

Die Berücksichtigung
inhaltlicher und räumlicher Unschärfe
bei der GIS-gestützten Erstellung
von Bodenkarten

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
der Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften
der Universität Bayreuth

vorgelegt von

Jens Hannemann

aus Eberswalde

Bayreuth, Februar 2009

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit vom 02.11.2005 bis 13.02.2009 am Lehrstuhl für Bodenkunde und Bodengeographie der Universität Bayreuth unter der Betreuung von Herrn

Prof. Dr. B. Huwe

angefertigt.

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften der Universität Bayreuth genehmigten Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

Amtierender Dekan: Prof. Dr. A. Müller

Tag der Einreichung: 13.02.2009

Tag des wissenschaftlichen Kolloquiums: 02.02.2010

Prüfungsausschuss:

Prof. Dr. B. Huwe 1. Gutachter

Prof. Dr. M. Sommer 2. Gutachter

PD Dr. W. Borken

Prof. Dr. M. Hauhs

Prof. Dr. E. Matzner Vorsitzender

Prof. Dr. L. Zöllner

Danksagung

Es ist mir ein Bedürfnis den Menschen Dank zu sagen, die maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Ganz besonders danke ich Herrn Prof. Dr. Bernd Huwe, der sich auf die Thematik und die Betreuung eines Externen eingelassen hat. Ich danke ihm, dass er mich so freundlich in die Arbeitsgruppe Bodenphysik integriert hat und stets Zeit, Interesse und Geduld fand, diese Arbeit zu begleiten. Die Diskussionen an der Universität Bayreuth habe ich immer als sehr angenehm und fördernd empfunden.

Als Mitarbeiter des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg bin ich diesem für die Möglichkeit der Datennutzung sehr dankbar. Ich danke Herrn Dr. Werner Stackebrandt, der stets am Fortgang der Arbeit interessiert war, und den Herren Dr. Dieter Kühn, Dr. Albrecht Bauriegel und Joris Hering für die Diskussionen und wertvollen Hinweise.

Bedanken möchte ich mich für die Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Markus Möller von der Geoflux GbR und Herrn Dr. Martin Volk vom UFZ Leipzig, die mir auch den Zugang zu der Software eCognition ermöglicht haben.

Für die konstruktiven und sehr interessanten Diskussionen danke ich Herrn Prof. Dr. Rolf Schmidt und Herrn Dr. Christoph Albrecht.

Den Herren Dr. Ulrich Thieke, Dr. Heinz Burger und Dr. Michael Fuchs danke ich für die Anmerkungen zum Manuskript. Herr Dr. Thieke stand mir auch immer sehr motivierend zur Seite.

Ich danke Frau Dr. Anja Kayser und Herrn Dr. Matthis Kayser für die kritische Durchsicht der Arbeit und ihre stete Diskussionsbereitschaft.

Den größten Dank sage ich meinen Eltern Joachim und Erika, die mir in jeder Phase meines Lebens mit ihrer Liebe, ihrer Fürsorglichkeit, ihrer Kraft und ihrem Verständnis zur Seite standen und mir stets Halt und Mut, auch für manche nicht so leicht zu meisternde Situation, gaben.

Ein genauso herzlicher Dank gilt meiner Frau Nadine, die immer motivierend zu mir stand, mehr mit unseren Söhnen Jonas und Jannes spielte, lachte und weinte als ich, ihnen erklärte, warum Papa so viel am Computer arbeitet und mich liebevoll und geduldig durch alle Höhen und Tiefen begleitet hat.

Ich danke sehr meinem Bruder André, der mir bei der Sanierung unseres Heims, solche Hilfe geleistet hat, ohne die ich kein Land gesehen hätte. Auch bedanke ich mich bei meinem Bruder Roland für seine tatkräftige Unterstützung.

*Meinen Söhnen
Jonas und Jannes*

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XI
Zusammenfassung	XIV
Summary	XV
1 Einleitung	1
1.1 Zielstellung	2
1.2 Forschungsstand und -bedarf	3
1.3 Lösungsvariante	6
2 Charakterisierung der Untersuchungsgebiete	8
2.1 Geologie, Boden und Topographie	8
2.2 Hydrologie und Klima	9
2.3 Nutzung	11
3 Theoretische Betrachtungen	12
3.1 Konventionelle und synthetisierte Kartenerstellung	12
3.1.1 Begriffsdefinitionen	13
3.2 Informationstheoretischer Hintergrund	23
3.2.1 Geographische Informationssysteme	23
3.2.1.1 Objekt- und Ebenenprinzip im GIS	23
3.2.1.2 Wissensformen	24
3.2.2 Grundlagen der Fuzzy-Logik	25
3.2.2.1 Fuzzyfizierung	26
3.2.2.2 Inferenz	30
3.2.2.3 Defuzzifizierung	35
3.2.3 Entscheidungstheoretische Betrachtungen	39
3.2.4 Evidenztheorie nach DEMPSTER & SHAFER	43
3.3 Regionalisierung von Bodenmerkmalen	44
3.3.1 Vergesellschaftungen und Sequenzen	44
3.3.2 Heterogenität und Maßstabsproblematik	47
3.3.3 Kern- und Übergangsbereiche	49

3.3.3.1	Allgemeine Betrachtungen	49
3.3.3.2	Übergänge und deren Typisierung	52
3.3.3.3	Ausweisung von Kernbereichen	61
4	Material und Methoden	66
4.1	Informationsgrundlagen	66
4.1.1	Datenformate	66
4.1.2	Datenkategorien	69
4.1.2.1	Flächendaten	69
4.1.2.2	Liniendaten	79
4.1.2.3	Punktdaten	80
4.1.3	Verschneidung, Verpunktung und Interpolation	83
4.1.4	Interferenz	89
4.1.5	Aggregierungsmethoden	91
4.2	Aussagesicherheit	92
4.2.1	Datenqualitäten	92
4.2.2	Index der Unschärfe / Schärfe	98
4.2.3	Bewertungs- und Darstellungsmethoden	98
4.3	Informationsvisualisierung	99
4.3.1	Polygenesegrad als Heterogenitätskriterium	99
4.3.2	Zielstern	100
4.3.3	Fuzzy-Hyper-Würfel	101
4.3.4	Visualisierung von Unschärfebereichen in Karten	101
4.4	Methodenbeschreibung	102
5	Ergebnisse	105
5.1	Informationsaufbereitung	105
5.1.1	Fuzzifizierung	105
5.1.1.1	Definition der Zielkategorien	105
5.1.1.2	Interpretation, Bewertung und Codierung der Informationen	110
5.1.1.3	Intrakategoriale Vereinigung	114
5.1.1.4	Verpunktung und Interpolation	117
5.1.1.5	Transformation und Wichtung	118
5.1.1.6	Extrakategoriale Vereinigung	121
5.2	Informationsverarbeitung	125
5.2.1	Inferenz	125
5.2.1.1	Inhaltliche Regelbasis	125
5.2.1.2	Räumliche Regelbasis	134
5.3	Informationsauswertung	136
5.3.1	Defuzzifizierung	136

5.3.1.1	Aggregierung	136
5.3.1.2	Ausweisung der Kern- und Übergangsbereiche	151
5.3.2	Validierung	153
5.3.2.1	Überprüfung des Ergebnisses mit Geländebefunden	153
5.3.2.2	Aussagesicherheit	157
6	Diskussion	159
7	Ausblick	162
	Literaturverzeichnis	165
A	Anhang	180
A.1	Tabellen	180
A.2	Quellen	186
A.3	Karten	188

Tabellenverzeichnis

3.1	Klassifikationsmöglichkeiten	15
3.2	Klassifikationsbeispiele nach morphogenetischen Kriterien	15
3.3	Merkmalsstruktur einer Bodenform	17
3.4	Wissensformen und deren Abbildung im GIS	25
3.5	Fuzzymengen, Verknüpfungen und Operationen	32
3.6	Modifikatoren und ihre rechenbare Umsetzung	33
3.7	Quantifizierung sprachlicher Modifikatoren	34
3.8	Streckung und Stauchung	35
3.9	Fuzzy-Methoden (Auswahl)	37
3.10	Präferenzbeeinflussungen	41
3.11	Nutzwertanalyse	42
3.12	Aggregierungsstufen	48
3.13	Matrix ausgewählter, potenzieller geologischer Übergangstypen	59
3.14	Steigungswinkel und -werte für Nachbarpixel	62
4.1	Vorteile und Nachteile von Vektor- und Rastermodell	66
4.2	Beispiele für die Übersetzung von Einheiten der Geologischen Spezialkarte	70
4.3	Alphanumerischer Codes des Klassenzeichens der Bodenschätzung	73
4.4	Beispiele für Agronomische Profile des Geologischen Messtischblattes	81
4.5	Datengrundlagen, -kategorien und deren empirische Wichtung	84
4.6	Effekte der additiven Überlagerung	90
4.7	Optimierungskriterien einer gebundenen Klassifikation	92
4.8	Arten imperfekter Daten	93
4.9	Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Unsicherheit und Datenqualität	93
4.10	Ableitungsgüte von Datenkategorien	94
4.11	Datenqualitäten und Aussagesicherheiten	96
4.12	Einfache Nutzwertermittlung bei der Kartenerstellung	97
5.1	Ordinalskalierte Reihe für Bindigkeiten von Bodenarten	107
5.2	Bodenformenrelevante Zielkategorien für das Untersuchungsgebiet	108
5.3	Schlüssel zur quantifizierten Abstufung von Merkmalskombinationen	111
5.4	Quantifizierung der Abstufung von Schichtobjekten	112
5.5	Zielkategorien Schlüssel für Flächendaten	112
5.6	Zusammengefasster Zielkategorien Schlüssel für Flächendaten	113
5.7	Matrix der Zugehörigkeitsgrade bodensystematischer Einheiten	113
5.8	Ebenenwichtungs- und Nachbarschaftsoperatoren	120
5.9	Anwendung der Operatoren auf die Grunddaten	121
5.10	Ergebnisspektren einer inhaltlichen Verschneidung	125
5.11	Regelprinzip zur Charakterisierung von Bodenformen	126
5.12	Rückübersetzung der Zugehörigkeitswerte (Bodenartengruppe)	130

5.13	Rückübersetzung der Zugehörigkeitswerte (Bodensystematische Einheiten) . . .	130
5.14	Flächenobjekt- bzw. Pixelbezogene Attributtabelle	132
5.15	Rangfolge der Zielkategorien	132
5.16	Regelmatrix zur Ableitung der Bodensystematischen Einheit	134
5.17	Intensitätswerte der Zielkategorien für das Segment	148
5.18	Klassenzugehörigkeitswerte eines Segmentes	151
A.1	Namenskonventionen Geometriedaten	180
A.2	Namenskonventionen Sachdaten	180
A.3	Auswahl der zu verschlüsselnden Bodenformen der FSK	181
A.4	Schlüssel Flächendaten Geologisches Messtischblatt	182
A.5	Hierarchieschlüssel der Substratgenese	183
A.6	Ausgangswichtung und Herkunft der Zielkategorie-Ebenen	184
A.7	Spezifikation des DGM 25	185

Abbildungsverzeichnis

2.1	Linienführung des Transektes	9
2.2	Gemorphologisch-landschaftsgenetische Gliederung des Landes Brandenburg	10
3.1	Struktur für die Datenvorhaltung und Erstellung von Bodenkarten	13
3.2	Differenzierung des Ausgangsgesteins und Komplexitätsgrad	14
3.3	Dimensionsstufen, deren Maßstabsbereiche und Beschreibung	20
3.4	Maßstabsabhängiges Kriterien-Ranking und Auflösung des Kernbereiches	21
3.5	Objekt- und Ebenenprinzip	24
3.6	Zugehörigkeitsgrade unscharfer Mengen	26
3.7	Funktionsgraph für die linguistische Variable 'moorig'	27
3.8	Formen von Fuzzy-Mengen	29
3.9	Soft-Splitting	30
3.10	Verknüpfungsarten unscharfer Mengen	31
3.11	Weitere Verknüpfungsarten unscharfer Mengen	32
3.12	Fließschema Fuzzy-Schritte	36
3.13	Teilmengen und Flächenschwerpunkt	37
3.14	Prinzip der Schwerpunktmethod	38
3.15	Methode der gleitenden Schwerpunkte	39
3.16	Bewertung, Präferenzordnung, Entscheidung	41
3.17	Entscheidungshilfe	43
3.18	Evidenztheorie nach DEMPSTER & SHAFER	44
3.19	Übergang von 'über' nach 'mit' und volumenbilanzierte Substratangaben	45
3.20	Bodencatena im Jungmoränengebiet nach SCHMIDT	46
3.21	Objektmodelle	51
3.22	Kernbereiche	52
3.23	Übergangsstärken und Knotenpunkte geologischer Einheiten	53
3.24	Knotenpunkt diskret abgegrenzter Flächen	53
3.25	Innerer und äußerer Kontrast eines Bodenareals	54
3.26	Übergangszonen als Ausdruck geometrischer Unsicherheit	55
3.27	Beispiele für Repräsentationen unscharfer Grenzen	55
3.28	Unschärfbereiche	56
3.29	Berechnung der Unschärfbereiche	57
3.30	Modellvorstellungen der räumlichen Variation von Böden	58
3.31	Übergangsmatrix von Flächeneinheiten der Bodenschätzung und Geologie	59
3.32	Varianten des Pufferns geographischer Objekte	60
3.33	α -Schnitt von Steigungswerten	62
3.34	Modelle von Flächenrepräsentationen	63
3.35	Idealschnitt	64
3.36	Veränderung von Kern- und Übergangsbereichen	64

3.37	Veränderung von Kern- und Übergangsbereichen	65
4.1	Rastermetriken	68
4.2	Polygonkonvertierungen	68
4.3	Halbkreis der Bodenentwicklung	72
4.4	Zuordnung von Bodensystematischen Einheiten zu Zustandsstufen	73
4.5	Digital aufbereitete Forstbodenformen	75
4.6	Oberflächenabfluss und Bodenabtrag	77
4.7	Räumliche Verteilung der Punktdaten	81
4.8	Erfassungsmaske des Programms FESCH	82
4.9	Flächenverschneidung	83
4.10	Varianten von Verpunktungen	86
4.11	Beispiele für Pedogenesen in ihren horizontalen Übergängen	88
4.12	Verpunktung und Inverse Distanz Wichtung	89
4.13	Effekte der additiven Überlagerung	90
4.14	Aggregierungsmethoden	91
4.15	Raumübertragungsprinzip bodenbeschreibender Kategorien	94
4.16	Pixelprofile von Flächen	96
4.17	Visualisierung von Pedogenesen im Zielstern	100
4.18	Beispiel eines Fuzzy-Würfels für die Darstellung von Pedogenesen	101
4.19	Liniendarstellungen zur Visualisierung der Unschärfebereiche in Karten	102
4.20	Fließschema der Verarbeitungsschritte	103
5.1	Additive Überlagerung und anschließende Interpolation	114
5.2	Aufmodulation einer kontinuierlichen Funktion auf eine diskrete Funktion	115
5.3	Ebenenvereinigung	116
5.4	Missing values	117
5.5	Interpolationsergebnis der Bindigkeit der Schichten Agronomischer Profile	118
5.6	Beispiele für transformierbare Funktionen	119
5.7	Eingangs- und Zielfunktionen	119
5.8	Anpassung von Zugehörigkeitsfunktionen	122
5.9	Datenrelief einer modifizierbaren Zugehörigkeitsfunktion	123
5.10	Regressionsbeziehungen	123
5.11	Legendeninvertierung spektraler Legenden	124
5.12	Ergebnis von Grid-Operationen	125
5.13	Synoptisches Formular zur Bestimmung der Zugehörigkeitswerte	126
5.14	Gewichtete Mittelwerte der Zugehörigkeitsgrade für Bodenschätzungsklassen	127
5.15	Ableitung von mittleren Zielkategorie-Zugehörigkeiten	128
5.16	Aufbereitung der Daten des Digitalen Feldschätzungsbuches (FESCH)	129
5.17	Fuzzifizierung und Defuzzifizierung von Pedogenesen und Tiefenstufen	131
5.18	Auswirkung der Regelinterferenz auf die Zielklassen	133

5.19 Grafische Darstellung einer Regelmatrix	134
5.20 Prinzip der tiefenbezogenen Aggregation	137
5.21 Schwerpunkttripel	138
5.22 Prinzip der zentralperspektivischen Aggregation	139
5.23 Gleitende Mittelwertbildung der zentralperspektivischen Aggregation	140
5.24 Überschneidung von Kern- und Übergangsbereichen	141
5.25 Unscharfe Clusterung	142
5.26 Analyse eines Bodenprofilfotos	144
5.27 RGB- Werteverteilung für Horizonte, Horizontbereiche oder Segmente	145
5.28 Fuzzy-Profile	145
5.29 Ergebnis der additiven Vereinigung der Zielkategorie-Ebenen	146
5.30 Parametereinstellungen für eine Segmentierung	147
5.31 Ausschnitt des segmentierten Ebenenstapels und Ergebniswichtungswert	147
5.32 Beispiele für Zielklassen und deren Zugehörigkeitsfunktionen	148
5.33 Klassifiziertes synthetisches Bild	149
5.34 Triangulär fuzzifizierte Präferenzordnung einer Legende	150
5.35 Ausgewählte Kern- und Übergangsbereiche des Blattes KW	152
5.36 Validierung der Zielklassen zu den Geländebodenformen	155
5.37 Validierung der Punktbodenformen mit den Segmentklassen	156
5.38 Karten der Aussagesicherheiten	157
5.39 Beispiel für die Aggregation des synthetischen Bildes der Aussagesicherheit	158

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung Bedeutung

allgemein

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
bzw.	beziehungsweise
DDR	Deutsche Demokratische Republik
d. h.	das heisst
engl.	englisch
etc.	et cetera (<i>lat.</i>), und so weiter
EU	Europäische Union
ggf.	gegebenenfalls
Hrsg.	Herausgeber
i. d. R.	in der Regel
i. M.	im Maßstab von
i. S. v.	im Sinne von
i. w. S.	im weiteren Sinne
lat.	lateinisch
resp.	respektive
S.	Seite
sog.	so genannt
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
u. U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
vs.	versus (<i>lat.</i>), gegen
z. B.	zum Beispiel
zit.	zitiert
z. T.	zum Teil

fachspezifisch

ALK	automatisierte Liegenschaftskarte
ALS	Amtlicher Landwirtschaftlicher Sachverständiger
AS	Ausgabe für den Staat (bei topografischen Karten der DDR)
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BFI	Bodenfeuchteindex

BIND	Bindigkeit
BK	Bodenkarte
BS	Bodenschätzung
BSK	Bodenschätzungskarte
BSE	Bodensystematische Einheit
BÜK	Bodenübersichtskarte
BZE	Bodenzustandserhebung (Forst)
CART	Classification and Regression Trees
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DHM	Digitales Höhenmodell
DIBOS	Digitalisierte Bodenschätzung
ETRS	European Terrestrial Reference System
FALKE	Forcierte- ALK- Einrichtung
FESCH	Digitales Feldschätzungsbuch der Bodenschätzung
FSK	Forstliche Standortkartierung
FMF	Fuzzy-Membership-Function, Zugehörigkeitsfunktion
GIS	Geographisches Informationssystem
GK	Geologische Karte
GM	Geologisches Messtischblatt
GOF	Geländeoberfläche
GUI	Graphical User Interface (Bedienungsoberfläche einer Software)
GÜK	Geologische Übersichtskarte
H _{GES}	Humosität (gesamt, allgemein)
HuTL	Höhe über Tiefenlinie
HSK	Horizont-Substrat-Kombination
HYK	Hydrogeologische Karte
IDW	Inverse Distanz Wichtung
KA4/5	Bodenkundliche Kartieranleitung (4. bzw. 5. Auflage)
KW	Königs Wusterhausen (Blatt bezeichnende Ortsangabe)
LABO	Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LBGR	Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg
LfUG	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
LGB	Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg
LXF	Schlüssel Flächendaten
LXH	Schlüssel Hierarchie
MrVBF	Multiresolution Valley-Bottom Flatness Index
MMK	Mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung
NIBIS	Niedersächsisches Bodeninformationssystem

PTF	Pedotransferfunktion
SAGA	System zur Automatisierten Geowissenschaftlichen Analyse
SEA	Forstliche Standortserkundungsanleitung
Sp	Schwerpunkt
SQL	Structured Query Language
SSE	Substratsystematische Einheit
TCI_{low}	Terrain Classification Index for Lowlands
TGL	Technische Güte- und Lieferbedingungen (Norm-Standard der DDR)
TIN	Triangulated Irregular Network
TK	Topografische Karte
TMC	Two-dimensional MARKOV-Chain
WRB	World Reference Base
ZC	Zielklasse
ZG	Zugehörigkeitsgrad
ZF	Zielfunktion
ZK	Zielkategorie

Symbolverzeichnis

Symbol Bedeutung

Mengenlehre

\in	Element von ...
\notin	nicht Element von ...
\subseteq	Teilmenge von ...
\subset	echte Teilmenge von ...
\cup	Vereinigung von Mengen
\cap	Durchschnitt von Mengen
\setminus	Differenzmenge
$C_E A$	Komplementmenge von A in Bezug auf E

Logik

\neg	Negation ('nicht')
\wedge	Konjunktion ('und')
\vee	Alternative ('oder')
\rightarrow	Implikation ('wenn ..., dann ...')
\leftrightarrow	Äquivalenz ('genau dann, wenn ...')

n	Anzahl von Elementen
μ	Zugehörigkeitsgrad
μ_{THV}	Schwellenwert (threshold value)
\succ	gefolgt von
<i>allgemein</i>	
◦	begraben (bei fossilen Horizonten)

„Jede natürliche Grenze ist in Wirklichkeit eine Übergangszone, die auch wieder ihre eigenen zwei Grenzen hat. Diese Grenzen wiederum sind auch Übergangszonen mit eigenen Grenzen und so weiter. Die Lokalisierung einer natürlichen Grenze ist schon vom Prinzip her nicht exakt und daher von Konventionen bestimmt.“

(ARMAND, 1992)

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beinhaltet die Entwicklung einer Methode zur objektivierten Erzeugung von Flächendaten für Bodenkarten. Ziel ist es, Daten, die sich in Maßstab, Datum, Art, Herkunft und Güte unterscheiden, zu bewerten, zu verknüpfen und unter Berücksichtigung ihres Raumbezuges zu einem Zielthema zusammenzuführen.

Es werden zunächst der informationstheoretische Hintergrund, sowie bestehende Regionalisierungsverfahren und -ansätze betrachtet. Eine wichtige Rolle spielt die Auseinandersetzung mit dem Sequenz- und Vergesellschaftungsprinzip, sowie der Maßstabsproblematik. Es wird ausführlich auf die vorhandenen Informationsgrundlagen eingegangen. Ausgangspunkt ist es sämtliche zur Verfügung stehenden Datenbestände in die Analyse zu integrieren. Die Beschreibung und das Aufzeigen von Analyse- und Bewertungsmöglichkeiten dieser sehr heterogenen Daten nimmt dabei einen zentralen Platz ein. Eine wichtige Rolle spielt stets die Interaktion von Computer und Experten. Die Methode durchläuft die Kette Aufbereitung, Verarbeitung, Auswertung und Visualisierung bodenkundlicher Informationen.

Als Bausteine werden bekannte, aber auch neu entwickelte Methoden verwendet, diskutiert und kombiniert. Die Entwicklung der Gesamtmethode bzw. des methodischen Ablaufs an sich steht dabei im Vordergrund. Hauptziel ist die Ausweisung von Kern- und Übergangsbereichen. Es wird besonderer Wert darauf gelegt, die intrinsischen Unterschiede in den Daten herauszuarbeiten und während des gesamten Methodenablaufs mitzuführen. Dazu wird konsequent das Abstufungsprinzip für die inhaltliche und räumliche Komponente gleichermaßen angewendet.

Der Umgang mit der inhaltlichen und räumlichen Unschärfe bildet den Schwerpunkt der Arbeit. Es werden Zielkategorien definiert, die die Bewertungsgrundlage für die räumlich auszuweisenden Bodenformen darstellen.

Der gesamte Methodenablauf ist eingebettet in die fuzzy-logischen Arbeitsschritte Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung. Es wird ein Ansatz vorgestellt, der die Verarbeitung unscharfer bodenkundlicher Informationen zu optimieren versucht. Durch eine gewichtete, inhaltlich-räumliche In-Beziehung-Setzung von Daten, durch eine Analyse von qualitativen und quantitativen Daten und die Einbeziehung sprachlicher Modifikatoren wird eine Konzeptkarte mit objektivierter Arealabgrenzung erarbeitet, die auf einer reproduzierbaren Datenverarbeitung und einer quantifizierten Aussagesicherheit fußt. Datenbank, GIS und Bildverarbeitung bilden dabei softwareseitig die Hauptkomponenten.

Zur Ergebnis führenden Ausweisung der Kern- und Übergangsbereiche wurde die Bildverarbeitungsmethode der *Segmentierung* gewählt. Diese wurde mit der Software *eCognition* vorgenommen. Inhalt und Abgrenzung der Segmente wurden mit den Punktdaten eines Transektes von der Hochfläche über die Niederung zur Hochfläche überprüft.

Im Zusammenhang mit der Darstellung der Aussagesicherheit in Karten wird das Prinzip der

Raumübertragung und Übertragungsgütemaße aufgegriffen und diskutiert. Es wird ein *Zwei-Karten-Konzept* angeregt, das neben der Karte mit der eigentlichen Fachinformation stets eine Karte der Aussagesicherheit vorsieht.

Es wird auf Aspekte der Visualisierung der inhaltlichen und/oder räumlichen Komponente eingegangen. Ziel ist dabei die synoptische Darstellung von Informationsergebnissen für den Nutzer.

Summary

The available work contains the development of a method for the objectified production of areal data for soil maps. A goal is it, data that are different in scale, calendar date, kind, derivation and quality, to assess, to link and to unit with consideration of its space reference into a target matter.

First the information-theoretical background, as well as existing regionalization procedures and approaches are regarded. An important role plays the argument with the sequence and association principle and the scale problem. It deals with the existing information bases in detail. Starting point is the integration of all available data volumes into the analysis. The description and pointing out of analysis and evaluation possibilities of these very heterogeneous data takes thereby a central place. An important role always plays the interaction of computer and expert. The method goes through the chain preparation, processing, evaluation and visualization of soil information.

As components are used, discussed and combined common, in addition, newly developed methods. The development of the total method rather the methodical operational expiration is actually the central point of attention thereby. Principal purpose is the delineation of core and transition areas. Special value is put on it to work out the intrinsic fuzziness in the data and carry during the entire expiration of method. It is consistently applied the gradation principle for the contentwise and spatial component equally. Handling with the contentwise and spatial fuzziness forms the emphasis of the work. Target categories are defined, which represent the basis of evaluation for the soils which can be proven spatially.

The entire expiration of the method is embedded into the fuzzy logical work procedures fuzzification, inference and defuzzification. A approach is presenting, which tries to optimize the processing of indistinct soil information. By a weighted, contentwise-spatial in-relationship-setting of data, through an analysis of qualitative and quantitative data and the inclusion of linguistic modifiers a concept map with objective area delineation is compiled, which is based on a reproducible data processing and a quantified stating security. Data base, GIS and image processing form thereby the main components in terms of software. For the delineation of core and transition areas the image processing method of segmentation was selected. This was made with the software *eCognition*. Contents and demarcation of the segments with the point data of a transect from highland across lowland to highland were examined. In connection

Summary

with the representation of stating security in maps, the principle of the space transmission and the transmission of the quality is picking up and discussing. It is proposing a *two-map concept*, which always plans a map of stating security beside the map with the actual specialized information. Finally is going into the aspects of the visualization of the contentwise and/or spatial component. A goal is the synoptic representation of information results for the user.

1 Einleitung

Die Pedosphäre kann als komplexes System aufgefasst werden, dessen klare Beschreibung durch immanente Unsicherheiten und Unschärfen beeinträchtigt ist. Die Unsicherheiten stellen meist einen Mangel an Information dar. Unschärfen ergeben sich dadurch, dass ein Sachverhalt nicht eindeutig bestimmbar ist oder dessen Zuordnung zu einer Zielinterpretation erschwert ist. Die Analyse dieses Systems durch Auflösung in seine Einzelbestandteile vereinfacht hierbei das Verständnis und führt zu einer Annäherung an die Beschreibung des realen Wirkungsgefüges. Entscheidend ist dabei die Art der Verknüpfungen der Einzelbestandteile da sie die Eigenschaften und den Gesamtcharakter des Systems bestimmen. Das Problem liegt jedoch in der sog. Emergenz, d. h.: „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ (RICHTER & ROST, 2002).

Die verschiedenen Formen des Wissens über ein System widerspiegeln dabei dessen Erklärbarkeit. Der Prozess der Erstellung einer Bodenkarte, also die Verarbeitung bodenkundlich relevanter Daten und deren Ergebnisdarstellung in Karten besitzt themenübergreifenden und damit interdisziplinären Charakter, d. h. die zu analysierenden Informationen sind sehr vielgestaltig und mehr oder weniger gut für die Zielinterpretation 'Bodenkarte' geeignet.

In der vorliegenden Arbeit wird vorzugsweise der Begriff Bodenkonzeptkarte gegenüber dem der Bodenkarte verwendet. Die Bodenkonzeptkarte hat vorläufigen Charakter und ist im Gegensatz zur Bodenkarte i.d.R. nicht justiziabel. Sie dient als Grundlage für die Planung von Geländeeinsätzen und Beprobungen. Als Bodenkarte i.e.S. wird die amtlich geprüfte und gedruckte Version betrachtet (vgl. KA5 (2004), S. 27-29).

Die Konturen und Inhalte von Kartiereinheiten in einer Konzeptkarte sind das Ergebnis der Selektion, Kombination, Interpretation, Zusammenfassung und Verallgemeinerung dieser verschiedensten thematischen Informationen (Relief, Geologie, Bodenschätzung, ältere Bodenkarten, Fernerkundungsdaten, Geomorphologie, Hydrologie, Klima etc.). Die Unschärfen ergeben sich zum einen durch unterschiedliche Datenqualitäten der Informationsgrundlagen, durch unzureichende Erkundungsdichten und durch Widersprüche bei der Informationskombination.

Ziel der im Folgenden vorgestellten Methode ist es, den Prozess der Konzeptkartenerstellung so zu objektivieren, dass der kartierende Bodenkundler in seiner Entscheidungsfindung bei der Flächenabgrenzung und -charakterisierung optimal unterstützt wird. Die Methode wurde für die Erstellung der Bodenkarte des Blatts Königs Wusterhausen (i. M. 1 : 50 000) entwickelt. Ein Schwerpunkt bildet dabei die Entwicklung von Regeln für die Ableitung von bodenkundlichen Inhalten aus thematisch unterschiedlichen Punkt- und Flächendaten. Diese dienen der Flächenabgrenzung und Inhaltszuweisung. Die Motivation für die Methodenentwicklung liefert der Umstand der Übergänge in geologischen Einheiten und der Bodendecke. So 'zerfasert' z. B. oft ein kompakter Moränenkörper in seinem Randbereich. Aus Fahlerden aus Geschiebemergel werden Fließerdien und Bänderfahlerden, die nur noch durch lehmige Bänder

1 Einleitung

eines entkalkten Geschiebemergels oder sogar nur wenige, dünne Bändchen gekennzeichnet sind. Es existieren die verschiedensten sequentiellen Übergänge. Die Kette Moor- Anmoor- Moorgley- Anmmorgley- Humusgley- Gley beschreibt den Übergang vom organischen und in einen mineralischen Boden, der über den Humusgehalt bzw. die Mächtigkeit der humosen Schicht definiert wird. Auch die Grenzen und Inhalte der Klassenflächen der Bodenschätzung müssen als 'unscharf' betrachtet werden. Obwohl „die Abgrenzung von Klassenflächen usw. sich grundsätzlich möglichst eng an die Natur, also an die durch Gelände und Bodenbeschaffenheit bedingten Unterschiede anschließen soll, ... dürfen die vorhandenen Eigentumsgrenzen nicht völlig außer Acht gelassen werden“ (RÖSCH & KURT, 1941).

Der Ansatz stützt sich also dabei nicht auf eine scharfe Abgrenzung und Inhaltsbeschreibung von Kartiereinheiten (Einzelflächen). Es wird in der Kartenerstellung und auch -darstellung berücksichtigt, dass diese Einheiten mehr oder weniger kontinuierlich ineinander übergehen. Das betrifft sowohl den bisher durch eine Linie gekennzeichneten Grenzsaum als auch die inhaltliche Unschärfe, d. h. das Merkmalspektrum von Flächeneinheiten (Kartier- und Legendeneinheiten). Die Kartiereinheiten werden von Leitböden als inhaltliche Kerne bestimmt. Diese weisen in vielen Fällen im Randbereich Merkmale mit zunehmend neuen Qualitäten auf. Das Merkmalspektrum wird aus mehreren Informationsebenen und Quellen (Themen von Karten und Punktinformationen meist verschiedener Nomenklatur) abgeleitet. Die Inhalte verschiedener Themen werden dabei vorwiegend qualitativ interpretiert bzw. bewertet. Des Weiteren besitzen diese Interpretationen unterschiedliche Aussagegüte, deren Darstellung in Karten der Aussagesicherheit zukünftig ihren Niederschlag finden muss.

Die Frage des Zusammenhangs von inhaltlicher und räumlicher Unschärfe wird mit einem in dieser Methode verfolgten Fuzzy-Ansatz behandelt. WOLF & PEYKE (1999) formulieren das Phänomen der Unschärfe in den geographischen Wissenschaften wie folgt: „Viele Objekte und Systeme in Natur und Gesellschaft weisen solche Unschärfeeigenschaften auf und widersetzen sich auf Grund ihrer Komplexität dem Bemühen, sie wissenschaftlich präzise in ihrer Struktur, Funktion und ihrem Verhalten zu erfassen. Man kann sagen, wenn die Komplexität eines Systems ansteigt, verlieren präzise Aussagen ihren Sinn und sinnvolle Aussagen ihre Präzision. ... Anstelle des 'exakten' mathematischen Methodenapparats gewinnt notwendigerweise die Subjektivität in Form des Expertenwissens bei der Problemlösung eine Schlüsselstellung. Der gesunde Menschenverstand wird aufgewertet. Inhaltsberücksichtigendes Wissen wird formalisierbar und kann auf die Sprachebene des Computers abgebildet werden.“

1.1 Zielstellung

Die Verarbeitung der großen Mengen von Informationen für die Erstellung von Konzeptbodenkarten impliziert eine Reihe weiterer Schwierigkeiten, wie z. B. den Umgang mit sehr heterogenen Datenbeständen in unterschiedlichen Maßstäben, Datenqualitäten, Nomenklaturen, räumlichen Verfügbarkeiten, sowie das Vorhandensein von kontinuierlichen und diskreten Da-

ten. Die Berücksichtigung dieser Probleme liefert mit dem vorliegenden methodischen Ansatz die Grundlage für die programmtechnische Algorithmierung und Reproduzierbarkeit des Prozesses der Konzeptkartenerstellung. Als Ergebnis wird ein Expertensystem 'Konzeptkartenerstellung' angestrebt, in dem einzelne Daten, Datengruppen oder ganze Datenebenen durch Bestimmung von Zugehörigkeitsgraden (Abschnitt 3.2.2.1.1) gewichtet in eine Gesamtanalyse eingehen. So ist eine Optimierung der Entscheidungsfindung hinsichtlich räumlicher und inhaltlicher Beschreibung eines Bodenareals möglich. Es werden Fuzzy-Methoden angewendet werden, die als prädestiniert für eine Quantifizierung von häufig nur qualitativ vorliegenden Bodeninformationen angesehen werden können. Des Weiteren eignen sich diese Methoden zur Beschreibung von kontinuierlichen Eigenschaften und erlauben graduelle Differenzierungen. Die 'Starre' der bisher für die Bodencharakterisierung verwendeten 'Kartiereinheiten' wird durch die Anwendung des Prinzips der kleinsten Raumeinheiten aufgelöst. Es wird auf eine möglichst 'weiche' Datenhaltung Wert gelegt, um Brüche und Sprünge bezogen auf den Inhalt-Raum-Kontext zu vermeiden. Eine Klassifizierung wird als stets letzter Schritt der Datenverarbeitung betrachtet. Ein weiteres Ziel der Methode besteht in der Ausweisung von Kern- und Übergangsbereichen von Böden, sowie der Definition von Übergangstypen. Die Erhöhung der Aussagesicherheit von Konzeptkarten erfolgt durch Darstellung von Datenqualitäten, wobei hier die Güte (inhaltliche Qualität) und Dichte (räumliche Qualität) berücksichtigt werden. Die Analyse der dritten, vertikalen Dimension minimiert die Unschärfe gegenüber konventionell erstellten 2D-Karten, die bisher lediglich die Tiefenstufen der Schichten von Bodenformen innerhalb einer Kartier- oder Legendeneinheit abbilden. Die Merkmale werden nicht nur bezüglich ihrer horizontalen, sondern auch ihrer tiefenbezogen differenzierten Eigenschaften betrachtet. Insgesamt soll die Methode so qualifiziert werden, dass nicht nur rein bodenkundliche Fragestellungen abgedeckt, sondern auch Ansprüche der Kartenerstellung allgemein befriedigt werden können. Dazu ist ein Programm- bzw. Expertensystem anzustreben, das die Funktionalitäten von Datenbank, GIS und Bildverarbeitung vereinigt.

1.2 Forschungsstand und -bedarf

In den letzten Jahren hat ein Trend eingesetzt, der zunehmend die konventionelle Bodenkartierung mit erheblichem Geländeaufwand durch eine digitale Bodenkartengenerierung mit reduziertem Geländeaufwand ablöst. In Zeiten knapper Mittel wird die personal- und damit kostenintensive Geländekartierung mehr und mehr zurückgedrängt. Dabei besteht die Gefahr, dass sich der Mensch immer stärker vom zu beschreibenden Objekt entkoppelt. Sachverstand und eine stetig steigende Geländeerfahrung ist eine Funktion der Anzahl der Beobachtungen vor Ort und der Zeit. Sie ist für die Verbesserung von Modellen unabdingbar. Die Erfahrungen und Denkweisen bodenkundlich arbeitender Experten, besonders der älteren Generation prägen auch heute noch die Bodenwissenschaften, einschließlich ihrer darauf aufbauenden mathematischen Modelle. Existieren irgendwann nur noch Gelände unerfahrene Wissenschaftler,

1 Einleitung

dürfte allein mit Computerhilfe keine 'vernünftige' Bodenkarte erzeugt werden können. Derzeitig kommen verstärkt die sog. nicht invasiven Geländemethoden zum Einsatz, die denen der Geophysik entlehnt sind. Hier sind besonders die Leitfähigkeitsmessungen als Verfahren der elektromagnetische Induktion zu nennen. LÜCK *et al.* (2000) führt damit Untersuchungen auf verschiedenen Testarealen des Landes Brandenburg durch. WELLER *et al.* (2007) nutzen diese Methode bereits erfolgreich für die Kartierung des Tongehaltes in Böden. Angewendet wird auch zunehmend das Bodenradar, das die Ausbreitungscharakteristik elektromagnetischer Wellen vorrangig dazu nutzt, die vertikale Bodenstruktur abzubilden.

Ein sehr junger Forschungszweig ist die Bodenspektroskopie. Mit dieser Methode wird die Absorption, Emission oder Streuung der elektromagnetischen Strahlung gemessen. Nach GRUNWALD & LAMSAL (2006) werden für Böden vorwiegend die Spektralbereiche des sichtbaren Lichts (350 bis 700 nm), des nahen Infrarots (700 bis 2500 nm) und des mittleren Infrarots (2500 bis 25 000 nm) verwendet. Dabei werden die spektralen Reflexionssignaturen verschiedener Bodenmaterialien in Bibliotheken katalogisiert.

Mit den genannten Verfahren wird die Lücke geschlossen, die durch die punktuelle Probenahme gegeben ist. Es wird eine exaktere räumliche Interpretation der punktuell durch die Analysenwerte der Proben gewonnenen Informationen ermöglicht. Forschungsbedarf besteht hierbei in der Untersuchung der Verknüpfbarkeit von invasiven und nicht-invasiven Methoden. Die Schwierigkeit existiert derzeit noch darin, die Wirkungen (Leitfähigkeitswerte, Reflexionsmuster etc.) als Summenparameter in einzelne Ursachen (Materialeigenschaften des Bodens) aufzulösen. Bei diesen Verfahren treten neue, emergente Eigenschaften auf. Hinzu kommt die sog. Konvergenzproblematik nach der unterschiedliche Eigenschaften zu gleichen Ergebnissen führen.

Eine von SOMMER *et al.* (2003) entwickelte Methode basiert auf einem hierarchischem Expertensystem. Dabei werden hauptsächlich nicht-invasive, Boden gebundene und Fernerkundungsverfahren verwendet. So sind mit Fernerkundungsverfahren Bodeneigenschaften bestimmbar, die für das Pflanzenwachstum wichtig, mit anderen nicht-invasiven Methoden jedoch nicht ableitbar sind. Das Ursache-Wirkungsproblem wird hier im Hinblick auf die Konvergenzproblematik besonders deutlich.

Das Ziel ist insgesamt darin zu sehen, den Anteil der invasiven Methoden zu reduzieren und mit Hilfe der nicht-invasiven Methoden sowohl eine Material- als auch Raumanalyse zu realisieren. Weiterhin sollte es Untersuchungsgegenstand sein, Korrelationen zwischen den nicht-invasiven, Boden gebundenen Methoden und Fernerkundungsverfahren zu finden. Beispielsweise ist die Frage zu klären in wie weit sich die spektrale Charakteristik der Böden mit zunehmender Aufnahmehöhe ändert und von der atmosphärischen Extinktion beeinflusst wird. Großer Forschungsbedarf besteht auch in der Klärung der skalenabhängigen Wirksamkeit statischer und dynamischer Modelle. Es ist zu untersuchen welche Eingangsparameter ein zu definierendes Zielthema maßstabsabhängig optimal abbilden. Ansätze hierzu liefern u. a. BOGENA *et al.* (2003) und verweisen besonders auf die Problematik der unterschiedlichen Land-

nutzung. Des Weiteren muss geklärt werden in welchen Zeitfenstern sich welche Parameter wie ändern, d. h. das 'Durchspielen' unterschiedlicher Szenarien muss gerade im Hinblick auf einen möglichen Klimawandel, einschließlich einer zunehmenden Bodendegradation, forciert werden. Bodenprozessmodelle, wie z. B. CANDY liefern hierbei bereits einen wichtigen Beitrag. Die Anwendbarkeit auf kleinere Maßstabsbereiche ist jedoch eingeschränkt. Einen Ansatz zur Lösung dieses Problems liefert DREYHAUPT (2002), der über die Entwicklung eines sog. Profilgenerators und der Ableitung linearer Regressionsfunktionen bestimmter Indikatoren Metamodelle auf größere Areale anwendet. Metamodelle betrachtet man dabei als 'abgerüstete' komplexe Modelle, die mit wenigen Eingangsdaten die Berechnung von Systemparametern ermöglichen (vgl. HUWE (1992)).

Die Übertragbarkeit von Modellansätzen (z. B. STOFFBILANZ) auf unterschiedliche Landschaftstypen untersucht auch HALBFASS (2005) und kommt u. a. zu dem Ergebnis, dass im Hinblick auf die mittelmaßstäbige stoffhaushaltliche Modellierung die fundamentale Aufgabe darin besteht, chorisch relevante Kapazitätsregler für den Landschaftsstoffhaushalt zu identifizieren, sowie deren raum-zeitliche Verknüpfung und Dependenz zu Strukturvariablen bzw. Prozesszustandsgrößen zu erfassen. Die Anwendungsmöglichkeiten der Fuzzy-Logik in extrem großen Maßstabsbereich zeigen u. a. SCHULZ & HUWE (1999) und SCHULZ *et al.* (1999) bei der Simulation des Wassertransports und Berechnungen des chemischen Gleichgewichtes. Zunehmend wird Fuzzy-Logik auch bei der Risikoabschätzung von Naturereignissen eingesetzt (vgl. u. a. HEMETSBERGER *et al.* (2002)).

Für die Beschreibung der Bodenentwicklung hält ALBRECHT (2005) die Anwendung von MARKOV-Ketten Erfolg versprechend. FLECKENSTEIN (2004) nutzt diese für eine Modellierung der geologischen Heterogenität und hydrofaziellen Charakterisierung von Flusssystemen. MARKOV-Ketten erlauben über eine Analyse der Vorgeschichte eines Systems die Prognose der künftigen Entwicklung bei Betrachtung der Komponenten Zustandsraum, Anfangsverteilung und Übergangsmatrix. LI *et al.* (2004) simulieren mit Hilfe von zweidimensionalen MARKOV-Ketten (TMC) die Bodenverbreitung. Dafür wird eine Karte der Übergangswahrscheinlichkeiten (TPM) und Transektdaten verwendet.

Durch die Vorgaben der EU und die steigenden Ansprüche des Bodenschutzes wird zunehmend eine optimierte Betriebsführung gerade auch im Precision-Farming-Bereich notwendig. Eine mögliche Struktur eines Management-Informationssystems für diese Bewirtschaftungsart hat LINEISEN (2002) offen gelegt und schlägt vor künftig „zu untersuchen, ob eine Datenauflösung von ertragsrelevanten Informationen im m^2 -Bereich, oder sogar darunter, ökonomische und ökologische Vorteile bewirken kann.“ Eine optimierte Betriebsführung ist wegen neuer gesetzlicher Anforderungen auch in der Tierproduktion erforderlich geworden. So nutzt KÖHLER (2003) Fuzzy-Logik für die Sicherstellung von Tiergesundheit und Milchqualität. FRANK (2002) greift ein Beispiel zur Tierhaltung von HEITHECKER (1993) auf bei dem die Fuzzy-Logik sogar auf die richterliche Entscheidungspraxis angewendet wird.

Bei der Verarbeitung von Informationen kommen verstärkt neuronale Netze zum Einsatz, die

1 Einleitung

menschliche Denkweisen und Lernregeln simulieren (BEHRENS *et al.* , 2005; HEIDER, 1997). Neuronale Netze verarbeiten bestimmte Inputs und liefern daraufhin bestimmte Outputs. „ ... es stabilisiert zunehmend seinen Output, selbst wenn der Input leicht variiert. ... Das große Problem der Fuzzy-Logiker ist es, multivalente WENN-DANN-Regeln aufzustellen, die bei unscharfem Input einen gewünschten, möglichst scharfen Output liefern können.“ (SCHWAMM, 1994). Dieser scharfe Output kann in den nächsten Jahren sicherlich nicht ohne die Verfahren der Entscheidungstheorie erreicht werden (vgl. TORRA & NARUKAWA (2007)). Schließlich ist man bei einer zweiwertigen Betrachtung, die nur ein 'für' oder ein 'wider', ein 'ja' oder 'nein' für einen ganzheitlich zu bewertenden Sachverhalt zulässt. Dafür ist es notwendig, dass in den Geowissenschaften allgemein und der Bodenkunde speziell, die sich etablierenden Verfahren in entscheidungsunterstützende und expertenbasierte Modelle integriert werden, um eine optimale Anpassung der 'Gesellschaftsfunktionen' an die sich verändernden Umweltbedingungen zu erzielen. Möglichkeiten der Kopplung und Integration dieser Systeme zeigt u. a. NAUCK *et al.* (1996). Dementsprechend besteht weiter Forschungsbedarf in der Anwendung der Methoden des sog. *Softcomputings* in der Bodenkunde, wie sie u. a. von ALIEV *et al.* (2000) beschrieben werden. Ziel ist dabei die Steigerung der Intelligenz eines Expertensystems durch die Kombination und Interaktion intelligenter Methoden.

1.3 Lösungsvariante

Die vorliegende Arbeit versucht einen Weg aufzuzeigen bodenkundliche Informationen auf weitgehend pragmatische Art und Weise aufzuarbeiten und auszuwerten. Die Algorithmen sind im Wesentlichen einfach strukturiert und folgen WENN-DANN-Regeln. Es werden nur untergeordnet statistische Verfahren verwendet. Das Ziel ist eine vorwiegend empirische Bewertung der Informationen und deren Komposition im pedogenetisch-landschaftlichen Kontext. Die Lösung mündet in einem interaktiven System, das Unschärfen in der Karte quantifiziert und visualisiert. Dieser weitgehend unscharfe Output lässt somit einen Interpretationsspielraum zu. Außer der Programmierung einer Regeldatenbank für die Generierung der inhaltlichen Komponente der Bodenareale wurden für die räumliche Komponente vorwiegend bestehende Programmsysteme genutzt. Hervorzuheben sind hier besonders die Softwarepakete eCognition[®]3.0¹ und SAGA² (System für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen), deren Verwendung in dieser Arbeit einen bedeutenden Anteil einnahm. Zur Problemlösung wird von folgenden, den natürlichen Charakter der Bodendecke betreffenden, Annahmen ausgegangen:

¹Im Folgenden als *eCognition* bezeichnet; <http://www.definiens-imaging.com/ecognition>

²<http://www.saga-gis.org/en/index.html>

- Der Charakter der Bodendecke wird durch Kern- und Übergangszonen bestimmt.
- Kernzonen besitzen einen engen Merkmalsbereich. Die Merkmale weisen eine gleichbleibende Raumtendenz auf.
- Übergangszonen haben einen breiten Merkmalsbereich. Die Merkmale weisen eine steigende oder fallende Raumtendenz auf.
- Größe, Konturierung und Inhalt der Kern und Übergangszonen ist maßstabsabhängig. Transformationen in andere Maßstabsbereiche spiegeln sich auch in den Aussagesicherheiten wider.
- Aussagesicherheiten lassen sich durch Wichtungen der Ausgangsdaten ableiten.
- Kernzonen sind Areale mit einem räumlichen (flächenmäßigen und tiefenbezogenem) und inhaltlichem Schwerpunkt. Diese fallen räumlich nicht zusammen (Inhalt-Raum-Inkongruenz).
- Es herrscht eine Diskrepanz zwischen ortsscharfer Bodenbeprobung und dessen flächenhafter, maßstäblicher In-Beziehung-Setzung.
- Die Heterogenität der Bodendecke ist maßstabsabhängig an unterschiedliche Kriterien geknüpft (maßstabsabhängiges 'Kriterien-Ranking'), d. h. in mittleren Maßstabsbereichen erfolgt ein Umschlag der Erfassungs- und Beschreibungsmöglichkeiten des Systems.
- Areale in der topischen Dimension werden eher quantitativ-stoffhaushaltlich erfasst, während in der chorischen Dimension die gegenseitigen Lagebeziehungen von topischen Einheiten (das Gefügemuster) in den Vordergrund treten (vgl. [BURGER \(1992\)](#)).
- Die abgeleiteten Ebenen der Karte, sowie die Karte selbst, werden als Datenoberfläche aufgefasst, so dass Reliefauswertungsverfahren angewendet und die Grundlagen für Fließwegmodellierungen gelegt werden können.

2 Charakterisierung der Untersuchungsgebiete

2.1 Geologie, Boden und Topographie

Das Hauptuntersuchungsgebiet umfasst das Blatt Königs Wusterhausen (L3746) und liegt südlich von Berlin. Die höchsten Erhebungen befinden sich im Bereich der Wünsdorfer Platte im Süden des Blattes mit über 90 m, der tiefste Punkt liegt mit 32,2 m zwischen Niederlehme und Wildau.

Das Gebiet ist durch eine Gliederung in mehr oder weniger große Platten aus Geschiebemergel oder/und glazifluviatilen Sanden und Niederungsbereichen aus Tal- und Flusssanden, sowie Torfen gekennzeichnet. JUSCHUS (2000) benennt die Schmelzwasserabflussbahnen in Anlehnung an die Arbeiten von LEMBKE (1936) und MARCINEK (1968) nach Ortschaften, die an oder in den Abflusswegen liegen. Die im Norden befindliche kompakte Platte des Teltow und die im westlichen Teil des Blattes liegende Glienicker Platte werden durch die Rangsdorf-Thyrower-Abflussbahn voneinander getrennt. Im Süden befinden sich die Ausläufer der Wünsdorfer und der kleineren Motzener und Pätzer Platte. Letztere trennt die sog. Hinterseepforte. Im Osten des Blattes nehmen die Schenkendorfer Platten einen relativ hohen Flächenanteil ein. Sie werden im Norden durch die Mittenwalder Abflussbahn von der Teltow-Platte getrennt. Östlich von ihnen verläuft in N-S-Richtung die Zeesen-Zeuthener-Abflussbahn, die in die Hinterseepforte übergeht. Die Zossener Niederung liegt im Südwesten und besitzt eine beträchtliche Ausdehnung. Aus ihr heraus führt die Schöneicher Abflussbahn, die in O-W-Richtung an der Wünsdorfer und Pätzer Platte vorbei in die Zeesener-Zeuthener-Abflussbahn mündet. Die zentral gelegene Telzer Platte erhebt sich aus einer weiten Niederung aus teilweise kalkhaltigen Flusssanden und Torfen. Der Inselcharakter der Platten kommt hier besonders deutlich zum Ausdruck (vgl. Abbildung 2.2).

Der Lindenberg bei Jühnsdorf, der sich genau zwischen der Teltow- und Glienicker Platte befindet und eine genetische Verwandtschaft zu beiden vermuten lässt, nimmt jedoch eine Sonderstellung ein. Es handelt sich hierbei um ein lokales Stauchungsgebiet mit aufgeschobenen Schollen, die Gerölle böhmischer und osterzgebirgischer Herkunft aufweisen. Sie werden als Gerölle des spätelster-/frühsaalezeitlichen Berliner Elbelaufs gedeutet und als 'Wietstocker Kiese' bezeichnet. Die Leitgerölle konnten von GENIESSER & MIELECKE (1957) nahezu lückenlos nachgewiesen werden.

Der z. T. engräumige Wechsel von Hochflächen und Niederungen, der Ausdruck der glazialen Entstehung des Untersuchungsgebietes, der spätglazialen und periglaziären Überprägung sowie seiner weiteren Differenzierung im Holozän ist, deutet bereits auf eine breite Palette von Sedimenten und Substraten hin. Demzufolge ist die Heterogenität der Bodendecke hoch.

Die Hochflächen werden durch z. T. pseudovergleyte Fahlerden und Fahlerden-Braunerden gekennzeichnet, die in den Bereichen der glazifluviatilen Sande in Braunerden übergehen und unter Waldnutzung podsolig sein können.

Die Niederungen werden durch Gleye und Niedermoore sowie deren Übergangsformen cha-

rakterisiert. Durch die Nähe der Geschiebemergelkörper sind diese oft kalkhaltig. Die karbonatreichen, limnischen Ablagerungen im Bereich des Saalowgrabens, der sich im Südwest-Teil des Blattes befindet, konnten von STRAHL (2004) stratigraphisch auf weichselspätglaziales Alter eingestuft werden. Die meist kalkhaltigen Mudden westlich von Zossen ergeben nach STRAHL (2005) jedoch eine pollenanalytische Datierung auf das Holozän. Die klimatisch und meliorativ bedingte Senkung des Grundwasserspiegels der letzten Jahrzehnte führte zur Ausprägung eines beträchtlichen Anteils von Reliktgleyen und degradierten Niedermooren. Untersuchungen zur Schaffung von Kompensationsmaßnahmen zum Ausbau des Flughafens Berlin-Schönefeld haben ergeben, dass gerade die Niederungsböden einen großen Anteil ihres natürlichen Potenzials eingebüßt haben. Es ist notwendig durch eine verbesserte Wasserversorgung der hydromorphen Böden eine natürlichere Bodenentwicklung zu erreichen. Zwischen der Glienicker Platte und dem Lindenberg wurden Transektuntersuchungen vorgenommen. Die Linienführung des Transektes zeigt die folgende Abbildung 2.1.

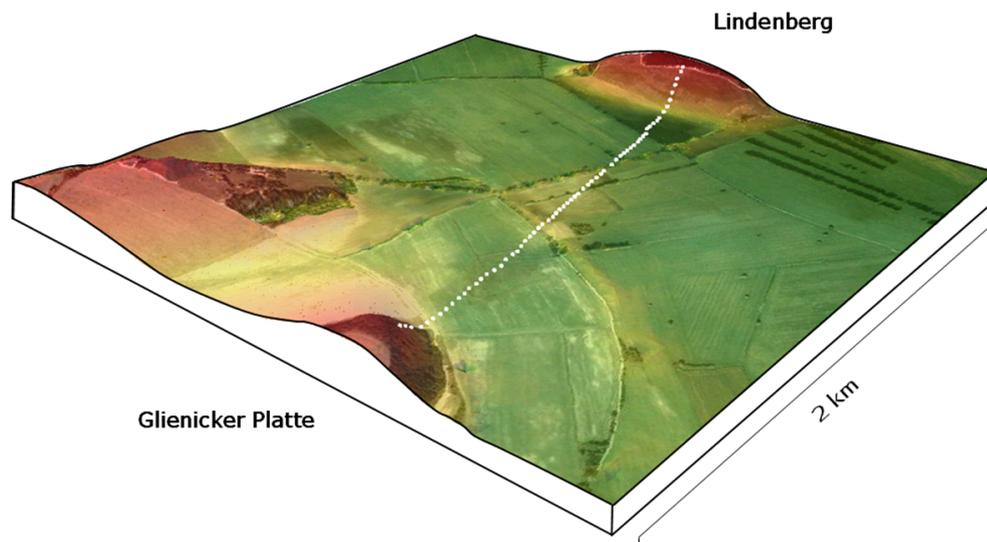


Abb. 2.1: Linienführung des Transektes von der auslaufenden Glienicker Platte über die Niederung der Rangsdorf-Thyrower-Abflussbahn bis zum morphologisch isolierten Lindenberg (Norden ist oben rechts).

2.2 Hydrologie und Klima

Hydrographisch ist das Gebiet durch relativ viele Gräben (z. B. Nuthegraben, Saalowgraben, Mahlower Seegraben) und Kanäle (z. B. Zülowkanal, Nottkanal) charakterisiert. Größere Seen sind der relativ zentral gelegene Rangsdorfer See, sowie der Zeuthener, Zeesener, Pätzer und Motzener See, die sich im östlichen Teil des Blattes befinden.

Das Klima ist kontinental geprägt. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei etwa 9 °C und die mittlere jährliche Niederschlagssumme bei ca. 500 mm.

2 Charakterisierung der Untersuchungsgebiete

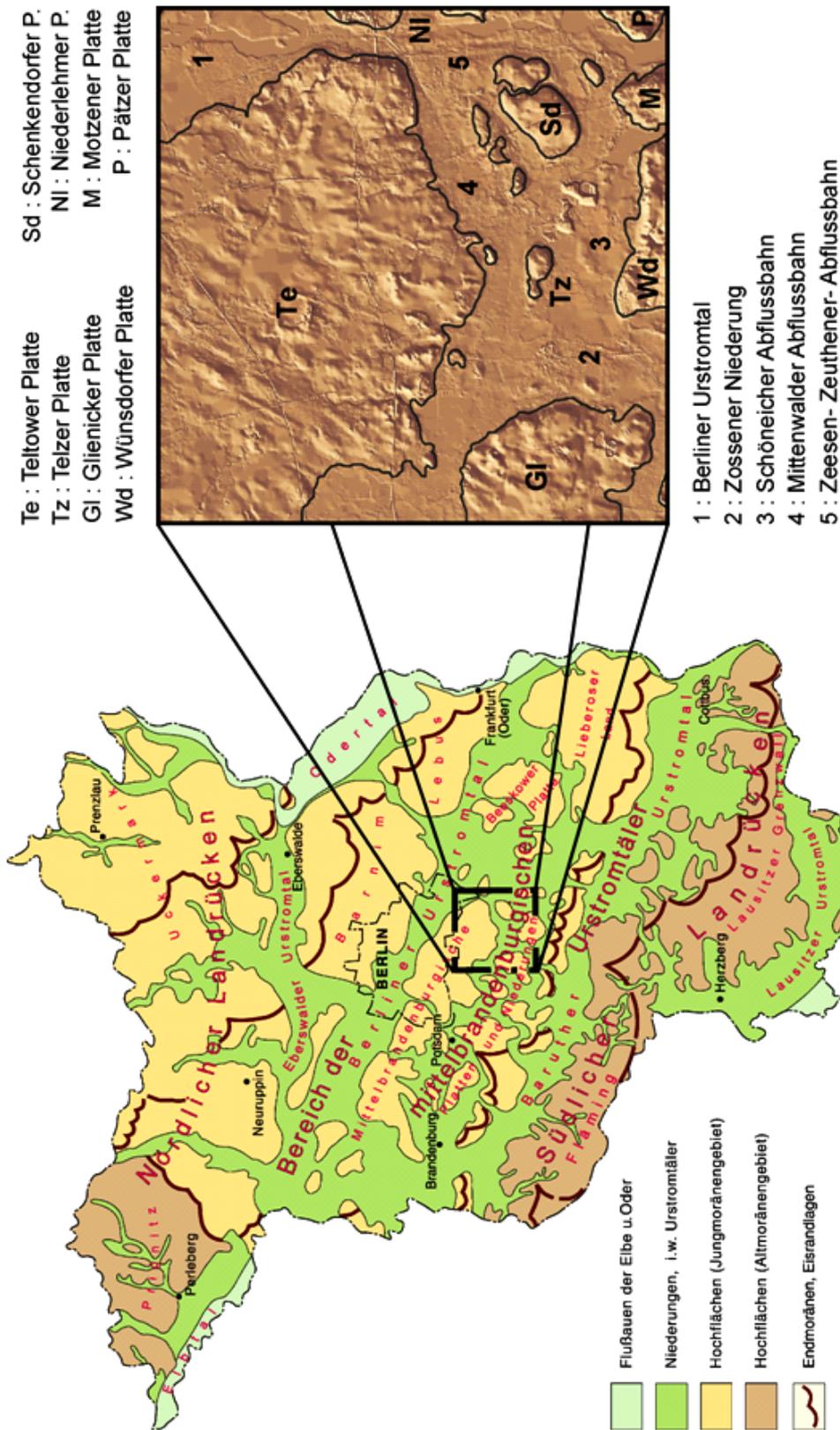


Abb. 2.2: Gemorphologisch-landschaftsgenetische Gliederung des Landes Brandenburg nach [STACKE-BRANDT et al. \(1997\)](#); Hauptuntersuchungsgebiet in geschummelter Reliefdarstellung mit Platten und Abflussbahnen (vgl. auch Karte IG10 und IG11 im Anhang).

2.3 Nutzung

Auf den ausgedehnten Niederungen mit hohem Grundwasserstand findet vorwiegend Grünlandnutzung statt, während in den stärker grundwasserabgesenkten Arealen auch Acker- und Gärtnereibetriebe betrieben werden. Die lehmigen Bereiche der Hochflächen werden meist ackerbaulich genutzt. Die Nutzung der sandigen, armen Standorte erfolgt meist forstlich. Nach KOPP & SCHWANECKE (1994) liegt das Gebiet im Wuchsgebiet des Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenlandes mit trockener Klima- und mittlerer bis ziemlich armer Nährkraftstufe (vgl. SEA). Als natürliche Baumarten kommen hier Eiche, Linde, Buche und Kiefer vor.

Relativ hoch ist der Anteil anthropogen geprägter Böden, besonders im Norden des Blattes mit dem Stadtgebiet von Berlin und dem stadtnahen Bereich einschließlich des Flughafens Schönefeld und im Nordosten mit dem Stadtgebiet von Königs Wusterhausen.

Die Deponie Schöneiche, die aus zwei Deponiekörpern besteht, liegt im Südosten des Blattes. Das Gebiet wird durch die Bundesautobahn A10 in O-W-Richtung und A13 in N-S-Richtung durchkreuzt. Die Eisenbahnlinien Berlin-Dresden im westlichen und Berlin-Cottbus im östlichen Teil des Blattes verlaufen in N-S-Richtung. Gebiete ehemaliger Rieselfelder befinden sich südlich des Schönefelder Autobahnkreuzes und bei Boddinsfelde.

Weitere Untersuchungen ohne eine spezifische Geländekartierung erfolgten im Norden und Nordosten des Landes Brandenburg. Markante Landschaftselemente sind hier die Seengebiete um Fürstenberg, Rheinsberg, Gransee und Templin, die Havelniederung bei Zehdenick, das Odertal, sowie die Endmoränenzüge der Pommerschen Eisrandlage, die als Element der glazialen Serie im Bereich der Ortslage Chorin lehrbuchhaft in Erscheinung treten. Typische Zungenbeckenseen sind der Parsteiner See und der Grimnitzsee. Webellinsee und Üdersee sind Rinnenseen. Die waldarme Region nördlich der Pommerschen Randlage ist stark durch die Bodenbildungen auf Geschiebemergel geprägt. Überwiegend sind Parabraunerden und Fahlerde-Braunerden verbreitet. Durch die geringe Entkalkungstiefe des jungen Mergels treten häufig Pararendzinen auf. Die großflächig fehlende Bewaldung und die teilweise hohe Reliefenergie führen zu erhöhter Erosion und Akkumulation, weshalb die Böden oft gekappt bzw. kolluvial geprägt sind. Des Weiteren treten schwarzerdeähnliche Böden auf.

3 Theoretische Betrachtungen

3.1 Konventionelle und synthetisierte Kartenerstellung

Die konventionelle Kartenerstellung nutzt vorwiegend die Ergebnisse aktueller Geländekartierungen. Für die Erstaufnahmen liegen/lagen i. d. R. keine weiteren Informationen vor. Im Laufe der Zeit folgte der Kartierungsbedarf den ständig steigenden Nutzungsansprüchen an die Landschaft und den geologischen Untergrund. Das führte zu einer stetigen Zunahme spezifischer, auch flächendeckender Informationen. Dieser Prozess hält bis heute an und ist eine Funktion des Erkenntnisfortschrittes über die Geosphäre. Die Untersuchungsmethoden werden spezieller und beziehen sich auf immer größere Skalenbereiche, so dass eine Datenauswertung notwendig wird und die Anwendung eines Bestimmungsschlüssels im Sinne von ALBRECHT *et al.* (2005A) bereits auf der Ebene der Horizontmerkmale forciert werden muss.

Einen Meilenstein in der digitalen Bodenkartierung haben MCBRATNEY & MENDONCA SANTOS (2003) mit dem Artikel 'On digital soil mapping' gesetzt. Konventionelle und digitale Bodenkartierung verbindet KÄGI (1999) und kommt u. a. zu dem Schluss, dass „die in das Modell aufgenommenen Geländeparameter die besten Resultate erzielt haben.“

Bei der algorithmierten Rekonstruktion des potentiell natürlichen Bodenmosaiks sieht FÖRSTER (2004) mögliche Probleme u. a. in einem vorhandenen Missverhältnis in der Genauigkeit von Flächenabgrenzung und der adäquaten qualitativen Differenzierung der Inhalte, sowie in der mangelnden Eignung von Informationsgrundlagen für die „... Anforderungen einer pedogenetisch begründeten Klassifikation“ BEHRENS & SCHOLTEN (2006) geben einen umfassenden Überblick über die digitale Bodenkartierung in Deutschland. SCHOLTEN & BEHRENS (2005) betonen auch, dass das Haupteinsatzgebiet synthetischer Bodenkarten „in der Vorbereitung der bodenkundlichen Geländeaufnahme ... und im Bereich der Qualitätssicherung bodenkundlicher Arbeiten“liegt.

Die Herangehensweise einer Bodeninventur im Rahmen der bodengeologischen Landesaufnahme und den Umgang mit der Problematik 'Vom Punkt zur Fläche' unter dem Aspekt des Bodenschutzes beschreiben DREXLER *et al.* (2000) und SCHRAA (2000). Das Konzept zur Erstellung von Bodenkarten im Land Brandenburg (KÜHN, 1995) folgt einem ähnlichen Modell. Die Grundelemente dieses Modells, das hauptsächlich einem Zuordnungsprinzip über Legendeneinheiten folgt, sind in der Abbildung 3.1 verdeutlicht. Dieses Modell bedient im Wesentlichen die inhaltliche Komponente der Kartenwerke auf unterschiedlichen hierarchischen Niveaus. Für verschiedene Maßstabbereiche werden unterschiedliche Flächendatenbanken vorgehalten. Das Konzept der Speicherung von Bodendaten geht u. a. auf KÜHN (1990) zurück. Die Flächenbodenformen, die über die sog. Horizont-Substrat-Kombinationen (vgl. Abschnitt 3.1.1) spezifiziert sind, bilden den direkten Bezug zur Fläche, der Kartiereinheit. Größe und Konturierung dieser ist maßstabsabhängig. Die Generallegendeneinheit ist ein Zuordnungssystem, das die inhaltliche Aggregation der Kartiereinheiten ermöglicht. Die Blattlegenden-

einheit geht aus dieser Aggregation hervor und berücksichtigt flächenbezogen die Darstellungszwänge, die durch den Betrachtungsausschnitt vorgegeben werden.

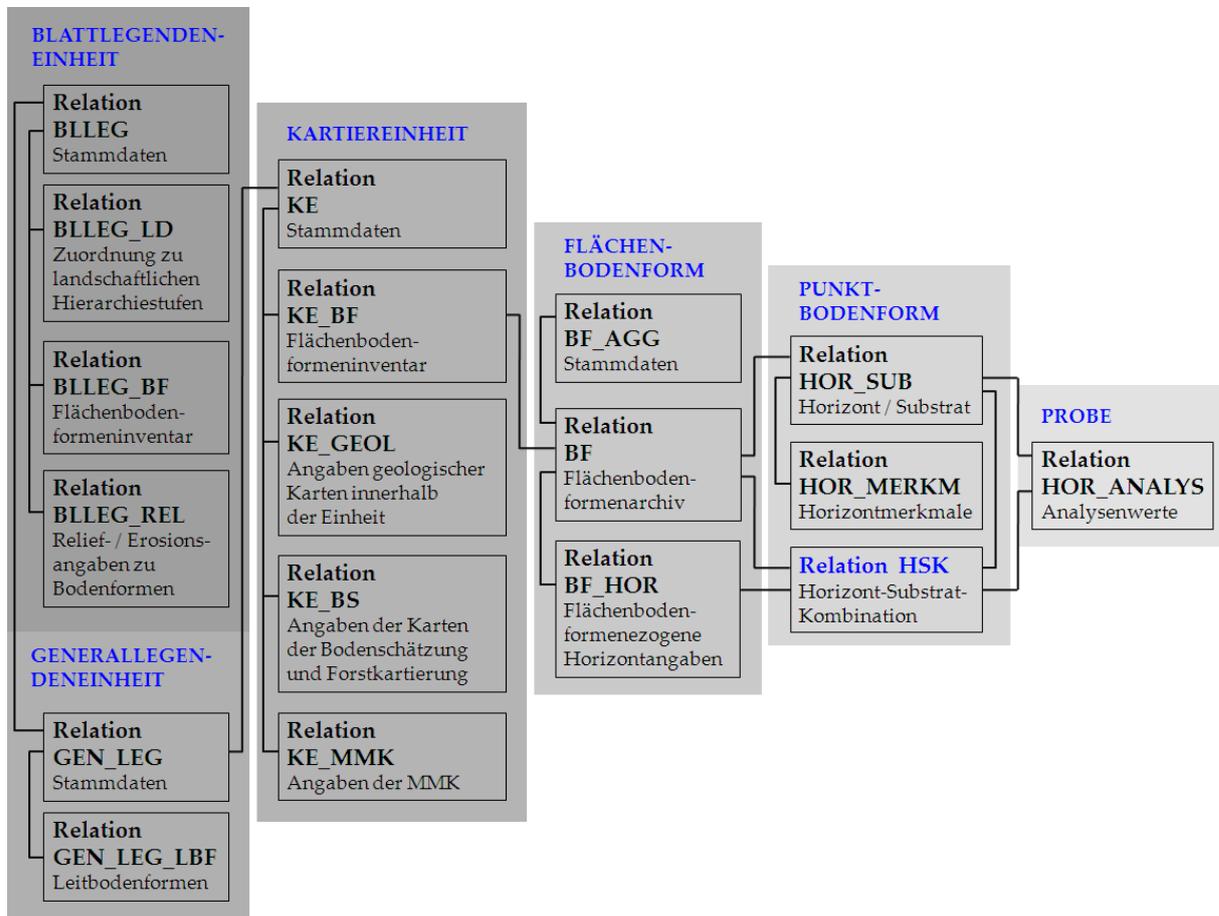


Abb. 3.1: Struktur für die Datenvorhaltung und Erstellung von Bodenkarten im Land Brandenburg. Die kaskadierte und grau abgestufte Darstellung symbolisiert die ansteigende inhaltliche Unschärfe in Richtung der Blattlegende. Die Relation HSK (Horizont-Substrat-Kombination) bildet die Schnittstelle zwischen quantitativen (Analysenwerten) und qualitativen (Merkmalen) Daten.

Der hier verfolgte Ansatz der synthetisierten Kartenerstellung versucht Brüche und Sprünge, die teilweise durch eine 'harte' Datenhaltung erzeugt werden, weitgehend zu vermeiden. Die konventionelle Art der Datenhaltung manifestiert sich beispielsweise besonders in einer gewissen räumlichen Starre der Kartiereinheiten. Diese wird, wie eingangs erwähnt, durch das Prinzip von kleinsten Einheiten verhindert. Für die inhaltliche Komponente sind das die Zielkategorien (vgl. Abschnitt 3.2.2.1.1), für die räumliche Komponente die Pixel.

3.1.1 Begriffsdefinitionen

In diesem Abschnitt werden Begriffe aus den Bereichen der angewandten Bodenkunde, der Landschaftswissenschaft und der Geographischen Informationssysteme erläutert, die für diese

3 Theoretische Betrachtungen

Arbeit grundsätzlichen Charakter tragen und eine wichtige Grundlage für die zu entwickelnde Methode bilden.

Pedogenese, Horizont, Substrat, Horizont-Substrat-Kombination und Bodenform

Die **Pedogenese** oder Bodenbildung bezeichnet den Prozess der Entstehung von Böden in Abhängigkeit von bestimmten Bodenbildungsfaktoren. Originär werden diese Faktoren durch die chemische, physikalische und biologische Verwitterung des Ausgangsgesteins bestimmt. Zunehmend werden die natürlichen Faktoren durch anthropogene überlagert. **KLEEFISCH (1994)** fasst die Faktorenkombinationen in einer Gleichung zusammen:

$$B = f(G, Wi, Bios, K, R, W, Z) \quad (3.1)$$

mit
 B: Boden (Merkmalsausprägung); G: Gestein/ Ausgangssubstrat;
 Wi: Bewirtschaftung; Bios: Flora und Fauna; K: Klima; R: Relief;
 W: Zuschusswasser; Z: Zeitdauer

OLSON (2006) diskutiert neben weiteren Faktorenmodellen, Entwicklungsmodellen, Massenbilanz- Modellen und komplexen Bodenlandschaftsmodellen, auch sog Prozessresponse-Modelle. Die Komponenten dieses Modells sind durch negative (intensitätsdämpfende) oder positive (intensitätsverstärkende) Rückkopplungen verbunden. Der in der obigen Gleichung ausgedrückte funktionale Zusammenhang von Umwelt und Boden ist auch Grundlage des Modells SoLIM (Soil-Landscape-Inference-Model). Nach **ZHU et al. (2006)** ist dieser Modellansatz geeignet die räumliche Variation der Bodeneigenschaften zu erfassen und darzustellen.

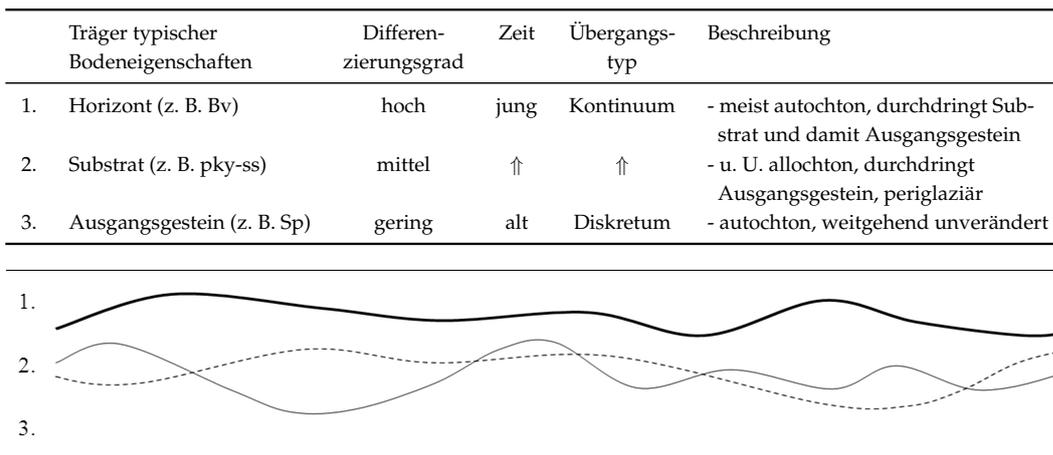


Abb. 3.2: Fortlaufende Differenzierung des Ausgangsgesteins und steigender Komplexitätsgrad (oben) und stark abstrahierter Schnitt (Substrat: gestrichelte Linie; Horizont: dünne Linie; GOF: fette Linie). Die GOF wird durch das Ausgangsgestein resp. Substrat gebildet. Die Bodenbildung 'greift' in das Substrat bzw. die Schichtung.

3.1 Konventionelle und synthetisierte Kartenerstellung

Die Abbildung 3.2 verdeutlicht die durch die Bodenbildung verursachte Veränderung des Ausgangsgesteins. Nach der Ablagerung des Ausgangsgesteins erfolgt durch die vorwiegend physikalische Verwitterung die Bildung des Substrates, das nun eine neue Schicht darstellt, aus dem Ausgangsgestein hervor gegangen ist und es durchdringt. Die anschließende hauptsächlich chemisch-biologische Verwitterung führt zur Ausbildung der Horizonte, die wiederum Substrat und damit Ausgangsgestein durchdringen.

Die Analyse der Kette der Bodenentwicklung, einschließlich der Substratbildung ist die Grundlage für die Bodenkartierung. Die Beschreibung des Ist-Zustandes als Folge einer polykausalen Entwicklung erfolgt über geeignete Klassifikationssysteme. Diese bedienen bestimmte Kriterien (Tabelle 3.1). In diesem Zusammenhang muss auf den Unterschied von Bodensystematik und Bodenklassifikation eingegangen werden, den ALBRECHT *et al.* (2005B) herausgearbeitet haben. Demnach ist eine Bodensystematik ein hierarchisch aufgebautes Ordnungssystem mit internem Bezug, d. h. Einfluss, Struktur und Zusammenhang der Boden bildenden Faktoren werden formalisiert. Die Bodenklassifikation hingegen stellt ein hierarchisches Ordnungsschema mit oftmals externem Bezug dar. Die Kriterien müssen hier nicht originär bodenkundlicher Natur sein.

Tab. 3.1: Faktoren und Kriterien für Klassifikationen. Faktoren und Kriterien bedingen einander. Eine Klassifikation nach dem Kriterium 'Verwandtschaft' führt ebenfalls zu einer Klassifikation nach dem Kriterium 'Ähnlichkeit' (in Anlehnung an SCHROEDER & LAMP (1976)).

Klassifikation	Faktor	Kriterium
isogen	gleiche Entstehung und Entwicklung	Verwandtschaft
isomorph	gleiche Merkmale	Ähnlichkeit
isofunktional	gleiche Funktionen und Reaktionen	Wirksamkeit
isotop	gleicher Ort	Nachbarschaft

Diese Kriterien werden meist kombiniert angewendet (vgl. Tabelle 3.2). Eine Auflösung in Einzelkriterien ist u. U. nicht möglich, da die genauen Definitionskriterien für die jeweilige Klasse oftmals nicht bekannt sind. Hier wird ebenfalls deutlich, dass eine Klassifikation stets das letzte Glied innerhalb der Interpretationskette sein muss. Ansonsten werden Unsicherheiten mitgeführt, die sich im weiteren Prozess der Kartenerstellung verstärken können.

Tab. 3.2: Klassifikationsbeispiele nach morphogenetischen Kriterien. Für die Auswahl der lithomorphen Böden sind die Hauptdefinitions-kriterien angegeben (nach SCHRÖDER & BLUM (1992), modifiziert).

	Lithomorph	Klimatomorph	Hydromorph	Anthropomorph
Silikat (allg.)	→Regosol	Tschernosem	Pseudogley	Kolluvisol
Karbonat	→Rendzina, Pararendzina	Braunerde	Gley	Hortisol
Ton	→Pelosol	Lessive Podsol	Vega Moor	Rigosol

3 Theoretische Betrachtungen

Nach KLEEFISCH (1994) sind isogene Böden, auch zwangsläufig isomorph und isofunktional. Dieser Zusammenhang liefert die Basis der räumlichen Übertragbarkeit von Bodeneigenschaften und damit der Kartenerstellung.

Der **Horizont** ist die kleinste, anhand makroskopischer, sensorisch erfassbarer Merkmale unterscheidbare Bodenschicht, meist unterschiedlichen Alters. Durch den Horizont werden vorwiegend unterschiedliche Intensitäten von Pedogenesen gekennzeichnet. Die Kombination der Horizonte bestimmt die Bodensystematische Einheit als Bestandteil der Bodenform.

Das **Substrat** (lat. Unterlage) ist aus dem originären Gestein hervorgegangen und bildet das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung. Der Wortbedeutung nach handelt es sich um eine Hierarchisierung des geologischen Begriffes 'Strate' (Schicht, Lage), also um eine Subschicht. Mit Hilfe des Substrates werden hauptsächlich Texturmerkmale beschrieben. Das Substrat wird über die Genese, die Grobbodenführung, die (Fein-)Bodenartengruppe und das geologische Ausgangsgestein gekennzeichnet. Die Substrate werden zur Substratsystematischen Einheit zusammengefasst.

Die **Horizont-Substrat-Kombination** besteht in Analogie zur Bodenform (vgl. nächsten Absatz) aus einem pedogenetischen, substratgenetischen, grob- und feinbodenartigen, sowie geogenetischen Anteil. Letzterer kennzeichnet das Ausgangsgestein. Der Begriff Horizont-Substrat-Gruppe wird erstmals von VETTERLEIN (1986) für die Charakterisierung bodenphysikalischer Eigenschaften verwendet. BAURIEGEL (2003) verwendet dieses Konzept für statistische Ableitung der Parameterdatensätze von Flächenbodenformen und schafft so die Schnittstelle von Punkt- und Flächendaten. Damit wird für das Land Brandenburg die Erstellung von Auswertekarten ermöglicht, die den zum Standard gewordenen Methodenkatalog des NIBIS bedienen. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen DEHNER *et al.* (2001). Einen Überblick über die Ableitungs- und Auswertungsmöglichkeiten des NIBIS zur Bewertung der Bodenfunktionen und schädlicher Bodenveränderungen (nach BBodSchG) geben ERDMANN & MÜLLER (2000).

Die **Bodenform** ist der aggregierte Ausdruck der Horizonte und ihrer Substrate. Sie setzt sich aus Bodensystematischer und Substratsystematischer Einheit zusammen (siehe Tabelle 3.3). In der Bodensystematischen Einheit werden die pedogenen (Horizont-)Merkmale zusammengefasst. In der Substratsystematischen Einheit lassen nach der KA5 maximal 3 Schichten angeben, wodurch die Beschränkung auf die wesentlichen Merkmale notwendig wird. Diese Beschränkung setzt eine gewisse Erfahrung des Interpreten voraus. Die Bodenform bildet das zentrale, bodenbeschreibende Objekt, sowohl in der bodengeologischen Geländekartierung als auch in der Bodenkarte.

Auf die Begriffe Punkt- und Flächenbodenform geht BAURIEGEL (2003) ausführlich ein. ZEITZ & KÜHN (2000) bereiten Altdaten der Moore über statistische Verfahren und der Nutzung von Expertenwissen auf um sie zur Kennzeichnung von Flächenbodenformen zu verwenden. Die Aggregierungsvorschriften zur Bildung der Bodensystematischen und Substratsystemati-

3.1 Konventionelle und synthetisierte Kartenerstellung

schen Einheit sind unterschiedlich. Bei der Bodensystematischen Einheit gehen die Horizontmerkmale mit ihren Tiefenlagen und Mächtigkeiten ein und nur bei zeitlich weit auseinander liegenden Pedogenesen ist die Angabe von Schichtungen möglich. Ein Tiefenbezug ist teilweise durch das systematische Niveau gegeben. Bei der Substratsystematischen Einheit werden i. d. R. die drei dominierenden Schichten mit dem entsprechendem Schichtwechselbereich angegeben. Insgesamt wäre es wünschenswert die Aggregierungsvorschriften zur Bildung der Bodensystematischen und Substratsystematischen Einheit zu harmonisieren.

Tab. 3.3: Merkmalsstruktur einer Bodenform (hier Fahlerde-Braunerde aus schwach Kies führendem Kryoturbatsand über Fliesssandlehm aus Geschiebemergel über tiefem Grundmoränenkalksandlehm aus Geschiebemergel). Es ist die Angabe von maximal 3 Schichten möglich, deren Schichtwechsel in den Tiefenstufen 0-30, 30-70, 70-120 und >120 cm angegeben werden kann.

B O D E N F O R M													
Bodensystematische Einheit		Substratsystematische Einheit											
		Obere Schicht				Mittlere Schicht			Untere Schicht				
Sub-	Typ	Genese	Kiesführung	Bodenartengruppe	Ausgangsgestein	Schichtwechsel	Genese	Bodenartengruppe	Ausgangsgestein	Schichtwechsel	Genese	Bodenartengruppe	Ausgangsgestein
Fahlerde	Braunerde	periglaziär-kryoturbat	schwach Kies führend	Sand	Geschiebedecksand	30-70 cm	periglaziär-fluidal	Sandlehm	Geschiebemergel	70-120 cm	Grundmoräne	Kalksandlehm	Geschiebemergel
LF-BB:		pky-(kk2)ss (Sp)		/		/	pfl- sl (Mg)		//		gm- csl (Mg)		

Landschaft, Dimension und Naturräumliche Gliederung

Der Begriff **Landschaft** ist sehr vielschichtig und damit schwer definierbar. Nach [STEINHARDT et al. \(2004\)](#) erfolgen Erklärungsmöglichkeiten von ganzheitlich- ästhetischer bis kausalanalytisch-genetischer Sicht. Der Landschaftsbegriff im geographischen Sinn geht unter anderem auf [NEEF \(1967\)](#) zurück, der unter Landschaft einen durch einheitliche Struktur und gleiches Wirkungsgefüge geprägten konkreten Teil der Erdoberfläche versteht. Nach [HAASE \(1991\)](#) bezeichnet der Begriff Landschaft Inhalt und Wesen eines von der Naturausstattung vorgezeichneten und durch die Gesellschaft beeinflussten und gestalteten Raumes als Ausschnitt aus der Erdhülle. Die natürlichen Wechselwirkungen zwischen den abiotischen und biotischen Landschaftskompartimenten werden durch direkte Eingriffe oder indirekte Effekte menschl-

3 Theoretische Betrachtungen

cher Tätigkeit überprägt. Unter dem Begriff Landschaft versteht man demnach ein ursprünglich natürliches Gebiet der Erdoberfläche, das sich durch gemeinsame Merkmale auszeichnet. Landschaften sind hochkomplex und besitzen ein systemimmanentes Erscheinungs- und Wirkungsgefüge, das sie von anderen Landschaften mehr oder weniger abgrenzt.

Eine Landschaft ist schwer mathematisierbar, da sie neben objektiven Gegebenheiten auch subjektiv geprägte Eigenschaften, wie Schönheit oder Weite beinhaltet. Im Grundsatz ist sie die Summe der Wechselbeziehungen der natürlichen Urfaktoren, ihrer anthropogenen Beeinflussung und Durchdringung, sowie ihrer funktionalen und ethischen Widerspiegelung im Bewusstsein des Menschen.

Der anthropogene Einfluss überprägt und zerschneidet zunehmend Naturlandschaften durch technisierte Strukturen und Abläufe (Siedlungen, Industrie, Verkehr)³. Durch das stetig steigende Bedürfnis der Kommunikation (z. B. Aufbau von Mobilfunktelefonmasten), des Personen- und Güterverkehrs (BERNHARDT & JÄGER, 1985), sowie beispielsweise auch der Windenergiegewinnung (z. B. Windräder) werden natürliche Landschaftsfunktionen nachhaltig beeinflusst.

Untersuchungen zum Landnutzungswandel und der damit verbundenen Veränderung der Landschaftsfunktionen im Zeitraum von 1890-1996 nimmt HALKE (2002) vor. GERIGHAUSEN (2004) kommt nach Anwendung eines objektbasierten Ansatzes (vgl. S.22) zur Standortcharakterisierung u. a. zu dem Schluss, „dass es bei der Bewertung von Landschaftsfunktionen nicht primär darum gehen sollte, flächendeckend hochauflösende Datensätze bereitzustellen, sondern dass mit zunehmendem Maßstab vielmehr Methoden zur Abgrenzung von Bezugseinheiten sowie zur Datenintegration bzw. Datendisaggregation zur Verfügung gestellt werden sollten, die im konkreten Fall auf aktuelle Eingangsdaten (wie Fernerkundungsdaten) angewendet werden können. Die Landschaft besitzt diverse Funktionen, die durch die Aufgaben und Leistungen des Landschaftshaushaltes bestimmt werden“ (MARKS *et al.*, 1992).

HALKE (2002) nutzt die Interferenzanalyse für die Ermittlung multifunktionaler Räume. Sie dient der Feststellung und Interpretation der Überlagerung der Funktionen bzw. Nutzungsansprüche auf einer Fläche. Die in diesen Räumen auftretenden Konflikte zwischen den Funktionen, werden diskutiert und durch Vorschläge von Kompensationsmaßnahmen Lösungen aufgezeigt. Die Problematik der Interferenz wird im Abschnitt 5.1.1.6 dieser Arbeit gesondert behandelt.

Die Landschaft ist neben den vielgestaltigen, inhaltlichen Komponenten auch durch die maßstäbliche Komponente gekennzeichnet. Die Anwendung des Begriffes ist in sehr großen Maßstäben wohl nicht zulässig, da hier eine gewisse Komplexität, die für eine landschaftliche Betrachtung notwendig ist, nicht erreicht wird. Zum Beispiel kann ein mit Bäumen umsäumter Teich mit Insel nicht als Landschaft bezeichnet werden. Landschaft im eigentlichen, natürlichen Sinn wird zunehmend zur Kulturlandschaft, zum urbanisierten Raum. Diese Veränderung folgt einer evolutionären Entwicklung in der der Mensch mehr und mehr Gestalter seiner

³vgl. auch Karte IA1 im Anhang

3.1 Konventionelle und synthetisierte Kartenerstellung

Umwelt (Landschaft) wird. Schließlich ist der anthropogene Faktor Mensch in Landschafts- und auch Klimaentwicklung natürlich. So ist z. B. auch die Frage zu stellen, ob es relevant ist, die globale Klimaveränderung auf anthropogene Einflüsse oder natürliche Ursachen zu polarisieren.

Seit längerer Zeit wird die Anwendbarkeit von GIS auf die Landschaft und die Mathematisierbarkeit ihrer Phänomene diskutiert. Nach DOLLINGER (1997) vertreten DUTTMANN & MOSIMANN (1994) die Meinung, dass GIS durch eine kontinuierliche Datenfortführung zur Erfassung von Zustandsänderungen in Raum und Zeit sogar den Übergang von „statischer Reaktionsplanung zu einer Vorsorgeplanung“ erlaubt. BASTIAN (1999) hält einen Rückgriff auf mathematische Modelle soweit gerechtfertigt, „als dies von den ökologischen Grundlagen her vertretbar erscheint“ und verweist auf SYRBE (1996), der die Lösung vieler Probleme bei der Wissensverarbeitung in der Anwendung der „Theorie der unscharfen Mengen“ sieht. Für den Erosionswiderstand gegen Wasser entwickelt SYRBE (1998) eine matrizenbasierte Fuzzy-Bewertungsmethodik.

Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit ist das Kompartiment Boden, das ein Teil des offenen Systems Landschaft darstellt und in diesem Kontext und dieser Betrachtungsweise interpretiert wird, d. h. dass system- und landschaftsanalytische Methoden und Denkweisen verwendet werden.

Der Begriff der **Dimension** bezieht sich in dieser Arbeit unter dem landschaftlichen Aspekt auf geographische Maßstabbereiche einer betrachteten Landschaft. Innerhalb dieser Bereiche werden bestimmte maßstabsadäquate Untersuchungs- und Darstellungsmethoden eingesetzt, die für den jeweiligen Maßstabbereich zu vergleichbaren Aussagen über die untersuchten Objekte führen. Die Einteilung der Maßstabbereiche geht im Wesentlichen auf die von NEEF (1963) geprägten Dimensionsstufen (geosphärisch, regionisch, chorisch und topisch) zurück. Im jeweiligen Maßstabbereich sind gleiche inhaltliche Aussagen möglich, es werden gleiche methodische Ziele verfolgt und es wird ein bestimmtes Methodenniveau eingehalten (HAASE & MANNFELD, 2002). Die landschaftshierarchische Gliederung bildet nur bedingt eine kontinuierliche Maßstabsreihe ab. Jede Stufe hat ihren eigenen Inhalt-Raum-Verhältnis in einem gewissen Abstraktionsgrad. Der Versuch der Abbildung einer kontinuierlichen Maßstabsreihe wird in Abschnitt 5.3.1.1 auf der Basis kleinster Raumeinheiten (hier Pixel) vorgenommen. Zu einer für die weitere Forschung sehr wichtigen Feststellung kommt BURGER (1992), wonach „Areale in der topischen Dimension eher quantitativ-stoffhaushaltlich erfasst, während in der chorologischen Dimension die gegenseitigen Lagebeziehungen von topischen Einheiten (das Gefügemuster) in den Vordergrund treten.“

Der Begriff wird im mathematischen Sinne als Vektorraum aufgefasst. Die Dimensionen dieses Vektorraumes bilden die Boden charakterisierenden Merkmale inhaltlicher und räumlicher Art. Der Zeitvektor, also die Entwicklungsdauer, findet hier keine Betrachtung.

3 Theoretische Betrachtungen

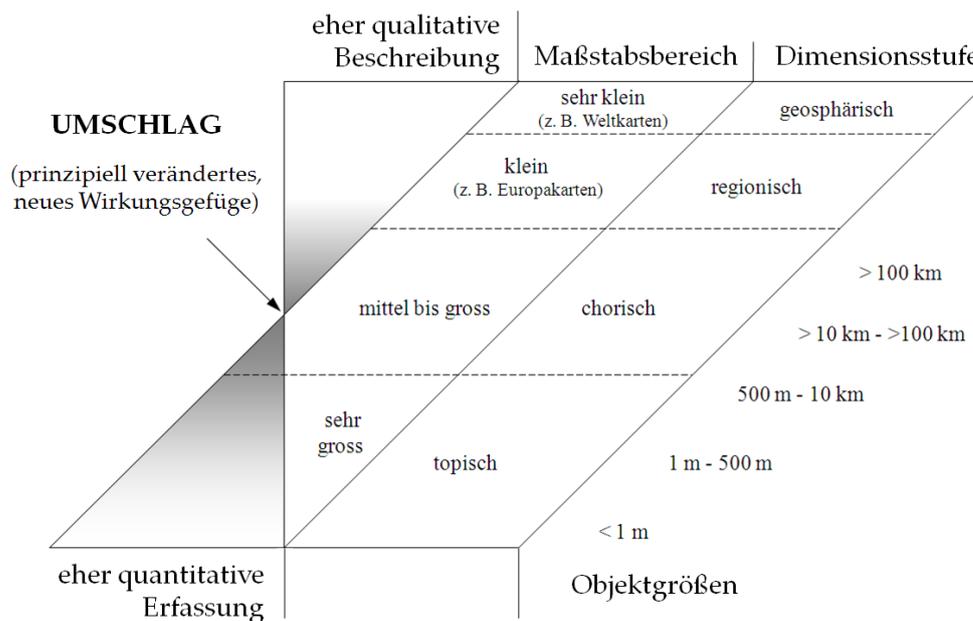


Abb. 3.3: Dimensionsstufen, deren Maßstabsbereiche und Beschreibung. Ein Umschlagspunkt liegt innerhalb der chorischen Dimensionsstufe. Das Wirkungsgefüge ändert sich.

Die Abbildung 3.3 zeigt, dass in den mittleren Maßstabsbereichen ein Umschlag der Erfassungs- und Beschreibungsmöglichkeiten des Systems erfolgt. Dieses Phänomen ist Ausdruck des im Abschnitt 1.3 genannten 'Kriterien-Rankings'. Die im Wesentlichen stetige (kontinuierliche) Funktion der Maßstabstransformation wird durch eine weitestgehend unstetige Kriterienfunktion überlagert. In Tabelle 3.12 werden solche Kriterien bzw. Faktoren von GEHRT *et al.* (1992) und SPONAGEL *et al.* (1999) beschrieben. SCHMIDT (2000) fasst Aggregierungsprinzipien und Kriterien der Parametertransformation zusammen. Handlungsbedarf besteht in der genauen Definition der Kriterien in Form einer hierarchischen Liste oder eines Sets. Diese Kriterien gehen gewichtet in den Prozess der maßstabsbezogenen Aggregation ein. In dieser Arbeit wird die Gewichtung in Form einer Rangfolge für den Maßstab 1 : 50 000 angegeben (vgl. Abschnitt 3.2.2.1.1). Die Abbildung 3.4 verdeutlicht das Verhältnis von Maßstab und Kriterien-Ranking. In dieser Arbeit wird versucht dieses Verhältnis zu quantifizieren. Einen Ansatz hierzu liefern die im Abschnitt 3.2.2.3 beschriebene Schwerpunktmethode, sowie die im Abschnitt 5.1.1.6 erläuterte maßstabsabhängige Anpassung einer Zugehörigkeitsfunktion. Mit kleiner werdendem Maßstab wird die multiquantitative Erfassung, d. h. die mehrerer Parameter zur Gesamtcharakterisierung eines Systems schwieriger. Sie ist zwar möglich und darstellbar, jedoch sind die Werte dann so stark gemittelt, dass die Wertangabe an sich wenig sinnvoll erscheint. Der CLARKE-Wert (benannt nach dem US-amerikanischen Geochemiker F. W. CLARKE) beispielsweise gibt den mittleren Elementgehalt der Erdkruste bis in 15 km Tiefe an, der eher eine Tendenz ausdrückt oder ausdrücken sollte. Die Wertangabe ist hier nicht unbedingt interessant, sondern vielmehr in welchem Verhältnis die Werte zueinander stehen,

ob sie erhöht oder erniedrigt sind. Offenbar existiert generell eine Diskrepanz zwischen ortscharfer, objektbezogener Beprobung bzw. Messung und deren flächenhafter, maßstäblicher In-Beziehung-Setzung, die durch eine alleinige Mittelwert- oder Medianbildung nicht aufgelöst werden kann. Im Prinzip sind alle natürlichen Phänomene kontinuierlich, d. h. jedes Merkmal lässt sich in ordinalskalierten, funktionalen Reihen abbilden. Eine Diskretisierung ergibt sich erst, wenn diese Merkmale in einen Raum- oder/und Zeitbezug gebracht werden.

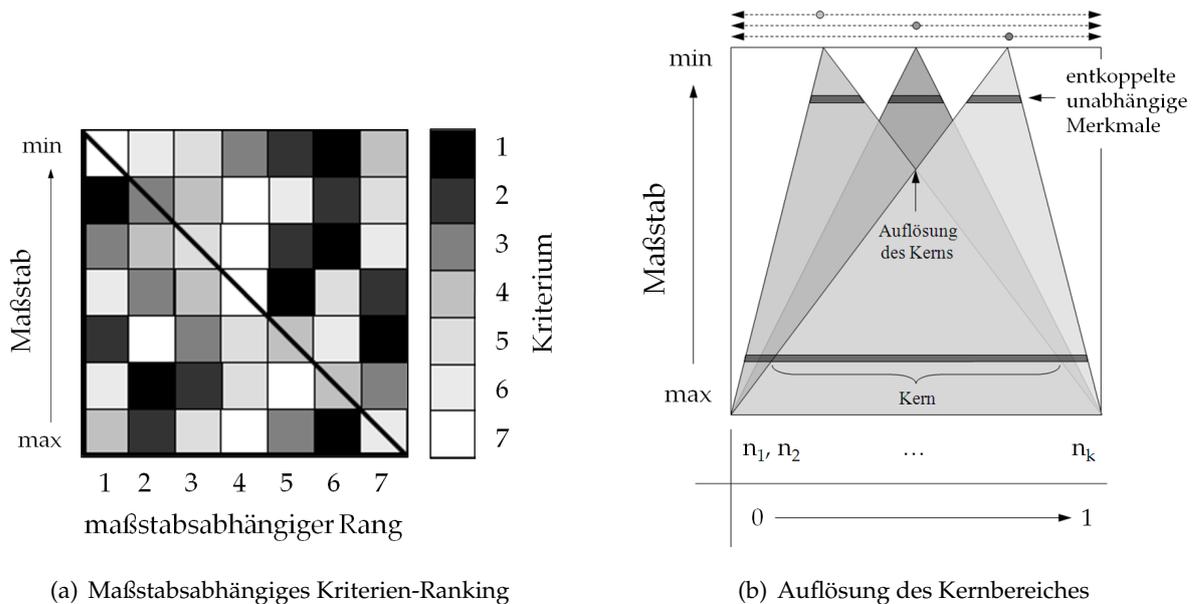


Abb. 3.4: Beim maßstabsabhängigen Kriterien-Ranking wird die stetige Funktion der Maßstabstransformation durch eine weitestgehend unstetige Kriterienfunktion überlagert. Die Ordnung der Kriterien, die meist nominalskaliert sind, ist in jeder Maßstabsebene unterschiedlich. Die Anzahl der karteninhaltsbestimmenden Kriterien verringert sich mit kleiner werdendem Maßstab. Bei der Auflösung des Kernbereiches, der durch die Zugehörigkeitswerte der Merkmale, sowie die Zugehörigkeitswerteverteilung in einem Maßstabsbereich gekennzeichnet ist, kommt es mit kleiner werdendem Maßstab zu einer Veränderung der Zugehörigkeitswerte und deren Verteilung und damit zu einer Merkmalsentkopplung (n =Anzahl der Zugehörigkeitswerte in einem Untersuchungsgebiet.)

Die **Naturräumliche Gliederung** ist eng an den Landschaftsbegriff gekoppelt. Sie grenzt naturräumliche Einheiten oder Naturräume auf mehreren Skalen voneinander ab. Die einzelnen Naturräume sind räumliche Individuen, die sich in ihrem Gesamtcharakter in einzelnen, mehreren oder auf kleiner Ebene sogar in allen Geofaktoren bzw. Geoökofaktoren von den benachbarten Flächeneinheiten unterscheiden. "Im Einzelnen sind dies, ..., die Naturfaktoren Relief, Klima, Boden, Vegetation, Wasser und Gestein (LESER, 1987; LIEDTKE, 1984). Deren Interferenz bestimmt die natürlichen Standortbedingungen. Ein sehr umfassendes Werk zur 'Naturräumlichen Gliederung der Landnutzung' liefern (KOPP *et al.*, 1982). Hier finden sich Verfahrens- und Denkweisen, die heute mehr denn je Beachtung finden und durch die Methoden der digitalen Datenverarbeitung neues Potenzial erfahren. Auffallend ist die Konsequenz der Anwendung des Abstufungsprinzips. Kombinationsmöglichkeiten werden über Matrizen

3 Theoretische Betrachtungen

dargestellt, die Verwendung der Begriffe wie Kette, Verknüpfung, Komposition, Modifikation, Vernetzung zeigen eine große Nähe zu fuzzy-logischen Herangehensweise der Autoren zur Charakterisierung der Naturräume des Tieflandes der DDR. Eine neuere Raumgliederung für Deutschland mit mathematischen Verfahren zeigen SCHMIDT (2002), (vgl. Abschnitt 4.1.5) und BURAK (2005). Die folgenden Begriffe beziehen sich auf die Informationsverarbeitung innerhalb von Geographischen Informationssystemen und leiten zum nächsten Kapitel über.

Objekt, Ebene und Legende

Ein **Objekt** wird als grundlegende Einheit zur Erfassung und Bewertung eines Sachverhaltes (hier der bodenformenrelevanten Merkmale) aufgefasst. Dabei kann das Objekt elementar oder aber, wie im Regelfall, komplex zusammengesetzt sein. Es besitzt eine räumliche, eine inhaltliche und eine topologische Komponente und ist durch die Zugehörigkeit zur jeweils übergeordneten Objektklasse gekennzeichnet. Ein Objekt wird durch seine Attribute beschrieben und eindeutig verschlüsselt. Objektklassen sind z. B. Bodenschätzungsklassen, Geologische Einheiten, Einheiten der Forstlichen Standortkartierung, Reliefklassen etc..

Die **Ebene** (Layer, Datenschicht) besitzt monothematischen Charakter und deckt in der Regel den gesamten Untersuchungsraum mit Informationen ab. Das Ebenenprinzip erlaubt die Möglichkeit, Objekte zusammenfassend in ihrem Raumbezug darzustellen. Die Ebenen werden durch die Zielkategorien (Verbraunung, Lessivierung, Grundwassereinfluss etc.) gebildet und sind Träger der objektbezogenen Zugehörigkeitswerte. Sie speichern dabei auch die Mächtigkeiten und Tiefenlagen der Zielkategorien.

Die **Legende** von Bodenkarten ist ein Zuordnungs- bzw. Klassifizierungssystem, das bestimmten inhaltlichen Kriterien gerecht wird und Bodenformen oder andere Auswertungs- und Ableitungsthemen zusammenfassend darstellt. Sie bestimmt in entscheidendem Maß das Kartenbild und berücksichtigt Ansprüche des Kartennutzers.

3.2 Informationstheoretischer Hintergrund

3.2.1 Geographische Informationssysteme

Nach BILL (1999) ist es die Hauptaufgabe eines Geographischen Informationssystems (GIS) neue Informationen aus den bestehenden raumbezogenen Datenbeständen abzuleiten. Es unterscheidet sich von anderen graphischen Systemen durch seine Analysefunktionalitäten. Seit etwa 15 Jahren werden in diese Systeme verstärkt Fuzzy-Algorithmen implementiert. So koppelt SCHMIDT (1995) ein GIS mit einem Fuzzy-Klassifikationsmodell. Programmsysteme wie SAGA (vgl. CONRAD (2006)) und Leop's Model⁴ (vgl. RIEDL (1999)) folgen ebenfalls einer solchen Entwicklung.

3.2.1.1 Objekt- und Ebenenprinzip im GIS

Die Begriffe Objekt und Ebene sind im Abschnitt 3.1.1 erläutert. In der geographischen Informationsverarbeitung kommen das Objekt- und das Ebenenprinzip als unterschiedliche Modellsätze zum Einsatz. In dieser Arbeit werden beide Ansätze sowie deren Kombinationsmöglichkeit behandelt. Das Objektprinzip wird in jüngerer Zeit dem der Ebene vorgezogen, da es flexibler ist und eine Hierarchie impliziert. In der Objektklasse sind Thema (Klassenname) und Eigenschaften (Attribute) räumlicher Objekte zusammengefasst. Die Objektbewertung erfolgt in der Regel raumunabhängig in Tabellen von Datenbanken. Die Rohdatentabellen werden zuvor in ihre Normalformen überführt. Die Objekte werden mit einem Hierarchie- und Zielkategorien Schlüssel verknüpft, so dass sich eine Bewertungstabelle mit ordinal- und intervallskalierten Zugehörigkeitswerten ergibt. Ein Objekt kann jedoch auch zu mehreren Ebenen gehören. Sie sind die Grundlage für die Ableitung der Bodenformen und deren Regionalisierung. Das Ebenenprinzip dient der Separation, Überlagerung und operationellen Verschneidung unterschiedlicher thematischer Daten. Es lässt sich als Vereinigungsmenge aller verfügbaren oder als Teilmenge selektiv extrahierter Ebenen darstellen (FRITSCH, 1991):

$$E = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_4 \cup E_5 \cup E_6 \dots E_n \quad (3.2)$$

mit

E: Ebene der Vereinigungsmengen; E_n : Einzelebenen

Die Ebenen bilden die Grundlage für deren raumbezogene, operationelle Verschneidung und damit den Inferenzprozess der fuzzy-logischen Vorgehensweise. Die Abbildung 3.5 verdeutlicht den Zusammenhang von Objekt- und Ebenenprinzip. Objekte und Objektklassen besitzen

⁴Leop; <http://www.srf.tuwien.ac.at/Projekte/MapModels/MapModels.htm>

3 Theoretische Betrachtungen

dabei unterschiedlich starke Bindungen zur jeweils übergeordneten Hierarchie- und Maßstabsebene. Die Bindungen zwischen den Ebenen nehmen von unten nach oben ab.

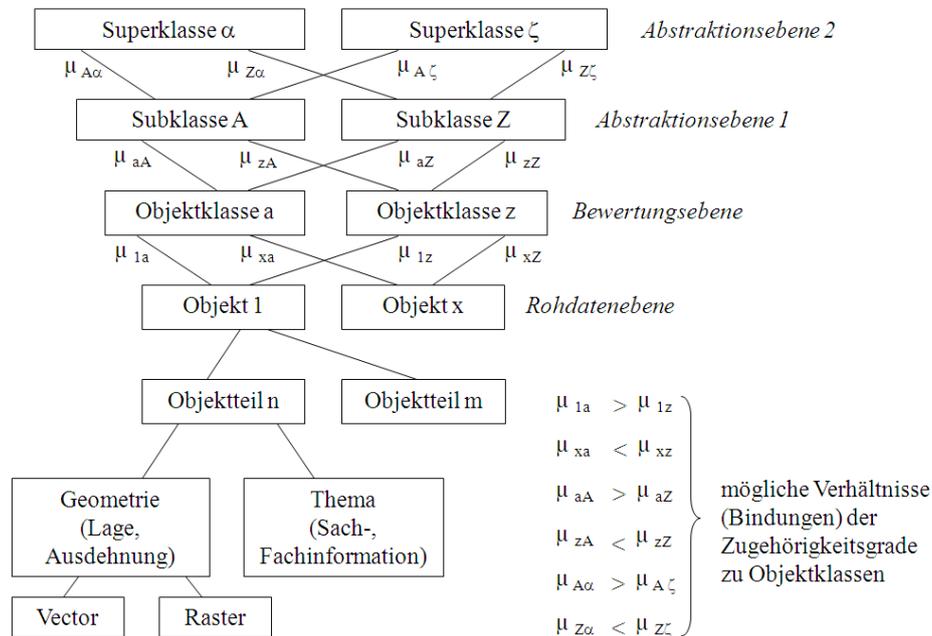


Abb. 3.5: Objekt- und Ebenenprinzip. Die Rohdatenebene hält die Objekte in ihrem Raumbezug vor. Sie fungiert als Schnittstelle zwischen Datenbank und GIS. In der Bewertungsebene erfolgt die statistische oder/und empirische Bewertung der Objekte, i. d. R. raumunabhängig in Datenbanken. Die Abstraktionsebenen sind durch die inhaltliche und räumliche Aggregation nach dem Ähnlichkeitsprinzip gekennzeichnet. Die Zugehörigkeiten der Objekte zu den übergeordneten Klassen sind unterschiedlich stark und können durch eine Funktion beschrieben werden.

Der hier verfolgte Ansatz sieht eine objektbezogene Bewertung der Informationsgrundlagen und deren ebenenbezogener Weiterverarbeitung im GIS bzw. Bildverarbeitungsprogramm vor.

3.2.1.2 Wissensformen

BILL (1999) unterscheidet unterschiedliche Wissensformen, die als sich ergänzend einzustufen sind. Konkurrierendes Wissen und damit 'falsches' Wissen ist in gewissem Sinne unwahrscheinlich, d.h. jedes Wissen besitzt ein mehr oder weniger großen, aber faktisch nie, keinen Wahrheitsgehalt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es kein widersprüchliches Wissen gibt. Im GIS kann dieses jedoch ohne die Konfliktbereinigung durch den Nutzer nicht weiterverarbeitet werden. Auf diesen Sachverhalt wird im nächsten Abschnitt eingegangen. Tabelle 3.4 zeigt verschiedene Wissensformen.

Tab. 3.4: Wissensformen und deren Abbildung im GIS (vgl. BILL (1999)). Diese bilden die Grundlage für die Strukturierung von Expertensystemen. Dem Umgang mit widersprüchlichem Wissen im GIS wird dabei künftig eine wachsende Rolle zukommen (vgl. auch Abschnitt 3.2.4).

Wissensformen	Abbildung im GIS
Prototypisches Wissen Fachwissen Prozedurales Wissen Wissen um regelhafte Zusammenhänge	implizit
Deklaratives Wissen Allgemeinwissen Unvollständiges Wissen Ungenaueres Wissen Unsicheres Wissen	explizit
Widersprüchliches Wissen	nein

Ein GIS kann damit als die raum-strukturierte Wissensrepräsentation eines Expertensystems aufgefasst werden. In solche Systeme wird zunehmend Fuzzy-Logik implementiert (vgl. ZHU *et al.* (2001)).

3.2.2 Grundlagen der Fuzzy-Logik

Die Menge der in einer Konzeptkarte zu verarbeitenden Daten ist enorm hoch. Dabei spielt die In-Beziehung-Setzung der Daten (Verknüpfung, Wichtung, Rangfolge) eine ebenso wichtige Rolle wie das Datum selbst. Feinste Unterschiede, Abstufungen oder selbst Nuancierungen in den Inhalten einer Informationsgrundlage (Karte) können beispielsweise in einer additiven Verschneidung von Daten sehr vieler Informationsebenen im Ergebnis zu einer sehr starken Differenzierung führen. Die Additive Verschneidung wird durch die Summierung der Zugehörigkeitsgrade einer Zielkategorie bei Verwendung von zwei oder mehr Informationsebenen erreicht.

Da die binäre Logik jedoch lediglich zwischen *ja* oder *nein*, *entweder* oder bzw. *0* und *1* unterscheidet, Werte dazwischen und Abstufungen bzw. fließende Übergänge jedoch nicht möglich sind und so nur einen Spezialfall der sog. Unscharfen Logik darstellt, ist die Anwendung von Fuzzy-Methoden vorgesehen. Unschärf bedeutet jedoch nicht ungenau. Ein präziser, scharfer Wert ist die Sonderform des allgemeinen, unscharfen Falles, der mehrere Werte beinhaltet und eine Menge im mathematischen Sinne darstellt. Die Regeln, die verwendet werden, sind ebenso logisch wie in der klassischen Mengenlehre. Fuzzy-Logik bildet eine Schnittstelle von Mensch und Maschine in der Art, dass die Maschine (z. B. Computer) scharfe Werte für die Steuerung und Regelung benötigt oder ein Messgerät scharfe Werte liefert und die In-Beziehung-Setzung dieser Werte zu menschlichen Ausdrucksweisen (Linguistik), Maßstäben, Einschätzungen und

3 Theoretische Betrachtungen

Empfindungen erfolgt. Die Möglichkeit der Verarbeitung von Abstufungen und der gekoppelten Analyse von qualitativen und quantitativen Daten unter Anwendung definierter Regeln bildet das enorme Potential der Fuzzy-Logik. Den Umgang mit Unschärfe und unscharfen Informationen beschreiben u. a. [TRAEGER \(1993\)](#) und [VIERTL & HARETER \(2005\)](#) ausführlich. Auf einige Methoden wird folgend eingegangen (siehe auch [Abbildung 3.12, S.36](#)).

3.2.2.1 Fuzzyfizierung

3.2.2.1.1 Fuzzy-Mengen und Linguistische Variablen

Bei der Fuzzifizierung (Unscharmachen) erfolgt die Zuordnung von Werten zu einer oder mehreren *unscharfen Mengen* (**Fuzzy-Mengen**) durch Bestimmung der Zugehörigkeitsgrade (μ) zu diesen unscharfen Mengen, d. h. bis zu welchem Grad erfüllt ein Sachverhalt bestimmte Eigenschaften. Dabei sind unscharfe Mengen jedoch stets auch scharf abgegrenzt. Die [Abbildung 3.6 \(a\)](#) zeigt die Ermittlung von Zugehörigkeitsgraden unscharfer Zahlen oder Werte zu einer unscharfen Menge, die [Abbildung 3.6 \(b\)](#) die Ermittlung von Zugehörigkeitsgraden unscharfer Mengen (z. B. Humusklassen) zu einer anderen unscharfen Menge (z. B. organische Böden). Die [Abbildung 3.7](#) verdeutlicht, dass der Zugehörigkeitsgrad des Humusgehaltes von 20 Prozent zur unscharfen Menge 'organisch' im Bereich von 0.4 bis 0.6 liegt. Ein extremer Humusgehalt besitzt eine Zugehörigkeit von 0.8 und eine sehr starker Humusgehalt von 0.4.

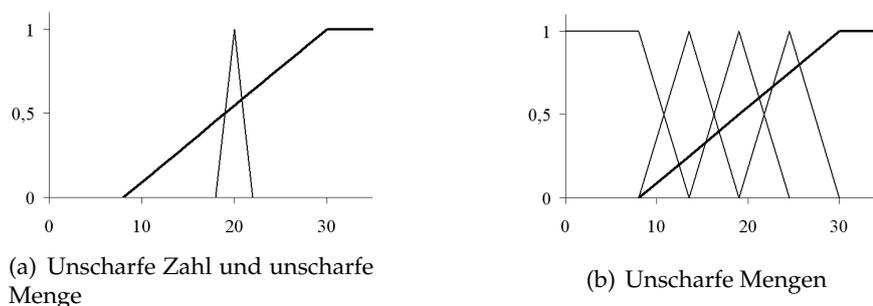


Abb. 3.6: Zugehörigkeitsgrade unscharfer Mengen

Als **Linguistische Variable** wird die Menge der nominal oder verbal skalierten Variationen einer betrachteten Variable (Basisvariable als numerischer Wert) verstanden. Solche Variablen können z. B. sein: moorig, humos, sandig, kalkig usw. Die Variationen dieser Variablen müssen unter Berücksichtigung von syntaktischen (Satzbau), semantischen (Wortbedeutung) und hierarchischen Regeln sowie ihren unscharfen Relationen formalisiert werden. Linguistische Variablen werden in der Fuzzy-Logik als unscharfe Mengen beschrieben. Der Auswertung der linguistischen Variablen kommt besonders auch bei der Analyse der Altdaten eine entscheidende Bedeutung zu. Der Begriff 'moorig' kann funktional wie folgt dargestellt werden:

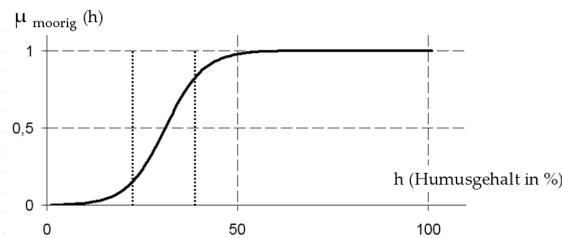


Abb. 3.7: Funktionsgraph für die linguistische Variable 'moorig'.

Im streng monoton steigenden Funktionsintervall (gepunktet) ist der eigentliche Begriff 'moorig' quantitativ definiert. Die Funktionsgleichung ist auf Seite 29 beschrieben (Gleichung 3.3; hier: $b = 0,2$, $a = 30$).

In den Legendeneinheiten der Geologischen Spezialkarte werden beispielsweise die Bezeichnungen 'Moorboden' und 'Moorerde' verwendet. Nach dem heutigen Sprachgebrauch wird 'Moorboden' eher als echtes Moor mit unzersetztem Torf verstanden, während 'Moorerde' eher im medizinischen Zusammenhang als Heilerde verwendet wird. Dem Sprachgebrauch des vergangenen Jahrhunderts nach dürfte aber die Bezeichnung 'Moorerde' einem zersetzten Torf entsprechen. Ein Indiz dafür findet sich in KRÜNITZ (1803) mit folgendem Wortlaut: „Diese Erde findet sich in Brüchen, die mit Laub und Nadelholz vermengt sind, besonders dann, wenn die Höhen, die den Saum solcher Mohre ausmachen, auch mit Laubhölzern und Nadelwäldungen besetzt sind.“

Zielkategorien und Zugehörigkeitsfunktionen

Zielkategorien werden als unscharfe Mengen verstanden, die durch die Zugehörigkeitsgrade der Objekte definiert sind. Sie werden in Abhängigkeit von der zu lösenden Aufgabe definiert. Die Definitionen der Zielkategorien für die Erstellung einer Konzeptbodenkarte (Zielthema) zeigt die Tabelle 5.2. Alle Zielkategorien fließen in die Bodenform als wichtigstes Element der Bodenkarte ein. Sämtliche Interpretationen und Auswertungen der vorliegenden Informationen, wie Alt- und Neudaten, Punkt-, Linien- und Flächendaten bedienen diese Zielkategorien. Die Zielkategorie kann als ambivalente Bewertungsebene betrachtet werden, d. h. es erfolgt einerseits eine inhaltliche (tabellarische) und andererseits eine räumliche (georeferenzierte) Charakterisierung. Die Zuweisung erfolgt durch Zugehörigkeitsgrade. Ein Zielthema (z. B. Bodenkarten, Auswertungskarten) hingegen wird als Komplex von Zielkategorien angesehen, der durch Zielklassen, wie Bodensystematische Einheiten, Substrate, Bodenformen, Legendeneinheiten etc. definiert wird. Als generell schwierig zu Hand haben ist die Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung der Böden. Diese wird bisher nur durch eine relativ grobe stratigraphische Einordnung und die Einschätzung von rezemem, reliktischem und fossilem Wassereinfluss realisiert. Fossile, vorwiegend begrabene Böden werden meist nur durch das Symbol \circ in der Horizontangabe bzw. den Schichtwechsel kenntlich gemacht (vgl. KA5 (2004), S. 82). Hier

3 Theoretische Betrachtungen

müssten die Charakterisierungsmöglichkeiten erweitert werden. Ein Ansatz hierzu liefert der in Abschnitt 4.3.1 beschriebene Polygenesegrad. Die in der Tabelle 5.2 gezeigte Zusammenstellung bildet gleichermaßen die Grundlage für die Bewertung der Ausgangs- und Erzeugung der Enddaten.

Die **Zugehörigkeitsgrade** der Objekte müssen für ein Zielinterpretationsergebnis verschiedener Themen ermittelt werden. Sie bilden für die jeweilige Zielkategorie die Zugehörigkeitsfunktion (siehe S. 28) ab. Als Objekt wird jedes einzelne Sachdatum (Attribut) eines Themas aufgefasst. Das kann z. B. die Bodenform einer älteren Bodenkarte, die Legendeneinheit oder/und ein agronomisches Profil der Geologischen Spezialkarte oder das Klassenzeichen der Bodenschätzungskarte sein. Die Zugehörigkeitsgrade der Objekte zu Zielkategorien werden systematisch und empirisch bestimmt. Der Zugehörigkeitsgrad kann dabei von 0 (keine Zugehörigkeit) bis 1 (volle Zugehörigkeit) angegeben werden. Die Angabe SLS (schwach lehmiger Sand) einer Schicht des agronomischen Profils in der Geologischen Spezialkarte führt beispielsweise zu einer Zugehörigkeit von 0,7 für die Zielkategorie 'Sand' und zu einer Zugehörigkeit von 0,3 für 'Lehm'. Die Bezeichnungen der Bodenarten, der zur Zeit der Erstellung der Geologischen Spezialkarten verwendeten Nomenklatur, können zu den in der heutigen Nomenklatur in Beziehung gesetzt werden.

Die Zuweisung der Zugehörigkeiten zu Zielkategorien erfolgt über Matrixtabellen, wie für einige Bodensystematische Einheiten in der Tabelle 5.7 (S. 113) dargestellt. In einem ersten Schritt werden Zugehörigkeiten ermittelt. Die bestimmende Pedogenese erhält dabei unabhängig vom systematischen Niveau die stärkste Zugehörigkeit. Die begleitenden werden entsprechend nach unten abgestuft. Im zweiten Schritt werden diese Zugehörigkeiten entsprechend ihrer Stärke innerhalb der Zeichenkette gewichtet. Im dritten Schritt wird eine mittlere Zugehörigkeit für die ausgewählte Menge bestimmt.

Die **Zugehörigkeitsfunktion** ist ein Hauptelement der Fuzzy-Logik. Sie repräsentiert den Zusammenhang der Zugehörigkeitsgrade in einer mathematischen Funktion. Diese Funktionen werden durch ihre Stützstellen (Definitionspunkte) charakterisiert. Die Definition dieser Stellen, sowie die Festlegung der Funktion selbst, erfolgt durch Expertenwissen. Es wird eine gute Feinjustierung möglich. Es liegt in der Natur der Fuzzy-Logik die Objekte auf der Grundlage unscharfer Informationen zu charakterisieren. Diese Charakterisierung kann immer nur eine Annäherung sein. Die Güte der Annäherung bestimmt jedoch das Ergebnis des Fuzzy-Systems. Ein unzureichendes Ergebnis ist demzufolge auf die mangelnde Qualität der gewählten Zugehörigkeitsfunktion durch unzureichendes Wissen über das System zurückzuführen. Am häufigsten werden die Dreieckform (Lambda-Typ), Glockenform, Trapezform (Pi-Typ), Z-Form und S-Form verwendet.

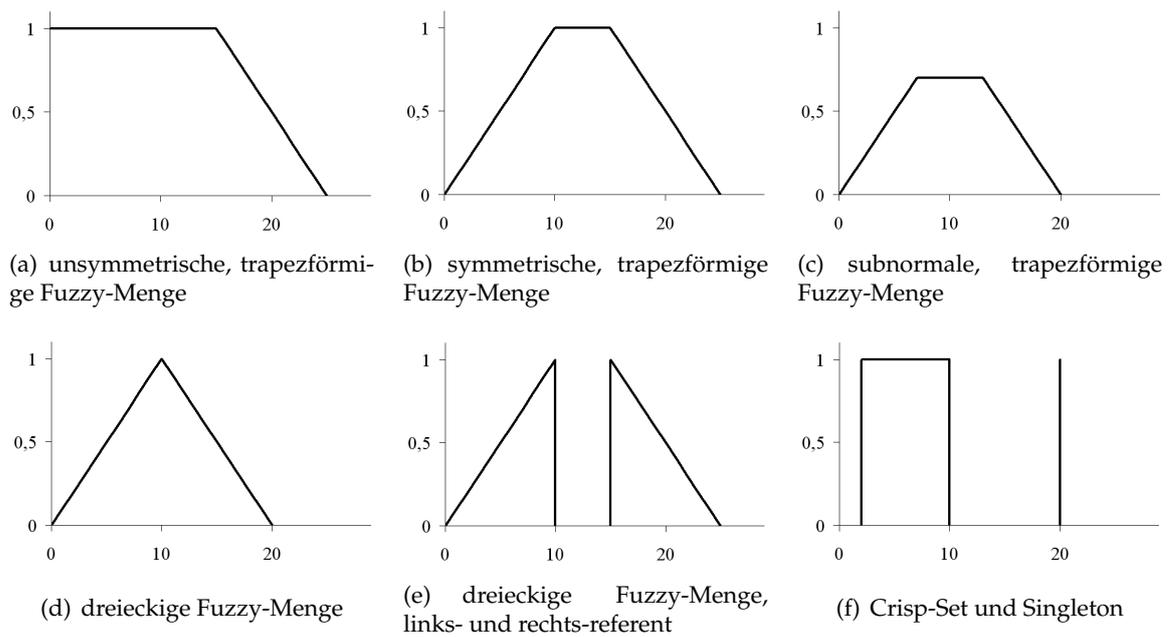


Abb. 3.8: Formen von Fuzzy-Mengen nach [FRIEDRICH \(2001\)](#)

In dieser Arbeit werden für die Objektbewertung primär Zugehörigkeitsfunktionstabellen verwendet, während für die Klassifikation durch Stützstellen definierbare Zugehörigkeitsfunktionen verwendet werden. Nach [STOLZ \(1998\)](#) ist „die Erstellung der Wertetabellen durch den Experten zwar zeitaufwendiger als das Einbinden der Funktionsgleichung in den Algorithmus, aber wesentlich flexibler.“ Es wird darauf verwiesen, dass eine Klassifizierung immer Brüche erzeugt, da eine mehr oder weniger starke Zusammenfassung von Werten vorgenommen wird. Die ohnehin problematische Schwellenwertwahl pflanzt sich so fort. Generell sollte bei Wertklassifizierungen, eine entsprechend große Datenmenge vorausgesetzt, die Methode der 'Natürlichen Unterbrechungen' (sog. *Jenks*) angewendet werden.

Softsplitting

Eine bei Klassifizierungen häufig angewendete Methode ist das sog. Soft-Splitting bei der 'harte' Klassengrenzen funktional aufgeweicht bzw. angeglichen werden (vgl. [Abbildung 3.9](#)). [SCHÖPF \(2006\)](#) verwendet diese Methode bei der Altersklassifizierung von Patienten.

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(b \times (-x + a))} \quad (3.3)$$

mit
a: Klassengrenze; b: Angleichungsgrad

3 Theoretische Betrachtungen

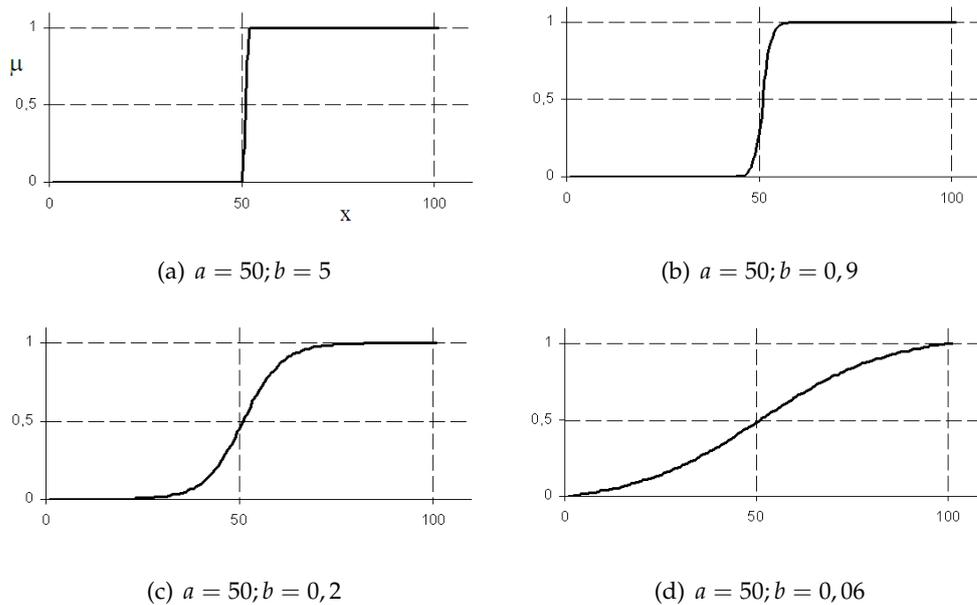


Abb. 3.9: Soft-Splitting. Mit dieser Methode werden Klassengrenzen aufgeweicht. Die Unterschiede zwischen den Klassen werden minimiert.

3.2.2.2 Inferenz

Bei der Inferenz, auch Schlussfolgerung oder Konklusion genannt, werden die Daten resp. Mengen zusammengeführt und Verarbeitungsregeln der Form WENN ... DANN ... auf die in der Fuzzifizierung ermittelten Zugehörigkeitsgrade angewendet. Die Einzelregeln lassen sich relativ einfach zu einem komplexen Regelsystem verknüpfen. Eine solche *Regelbasis* ist leicht vom Experten erweiterbar und veränderbar. Dabei wird die Bestimmung der Verknüpfungsart durch das logische UND (*additive Konjunktion*) bzw. das logische ODER (*Alternative*) vorgenommen. Die Auswertung der Regel erfolgt in den Schritten:

1. *Aggregation:* Für die Prämisse jeder einzelnen Regel wird ein Erfülltheitsgrad der Bedingung berechnet.
2. *Implikation:* Die Erfülltheitsgrade der Prämissen für die Regeln werden verknüpft und liefern das eigentliche Inferenzergebnis.
3. *Akkumulation:* Die Implikationsergebnisse werden zu einer Ergebnismenge zusammengeführt.

Im eigentlichen Inferenzschritt erfolgt zunächst eine Regelreduktion durch die Verknüpfung der Zugehörigkeitsgrade der unscharfen Mengen. Die Konklusionen hier ergeben sich entsprechend der aufgestellten Regelbasis. Danach werden entsprechende Operatoren angewendet. Im Beispiel ist es der Min-Operator, der jeweils den kleinsten Zugehörigkeitswert liefert. Dieses Zwischenergebnis stellt gewissermaßen die „kleinste gemeinsame Menge“ der entspre-

chenden Regel dar. Auf dieses Ergebnis wiederum wird Max-Operator angewendet, der die „umfassendste Menge“ ergibt.

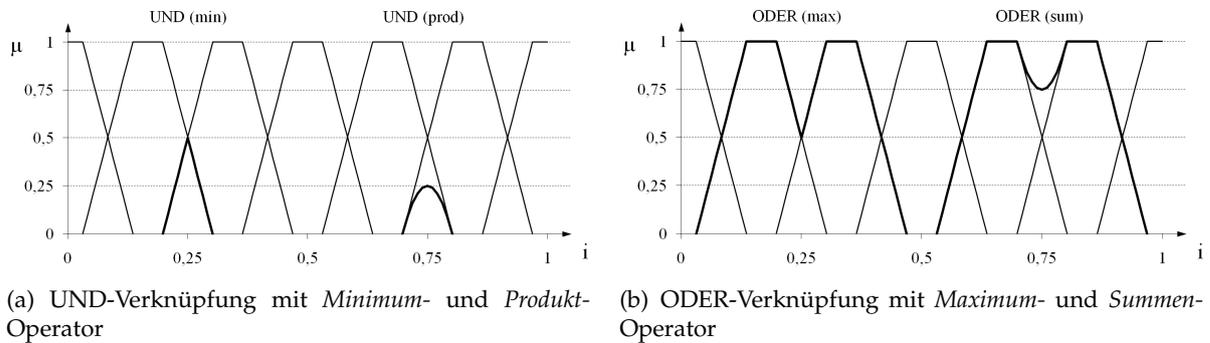
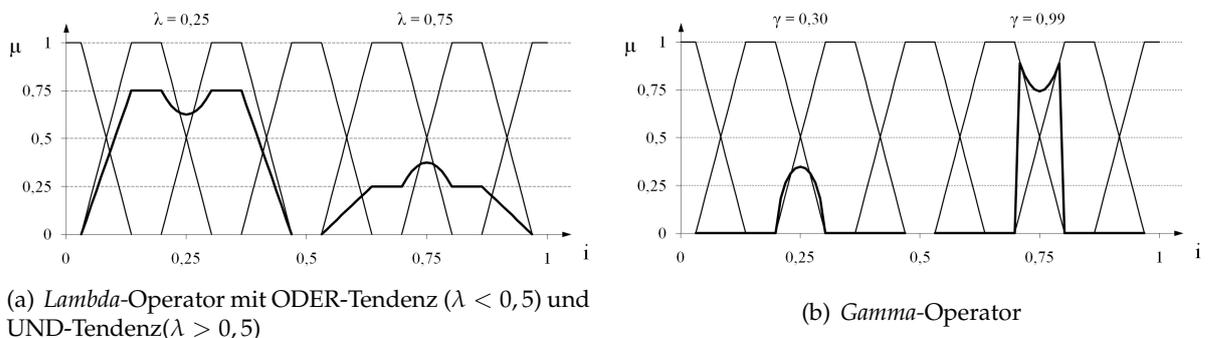
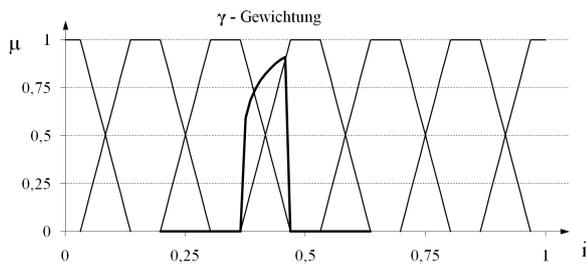


Abb. 3.10: Verknüpfungsarten unscharfer Mengen (siehe auch Tabelle 3.5).

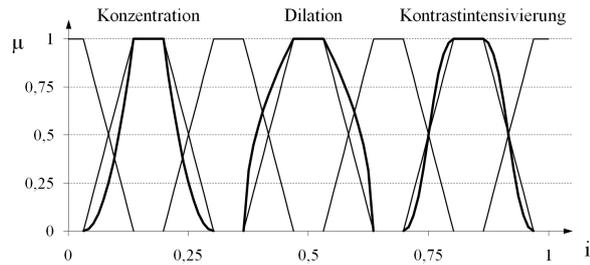
Operatoren wichten und beeinflussen die Verknüpfungsart der zu komponierenden Mengen auf geeignete Weise. Sie werden verwendet, wenn die Regel einer Fuzzy-Inferenz mehr als eine Variable umfasst, um einen Wert zu erhalten, der das Gesamtergebnis der Bedingung für diese Regel widerspiegelt (KÖHLER, 2003). In Tabelle 3.5 sind gebräuchliche Operatoren aufgelistet. Sie werden angewendet nachdem die Zugehörigkeitswerte für die Zielkategorien bestimmt worden sind. Diese liegen in Tabellen in erster Normalform vor, d. h. die meist komplexe Objektinformation wird schrittweise in mehrere Relationen zerlegt. Diese besitzen durch ihre operationelle Verknüpfung eine funktionale Abhängigkeit. Die Vorteile dieser Arbeitsweise liegen in der besseren Überschaubarkeit, der Redundanzfreiheit und der Verringerung von Datenwidersprüchen. Bei der Integration von Daten verschiedener Pools (unterschiedliche Maßstäbe bzw. Hierarchie, Punkt- und Flächendaten) sind besonders auch die Sachverhalte zu berücksichtigen, die in Tabelle 5.8 (S.120) benannt werden, da sie einen bedeutenden Einfluss auf das Ergebnis haben. Die Abbildung 3.10 (a) verdeutlicht Schnittmengen, während die Abbildung 3.10 (b) Vereinigungsmengen zeigt. Neben diesen Operatorarten, die die mathematische Definition und deren Einordnung zeigen, sind Kategorien von Operatoren aufgestellt worden, die den Bezug zu den Daten selbst sowie ihrer räumlichen Beziehung verdeutlichen.



3 Theoretische Betrachtungen



(c) Gamma-Gewichtung ($\gamma = 0,75$)



(d) Mengenform beeinflussende Operatoren

Abb. 3.11: Weitere Verknüpfungsarten unscharfer Mengen (siehe auch Tabelle 3.5).

Die Tabelle 3.5 zeigt einige in der Fuzzy-Mathematik übliche Operationen und Operatoren. Bei den Operatoren mit kompensatorischer Wirkung kann ein 'Übergang' zwischen UND und ODER eingestellt werden. Der zugelassene Wertebereich dieser Operatoren liegt auch hier von 0 bis 1. Grundsätzlich können Mengen verknüpfende und Mengenform beeinflussende Operatoren (Modifikatoroperationen) unterschieden werden.

Tab. 3.5: Fuzzymengen, Verknüpfungen und Operationen (zusammengestellt aus (TRAEGER, 1993), ergänzt)

Operation	Formel	Beispiel, Bemerkung
Mengenoperationen:		
Vereinigung	$V = A \cup B$	$(1,2) \cup (2,3) = (1,2,3)$
Durchschnitt	$M = A \cap B$	$(1,2) \cap (2,3) = (2)$
Differenz	$D = A \setminus B$	$(1,2) \setminus (2,3) = (1,3)$
Komplement	$K_A = C$	$K_{(1,2)} = (0,3)$
Fuzzy-Zahl:	$L[(x_0 - x) \mid]$ für $x \leq x_0$ $R[(x - x_0) \mid r]$ für $x > x_0$	
Verknüpfungsoperatoren:		
UND	$\mu_{A \wedge B}(x) = \min\{\mu_A(x); \mu_B(x)\}$	UND (min)
	$\mu_{A \wedge B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x)$	UND (prod)
ODER	$\mu_{A \vee B}(x) = \max\{0; [\mu_A(x) + \mu_B(x)] - 1\}$	Begrenzte Differenz
	$\mu_{A \vee B}(x) = \max\{\mu_A(x); \mu_B(x)\}$	ODER (max)
	$\mu_{A \vee B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x)$	ODER (sum)
	$\mu_{A \vee B}(x) = \min\{1; [\mu_A(x) + \mu_B(x)]\}$	Begrenzte Summe
Operatoren mit kompensatorischer Wirkung:		
UND / ODER	$\mu_{A \wedge B}(x) = \lambda[\mu_A(x) \times \mu_B(x)] + (1 - \lambda)[\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x)]$ $\mu_{A \vee B}(x) = [\mu_A(x) \times \mu_B(x)]^{1-\gamma} [1 - (1 - \mu_A(x)) \times (1 - \mu_B(x))]^\gamma$	Lambda Gamma (Potenzgewichtung)
Negation	$\neg \mu_a = 1 - \mu_a$	
Modifikatoroperatoren:		
Konzentration	$\mu_{KONZ}(x) = \mu_A(x)^\delta$ für $\delta > 1$	Schärfung
Dilation	$\mu_{DILT}(x) = \mu_A(x)^\phi$ für $\phi < 1$	Dehnung
Kontrastierung	$\mu_{KRST}(x) = 2\mu_A^2(x)$ für $\mu(x) \geq 0,5$	Kontrastintensivierung
	$\mu_{KRST}(x) = 1 - 2(1 - \mu_A(x))^2$ für $\mu(x) < 0,5$	
α -Schnitt	$S_e = \mu_A(x) > a$ (einfacher α -Schnitt)	$\alpha = \text{festgelegter Wert}$
	$S_s t = \mu_A(x) = a$ (strenger α -Schnitt)	

Wichtungen von Objekten oder Ebenen werden mit Wichtungsoperatoren realisiert. Einige sind in Tabelle 5.8 (S.120) dargestellt. Bezogen auf die inhaltliche Komponente wird diese vorwiegend empirisch durch den Experten vorgenommen. Sie nimmt damit eine Schlüsselstellung im Prozess der Interaktion von Computer und Experten ein. In Bezug zur räumlich-maßstäblichen Komponente kann die Wichtung für die Ebene im Sinne des GIS nach der Gleichung auf Seite 120 berechnet werden. Bei der Interpretation von Karten muss berücksichtigt werden, dass die Beschreibungen der Flächeninhalte und die Grenzziehung immer nur die Aussageschärfe des betrachteten thematischen Ziels in einem definierten Maßstab bedienen (z. B. Ausweisung von petrographischen und stratigraphischen Einheiten in der geologischen Karte). So kann ein Geschiebemergel in der geologischen Karte sehr unterschiedliche bodenkundlich relevante Ausprägungen besitzen, die nicht das Darstellungsziel der Ursprungskarte sind. Diese Mehrdeutigkeiten und Unschärfen in der Interpretation können durch die Verwendung weiterer Themen wie beispielsweise der Hinzunahme der punktuell vorliegenden Daten minimiert werden (Einträge der Schichtungen in den geologischen Karten). Auch die Klassenflächen und -zeichen der Bodenschätzung werden als eine verfügbare Datenquelle abgefragt und liefern eine mehr oder weniger breite Interpretationsspanne für boden- und substrat-systematische Einheiten. Digital vorliegende Punktdaten in Form der Grablochbeschriebe der Bodenschätzung verbessern die Aussage für Klassenflächen enorm, d. h. die Spannweite der bodenkundlichen Interpretationen wird verringert (Minimierung der inhaltlichen Unschärfe). Die Inhalte der verschiedenen Kartenthemen und Punktinformationen, die der bodenkundlichen Beschreibung dienen, werden hinsichtlich ihrer Ausprägung und Intensität im Raum (vertikal und horizontal) interpretiert. Die Informationsebenen sind bei der Interpretation zu wichten. Wichtung bedeutet hier eine abgestufte In-Beziehung-Setzung bzw. Bewertung der zur Verfügung stehenden Eingangsinformationen. Sie ist jeweils abhängig vom Interpretationsziel (Zielkategorie). Dies kann die Beurteilung eines konkreten Bodenbildungsprozesses wie z. B. eine kolluviale Umlagerung sein. Hier würde die Informationsebene 'Relief' eine stärkere Wichtung erhalten als z. B. bei der Zielkategorie Lessivierung. Bei letzterer würde die Informationsebene 'Geologie' (Substratverbreitung) eine höhere Wichtung erhalten als die Informationsebene 'Relief'. Die gegenseitige Wichtung der Daten schließt eine Normierung ein.

Modifikatoren sind sprachliche Elemente, d. h. meist attributive Adjektive die ein anderes Element oder Objekt näher bestimmen. Sie sind oft mit Linguistischen Variablen verbunden und steigern oder senken dessen Wortbedeutung. Die Modifizierung kann wie folgt erfolgen:

Tab. 3.6: Modifikatoren und ihre rechenbare Umsetzung nach [TRAEGER \(1993\)](#), modifiziert

Sprachlicher Modifikator	Beispiel für rechenbare Umsetzung
gering	$= y_1$
nicht gering	$= 1 - y_1$
hoch	$= y_n$
mehr oder weniger hoch	$= \sqrt{y_n}$
sehr hoch	$= y_n^2$
nicht sehr hoch	$= 1 - y_n^2$

3 Theoretische Betrachtungen

Synonym für gering ist wenig, schwach, selten etc. und für hoch viel, stark, oft etc. zu verwenden. Die Unschärfe in den Modifikatoren selbst ist in der Tabelle 3.7 gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass diese im Mittenbereich am größten und in den Extrembereichen am kleinsten ist. Im Verlauf weiterer Arbeiten wäre zu prüfen, in wie weit eine Verallgemeinerung auf andere verbalen Einstufungen, wie z. B. mittelkörniger Sand usw. zulässig ist. Vergleichende Untersuchungen von Korngrößenanalysen und Bodenartenansprachen im Gelände können hierzu einen Beitrag leisten.

Tab. 3.7: Untersuchungen zur Quantifizierung sprachlicher Modifikatoren nach FREIBERGER & MC-NEILL (1998), zit. in Tizhoosh (1998), modifiziert

Wort	Mittelwert (nach SIMPSON, 1944)	Mittelwert (nach HAKEL, 1968)	Differenz	Unschärfenbereich
Immer	99	100	1	■
Sehr oft	88	87	1	■
Meistens	85	79	6	■■■■■
Oft	78	74	4	■■■■
Im Allgemeinen	78	74	4	■■■■
Häufig	73	72	1	■
Ziemlich oft	65	72	7	■■■■■■■
Ausgeglichen	50	50	0	
Dann und wann	20	34	14	■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■
Manchmal	20	29	9	■■■■■■■■■■■■■■■■■■
Gelegentlich	20	28	8	■■■■■■■■■■■■■■■■
Von Zeit zu Zeit	15	22	7	■■■■■■■■■■■■■■■■
Nicht oft	13	16	3	■■■■
Üblicherweise nicht	10	16	6	■■■■■■■■■■■■■■■■
Selten	10	9	1	■
Kaum jemals	7	8	1	■
Sehr selten	6	7	1	■
Kaum	5	5	0	
Fast nie	3	2	1	■
Nie	0	0	0	

Ziel einer **Transformation** von Daten ist die Erzeugung eines einheitlichen Datenbereichs für sämtliche Zielkategorien. Dies ist Grundlage für eine gleichgewichtige Bewertung der Daten. Die Transformation beeinflusst dabei den Wertebereich der Daten. Es wird ein Zieldatenbereich, der durch eine monoton steigende Funktion charakterisiert ist, ausgewählt. Die Berücksichtigung der Werteverteilung ist in der vorliegenden Arbeit nicht vorgesehen. Es werden die Methoden *Normierung* und *Stauchung/Streckung* unterschieden:

Die *Normierung (Normalisierung)* wird hier als die Transformation von Zugehörigkeitswerten auf den Bereich zwischen 0 und 1 verstanden. Die nicht normalisierte Menge wird normalisiert indem alle Zugehörigkeitsgrade durch den maximal vorkommenden Zugehörigkeitsgrad (Amplitudenwert) dividiert werden. Die Anzahl der Datensätze bleibt nach der Transformation gleich.

Bei der *Stauchung/Streckung* wird ein Zieldatenbereich ausgewählt. Es werden jeweils die Endglieder der Datenreihen (Amplituden- und Talwert) betrachtet und die Zwischenwerte entsprechend einem Äquidistanzfaktor berechnet. Bei der Streckung steigt die Anzahl der Datensätze,

bei der Stauchung wir sie verringert.

Tab. 3.8: Prinzip und Beispiel einer linearen Streckung und Stauchung. Der enge Datenbereich wird auf den weiten Datenbereich bezogen und umgekehrt.

Datenbereich	Minimum	Maximum	Anzahl der Zwischenzeilen der		Streckungswert	Stauchungswert	Beispiel Streckung		Beispiel Stauchung	
			gestreckten Reihe	gestauchten Reihe						
weit	1	6		2			1	2	2	1
eng	2	5	4		0,6	1,67	2	2,6	3	2,7
							3	3,2	4	4,3
							4	3,8	5	6
							5	4,4		
							6	5		

(a) Prinzip

(b) Beispiel

Damit ist eine Stauchung mit einem Informationsverlust verbunden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass eine Streckung einen Informationsgewinn, zumindest in der räumlichen Auflösung, bedeutet.

Die **Prämisse** ist eine Bedingung, Annahme oder Voraussetzung. Sie ist ein Element des logischen Schließens (Konklusion), das mindestens zwei Prämissen benötigt. Dabei ist es unerheblich ob eine Prämisse wahr, wahrscheinlich oder falsch ist. Dabei können falsche Prämissen zu richtigen Konklusionen führen. Aus 'Lehmböden sind bindige Böden' und 'Bindige Böden sind tonreich' folgt 'Lehmböden sind tonreich'. Aus 'Braunerden sind terrestrische Böden' und 'Braunerden sind braun' führt zu der falschen Schlussfolgerung 'Terrestrische Böden sind braun'. Das muss jedoch nicht zwangsläufig so sein: 'Alle Waldböden sind nährstoffarm' und 'Podsole sind Waldböden' ergibt 'Podsole sind nährstoffarm'. Bei der Bewertung der Prämissen können verschiedene Erfülltheitsgrade berücksichtigt werden, die entsprechend den Methoden der Fuzzy-Mengen-Lehre angewendet werden. Diese Methoden führen i. d. R. zu einer Abschwächung der Prämissen (vgl. Abschnitt 3.2.2.1.1).

3.2.2.3 Defuzzifizierung

Im Prozess der Defuzzifizierung, der Schärfung, erfolgt die Umsetzung eines unscharfen Sachverhaltes in konkrete, rechenbare Zahlen und Werte. Als Defuzzifizierungsmethode hat sich die Schwerpunktmethode bewährt (Abbildung 3.13). Generell ist zu bemerken, dass jeder Operator und jede Methode an der Effizienz, dem Ergebnis und der Integrierbarkeit in ein bestehendes System zu messen ist.

Die **Methoden** der Defuzzifizierung dienen der Auswertung der Inferenzergebnisse. Bezüglich ihrer Effekte kann man robuste und sensible Defuzzifizierungsoperatoren unterscheiden. Eine Auswahl ist in der Tabelle 3.9 zusammengestellt. Robuste Operatoren (Maximum, Mini-

3 Theoretische Betrachtungen

mum) sind zwar schnell auszuwerten haben jedoch den Nachteil, dass sie nur die Extremwerte der Zugehörigkeitsgrade berücksichtigen. Die Mittelwerte der Zugehörigkeitsgrade hingegen haben einen aus- oder angleichenden Effekt zur Folge. Größter und kleinster Zugehörigkeitsgrad gehen in die Betrachtung mit ein. Die Summe zweier oder mehrerer unscharfer Mengen bewirkt eine Tendenzverstärkung.

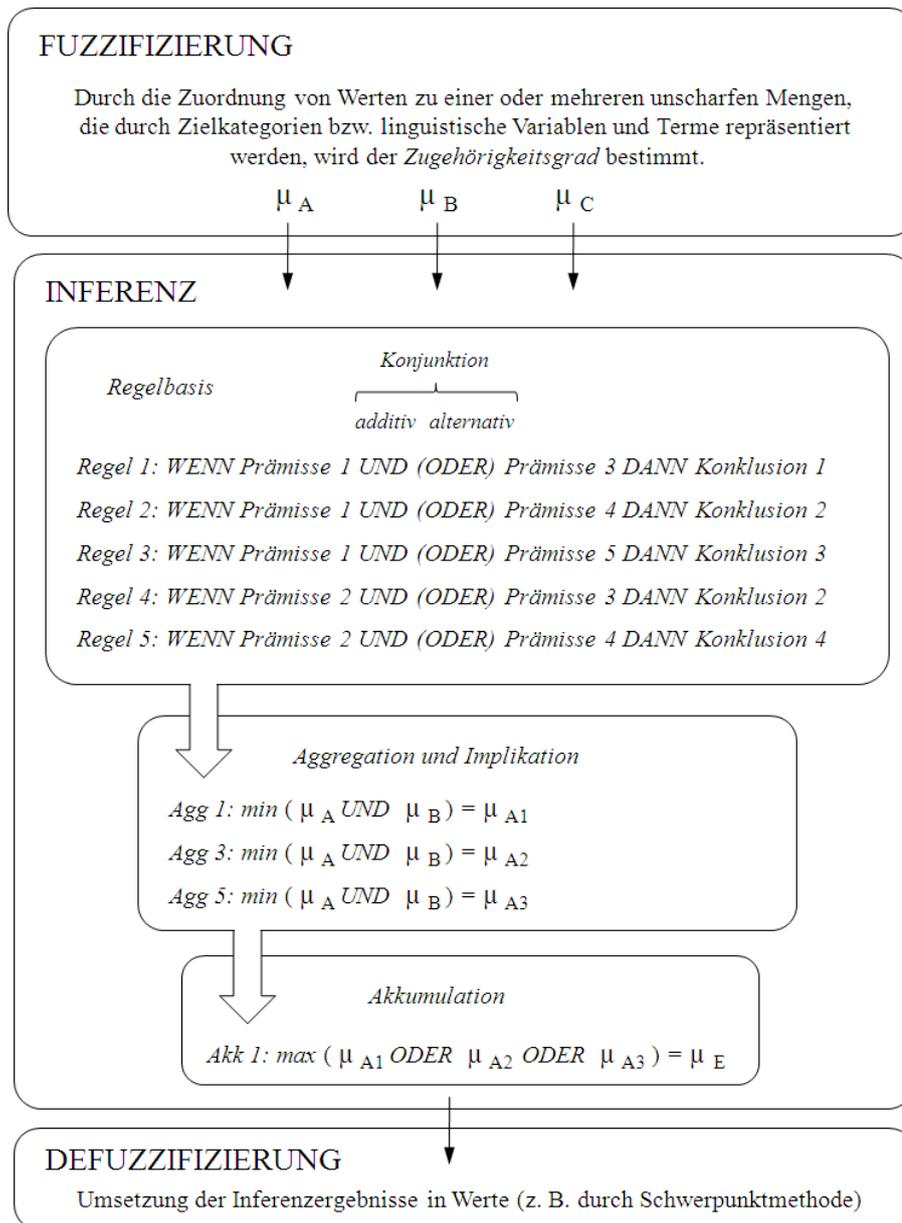


Abb. 3.12: Fließschema Fuzzy-Schritte. Hauptgegenstand der Fuzzifizierung ist Bestimmung der Zugehörigkeitsgrade. Bei der Inferenz wird die Regelbasis aufgestellt (siehe auch S. 125), die durch die Verknüpfung der Prämissen und die entsprechenden Konklusionen gekennzeichnet ist. Danach werden die Erfülltheitsgrade der Prämissen verknüpft (meist *Min*-Operator). Der auf diese Teilmengen angewendete *Max*-Operator liefert die Ergebnismenge für die im Prozess der Defuzzifizierung ein scharfer Wert berechnet werden kann.

Bei der *Maximum-Methode* wird nur der größte Zugehörigkeitsgrad verwendet. Das hat jedoch den Nachteil, dass kleinere Werte nicht berücksichtigt werden, solange sich der größte Zugehörigkeitsgrad nicht ändert. Die *Minimum-Methode* liefert analog den kleinsten Zugehörigkeitsgrad. Der arithmetische Mittelwert hat einen ausgleichenden Effekt. Eine Tendenzverstärkung hingegen bewirkt die *Summen-Methode*. Die Summe der Zugehörigkeitsgrade ist in jedem Fall größer als der größte einzelne Zugehörigkeitsgrad.

Tab. 3.9: Fuzzy-Methoden (Auswahl)

Methoden	Beschreibung
Mittelwert	Die Zugehörigkeitsfunktionen werden gemittelt (arithmetisch, geometrisch, gleitend).
Summe	Die Zugehörigkeitsfunktionen werden addiert.
Max/Min (Clipping)	Zugehörigkeitsfunktionen werden in Höhe der jeweiligen Zugehörigkeitsgrade abgeschnitten.
Max/Prod	Zugehörigkeitsfunktionen werden mit dem Wert der jeweiligen Zugehörigkeitsgrade multipliziert.
Singletons	Einzeldarstellung der Zugehörigkeitsgrade.
Teilschwerpunkte	Die Zugehörigkeitsfunktionen werden in geometrische Figuren zerlegt, die eine einfache Berechnung der Schwerpunkte erlauben.
α -Schnitt	Menge aller Elemente, deren Zugehörigkeitsgrad mindestens α beträgt

Ein gleitender α -Schnitt wird für die Ausweisung von Kern- und Übergangsbereichen in verschiedenen Maßstabsbereichen vorgeschlagen. Ein α -Schnitt im großen Maßstab wird bei hohen, im kleinen Maßstab bei niedrigen Zugehörigkeitsgraden durchgeführt. Das bedeutet das mit kleiner werdendem Maßstabsbereich die Unschärfe zunimmt.

Bei der *Schwerpunktmethode* wird der Schwerpunkt der geometrischen Form der resultierenden Fuzzy-Menge berechnet. Die Abbildung 3.13 zeigt einen solchen Schwerpunkt. Der Schwerpunkt der grau eingefärbten Teilfläche (Schnittmenge der Humusklasse 10 bis 20% und der Menge 'organische Böden') liefert bei einem Humusgehalt von ca. 17% ein Zugehörigkeitswert von etwa 0,2.

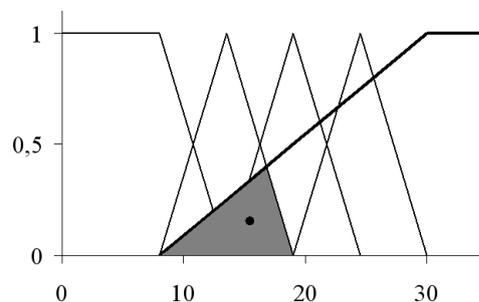


Abb. 3.13: Teilmengen und Flächenschwerpunkt. Beispiel aus der Abbildung 3.6 (b)

3 Theoretische Betrachtungen

Im Ergebnis einer Defuzzifizierung der Zielkategorien liefert die Schwerpunktmethode einen Wert, der die Zielkategorie angibt, die für den jeweiligen Pixelstapel bestimmend ist. Die Berechnung wird flächendeckend für die ordinalskalierte Reihe des Stapels der Zielkategorieebenen durchgeführt. Die ordinalskalierte Reihe ergibt sich aus der Gewichtung der Zielkategorieebenen. Die Berechnung der Schwerpunkte erfolgt gleitend, jeweils für die von den Zugehörigkeitswerten aufgespannten Teilflächen. Die Teilflächen sind jedoch keine Rechtecke, da hier der Schwerpunkt immer genau im Zentrum der Teilflächen liegen würde, sondern Rechtecke mit aufgesetzten Dreiecken. Das hat den Vorteil, dass durch die Winkel- und Längenverhältnisse der Hypotenuse des Dreiecks der Trend zur jeweiligen Nachbarseite im Schwerpunktwert enthalten ist. Die Abbildung 3.14 verdeutlicht, dass bei absteigenden und aufsteigenden Trendverhältnissen der Zielkategorienwert des Schwerpunktwertes immer zum höheren Zugehörigkeitswert verschoben ist. Dies ist bei einer Betrachtung der Teilflächen als Rechtecke nicht gegeben. Der in den Zugehörigkeitswerten auftretende Nivellierungseffekt kann als Nachteil angesehen werden. Für die Zugehörigkeitswerte könnte jedoch ggf. die Methode der gleitenden Mittelwerte herangezogen werden.

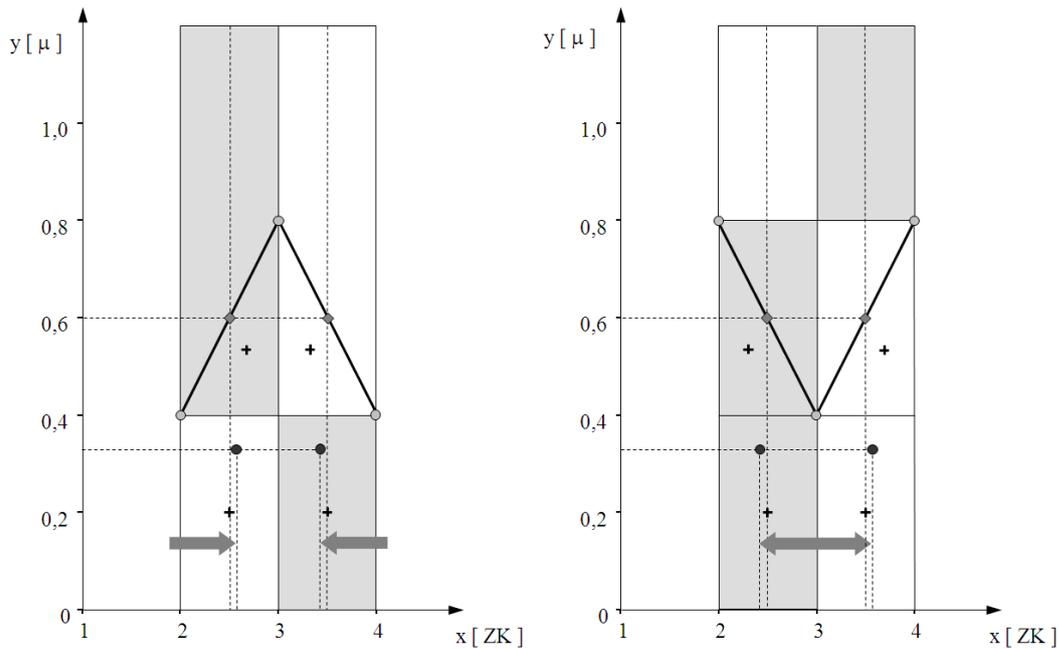


Abb. 3.14: Prinzip der Schwerpunktmethode. *Links:* konvergente Schwerpunktverschiebung bei geringeren Werten der Nachbar-Zielkategorien; *Rechts:* divergente Schwerpunktverschiebung bei höheren Werten der Nachbar-Zielkategorien (Legende siehe Abbildung 3.15).

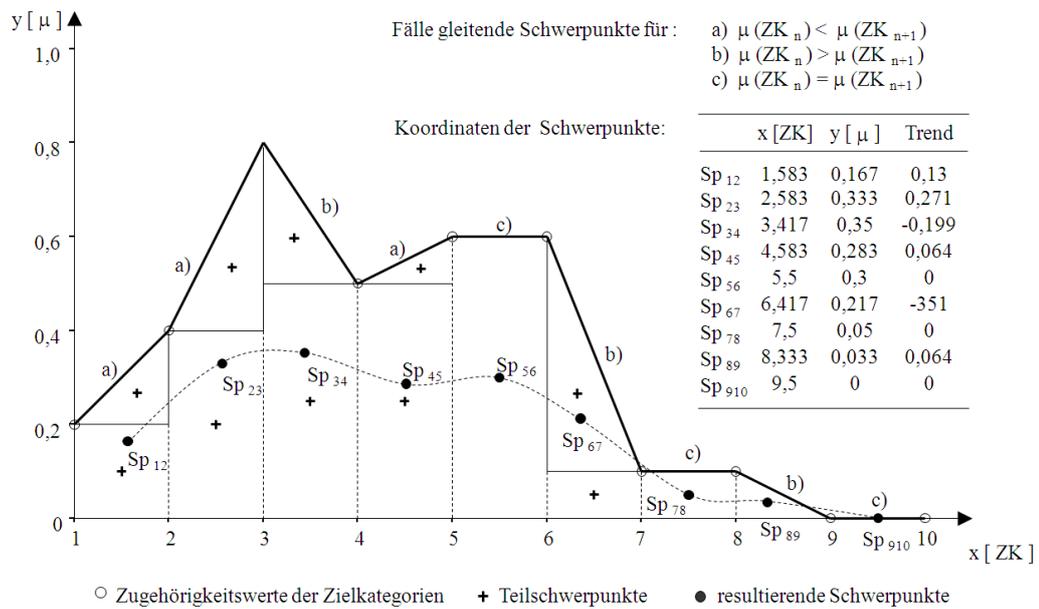


Abb. 3.15: Beispiel für die Anwendung der Methode der gleitenden Schwerpunkte für die Zielkategorien. Bei dieser Methode spiegelt sich in den Ergebniswerten der Trend wieder.

Bezogen auf die Analyse von Inhalt und Raum ist zu bemerken, dass der inhaltliche, wertebegleite Schwerpunkt gegenüber dem räumlichen, flächenformbezogenen verschoben ist. Diese Inkongruenz ergibt sich bei heterogenen Flächeneinheiten. Sie ist um so größer:

- je größer die Fläche (Polygon, Segment, Areal),
- je komplizierter die Flächengestalt und
- je heterogener der Flächeninhalt ist.

Die Schwerpunkte sind durch ihre x-, y- und z- Koordinaten gekennzeichnet. Die z-Koordinate beim geometrischen Schwerpunkt ergibt sich aus dem normierten Flächengrößenwert. Die z-Koordinate des Inhalts ergibt sich aus der resultierenden Tiefenlage des bestimmenden Merkmals bzw. der Zielkategorie (Abbildung 5.21, S. 138). Je kleiner die Koordinatendifferenz der Schwerpunkte ist, desto stärker ist die Inhalt-Raum-Bindung und desto besser ist das Aggregationsergebnis.

3.2.3 Entscheidungstheoretische Betrachtungen

Bei der Kombination und Verschneidung von Informationen kommt es unweigerlich zu Zielkonflikten (vgl. Abschnitt 5.1.1.2). Diese können einerseits zwischen den einzelnen Zielkategorien auftreten (extrakategorial) und andererseits innerhalb dieser (intrakategorial). Nach

3 Theoretische Betrachtungen

ROMMELFANGER & EICKEMEIER (2001) können Zielkonflikte z. B. durch eine Zielgewichtung gelöst werden. Es unterscheiden sich Systeme nur im Informationsstand über die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Umweltzustände und der Konsequenzen (Nutzenwerte). Dabei werden vollkommene und unvollkommene Informationssysteme unterschieden. Der 1. Fall tritt sehr selten auf, da hier ein direkter Zusammenhang von Information und Zustand besteht. Öfter kommt es vor, dass weniger Informationen als Zustände vorhanden sind. Auch im Falle bedingter Wahrscheinlichkeit von Informationen kann nicht mit Sicherheit auf einen Zustand geschlossen werden. Demzufolge unterscheidet man Systeme die zu einer Sicherheits-, Ungewissheits- und Risikosituation führen. Diesen Charakter tragen die Entscheidungen, die aus dem Bewertungsprozess dieser Systeme hervorgehen. Es kann sein, dass die Informationen, die aus einer Ungewissheitssituation kommen, jedoch das Hauptziel bedienen sollen. Hier muss auch im Entscheidungsergebnis deutlich werden, dass die Lösung aus solch einer Situation heraus gefunden wurde.

Bei mehreren Zielen existiert im Idealfall eine ideale, perfekte, dominante oder gleichmäßig beste Lösung. Sehr wichtig für Entscheidungen sind Präferenzen (Vorzüge) und Präferenzordnungen, die durch folgende Prinzipien unterstützt werden können:

- Transformationsprinzip (schritt- und Paar weiser Vergleich der Zielgrößen)
- Zielgewichtung (faktorielle Verstärkung oder Abschwächung)
- Lexikografische Ordnung (vom Experten vorgegebene Rangfolge)
- K.O.-Kriterien (Auslöschung, wenn bestimmte Minima, Maxima unter-/überschritten werden)
- Körth-Regel (Maximierung des relativen Zielerreichungsgrades)

Besondere Beachtung in dieser Arbeit findet die lexikographische Ordnung, die hier die Präferenzen für die Entscheidung der Legendenbildung durch die Segmentierung des Stapels der Zugehörigkeitsebenen regelt. Es kommt vor, dass sich die Präferenzen gegenseitig beeinflussen oder gar beeinträchtigen. Die Bewertung einzelner Ergebnisse ist jedoch nur bei Präferenzunabhängigkeit sinnvoll. Diese erreicht man u. a. wenn präferenzabhängige Zielgrößen zu einer übergeordneten Zielgröße zusammengefasst werden. Diese erfolgt z. B. durch die Einführung der abstrakteren, hierarchisch höher angesiedelten Kategorie 'Bindigkeit', die die Kategorien der Bodenarten Sand, Lehm, Schluff und Ton vereinigt. Die Kategorie 'Wassereinfluss' fasst die Kategorien Grundwassereinfluss und Stauwassereinfluss zusammen. Folgende wechselseitige Präferenzbeeinflussungen sind möglich:

Tab. 3.10: Präferenzbeeinflussungen nach ROMMELFANGER & EICKEMEIER (2001)

Art der Präferenzbeeinflussung	Wirkung
- indifferent / neutral	ohne gegenseitige Beeinflussung
- konkurrierend / konfliktär	Beeinträchtigung des Realisierungsgrades
- komplementär / harmonisch	Steigerung des Realisierungsgrades
- symmetrisch	wechselseitig, Umkehrung gilt
- asymmetrisch	Umkehrung gilt nicht

Die folgende Abbildung 3.16 verdeutlicht zusammenfassend den Prozess der Entscheidungsfindung, ausgehend von einer wissensbasierten Bewertung eines realen Umweltzustandes.

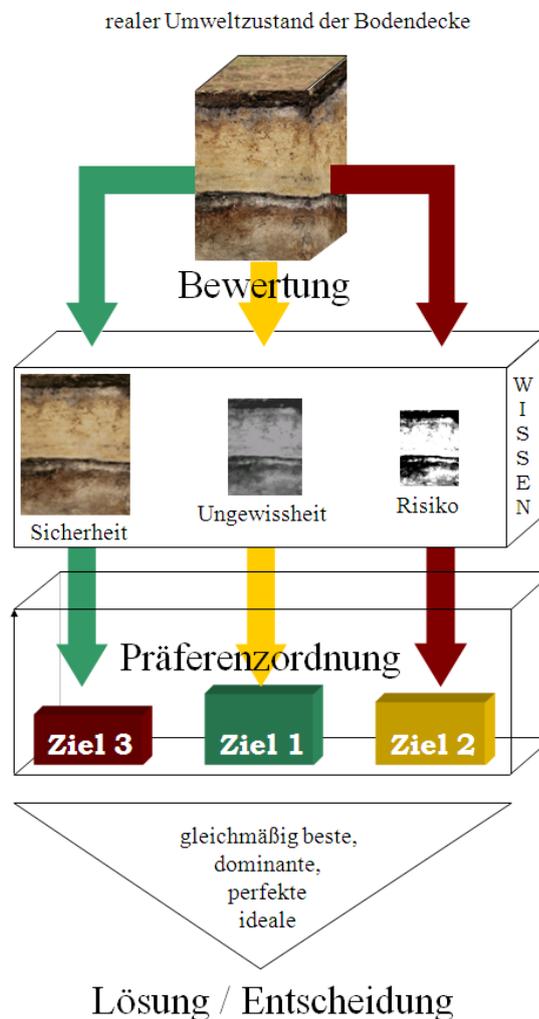


Abb. 3.16: Die Bewertung natürlicher Phänomene führt zu einer Sicherheits-, Ungewissheits- oder Risikosituation. Die Präferenzordnung definiert, z. B. durch die Zielgewichtung, die Wichtigkeit der Ziele. Diese Ziele sind u. U. durch die verschiedenen Wissenssituationen unterschiedlich bedienbar. Die Berücksichtigung der Präferenzbeeinflussung ermöglicht die Entscheidung.

3 Theoretische Betrachtungen

Konkurrierende Präferenzbeeinflussungen erschweren die Entscheidung. Eine Methode zur Lösung dieses Konfliktes ist, wie erwähnt, die Zielgewichtung, die über eine partielle Nutzenbewertung eine Bestimmung des Gesamtnutzens erlaubt. Beim Vorliegen mehrerer Ziele ist der Aufbau eines hierarchischen Zielsystems anzustreben. „Bei der Bewertung ... wird letztlich so vorgegangen ..., die Gewichte der Basiskriterien werden mit Hilfe der aufgebauten Zielhierarchie bestimmt: Das Gewicht für jedes Basisziel errechnet sich als Produkt der Stufengewichte über die Kanten, die vom Basisziel zum Gesamtziel führen. Ist auf diese Weise für jedes Basisziel das Gewicht ermittelt, wird die Summe ... gebildet“ (ROMMELFANGER & EICKEMEIER, 2001). Der höchste Wert wird ausgewählt. Weiterhin ist die Frage zu stellen inwieweit eine lineare Entscheidungsregel die Aggregation des Gesamtnutzens wiedergibt. Verschiedene Autoren (zit. in: ROMMELFANGER & EICKEMEIER (2001)) haben bewiesen, dass eine additive Entscheidungsregel vorliegen muss, wenn eine starke Präferenzunabhängigkeit gegeben ist, die Ziele substituierbar sind und die Präferenzordnung (hier lexikographisch) relativ schwach ist.

Tab. 3.11: Nutzwertanalyse und Fuzzy-Entscheidungsmodellierung nach MANDL (2004)

Phase	Nutzwertanalyse	Fuzzy-Entscheidungsmodellierung
1	Aufgabenbeschreibung: Zielsystem	Beschreibung: Fuzzy-Modell
2	Daten: Kriterien, Zielerträge	Daten: Variablen (Prämissen / Ziel), Fuzzy-Sets, Werte / Regeln
3	Normierung: Zielerfüllungsgrade	Fuzzifizierung: FMF-Werte / Kompatibilitätsmaß, Aggregationsoperator
4	Gewichte: Kriteriengewichte	Gewichtung: Gewichte / Vertrauensmaß
5	Wertsynthese: Teilnutzwerte, Nutzwerte	Inferenz: Verknüpfungs-, Inferenz- und Akkumulationsoperator
6	Präferenzordnung der Alternativen	Defuzzifizierung: linguistische Approximation
7	Konfliktbereinigung	Mehrfachergebnis: FMF-Werte für Zielalternativen
8	Diskrete Entscheidung: holistische Kriterien	Diskrete Entscheidung

Die Entscheidung für ein 'Ja' oder 'Nein' wird meist getroffen, wenn ein holistischer (ganzheitlicher) Schwellenwert (siehe Tabelle 3.11), der sich wiederum aus Schwellenwerten zusammen setzt (Entscheidungsbaum), über- oder unterschritten wird. Dabei ist eine vom Experten vorgenommene Setzung von Schwellenwerten problematisch, weil so möglicherweise eine Entscheidung 'vorgegeben' wird, die bei veränderten Ausgangsbedingungen evtl. anders ausfallen würde. Das Entscheidungsmodell sollte also weniger statisch, sondern aus sich selbst heraus entwickelbar sein.

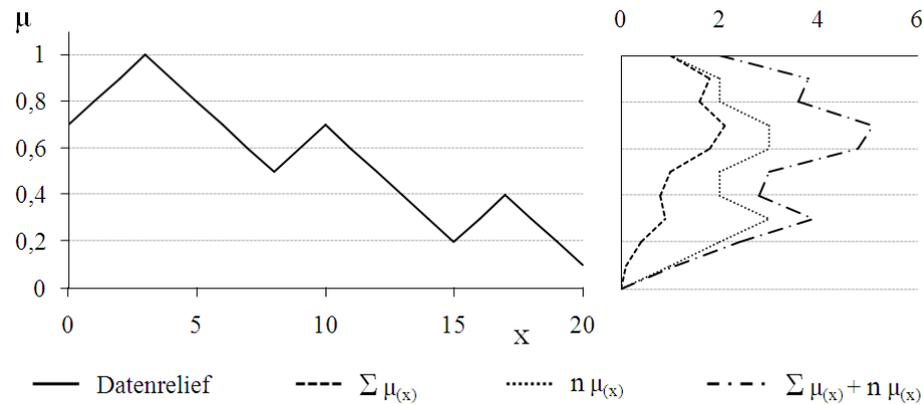


Abb. 3.17: Entscheidungshilfe für z. B. die Analyse von Transektdaten. Es wird das Datenrelief gleitend horizontal geschnitten. Die Maximalwerte markieren so Schwellenwerte für Datenreliefanalysen ($\Sigma \mu_{(x)}$: horizontale Summe der Zugehörigkeitswerte; $n\mu_{(x)}$: horizontale Anzahl der Zugehörigkeitswerte).

Eine mögliche Hilfe bietet das in Abbildung 3.17 dargestellte Verfahren. Dabei werden zwei- oder dreidimensionale Datenreliefs gleitend horizontal geschnitten. Die Zugehörigkeitswerte werden summiert. Es ergibt sich eine Art vertikale Verteilungsfunktion, deren Maxima mögliche Schwellenwerte markieren. Entsprechend der Abbildung 3.17 würde ein Schwellenwert $\mu_{THV} = 0,7$ festgelegt werden können.

3.2.4 Evidenztheorie nach DEMPSTER & SHAFER

Die DEMPSTER-SHAFER-Theorie (zit. in: BURGER (1992)) unterscheidet zwischen der Wahrscheinlichkeit $P(A)$ eines Ereignisses T und dem Wissen über dieses Ereignis $Bel(A)$ (Glaubens- bzw. Verdachtsfunktion). Jedem Element bzw. jeder Teilmenge einer definierten Menge (Klasse) kann bezüglich einer Evidenz (Klarheit, Offenkundigkeit, Fakt) ein positiver Verdacht zugeordnet werden. Er ergibt sich aus einer aus den Häufigkeiten der in einer Klasse enthaltenen Elemente abgeleiteten Wahrscheinlichkeit. Neben diesem positiven, wirklichen Verdacht existiert noch ein möglicher Verdacht, der die subjektive 'Denkbarkeit' beschreibt. Der positive Verdacht ist immer kleiner als der mögliche Verdacht. Was unwahrscheinlich ist, kann möglich, was unmöglich ist kann jedoch nicht wahrscheinlich sein. Der positive Verdacht ist Teilmenge des möglichen Verdachts. Im Prinzip werden hier Zugehörigkeiten mit Wahrscheinlichkeiten untersetzt. Auf Hochflächensanden wird kaum eine Grundvergleyung auftreten, ist aber denkbar, ein Moor wird jedoch nicht verbraunt sein können. Das Verhältnis der Verdachtsmomente zeigt die Abbildung 3.18 b). Von 0 bis zum positiven Verdacht reicht die objektiv begründbare Wahrscheinlichkeit des Verdachtes, daran an schließt sich ein Bereich der Unwissenheit, der in einen der Ablehnung des Verdachtes übergeht.

Die Kombination von Hinweisen auf eine zu erzielende Aussage erfolgt durch die DEMPSTER-

3 Theoretische Betrachtungen

TER'sche Kombinationsregel, die graphisch als Matrix in der Abbildung 3.18 a) dargestellt ist. Die DEMPSTER-SHAFER-Theorie stellt gewissermaßen eine Verdachtsfilterung für das kausale Zutreffen einer Möglichkeit bzw. der Kombination von Möglichkeiten dar. SPIES (1989B) beschreibt diesen Sachverhalt anschaulich in Form der sog. Plausibilitätsintervalle.

Eine Interpretation der DEMPSTER-SHAFER-Theorie ist das 'Transferabel Belief Model (TBM)', das DOBERS (2005) für die Hypothesenstützung von Bodenformenableitungen aus Bodenschätzungsklassen unter Einbeziehung von elektrischen Leitfähigkeits- und DGPS-Ertragsdaten nutzt.

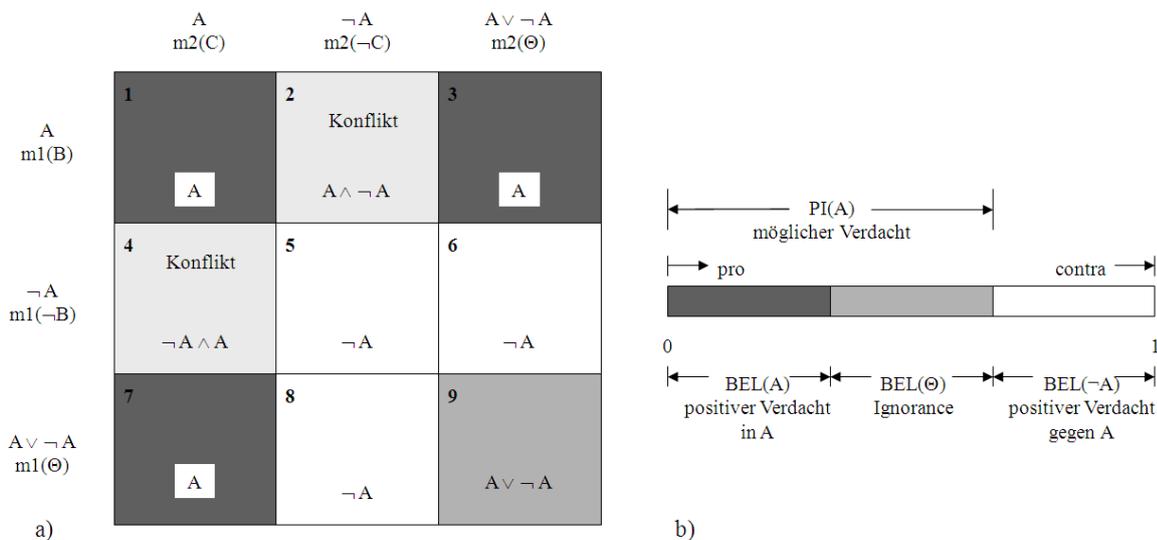


Abb. 3.18: Evidenztheorie nach DEMPSTER & SHAFER; a) Matrix der Kombinationsregeln, b) Verdachtsmomente (aus BURGER (1992))

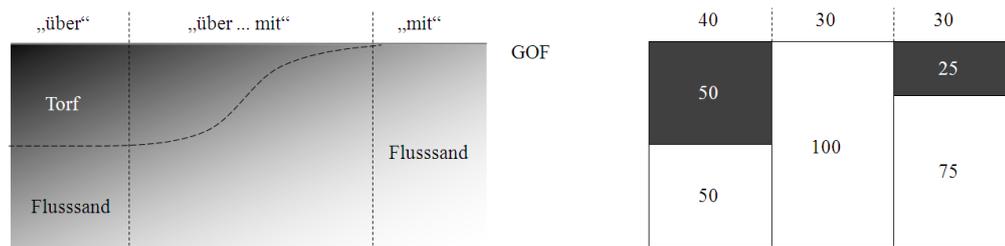
3.3 Regionalisierung von Bodenmerkmalen

3.3.1 Vergesellschaftungen und Sequenzen

Vergesellschaftungen (Inventarprinzip)

Böden treten mehr oder weniger vergesellschaftet auf. Die Anzahl, sowie die Art und Weise der Zusammensetzung der Individuen bestimmt den Charakter der Gesellschaft. Die genetische Bindung der Individuen kann in einer Bodengesellschaft unterschiedlich stark sein. In Karten werden die Vergesellschaftungen durch die Inventarbeschreibungen der Bodenformen für die Flächen ausgedrückt. Auf hohem hierarchischem Niveau (Kartenlegende) werden meist die Wörter, die hier auch als linguistische Variablen aufgefasst und behandelt werden können, 'und' und 'mit' verwendet. 'Und' kennzeichnet einen Anteil der begleitenden Bodenform von etwa 50%, während 'mit' deutlich unter 50% liegen würde. Das folgende Beispiel ver-

deutlicht, dass 'über' ebenfalls die Bedeutung von 'und' und 'mit' in vertikaler Richtung bzw. Nachbarschaft besitzt. Auf das Bodenareal bezogen heißt das, dass das Verhältnis der Bilanzen der Schichtmächtigkeiten und Flächenanteile der Bodenformen ausgewogen sein muss. Das bedeutet auch, dass Schichtungen immer auch ihre Korrespondenz in der horizontalen Nachbarschaft besitzen. Dies trifft besonders für Kontinuen, besonders jüngere Bildungen zu. Ein 'Torf über Flusssand' muss also in seiner Nachbarschaft einen 'Flusssand' besitzen. Den Grund liefert die Wirkung der erosiven Freilegung, die vertikale Grenzen zu horizontalen Grenzen werden lässt.



(a) Übergang eines vertikalen in einen horizontalen Wechsel (von 'über' nach 'mit' bzw. 'und'). Dieses Übergangsphänomen tritt durch die reliefbildende Erosion (Akkumulation) konkordant lagernder Schichten auf.

(b) Volumenbilanzierte Substratangaben für Torf (schwarz) und Flusssand (weiß). Die Zahlen in den idealisierten Bodenprofilen stellen die Schichtmächtigkeiten, darüber die Flächenanteile bezogen auf die Kartiereinheit, dar.

Abb. 3.19: Übergang von 'über' nach 'mit' und volumenbilanzierte Substratangaben.

Das Beispiel in Abbildung 3.19 (b) verdeutlicht das Prinzip der volumenbilanzierten Ausweisung der Substrate bzw. der Bodenformen und ihrer Schichten für ein Bodenareal. Demnach wäre der Volumenanteil des Flusssandes 3-mal so hoch wie der des Torfes. Bei dieser Bewertungsmethode muss berücksichtigt werden, dass eine Entkoppelung des natürlichen Bodenprofils stattfindet. Diese hätte für die Einbeziehung von Analysenwerten eine nachteilige Auswirkung.

Sequenzen

Eine Sequenz kennzeichnet eine Folge, eine Reihe oder eine Aufeinanderfolge. Bei der Bodensequenz werden dabei Boden prägende Gesichtspunkte angesetzt, die diese Abfolge charakterisieren. Gebräuchliche Bodensequenzen stellen die Klima- und Reliefsequenz (Catena) dar. Die Catena (lat. Kette) ist eine primär vom Relief geprägte Bodenabfolge. Der Begriff wurde von MILNE (1935) eingeführt und von SCHMIDT (1978) maßgeblich für die praktische und theoretische Bodenkartierung weiterentwickelt. Es handelt sich weitestgehend um einen linearen Landschaftsausschnitt (Vertikalschnitt) der eine charakteristische, auf andere ähnliche Reliefverhältnisse übertragbare Bodenentwicklung zeigt. Das Catena-Prinzip bildet ein

3 Theoretische Betrachtungen

der wichtigsten theoretischen Elemente des Gedankengerüsts für den kartierenden Bodenkundler und für die Modellierung des Bodenkörpers. Wichtige Merkmale einer Catena zeigt die Abbildung 3.20.

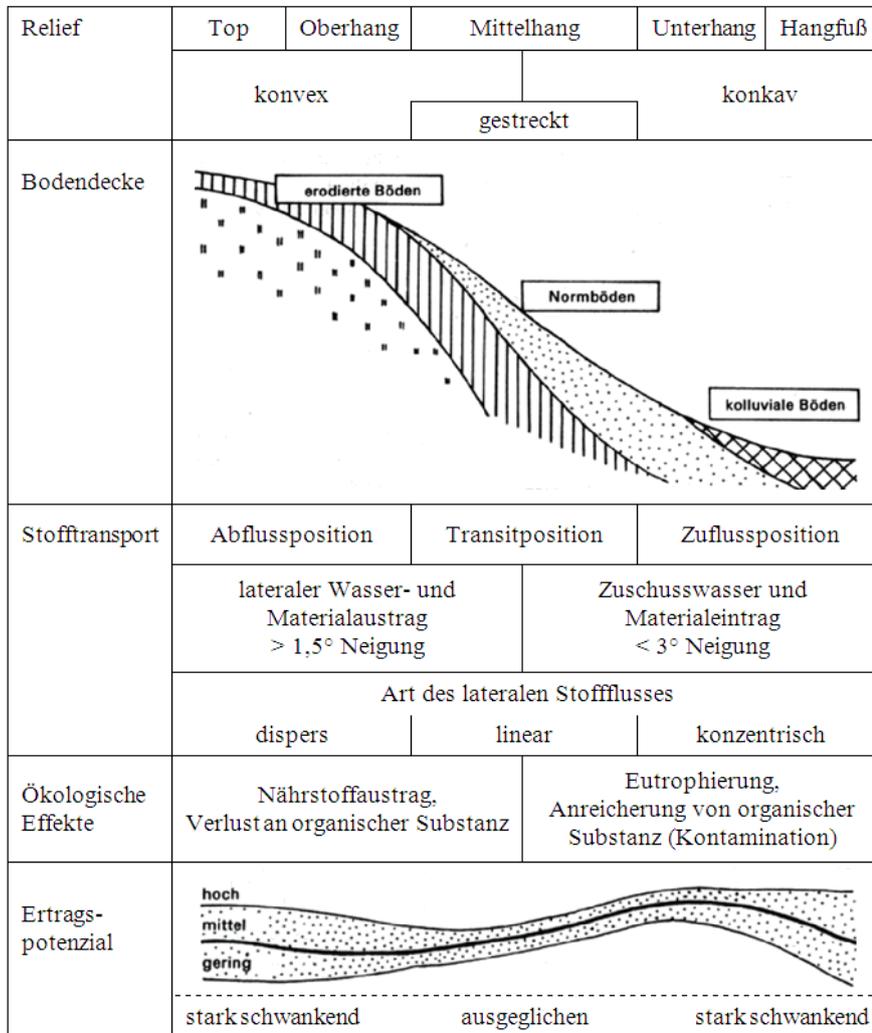


Abb. 3.20: Merkmale einer Bodencatena im Jungmoränengebiet nach SCHMIDT (1991)

Nach BROWN (2006) wird etwa seit Mitte des 19. Jahrhunderts die Diskussion um das Catena-Konzept geführt. Dabei wurde die Frage aufgeworfen, ob die Catena die geographische Vergesellschaftung oder die taxonomische Gruppierung der Böden berücksichtigen sollte. Heute wird MILNE's ursprünglicher Catena-Begriff als 'Gesellschaft aus geographisch regelhaft in Verbindung stehender Böden' aufgefasst. Das Catana-Konzept ist auch die methodische Grundlage für die von SOMMER (1992) durchgeführten Untersuchungen zu Stoffflüssen in der Landschaft. Auf Grund wiederkehrender Muster können fünf Stofftypen gefunden werden. Der Ansatz stellt einen Brückenschlag zwischen Bodengesellschafts- und Catena-Prinzip dar.

Generell kann das Catena-Prinzip als linienhaft, gerichtetes, gradientenbasiertes Übertragungsverfahren angesehen werden, während das Bodengesellschaftsprinzip eher für die flächenhaft, verteilungsbasierte Bewertung geeignet erscheint. Streng genommen stellen also auch die Böden einer Catena eine Gesellschaft dar. Jedoch in Verbindung mit dem Heterogenitätsbegriff scheint dies nicht zulässig, da sich die Merkmale oder Eigenschaften in diesem Fall stark unterscheiden und sprunghaft ändern können. Vereinfacht kann die Bodengesellschaft als die Überlagerung von n-Catenaen (besser Sequenzen) angesehen werden. Diese gesetzmäßigen Abfolgen unterscheiden sich in ihren Richtungen und erzeugen so die Heterogenität. Der Heterogenitätsbegriff an sich ist nur im Zusammenhang mit Gesellschaftsaspekten der Bodenbedeckung sinnvoll anwendbar.

3.3.2 Heterogenität und Maßstabsproblematik

Auf den grundsätzlichen Zusammenhang von bodenförmlichen Inhalt und dessen räumlicher Repräsentation ist bereits eingegangen worden. Eine Transformation in andere Maßstabsbereiche bedeutet immer eine Änderung der Komponenten Inhalt und Raum (Abgrenzung) selbst, sowie auch des im Ausgangsmaßstab festgelegten Zusammenhangs (Inhalt-Raum-Bindung). Dabei sind hierarchisches Niveau und Maßstab stets gekoppelt. Eine Maßstabsverkleinerung führt zu einem höheren („gröberen“) Niveau. Prinzipiell ist, bezogen auf einen Ausgangsdatenbestand, nur eine Maßstabsverkleinerung (Aggregation) sinnvoll.

Eine Systematik für die Gliederung von Böden und deren Aggregation in Abhängigkeit vom Maßstab gibt GEHRT *et al.* (1992) in Tabelle 3.12. Die sieben Stufen sind von der KA5 (2004) in die Bodenkundliche Kartieranleitung aufgenommen worden. Die Faktoren, die den Charakter der Karte bestimmen, ändern sich mit den unterschiedlichen Maßstabsstufen. Die Aggregierungsstufen werden über den bodenkundlichen Inhalt definiert. Die Wirkungsfaktoren und die Art der Zusammenfassung sind von Stufe zu Stufe unterschiedlich und spezifisch. Eine Disaggregation benötigt immer weitere, differenzierende Daten. Eine formale Maßstabsvergrößerung ist nicht zulässig bzw. möglich und widerspricht der für diese Methode gewählten induktiven Herangehensweise. Bei einer Maßstabsverkleinerung erfolgt eine ‚Vergrößerung‘. Diese bedeutet für den Inhalt ein höheres hierarchisches Niveau der Objekte und für den Raum größere Areale. Da die Inhalt-Raum-Bindung immer schwächer wird, löst sich quasi der Inhalt in seiner räumlichen Zuordnung auf (vgl. Abschnitt 5.3.1.1). Das Ende der Transformation ist die Konfusion. Das bedeutet die Karte besteht aus nur einem Pixel (Punkt mit einem Maximum an inhaltlicher und räumlicher Unschärfe; vgl. Abbildung 5.23). Die Integration unterschiedlicher Maßstäbe bei der Konzeptkartenerstellung erfolgt durch den unter Abschnitt 3.2.2.1.1 genannten Maßstabsoperator. Bei der MMK beispielsweise, die für den Zielmaßstab 1 : 100 000 erstellt wurde, werden die Flächeninventare abgeschwächt nachdem ein auf die gesamte Fläche bezogener mittlerer Inhalt berechnet wurde. Dieser Inhalt ist also monotypisch und wird

3 Theoretische Betrachtungen

Tab. 3.12: Aggregierungsstufen nach GEHRT *et al.* (1992)

Stufe	Bodenkundlicher Inhalt	Wirkungsfaktoren	Kriterien der Zusammenfassung	Darstellungsebenen / Maßstab	Bezeichnung nach HAASE (1978) / SCHRÖDER (1968)
7	Bodenregion (BR) mit wenigen übergreifenden dominanten Richtungen der Bodengnese	Großstrukturengruppe mit grundsätzlichen Unterschieden in der landschaftlichen Ausprägung	geomorphologisch begründete Bodenlandschaften, die Grenzen werden in Abstimmung zwischen den geologischen Landesämtern konventionell festgelegt und in einer Übersichtskarte dargestellt	1 : 1 Mio. und kleiner	Pedoregion Bodenprovinz
6	Bodengroßlandschaft (BGL) mit einheitlicher Verteilungsform und wenigen dominanten Boden-genesen	geologisch-morphologisch begründete Großstruktur, Mesoklima führt zu dominanten Richtungen der Bodengnese		1 : 500 000	Pedomakrochore Boden- gebiet
5	Bodenlandschaft (BL) weniger Bodengesellschaften der Stufe 4, z. B. eine dominante Bodengnese	Gruppe ähnlicher geomorphologischer Strukturen, einzelne Faktoren bestimmen die Bodenhaupt-gnese (z. B. Klima- oder Lösprovinz)		1 : 200 000	
4	Gesellschaft weniger, gleichrangiger, heterotoper Leitbodenformen (LBC), Angabe des Klimaxbodens	hervortretende geomorphologische Struktur mit stofflichen Zusammenhang	bodenkundlich relevante geomorphologische Strukturen	1 : 100 000	Pedomesochore Boden- bezirk
3	Bodengesellschaft mit dominanter homotoper Leitbodenform (LBF)	Verbreitungsgebiet eines überwiegen- den Faktors mit lokalen Abweichungen	nach dominierendem Ausgangsgestein u. Pedognese	1 : 50 000	Pedomikrochore
2	heterogene Bodenformengesellschaften (BFG) mit nur geringen Abweichungen in der Bodengnese	landschaftsspezifisch hervortretend: Relief, Ausgangsgestein, Wassenhaushalt oder Mikroklima	nach arealbestimmendem Faktor	1 : 25 000	Pedotop
1	einheitliche homotope Bodenform (BF) mit einheitlichem Relief und gleichem Wasserhaushalt	alle Faktoren der Bodenbildung	keine	1 : 1 000 1 : 5 000	Poly- pedon Boden- einheit

durch die weitere Verschneidung modifiziert. Das bedeutet, ein vergleytes 'breites MMK-Tal' wird für den Bereich eines überlagerten vergleyten 'schmalen Geologie-Tals' für die Zielkategorie verstärkt. Die Information des nicht verstärkten Bereiches bleibt erhalten, tritt jedoch für die weiteren Ebenenverarbeitungen zurück. Bei künftigen Untersuchungen zur Maßstabsproblematik in den Geowissenschaften ist nach Meinung des Autors verstärkt die sog. 'fraktale Dimension' einzubeziehen. Fraktale zeichnen sich gegenüber euklidischen Formen dadurch aus, dass sie keinen endlichen Umfang haben. Die fraktale Dimension kann für Kurven in gebrochenen Dimensionszahlen (Dezimalzahlen) angegeben werden. Nach BLUM (2002) „drücken die Dimensionszahlen aus, wie schnell ihre Länge bei kleiner werdendem Maßstab gegen unendlich wächst.“ Zu bemerken ist hier, dass der 'kleiner werdende Maßstab' einem größer! werdendem Maßstab in den Geowissenschaften entspricht. Die Form an sich wird komplizierter ist jedoch stets selbstähnlich. FUCHS (2002) nutzt die fraktale Dimension bereits für die Analyse des Formeninventars von Polygoncovern.

3.3.3 Kern- und Übergangsbereiche

3.3.3.1 Allgemeine Betrachtungen

Bodenareale werden bisher scharf abgegrenzt, das heißt es entstehen diskrete Flächen, die zwar hinsichtlich ihres Bodenformeninventars bzw. -spektrums beschrieben werden, also Übergänge Berücksichtigung finden, aber Übergänge in der Flächenkonturierung bislang unberücksichtigt bleiben. Auf dieses Dilemma weist auch SCHOBESBERGER (2007) hin und bemängelt: „Die räumlichen Grenzen sind scharf und nicht fuzzy, nur die semantischen Attributgrenzen sind unscharf.“ Er stellt weiter fest: „Die Visualisierung von räumlich unscharfen Phänomenen ist komplexer als die Darstellung von Unschärfe in räumlich exakt abgrenzbaren Phänomenen.“

Die weiteren Betrachtungen fokussieren auf den Zusammenhang von räumlichen und inhaltlichen Übergängen, sowie auf den Kontinuitätscharakter der Pedosphäre. Anthropogen geprägte Böden wechseln eher diskontinuierlich zu ihren Nachbarn, während natürliche oder besser naturnahe Böden kontinuierliche Übergänge aufweisen. In der Landschaftsanalyse werden die räumlichen Übergangsbereiche als Ökotope bezeichnet (vgl. STEINHARDT *et al.* (2004)). „Jede natürliche Grenze ist in Wirklichkeit eine Übergangszone, die auch wieder ihre eigenen zwei Grenzen hat. Diese Grenzen wiederum sind auch Übergangszonen mit eigenen Grenzen und so weiter. Die Lokalisierung einer natürlichen Grenze ist schon vom Prinzip her nicht exakt und daher von Konventionen bestimmt“ (ARMAND, 1992).

Nach STEINHARDT *et al.* (2004) heißt das: „Ändert man die Betrachtungsebene, ändern sich auch die Charakteristika des Betrachtungsgegenstandes.... Obwohl wir Ökotope als Grenzen und Grenzsäume auffassen, sind sie Teil des Kontinuums der Landschaftssphäre. Unser Gehirn funktioniert allerdings so, dass Unterteilungen unserer Umwelt nötig sind um deren Kom-

3 Theoretische Betrachtungen

plexität in überschaubare Teile zu untergliedern. In diesem Sinne sind Ökotope als Grenzen dieser überschaubaren Teile anthropozentrisch definiert. Die theoretische Notwendigkeit der Grenzziehung ergibt sich aus dem Hierarchieprinzip, denn die Einordnung untergeordneter Landschaftseinheiten in die nächst höhere Ebene erfolgt durch die Grenzziehung.“

Des Weiteren ist die präzise Beschreibung von Bodenarealen durch zwei wesentliche Faktoren erschwert, da gewisse Unschärfen einerseits durch die Vagheit der Informationen und andererseits durch Zwänge in der Darstellung der Bodeninformationen (bisher noch 2D, Maßstab) existieren. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Bodenareale natürliche, unscharfe Mengen von Bodenformen bilden. Sie sind nicht eindeutig, d. h. scharf (inhaltlich und räumlich) abgrenzbar. Es existieren räumlich graduelle Übergänge, die im Kartenbild Entsprechung finden müssen. Die bisher in der Bodenkartenerstellung angewendeten Regeln beziehen sich in erster Linie auf die inhaltliche Flächenbeschreibung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass:

- Kartiereinheiten in Abhängigkeit vom Maßstab einen mehr oder weniger starken inneren und nachbarschaftlichen (äußeren) Kontrast besitzen (Abbildung 3.25),
- inhaltliche und räumliche Übergänge existieren,
- Bodenformen innerhalb eines Bodenareals natürliche Mengen bilden,
- bei scharfer Abgrenzung (Grenzlinien) von Bodenarealen ein (unstetiger) Qualitätssprung vorhanden ist, der auch vom Maßstab abhängt,
- das Erreichen der neuen Qualität des Nachbarareals durch ein allmähliches Hinüberwachsen und graduelle Übergänge erfolgt.

Generell wird hier davon ausgegangen, dass die Bodendecke in Analogie zur Landschaft sog. Kern- und Übergangsbereiche besitzt. Kernbereiche werden als relativ quasi-homogen angenommen. Übergangsbereiche vermitteln zwischen den Kernbereichen und sind Ausdruck der inhaltlichen, sowie räumlichen (horizontale und vertikale) Übergänge. Bei der Charakterisierung von Übergangsbereichen muss in Betracht gezogen werden, dass die Merkmale bzw. Merkmalskombinationen qualitative, quantitative und räumliche Dimensionen besitzen. Es werden folgende Annahmen gemacht:

- weiche Übergänge besitzen großräumig eine geringe inhaltliche Diversität, d. h. eine hohe räumliche, aber geringe inhaltliche Unschärfe,
- harte oder scharfe Übergänge besitzen kleinräumig eine hohe inhaltliche Diversität, d. h. geringe räumliche und hohe inhaltliche Unschärfe.

Beide Aussagen beziehen sich auf die jeweiligen Nachbareinheiten. In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, dass 3D-Darstellungen von Bodeneinheiten zumindest die räumliche Unschärfe mindern. In 2D-Bodenkarten erfolgt lediglich eine tiefenstufenbezogene Berücksichtigung der vertikalen Dimension. Generell steht man vor dem Dilemma einen n-dimensionalen Merkmalsraum in einen stets 3-dimensionalen Raum mit geographischem Bezug zu 'pressen'. Scharf im Sinne von eindeutig kann nur *ein* Merkmal räumlich abgebildet werden. In Raum und Zeit variierende Merkmale stehen einem 'statischen geographischen Raum' gegenüber. Die Abbildung 3.21 zeigt verschiedene Modelle für die Kombination räumlich unscharfer Objekte. Die Abbildung (c) repräsentiert das Modell, das dieser Arbeit zu Grunde liegt - Kernzonen werden durch unscharfe Übergangszonen voneinander getrennt.

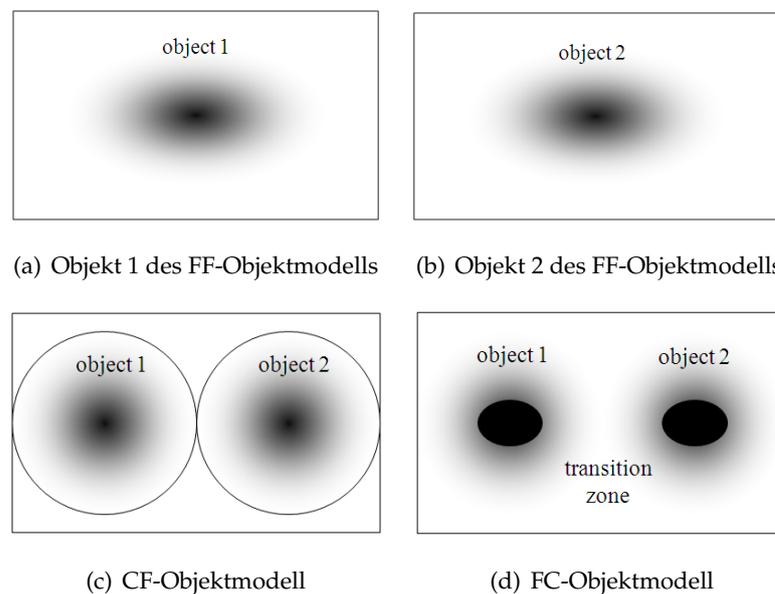


Abb. 3.21: Objektmodelle nach CHENG *et al.* (2001), FF: fuzzy-fuzzy, CF: crisp-fuzzy, FC: fuzzy-crisp. Die Abbildung (c) repräsentiert das Modell der Kern- und Übergangszonen.

Kernbereiche von Bodenartenschichtungen weisen MCBRATNEY & ODEH (1997) aus (Abbildung 3.22 a)). Die linguistische Variable 'über' kennzeichnet dabei den tiefenbezogenen Schwellenwertbereich des Bodenartenwechsels. Die horizontalen Übergänge sind weiß.

3 Theoretische Betrachtungen

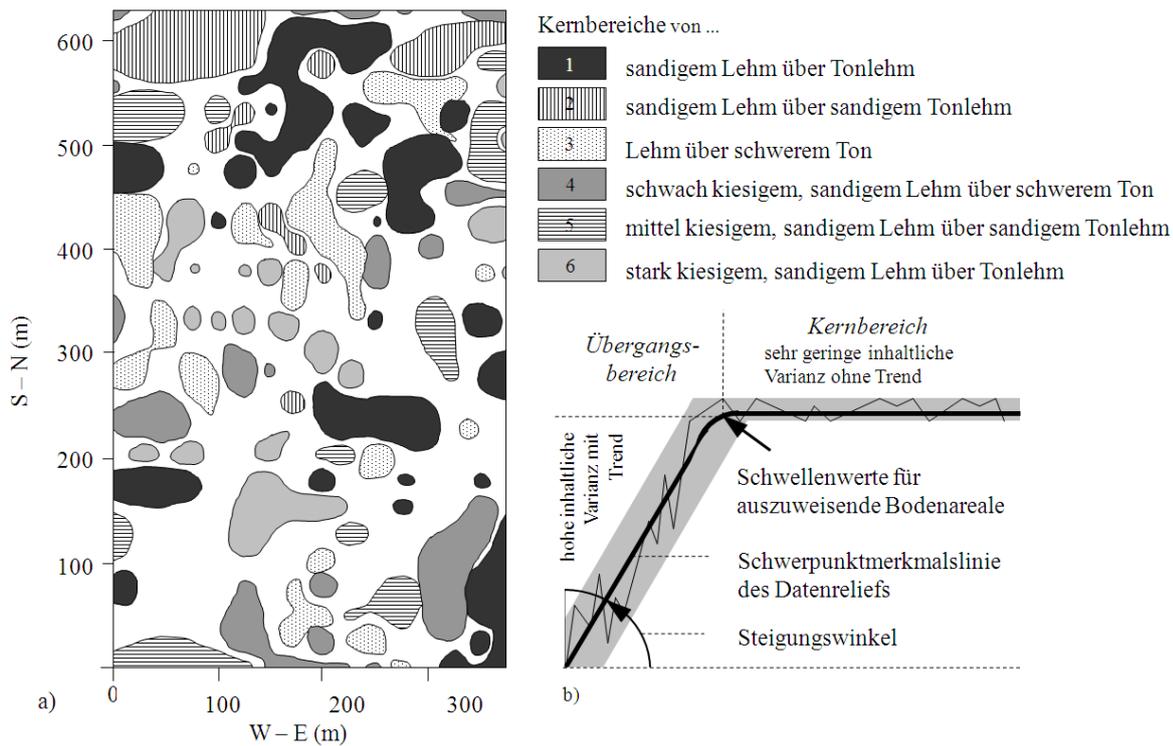
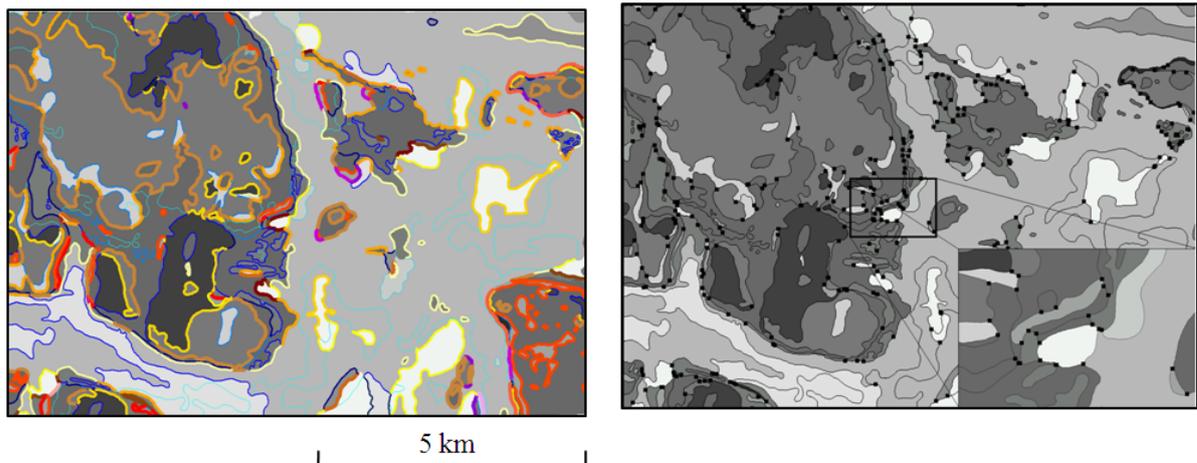


Abb. 3.22: a) Kernbereiche von Bodenartenschichtungen nach MCBRATNEY & ODEH (1997), b) Bereichsbreite und Tendenz von Merkmalen oder Merkmalsgruppen in Kern- und Übergangsbereichen

3.3.3.2 Übergänge und deren Typisierung

Bei der diskreten Flächenabgrenzung sind neben den Grenzlinien an sich auch deren Knotenpunkte (Knoten, nodes) bzw. -bereiche kritisch zu betrachten. Hier hat der Übergang weniger monodirektionalen sondern extrem polydirektionalen Charakter. Dieser Bereich ist quasi der Gegenpol des Kernbereiches. Es wird angenommen, dass ausgehend vom Kernbereich die Merkmalsänderung konzentrisch erfolgt, im Übergangsbereich zonal und im Knotenbereich diszentrisch. Der Übergang verläuft nicht 'von ... bis' sondern 'von ... über ... (und über)... bis', da der Einfluss des Nachbarareals hinzu kommt und stärker wird. Hier ist ein Maximum der Inhalt-Raum-Unschärfe erreicht. Die Abbildungen 3.23 und 3.24 verdeutlichen diesen Sachverhalt.



(a) Farblich markierte Grenzliniensegmente zur Hervorhebung der Übergangsstärke geologischer Einheiten; (blau=gering, lila=hoch)

(b) Knotenpunkte (engl.: *nodes*) der digitalisierten Geologischen Karte (siehe auch folgende Abbildung)

Abb. 3.23: Übergangsstärken und Knotenpunkte geologischer Einheiten; Ausschnitt Blatt Königs Wusterhausen (Glienicke Platte und Zossener Niederung)

Vom Kernbereich in Richtung Knotenpunkt steigt der Grad der Unschärfe, d. h. eine Zuordnung zu der einen oder anderen Fläche ist erschwert. Im Knotenpunkt können theoretisch die Inhalte sämtlicher Nachbareinheiten angetroffen werden.

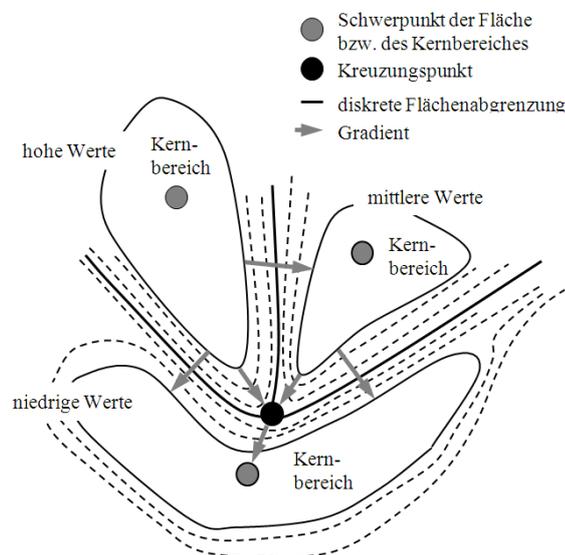


Abb. 3.24: Knotenpunkt diskret abgegrenzter Flächen als Inhalt-Raum-Unschärfbereich mit lokalem Maximum. Ein Knoten wird bei ausgewogenen Datenreliefverhältnissen meist aus 3, selten aus 4 Flächen gebildet. 5 oder mehr aneinanderstoßende Flächen sind nach Möglichkeit zu vermeiden, können jedoch bei sehr starkem Einfluss einer Datenreliefkomponente auftreten (z. B. Hochgebirgsrelief).

3 Theoretische Betrachtungen

Die Abbildung 3.35 (S. 64) zeigt Bodeneinheiten (z. B. Kartiereinheiten), dargestellt als Trapeze, in ihren quantifizierten Inhalten und räumlichen Ausdehnungen (eine horizontale Richtung). Die Kernbereiche werden durch die horizontalen Linien (Plateaus) repräsentiert. Sie sind, was auch für diskret abgegrenzte Einheiten gilt, durch einen inneren und äußeren (nachbarschaftlichen) Kontrast gekennzeichnet. Der innere Kontrast kann als Varianz der diese Einheit charakterisierenden Objekte betrachtet werden, während der äußere Kontrast den Unterschied zu den Nachbareinheiten darstellt. Beide sind ein Maß für die Homogenität / Heterogenität der Einheit an sich bzw. der Einheiten untereinander.

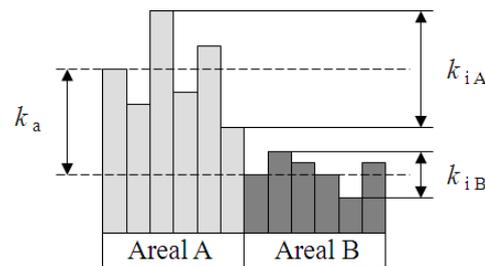


Abb. 3.25: Beziehung von innerem und äußerem Kontrast eines Bodenareals ohne Berücksichtigung von Übergangszonen. (K_a = äußerer Kontrast von Areal A und Areal B, K_{iA} = innerer Kontrast Areal A, K_{iB} = innerer Kontrast Areal B)

Als metrisches Maß für den inhaltlichen Unterschied benachbarter Einheiten kann der Kontrast K verwendet werden. Für den räumlich-inhaltlichen Abstand wird, wie auf Seite 61 ausführlicher behandelt, besser der Gradient G herangezogen. Die Abbildung 3.25 zeigt die Kontrastverhältnisse von Bodenarealen. Die Säulen stellen die quantifizierten Kombinationen von Pedogenesen und Substratgenesen (Bodenformen als Objekte) dar und werden als Pixelwerte weiterverarbeitet. Die Kontraste berechnen sich aus den Varianzen der Pixelwerte. Die Varianzen sind damit ein Kriterium für die Abgrenzung von Bodenarealen.

$$K_i = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n - 1)} \qquad K_a = |K_{iA} - K_{iB}| \qquad (3.4)$$

mit

K_i : innerer Kontrast; K_a : äußerer Kontrast; x : Pixelwerte; n : Grundgesamtheit der Pixel in einem Areal (vgl. Abbildung 3.25)

Bereits die Bildungsvorschrift für die Klassenflächen der Bodenschätzung berücksichtigt den Kontrast in der Art, dass Teilflächen bei einem Unterschied der Wertzahlen von $< 15/100$ der anderen Klassenfläche zugeordnet werden (vgl. RÖSCH & KURT (1941)).

Wie in den Abbildungen 3.26 (unten) und 3.35 (S. 64) durchdringen bzw. überlappen sich die Einheiten in einer Übergangszone bis zu einem bestimmten Maß. Sie gehen mehr oder weniger

3.3 Regionalisierung von Bodenmerkmalen

kontinuierlich ineinander über. Die Übergangszonen sind durch Abstufungen (Hinüberwachsen in die neue Qualität) charakterisiert. Sie sind durch die aufsteigenden bzw. absteigenden Linien gekennzeichnet. Hier wird die Länge als auch der Steigungswinkel der Linie als Maß für die Übergangszone angesehen. Der Übergang ist entweder durch einen absteigenden oder aufsteigenden Trend charakterisiert. In der Übergangszone ist die Schwankungsbreite der in diesem Bereich beschriebenen Merkmale bzw. Objekte (z. B. Bodenformen) größer als im Kernbereich. Die Objekte im Kernbereich weisen bezüglich ihrer Qualitäten keinen Trend auf (vgl. Abbildung 3.22 b).

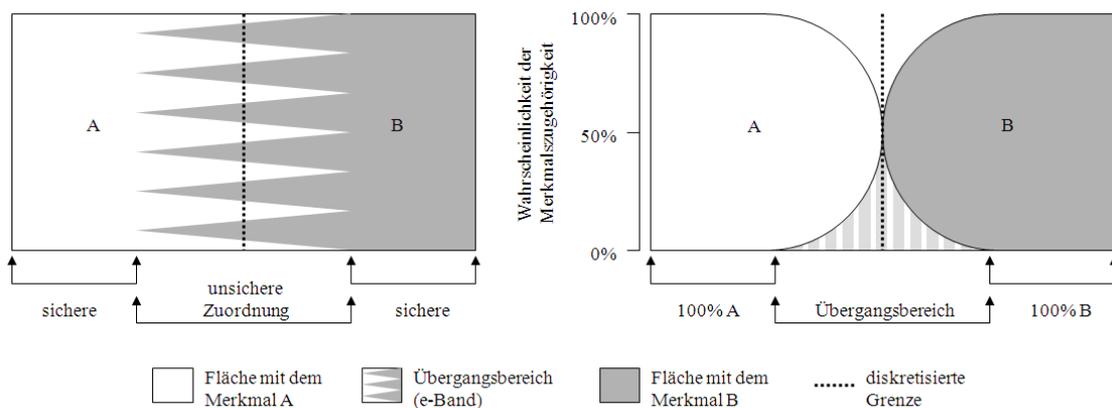


Abb. 3.26: Übergangszonen nach SZIBALSKI (2000), modifiziert; Sie sind hier als sog. ϵ -Band dargestellt und somit eher Ausdruck einer geometrischen Unsicherheit

Die Behandlung und auch Darstellung der Grenzen bzw. Übergangsbereiche ist dabei abhängig vom Kontinuitätsgrad der betrachteten Ebenen. Es ist zu unterscheiden, ob diese Zonen durch eine 'initiale' Interpolation oder durch ein bereits erfolgtes, diskretisierendes Aggregations- oder Segmentierungsverfahren (Klassifikation) entstanden sind. Bei den klassifizierenden Verfahren tritt eine schwellenwertbedingte Nivellierung ein, so dass Pixelinformationen verloren gehen können.

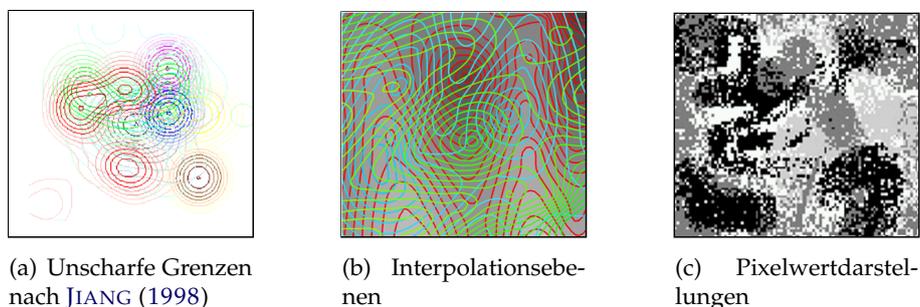


Abb. 3.27: Beispiele für Repräsentationen unscharfer Grenzen

3 Theoretische Betrachtungen

Die Abbildungen 3.27 (a) und (b) verdeutlichen übereinandergelegte 'pixelkontinuierliche Grenzen', die als technische Repräsentation des Catena-Prinzips aufgefasst werden können. Die Abbildung (c) hingegen zeigt 'pixeldiskrete Areale', die einerseits Ausdruck einer Klassifikation oder andererseits aber einer Maßstabsverkleinerung der Abbildungen (a) und (b) entspricht. Dies entspricht eher der Repräsentation des Bodengesellschaftsansatzes. Ausführungen hierzu wurden im Abschnitt 3.3.1 (S. 47) gemacht. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass eine Maßstabsverkleinerung prinzipiell ein diskretisierendes Verfahren ist.

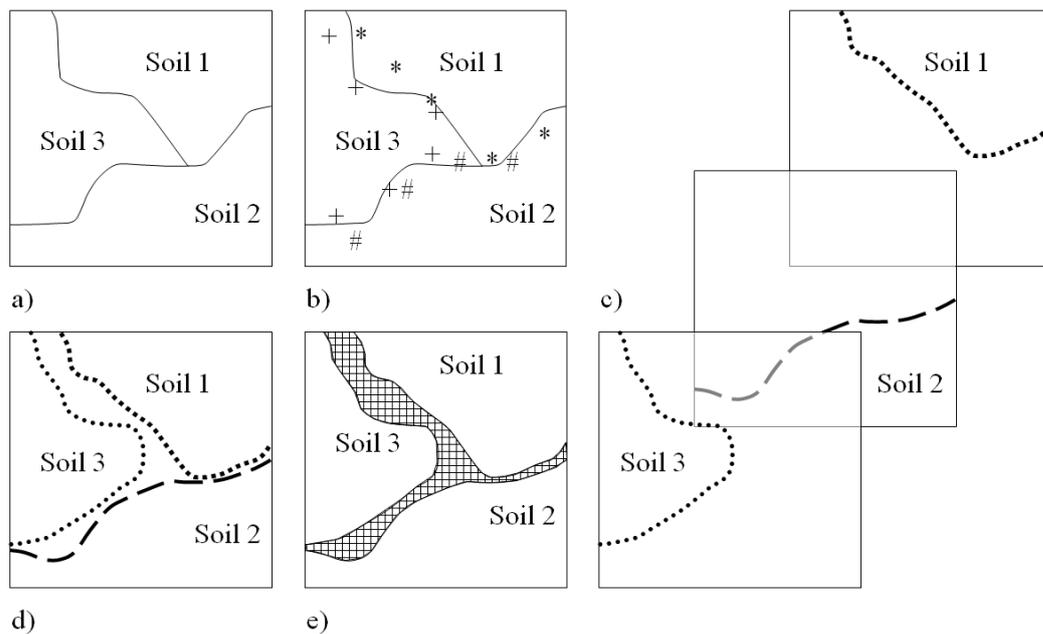


Abb. 3.28: Unschärfebereiche nach *SUNILA et al.* (2004); a) Bodenkarte mit scharfen Grenzen, b) Stichprobenpunkte, c) Anwendung des Kriging-Verfahrens für jeden Bodentyp um die Grenzlinien zu erhalten, d) Kombination der Ebenen, e) Überlappende Bereiche bilden die Unschärfezone.

Die Unschärfebereiche ergeben sich aus den geglätteten Linienzügen von zusammengefassten Kartierungspunkten gleicher Merkmale. Diese Punkte markieren die jeweiligen horizontalen Maximalausdehnungen der Merkmale oder der Merkmalskombinationen. Es wird deutlich, dass der Unschärfebereich naturgemäß dort am größten ist, wo die Distanz der Kartierungspunkte unterschiedlicher Merkmale am größten ist. Diese Zone ist durch einen Mangel an Information (Unsicherheit) und räumlicher Auflösung gekennzeichnet.

3.3 Regionalisierung von Bodenmerkmalen

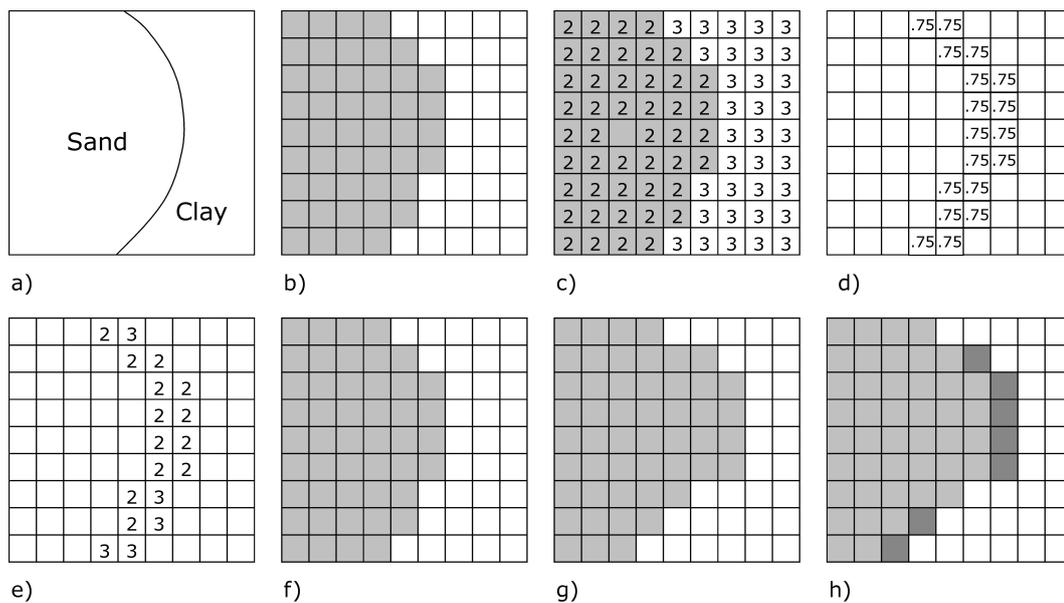


Abb. 3.29: Berechnung der Unschärfebereiche nach [SUNILA & HORTTANAINEN \(2003\)](#) (modifiziert); a) Die Karte besteht aus zwei Bodenarten: Sand und Ton, b) Die Karte wird ins Rasterformat transformiert, c) 'Sand' wird mit 2 und 'Ton' mit 3 codiert, d) Zugehörigkeitsfunktionen repräsentieren den Grad der Klassifikationssicherheit entlang der Grenzen der Bodenarten, e) Kriging wird für jede Klasse angewendet, f) Ausgangsrasterkarte, g) Die neuen Grenzen nach Anwendung des Kriging-Verfahrens, h) Die hervorgehobenen Raster zeigen den Fehler bzw. die Unschärfe entlang der Grenzen

Übergangstypen

Die Typisierung der Übergänge verfolgt das Ziel den Unterschied von Merkmalsausprägungen, die sich aus den Flächeneinheiten vorhandener Karten ableiten lassen, räumlich zu quantifizieren und visualisieren. Zu betonen ist, dass die jeweiligen Einstufungen komplex, entsprechend der Merkmalsvielfalt der betrachteten Fläche, oder aber einzeln entsprechend der definierten Zielkategorien erfolgen können. Im ersten Fall hätte man zwischen den Flächeneinheiten stets einen Übergang, während das im zweiten Fall nicht zwingend sein muss. Wenn man zum Beispiel die Einheiten des geologischen Messtischblattes 'Talsand' und 'Flusssand' bezogen auf die Zielkategorie Bodenart (Bindigkeit) betrachtet ergibt sich aus rein linguistischer Sicht kein Übergang. Hier wird deutlich wie wichtig der empirisch bestimmte oder/und gemessene Wert (Korngrößenanalyse) ist, da hier sicherlich eine weitere Differenzierung möglich ist. Bei der Typisierung von Übergängen sind folgende Komponenten zu berücksichtigen:

- Form bzw. Ausprägung des Übergangs (vertikale Schnittansicht)
- Werteunterschied (Kontrast)
- Richtungsabhängigkeit
- betrachteter Maßstab

3 Theoretische Betrachtungen

SINOWSKI (1995) greift die von BURROUGH (1993) entwickelten Modelltypen auf und unterstreicht die Verschachtelung dieser über mehrere Skalenniveaus (BURROUGH, 1983A,B), sowie die Trendhaftigkeit der räumlichen Variation (Abbildung 3.30).

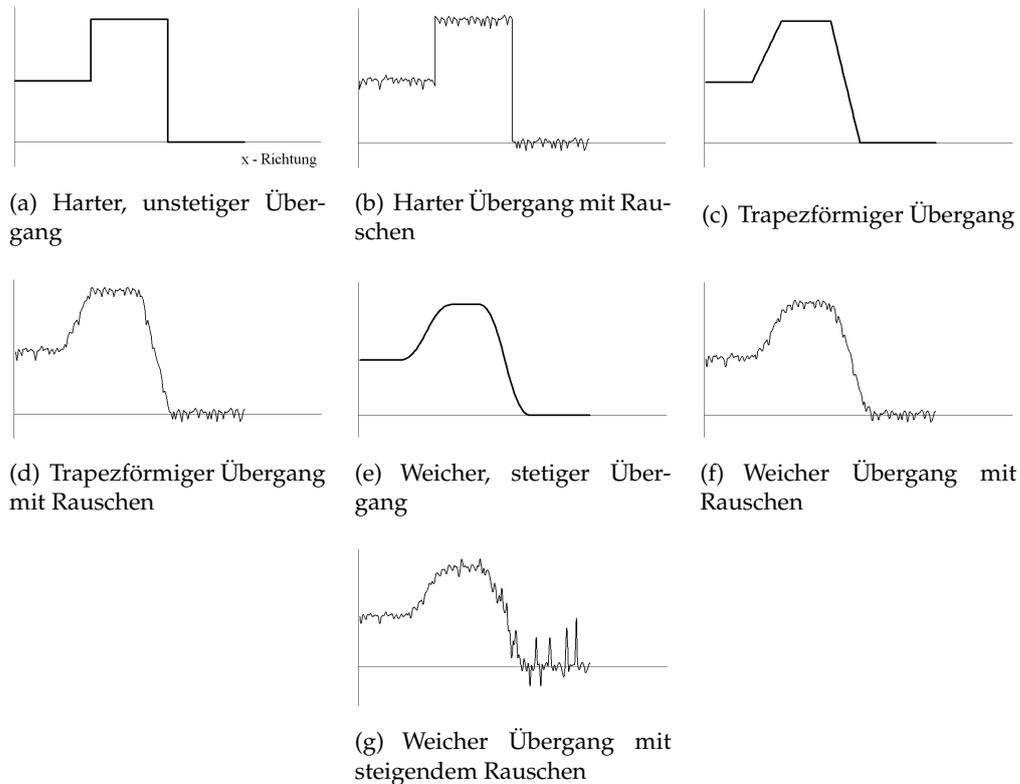


Abb. 3.30: Hypothetische Modellvorstellungen der räumlichen Variation von Böden (aus: (SINOWSKI, 1995), modifiziert)

Übergangstypen werden auch für andere Zielkategorien definiert. So wird die genetische Verwandtschaft (Ähnlichkeit) geologischer Ausgangssubstrate empirisch bestimmt. Ein Nachschüttsand beispielsweise weist zu einem Geschiebemergel eine höhere Verwandtschaft auf als zu einer Moorbildung. Diese ist wiederum enger an fluviale bis limnische Bildungen geknüpft. Auf dieses Prinzip der kategoriellen Bindung ist bereits im Abschnitt 3.2.1.1 (S. 23) eingegangen worden und kann auch bei Bodenformen angewendet werden, die Faktorenkombination ist hier jedoch ungleich höher.

3.3 Regionalisierung von Bodenmerkmalen

Tab. 3.13: Matrix ausgewählter, potenzieller geologischer Übergangstypen (Variante einer implikativen Übergangstabelle.) Werte um 1 markieren einen weichen, Werte um 0 einen harten Übergang. Sie können z. B. für die Einstellung der Pufferstärke verwendet werden.

		Torf	Moorboden	Wiesenkalk	Flussand	Talsand	Flugsand	Abschlamm Massen	Schmelzwassersand	Geschiebelehm	Geschiebemergel
	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Torf	1	1,00									
Moorboden	2	0,89	1,00								
Wiesenkalk	3	0,78	0,89	1,00							
Flussand	4	0,67	0,78	0,89	1,00						
Talsand	5	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00					
Flugsand	6	0,44	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00				
Abschlamm Massen	7	0,33	0,44	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00			
glazifluvialer Sand	8	0,22	0,33	0,44	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00		
Geschiebelehm	9	0,11	0,22	0,33	0,44	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00	
Geschiebemergel	10	0,00	0,11	0,22	0,33	0,44	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00

Übergangsmatrizen, wie sie in Tabelle 3.13 dargestellt sind, werden für jede Datengrundlage aufgestellt bei denen eine diskrete Abgrenzung der Flächeneinheiten vorgenommen wurde. In dieser Arbeit wird ein zielkategorienbezogener Übergangsgrad durch die Interpolation verpunkteter Flächen berücksichtigt.

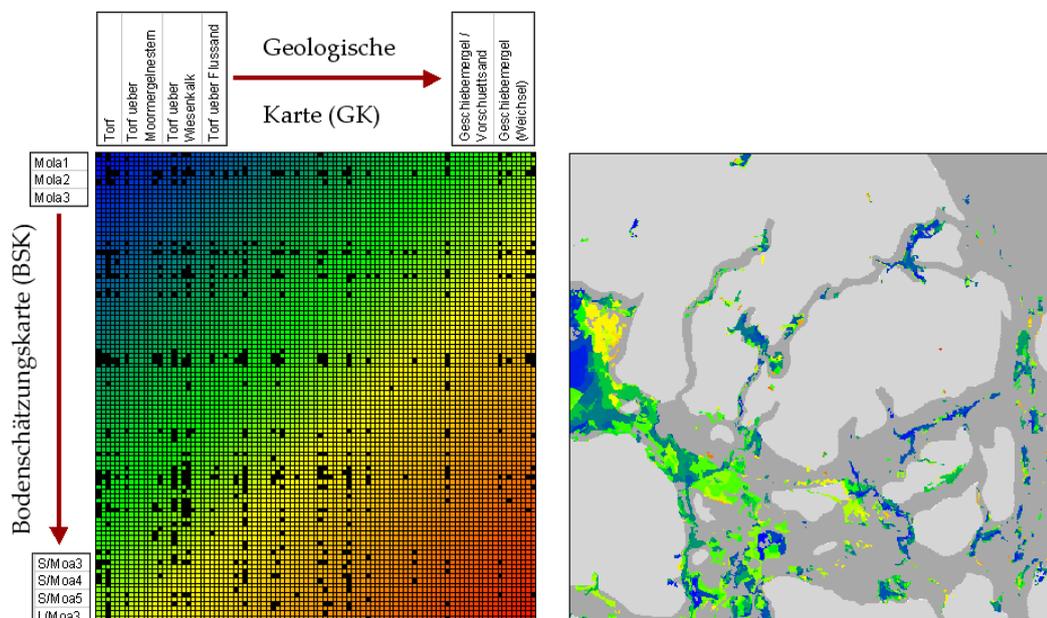


Abb. 3.31: Übergangsmatrix von Flächeneinheiten der Bodenschätzung und Geologie (*links*) und dessen Raumrepräsentation (*rechts*).

3 Theoretische Betrachtungen

Die Aufstellung von Übergangsmatrizen ist auch für bereits verschnittene Flächen sinnvoll. Die Objekte werden themenbezogen ordinal codiert. Dieser Code, der durch die Verschneidung kombiniert ist, stellt die Koordinate für das Verschneidungsobjekt im Matrizenraum dar. In Abbildung 3.31 markieren die schwarzen Quadrate die auftretenden Kombinationen von Einheiten der GK und BSK. Aus Darstellungsgründen sind die Zwischenobjekte nicht aufgeführt.

Neben den rein kontinuierlichen Darstellungen, die durch lokale Extrempunkte und ihren Zwischenwerten gekennzeichnet sind, sind grenzauflösende bzw. Übergangszonen erzeugende Verfahren, wie die **Pufferung** zu nennen. Puffer sind Zonen, die Polygone, Linien⁵ oder Punkte mit konstantem oder variablem Abstand umgeben. Einige Möglichkeiten des 'Pufferns' verschiedener Datenkategorien bis zur 3D- Fuzzy-Karte zeigt die Abbildung 3.32.

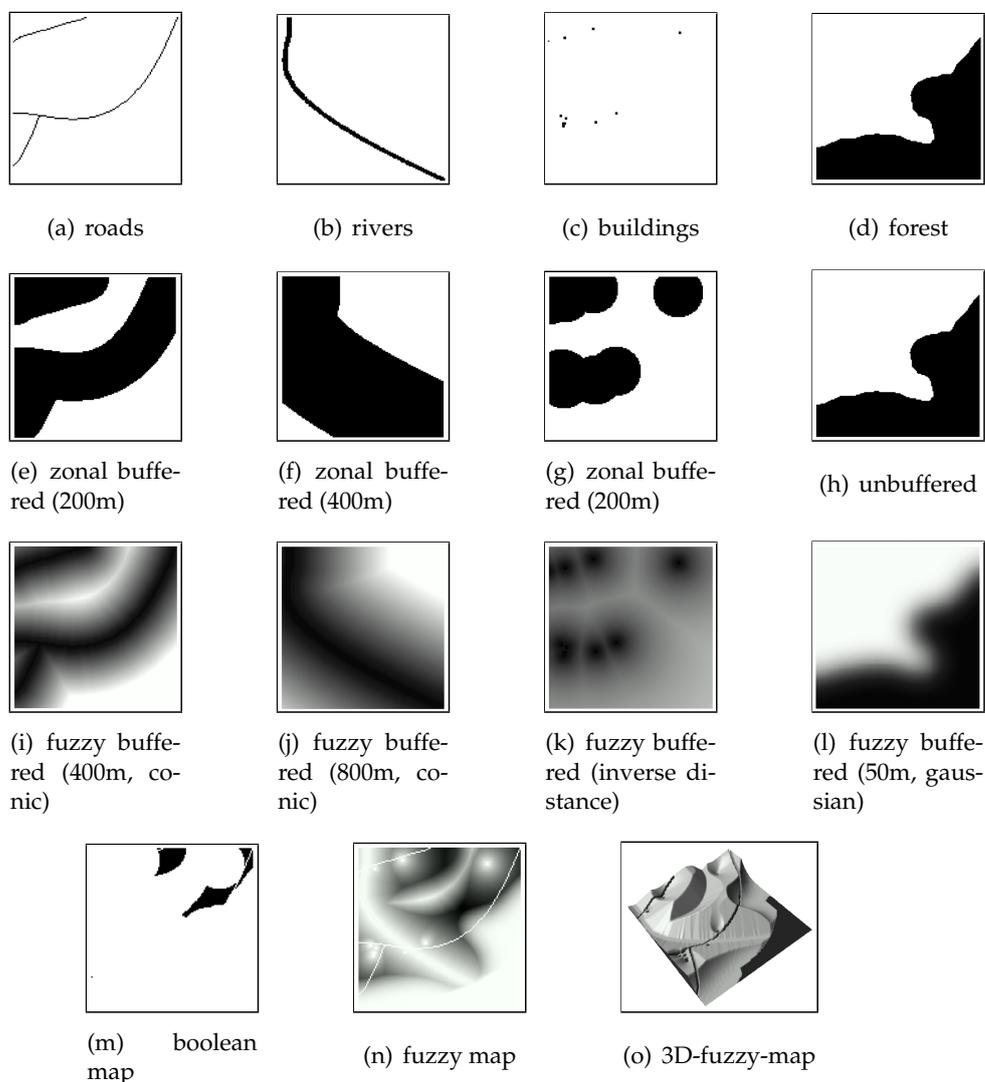


Abb. 3.32: Puffervarianten punkt-, linien- und flächenhafter geographischer Objekte nach (DUFF & GUESGEN (2002), zit. in: GUESGEN *et al.* (2003)). Die Abbildung (m) ist das Ergebnis der Verschneidung der Abbildungen (e) bis (h), die Abbildung (n) der Vereinigung der Abbildungen (i) bis (l).

⁵vgl. auch Karte IA15 im Anhang

3.3.3.3 Ausweisung von Kernbereichen

Die Ausweisung der Kern- und Übergangsbereiche erfolgt durch die Analyse der Ähnlichkeiten der durch den Ebenenstapel gebildeten 'Pixelprofile', die Bodenformen repräsentieren. Sie sind über die Zugehörigkeitsgrade der Zielkategorien definiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kernbereiche quasihomogen sind und einen hohen Zugehörigkeitsgrad (inhaltlich, lagebezogen) zur betreffenden Zielkategorie (Legende) besitzen, während die Übergangsbereiche einen geringeren Zugehörigkeitsgrad zur Zielkategorie besitzen und einen zunehmend höheren zu anderen Zielkategorien.

Übergangsbereiche sind inhaltlich und räumlich schwerer zu beschreiben. Die inhaltliche als auch räumliche Varianz ist hoch. Die Ausweisung von Kern- und Übergangsbereichen kann auf Grund der Informationsfülle nur computergestützt erfolgen. Die inhaltliche und räumliche Charakterisierung der Kernbereiche wird durch zu definierende Ähnlichkeiten (geringster inhaltlicher Kontrast bei nächster Nachbarschaft) vorgenommen.

Prinzipiell können für die Ausweisung von Kern- und Übergangsbereichen zwei Wege beschritten werden, die ggf. kombiniert werden können. Der erste Weg ist der einer mehr regionen-, d. h. segmentbezogenen Analyse bei der jeweils geringe nachbarschaftliche Varianzen als Homogenitätskriterien für die Arealbildung herangezogen werden. Der zweite Weg verfolgt eine trendorientierte Analyse, die sich auf die Gradienten der benachbarten Pixel beziehen. Der Gradient oder das Gefälle berechnet sich aus der Änderung des Pixelwertes über die horizontale Distanz. Die Ausweisung der Übergangsbereiche erfolgt also in Anlehnung an die Algorithmen der Reliefauswertung dahingehend, dass hier wie bei der Analyse der Hangneigung vorgegangen wird. Die summierten (multiplizierten etc.) Zugehörigkeitswerte werden als Datenrelief aufgefasst. Die Zugehörigkeitsgrade der einzelnen Zielkategorien spielen hier keine Rolle, da man lediglich den Gesamttrend erfassen möchte. Das heißt, fallen zum Beispiel die Werte der Zielkategorie Verbraunung in dem gleichen Maße wie die der Vergleyung steigen, ist kein Trend anzunehmen, wenn beide Zielkategorien gleich gewichtet sind. Das konkrete Inventar des Bodenareals spielt hier eine untergeordnete Rolle. Für die weitere Analyse werden die Neigungen resp. Steigungen des Datenreliefs für jedes Pixel berechnet, die so die Maße für die Übergangszonen darstellen. Hohe Werte bedeuten einen sehr scharfen, mittlere bis geringe Werte einen weichen Wechsel zum Kernbereich, der selbst durch sehr geringe Werte gekennzeichnet ist.

Im Gegensatz zur gebräuchlichen Hangneigungsberechnung über die Tangens-Funktion wird die Sinusfunktion verwendet, um den maximalen Steigungswert von 1 bei einem Steigungswinkel von 90° und den minimalen Steigungswert (Plateauwert) von 0 bei einem Steigungswinkel von 0° zu erhalten. Die Tangensfunktion liefert bei 45° den Wert 1.

3 Theoretische Betrachtungen

$$SW = \left| \arcsin \left(\frac{\mu[P_{n+1}] - \mu[P_n]}{\mu[P_n]} \right) \times \left(\frac{180}{\pi} \right) \right| \quad (3.5)$$

mit

SW: Steigungs-(Neigungs-) Winkel; S: Steigungswert;

$[P_n]$: Zugehörigkeitswert des Pixels an der Stelle n ; $[P_{n+1}]$: Zugehörigkeitswert des Nachbarpixels

Tab. 3.14: Steigungswinkel und -werte für Nachbarpixel

$\mu[P_n]$	$\mu[P_{n+1}]$	SW [°]	S
0	1	90,00	1
0,1	1	64,16	0,9
0,2	1	53,13	0,8
0,3	1	44,43	0,7
0,4	1	36,87	0,6
0,5	1	30,00	0,5
0,6	1	23,58	0,4
0,7	1	17,46	0,3
0,8	1	11,54	0,2
0,9	1	5,74	0,1
1	1	0,00	0

Zur Abgrenzung von Kern- und Übergangsbereichen wird der α -Schnitt für die Steigungswerte verwendet, d. h. Werte unterhalb des Schwellenwertes charakterisieren Kernbereiche, Werte darüber Übergangsbereiche.

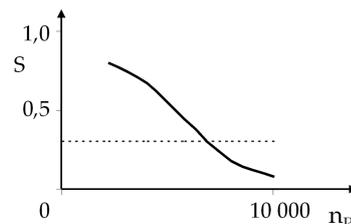
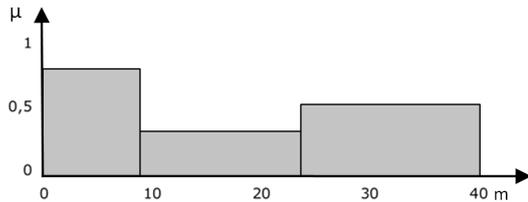


Abb. 3.33: Absteigend sortierte Steigungswerte S (ohne Duplikate; n_p : Pixelanzahl) des Datenreliefs und α -Schnitt zur Abgrenzung von Kern- und Übergangsbereichen. Zur Festlegung des Wertes für den α -Schnitt kann die in Abbildung 3.17 (S. 43) beschriebene Methode verwendet werden.

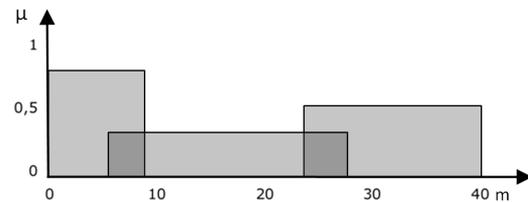
Dabei kommt der Frage, nach welchen Regeln die Schwellenwerte (-spannen) für auszuweisende Bodenareale (Kernbereiche) anzusetzen sind, eine entscheidende Bedeutung zu. Eine mögliche Methode ist in Abbildung 3.17 beschrieben. Der Begriff 'Abgrenzung' ist ggf. um den Begriff 'Rayonierung' zu ergänzen, d. h. dass der Begriff 'Areal' dem der 'Fläche' stets vorzuziehen ist.

Repräsentationen von Kern- und Übergangsbereichen

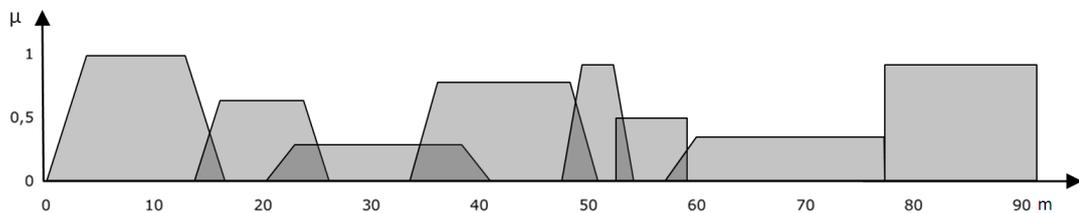
Repräsentationen inhaltlicher und geometrischer Flächencharakterisierung in vertikalen Schnittansichten zeigt die Abbildung 3.34. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz stützt sich auf das in Abbildung (c) aufgezeigte Prinzip.



(a) Diskrete Abgrenzung von Flächeneinheiten.



(b) Flächeneinheiten mit Übergangszonen (dunkelgrau)



(c) Durch trapezförmige Zugehörigkeitsfunktionen repräsentierte Bodenareale und abgestufte Übergangszonen im Überschneidungsbereich (dunkelgrau)

Abb. 3.34: Modelle von Flächenrepräsentationen. Der Höhenunterschied zwischen den geometrischen Formen kennzeichnet den äußeren Kontrast gemäß Abbildung 3.25, der hier unterschiedliche Zugehörigkeitsgrade zu unterschiedlichen Zielklassen (siehe Abschnitt 3.2.2.1.1) darstellt. Er wird weiterhin durch die benachbarte(n) Fläche(n) bestimmt und stellt ebenso ein inhaltliches Distanzmaß zwischen den Zielklassen dar.

Die Abbildung 3.35 zeigt einen Idealschnitt durch die Bodendecke in Form von Fuzzy-Mengen. Die Kernbereiche stellen Zielklassen dar und werden als 'reine' Merkmale, wie z. B. die Bodencharakterisierung mindestens auf Typenniveau (vgl. KA5, S. 190 ff.) angesehen. Die Übergangsbereiche bilden Schnittmengen. Die Stärke des Übergangs kann durch den Gradienten (Neigung des Datenreliefs) angegeben werden.

3 Theoretische Betrachtungen

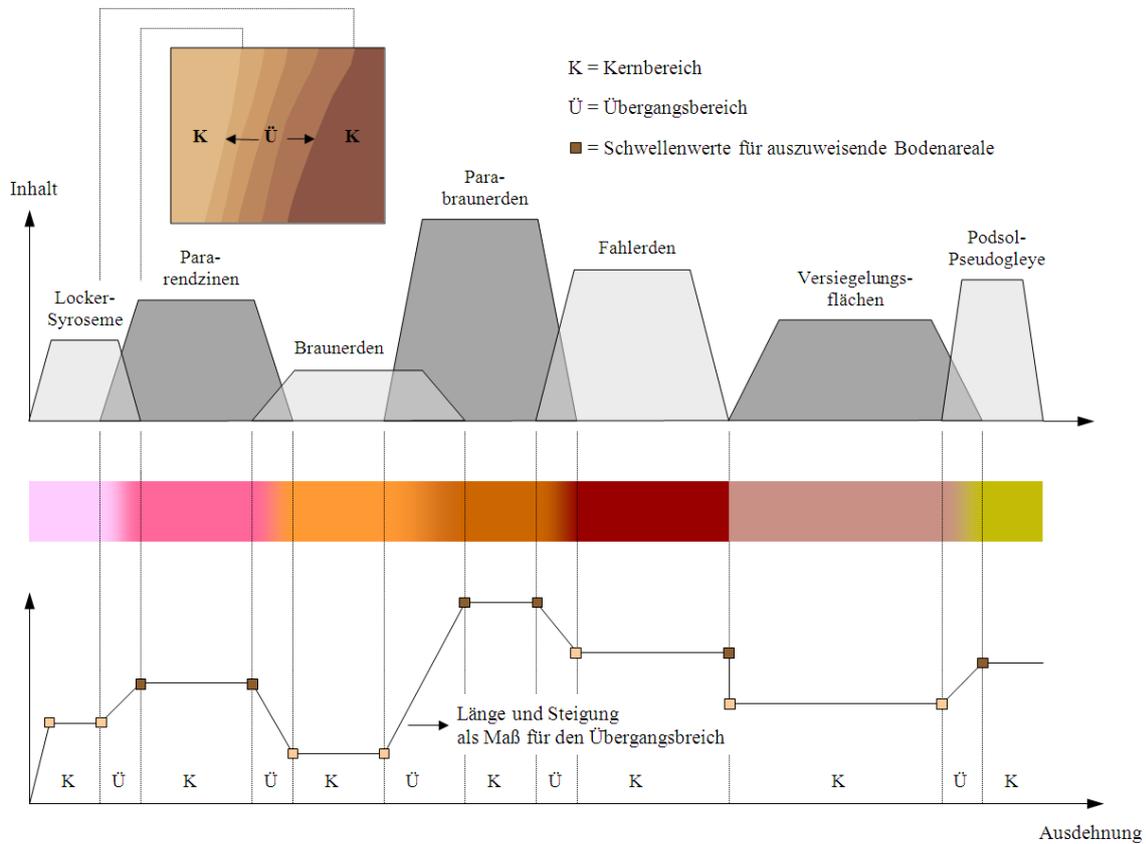


Abb. 3.35: Repräsentationen von Bodentypen als Kernbereiche (Idealschnitt). Sie können als 'Toleranz' der Fuzzy-Menge aufgefasst werden. Die Übergangsbereiche stellen Schnittmengen dar.

Das Prinzip der Repräsentation der Bodenformen als Fuzzy-Mengen eignet sich auch für maßstabsbezogene Aussagen. Demnach sind Kernbereiche in großen Maßstabsbereichen durch höhere Zugehörigkeitswerte gekennzeichnet als in kleinen. Der Maßstabsbereich kann durch einen entsprechenden α -Schnitt 'selektiert' werden (vgl. Abbildung 3.36).

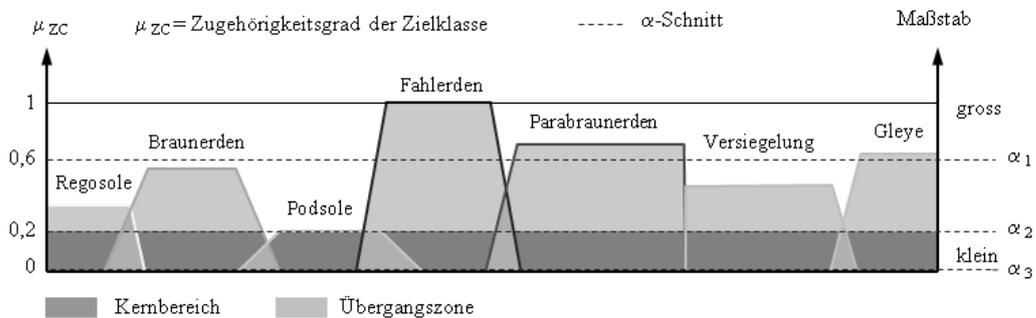


Abb. 3.36: Zugehörigkeitsgrade von Bodeneinheiten und Kern- und Übergangsbereichen. Die α -Schnitte bilden entsprechende Maßstabsstufen ab.

3.3 Regionalisierung von Bodenmerkmalen

Die folgende Abbildung 3.37 verdeutlicht, dass mit einer Verringerung der Zugehörigkeitsgrade eine Vergrößerung der Übergangsbereiche und damit der Unschärfe in kleiner werdenden Maßstäben einhergeht.

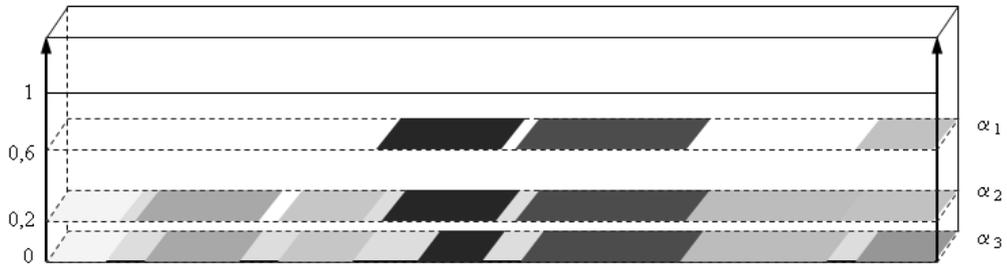


Abb. 3.37: α -Schnitte entsprechend der Abbildung 3.36. Deutlich wird die Vergrößerung der Übergangsbereiche und die Verkleinerung der Kernbereiche bei kleiner werdenden Maßstäben

4 Material und Methoden

4.1 Informationsgrundlagen

4.1.1 Datenformate

Die für die Erstellung einer Bodenkarte verwendbaren Informationsgrundlagen liegen in unterschiedlichen Datenformaten vor. Analog vorliegende Karten müssen digitalisiert werden. Bei der Digitalisierung als auch bei der Weiterverarbeitung der Daten sind unterschiedliche Herangehensweisen denkbar. Im Folgenden wird auf die innerhalb von GIS verwendeten Datenformate eingegangen. Grundsätzlich unterscheidet man im GIS zwei Datenmodelle bzw. -formate, das Vektor- und das Rasterformat. Welches Format Anwendung findet ist abhängig von der Aufgabe. Die Vor- und Nachteile beider Formate sind nachfolgend gegenübergestellt. In dieser Arbeit wirkt verstärkt auf das Rasterdatenformat Bezug genommen.

Tab. 4.1: Vorteile und Nachteile von Vektor- und Rastermodell (zusammengestellt aus: DE LANGE *et al.* (1997) und ROSNER (1999), modifiziert und ergänzt)

	Vorteile	Nachteile
Vektormodell	<ul style="list-style-type: none"> - hohe geometrische Auflösung und Genauigkeit, präzise Flächen - und Linienberechnung - eindeutige Objektbeschreibung - geringe Datenmengen - topologische Information - einfacher Datenimport - Datenbankanbindung - gute Eignung für kartographische Darstellungen - hierarchische Datenabbildung durch die Grundprimitive (Punkt, Linie, Polygon) 	<ul style="list-style-type: none"> - aufwendige Erfassung von Geometrie und Topologie - Verschneidung von Objekten zur Bildung neuer Geoobjekte sehr rechenintensiv - neben der geometrischen Beschreibung der Objekte muss auch eine topologische erfolgen - komplexe Datenstruktur - Overlay-Operationen z. T. schwierig - hoher Aufwand bei der Nachführung von Daten - räumliche Schwankungen nur im TIN gut darstellbar - ungeeignet für Methoden der digitalen Bildverarbeitung
Rastermodell	<ul style="list-style-type: none"> - geringer Aufwand bei der Erfassung von Geometrie und Topologie - Verschneiden von Geoobjekten sehr einfach (z. B. Durchschnitt von Pixelmengen) - Durchführung diverser Mengenoperationen (Puffern) - einfache Datenstruktur und einfacher Datenimport - räumliche Schwankungen/Übergänge gut darstellbar - Overlay-Operationen einfach durchführbar - geeignet für digitale Bildverarbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> - Objekte sind nicht form- und lagetreu darstellbar - für hohe Genauigkeiten muss die Pixelgröße sehr klein gewählt werden - schwieriger Kompromiss zwischen Informations- und Datenmenge - topologische Beziehungen kaum darstellbar - schlechte Eignung für kartographische Darstellungen - i. d. R. keine Sachdatenzuweisung möglich

FRITSCH *et al.* (1998) geht auf die geometrische und thematische Unsicherheit beider Modelle ein und fordert weitere „Untersuchungen zu komplexen Analysen mit kombinierten geometrischen, topologischen und thematischen Fragestellungen.“

Der größte Vorteil des Vektormodells ist in der topologisch hierarchischen Datenabbildung zu sehen, die die Konsistenz von Punkt, Fläche und Polygon gewährleistet. Der Satz von EULER gibt den Zusammenhang von Anzahl der Punkte, Linien und Polygone an. Diese Beziehung wird Charakteristik der Abbildung genannt und gilt für zusammenhängende planare Graphen.

$$C = n_P - n_L + n_F = 2 \quad (4.1)$$

mit

C : Charakteristik; n_P : Anzahl Punkte; n_L : Anzahl Linien; n_F : Anzahl Flächen

Vektordaten erlauben eine objektbezogene Datenverarbeitung und eine komplexe Datenstrukturierung. Sie werden häufig für Analysen mit diskreten Objekten verwendet. Rasterdaten besitzen eine sehr einfache Topologie, die lediglich durch die Position (Zeilen- und Spaltenindex innerhalb einer Matrix) des Elementes gekennzeichnet werden.

Eine Weiterentwicklung des Rastermodells stellt das Quadtree-System dar (vgl. auch S. 86), das eine hierarchische Datenspeicherung erlaubt. Das Prinzip beruht auf der rekursiven Zerlegung (Viertelungsmethode) von Bildbereichen. Ausgehend von einem Basisquadrat werden Pixel mit gleichen Werten zu größeren, homogenen Einheiten zusammengefasst. Das Gitter wird schrittweise bis zu einer gewünschten Auflösung verfeinert, bis jede Gitterzelle eine homogene Fläche repräsentiert. Diese Fläche wird zusammen mit ihrem charakterisierenden Merkmal (Klassennummer) und einer einzigen Koordinate gespeichert, die sich auf die dabei entstandene, baumförmige Datenstruktur bezieht. Durch die Anpassung der Zellengröße an die räumliche Variation der Daten erlaubt die Quadtreestruktur eine Annäherung an die Genauigkeit der Vektordatenstruktur. Es können unterschiedlich aufgelöste Daten unter Nutzung von Auflösungsstufen überlagert werden, wobei in jedem Falle die Detailgenauigkeit jeder einzelnen Ebene erhalten bleibt. Algorithmen für Flächenberechnungen oder komplexe Verschneidungen reduzieren sich auf einen Vergleich der Klassennummern in den verschiedenen Auflösungsstufen der beteiligten Quadtrees mit einem einmaligen Durchlauf der Datenstruktur. Bei diesen Auswertungen kann die Lageinformation unberücksichtigt bleiben. Die logische Anordnung der Zellen innerhalb der Datenstruktur genügt. Dadurch sind sie insbesondere für nachbarschaftsbezogene Auswertungen geeignet. Die Quadtreestruktur vereinigt die Vorteile von Raster- und Vektormodell. Die Datenmenge kann im Vergleich zum konventionellen Rastermodell deutlich verringert werden. Bei gleichem Speichervolumen steigt die räumliche Auflösung. Es können großräumige Strukturen und feingliedrige Elemente in geeigneter Form dargestellt werden. Ein wichtiger Vorteil der Rastermodelle gegenüber den Vektormodellen liegt in der Möglichkeit der gewichteten Überlagerung mehrerer Datenebenen. Sie eignen sich besonders für die Darstellung kontinuierlicher Daten.

Die am stärksten verbreitete Metrik des Rasterdatenmodells ist das Quadrat. Digitale Bilder und Grids nutzen diese Metrik. Neben vielen Vorteilen (einfache Speicherung, regelmäßige Anordnung in Zeilen und Spalten etc.) gibt es einige Nachteile, die besonders die Beziehungen zu den Nachbarelementen betreffen. Die Mittelpunkte der diagonal liegenden (Eck-)Nachbarn besitzen einen anderen, erheblich größeren Abstand als die Kantennachbarn (Abbildung 4.1). Die optimale Metrik hinsichtlich einer 'ausgewogenen' Nachbarschaft wäre der Kreis, die jedoch nicht umzusetzen ist, da Zwickelflächen (grau) ohne Inhalt entstehen. Einen Kompromiss aus beiden bildet das Hexagon⁶, das eine weitestgehend gleich starke Bindung zu den Nach-

⁶vgl. Karte IW7 im Anhang

4 Material und Methoden

barelementen aufweist. Die Mittelpunkte der jeweiligen Nachbarelemente besitzen stets den gleichen Abstand. Insgesamt wird hier auch ein Problem deutlich, das die Definition 'Nachbar' betrifft. Streng betrachtet besitzt das Quadrat (Pixel) nur vier echte Nachbarn. Die Berührungslänge der anderen vier beträgt Null. Programme, die mit dieser Metrik arbeiten, berücksichtigen jedoch meist acht gleichberechtigte Nachbarn. Hexagone besitzen sechs echte Nachbarn. Die hexagonale Metrik würde zu einer weiteren Annäherung an die Vektordatenstruktur führen. Sie scheint weiterhin in Analogie zum kleinsten Bodenkörper, dem Pedon, prädestiniert zu sein für Anwendungen mit bodenkundlichem Bezug. Es wäre auch möglich Fließrichtungen genauer zu modellieren, da sechs Vektoren angegeben werden können. Nachteilig ist jedoch, dass die horizontalen, d. h. die W-O- und O-W-Richtung, nicht berücksichtigt werden können. Denkbar ist hier ein hybrides System, das beide Metriken kombiniert, um acht Hauptrichtungen angeben zu können.

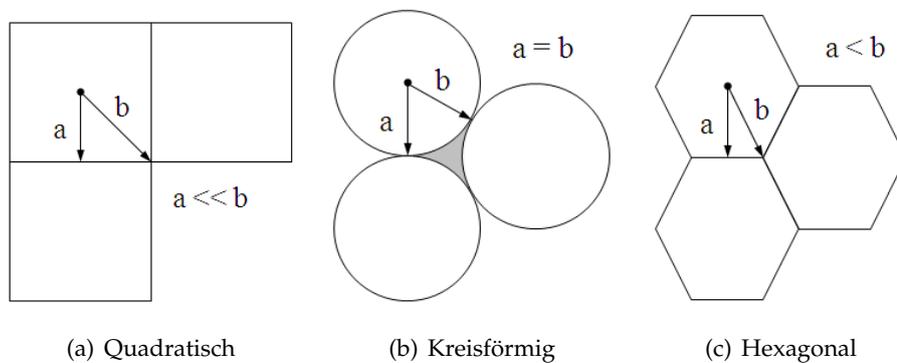


Abb. 4.1: Rastermetriken

Diese Annahme äußert sich auch in der Möglichkeit einer besseren Anpassung des Grenzverlaufes bei Polygonkonvertierungen. Die konvertierte Grenzlinie passt sich genauer der Polygongrenzlinie an. Die Flächengröße des Hexagons ist insgesamt allerdings auch geringer (Abbildung 4.2). Eine weitere Möglichkeit ist auch die Anordnung der quadratischen Pixel in dieser Wabenstruktur.

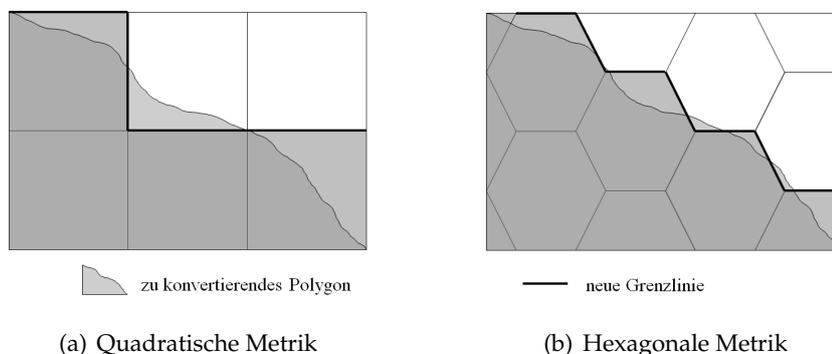


Abb. 4.2: Polygonkonvertierung durch quadratische und hexagonale Rastermetrik

4.1.2 Datenkategorien

GIS-Daten sind in verschiedene Kategorien eingeteilt. Bei der Erstellung von Bodenkarten werden alle Kategorien verwendet. Unterschiedliche Aussagesicherheiten sowohl innerhalb der Kategorien als auch zwischen den einzelnen Kategorien werden berücksichtigt. Diese ergeben sich hauptsächlich durch die unterschiedlichen Alter und Maßstäbe der Ausgangsdaten. Für die datentechnische Verarbeitung der Daten sind bestimmte Konventionen für die Namen (Bezeichnungen) der Dateien einzuhalten, die die Spezifikation der Daten in jedem Verarbeitungsschritt erkennen lassen. Beispiele für Namenskonventionen von Geometrie- und Sachdaten befinden sich in den Tabellen [A.1](#) und [A.2](#) im Anhang.

4.1.2.1 Flächendaten

Geologische Karten

Geologische Karten liefern im Allgemeinen eine sehr gute Grundlage für die Ableitung von Regeln zur Konstruktion des Substrataufbaus. Für die Erstellung der Konzeptkarte der Bodenkarte 1 : 50 000 wird hier vorrangig die Geologische Spezialkarte Preußens (Messtischblatt, 1 : 25 000; vgl. Karte IG1 im Anhang) verwendet. Auf die Verwendung geologischer Karten anderer Maßstabbereiche wird später eingegangen. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit aus den Einheiten dieser Karte empirisch und unter Einbeziehung von Geländebefunden der laufenden Bodenkartierung das Substrat und Regeln für dessen Zusammensetzung herzuleiten. Dabei muss berücksichtigt werden, dass geologische Karten teilweise abgedeckt sein können. Beispiele für die Übersetzung in die zur Zeit gültige Substratnomenklatur der KA5 zeigt die Tabelle [4.2](#). Eventuelle Mehrfachzugehörigkeiten derart übersetzter Substrate zu den geologischen Objekten wurden nicht berücksichtigt. Mehrfachzugehörigkeiten treten auf, wenn einem Objekt mehrere Übersetzungsmöglichkeiten zugeordnet werden können. Die Angabe δm beinhaltet z. B. eine Spanne möglicher bodenartlicher Ausprägungen. Die geologischen Kürzel sind im Vorgriff auf die separate Weiterverarbeitung in der folgenden Tabelle bereits in Zeichen zerlegt dargestellt.

Bei dieser Herangehensweise ist es jedoch zum einen schwierig diese Daten für weitere Rechenoperationen zu verwenden und zum anderen die Palette der Substratvielfalt einer geologischen Einheit zu berücksichtigen. Die Einbeziehung dieser Mehrdeutigkeiten erfolgt über die Zuordnung von Zugehörigkeiten zu Zielkategorien (vgl. Abschnitt [3.2.2.1.1](#)). Geologische Karten in kleineren Maßstäben kommen ebenfalls zum Einsatz. Ihre potenzielle Aussagegüte wird jedoch für den veranschlagten Zielmaßstab von 1 : 50 000 geringer gewichtet. Problematisch ist die Verarbeitung geologischer Flächendaten in so fern, dass die natürliche Varianz weitaus höher ist als die in Karten dargestellte. Es werden also weitgehend homogene Flächen auf ei-

Tab. 4.2: Beispiele für die Übersetzung der Geologischen Spezialkarte (1 : 25 000) zur Ableitung von Substraten (qh: Quartär (Holozän), qw: Quartär (Weichsel-Stadium), qwo: Quartär (oberes Weichsel-Stadial, qs: Quartär (Saale-Stadium)).

Stratigraphie	Geologisches Objekt (Kürzel)	verhall	KA5-Kürzel
qh	a h	Moorende	og-Hnv
qh/qw	a h / δ s	Moorende / Nachschüttungsand	og-Hnv / fg-ss (ns)
qh	a h / a r	Moorende / Raseneisenstein / Flusssand	og-Hnv / Fe / ff-ss (Sf)
qh	a r	Raseneisenstein	Fe
qh	a t	Torf	og-Hn
qh/qw	a t / δ s	Torf / Nachschüttungsand	og-Hn / fg-ss(ns)
qh	a t / a s	Torf / Flusssand	og-Hn / ff-ss (Sf)
qh	a t / a tm	Torf / Wiesentommergel	og-Hn / ff-cll
qh	a k	Wiesenkalk	q-Mw
qh	a hk	Moormergel	og-Hcv
qh/qw	a hk / δ m	Moormergel / Weichselmurgel	og-Hcv / gm-csl (Mg)
qh	a hk / a s	Moormergel / Flusssand	og-Hcv / ff-ss (Sf)
qh	a hk / a k	Moormergel / Wiesenkalk / Flusssand	og-Hcv / q-Mw / ff-ss (Sf)
qh	a hk / a h	Moormergel / Moorende / Flusssand	og-Hcv / og-Hnv / ff-ss (Sf)
qh	a kh / a t	Moormergelster in Moorende / Torf	og-Hnv + og-Hcv / og-Hn
qh	a kh / a t / ak	M-nester in Moorende / Torf / Wiesenkalk	og-Hnv + og-Hcv / og-Hn / q-Mw
qh/qw	a hk / δ s	Moormergel / Nachschüttungsand	og-Hc / fg-ss (ns)
qh/qs	a hk / δ s	Moormergel / Vorschüttungsand	og-Hc / fg-ss (vs)
qh/qs	a hk / d m	Moormergel / Saalemurgel	og-Hc / gm-csl (Mg)
qh	a s	Flusssand	ff-ss (Sf)
qh	a s / a t	Flusssand / Torf	ff-ss (Sf) / og-Hn
qwo	α s	Dünensand (Flugsand)	a-ss (Sa)
qwo	α s	Abschlämmmassen	pas-ss (Sgf)
qwo	α s	Talsand	fp-ss (Sf)
qwo	α ds	Rinnensande (rote Punkte)	fg-ss(rs)
qwo/qs	α ds / d s	Reste Spätglazial / Vorschüttungsand	... / fg-ss (vs)
qw	δ s	Grand (Nachschüttungsand)	fg-ss(ns)
qw	δ g	Grand (Nachschüttungsand)	fg-(k4)ss (ns)
qw	δ m	Mergel	gm-csl (Mg)
qw	δ ms	Mergelsand	gm-cls (Mg)
qw	δ tm	Tommergel	gm-cll (Mg)
qw	δ s	Grand (Weichselvorschüttungsand)	fg-ss (vs)
qs (qw)	δ g	Grand (Weichselvorschüttungsand)	fg-(k4)ss (vs)
qs (qw)	δ m	Mergel	gm-csl (Mg)
qs	δ ms	Mergelsand	gm-cls (Mg)
qs	δ tm	Tommergel	gm-cll (Mg)
qw/qs	δ d	Reste von ... / Vorschüttungsand	... / fg-ss (vs)
qw/qs	δ d / s	Weichsellehmpfplatte / Vorschüttungsand	gm-ll / fg-ss (vs)
qw/qs	δ d / s	dünne Lage von ... / Vorschüttungsand	... / fg-ss (vs)

nem hohen Abstraktionsgrad ausgewiesen, die eigentlich heterogener Natur sind. Bodenkarten stellen die Varianz als Gesellschaftsbeschriebe der Bodenformen mit Flächenanteilen dar. Das Dilemma liegt hier jedoch darin, dass die den Flächeneinheiten zugewiesenen Bodenformen räumlich nicht genau zuzuordnen sind.

Bodenschätzungskarten

Der Informationsgehalt der Bodenschätzungskarten⁷ bzw. der Bodenschätzungsdaten insgesamt, ist inhaltlich und räumlich sehr hoch. Die Grundlage für die Ausgrenzung der Klassenflächen bildeten Bohrstocksondierungen im 50 × 50 m-Raster. Zu den Klassenflächen lassen sich bodensystematische Einheiten den Zustandsstufen der Bodenschätzung zuordnen. (Abbildung 4.4). Es muss berücksichtigt werden, dass die heute teilweise überholten Ansichten zur Einschätzung der Bodenqualität in die Bewertung eingegangen sind und so eine Unterschätzung der Ertragsleistung von lessivierten Böden und eine Überschätzung der Produktivität von Braunerden erfolgte (STEINHARDT *et al.*, 2004). Anwendungs- und Auswertungsmöglichkeiten der Bodenschätzung werden von PFEIFFER *et al.* (2003) beschrieben. Die computergestützte Übersetzung der Bodenschätzung in die Nomenklatur der bodenkundlichen Kartieranleitung geht im Wesentlichen auf das von BENNE *et al.* (1990) im Rahmen von NIBIS (Niedersächsisches Bodeninformationssystem) entwickelte Programm zurück. Diesen Übersetzungsschlüssel wendet u. a. bereits TILSCH (1994) für die Erstellung einer Konzeptbodenkarte an und weist zu diesem Zeitpunkt schon auf notwendige Anpassungen an 'die bodenkundliche Landschaft' hin. WALLBAUM (1992) konnte über die Zuordnung einer Menge von ermittelten Körnungs- bzw. Bodenarten zu bodenartenbeschreibenden Signa zeigen, dass sich die häufigsten Bodenarten (Modalwerte) als exakteste Übersetzung interpretieren lassen. Standortbeurteilungen und -vergleiche unter Verwendung der Bodenschätzung erlaubt das Programm VERMOST (Vergleichsmethode Standort). Ursprünglich wurden für das Blatt Königs Wusterhausen die monochromatischen Druckvorlagen der Bodenschätzungskarten 1 : 25 000 eingescannt und halbautomatisch vektorisiert. Auf diesen Druckvorlagen sind nur die Klassenflächengrenzen und die Klassenflächenbezeichnungen vorhanden. Nach der Vektorisierung der Linien und der Georeferenzierung erfolgte das manuelle Entfernen der Klassenflächenbezeichnungen. Der topologische Aufbau der Flächendaten wurde mit den Programmen ArcView[®]3.1 und ArcInfo/ArcGIS[®]8.0⁸ vorgenommen. Mittlerweile liegt die vektorisierte Bodenschätzung durch die vom Ministerium des Innern des Landes Brandenburg koordinierten Maßnahmen FALKE und DIBOS fast flächendeckend für das Land Brandenburg vor. Die Abbildung 4.3 zeigt die im Hinblick auf die Ertragsfähigkeit progressive und degressive Bodenentwicklung von Acker- und Grünlandstandorten. Die Vielzahl der die Ertragsfähigkeit bestimmenden Merkmale ist durch Interferenzen gekennzeichnet, führt jedoch oft zur gleichen Wert- bzw. Zustandsstufe. Die in den Ackerzahlen zum Ausdruck kommenden Abschlüsse der Bodenzahlen sind in Brandenburg vorwiegend in den gerin-

⁷vgl. Karte IG2 im Anhang

⁸<http://www.esri.com>; <http://arcscripsts.esri.com>

4 Material und Methoden

gen Niederschlagsmengen begründet. Abweichend von ihrer ursprünglichen, fiskalischen Bestimmung wird die Bodenschätzung im Land Brandenburg heute vorwiegend im Rahmen von Flurbereinigungs- und Bodenordnungsverfahren angewendet. Die Einbeziehung ortskundiger, langjähriger Landwirte, die als ehrenamtliche Amtliche Landwirtschaftliche Sachverständige (ALS) fungieren, ist unbedingt weiter zu verfolgen. Diese Arbeitsweise sichert auf unwiederbringliche Weise die für Expertensysteme notwendige Implementierung des Wissens von Erfahrungsträgern im Entscheidungsprozess.

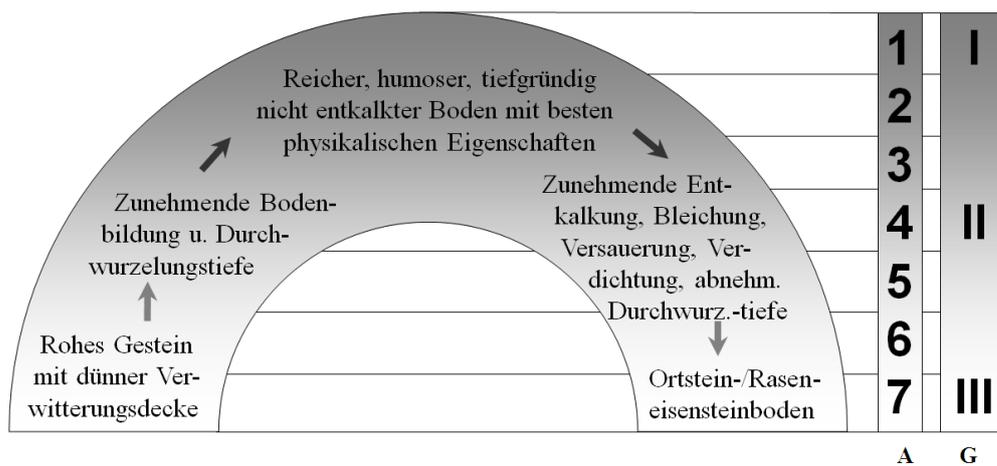


Abb. 4.3: GÖRZ'scher Halbkreis der Bodenentwicklung mit Zuordnung zu Zustandsstufen der Bodenschätzung von Acker (A) und Grünland (G) genutzten Standorten (zit. in ROTHKEGEL (1950), modifiziert)

Die Abbildung 4.4 verdeutlicht eine Ableitungsmöglichkeit von Bodentypen zu Zustandsstufen der Bodenschätzung. Dabei ist die Interpretationsbreite mehr oder weniger eng. Eine Differenzierung in ein feineres systematisches Niveau (z. B. Subtyp) ist kaum möglich. Aus den Angaben der Bodenschätzungsklassen allein lassen sich jedoch bereits mehrere Merkmale direkt oder indirekt ableiten. Zu betonen ist, dass die Klassenflächen quasi die räumlich aggregierten Grablöcher bzw. bestimmenden Grablöcher darstellen und so nur ein begrenztes inhaltliches und räumliches Auflösungs-niveau bieten. Direkt ableiten lassen sich aus den Klassenflächen die Merkmale Nutzung, Bodenarten, Zustandsstufen, geologische Entstehung (Genese), Klimastufen und Wasserverhältnisse⁹. Indirekt bestimmbar sind Schichtwechsel, Humosität und Horizontübergänge (Tabellen 4.3). Diese Merkmale werden in separaten Bewertungstabellen gehalten und sind dem Bewertungsobjekt (Klassenfläche) zugeordnet. Da die Begriffe Alluvium und Diluvium in der geologischen Terminologie heute nicht mehr in Gebrauch sind, werden sie mit den morphogenetischen Begriffen Hochfläche und Niederung gleichgesetzt. Alluviale Standorte auf Hochflächen deuten meist auf Stauwasser hin. Diluvial-Standorte können auch auf trockenen Talsanden vorkommen.

⁹vgl. Karten IA5 bis IA9 im Anhang

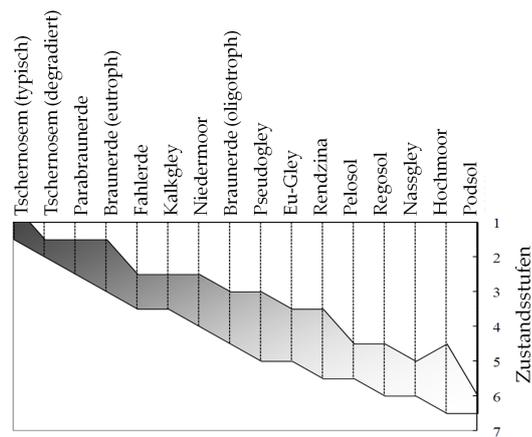


Abb. 4.4: Zuordnung von Bodensystematischen Einheiten (Bodentypen) zu Zustandsstufen der Bodenschätzung (in Anlehnung an **SCHRÖDER & BLUM (1992)**).

Die Differenzierung der Ackerstandorte ist mit 9 Bodenarten und 7 Zustandsstufen viel stärker als bei Standorten des Grünlands (5 Bodenarten und 3 Zustandsstufen). Bei Berücksichtigung von Übergängen werden die Lücken entsprechend interpoliert, so dass z. B. der Übergang von einem Sand zu einem lehmigen Sand über einen Bereich des anlehmigen Sandes führt.

Tab. 4.3: Zerlegung des Alphanumerischen Codes (z. B. S4D für Acker oder SIIa2 für Grünland) des Klassenzeichens der Bodenschätzung. Die grau hinterlegten Felder markieren die Lücken.

Acker	Grünland	Bedeutung
S	S	Sand
Sl		anlehmiger Sand
IS	IS	lehmiger Sand
SL		stark lehmiger Sand
sL		sandiger Lehm
L	L	Lehm
LT		schwerer Lehm
T	T	Ton
Mo	Mo	Moor

a) Bodenarten Acker und Grünland

Stufe Acker	Stufe Grünland	Übergang von der Krume zum Untergrund	Humus
1	I	allmählich	reich
2			
3			
4	II	↓	↓
5			
6			
7	III	scharf	arm

b) Zustandsstufen Acker und Grünland

Acker	Bedeutung
Al	Alluvium (Schwemmland)
D	Diluvium
AID	unsichere Entstehung
Al/D	Alluvium über Diluvium

c) Entstehung Acker

Stufe	Bereich	Wertigkeit
a	8.0°C und mehr	günstig
b	7.0 – 7.9 °C	mittel
c	5.7 – 6.9 °C	ungünstig
d	5.6 °C und weniger	sehr ungünstig

d) Klimastufen Grünland

Stufe	Bedeutung
1	frisch
2	frisch bis feucht
3	feucht
4	feucht bis nass oder ziemlich trocken
5	nass oder trocken

e) Wasserstufen Grünland

4 Material und Methoden

An dieser Stelle sei erwähnt, dass im Zuge der Intensivierung der Pflanzenproduktion in der DDR seit etwa 1971 die 'Standortkundliche Ergänzung der Bodenschätzung' durchgeführt wurde. Ziel war es, Veränderungen der Bodendecke (Wasserverhältnisse, Steinigkeit) durch erneute Geländearbeiten und der Einbeziehung der Erfahrung der Bewirtschafter zu erfassen, sowie eine Bodengliederungskarte zu erstellen (KASCH, 1971). Auch diese Daten werden im LBGR digital aufbereitet. Sie sind jedoch nicht für die gesamte Landesfläche, u. a. auch nicht für das Hauptuntersuchungsgebiet des Blattes Königs Wusterhausen, verfügbar.

Karten der Forstlichen Standortkartierung

In die Informationsebene der Bodenschätzung ist die der Forstlichen Standortkartierung mit den Flächen der Forstbodenformen (Ursprungsmaßstab 1 : 10 000) integriert worden. Die 2. Auflage der Anleitung zur forstlichen Standortserkundung (SEA95) erarbeiteten SCHULZE & KOPP (1996). Sie ist in die Teile A (Standortsformen), B (Praktisches Arbeitsverfahren), C (Forstliche Auswertung) und D (Bodenformen-Katalog) gegliedert. Die Grundzüge des Arbeitsverfahrens zur Forstlichen Standortserkundung legen KOPP & SCHWANECKE (1994) dar. Eine erste Übersetzung der Bodenformen erfolgte entsprechend einer von KOPP & JOCHHEIM (2002) vorgenommenen Parallelisierung der Hauptbodenformen der Naturraumkarten und forstlichen Standortkarten mit den bodensystematischen Einheiten der gültigen Nomenklatur der Geologischen Landesämter (KA5, 2004).

Insgesamt handelt es sich für das Untersuchungsgebiet des Blattes KW um ca. 8 000 Flächen. Die Forstbodenformen haben unter Berücksichtigung ihrer speziellen Nomenklatur einen direkten Bezug zur eigentlichen Bodensystematik, da ihre Einstufung zunächst wertfrei erfolgt. Bei der Bodenschätzung hingegen liegt der Fokus auf der Beurteilung der 'Güte' der Böden. Bodensystematische Einheiten können hier direkt über die Semantik abgeleitet werden. Mehrdeutigkeiten in der Wortbedeutung müssen nicht unbedingt berücksichtigt werden. Der Ansatz geht davon aus, dass z. B. Gleye in jeder Nomenklatur auch Gleye darstellen, Podsole nach SEA und KA5 Podsole sind, Lehme in der TGL Lehme auch in Baugrunduntersuchungsvorschriften bleiben. Es wird gewissermaßen nur die Kernbedeutung des Wortes ohne exakte nomenklatorische Spezifikation und Definition verwendet. Die strenge nomenklatorische Definition der hier verwendeten Merkmalswörter wird aufgeweicht. Die Definition der Gleye erfolgt über die Tiefenlage der Merkmale des Grundwassereinflusses. Dabei ist es bei dieser Herangehensweise unerheblich ob die Merkmale in der einen Nomenklatur innerhalb einer Tiefe von 40 cm unter GOF (KA5) auftreten und in der anderen in einer Tiefe von 30 bis 40 cm unter GOF (TGL). Die Informationskombination führt zu einem errechneten Wort mit einem Schwerpunkt. Die anthropogen stark veränderten Sonderstandorte, wie sie von SOWA & SCHÜBEL (1972) beschrieben worden sind, wurden hauptsächlich ihrer Wortbedeutung nach erfasst. Die folgende Abbildung zeigt die wichtigsten, digital aufbereiteten Merkmalsblätter des SEA. Die Aufbereitung erfolgte mit dem Programm MS ACCESS¹⁰.

¹⁰Microsoft; <http://office.microsoft.com/de-de/access/FX100487571031.aspx>

Forstbodenformen		
Bodenform :	<input type="text" value="BaeS"/>	Kurz: <input type="text" value="sB"/>
		Nr: <input type="text" value="60"/>
Sand - Braunerde		
Horizonte:	<input type="text" value="AhBv,Bv,[(Bv)],C,Ca,C"/>	
Körnung:	<input type="text" value="mS bis 160"/>	Kalk: <input type="text" value="bis mind. 20 karbonatfrei, Kalziumkarbonat bis 30% durchweg erst ab Eta-Zone o. tiefer einsetzend o. fehlend"/>
Bänder:	<input type="text"/>	
Eisen:	<input type="text"/>	
Humus:	<input type="text"/>	
Wasser:	<input type="text" value="mind bis 60 frei oder fast frei von GW"/>	

Abb. 4.5: Erfassungs- und Bearbeitungsformular für die Forstbodenformen des SEA (Teil 1) im Programm MS ACCESS. Eine Übersetzung der für das Blatt KW relevanten Bodenformen nach KA5 befindet sich im Anhang (Tabelle A.3, S. 181).

Reliefdaten

Das Relief besitzt einen sehr großen Einfluss auf die Bodenbildung. *KOPP et al. (1982)* unterscheiden Bodenbildungsbedingungen zu denen neben dem Substrat, Klima, belebte Umwelt und dem Menschen auch das Relief zu zählen ist und bodenbildende Vorgänge, die im Wesentlichen durch Stoffumwandlungen und -verlagerungen gekennzeichnet sind. Sie leiten aus bestimmten Einzelmerkmalen wie Neigung, Wölbung, Hangrichtung etc. bereits komplexe Reliefformen ab. Die Neigung ist dabei als wichtigstes Merkmal einzustufen. *KOPP et al. (1982)* stellen auch verschiedene Abstufungen nach *KUGLER (1974)* gegenüber und schlagen eine allgemeingültige Abstufung vor.

Zunehmende Bedeutung erlangt die Erstellung und Auswertung von DGM auch auf dem Gebiet des *Precision Farming*. *SCHMIDT & GEBBERS (2000)* erzeugen hochauflösende DGM mittels eines Landmaschinen gebundenen DGPS. Der Vorteil dieser Methode gegenüber Laserverfahren liegt vor allem in den sehr geringen Kosten. Außerdem entfällt das bei den Laser-DGM u. a. für die Vegetationskorrektur aufwendige *Postprocessing*. Auf die Bedeutung des Mikroreliefs für die Erosion geht *HELMING (1992)* ein (vgl. auch Abschnitt 6). Reliefauswertungen nach hierarchischen und Fuzzy-Ansätzen beschreiben u. a. *MÖLLER et al. (2008)*, *MACMILLAN et al. (2004)* und *MACMILLAN et al. (2000)*.

Grundlage für die digitale Reliefauswertung des Blattes Königs Wusterhausen bildet das DGM 25¹¹ des LGB. Die Spezifikation ist im Anhang (Tabelle A.7) angegeben. Die Erstel-

¹¹vgl. Karte IG9 im Anhang

4 Material und Methoden

lung des DGM erfolgte durch die Digitalisierung von Höhenlinien, Höhenpunkten und -informationen (Uferlinien, Böschungen) der TK 25 (AS), dem Staatlichen Kartenwerk der DDR. Des Weiteren ist eine photogrammetrische Stereoauswertung von Luftbildern vorgenommen worden. Die Auswertung des DGM erfolgt mit geeigneten Analyseprogrammen (SAGA, IVHG¹², *eCognition*). Dabei werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. KÖTHE & LEHMEIER (1993) leiten Reliefkategorien in Gestalt geomorphographischer Formtypen ab, die eine vertikale und horizontale Reliefgliederung repräsentieren. FRIEDRICH (1996) vertritt die Meinung, dass eine Reliefgliederung nur auf Grundlage einer Erfassung der gesamten Formgestalt erreicht werden kann. Dazu werden Verfahren der Clusteranalyse (multivariate Distanzgruppierung) unter Beachtung der lokalen Nachbarschaft genutzt. Dieser Ansatz ist Grundlage für das Programm IVHG. MÖLLER (2005) gliedert das Relief mit Hilfe der Segmentierungsalgorithmen der Software *eCognition*. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Reliefanalysen stützen sich in erster Linie auf das Programmsystem SAGA, das unter Federführung von BÖHNER *et al.* (2006) und maßgeblichem Anteil der Firma scilands GmbH entwickelt wurde. Bereits die Untersuchungen von WALTHER (1994) mit SARA¹³, dem Vorgängerprogramm von SAGA, belegen die Eignung der automatischen Reliefanalyse für die bodenkundliche Kartierung. So ist es möglich, dass mit Hilfe der Reliefanalyse eine kleinräumigere Bodenvariabilität erfasst werden kann als mit den Klassenflächen der Bodenschätzung. Das modular aufgebaute SAGA-Paket gehört zur Reihe der OpenGIS- Programme und ermöglicht so eine sehr flexible Weiterentwicklung durch eine ständig wachsende Nutzergemeinde. Es besitzt leistungsfähige Tools in der Reliefauswertung und in der Bildverarbeitung. Für die für das Blatt Königs Wusterhausen durchzuführenden Analysen wurde die Firma scilands GmbH beauftragt. Für die Ableitung von Bodenformen wurden folgend erläuterte DGM-Auswertungen herangezogen:

Geomorphographische Karte

Die Gemorphographische Karte¹⁴ weist komplexe, geomorphographische Reliefformentypen, wie Scheitel-, Senken- und Hangbereiche aus. Diese bilden die morphographischen Reliefeinheiten der Kategorie I des Programms SARA (KÖTHE *et al.* , 1996). Konvergenz-, Divergenz- und Intermediärbereiche stellen morphographische Reliefeinheiten der Kategorie II dar und differenzieren die Einheiten der Kategorie I. In Korrespondenz zum Catena-Prinzip (SCHMIDT (1991), vgl. S. 46) können so Böden potentieller Erosions-, Durchfluss- und Akkumulationsneigung ausgewiesen werden.

Hangneigung

Die Hangneigung¹⁵ ist ein einfacher, aber sehr wichtiger Reliefparameter und gibt die Neigung

¹²<http://www.math.uni-frankfurt.de/stoch/software/ivhg/index.html>

¹³System zur Automatischen Reliefanalyse

¹⁴vgl. Karte IA10 im Anhang

¹⁵vgl. Karte IA12 im Anhang

in Grad in Expositionsrichtung an. Sie wird nach [BAUER *et al.* \(1985\)](#) berechnet. In der Regel wächst mit steigender Hangneigung der Oberflächenabfluss und Bodenabtrag. In dieser Arbeit wird der Parameter Neigung ebenfalls zur Abgrenzung von Kern- und Übergangsbereichen vorgeschlagen (siehe auch S. 61).

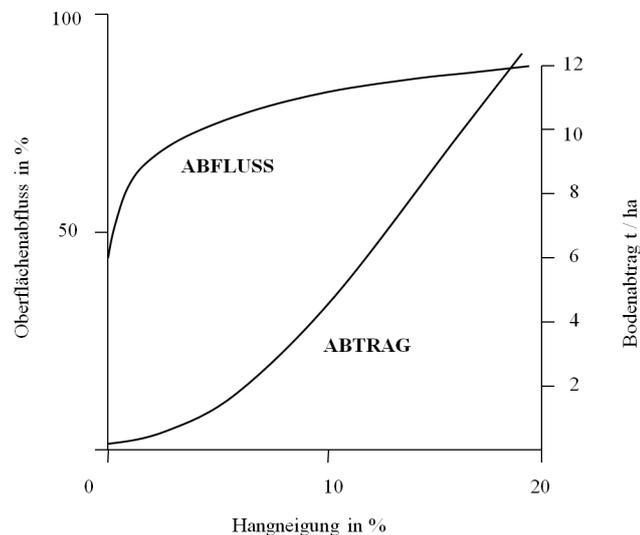


Abb. 4.6: Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in Abhängigkeit von der Hangneigung nach [BREBURDA \(1983\)](#)

Exposition

Die Exposition¹⁶ gibt die Richtung der stärksten Neigung an und wird ebenfalls nach [BAUER *et al.* \(1985\)](#) berechnet. Die Exposition spielt eine wichtige Rolle bei der Ausbildung von Podsolen. So weisen nordexponierte Hänge eine intensivere Podsolierung als südexponierte auf.

Bodenfeuchteindex

Der Bodenfeuchteindex (BFI)¹⁷ gibt die potentiellen Feuchteverhältnisse wieder und errechnet sich aus der durch den lokalen Abfluss verfügbaren Wassermenge im Einzugsgebiet und der Neigung. Die Neigung bestimmt dabei die Fließgeschwindigkeit und damit die Verweildauer des abfließenden Wassers ([BÖHNER & KÖTHE, 2003](#)). Der Bodenfeuchte- oder Wetness-Index wurde erstmals von [BEVEN & KIRKBY \(1979\)](#) beschrieben und repräsentiert einen nichtlinearen Zusammenhang des speziellen Einzugsgebietes eines Punktes und seiner lokalen Neigung. Ein hoher Wert ist demnach charakteristisch für konvergierende, flache Bereiche. Niedrige Werte herrschen in steilen, kleineren Gebieten vor. Gleichzeitig wird eine starke laterale Komponente des Bodenwasserflusses unterstellt. Der BFI eignet sich nicht nur für grundwasserbeein-

¹⁶vgl. Karte IA13 im Anhang

¹⁷vgl. Karte IA11 im Anhang

4 Material und Methoden

flusste Böden, sondern ist auch ein wichtiges Maß für die Quantifizierung des Stauwassereinflusses.

Höhe über Tiefenlinie

Die Höhe über Tiefenlinie (HuTL)¹⁸ kennzeichnet die lokale Erosionsbasis und damit die relative Höhenlage. Sie berechnet sich aus dem Vertikalabstand der Rasterzellen zur Tiefenlinie und eignet sich für die Regionalisierung des Grundwasserflurabstandes.

Multiresolution Valley-Bottom Flatness Index

MCKENZIE & GALLANT (2007) führen einen Reliefparameter ein, der ähnlich dem Bodenfeuchteindex dazu dient, geomorphologische Unterschiede und Bodenmächtigkeiten abzuschätzen. Dabei eignet sich der Bodenfeuchteindex vorrangig dazu die Mächtigkeit in erosionsbeeinflussten Zonen abzuschätzen. Der *Multiresolution Valley-Bottom Flatness Index (MrVBF)* hingegen findet in Depositionszonen Anwendung. In Abhängigkeit von der zu erwartenden Mächtigkeit werden die Indizes funktional gewichtet. Somit wird es möglich bilaterale Übergangszonen auszuweisen.

Terrain Classification Index

Der Terrain Classification Index for Lowland (TCI_{low}) ist ein kombinierter Reliefparameter, der morphographische Reliefformen metrisch abzubilden versucht. Er ergibt sich aus der Summe von Höhe über Tiefenlinie und Bodenfeuchteindex (KÖTHER, 2007).

Dem Relief kommt insgesamt die Rolle eines multikategorialen Indikators zu, der in unterschiedlichem Maße z. B. die Zielkategorien Wassereinfluss und Bindigkeit, sowie kolluviale und erosive Substratgenese (vgl. Tabelle 5.2, S. 108) bedient. Da quasi die gesamte Bodendecke reliefdeterminiert ist (siehe *Catena-Prinzip*, S. 46), wird der Reliefauswertung eine hohe Bedeutung beigemessen und erhält bei der Datenaufbereitung eine hohe Wichtung (vgl. Abschnitt 3.2.2.1.1). Sie liefert wichtige Elemente einer Indizienkette, die schließlich die Bodenform bzw. die Horizontabfolge liefert.

Luft- und Satellitenbilder

Konventionelle Luft- und Satellitenbilder bilden den oberflächigen oder oberflächennahen Bereich eines betrachteten Landschaftsausschnittes objektiv ab, d. h. es erfolgt keine Interpretation bei der Datenaufnahme. Die Eindringtiefe bzw. das Rückstrahlungsvermögen ist abhängig von der Wellenlänge des verwendeten Spektralbereiches. Da diese wiederum nicht nur von den Bodeneigenschaften in ihren spezifischen Parameterkombinationen bestimmt werden, ist letztlich nur ein Summenparameter auswertbar, der nur durch Hinzunahme anderer Informa-

¹⁸vgl. Karte IA14 im Anhang

tionsquellen in Einzelparameter aufgelöst werden kann. Dies betrifft natürlich auch andere Datengrundlagen jedoch nicht in so hohem Maße, da bereits bei der zielkategorienorientierten Auswahl der Informationsunterlagen eine Einengung der Parametervielfalt erfolgt. Diese Möglichkeit ist sowohl bei den passiven als auch aktiven Fernerkundungsverfahren eingeschränkt. Unter bestimmten Aspekten ist jedoch die Auflösung in Einzelparameter nicht unbedingt erforderlich, z. B. dann wenn es lediglich um die Betrachtung der Änderung bestimmter Eigenschaften geht. Luftbilder¹⁹ des sichtbaren Lichtes, und nur diese werden hier betrachtet, eignen sich besonders für die Ausweisung von Nassstellen, Moorumrandungen, qualitativen Humusgehalten und von Versiegelungsgraden der Siedlungsgebiete. Auf das Potenzial der multitemporalen Auswertung sei hier nur verwiesen. Diese erlaubt z. B. den Torfschwund zu berechnen und den Flächenverbrauch durch Versiegelung zu quantifizieren.

Bodenprofilbilder

Bodenprofilbilder dokumentieren den vertikalen Aufbau des Bodens im extrem großmaßstäbigen Bereich und werden konventionell im Bereich des sichtbaren Lichtes angefertigt. Denkbar sind aber auch Methoden, wie sie bei Fernerkundungsverfahren (Infrarot, Radar etc.) angewendet werden. Eine solche Vorgehensweise würde sich besonders dazu eignen, die Tiefenwirkung der Fernerkundungsverfahren zu quantifizieren. Damit wären gleiche Verfahren in extrem unterschiedlichen Maßstabbereichen und in unterschiedlichen räumlichen Dimensionen vergleichbar. Innerhalb der Integration von Horizontbeschreibungen in die Konzeptkartenerstellung bilden Bodenprofilfotos ebenfalls wertvolle qualitative Daten, die stärker in eine Interpretation einzubeziehen sind. Dazu soll im Fortgang der Arbeiten die bildanalytische Auswertung von Profilfotos intensiviert werden. Als Software kommt ebenfalls das Programm *eCognition* zum Einsatz. Weitere leistungsfähige Bildbearbeitungsprogramme sind GIMP²⁰ (KYLANDER & KYLANDER, 2001) und AdOculus (BÄSSMANN & KREYSS, 2004). Auf die Theorie der Fuzzy-Bildverarbeitung geht TIZHOOSH (1998) ausführlich ein. Das Ziel der Analysen von Bodenprofilfotos besteht in einer durch Klassifikation objektivierten Horizontdifferenzierung. Prinzipiell könnte durch eine Bildanalyse, die u. U. bereits vor Ort durchgeführt werden kann, auch eine optimierte Probenahme gesteuert werden, da Areale signifikanter Merkmalsunterschiede statistisch 'abgesichert' erfasst werden könnten. Ein Ansatz zur Bildanalyse wird in dieser Arbeit im Abschnitt 5.3.1.1.3 (S. 143) vorgestellt.

4.1.2.2 Liniendaten

Liniendaten besitzen, bezogen auf die Ebene, eine eindimensionale Ausdehnung. Als bodenkundlich relevant werden hierzu Fluss-, Kanal- und Grabenläufe²¹, die aus topografischen

¹⁹vgl. Karte IG4 im Anhang

²⁰GNU Image Manipulation Program; <http://www.gimp.org/>

²¹vgl. Karte IG5 im Anhang

4 Material und Methoden

Karten abdigitalisiert werden oder bereits in ATKIS als Ebene vorliegen. Dabei müssen die Gewässernetzhierarchie und die generellen Abflussbedingungen berücksichtigt werden. In Mitteleuropa kann von vorwiegend effluenten Verhältnissen ausgegangen werden. Nach SPRINGER (2006) sind diese Verhältnisse dadurch gekennzeichnet, dass das Grundwasser dem Fluss zufließt (Exfiltration). Die Grundwasseroberfläche ist in Richtung Fluss geneigt. Der Neigungsbereich ist dabei abhängig von der Größe des Flusses. Reliefparameter wie z. B. Höhe über Tiefenlinie und Kulminationslinien gehören ebenfalls zu dieser Datenkategorie. Diese Kategorie liefert Extrema innerhalb der Ableitungswerte einer Zielkategorie, z. B. der Verglebung.

4.1.2.3 Punktdaten

Die im Gelände erhobenen Punktdaten stellen innerhalb der inhaltlich/räumlichen Kategorie die höchste Aussagesicherheit dar. Die Profile oder Sondierungen werden einerseits inhaltlich sehr genau beschrieben, andererseits werden die Koordinaten meist genau auf $\pm 1m$ bestimmt. Sie dokumentieren die hier betrachteten Bodenmerkmale in ihrer tiefenbezogenen Ausprägung. Die Tiefenangaben können dabei zentimetergenau sein oder aber sie werden in Tiefenstufen angegeben. Oft sind Analysendaten verfügbar. Auch innerhalb der Informationsebene 'Punktdaten' existieren Abstufungen bezüglich der Aussagesicherheit. Neudaten sind beispielsweise 'sicherer' als Altdaten einzustufen, weil sie in der Regel nach der gültigen Nomenklatur aufgenommen werden und so keine Unsicherheiten wie bei der Übersetzung von Altdaten auftreten. Ein Konzept zur algorithmierten Übertragung bodenkundlicher Daten von der TGL- zur KA4-Nomenklatur haben HARTMANN & KAINZ (1997) entwickelt und unterstreichen, dass eine formale Zuordnung ohne eine inhaltliche Betrachtung der Profildaten abzulehnen ist, „da die unterschiedlich verwendeten Aggregierungsstufen nicht eindeutig zugeordnet werden können und demzufolge eine Fehlerquelle beinhalten.“ Liegen für das Interpretationsthema 'Bodenkarte' Punkt- und Flächendaten gleichermaßen vor, so werden die Punktdaten höher bewertet bzw. gewichtet. Die Gewichtungsfaktoren gehen als Wichtungslayer (Ebenenprinzip) in die räumliche Analyse der Sachdaten ein. Diese stellen keine Wahrscheinlichkeitsfaktoren dar, sondern eine informelle Bewertung, in wie weit die Informationsebenen eine Evidenz bedienen. Folgende Punktdaten sind für das Blatt Königs Wusterhausen erschlossen bzw. erhoben worden:

1. Agronomische Profile der Geologischen Spezialkarte
2. Eintragungen von Profilen in die Arbeitsblätter zur Geologischen Spezialkarte
3. Grablochbeschriebe der Bodenschätzung
4. LBGR- und Fremdpunktdaten in verschiedenen Aufnahmeintensitäten

Eine Übersicht der für das Hauptuntersuchungsgebiet verwendeten Punktdaten zeigt die folgende Abbildung (vgl. auch Karte IG12 im Anhang).

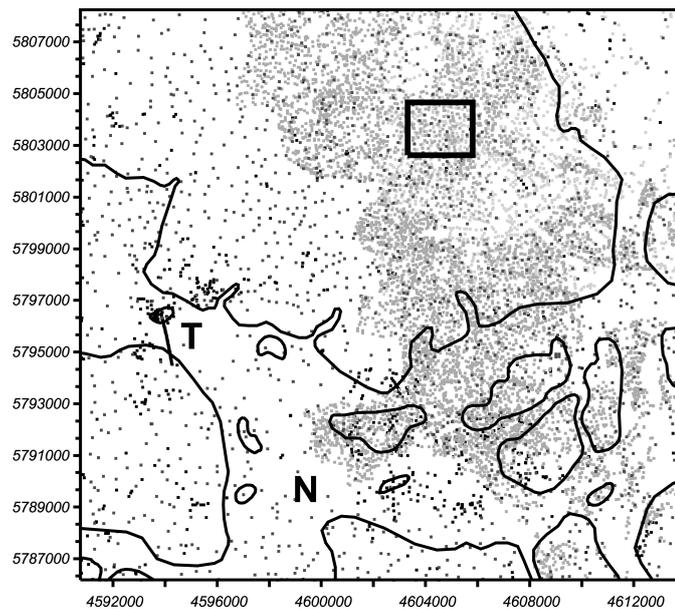


Abb. 4.7: Räumliche Verteilung der verfügbaren Punktdaten auf dem Blatt KW. Das Rechteck markiert den in der Abbildung 5.30 (S. 147) behandelten Ausschnitt. N: Niederung; T: Transekt (siehe auch Abbildungen 2.1 (S. 9) und 5.36 (S. 155)).

Geologische Schichtdaten (Agronomische Einschreibungen)

Neben den Flächeninformationen der Geologischen Spezialkarte liefern auch die Eintragungen der sog. Agronomischen Profile wertvolle Interpretationsgrundlagen für die Erstellung der Konzeptkarte. Bei mittlerer Datendichte ist die räumliche Repräsentanz dieser Profile hoch einzustufen. Die Aufnahmetiefe beträgt in der Regel 2 m. Durch die Angabe von Schichten und deren Tiefenlagen bzw. -spannen gehen sie mit in die Analyse der vertikalen Dimension ein. Es werden maximal vier Schichten angegeben. Eine sehr hohe Datendichte weisen die Eintragungen der Profile in den Arbeitskarten der jeweiligen Blattbearbeiter auf. Diese sind jedoch nur noch vereinzelt verfügbar. Für die BK 50 des Blattes Königs Wusterhausen ist das konkret die Arbeitskarte 3647. Die Aufnahmetiefe erreicht hier nicht immer 2 m.

Tab. 4.4: Beispiele für den Inhalt, die Struktur und die verbale Bedeutung von Agronomischen Profilen des Geologischen Messtischblattes

	schwach lehmiger Sand mit 8 dm Mächtigkeit		kalkig, humoser Sand mit 3 dm Mächtigkeit		sandiger Humus mit 3 dm Mächtigkeit
<u>SLS 8</u>	über	<u>KHS 3</u>	über	<u>SH 3</u>	über
<u>SL 6-10</u>	sandigem Lehm	<u>K 3</u>	Kalk	S	Sand
S	mit 6 bis 10 cm Mächtigkeit	S	mit 3 dm Mächtigkeit		
	über		über		
	Sand		Sand		

Grablochbeschreibungen der Bodenschätzung

Die für die Klassenflächen repräsentativen *Bestimmenden Grablöcher*, die durch eine Kurzbeschreibung dokumentiert sind, besitzen eine hohe räumliche und inhaltliche Auflösung. Die Anzahl der beschriebenen Merkmale ist groß. Digitalisierte Grablochbeschreibungen liegen bisher nur für etwas mehr als 50 % des Untersuchungsgebietes vor. Die digitale Erfassung der Feldschätzungsbücher erfolgte unter Koordinierung der Oberfinanzdirektion in den Finanzämtern der Kreise des Landes Brandenburg mit dem eigens für diese Maßnahme entwickelten Programm FESCH (Digitales FeldSchätzungsbuch). Die Erfassung der Profildaten und die Bestimmung der Koordinaten der Grablochbeschreibungen ist nicht synchron und am gleichen Ort erfolgt. Insgesamt lagen für das Gebiet 6 017 digitalisierte Grablochbeschreibungen vor. Die Verknüpfung der Sachdaten mit den Lagekoordinaten wurde im LBGR durchgeführt. Auf Grund der hohen Informationsdichte eignen sich die Grablochbeschreibungen besonders gut für die Analyse der vertikalen Dimension. Neben den bestimmenden Grablöchern existieren die sog. *Mitlaufenden Grablöcher*, als weitere in einer Klassenfläche befindliche Grablöcher. Die Gesamtanzahl der Grablöcher wird nach MORSTEIN (2007) für Brandenburg mit 680 000 angegeben. Die Zahl der *Musterstücke* beträgt 220, die der *Vergleichstücke* 12 000. Sie besitzen jedoch auf Grund der für das Untersuchungsgebiet geringen Datendichte nur eine untergeordnete Bedeutung. Insgesamt sind für die Landesfläche 6,2 Millionen Bohrlöcher dokumentiert. Die Zahl der Schätzungskarten beläuft sich auf etwa 12 000.

Nr.	Humus	Kalk	Farbe	Eisen	Feu.	Sonst.	Bodenart	von	bis	Horizz
1	h2+h3						S	2,5	2,5	
2	h2						S	2,0	2,0	
3	h2						S	2,0	2,0	
4							S-			
5					fr		S	4,0	4,0	
6							S,12			
7										

Abb. 4.8: Erfassungsmaske des Programms FESCH (Digitales Feldschätzungsbuch). Im oberen Bereich des Formulars befinden sich die Kopf- bzw. Stammdaten, im unteren die Schichtdaten (hier 6 Schichten).

Profildatenbanken des LBGR

Die Profildaten des LBGR sind in separaten, projektbezogenen Datenbanken abgelegt. Dies stellt die Berücksichtigung nomenklatorischer Spezifikation sicher und erlaubt eine Einschätzung der Datenqualität entsprechend der Herkunft und des Alters. Für die Verarbeitung im GIS werden die Daten zusammengeführt, so dass sämtliche Kopfdaten mit den Datenfeldern (Schurfbezeichnung, Hochwert, Rechtswert, Bodenform, Herkunftsdatenbank) und sämtliche Schichtdaten (Horizonttiefen, Horizont, Substrat) in zwei verknüpften Tabellen zur Verfügung stehen. Diese bilden die Grundlage für die Belegung der Zielkategorien mit den Zugehörigkeitswerten (vgl. Abschnitt 3.2.2.1.1).

Eine Übersicht der Datengrundlagen und -kategorien, sowie deren Ableitungsschwerpunkte gibt die Tabelle 4.5.

4.1.3 Verschneidung, Verpunktung und Interpolation

Bei einer fortschreitenden **Verschneidung** von Flächen steigt die Menge der zu verarbeitenden Informationen bei immer kleiner werdender Flächengröße exponentiell. Die Flächengröße geht gegen Null (Punkt, Pixel, Voxel) und das Datenspektrum pro Zielkategorie gegen Unendlich. Die Güte der Wichtung der Informationen (Ebenen) und die Art der gewählten Mengenoperatoren bestimmt die Differenzierung und die Sensibilität bezüglich nachgeschalteter Auswertungen.

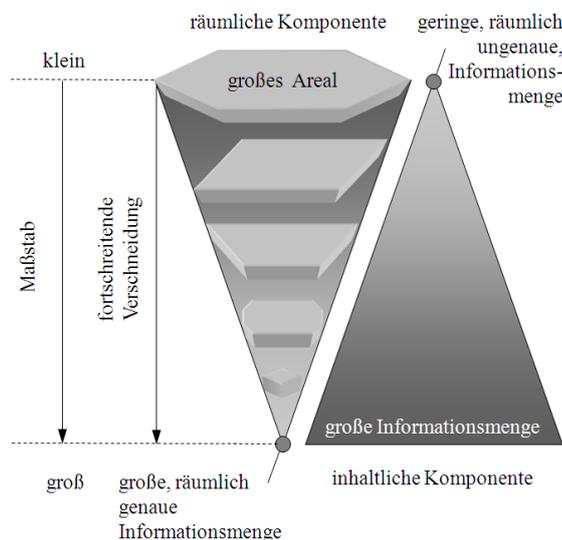


Abb. 4.9: Räumliche und inhaltliche Dimension bei fortschreitender Flächenverschneidung. Bei fortschreitender Verschneidung (Vereinigung) steigt die Informationsmenge sehr stark an.

Tab. 4.5: Datengrundlagen, -kategorien und deren empirische Wichtung bezogen auf den Zielmaßstab 1 : 50 000 (Bedeutung der Abkürzungen: P: Pedogenese, S: Substrat, A: Akkumulation, E: Erosion, Y: Anthropogener Einfluss, G: Grundwasser, H: Humus).

Thematische Ebene	Informationsgrundlage	Maßstab/ Gitterweite	Datenkategorien			Wichtung der Zielkategorien														
			Punktdaten	Flächendaten	Liniendaten	P	S	A	E	Y	G	H								
Geologie	Geologische Spezialkarte	1 : 25 000	Agronomische Einschreibungen Profile Arbeitsblätter	Geologische Einheiten	0,4	0,7	0,3	0,6	0,2	0,2	0,1	0,1	0,8	0,3						
															Geologische Karte	1 : 100 000	Geologische Einheiten	0,2	0,2	
															Geologische Karte	1 : 300 000	Geologische Einheiten	0,1	0,1	
Boden- Schätzung	Boden- schätzungskarte	1 : 25 000	Muster- und Vergleichsstücke Grablocheschriebe	Klassenflächen	0,8	0,8	0,3	0,7	0,9	0,9	0,1	0,7	0,7	0,8						
															Forstliche Stand- ortserkundung	1 : 10 000	Standorts- einheiten	0,9	0,9	
Relief	DGM25	25 m		Einheiten der Relief- auswertung	0,1	0,1	0,7	0,7	0,9	0,9	0,1	0,7	0,7	0,8						
Topographie	Topographische Karten	1 : 25 000	Amtliche Höhenpunkte	Seen, Teiche, Nassstellen, Sandareale, Siedlungen	0,2	0,2	0,8	0,3	0,8	0,3	0,8	0,3	0,3	0,5						
															Luftbilder	1 : 10000	Seen, Teiche, Nassstellen, Humus-, Moorareale, Sied- lungen, Verkehrswege	1,0	0,4	0,5
Hydro- geologie	Hydrogeologische Karte	1 : 25 000	Pegelstände	Grundwasserberfläche	0,1	0,1	0,1	1	1	1	1	1	1	1						
															Klima	Niederschlags-/ Temperaturkarten	0,1	0,1	0,1	1
Boden	Landesaufnahme	1 : 300 000 1 : 200 000 1 : 100 000	Sondierungen	Bodeneinheiten Bodeneinheiten Bodeneinheiten	0,4 0,3 0,6	0,4 0,3 0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
																Fremd-/Altdaten	Profile, Sondierungen, Analysendaten	Bodeneinheiten	0,9	0,9
																MMK	1 : 100 000	PRODAT	Standortseinheiten	0,8

Die Repräsentation des Geowissens, also hier vorwiegend die Interpretation der Inhalte, erfolgt durch die Anwendung von WENN ... DANN -Regeln, die empirisch und über Abfragen aus Punkt- oder Flächendatenbanken abgeleitet werden. Jede zusätzliche der in Tabelle 5.10 (S. 125) angegebenen Informationsebenen engt das Spektrum der abgeleiteten (hypothetischen) Bodenformen ein. Die Bestimmung der dominierenden Pedogenese und des schwerpunktmäßig auftretenden Substrates erfolgt durch die Bestimmung mittlerer gewichteter Zugehörigkeiten. Diese Bodenform bildet den inhaltlichen Kern der Bodengesellschaft. Grundsätzlich wird jede Information eines Fachthemas als Indiz für die Ableitung der Zielaussage angesehen. Die Charaktere der Indizien können dabei von nur vagen Hinweisen bis hin zu Beweisen reichen. Sie können regional sehr unterschiedlich sein. Die Abarbeitung dieser Indizienkette, die iterative Prüfungen definierter Bedingungen vornimmt, führt zur Generierung der Flächenaussagen. Dabei wird jedes Merkmal der jeweilig betrachteten Informationsebene als ein mehr oder weniger gut geeigneter Indikator bzw. geeignetes Indiz für die Belegung einer definierten Zielkategorie herangezogen. Es werden zunächst Flächen unter Einbeziehung von Punktinformationen zwecks einer weiteren Differenzierung durch die Zerlegung in Thiessen-Polygone partitioniert. Ein Thiessen-Polygon eines Punktes erhält man durch das Berechnen der Mittelsenkrechten von allen Nachbarpunkten zu dem untersuchten Punkt. Die Schnittpunkte dieser Mittelsenkrechten der nahe liegenden Punkte schneiden an den Thiessen-Scheitelpunkten, deren Verbindung das Thiessen-Polygon ergibt (BILL, 1999). Die Partitionierung ist für jede Fläche gesondert durchzuführen²². Diese Art der Flächendifferenzierung z. B. der Legenden-einheiten in der Geologischen Spezialkarte kann durch die Einbeziehung der agronomischen Profile, bei den Klassenflächen der Bodenschätzung durch die Grablochbeschriebe erfolgen.

Die **Verpunktung** wird als räumliche Fuzzifizierung betrachtet. Der Abstand der Punkte (Rasterweite) bestimmt die Fuzziness im erzeugten Grenzbereich. Die Geometrien der durch die Verschneidung entstandenen Flächen werden durch Verpunktungen (Abbildung 4.10) bzw. Punktklassenbildung (Raster, Grid) aufgelöst, wodurch die unterschiedlichen geometrischen Qualitäten der Informationsebenen weniger ins Gewicht fallen. Dies erreicht man durch die Zuweisung der Zugehörigkeitswerte der Zielkategorien an die Punkte des in die Flächen gelegten Rasters.

²²vgl. Karte IW5 im Anhang

4 Material und Methoden

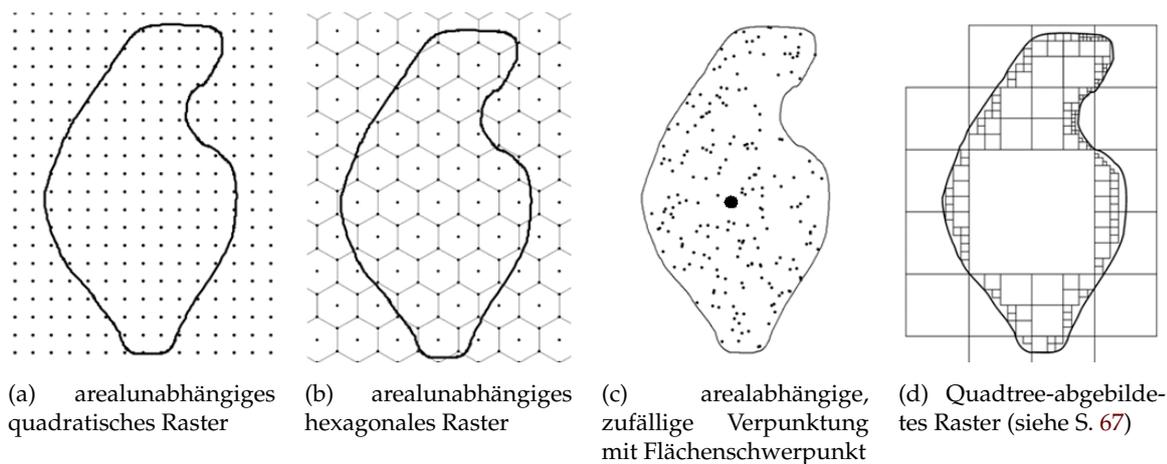


Abb. 4.10: Varianten von Verpunktungen (Raster, Grid) einer Fläche des Verschneidungsproduktes

Konkret aufgenommene Profile (Punkte) aus aktuellen oder Altdatenbeständen werden im anschließenden Schätzverfahren mit einbezogen. Schätz- bzw. Interpolationsverfahren, wie z. B. Inverse Distanz Wichtung (IDW) oder Kriging quantifizieren und kategorisieren Saum-/Übergangsbereiche in vertikaler und horizontaler Richtung. Das Verfahren wird dem erwähnten Umstand gerecht, dass Böden mehr oder weniger kontinuierlich ineinander übergehen. Ausnahmen bilden stark anthropogen geprägte Böden. KÖTHE & BÖHNER (2001) nutzen Kriging für sog. funktionale Bodenkonzeptkarten.

Die **Interpolation** dient in dieser Arbeit vorrangig dazu, den kontinuierlichen Charakter der Bodendecke zu erfassen. Nach HINTERDING *et al.* (2003) werden in einigen Bundesländern, darunter auch Brandenburg, Kriging-Verfahren für die räumliche Interpolation genutzt. Das Land Sachsen verwendet für den Vollzug des Bodenschutzes das *Inverse Distanz Verfahren*, das ebenfalls zufrieden stellende Ergebnisse liefert. Nach BULLINGER (2000) geht das Verfahren auf das aus der Physik bekannte Gravitationsmodell zurück. Es basiert grundlegend auf der Mittelung von Datenpunkten. Lokale Extremwerte werden nur wiedergegeben, wenn diese als Datenpunkte erfasst sind. Gründe für die Verwendung dieses Verfahrens innerhalb dieser Arbeit liegen weiterhin in der Einfachheit und der Zeitersparnis, da keine Anpassungen in Form von Variogrammen erfolgen müssen. Die Interpolation ist hier eher Mittel zum Zweck, denn sie dient nach der Verpunktung der Flächen vorrangig der Quantifizierung der Übergänge bei direkter Einbindung der realen, originären, nicht abgeleiteten Punktdaten. Bei der IDW-Methode werden die Punkte in Abhängigkeit der Entfernung zu dem gerade bearbeiteten Gitterpunkt gewichtet. Dabei bestimmt der Exponent, wie stark die Gewichtung mit der Entfernung abnimmt, d. h.. die Erhöhung der Gewichtung führt zu einer Verkleinerung des Einflussbereiches der Datenpunkte. Bei groß gewählten Exponenten werden also die nah liegenden Nachbarpunkte höher gewichtet. Die Summe der Gewichtungsfaktoren hat den Wert 1. Die Gewichtung eines Punktes ist exponentiell proportional zum umgekehrten Wert der

Entfernung. Bezogen auf die Anzahl einzubeziehender Punkte empfiehlt ZIMMERMANN *et al.* (1999) sechs Nachbarn für die Erzeugung 'weicher' Oberflächen. Der Vorteil der Methode, den BULLINGER (2000) beschreibt, ist die einfache Erzeugung einer glatten, stetig differenzierbaren Oberfläche. Die Inverse Distanz Wichtung ist eine exakte Methode, die interpolierte Oberfläche verläuft durch alle Datenpunkte. Es dient in dieser Arbeit dazu die räumliche Zugehörigkeitsfunktion der Zugehörigkeitswerte der Zielkategorien abzubilden.

Schätzverfahren, wie *Kriging*, quantifizieren zwar die Interpolationsfehler, die Wahl der Variogrammfunktion und die relativ große Anzahl der Freiheitsgrade beeinflussen jedoch maßgeblich die Modellierung. Bereits OTTE (1988) kommt zu dem Schluss, dass *Kriging* nicht eindeutig besser als andere Interpolationsverfahren abschneidet. Auch nach HERBST (2001) sind *Kriging*verfahren „nur eingeschränkt in der Lage die Varianz des Ausgangsdatensatzes zu reproduzieren.“ Modifizierte *Kriging*-Verfahren nutzen MONSE & SCHULTZ-STERBERG (2000), MONSE *et al.* (2000) und BÖHNER & KÖTHE (2003) für die angewandte Bodenregionalisierung u. a. im Bodenschutz.

BURGER & SCHAFMEISTER (2000) modifizieren vorhandene Interpolationsprogramme unter Einbeziehung von Zusatzinformationen über hydrogeologische Kenngrößen und unter Berücksichtigung anisotroper, strömungsabhängiger Grundwasserbeschaffenheitsmerkmale. BARDOSSY *et al.* (2003) entwickeln eine Interpolationsmethode, die ebenfalls Zusatzinformationen heranzieht um sie als Klassifizierungshilfe von Grundwasserdaten zu nutzen und so plausiblere Ergebnisse für die Regionalisierung von Messwerten als herkömmliche Methoden zu erzielen.

Bei der *Triangulierung* wird die Werteoberfläche der Beobachtungsvariablen durch Aufspannen von Ebenen zwischen den gemessenen Werten geschätzt. Jeweils durch drei benachbart gemessene Werte wird eine Ebene gelegt. Diese Ebenen bilden zusammen die zu schätzende Werteoberfläche. Es werden Punkte mit x-, y- und z-Koordinaten dreiecksvermascht. Der Vorteil liegt auch hier darin, dass die entstandenen Flächen durch die definierten Punkte verlaufen bzw. ihre Ecken bilden. Somit tritt kein Informationsverlust auf. Dieses, auch als Dreiecksvermaschung bekannte Verfahren, muss dabei dem sog. DELAUNAY-Kriterium genügen nach dem der Umkreis eines Dreiecks des Netzes keine weiteren Punkte der vorgegebenen Punktmenge enthalten darf. Die Eckpunkte der DELAUNAY-Triangulierung bilden die Umkreismittelpunkte der sog. Voronoi- bzw. Thiessen- Polygone (vgl. S. 85). TIN erlauben dichte Informationen in komplexen Flächen und wenige Informationen in einfachen oder homogenen Flächen.

Eine weitere Methode zur Erzeugung stetiger Oberflächen bilden *Splines*. Ein Spline ist eine Kurve, die durch eine gegebene Anzahl von Punkten verläuft und diese möglichst glatt verbindet. Die Punkte werden durch Polynome meist dritter Ordnung mit stetiger erster Ableitung verbunden. Für die räumliche Interpolation werden kubische Splines verwendet. Ein kubischer Spline ist eine glatte Kurve, die durch gegebene Punkte im Koordinatensystem geht. Die Teilstücke der Kurve werden dabei durch eine kubische Parabel beschrieben. Die Funktion muss zweimal stetig differenzierbar sein, so dass Knicke an den Anschlussstellen vermieden werden.

4 Material und Methoden

Für eine Vergrößerung der Rasterweite bzw. Zusammenfassung von Punktdaten für Maßstabsverkleinerungen wird der Interpolation eine Mittelwertbildung durch die Anwendung der 'Moving-Window'-Methode vorgeschaltet. Diese Methode wird unter Abschnitt 4.1.5 näher beschrieben.

Die Anwendung der Interpolationsverfahren ist sehr komfortabel mit dem Programm Surfer^{®23} möglich. Es bietet auch sehr gute Visualisierungsmöglichkeiten. Die Diskussion der Güte der verschiedenen Verfahren ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Das Interpolationsverfahren stellt nur einen Methodenbaustein dar. Seine Anwendung beeinflusst das Prinzip der Gesamtmethode nicht.

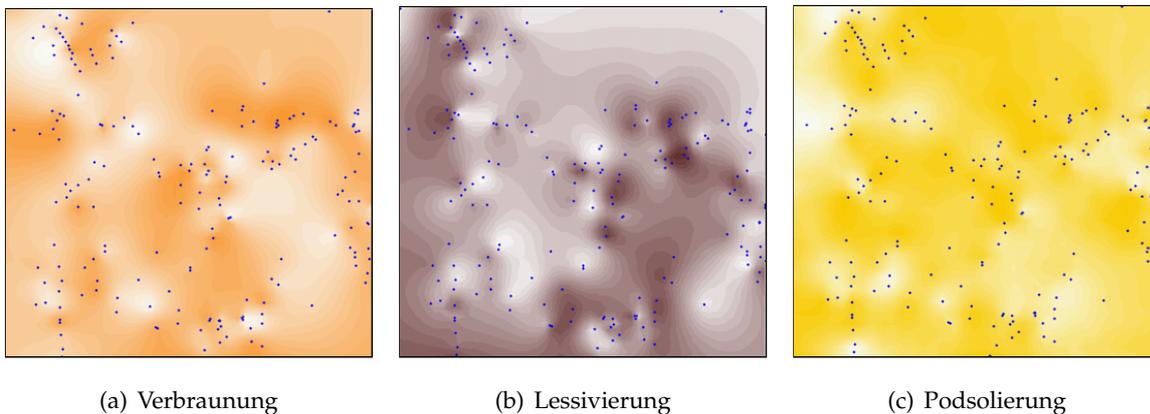


Abb. 4.11: Beispiele für Pedogenesen in ihren horizontalen Übergängen nach Bestimmung der Zugehörigkeiten von Punktinformationen zu Zielkategorien der Pedogenesen und Anwendung des IDW-Verfahrens

In der Abbildung 4.12 repräsentieren dunkle Bereiche stärkere Intensitäten der jeweiligen Pedogenese als die hellen (schwache bis keine). Die entstandenen Ebenen werden überlagert bzw. verschnitten, so dass die Erstellung einer Bodenformenkarte möglich ist. Diese Karte weist jedem Punkt (Pixel) eine kartierte oder geschätzte Bodenform zu. Die Abbildung 3.27 (S. 55) verdeutlicht das Prinzip der Rasterverschneidung. Die 'Grenzen' sind in jeder Ebene unterschiedlich und im Kontext der Bodenformen unscharf.

Die Abbildung 4.12 zeigt die erzeugten Übergänge nach der Verpunktung und Interpolation.

²³<http://www.goldensoftware.com/products/surfer/surfer.shtml>

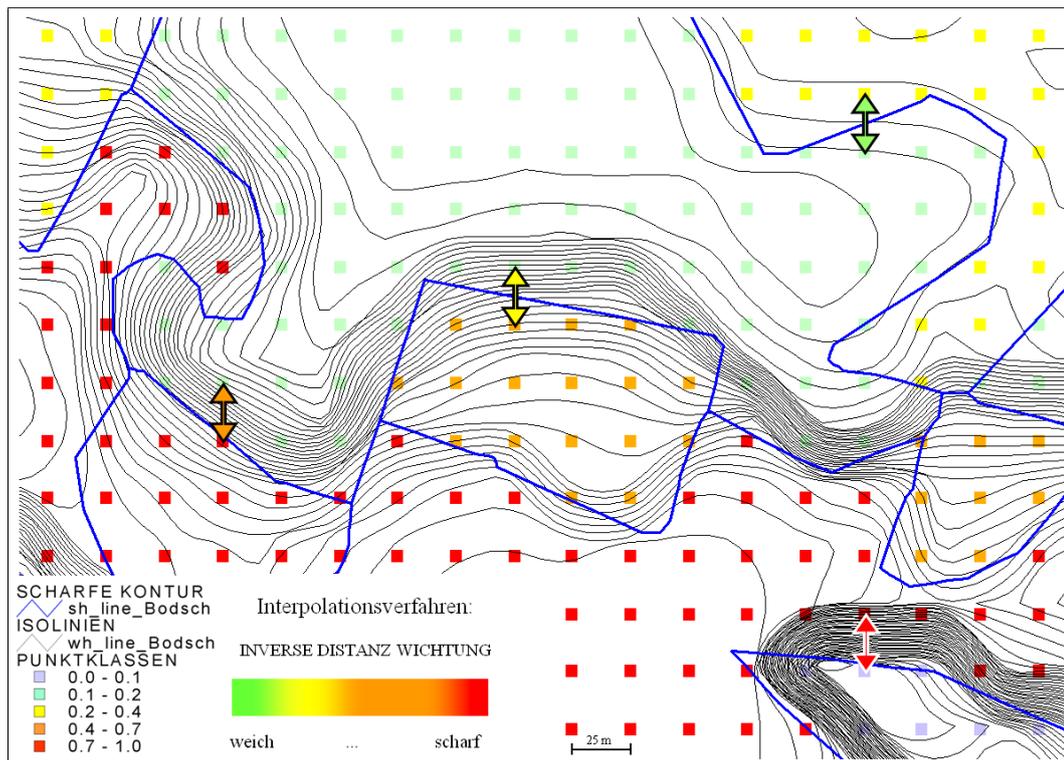


Abb. 4.12: Inverse Distanz Wichtung nach Verpunktung im Quadratraster-Verfahren. Die Rasterweite beträgt 25m. Die Übergänge sind durch die Liniendichten, sowie die farbigen Doppelpfeile entsprechend der kontinuierlichen Farblegende exemplarisch dargestellt

Abstrahierte Darstellungen von Übergangsbereichen zeigen die Abbildungen 3.26 (S. 55) und 3.35 (S. 64). Sie verdeutlichen die Unsicherheit der räumlichen und inhaltlichen Zuordnung von Merkmalen und stellen die horizontale Repräsentation des in Abbildung 3.22 b) dargestellten Sachverhaltes dar.

4.1.4 Interferenz

Interferenz wird in dieser Arbeit als Effekt aufgefasst, der auftritt, wenn die Datenreliefs zweier oder mehrerer Zielkategorie bildender Ebenen (z. B. Bindigkeit aus der Ebene Geologie, Bodenschätzung etc.) überlagert werden. Entsprechend den relativen Lagen der Peaks (Berge) und Täler treten die in Tabelle 4.6 genannten und in Abbildung 4.13 grafisch dargestellten Erscheinungen auf.

Tab. 4.6: Effekte der additiven Überlagerung (vgl. Abbildung 4.13).

Effekt	Ursache
(A_a) absolute Abschwächung	Peak und Peak bzw. Tal und Tal fallen zusammen $p + p = A_a, t + t = A_a$
(A_r) relative Abschwächung	Peak und Peak bzw. Tal und Tal fallen zusammen, Flanken eines Reliefs flacher $t_{flach} + t = A_r$
(E) Auslöschung	Peak und Tal fallen zusammen $p + t = E$
(L) Angleichung	Peak und Tal sind verschoben und haben gleiche Amplituden $t + p_{x_0+\phi} = L_1, t + p_{x_0-\phi} = L_2$
(R) Reduktion	Peak und Tal sind verschoben und haben unterschiedliche Amplituden $t_{flach} + p_{x_0-\phi} = R$

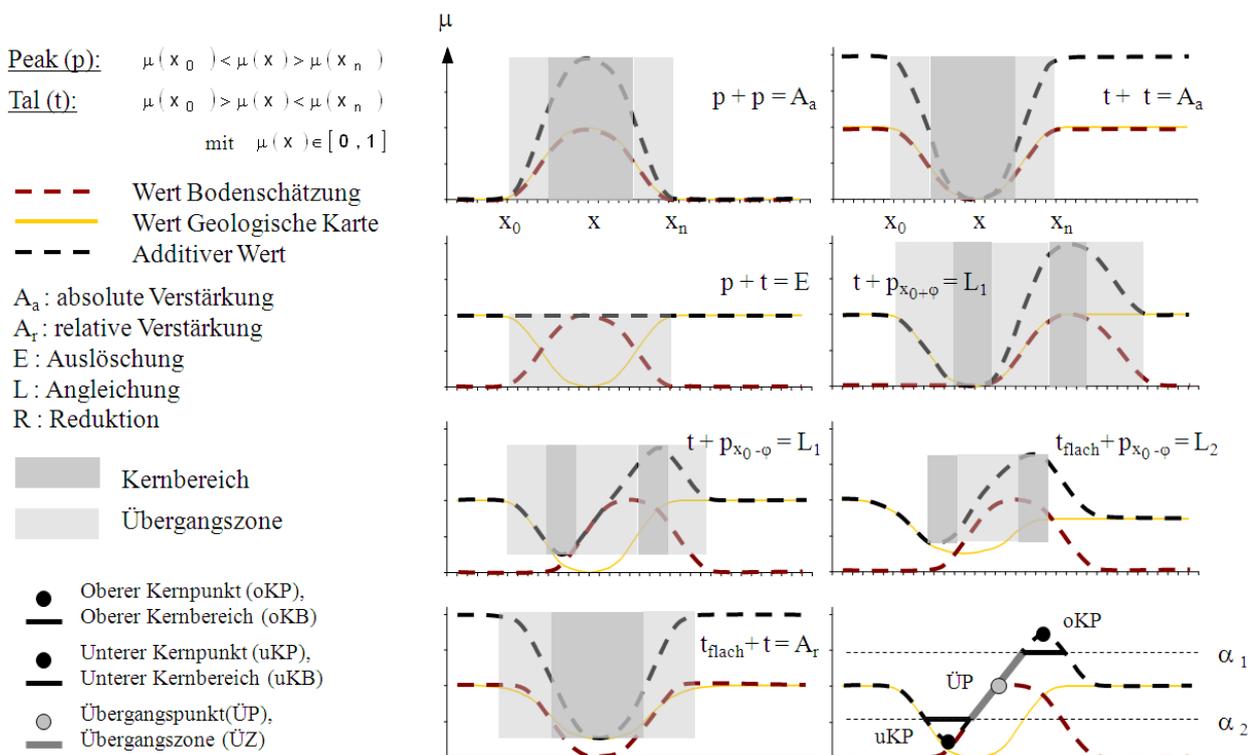


Abb. 4.13: Effekte der additiven Überlagerung der Ebenen Geologie und Bodenschätzung für die Zielkategorie Bindigkeit unter Berücksichtigung von Übergängen

Der Kernbereich wird hier als ein um die Extremwerte, d. h. die resultierenden Peakwerte (oberer Kernpunkt) und Talwerte (unterer Kernpunkt), definierter Bereich aufgefasst. In diesen Bereichen ist die Varianz stets geringer als in den benachbarten Übergangsbereichen.

4.1.5 Aggregierungsmethoden

Die Aggregierung ist eine Methode der Defuzzifizierung. Sie fasst Objekte oder auch Mengen zusammen. Grundsätzlich können inhalts- und raumaggregierende Verfahren unterschieden werden. Die raumaggregierenden Verfahren berücksichtigen dabei auch die räumliche Komponente. Deshalb sind diese Verfahren vorzuziehen. In Abbildung 4.14 sind einige wichtige Verfahren genannt. Im Abschnitt 5.3.1.1 wird auf die Zentralisierung, Clusterung und Segmentierung näher eingegangen.

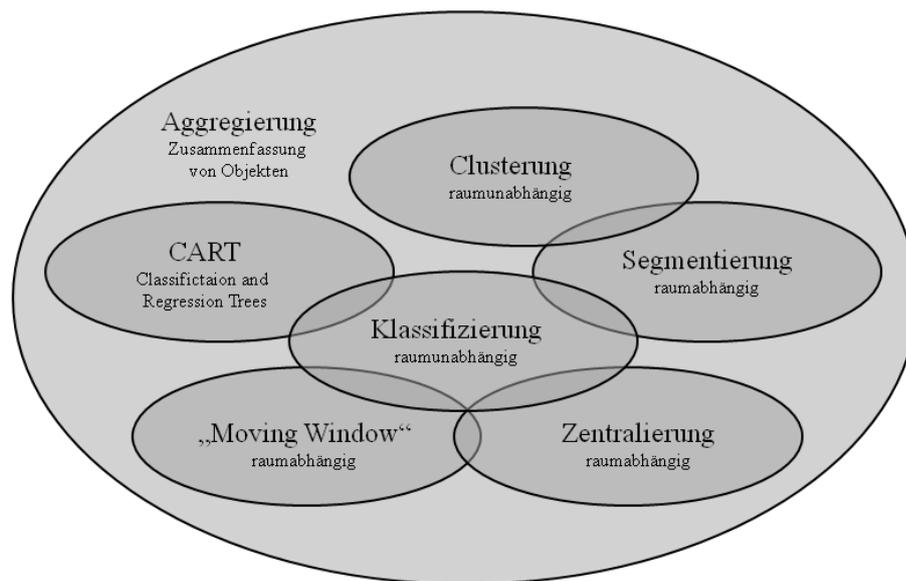


Abb. 4.14: Raumabhängige und raumunabhängige Aggregierung. In dieser Arbeit wird die Aggregierung als eine Methode der räumlichen Defuzzifizierung betrachtet.

'Moving-Window'-Methode

Bei der 'Moving-Window'-Methode wird ein 'Fenster' bestimmter Größe und Form (meist Quadrat oder Kreis) um eine Fensterbreite über die Daten bewegt. Die Daten können dabei als regelmäßig oder unregelmäßig vorliegende Punkte oder als Grid vorliegen. Die sich im Fensterausschnitt befindenden Daten werden zusammengefasst. Für den Ausschnitt können z. B. Mittelwert, Minimum, Maximum angegeben werden.

CART²⁴ (Classification and Regression Trees)

Der CART-Algorithmus ist von BREIMAN *et al.* (1984) entwickelt worden. Er stellt ein hierarchisches Clusterverfahren dar bei dem optimale Klassentrennungen erreicht werden sollen. Der Algorithmus basiert auf binären Entscheidungsbäumen. Die Klassifikationsgüte

²⁴<http://www.statsoft.com/textbook/stcart.html>

4 Material und Methoden

wird dadurch optimiert, dass die vorgenommene Klassifikation auf eine maximale Anzahl von Objekten zutrifft. Je höher der Anteil des Objektes an der Zielklasse, desto stärker ist sein Einfluss auf die 'binär endende' Entscheidung. CART hat den Vorteil sehr große Mengen kategorialer, ordinaler und metrisch-kontinuierlicher Daten ohne Veränderung ihrer Skalierung zu verarbeiten. Das Verfahren nutzen SELLE *et al.* (2006) für die Regionalisierung der nutzbaren Feldkapazität.

SCHMIDT (2002) führt mit dem CART-Verfahren eine Raumgliederung von Deutschland durch und definiert folgende Voraussetzungen für Gruppierungen:

Tab. 4.7: Optimierungskriterien einer sog. gebundenen Klassifikation nach SCHMIDT (2002)

Kriterium	Beschreibung
1. Homogenität	Elemente sollen innerhalb einer Klasse einander möglichst ähnlich sein
2. Trennschärfe	Klassen sollen voneinander möglichst verschieden sein
3. Richtigkeit	der Sachverhaltserfassung
4. Objektivität	Bearbeiterunabhängigkeit und Verfahrenstransparenz
5. Reliabilität	Zuverlässigkeit, Wiederholbarkeit, Präzision
6. Validität	Gültigkeit der Beziehungen

Eine prozessorientierte landschaftsökologische Gliederung Deutschlands nimmt BURAK (2005) auf Basis von sog. Konfinitätsanalysen (Nachbarschaftsanalysen) vor.

4.2 Aussagesicherheit

4.2.1 Datenqualitäten

Nach SCHÖLL (2004) können Daten bzw. Datenbanken zu keinem Zeitpunkt ein perfektes Bild der realen Welt liefern. Deshalb ist die Kategorie 'imperfekte' Daten einzuführen, die die Beurteilung der Qualität einer Datenbasis hinsichtlich der Daten selbst sowie ihrer Verknüpfung erlaubt. Arten der Imperfektion der Daten selbst werden in Tabelle 4.8 unterschieden.

Tab. 4.8: Arten imperfekter Daten (vgl. SCHÖLL (2004))

Art der Imperfektion	Beschreibung
Unvollständigkeit	Fehlen eines Datums (existenziell, universell)
Unsicherheit	Fehlen von Informationen über den wahren Wert (Möglichkeit, Wahrscheinlichkeit, Glaubwürdigkeit und Plausibilität)
Ungenauigkeit	nur Näherung bekannt (intervallwertig, diskret, negativ)
Vagheit	Fehlen der genauen Bestimmung eines natürlich sprachlichen Begriffes (linguistische Variable)

Des Weiteren tritt Imperfektion (Unvollkommenheit) zwischen den Daten dann auf, wenn sich die Bedeutung der Daten mit der Zeit ändert oder wenn Daten aus verschiedenen Quellen zusammengeführt werden. Hier werden die Kategorien Vereinbarkeit und Unvereinbarkeit verwendet. Weitere Gründe für die Imperfektion zwischen den Daten liegen in der unvollständigen Spezifikation der Datenstruktur der Datenbank oder die Daten passen nicht in die spezifizierte Struktur. Auf Modelle und Fortpflanzung der Unschärfe gehen auch OBERGUGGENBERGER (2000) und WÄLDER (2006) ein. HEUVELINK & BROWN (2007) entwickeln eine Taxonomie unsichererer Bodenvariablen, die kontinuierlichen, diskreten, kategorialen oder beschreibenden Charakter tragen und in ihrer Raum-Zeit-Variabilität betrachtet werden müssen. Sie leiten aus deren Kombination sog. Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen ab, die die Unsicherheit quantifizieren. Nach FISHER (2003) können zwischen den Komponenten der Unsicherheit und der Datenqualität folgende Beziehungen hergestellt werden:

Tab. 4.9: Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Komponenten der Unsicherheit und Datenqualität nach FISHER (2003), (zit. in FINKE (2007), modifiziert)

Unsicherheit	Datenqualität
Fehler	Positionsgenauigkeit Attributgenauigkeit Vollständigkeit
Vagheit, Konflikt, Mehrdeutigkeit	Semantische Genauigkeit
Fehler, Konflikt, Vagheit, Mehrdeutigkeit	Gültigkeit
Konflikt	Logische Konsistenz
?	Herkunft

Für die Bewertung der Ableitungsgüte aus Rohdaten sind verschiedene Kriterien heranzuziehen, die sich nach den Komponenten Inhalt, Raum und Abstraktion orientieren. So kann man den Analysenwert einer Probe hinsichtlich seiner Daten- und Lageschärfe als schärfstes Datum

4 Material und Methoden

betrachten. Aus Flächendaten abgeleitete Flächendaten stellen das Maximum der Unschärfe dar (Tabelle 4.10). Das Prinzip ist in Abbildung 4.15 verdeutlicht.

Tab. 4.10: Ableitungsgüte verschiedener Datenkategorien; Pr: Probe, HSK1: Horizont-Substrat-Kombination mit Analysendaten, HSK2: Horizont-Substrat-Kombination mit abgeleiteten Analysendaten, HSK3: Horizont-Substrat-Kombination mit abgeleiteten Analysendaten (lagefern), P1: Profil- mit Horizont-/Substratangaben (systematisch nicht abstrahiert), P2: Profil- mit Horizont-/Substratangaben (systematisch wenig abstrahiert), P3: Profil (systematisch stark abstrahiert), F1: Flächeneinheit 1, F2: Flächeneinheit 2 (lagenah zu Flächeneinheit 1), F3: Flächeneinheit 3 (lagefern zu Flächeneinheit 1)

Ableitungsniveau	Objekt	Inhaltskomponente	Raumkomponente	Abstraktionskomponente	Inhaltstreue	Lagefreue	Datenschärfe	Informationsgehalt	Ableitungsgrad
Fläche	F3	$F3 = F1$	$F3 \gg F1$	$F3 = F1$	gering	hoch	gering	hoch	hoch
	F2	$F2 = F1$	$F2 > F1$	$F2 = F1$	mittel	hoch			
	F1	F1	F1	F1	hoch	hoch			
Profil	P3	$P3 = P1$	$P3 \gg P1$	$P3 \gg P1$	gering	gering	↓	↑	↑
	P2	$P2 = P1$	$P2 > P1$	$P2 > P1$	mittel	mittel			
	P1	P1	P1	P1	hoch	hoch			
HSK	HSK3	$HSK3 = HSK1$	$HSK3 \gg HSK1$	$HSK3 \gg HSK1$	gering	gering	↓	↑	↑
	HSK2	$HSK2 = HSK1$	$HSK2 > HSK1$	$HSK2 > HSK1$	mittel	gering			
	HSK1	HSK1	HSK1	$HSK1 = Pr$	hoch	mittel			
Probe	Pr	Pr	Pr	Pr	hoch	hoch	hoch	gering	gering

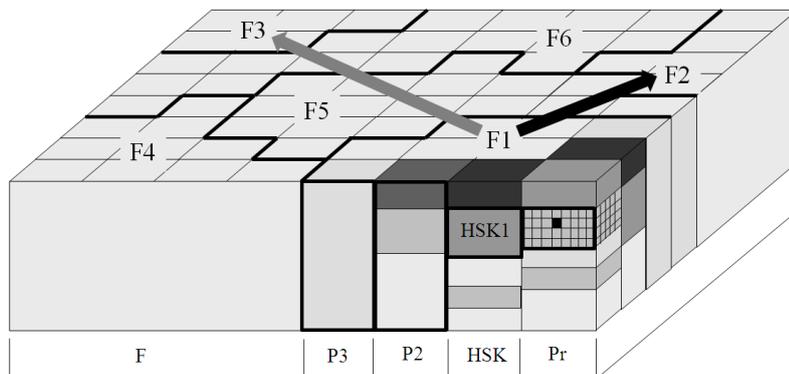


Abb. 4.15: Raumübertragungsprinzip der bodenbeschreibenden Kategorien Probe (Analysenwerte), Horizont-Substrat-Kombination, Profil und Fläche. Die Pfeile symbolisieren unterschiedliche 'Übertragungsentfernungen'. Die Abkürzungen beziehen sich auf die Tabelle 4.10

Die räumliche Regelbasis ist also insofern mit der inhaltlichen verknüpft, als dass die Distanz des abgeleiteten Objektes in die Bewertung mit eingeht. Für Punktdaten erfolgt die Distanzbe-
rechnung entsprechend des Satzes nach PHYTAGORAS:

$$d = \sqrt{|RW_R - RW_A|^2 + |HW_R - HW_A|^2} \quad (4.2)$$

mit

d : Distanz; RW_R : Rechtswert Rohdatum; RW_A : Rechtswert Ableitungsdatum;
 HW_R : Hochwert Rohdatum; HW_A : Hochwert Ableitungsdatum

Bei Flächenobjekten werden die Koordinaten der Schwerpunkte berechnet. Weiterhin kann der sog. Gestaltindex verwendet werden, der als 'Übereinstimmungsgrad' der Flächenformen ebenfalls als Gütemaß in die Bewertung eingehen kann. Den Gestaltindex und eine breite Palette weiterer Indizes zur Landschaftsanalyse nutzt [FUCHS \(2002\)](#). Der Gestaltindex kennzeichnet eine Fläche im Hinblick auf ihre Abweichung von der Kreisform. Er wird wie folgt berechnet:

$$G_I = \frac{p_{ij}}{2\sqrt{\pi \times a_{ij}}} \quad (4.3)$$

mit

G_I : Gestaltindex; p : Umfang; a : Fläche

Der Gestaltindex eignet sich dazu, die Übertragungsgüte von Werten einer Fläche auf eine andere Fläche auszudrücken. Je ähnlicher sich die Flächen bezüglich ihrer Form sind, desto besser sind die Übertragungsgütemaße. Demnach werden die Werte, die z. B. von einer kreisförmigen auf eine linienhafte Fläche, eine Linie oder gar einen Punkt übertragen werden, mit einem geringen Übertragungsgütemaß belegt. Ein weiteres Maß, das zur Beurteilung der Übertragungsgüte herangezogen werden kann, ist die sog. 'fraktale Dimension' (siehe S. 49). Die Gütemaße sind Elemente der Aussagesicherheit und dienen damit der Qualifizierung von Pedotransferfunktionen.

Diese Vorgehensweise ist jedoch nur bei der Verarbeitung von Vektordaten (Polygonen) sinnvoll anwendbar. Eine andere Methode, die besonders für die Rasterdatenverarbeitung geeignet erscheint, ist die Anzahl der Pixel in unterschiedlichen Richtungen zu bestimmen. Das ist durch das einfache zeilen(x-Richtung)- und spaltenweise(y-Richtung) Zählen der Pixel pro Identifikationsnummer der Pixelklasse (Polygon, Segment) möglich. Das ist im Beispiel der Abbildung 4.16 vorgenommen worden. Das Ergebnis sind Pixelprofilinien, die eine Art Fingerabdruck für die konkrete Fläche darstellen. Aus ihnen können weitere Parameter für die Flächencharakterisierung abgeleitet werden, die hier jedoch nicht weiter diskutiert werden.

4 Material und Methoden

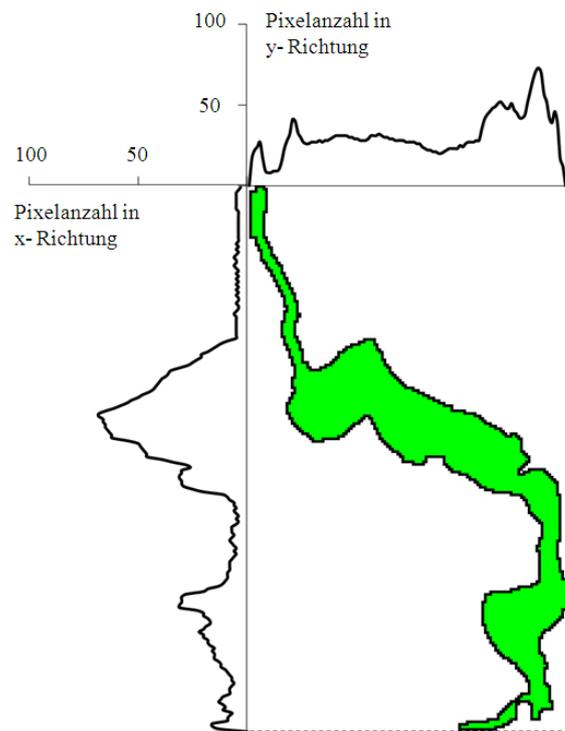


Abb. 4.16: Pixelprofil (Anzahl) in x- und y-Richtung für die Flächencharakterisierung

Bezogen auf die räumliche Darstellung von Datenqualitäten wurden in Abschnitt 4.2 fünf Methoden umrissen. Bei der diskreten Flächenabgrenzung liegt der Schwerpunkt auf einer generalisierten Flächenaussage für Dichten von Punktinformationen, bei der kontinuierlichen Darstellung hingegen gehen Dichten und Qualitäten von Punktinformationen gleichermaßen ein. Dabei müssen vereinfacht folgende Kombinationsmöglichkeiten berücksichtigt werden (Tabelle 4.11).

Tab. 4.11: Datenqualitäten und Aussagesicherheiten

Kategorie	Grad der Aussagesicherheit
hohe Qualität und hohe Raumdichte der Daten	insgesamt hohe Aussagesicherheit
hohe Qualität und geringe Raumdichte der Daten	insgesamt mittlere Aussagesicherheit
geringe Qualität und hohe Raumdichte der Daten	insgesamt mittlere Aussagesicherheit
geringe Qualität und geringe Raumdichte der Daten	insgesamt geringe Aussagesicherheit

Qualität ist neben der eigentlichen Güte auch eine Funktion der Zeit. Sie ist heute mehr denn je ein wichtiger Parameter bei einer Aufwand/Nutzen-Kalkulation. Die folgende Formel versucht verschiedene, die Aussagegüte bestimmende Parameter auszudrücken. Zu bemerken ist, dass die Zeit der Methodenentwicklung hier keinen Eingang findet, sondern nur der Zeitaufwand der Kartenerstellung an sich. Dazu wurde die folgende Gleichung aufgestellt (vgl. Tabel-

le 3.11 und 4.12).

$$AN_G = \frac{\sum_{i=1}^n (F \times m \times D \times VM \times AG \times W \times E)}{t} \quad (4.4)$$

mit

AN_G : Gesamtnutzwert, F: Flächenanteil, m: Anzahl, D: Datum,
VM: Maßstabsverhältnis, AG: Aufbereitungsgrad, W: Aussagequalität,
E: Ebenenanzahl; t: benötigte Erstellungszeit in Monaten

Die folgende Tabelle 4.12 stellt einige Beispiele für den Nutzwert der inhaltlichen Komponente einiger Informationsebenen und deren Kombination gegenüber.

Tab. 4.12: Einfache Nutzwertermittlung bei der Kartenerstellung. Grundlage ist die Gleichung 4.4. Angenommen wurde die Erstellung einer Bodenkarte i. M. 1 : 50 000. Das Datum geht dezimal in der Form *jjjj,mmtt* ein. Es wurde der digitale Aufbereitungsgrad vorausgesetzt. Der Gesamtnutzwert wurde für eine Ebene und drei Monate Erstellungszeit berechnet.

n	Flächenanteil	Anzahl	Jahr	Monat	Tag	Maßstabsverhältnis	analog	georeferenziert	digital	Aussagequalität	Nutzwert
	%		jjjj	mm	tt		a	g	d		
	F	m		D		VM		AG		W	AN
(1) Karten Boden	100	1	2001	12	10	0,166	0,1	0,5	1	1	0,000221
(2) Karten Nicht-Boden	100	1	1900	00	00	2			1	0,7	0,001773
(3) Landesprofile	1	1500	2000	00	00	50			1	1	1,000000
(4) Nicht KA4/5-Profile	1	50	1985	00	00	50			1	0,9	0,029775
(1) BÜK 300 000, (2) Geologische Karte 1 : 25 000, (3) LBGR, (4) PRODAT										AN_G : 0,343923	

Der Flächenanteil der Punktdaten wird im obigen Beispiel auf 1 gesetzt. Die Teilnutzenwerte sind normiert. Die Angaben, die insgesamt zur Datenverlässlichkeit gemacht werden können, sind generell abhängig vom Maßstab, da sich zumindest eine Komponente der Aussagesicherheit (Datendichte) ändert. D. h. eine geringe Datendichte im großen Maßstab führt zu einer höheren Datendichte im kleineren Maßstab und damit zu einer relativ erhöhten Aussagesicherheit für den betreffenden kleineren Maßstabsbereich.

4.2.2 Index der Unschärfe / Schärfe

Der Index der Unschärfe nach TIZHOOSH (1998) wird für die Zugehörigkeiten der Pixel einer $x \times x$ -Nachbarschaft berechnet. Die Unschärfe wird hier als Abstand zwischen einer Fuzzy-Menge und ihrem Komplement verstanden. Der Index der Unschärfe ist geeignet als Gütemaß bei Karten mit angegeben zu werden, da nach HADER *et al.* (1998) die Verschärfung eines Bildes häufig nur bis zu einem gewissen Grad sinnvoll ist und sich die Pixel um so besser in Klassen aufteilen lassen, je kleiner der Index der Unschärfe eines Bildes ist. Er eignet sich auch deshalb dazu die optimale Anzahl der Klassen bei der Segmentierung zu ermitteln.

$$\gamma = \frac{2}{MN} \sum_M \sum_N \min(\mu_{mn-1} - \mu_{mn}) \quad (4.5)$$

mit

γ : Index der Unschärfe; μ_{mn} : Grau- bzw. Farbwertzugehörigkeit

4.2.3 Bewertungs- und Darstellungsmethoden

Gerade in einer Zeit eines enormen Informationsangebotes ist es wichtig die Güte oder Verlässlichkeit der Informationen differenziert zu beschreiben und darzustellen. Es gibt zahlreiche Vorschriften, Nomenklaturen und Methoden, die ein konkretes Ziel zu einer bestimmten Zeit bei einem bestimmten Kenntnisstand bedienen. Es müssen diese mit den verschiedensten Methoden der für jeweils eine ganz spezielle Zielkategorie erzielten Informationen teilweise neu in Beziehung gesetzt werden. Dabei werden die eigenen und aktuellsten Informationen (Karten, Profilaufnahmen) am höchsten gewichtet. Die Informationsgüte steht dabei immer in einer direkten Beziehung zur eigentlichen Fachinformation bezogen auf eine Zielkategorie. Erweitert auf Karten (räumliche Darstellungen allgemein, auch 3D-Modelle) bedeutet das, dass zu einer jeden thematischen Karte (Bodenkarte, Geologische Karte, Auswertungskarte) auch eine Karte der Aussagesicherheit gehört (*Zwei-Karten-Konzept*). Diese Aussagesicherheit ergibt sich aus den zu der Zielkategorie gewichteten Daten- bzw. Informationsgütern der verschiedenen thematischen Ebenen (inhaltliche Komponente), sowie der Datendichten (räumliche Komponente). Das Ziel besteht darin, dass der Geländeeinsatz so optimiert wird, dass gezielt Areale mit geringen Datendichten oder/und Datenqualitäten kartiert werden. Auswertungskarten können ebenfalls besser eingeschätzt werden und bilden so eine fundierte Grundlage für zu treffende Entscheidungen besonders im Umwelt- und Planungssektor, so dass eventuell erforderliche Nachuntersuchungen angestellt werden können.

Für die räumliche Darstellung der Datenqualitäten können Verfahren verwendet werden, die sich auf eine diskrete Flächenabgrenzung oder eine kontinuierliche Darstellung beziehen. Einige Möglichkeiten der Darstellung von Aussagesicherheiten werden folgend umrissen:

Regelmäßige Polygone

Die Darstellung von Datendichten und Datenqualitäten unter Nutzung regelmäßiger Polygone (Quadratraster, Hexagon, Pixel) ist eine einfache Methode zur räumlichen Visualisierung der Aussagesicherheit. Dabei wird die Anzahl der Datenpunkte pro Quadratraster (Größe frei wählbar) gezählt und abgestuft dargestellt. Ebenso kann die Datenqualität dargestellt werden.

Unregelmäßige Polygone

Eine Darstellung in unregelmäßigen Polygonen, die konkrete Flächenkonturen aus Karten, z. B. Naturräumliche Einheiten oder Legendeneinheiten repräsentieren, ist ebenfalls möglich. Des Weiteren ist eine Darstellung in Thiessen-Polygonen sinnvoll. Dieses Verfahren eignet sich besonders zur Darstellung von Datenqualitäten. Es werden einzelne Punkte oder Punktwolken flächenmäßig dargestellt. Die Erzeugung von Thiessen-Polygonen wurde auf Seite 85 erläutert. Die Werteoberfläche ist konstant.

Interpolation

In Analogie zu der Annahme von Kern- und Übergangsbereichen in der Bodendecke ist auch für die Aussagesicherheiten eine kontinuierliche Darstellung sinnvoll. Dabei kommen die im Abschnitt 4.1.3 (S. 86) beschriebenen Verfahren zum Einsatz. Im Gegensatz zu den Polygonmethoden wird eine stetige Werteoberfläche erzeugt. Die Methoden der Interpolation sind auch hier denen der diskreten Flächenabgrenzung vorzuziehen. Die gewählten Areale können zwar abgestuft dargestellt werden, es entstehen aber so genannte Treppenfunktionen, die als nachteilig anzusehen sind. Bei den kontinuierlichen Darstellungen hingegen werden stetige Werteoberflächen erreicht, die auch bei der Zielkategorie Aussagesicherheit Übergänge besser berücksichtigen. Das heißt, je näher man sich an einem aktuell kartierten Punkt (Profil) befindet, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass auch dort die Bodenform angetroffen wird, die im kartierten Punkt aufgenommen wurde und in der Karte ihren Ausdruck findet.

4.3 Informationsvisualisierung

4.3.1 Polygenesegrad als Heterogenitätskriterium

Der Polygenesegrad stellt ein Heterogenitätskriterium in vertikaler Richtung dar. Er kennzeichnet die Komplexität der Pedogenese und Substratgenese nach Anzahl der in Erscheinung tretenden bodenbildenden Prozesse seit Ablagerung des Ausgangsgesteins. Dabei können pro-

4 Material und Methoden

gressive und degressive Bodenentwicklungen berücksichtigt werden. Er errechnet sich wie folgt:

$$\mu_{PG} = \frac{n_{HT} + n_{BT} + n_{GG} + n_{rGG} + n_{SS} + n_{KS} + n_{SG} + n_{YY}}{100} \quad (4.6)$$

mit

μ_{PG} : Polygenesegrad; n_{HT} : Humusbildung oder -abbau (auch Moore);

n_{BT} : terrestrische Pedogenesen; n_{GG} : Grundwassereinfluss;

n_{rGG} : reliktscher Grundwassereinfluss; n_{SS} : Stauwassereinfluss;

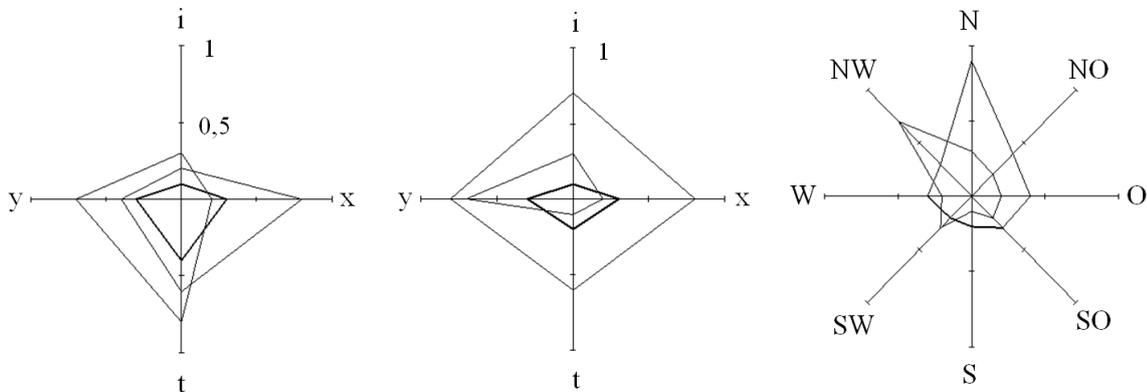
n_{KS} : Sekundärkalkbildung; n_{SG} : Substratgenesen;

n_{YY} : anthropogener Einfluss

Das bedeutet z. B., dass ein Regosol einen sehr geringen und eine anthropogen überprägte, pseudovergleyte Braunerde-Fahlerde einen hohen Polygenesegrad besitzt.

4.3.2 Zielstern

Zur Visualisierung der Pedogenesen eignet sich die aus der Entscheidungstheorie bekannte netzartige Darstellung des Zielsternes bei dem die beste Alternative dort zu finden ist, wo die Netzfäden möglichst nah am Sternmittelpunkt liegen. Er kann dafür verwendet werden die Inhalt-Raum-Charakteristik der Pedogenesen synoptisch zu visualisieren.



(a) Beispiel für die Hauptmerkmale unterschiedlicher Podsolierungsintensitäten

(b) Beispiel für die Hauptmerkmale unterschiedlicher Verbrauensintensitäten

(c) Beispiel für expositionsbestimmte Pedogenesen

Abb. 4.17: Visualisierung von Pedogenesen (i: Merkmalsintensität, x: horizontale Erstreckung in O-W-Richtung, y: horizontale Erstreckung in N-S-Richtung, t: Tiefenerstreckung des Merkmals)

Hier liegen die schwach ausgebildeten Pedogenesen mit geringer räumlicher Ausdehnung im Mittelpunkt. Sämtliche Merkmale sind normiert dargestellt. In der Abbildung 4.17 c) werden die Pedogenesen intensitätsbezogen entsprechend den Himmelsrichtungen beispielhaft

gezeigt. Diese Art der Visualisierung ermöglicht eine schnelle Einschätzung der Hauptmerkmale der Pedogenesen für einen betrachteten Landschaftsausschnitt.

4.3.3 Fuzzy-Hyper-Würfel

Eine anschauliche Art Zugehörigkeitsfunktionen von Mengen darzustellen ist der Fuzzy-Hyper-Würfel. Dabei weisen die Ecken des Würfels die maximalen Zugehörigkeiten von 1 auf. Die Unschärfe ist hier praktisch null. Je mehr man sich jedoch zum Zentrum des Würfels bewegt, desto grösser wird die Unschärfe. Bezüglich der Mengenzugehörigkeit herrscht somit im Würfelzentrum eine extrem hohe bzw. absolute Unschärfe. Die Darstellung der Fuzzy-Mengen im Hyperwürfel betont die Beziehung zwischen den Mengen selbst. Die Visualisierung im Fuzzy-Hyper-Würfel eignet sich für die Darstellung der Relationen pedogenetischer Ausprägungen innerhalb von Bodenklassifikationssystemen (z. B. Gegenüberstellung KA5 und WRB).

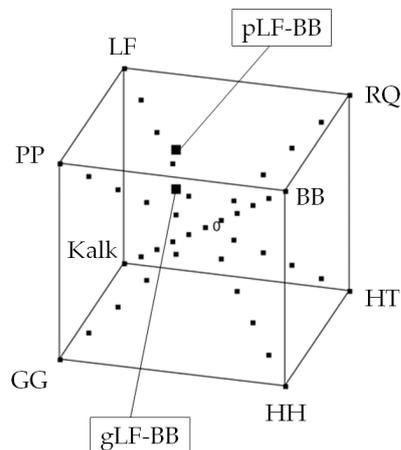


Abb. 4.18: Beispiel eines Fuzzy-Würfels für die Darstellung von Pedogenesen (RQ: Rohboden, BB: Verbraunung, PP: Podsolierung, LF: Lessivierung, GG: Vergleyung, Kalk: Kalkigkeit, HH: Hydrogener Humus, HT: Terrigener Humus)

Beispielhaft ist eine pLF-BB (oberes schwarzes Quadrat) und gLF-BB (unteres schwarzes Quadrat) dargestellt.

4.3.4 Visualisierung von Unschärfebereichen in Karten

Flächeneinheiten in Karten werden meist durch eine durchgezogene Linie abgegrenzt. Grenzen müssen auch weiterhin dargestellt werden können, da sie Unterschiede dokumentieren und so erst Entscheidungen möglich machen. Wie in dieser Arbeit auch aufgezeigt wurde ist Grenze nicht gleich Grenze. Dieser Sachverhalt muss im Kartenbild Entsprechung finden.

4 Material und Methoden

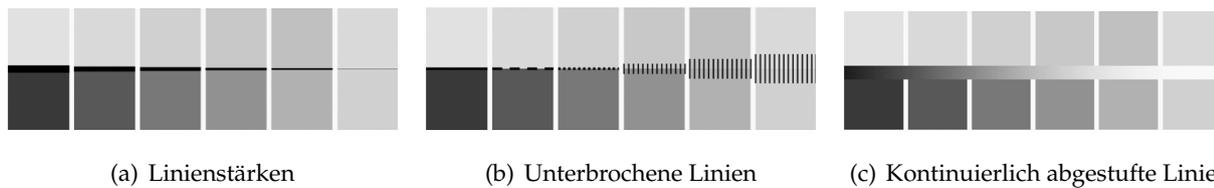


Abb. 4.19: Liniendarstellungen zur Visualisierung der Unschärfebereiche in Karten. Die vertikal benachbarten, grau abgestuften Quadrate kennzeichnen unterschiedliche Kontrastverhältnisse von Flächeneinheiten. Die *Smoothness* nimmt dabei von rechts nach links ab.

Neben den Liniendarstellungen bilden Farbsättigung und Transparenz²⁵ geeignete Instrumente Unschärfebereiche in Karten zu visualisieren. Nach SCHOBESBERGER (2007) stehen sechs sog. visuelle Variablen zur Verfügung, die u. a. in der *Pixel-Mixture-Technology* und der *Colour-Mixture-Technology* angewendet werden können.

Neue Methoden zur Abgrenzung und Visualisierung kulturlandschaftlicher Handlungsräume werden u. a. von RÖHRING & GAILING (2006) aufgezeigt, die die Meinung vertreten, dass „Kulturlandschaften nur unscharf abgegrenzt werden können.“ Dieses Prinzip wurde für Bodenkarten auch in dieser Arbeit verfolgt. An dieser Stelle sei auf die Zusammenstellung exzellenter Darstellungen von quantitativen Informationen, auch in Karten, von TUFTE (2001) verwiesen, der meint: „Modern data graphics can do much more than simply substitute for small statistical tables.“ Dieser Meinung soll durch die zahlreichen Abbildungen auch in dieser Arbeit entsprochen werden.

4.4 Methodenbeschreibung

Die einzelnen Verarbeitungsschritte der Methode sind in Abbildung 4.20 dargestellt. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen COLE & BOETTINGER (2007). Sie nutzen die Methode eines *Pedogenetic Understanding Raster-based Classification (PURC)*, die über die Vorstufe (Datenakquisition, Feldarbeit etc.), die Entwicklungsstufe (Wissensintegration, Modellentwicklung etc.) und die Endstufe (Klassifizierung, Modell- und Feldverifizierung) abgearbeitet wird. Durch die Analyse der Daten, die in jeder Stufe generiert werden, ergibt sich ein Wissensgewinn, der jede Stufe wechselseitig qualifiziert.

Am Anfang der Arbeiten steht die digitale Aufbereitung aller für die bodenkundliche Interpretation relevanten Informationsgrundlagen. Dazu gehören Flächen-, Punkt- und Liniendigitalisierungen sowie der Aufbau von Sachdatenbanken in denen die Attribute bzw. die Fachdaten recherchierbar abgelegt sind. Grundlage für die Datenstruktur sind die festgelegten Zielkategorien (1. Schritt). In einem 2. Verarbeitungsschritt werden die Objekte bewertet (statistische Auswertung von Messdaten oder/und empirische Bewertung). Danach ist eine Transformati-

²⁵vgl. auch Karten IV1 bis IV6 im Anhang

on durchzuführen, die die Daten auf einen einheitlichen Datenbereich bezieht. Da die unterschiedlichen Rohdatenebenen die einzelnen Zielkategorien in unterschiedlicher Qualität bedienen, erfolgt eine faktorielle Wichtung der Rohdaten. Danach werden die berechneten Produkte (Objektwert \times Wichtungsfaktor) addiert (5. Schritt). Ist dies für alle Zielkategorien erfolgt, ist die Anpassung der Datenbereiche durch Normierung, Stauchung oder Streckung vorzunehmen. Im 7. Schritt erfolgt die Verpunktung der bewerteten Flächenobjekte (vgl. Abbildung 4.10) oder Linienobjekte. Jeder Punkt nimmt dabei die Attribute (hier Zugehörigkeitswerte) des Objektes auf. Es existieren zu diesem Zeitpunkt nur Punktdaten, die in einer Gesamtdatenbank mit den Koordinaten gespeichert sind. In dieser Datenbank wird eine Matrixtabelle mit den Zielkategorien geführt, die mit Zugehörigkeitsgraden der Attribute belegt werden. Auch qualitative Daten liegen jetzt quantitativ (numerisch) vor. Diese Verpunktung ist die Voraussetzung für die Interpolation (IDW, Kriging-Verfahren), die für jede Zielkategorie durchgeführt wird. Die so entstandenen Ebenen können auf Rasterdatenbasis vereinigt werden (9. Schritt). Danach erfolgt eine Normierung der Daten.

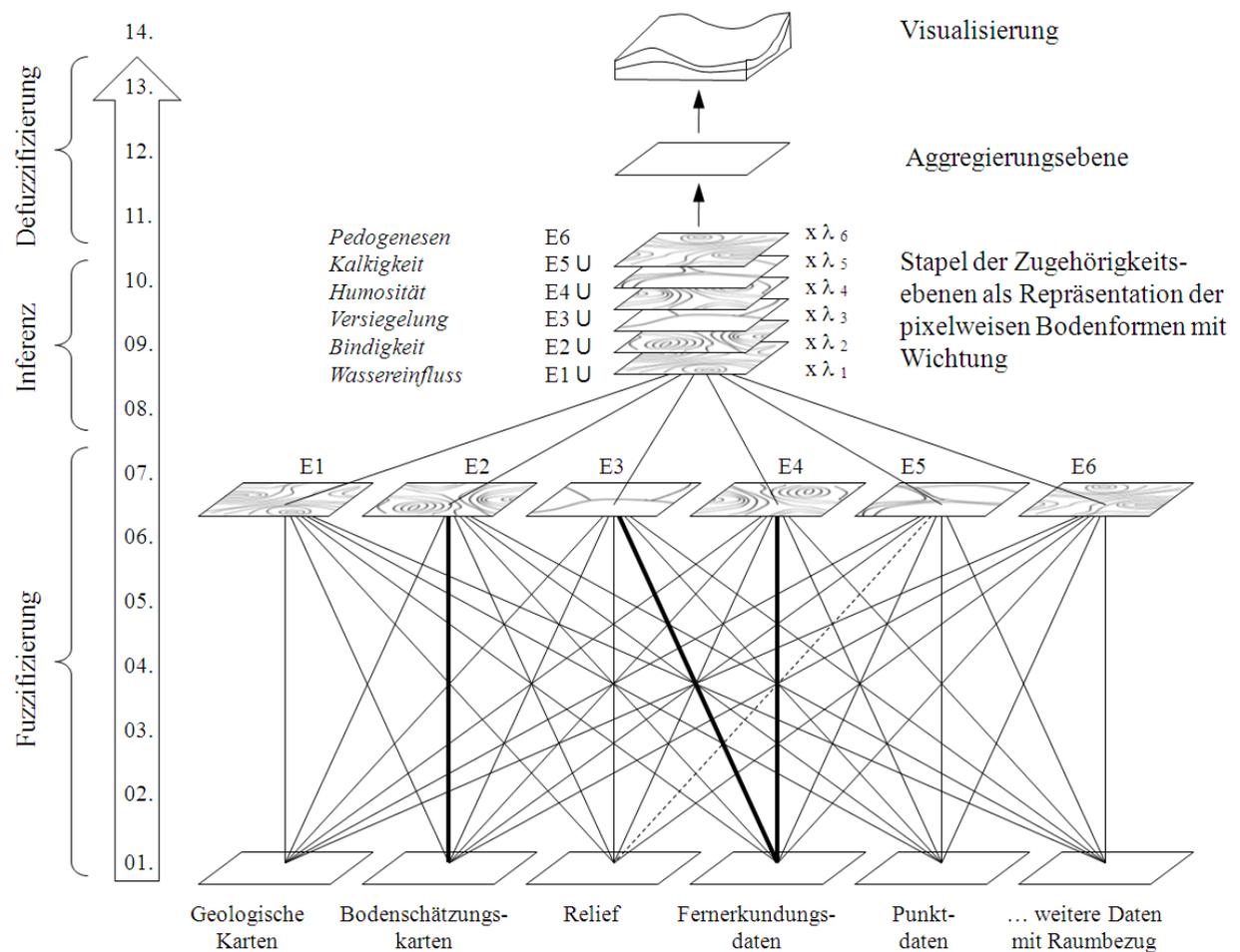


Abb. 4.20: Fließschema der Verarbeitungsschritte; 01. Festlegung der Zielkategorien, 02. Objektbewertung, 03. Transformation, 04. Ebenenwichtung (hier symbolisiert durch unterschiedliche Linienarten und -stärken), 05. intrakategoriale Addition, 06. Transformation, 07. Verpunktung, Interpolation, Pufferung, Filterung, 08. Wichtung, 09. extrakategoriale Vereinigung, 10. Regelbasis (Anwendung der WENN-DANN-Regeln), 11. Aggregation, 12. Neigungsberechnung, 13. Validierung und 14. Beurteilung der Aussagesicherheit

4 Material und Methoden

Das Ergebnis ist eine 'Rohbodenkarte' mit pixel- bzw. voxelartig vorliegenden Bodenformen. Die Karte stellt nun ein synthetisches Bild dar für das Bildverarbeitungsverfahren (z. B. *eCognition*) zur Aggregation und Legendenbildung herangezogen werden können. Die Aggregation (11. Schritt) erfolgt durch Segmentierung und Klassifizierung. Die Ausgrenzung von Kern- und Übergangsbereichen kann auch durch den α -Schnitt der berechneten Neigungswerte erfolgen. Die Validierung (13. Schritt) ist die Grundlage für die Beurteilung der Aussagesicherheit (14. Schritt). Am Ende der Auswertung steht die visuell optimierte, räumliche Darstellung der Ergebnisse mit maximalem Informationsgehalt bezüglich der inhaltlichen und räumlichen Charakteristik der Böden. Visualisierungsmöglichkeiten wurden konzeptionell im Abschnitt 4.3.4 aufgezeigt. Die Methodenschritte werden im folgenden Kapitel behandelt.

5 Ergebnisse

5.1 Informationsaufbereitung

5.1.1 Fuzzifizierung

5.1.1.1 Definition der Zielkategorien *Schritt 1*

Für die Interpretation und Bewertung der Datengrundlagen und der anschließenden räumlich-inhaltlichen Aggregation werden besonders folgende, hierarchisch hoch angesiedelte Zielkategorien betrachtet. Das bedeutet, dass sich die Inhalte der Zieleinheiten (Bodenformen, Legendeneinheiten) auf Typen- bis Subtypenniveau abbilden lassen. Die Wahl der Zielkategorien ist abhängig von der zu erstellenden Karte. Prinzipiell ist das differenzierteste Niveau anzustreben. Dabei ist der Aufbau eines hierarchischen Schlüssels zweckmäßig, der unterschiedliche Niveaus bedienen kann. Ein hierarchischer Schlüssel repräsentiert die in Beziehung gesetzten Gruppen (Zielkategorien) von Zugehörigkeiten. Bisher existieren zwei weitere Stufen. Die einzelnen Stufen werden hier als Zugehörigkeitsgrade zu den Kategorien verstanden und fungieren als Elemente zur Ableitung eines Zielthemas, z. B. Karte der Organischen Substanz. Die Kategorien sind hier nur als Auswahl zu verstehen. Grundlage für die Erstellung des Schlüssels müssen dabei die Definitionskriterien der Zusatzsymbole, Horizonte, Substrate und Boden- und Substratsystematischen Einheiten sein. Der Hierarchieschlüssel (vgl. Tabelle A.5 im Anhang S. 183) ergibt sich durch eine fortschreitende, weitestgehend scharfe Klassifizierung der Grunddaten bezogen auf eine Zielkategorie. Diese kann ordinal- oder intervallskaliert durchgeführt werden. Die Tabelle 5.6 zeigt die Bewertung des 'Bindigkeitsinventars' von Geologie, Bodenschätzung und Forst. Die Objekte werden in die entsprechende Reihenfolge gebracht. Die Bewertung erfolgt rangbezogen oder ausgehend von den Endgliedern äquidistant. Eine andere Möglichkeit stellt der *Deka-Code* dar (hier ohne Beispiel), bei dem die Bewertungsobjekte der Reihe fortlaufend mit 10 multipliziert werden, so dass sich bei einer additiven Verschneidung die Objekte der kontinuierlichen Reihe im Zahlenwert widerspiegeln. Die Information an sich bleibt erhalten. Werden sehr viele Informationsebenen verschnitten muss der Multiplikator entsprechend größer (z. B. 100) gewählt werden, um die Distanz der in der Reihe benachbarten Objekte zu erhöhen und Überschneidungen zu vermeiden. Tritt im Zahlenwert die Ziffer 2 oder größer auf, bedeutet das, dass das Objekt zweimal (drei-, viermal,...) vertreten ist. Wichtig ist die separierte, positionsbezogene Ablage des Codes. Die Methode dient in erster Linie einer numerischen Informationsvisualisierung von Zwischenergebnissen. Berechnungen (Maximum, Mittelwert etc.) können auf die Kette des Codes angewendet werden.

5 Ergebnisse

Als wichtigste Zielkategorien, im Hinblick auf eine ökologische Betrachtung und eine Aggregation werden in absteigender Reihenfolge betrachtet:

Wassereinfluss > Bindigkeit > Humosität > Kalkigkeit > Pedogenesen

Die Zielkategorien Rohboden, Verbraunung, Podsolierung und Lessivierung werden innerhalb der übergeordneten Kategorie 'Pedogenesen' gleichrangig, der substratgenetische Aspekt zunächst nicht betrachtet (vgl. Tabelle 5.2). Beim Wassereinfluss wird nicht zwischen Stau- und Grundwasser unterschieden, da wie erwähnt, die Zeit, also hier die Verweildauer des Wassers im Substrat, keine Berücksichtigung findet. Die Bindigkeit bezieht sich auf den Feinboden ohne bodenartige Differenzierung und ohne Einbeziehung von Humus und Kalk. Die Zugehörigkeiten werden entsprechend der mittleren Korngröße des Korngemisches in absteigender Reihenfolge bestimmt. Demnach erhält prinzipiell der Sand den geringsten und Ton den höchsten Zugehörigkeitswert (vgl. Tabelle 5.1). Die Aufstellung solcher Reihen ermöglicht eine einfachere operationelle Verschneidung und Implementierung unterschiedlicher Nomenklaturen und Klasseneinteilungen. In älteren Systematiken kommen die Korngrößenfraktionen Schlick und Schlamm ($< 0,001$) vor, die heute nicht mehr verwendet werden, jedoch auch Bindigkeitsangaben und Indizien für eine gewisse Humosität liefern. Der Anteil des Korngrößenbereichs von $< 0,01$ mm wird von SADOWNIKOW (1958) für die feldmäßige Einteilung der Bodenarten verwendet. Die Hauptbodenarten werden hier durch die kombinierten Angaben von sandig, schluffig und schlammig differenziert. „Nach der mechanischen Analyse wird für die Beschreibung der Böden eine Klassifikation nach den sich an den Bruchstellen zeigenden Erscheinungen festgelegt.“ (vgl. auch S. 29)

5.1 Informationsaufbereitung

Tab. 5.1: Ordinalskalierte Reihe für Bindigkeiten (i_{BIND}) von Bodenarten unterschiedlicher Nomenklatur. Das Bodenartendreieck wird auf eine Linie projiziert. Die Bindigkeit ist demnach ein Summenparameter aus Sand, Schluff, (Lehm) und Ton. Sie dient der Zusammenführung und Quantifizierung von Bodenartenangaben aus Kartengrundlagen. (TGL: Technische Güte- und Lieferbedingungen, LfUG: Landesanstalt für Umwelt und Geologie Sachsen, KA5: Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage)

Bodenarten- hauptgruppe	Bodenschätzung		TGL	LfUG	KA5	verbal (KA5)	i_{BIND}				
	Grünland	Acker									
Sand	S	S	S	S	S	Sand	0,0				
			uS	uS	Su2	schwach schluffiger Sand					
					Su3	mittel schluffiger Sand					
					Su4	stark schluffiger Sand					
					l'S	sehr schwach lehmiger Sand					
				Sl (S/Sl)	l'S	Sl (S/Sl)	Sl2	anlehmiger Sand			
							Sl3	mittel lehmiger Sand			
	IS	IS	IS	IS	IS	Sl4	stark lehmiger Sand				
						tS	St2	schwach toniger Sand			
							St3	toniger Sand			
							Slu	schluffig-lehmiger Sand			
							sU	Us	sandiger Schluff		
								Uls	sandig-lehmiger Schluff		
								U	U	Uu	Schluff
Schluff			IU	IU		lehmiger Schluff	i				
			tU	Ut2	schwach toniger Schluff	n					
				Ut3	mittel toniger Schluff	d					
				Ut4	stark toniger Schluff	i					
		SL (IS/sL)		SL (IS/sL)	Ls4	stark sandiger Lehm	g				
Lehm	L	L	L	L	Ls3	mittel sandiger Lehm	k				
					Ls2	schwach sandiger Lehm	e				
					UL			Lehm	i		
						uL	Lu	schluffiger Lehm			
							Lts	sandig toniger Lehm			
					LT	tL	Lt2	schwach toniger Lehm			
							Lt3	mittel toniger Lehm			
							LT	Lehmton			
							sT	sT	Ts4	stark sandiger Ton	
									Ts3	mittel sandiger Ton	
Ton					Ts2	schwach sandiger Ton					
					Tu4	stark schluffiger Ton					
			uT		Tu3	mittel schluffiger Ton					
					Tu2	schwach schluffiger Ton					
			IT	IT	Tl	lehmiger Ton	↓				
	T	T	T	T	Tt	Ton	1,0				

5 Ergebnisse

Tab. 5.2: Auswahl bodenformenrelevanter Zielkategorien für das Untersuchungsgebiet mit Bewertungsbeispielen. (Indexbedeutung der Bewertungsobjekte: F: Flächen-, L: Linien-, P: Punktdatum; 1: GK 25, 2: Bodenschätzung, 3: Forst, 4: DGM, 5: Topografie, 6: Hydrogeologische Karte, 7: Legendeneinheit Bodenkarte, 8: MMK (vgl. Karte IG3 im Anhang), 9. Punktbodenform des LBGR)

Zielkategorie		Kürzel	Beschreibung	Bewertungsobjekte									
				Talsand ^{F1}	S ⁴ D ^{F2}	KdS ⁶ F ³	Senke ^{F4}	Graben ^{L5}	GWst ^{F6}	2 ^{F7}	D II a ^{F8}	RQ: a-ss ^{F9}	
Wasser (Wa)	Grundvergleyung	GG	grundnasse Böden	0,8		0,3		1,0	1,0				
	Stauvergleyung	SS	staunasse Böden						0,1				
	Reliktvergleyung	rGG	reliktisch vergleyte Böden	1,0									
Bodenart (Ba)	Kies	K	Anteil Grobboden								0,1		
	Sand	S	Anteil Sand	1,0	0,7						0,2	1,0	
	Lehm	L	Anteil Lehm		0,3						0,8		
	Schluff	U	Anteil Schluff										
	Ton Bindigkeit	T BIND	Anteil Ton silikatische Bindigkeit	0,1	0,4		0,3				0,6	0,7	
Humosität (Hu)	anthropogen	HY	urban geprägte Böden										
	terrigen	HT	Waldareale, Kolluvien				0,9						
	hydrogen	HH	wasserbürtiger Humus					0,8					
Kalk (Ka)	Kalkigkeit	Ka	kalkhaltige Böden										
Pedogenesen (Pg)	Rohboden	RQ	Regosole			1,0						1,0	
	Verbraunung	BB	Braunerden	0,5	0,6					0,3	0,2		
	Podsolierung	PP	Podsole	0,6									
	Lessivierung	LF	Fahlerden, Parabraunerden		0,7					0,9	0,8		
	Sand-Bänderung	SB	Böden mit Sand-Bänderung										
Substratgenese (Sg)	Ton-Bänderung	TB	Böden mit Ton-Bänderung										
	Flug ...	a	Die Zugehörigkeitswerte der Substratgenese werden i. d. R. binär angegeben. Eventuelle Abstufungen repräsentieren hier keine Intensitätsunterschiede, sondern Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten.	1,0									
	organisch	og											
	limnisch	fl											
	quell ...	qw											
	Fluss ...	ff											
	Urstrom ...	fu			1,0								
	Kryoturbat ...	pky			1,0	0,5				1,0	1,0		
	Kryofliess ...	pfl								1,0	1,0		
	Abschlamm ...	pas				0,3							
glazilimnisch	fgl												
glazifluviatil	fg												
Grundmoräne	gm		0,8					1,0	1,0				
kolluvial, erosiv	uk, ue					1,0							
Versiegelung	YY												
Tiefe	Tiefen (obere, untere)	oT, uT	werden für sämtliche Zielkategorien angegeben										

Zielkategorie Wassereinfluss

Der Wassereinfluss wird im Hinblick auf die Aggregation sämtlicher Zielkategorien zur eigentlichen Bodenkarte als wichtigstes Kartenbild bestimmendes Merkmal angesehen. Auch in Bezug zu Stoff- und Materialverlagerungen ist diese Einstufung sinnvoll. Die

Fließwege dieser werden durch das Wasser vorgegeben. Der Wassereinfluss kann quasi aus allen Informationsebenen abgeleitet werden. So liefert bereits die Angabe Al oder D in der Bodenschätzung Angaben zum Wassereinfluss. Al bedeutet neben einer alluvialen Genese i. d. R. auch Wassereinfluss. Der Wassereinfluss kann am besten über hydrogeologische Karten (Pegelstände, Grundwasserisohypsen), aber auch durch Grundwasserstandsangaben bei Profilaufnahmen, Sondierungen, Grablöchern der Bodenschätzung usw. bewertet werden. Auch geologische Karten liefern mit den Angaben wie z. B. Flusssand und Talsand indirekte Differenzierungsmöglichkeiten zum Wassereinfluss.

Zielkategorie Bindigkeit

Die Zielkategorie Bindigkeit bildet die quantitativ definierten Bodenarten ebenfalls in einer ordinalskalierten Reihe ab (Tabelle 5.1). Die wichtigsten Eingangsinformationen sind hier die der Bodenschätzung, der Forstlichen Standortskartierung und der Geologischen Messtischblätter. Die abgeleiteten Daten der Grablöcher werden direkt mit den Klassenflächen verknüpft. Die Agronomischen Profile des Geologischen Messtischblattes separieren die Geologischen Einheiten über die Aufteilung in Thiessen-Polygone.

Zielkategorie Humosität

Bei der Humosität werden die Unterkategorien terrestrische, anthropogene und hydrogene Humosität unterschieden. Sie werden jedoch im Zuge der Datenaggregation zusammengefasst betrachtet. Die kolluviale Substratgenese impliziert einen erhöhten Humusgehalt, so dass die terrigene Humosität u. a. auch über das Relief abgeleitet werden kann

Zielkategorie Kalkigkeit

Die Kalkigkeit steht in der Rangfolge der Wichtigkeit bezüglich der Aggregation an vierter Stelle. Es wird hier nicht zwischen Primär- und Sekundärkalk unterschieden. Sie wird vorwiegend aus der Semantik und Syntax verbaler Beschreibungen (Legenden) und Codes (z. B. Agronomischen Profilen (vgl. Tabelle 4.4, S. 81, sowie Tabelle 5.3 und 5.4, S. 111)) abgeleitet.

Zielkategorie der Pedogenese

Als wichtige bodensystematisch relevanten Zielkategorien werden die terrestrischen Pedogenesen Rohbodenbildung, die Verbraunung, die Podsolierung und Lessivierung betrachtet. Diese treten jedoch für die Ausweisung der Areale für die Bodenkarte zurück (vgl. Abschnitt 3.2.2.1.1).

Zielkategorie Tiefenlage

Bei Daten aus denen sich die Tiefenlagen oder Mächtigkeiten von Merkmalen ableiten lassen (i. d. R. Punktdaten), muss vor Beginn der Arbeiten definiert werden, welche Auflösung die

5 Ergebnisse

Tiefenangaben haben sollen. Es wird eine Auflösung von 10 cm vorgeschlagen.

5.1.1.2 Interpretation, Bewertung und Codierung der Informationen *Schritt 2*

Die Komponenten Interpretation, Bewertung und Codierung der Ausgangsinformationen zählen zu den wichtigsten Grundlagen innerhalb einer Informationsaufbereitung. Sie bilden im Prozess der Kartenerstellung eine Einheit und sind immer abhängig vom Zweck der zu lösenden Aufgabe. Die Bewertung der Objekte, die i. d. R. abgestuft erfolgt, setzt diese in einen gemeinsamen, zielabhängigen Kontext. Die Bedeutung des Begriffes *Wert* an sich ist sehr vielgestaltig. Nach KAISER (2001) ist es „deshalb im Interesse einer gleichgerichteten Interpretation der Ergebnisse und für deren Akzeptanz durchaus wesentlich, inwieweit sich die bei der Ergebnisdarstellung verwendete Fachterminologie mit dem allgemein sprachlichen Gebrauch derselben Begriffe deckt.“ Ein einheitliches Begriffsverständnis existiert nicht. Nach KAISER (2001) definiert der DUDEN (1991) *Wert* wie folgt:

Definition 1:

Wert ist „die objektive Bedeutung (...) oder die subjektive Beurteilung (...) von Waren, Leistungen und Geld im Hinblick auf die mittelbar (...) oder unmittelbar (...) durch ihren Besitz gegebenen Möglichkeiten, der Befriedigung menschlicher Bedürfnisse zu dienen.“

Definition 2:

Werte sind auch Ausdruck von „(...) Beziehungen, die zwischen einer Sache und einem übergeordneten Maßstab durch den Menschen gefühlt oder gedacht werden (...).“

Als objektiv kann man die in den Naturwissenschaften numerisch vorliegenden, gemessenen Werte betrachten. Subjektiv sind Werte die eine Sache oder auch Messwerte beurteilen. Werte z. B. in der Ökonomie sind eher subjektiv, da deren Steuerung zwar durch Gesetzmäßigkeiten erfolgt, aber letztlich durch das Streben der Gewinnmaximierung determiniert und damit abhängig vom Willen von Menschen sind. Des Weiteren existieren Werte die eher Empfindungen ausdrücken, ideeller Natur sind. Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass die verschiedenen Wertkategorien unterschiedlichen Einflüssen unterliegen und damit das Ergebnis beeinflussen. Besonders stark trifft das bei der Bewertung von Landschaften zu bei denen eine sehr große Spannbreite der Wertkategorien vorliegt. Bei Bewertungen sind stets mindestens zwei Wertkategorien zu verknüpfen.

Bodeninformationen bzw. bodenkundlich relevante Informationen liegen zu einem sehr großen Anteil qualitativ vor. Unter 'qualitativ' werden hier ursprünglich nicht rechen- und auswertbare Daten verstanden, die aufgrund ihres verbalen Charakters, ihrer alphanumeri-

schen oder ihrer durch Kürzel realisierten Codierung für eine Weiterverarbeitung quantifiziert werden müssen. Dabei finden bei der Erstellung der Bodenkonzeptkarte folgende Aspekte Berücksichtigung:

- Welche bodenformenrelevanten Merkmale können charakterisiert werden bzw. welcher Zielkategorie können sie zugeordnet werden ?
- In welcher Beziehung stehen die Einzelmerkmale und Merkmalskombinationen ?
- Welche Intensität und Tiefenerstreckung des Merkmals ist aus der Beschreibung ableitbar?

Die Quantifizierung der Merkmalskombinationen erfolgt durch einen geeigneten Schlüssel (Tabelle 5.3), der eine quantifizierte Abstufung zulässt. Dieser Schlüssel ergibt sich aus dem Intensitätsspektrum der Merkmale. Die Spanne dieses Intensitätsspektrums beinhaltet einerseits die Position des Auftretens des Merkmals in der Zeichenkette und andererseits die angegebene Abstufung. Diese Abstufung kann in Abhängigkeit von den auftretenden Kombinationen differenzierter als in den Tabellen 5.3 und 5.4 dargestellt ausfallen. Ziel ist es, die Einzelmerkmale sowohl in der jeweiligen Kombination als auch in der jeweiligen Merkmalsgruppe zu wichten. Dies wird für Punkt- und Flächendaten gleichermaßen durchgeführt.

Tab. 5.3: Schlüssel zur quantifizierten Abstufung von max. 10 Merkmalskombinationen bezogen auf Werte zwischen 0 - 1 in Schritten von 0,1 und Beispiel für die Quantifizierung von Merkmalskombinationen entsprechend der Merkmalspositionen in der Zeichen- bzw. Wortkette

Kürzel	verbalisiertes Kürzel	Zielkategorien			
		Humosität	Kalkigkeit	Lehm	Sand
S	Sand				1
SLS - S	schwach lehmiger Sand bis Sand			0,86	1
SLS	Schwach lehmiger Sand			0,88	1
KHLS	kalkig humoser lehmiger Sand	0,8	0,7	0,9	1
SHS	schwach humoser Sand	0,88			1
SH	sandiger Humus	1			0,9
LS	lehmiger Sand			0,9	1
KSH	kalkig sandiger Humus	1	0,8		0,9
KHS	kalkig humoser Sand	0,9	0,8		1
KH	kalkiger Sand	1	0,9		
HS	humoser Sand	0,9			1
HKS	humoser kalkiger Sand	0,8	0,9		1
HK	humoser Kalk	0,9	1		
H	Humus	1			

5 Ergebnisse

Tab. 5.4: Quantifizierung der verbalen, adjektivischen Abstufung der Schichtobjekte der agronomischen Profile der Geologischen Spezialkarte 1 : 25 000

verbale Abstufung	quantifizierte Abstufung
extrem schwach	-0,04
sehr schwach	-0,03
schwach	-0,02
mittelschwach	-0,01
mittel	0
mittelstark	0,01
stark	0,02
sehrstark	0,03
extrem stark	0,04

Tab. 5.5: Zielkategorienchlüssel $LXF_{H_{GES}}$ für die Humosität für Flächendaten unterschiedlicher thematischer Ebenen. Die Objekte werden mit Zugehörigkeitsgraden für die jeweilige Zielkategorie belegt.

thematische Ebene	Objekt-nummer	(Flächen-) Objekt	Zielkategorie Humosität
Boden-schätzung	1	MoI	1
	2	MoII	0,8
	3	MoIII	0,7
	4	S2D	0,2
	5	S3D	0,19
	6	S4D	0,18
	7	S5D	0,17
	8	S6D	0,16
	9	S7D	0,10-0,15
Geologie	1	Torf	1
	2	Moorerde	0,60-0,80
	3	humoser Sand	0,20-0,30
Relief	1	Senke	0,5
	2	Hangfuß	0,45
	3	Unterhang	0,4
	4	Mittelhang	0,35
	5	Oberhang	0,3
	6	Scheitelbereich	0,25

Die Tabelle 5.5 zeigt eine einfache Bewertung von Flächenobjekten unterschiedlicher thematischer Ebenen, die hier mit Zugehörigkeitsgraden hinsichtlich der Zielkategorie Humosität belegt wurden.

Tab. 5.6: Aus Flächenobjekten der Bodenschätzung und FSK zusammengefasster Zielkategorienchlüssel *LXF_BIND* für die Bindigkeit (vgl. auch Tabelle A.4 im Anhang).

Objekt	Bindigkeit (verbal)	Rang	äquidistant
Mo	Moor	1	0,000
sMo	sandiges Moor	2	0,077
G	Grand	3	0,154
K	Kies	4	0,231
S	Sand	5	0,308
bS	gebändeter Sand	6	0,385
uS	schluffiger Sand (Klock)	7	0,462
Sl	schwach lehmiger Sand	8	0,538
lS	lehmiger Sand	9	0,615
SL	stark lehmiger Sand	10	0,692
sL	sandiger Lehm	11	0,769
L	Lehm	12	0,846
LT	schwerer (toniger) Lehm	13	0,923
T	Ton	14	1,000

Die Tabelle 5.6 stellt eine Flächenobjektsynthese aus den Karten der Bodenschätzung (1 : 25 000) und Forstlichen Standortserkundung (1 : 10 000) dar. Die Objekte wurden in eine ordinalskalierte Reihe gebracht. Es werden verbal gleich codierte Objekte gleich bewertet.

Tab. 5.7: Matrix der Zugehörigkeitsgrade bodensystematischer Einheiten zu Zielkategorien pedogenetisch relevanter Prozesse und Merkmale für ein Thema oder eine Themenkombination (z. B. Bodenschätzungs-kategorie und/oder Geologie)

Objekt- nummer	Objekt	Zielkategorien (Auswahl)							
		PP	BB	LF	GG	PP	BB	LF	GG
		1. Schritt: Bestimmung der Zugehörigkeiten				2. Schritt: Wichtung inner- halb der Zeichenkette			
1	gpBB-LF	0,3	0,7	1	0,1	14,3	33,3	47,6	4,8
2	pLF-BB	0,6	1	0,7		26,1	43,5	30,4	0
3	bLF		0,6	1		0	37,5	62,5	0
4	BB		1			0	100	0	0
5	GG				1	0	0	0	100
6	PP	1				100	0	0	0
7	gPP	1			0,5	58,8	0	0	41,2
8	lBB		1	0,6		0	62,5	37,5	0
9	pBB	0,6	1			37,5	62,5	0	0
10	p2BB	0,2	1			16,7	83,3	0	0
11	gLF			1	0,2	0	0	83,3	16,7
12	GG-BB		1		0,7	0	58,8	0	41,2
13	gBB		1		0,2	0	83,3	0	16,7
14	GG-PP	1			0,7	58,8	0	0	41,2
15	PP-GG	0,7			1	41,2	0	0	58,8
16	LF			1		0	0	100	0
17	pLF	0,2		1		16,7	0	83,3	0
18	p4BB	0,4	1			28,6	71,4	0	0
3. Schritt: Wichtung der Summen						22,1	35,4	24,7	17,8

5 Ergebnisse

Die Bewertung erfolgt dabei über den Rang und äquidistant im Intervall $[0, 1]$. Die Abstufung in der Tabelle 5.5 ist nicht äquidistant und damit nicht linear. Auf die Behandlung solcher Funktionen wird in Abschnitt 5.2.1.1, S. 125 eingegangen.

Die Abstufungen der Zielkategorien der pedogenen Merkmale können in dem gezeigten Beispiel der Tabelle 5.7 als unterschiedliche Intensitäten der Pedogenesen aufgefasst werden. Die Einzelinformationen, die innerhalb von verschlüsselten Zeichenketten abgelegt sind und Teile eines zusammengefassten, aggregierten Ausdrucks sind, werden aufgelöst bzw. atomisiert. Sie können so neu in Beziehung gesetzt und einer neuen Zielkategorie zugeordnet werden. So können für Flächen Aussagen zur Intensität pedologischer Prozesse gemacht werden, indem der arithmetische Mittelwert oder der Schwerpunkt der Zugehörigkeiten bestimmt wird (vgl. S. 28).

5.1.1.3 Intrakategoriale Vereinigung *Schritt 5*

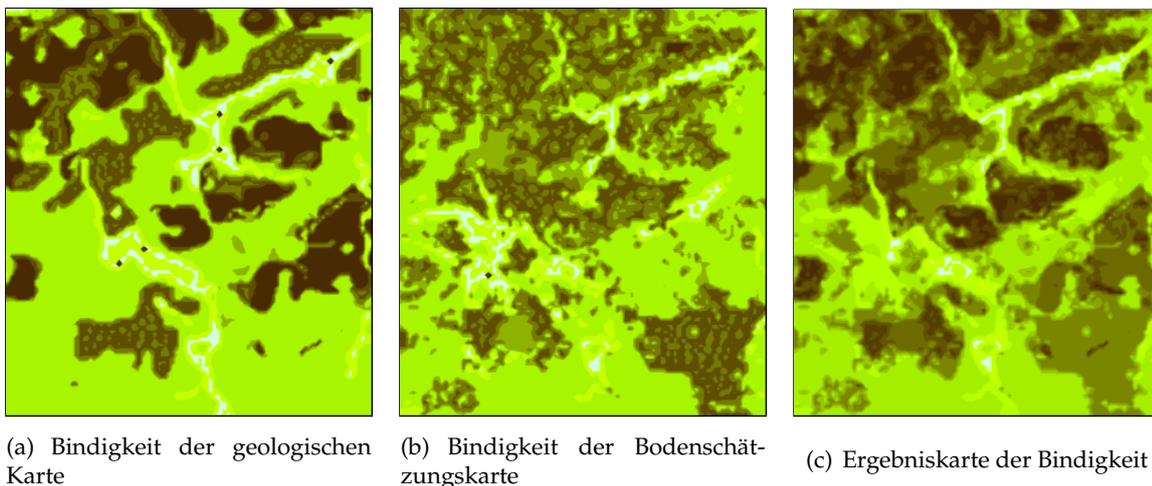


Abb. 5.1: Additive Überlagerung von geologischer Karte und Bodenschätzungskarte und anschließende Interpolation für einen Ausschnitt des Blattes Königs Wusterhausen (Blatt 3747, Maßstab 1 : 25 000) unter Berücksichtigung von Übergängen für die Zielkategorie 'Bindigkeit'

Die Abbildung 5.1 zeigt die Überlagerung von geologischer Karte und Bodenschätzungskarte nachdem die Einheiten hinsichtlich der Bindigkeit bewertet, verpunktet und anschließend interpoliert worden sind. Die Verpunktung soll einerseits den Unterschied in den geometrischen Qualitäten minimieren und andererseits dem Umstand der Übergänge in den Bodenarealen gerecht werden. Da i. d. R. die geologische Karte räumlich als auch inhaltlich gröber aufgelöst ist, ergibt sich hier die 'Aufmodulation' einer feinen auf eine grobe Funktion (vgl. Abbildung 5.2). Dieses Vorgehen führt zu inhaltlich verstärkenden, angleichenden und räumlich differenzierenden Effekten. Es wird eine stärkere bodenartige Differenzierung erreicht. Prinzipiell

kritisch zu betrachten sind die Effekte der Abschwächung bzw. Auslöschung, da es sich hier um Zielkonflikte handelt und die Unsicherheit des Verschneidungsergebnisses insgesamt höher zu bewerten ist als bei einer Verstärkung (Abbildung 4.13, S. 90). Unberücksichtigt bleibt zunächst jedoch auch hier der Sachverhalt, dass die geologische Karte teilweise abgedeckt ist. Die Abbildung 5.2 zeigt das Prinzip der Aufmodulation von kontinuierlichen Daten (z. B. Humusgehalte) auf diskrete Daten (Moor-, Anmoorareale i. w. S.). Dieses Prinzip ist nur bei Daten gleicher Zielkategorie sinnvoll. Im Kontext der Inhalt-Raum-Betrachtung ist jedoch auch eine extrakategoriale Addition in Erwägung zu ziehen. Es werden zwar geringe und hohe Zugehörigkeitswerte 'vermischt', bezogen auf die räumliche Komponente ergibt sich jedoch ein Zusammenfassungskriterium unabhängig vom Inhalt. Dieser Ansatz kann z. B. bei der Ausgrenzung von sehr heterogenen Bodengesellschaften interessant sein. Der Inhalt der ausgegrenzten Fläche ergibt sich aus den die Bodenform repräsentierenden Pixelwerten. (vgl. auch Abbildung 5.3).

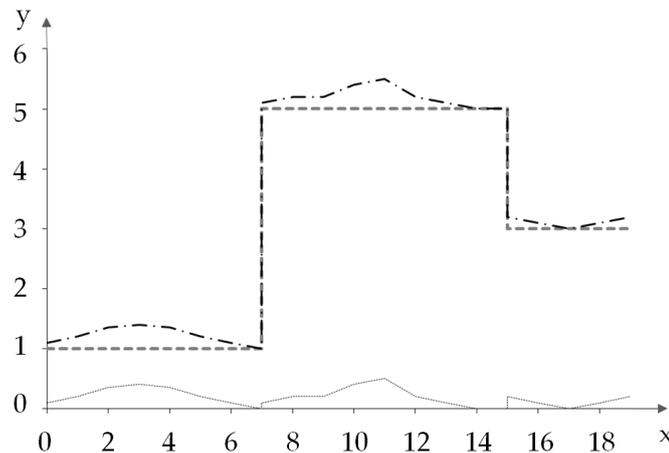


Abb. 5.2: Aufmodulation einer kontinuierlichen Funktion (dünne Linie) auf eine diskrete Funktion (gestrichelte Linie). Die Informationen der Ausgangsfunktionen bleiben in der Ergebnisfunktion (Strich-Punkt-Linie) erhalten.

An dieser Stelle wird deutlich, dass das Rastermodell gegenüber dem Vektormodell besonders auch Vorteile bei der Verarbeitung und Darstellung (vgl. auch RÖHRING & GAILING (2006)) diskreter und kontinuierlicher Daten bietet.

5 Ergebnisse

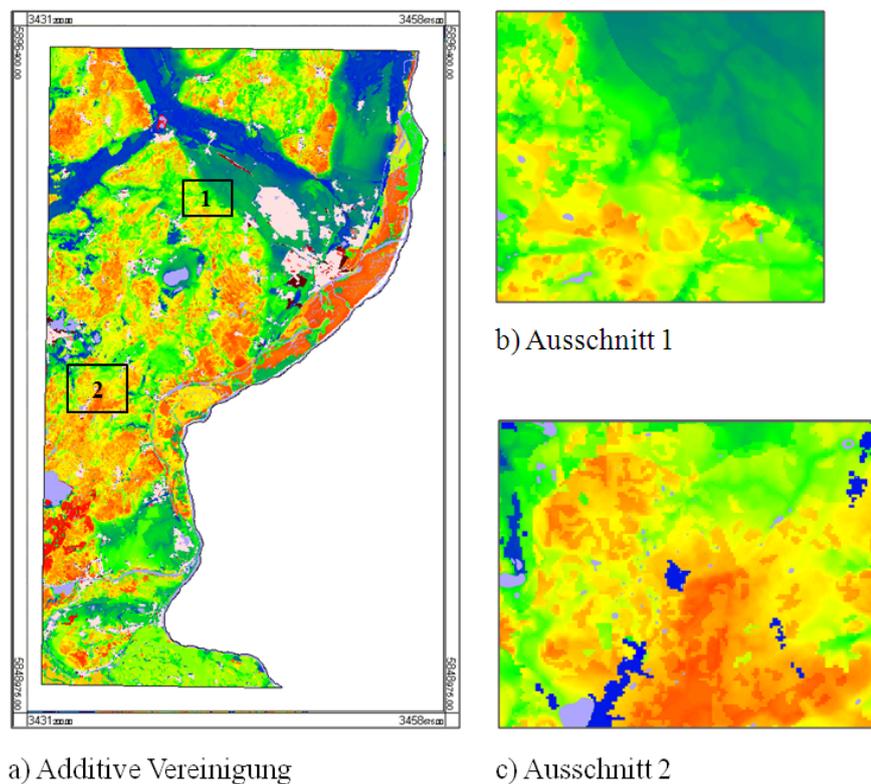
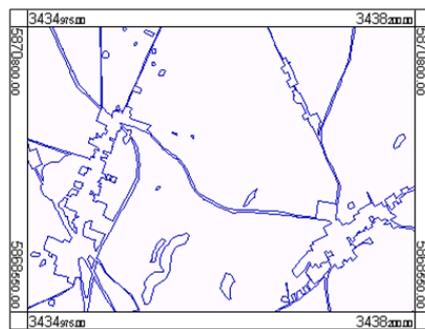
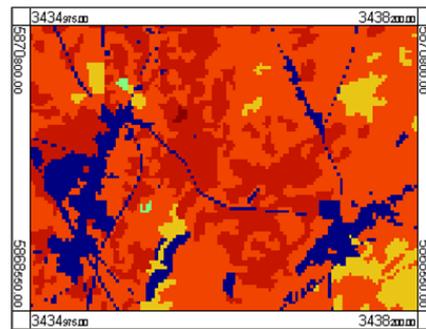
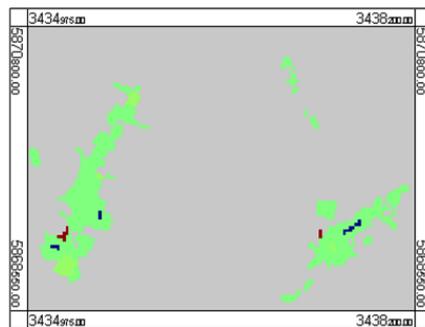
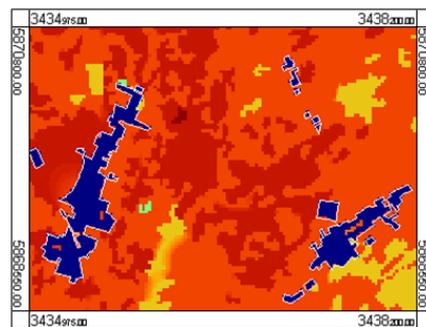


Abb. 5.3: a) Vereinigung der Ebenen Bodenschätzung (Bindigkeit), Geologischer Karte i. M. 1 : 300 000 (Bindigkeit), Moormächtigkeit und Reliefauswertung (Senken), b) und c) 'Durchpausen' der Grenzen

Problematisch bei der additiven Vereinigung der Daten sind die sog. *Missing values* oder *No-Data-Areas*. Sie sind ein Beispiel für die Unterkategorie 'Unvollständigkeit' der imperfekten Daten (siehe Abschnitt 4.2.1) und bei der Aussagesicherheit entsprechend zu berücksichtigen. Diese treten beispielsweise bei den digitalisierten Klassenflächen der Bodenschätzung in erheblichem Umfang auf, da nur die landwirtschaftlich genutzte Fläche geschätzt wurde. Andere Nutzungen, wie Wald, aber auch Siedlungen (Bebauung) und Gewässer, besonders jedoch Verkehrswege stellen Lücken in der Karte dar. Deshalb wurden die linienhaften Lücken der Verkehrswege mit dem SAGA-Algorithmus *Close Gaps* geschlossen. Die flächenhaften Lücken (Wald, Siedlungen, Gewässer) werden durch Verschneidung mit den entsprechenden thematischen Ebenen 'aufgefüllt'. Bei der Bebauung wird demzufolge auch die rezente Ausdehnung verwendet.

(a) *Missing values* als Polygone (Ortschaften, Straßen, Wege)(b) Grid der Bodenschätzung mit '*Missing values*' (blau)

(c) Rezente Bebauung

(d) Ergebnis nach Anwendung des *Close Gaps Algorithmus***Abb. 5.4:** *Missing values* (fehlende Werte) bei den digitalisierten Klassenflächen der Bodenschätzung

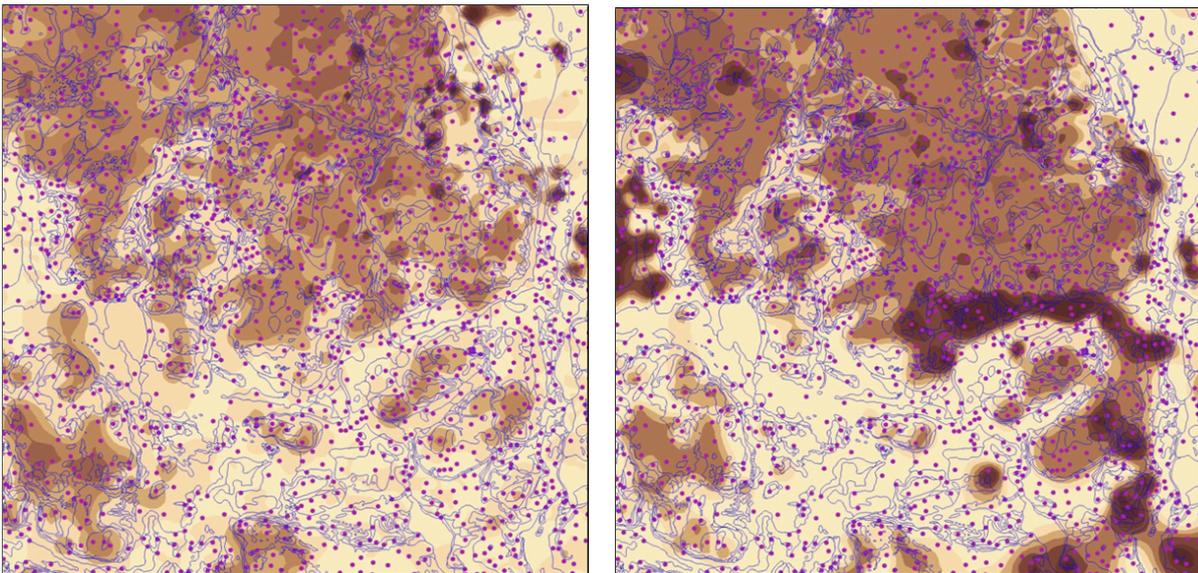
5.1.1.4 Verpunktung und Interpolation *Schritt 7*

Von den in Abbildung 4.10 (S. 86) dargestellten Varianten von möglichen **Verpunktungen** wird das Quadtree-Verfahren favorisiert, da es den erwähnten Kompromiss zwischen Polygon-Raster-Konvertierung ermöglicht. Die Varianten (a) und (b) bilden die Flächenkonturen nur in der definierten Rasterweite ab. Die Variante (c) ist für jede Fläche gesondert durchzuführen. Die Anzahl der Punkte ist auf die Flächengröße anzupassen. Der Flächenschwerpunkt ist für alle Varianten zu bestimmen. An dieser Stelle ist zu betonen, dass die realen Punktdaten in das Punktraster integriert werden.

Interpolationsverfahren wurden im Abschnitt 4.1.3 näher beschrieben. Ein Beispiel für die schichtweise Interpolation der Bindigkeit der Agronomischen Profile zeigt die folgende Abbildung. Die dunklen Bereiche besitzen dabei die höchste Bindigkeit. Es wird deutlich, dass die Bindigkeit in der zweiten Schicht ansteigt. Die Ebenen werden entsprechend ihrer Tiefenlage gewichtet. Durch die Einbeziehung der Ober- und Untergrenzen der Schichten

5 Ergebnisse

können einerseits auch die Mächtigkeiten mit in die Wichtung einbezogen werden und andererseits die Voraussetzungen für eine 3D-Modellierung des 'Bindigkeitskörpers' geschaffen werden. Weitere Beispiele für die Anwendung von Interpolationsverfahren befinden sich im Kartenanhang. Die Karte IW12 im Anhang zeigt beispielsweise die Verschneidung verschiedener 'Bindigkeitsebenen' (Geologische Einheiten, Bodenschätzung, Thiessen-Polygone der Agronomischen Profile). Es wurden die Flächenschwerpunkte ermittelt. Die Grauabstufung korrespondiert mit der Bindigkeit (weiß: keine, schwarz: hohe Bindigkeit). Danach wurde die Interpolation durchgeführt.



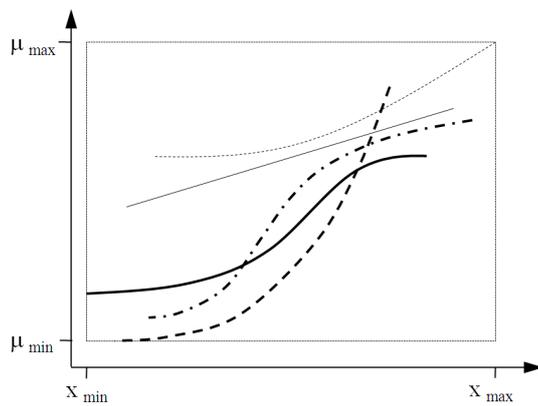
(a) Bindigkeit der 1. Schicht

(b) Bindigkeit der 2. Schicht

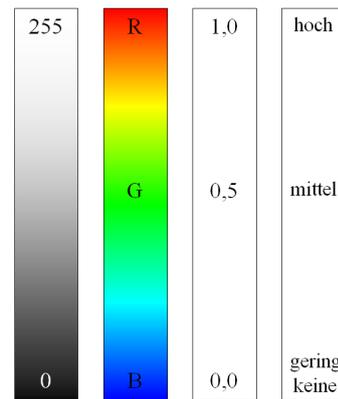
Abb. 5.5: Interpolationsergebnis der Bindigkeit der Schichten von Agronomischen Profilen (Blattschnitt Königs Wusterhausen)

5.1.1.5 Transformation und Wichtung Schritte 3, 4, 6 und 8

Als **Transformationsmethode** wurde die *Normierung* verwendet. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Transformation der kategorialen Zugehörigkeitsfunktionen. Diese Zugehörigkeitsfunktionen sind Ausdruck der aus unterschiedlichen Themen bewerteten, ordinalskalierten Objekte. Die Abbildung 5.6 zeigt mögliche Zugehörigkeitsfunktionen von Objektbewertungen unterschiedlicher Datenherkunft. Als Bedingung muss vorausgesetzt werden, dass die Funktionen monoton steigend sind.



(a) Schar unterschiedlicher, ordinalskaliertes Bewertungsfunktionen



(b) Linear transformierbare Legendes

Abb. 5.6: Beispiele für transformierbare Funktionen

Die Transformation der Funktionen erfolgt dabei zunächst durch die Bestimmung der Zielfunktion, die Form, den Zugehörigkeitswertebereich und das Funktionsintervall vorgibt. Alle anderen Funktionen werden auf diese Funktion bezogen. Die Abbildung 5.7 zeigt das Dialogfenster von *eCognition* für die Definition der Zugehörigkeitsfunktionen. In diesem Fall wird die Fuzzy-Funktion nicht wie in der Abbildung 3.11 durch einen Operator beeinflusst, sondern durch die Veränderung der Stützpunkte der Funktion.

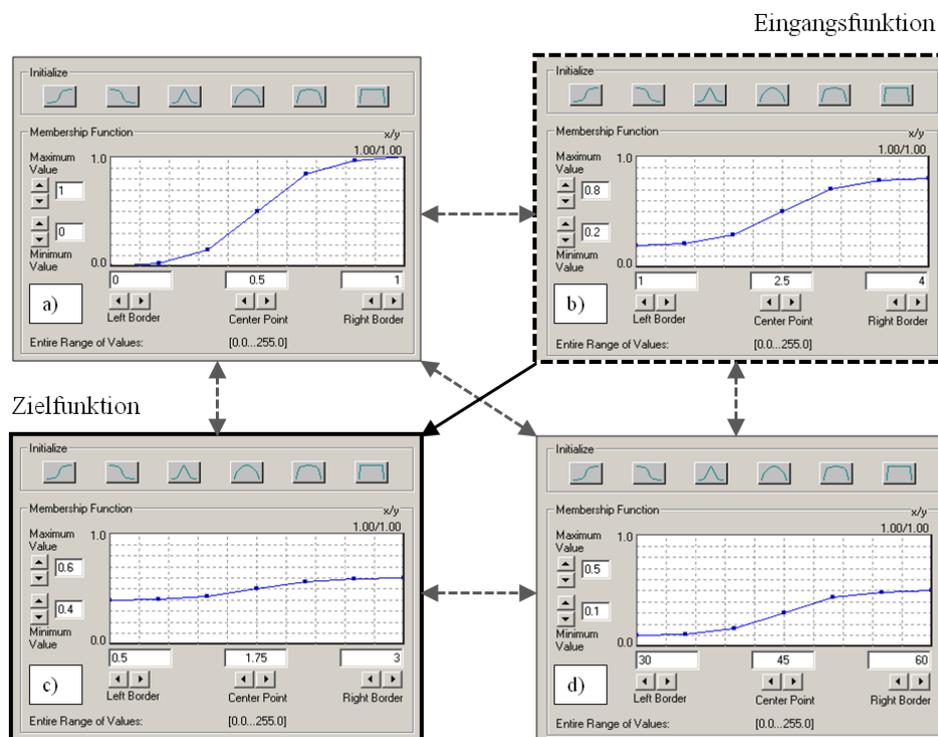


Abb. 5.7: Eingangs- und Zielfunktionen

5 Ergebnisse

Der Abbildung 5.3 liegt die folgende Gleichung zu Grunde:

$$V = \sum_{k=1}^n i_{ZK} \times \lambda_{ZK} \quad (5.1)$$

mit V: Vereinigungswert
 i_{ZK} : Wert Zielkategorie der Informationsgrundlage;
 λ_{ZK} : Wichtungsfaktor

Wichtungsfaktoren für die Vereinigung der Ebenen ergeben sich aus dem Verhältnis von Ziel- und Eingangsmaßstab (Gleichung 5.2). Dies gilt für die Ableitung großmaßstäbiger Karten aus kleinermaßstäbigen und umgekehrt. Im ersten Fall tritt eine Abschwächung in Form einer Kontrastminimierung auf, während im zweiten Fall eine Kontrastverstärkung stattfindet. Es ist die Einbeziehung von Wichtungslayern möglich, die auch räumlich differenzierte Wichtungen erlauben. Diese Layer bestehen lediglich aus einem Wichtungswert für jedes Pixel.

$$\lambda_{ZK} = M_{out} / M_{in} \quad (5.2)$$

mit
 M_{out} : Zielmaßstabszahl; M_{in} : Eingangmaßstabszahl

Tab. 5.8: Ebenenwichtungs- und Nachbarschaftsoperatoren. Die Ebenenwichtungsoperatoren werden auf die verschiedenen Eingangsdatenebenen, die Nachbarschaftsoperatoren objektbezogen (flächenbezogen) verwendet. Auf das Objekt- und Ebenenmodell wurde im Abschnitt 3.2.1 näher eingegangen.

Ebenenwichtungsoperatoren	
Grunddaten (zu erwartende Ableitungsqualität)	O_D
Maßstab	O_M
Nachbarschaftsoperatoren	
horizontale Nachbarschaft	O_N
vertikale Nachbarschaft (Schichtung)	O_S
Anteil	O_A

Insgesamt ist die Frage zu stellen wie stark die inhaltliche und räumliche (horizontale und vertikale) Dimension zu berücksichtigen ist. Beim dem Ziel eine 3D- Karte zu erstellen, müssen die Arten und Werte der Operatoren anders angewendet werden als bei 2D-Karten.

Tab. 5.9: Gegenüberstellung und Anwendung von Operatoren auf die Grunddaten. Sie werden bei multiattributiven Sachdaten meist faktoriell verwendet. Die Zeichen tragen Arbeitscharakter in der jeweiligen Datenbank.

Bodenschätzung / Forst	Geologie	Bedeutung	Art	Faktor
,	und	mit	O_N	0,4
/	/	über	O_S	0,6
;	+	mit	O_N	0,3
-	++	und	O_N	0,9
>	>	teilweise	O_A	0,3
MMK	100 000	gering	O_M	0,2

5.1.1.6 Extrakategoriale Vereinigung *Schritt 9*

Die Zugehörigkeitswerte werden den Flächen- und Punktdaten über Tabellen einer ACCESS-Datenbank zugewiesen. Die Übergabe der Daten an das GIS ArcView erfolgt dabei über SQL-Verbindungen. Hier werden auch die Ebenen-, Flächen- bzw. Arealwichtungen vorgenommen. Die Sachdaten werden mit dem künstlichen Punktraster (vgl. Abbildung 4.10) verknüpft, die realen Punktdaten werden hier integriert. Danach erfolgt die Interpolation für jede Zielkategorie. Als Interpolationsmethode der Zugehörigkeitswerte wurde die Inverse Distanz Wichtung (IDW) gewählt. Dabei wird jede Interpolation als eine ! Realisierung von n-Interpolationen angesehen, die die Zugehörigkeitsfunktion bilden. Für die Anpassung der Zugehörigkeitsfunktionen ist eine Applikation in MS EXCEL²⁶ erstellt worden, die eine Abschwächung bzw. Verstärkung und eine Streckung bzw. Stauchung der Zugehörigkeitswerte an sich, als auch ihres räumlichen Gültigkeitsbereiches erlaubt. Dabei wird eine kontinuierliche Adaption auf unterschiedliche Maßstäbe möglich. Die Zugehörigkeitsfunktion einer Zielkategorie im kleinen Maßstab wird eher mit einem flachen Verlauf angepasst, während sie im großen Maßstab steilere Verläufe hat. Hier wird gewissermaßen durch geeignete Operatoren eine differenzierte, feine Funktion auf eine grobe aufmoduliert (vgl. auch Abbildung 5.2). Dabei kommt es wie bei der intrakategorialen Vereinigung auch, zu Interferenzeffekten. Dieser Schritt hat insgesamt eine starke Auswirkung bei der Ausgrenzung von Kern- und Übergangsbereichen.

²⁶Microsoft; <http://office.microsoft.com/de-de/excel/FX100487621031.aspx>

5 Ergebnisse

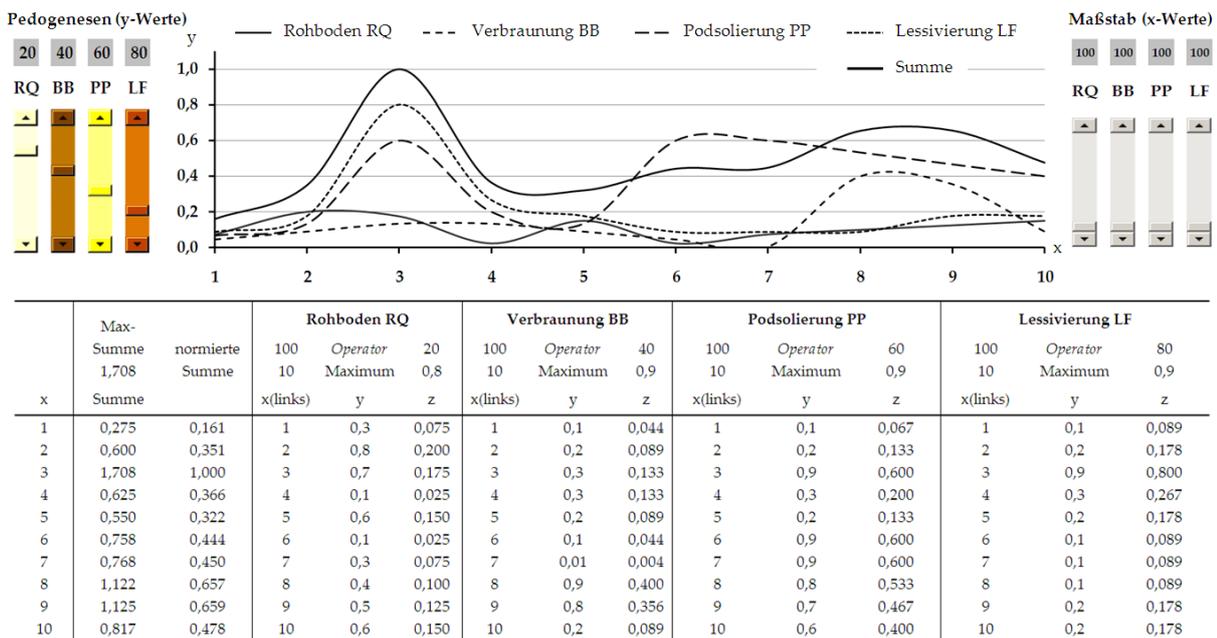
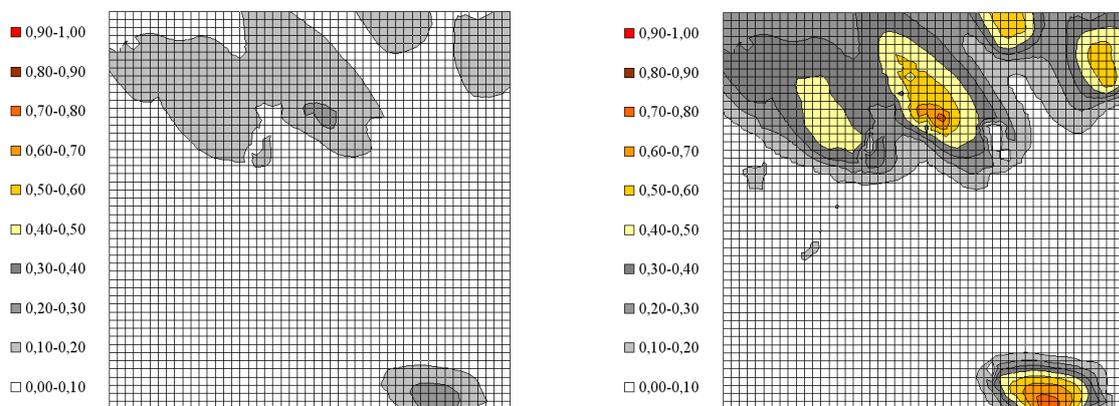


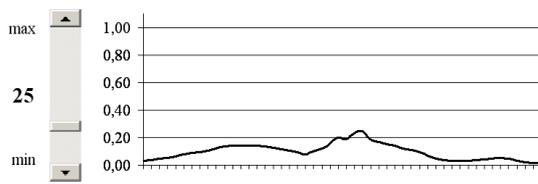
Abb. 5.8: Anpassung von Zugehörigkeitsfunktionen ausgewählter Zielkategorien der Pedogenese. Die durchgezogene, fette Linie markiert die normierte Summe (Tabellenspalte 3) der Intensitäten der Pedogenese (linke Schieberegler). In der Tabelle sind die Rasterpunkte von 1-10 mit ihren Ausgangswerten (y-Spalte) und Ergebniswerten (z-Spalte) dargestellt.

Die Kartenrepräsentation des in Abbildung 5.8 gezeigten Prinzips ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Für weiter gehende Anwendungen, wäre eine Implementierung in GIS interessant, so dass die Ebenen sowohl separat als auch vereinigt durch Schieberegler operationell modifiziert werden können. Der Vorteil für den Anwender ist darin zu sehen, dass die Wirkung der Operationen sofort auch im gegenseitigen und räumlichen Kontext sichtbar wird.

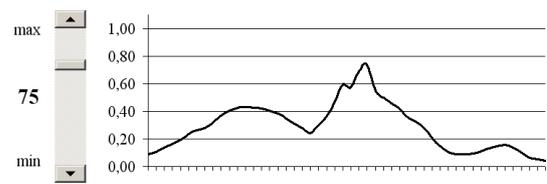


(a) Geringe Verstärkung eines Datenreliefs in der x-y-Darstellung

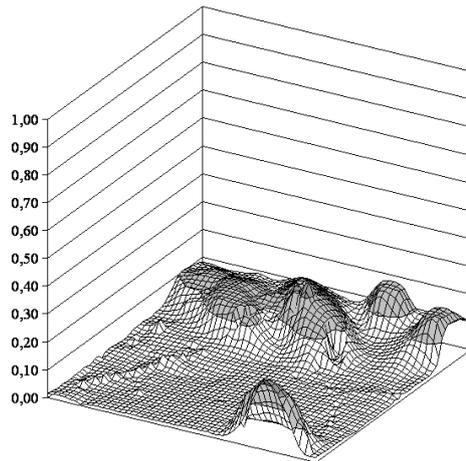
(b) Hohe Verstärkung eines Datenreliefs in der x-y-Darstellung



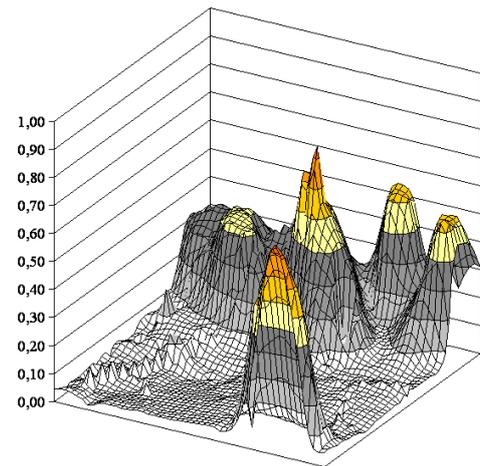
(c) Eine geringe, 25%-ige Verstärkung des Ausgangsdatenreliefs in einer vertikalen Schnittansicht des oberen Drittels des Reliefs



(d) Eine hohe, 75%-ige Verstärkung des Ausgangsdatenreliefs in einer vertikalen Schnittansicht des oberen Drittels des Reliefs



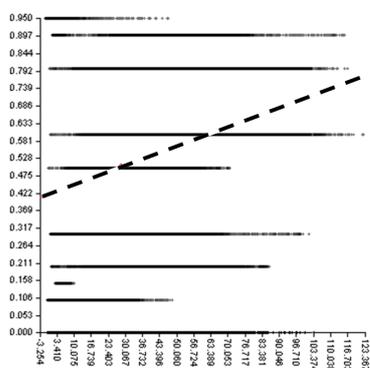
(e) Geringe Verstärkung eines Datenreliefs in der x-y-z-Darstellung



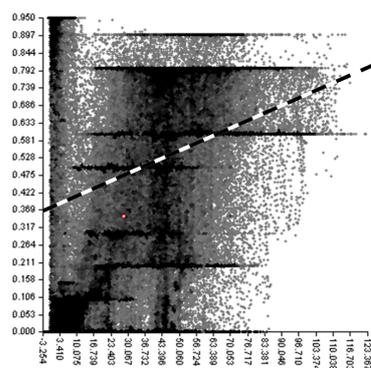
(f) Hohe Verstärkung eines Datenreliefs in der x-y-z-Darstellung

Abb. 5.9: Datenrelief einer kontinuierlich modifizierbaren Zugehörigkeitsfunktion in verschiedenen Ansichten (hier Beispiel einer Verstärkung, Ausschnitt 50×50 Pixel)

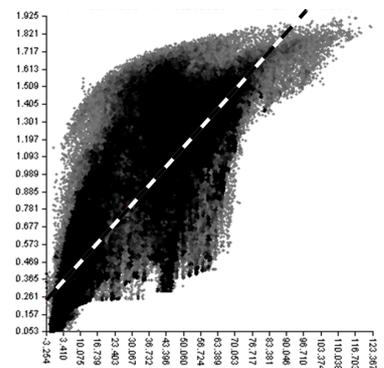
Zur Beurteilung der Qualitätsverbesserung, die durch die Grenzaufweichung der Flächen erreicht werden sollte, wurden Regressionsrechnungen von diskreten und kontinuierlichen Daten durchgeführt. Die Abbildung 5.10 (b) zeigt bereits eine Verbesserung der Regression.



(a) DGM vs. Bindigkeit



(b) DGM vs. gepufferte Bindigkeit



(c) DGM vs. TCI_{low}

Abb. 5.10: Regressionsbeziehungen zwischen DGM, Bindigkeit und TCI_{low}

5 Ergebnisse

Die Regressionsbeziehungen werden in den folgenden Gleichungen beschrieben. Besonders stark ist mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,81 und einem Bestimmtheitsmaß von 0,66 der Zusammenhang von DGM und TCI_{low} . Dieses Ergebnis muss jedoch auch erwartet werden da der TCI_{low} aus dem DGM abgeleitet worden ist. Dass bereits mit einer Pufferung eine Verbesserung der Korrelation erreicht werden kann, zeigen die steigenden Werte von Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmaß. Dieser Sachverhalt unterstützt den methodischen Ansatz, eine möglichst weiche Datenverarbeitung vorzunehmen.

$$(a) y = 0.002981 \times x + 0,418823 \quad (r = 0,1855, r^2 = 0,0344) \quad (5.3)$$

$$(b) y = 0.003432 \times x + 0,378538 \quad (r = 0,2132, r^2 = 0,0455) \quad (5.4)$$

$$(c) y = 0.017069 \times x + 0,296095 \quad (r = 0,8132, r^2 = 0,6599) \quad (5.5)$$

mit
 r: Korrelationskoeffizient; r^2 : Bestimmtheitsmaß

Kritisch ist bei dieser Herangehensweise jedoch zu beurteilen, dass der Vergleich der Wertepaare raumunabhängig erfolgt. Deshalb wurden die Zielkategorienwerte, die in den Ebenen vorgehalten werden, mit ordinalskalierten Legenden und deren Invertierung belegt. Durch eine entsprechende Wahl der Farben und deren Transparenzgrade treten Regionen hervor, die die Art der Zusammenhänge räumlich ausweisen. Das Prinzip ist der Abbildung 5.11 dargestellt. Kartenbeispiele befinden sich im Anhang (Karten IW9, IW10 und IW11).

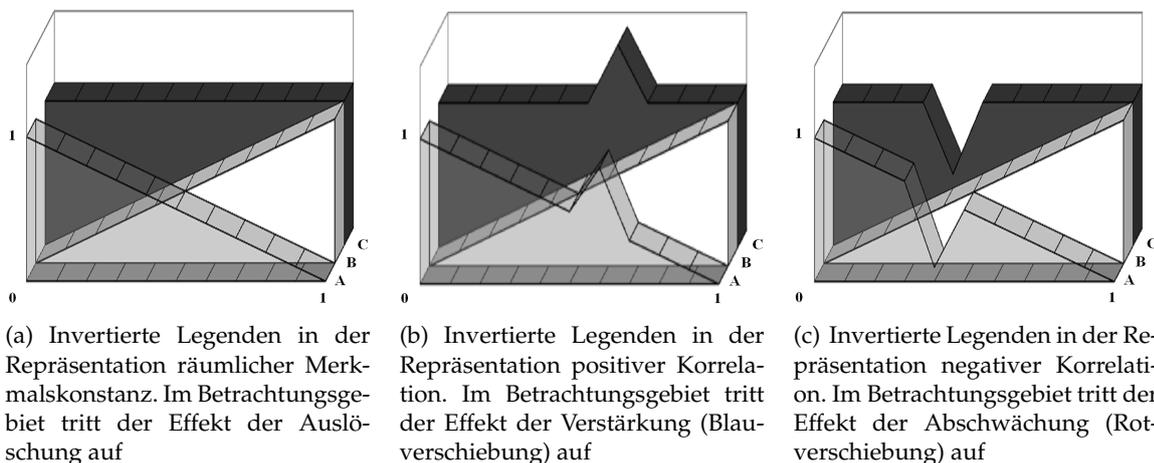


Abb. 5.11: Legendeninvertierung spektraler Legenden (A: Ausgangslegende (Zielkategorie A), B: Invertierte Legende (Zielkategorie B), C: Ergebnislegende)

Schließlich sei in diesem Abschnitt darauf verwiesen, dass neben der Berücksichtigung der Abdeckung von Schichten in geologischen Karten, auch beachtet werden muss, dass für Stoffflussberechnungen (vgl. u. a. SOMMER (1992)) zunächst die Berechnung des Ausgangsreliefs

notwendig ist. Das trifft für potentielle Erosions- und Akkumulationsbereiche ebenso zu wie für Moorareale. Ein Beispiel für eine mögliche Grid-Operation zeigt die Abbildung 5.12.

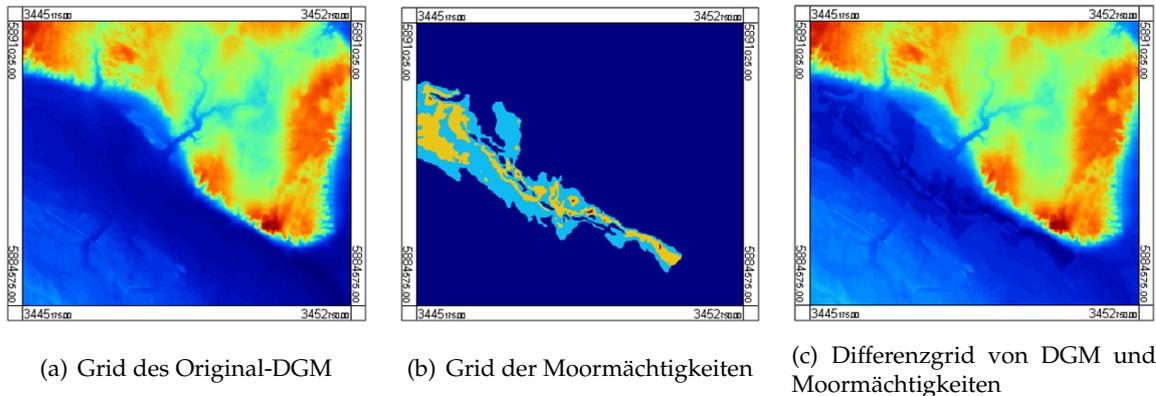


Abb. 5.12: Ergebnis von Grid-Operationen. Die Moormächtigkeiten wurden vom DGM subtrahiert, wodurch sich eine Differenzierung des DGM ergibt, die z. B. für die Modellierung von Fließwegen benötigt wird.

5.2 Informationsverarbeitung

5.2.1 Inferenz

5.2.1.1 Inhaltliche Regelbasis Schritt 10

Mit den Regeln werden aus vorhandenen Informationen neue Informationen erzeugt, die ihrerseits wieder Informationsgrundlage sein können. Dadurch können Boden- und Substratsystematische Einheiten für die entstandenen Flächen abgeleitet werden. Das Ergebnis ist ein Spektrum an maximal möglichen, zunächst hypothetischen Bodenformen. Die einfache und formale programmtechnische Umsetzung ohne Merkmalsseparation könnte lauten:

Tab. 5.10: Beispiele für Ergebnisspektren einer inhaltlichen Verschneidung der Informationsebenen Bodenschätzung, Geologie, Relief und Grundwasser

Ausgangsbedingung 1:	WENN Bodenschätzung =	S13D
- weitere Bedingung 1 :	UND Geologie =	δm
- weitere Bedingung 1b:	UND Reliefanalyse =	Erhebung
Ergebnis 1:	DANN Bodenform =	BB-LF: pky-ss (Sp) / pfl-ls (Sp, Mg) // gm-cls (Mg)
		bLF: pky-ss (Sp) / pfl-ls (Sp, Mg) // gm-cls (Mg)
		LF-BB: pky-ss (Sp) / pfl-ls (Sp, Mg) // gm-cls (Mg)
Ergebnis 1n:		lBB: pky-ss (Sp) / pfl-ls (Sp, Mg) // gm-cll (Mg)
Ausgangsbedingung 2:	WENN Bodenschätzung =	S3A1
- weitere Bedingung 2a:	UND Geologie =	Flusssand
- weitere Bedingung 2b:	UND Reliefanalyse =	Niederung
- weitere Bedingung 2c:	UND Agronomisches Profil =	HS 50 / S
- weitere Bedingung 2d:	UND Grundwasser =	hoch
Ergebnis 2:	DANN Bodenform =	GGh: ff-ss(Sf)
Ergebnis 2z:		GGhh: ff-ss(Sf)

5 Ergebnisse

Eine Auswahl der zielkategorienbezogenen Regeln, die dieser Arbeit zu Grunde liegen, zeigt die folgende Tabelle (vgl. auch S. 148):

Tab. 5.11: Regelprinzip zur Charakterisierung von Bodenformen

WENN Prämisse 1 UND	WENN Prämisse 2	DANN Konklusion
Wassereinfluss hoch	Bindigkeit gering	Gley aus Sand
Wassereinfluss mittel	Bindigkeit mittel	Reliktgley aus Lehmsand
Wassereinfluss hoch	Bindigkeit hoch	Pseudogley aus Ton
Verbraunung hoch	Bindigkeit mittel	Braunerden aus Lehmsand
Humosität mittel	Bindigkeit mittel	Kolluvisole aus Lehmsand
Lessivierung gering	Verbraunung hoch	Fahlerde-Braunerde
Podsolierung hoch	Verbraunung gering	Braunerde-Podsol

Diese Regeln münden in die durch die Wahl der entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen definierbaren Zielklassen (vgl. S. 148).

Im Zentrum der Erstellung einer inhaltlichen Regelbasis steht zunächst die Zusammenführung sämtlicher Sachdateninformationen in einer Datenbank. Ziel ist die zielkategorienbezogene Bewertung. Dazu werden sämtliche zur Verfügung stehenden Daten in einem Bewertungsformular (vgl. Abbildung 5.13) zusammengeführt. Die Bewertung erfolgt pragmatisch.

Abb. 5.13: Synoptisches Formular zur Bestimmung der Zugehörigkeitswerte von Objekten der Bodenschätzungskarte und der Forstlichen Standortkartierung. Teil 1, 2 und 3 des Formulars zeigen das zu bewertende Objekt mit den jeweiligen Merkmalen innerhalb der entsprechenden GIS-Ebene. Die verbale Bezeichnung (Teil 4) vereinigt zusammenfassbare Merkmale. Im Teil 5 sind für eine Einheit 5 Schichtungsfälle für die Bodenarten ausweisbar. Teil 6 beinhaltet die abgeleitete Flächenbodenform. Im Teil 7 werden die Zugehörigkeitswerte für die bodenformenrelevanten Zielkategorien bestimmt. Daraus werden die Zielkategorie-Ebenen extrahiert.

Dieses Vorgehen bietet sich bei einer Datenlage an, bei der keine oder nur wenige flächenauswertbare Punktdaten vorhanden sind. Ist für die zu bewertenden Flächenobjekte eine statistisch vertretbare Anzahl von Punktdaten verfügbar, können diese entsprechend qualifiziert werden. Dabei werden die gewichteten Mittelwerte der bestimmten Zugehörigkeitswerte für die Zielkategorien gebildet (Abbildung 5.14). Auffallend ist dabei, dass der Schwerpunkt der höchsten Bindigkeit im Bereich SL5D liegt, der höchsten Kalkigkeit im Bereich IS5D.

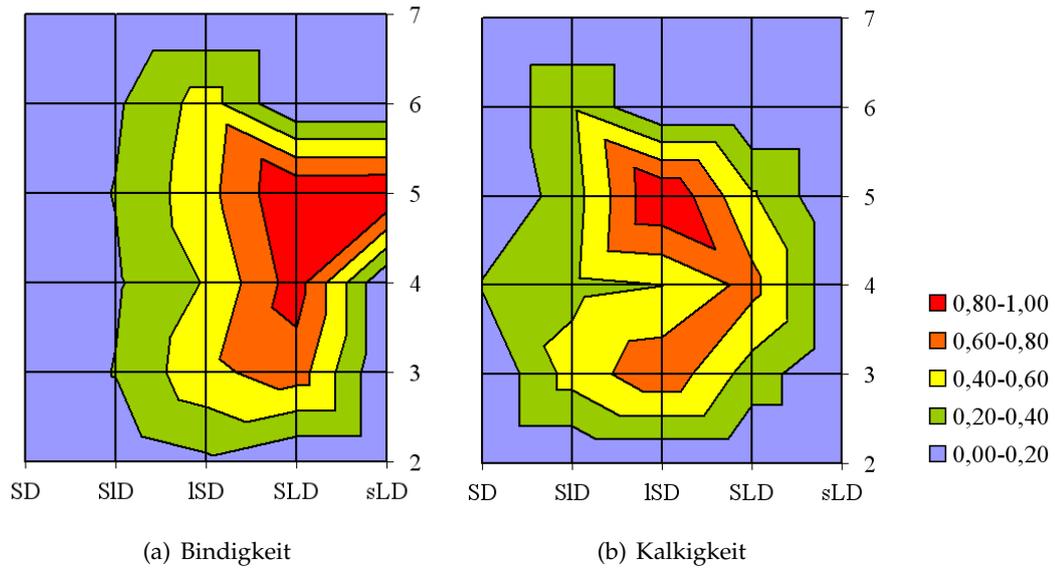
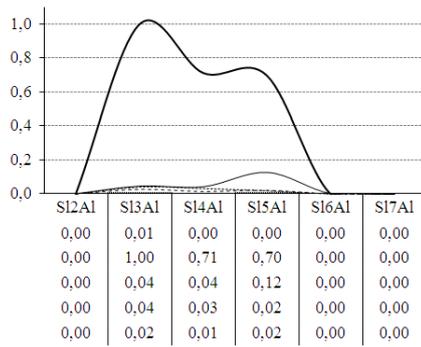


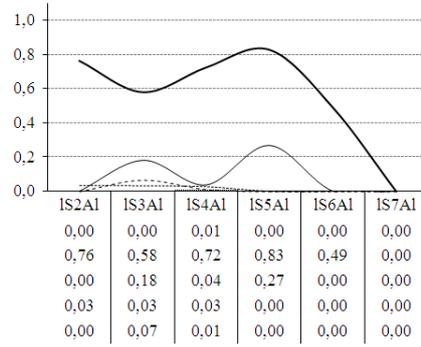
Abb. 5.14: Gewichtete Mittelwerte der Zugehörigkeitsgrade von Zielkategorien zu Zustandsstufen von Bodenschätzungsklassen (abgeleitet aus Punktdaten des LBGR)

Die Abbildung 5.15 gibt das Ableitungsergebnis von Zugehörigkeitswerten für Einheiten der Bodenschätzung und Geologie wider. Dafür sind die Punktdaten in den jeweiligen zu bewertenden Flächen datenbanktechnisch abgefragt worden. Über die zielkategorienrelevanten Merkmale der Horizonte und Substrate, sowie deren Mächtigkeiten, erfolgte die Berechnung eines mittleren Wertes für die Flächeneinheit.

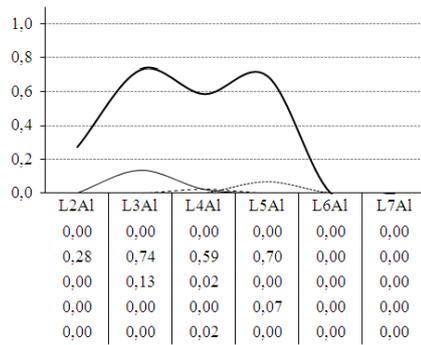
5 Ergebnisse



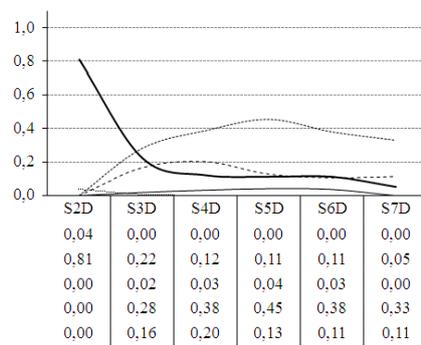
(a) Bodenschätzungsklassen SI Al



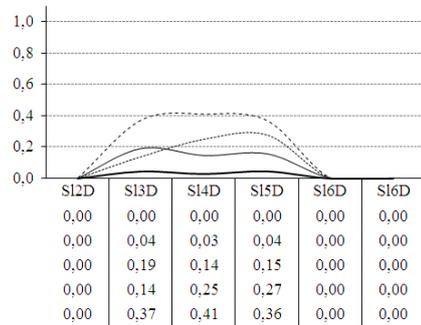
(b) Bodenschätzungsklassen IS Al



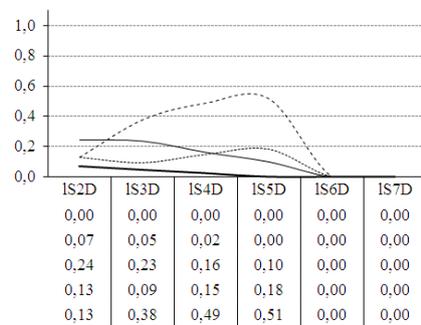
(c) Bodenschätzungsklassen L Al



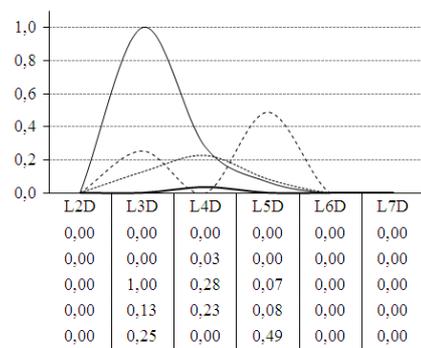
(d) Bodenschätzungsklassen S D



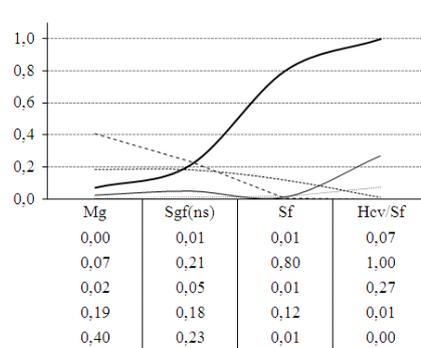
(e) Bodenschätzungsklassen SI D



(f) Bodenschätzungsklassen IS D



(g) Bodenschätzungsklassen L D



(h) Geologische Einheiten, Gesteine

Abb. 5.15: Ableitung von mittleren Zielkategorie-Zugehörigkeiten aus Punktdaten für Flächeneinheiten
 — Wassereinfluss — Kalkigkeit Hydrogener Humus - - - - - Verbraunung - - - - - Lessivierung

Eine Methode für die mächtigkeitsbilanzierte Aufbereitung der FESCH-Daten bezüglich der Zielkategorien Bindigkeit und Kalk (Wassereinfluss und Humus nicht dargestellt) zeigt die Abbildung 5.16. Für die Bindigkeit werden die Hauptbodenart und deren Modifizierung in getrennten Datenfeldern gehalten. Durch die dem Gesamtinventar entsprechenden aufgestellten Reihen von Zu- und Abschlagswerten wird die 'Intensität' der Bindigkeit berechnet. Für die Ermittlung der profilbezogenen Bindigkeit erfolgt durch faktorielle Einbeziehung der Mächtigkeit, so dass ein Wertebereich für die jeweilige Klassenfläche angegeben werden kann. Insgesamt ist jedoch die Frage zu stellen, in wie weit die Konturen der Klassenflächen für die weitere Auswertung verwendet werden können (vgl. Einleitung) oder ausgehend von den bestimmenden Grablöchern eine Neugenerierung von Flächendaten über Thiessen-Polygone, Pufferzonen oder eine Interpolation vorzunehmen ist.

FESCH ID: 122901T05_15 X_COORD: 4610273,15112 Y_COORD: 5790734,49896

Summe von BINDIGKEIT: 0,7
Summe von KALK: 2,925

Klassenzeichen: S 3 AI
Nutzung: A

Bemerkungen:
BZ: 36
AZKF: 32

Zielkategorien

ID	SCHICHTNR	Maecht_von	Maecht_bis	Bodenart	Bindigkeit * Mächtigkeit	Kalk	Kalk * Mächtigkeit
122901T05_15	1	1	2	S	0	ka3	1,3
122901T05_15	2	2	2,5	S	0	ka3	1,625
122901T05_15	3	2	2	S,(1)-sch3	0,7		1,95
122901T05_15	4	3,5	3	S	0		

```

If B = "lehmig, sehr schwach" Then T![z1] = T![z1] + 0.1
If B = "lehmig, schwach" Then T![z1] = T![z1] + 0.2
If B = "lehmig" Then T![z1] = T![z1] + 0.3
If B = "lehmig, mittel" Then T![z1] = T![z1] + 0.3
If B = "lehmig, stark" Then T![z1] = T![z1] + 0.4
If B = "lehmstreifig" Then T![z1] = T![z1] + 0.35

If B = "mergelig" Then T![z1] = T![z1] + 0.07
If B = "mergelig, schwach" Then T![z1] = T![z1] + 0.05

If B = "tonig, sehr schwach" Then T![z1] = T![z1] + 0.35
If B = "tonig, schwach" Then T![z1] = T![z1] + 0.4
If B = "tonig, mittel" Then T![z1] = T![z1] + 0.45
If B = "tonig, stark" Then T![z1] = T![z1] + 0.475

```

Kürzel	A	B	Z1 (Bindigkeit)
L	Lehm		1,8
14		tonig, stark	0,475
13		tonig, mittel	0,45
12		tonig, schwach	0,4
14		lehmig, stark	0,4
11		tonig, sehr schwach	0,35
13		lehmig, mittel	0,3
12		lehmig, schwach	0,2
s4		sandig, stark	-0,2

Abb. 5.16: Aufbereitung der Daten des Digitalen Feldschätzungsbuches (FESCH). Aus den FESCH-Daten werden vorrangig die Zugehörigkeitswerte für die Bindigkeit und Kalkigkeit abgeleitet

Für die Klassenbildung resp. Rückübersetzung ist die Setzung von Schwellenwerten notwendig. Eine Auflistung dieser für Bodenartengruppen und Bodensystematischen Einheiten findet sich in den folgenden Tabellen 5.12 und 5.13.

5 Ergebnisse

Tab. 5.12: Rückübersetzung der Zugehörigkeitswerte der Zielkategorie Bindigkeit in die 'Sprache der Bodenartengruppe'

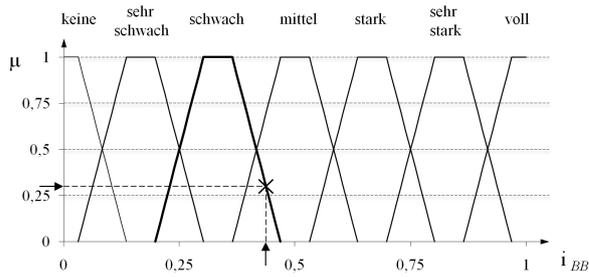
Schwellenwertbereiche	Bindigkeit	Bodenartengruppen (ohne Schluff)	
		Kürzel	verbal
$1 \geq \mu \leq 0,8$	extrem hoch	t	Ton
$0,8 > \mu \leq 0,7$	sehr hoch	lt	Lehmton
$0,7 > \mu \leq 0,6$	hoch	tl	Tonlehm
$0,6 > \mu \leq 0,4$	mittel	ll	Lehm
$0,4 > \mu \leq 0,3$	gering	sl	Sandlehm
$0,3 > \mu \leq 0,2$	sehr gering	ls	Lehmsand
$0,2 > \mu < 0$	keine	s	Sand

Bei dieser Art der Rückübersetzung muss sichergestellt sein, dass im Untersuchungsgebiet die 'globalen' Extremwerte (Ton und Sand) der Reihe auch den 'lokalen' Extremwerten entsprechen. Andernfalls würde die Rückübersetzung der zuvor normierten Daten zu falschen Ergebnissen führen. Ggf. muss die Übersetzungstabelle den lokalen Bedingungen angepasst werden.

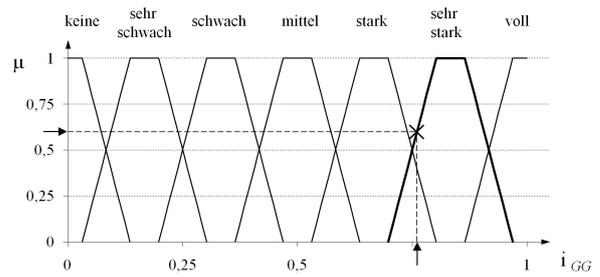
Tab. 5.13: Rückübersetzung der Zugehörigkeitswerte der Zielkategorie Verbraunung in die 'Sprache der Bodensystematischen Einheiten'

Schwellenwertbereiche	Bodensystematische Einheit	
	Kürzel	verbal
$1 \geq \mu \leq 0,8$	<i>BB</i>	<i>Braunerde</i>
$0,8 > \mu \leq 0,6$	<i>XX-BB</i>	z. B. <i>Fahlerde-Braunerde</i>
$0,6 > \mu \leq 0,4$	<i>BB-XX</i>	z. B. <i>Braunerde-Fahlerde</i>
$0,4 > \mu \leq 0,3$	<i>b4XX-XX</i>	z. B. <i>stark verbraunter Fahlerde-Podsol</i>
$0,3 > \mu \leq 0,2$	<i>b3XX-XX</i>	z. B. <i>mittel verbraunter Fahlerde-Podsol</i>
$0,2 > \mu < 0$	<i>b2XX-XX</i>	z. B. <i>schwach verbraunter Fahlerde-Podsol</i>

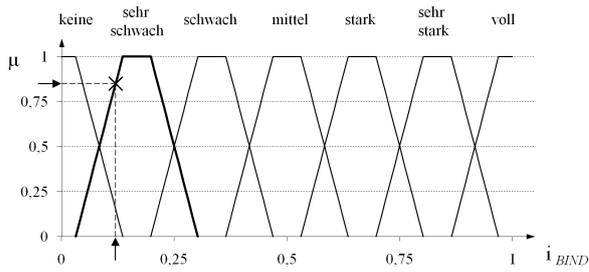
Dieser Vorgehensweise sollte jedoch das Prinzip der unscharfen Mengen vorgezogen werden. Die Abbildung 5.17 verdeutlicht das Prinzip der Ermittlung der Zugehörigkeiten von Intensitäts- und Tiefenwerten zu entsprechenden linguistischen Termen.



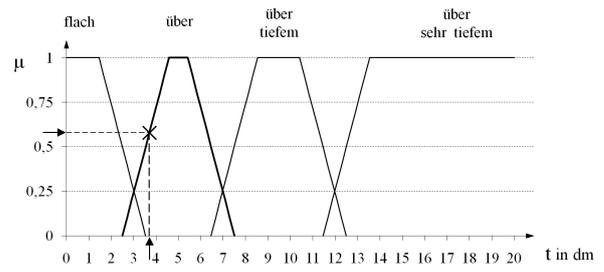
(a) Verbraunung



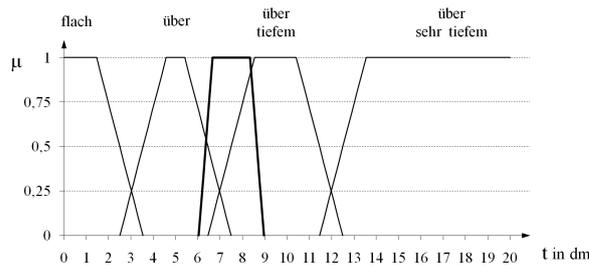
(b) Vergleyung



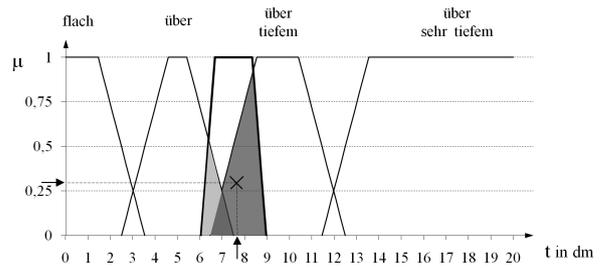
(c) Bindigkeit



(d) Tiefenstufen der KA5



(e) Tiefenstufen der KA5 mit Tiefenbereichsangaben der Agronomischen Profile (hier 6 bis 9 dm)



(f) Schnittmengen aus Abbildung 5.17 (e) und Schwerpunktbestimmung der Ergebnisfläche.

Abb. 5.17: Fuzzifizierung und Defuzzifizierung von Pedogenesen und Tiefenstufen

In den Beispielen der Abbildung 5.17 sind die Intensitäten der Pedogenesen und der Bindigkeit, sowie Tiefenstufen auf der Abszisse aufgetragen. Die in der Abbildungen (c) dargestellten Fuzzy-Mengen (*keine*, *sehr schwach*, *schwach*, *mittel*, *stark*, *sehr stark*, *voll*) können z. B. mit den Bodenartengruppen (*Reinsand*, *Lehmsand*, *Sandlehm*, *Normallehm*, *Tonlehm*, *Lehmton*, *(Rein-)Ton*) gleichgesetzt werden. Feinere Abstufungen, wie z. B. in Tabelle 5.1 auf S. 107 sind möglich. Für die Pedogenesen können die hierarchischen Klassen der KA5 verwendet werden. Demnach würde die Fuzzy-Menge *voll* der Klasse *Braunerde* und die Fuzzy-Menge *schwach* der Subvarietät *b2...* entsprechen. Gemäß den Abbildungen (a), (b) und (c) ergibt sich ein *schwach verbraunter XX-Gley aus Lehmsand (b2XX-GG: ls)*.

Die Abbildung (e) stellt die fuzzifizierten Tiefenstufen der KA5 (vgl. auch Abbildung (d)) mit der fuzzifizierten Tiefenbereichsangabe eines agronomischen Profils gegenüber. Das Ergebnis ist in Abbildung (f) dargestellt. Nach Anwendung des UND(min)-Operators ergeben sich die

5 Ergebnisse

grauen Teilflächen (Zwischenergebnis), die nach Anwendung des ODER(max)-Operators die Gesamtfläche ergibt. Für die Endergebnisfläche wird der Schwerpunkt berechnet. Dieser liegt mit einem Zugehörigkeitsgrad von etwa 0,3 bei einer Tiefe von 7,8 dm in der Klasse 'über tiefem'. Im Ergebnis der Ableitung der Zugehörigkeitswerte für die Flächen der verschiedenen Informationsebenen steht die operationelle Verschneidung der Ebenen. Für jedes Pixel der Karte steht ein Zugehörigkeitswert für die betrachteten Zielkategorien zur Verfügung. Die jeweilige Zielkategorie wird in festgelegten Spalten als Attribut mitgeführt. Diese Art der Datenhaltung stellt eine Vorkonfektionierung für die im Defuzzifizierungsprozess aufzustellende Rangfolge (Maximum-Methode) dar (vgl. Tabelle 5.14).

Tab. 5.14: Flächenobjekt- bzw. Pixelbezogene Attributtabelle. Neben den Zugehörigkeitswerten werden die Bezeichnungen für die Zielkategorien als Attribute mitgeführt. So kann dem Bodengesellschaftsansatz in der Weise entsprochen werden, dass pro Flächeneinheit mehrere Bodenformen ausweisbar sind.

Objekt	A-Zielkategorie	Wert A-Zielkategorie	B-Zielkategorie	Wert B-Zielkategorie	C-Zielkategorie	Wert C-Zielkategorie	D-Zielkategorie	Wert D-Zielkategorie
1	BB	0,7	LF	0,3	PP	0,2	GG	0,3
2	BB	0,1	LF	0,5	PP	0,6	GG	1,0
3	BB	0,5	LF	0,3	PP	0,2	GG	0,3
4	BB	0,2	LF	1,0	PP	1,0	GG	0,7
5	BB	0,3	LF	0,2	PP	0,4	GG	0,2

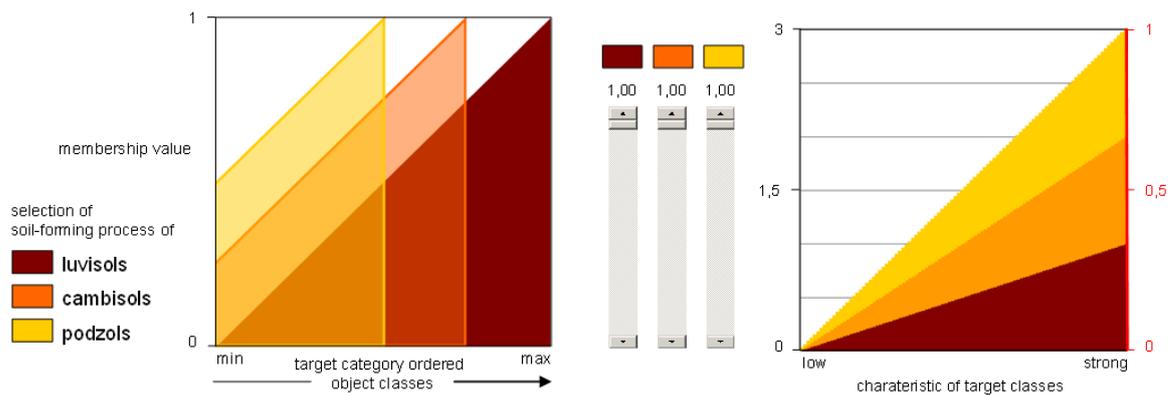
Nach diesem Schritt wird entsprechend des Zugehörigkeitsgrades eine Rangfolge gebildet. Die innerhalb der Objekte höchsten Zugehörigkeitsgrade erhalten dabei den Rang 1 (Tabelle 5.15).

Tab. 5.15: Rangfolge der Zielkategorien. Diese Tabelle geht aus der Tabelle 5.14 hervor. Aus einer 1 : 1-Relation zwischen Objekt und Attribut wird eine 1 : n-Relation. Die Rangfolge wird dabei durch die Zugehörigkeitswerte vorgegeben. Denkbar ist hier auch die Einbeziehung von Flächenanteilen.

Objekt	Rang	Zielkategorie	Zugehörigkeitsgrad
1	1	BB	0,7
1	2	GG	0,3
1	3	LF	0,3
1	4	PP	0,2
2	1	GG	1,0
2	2	PP	0,6
2	3	LF	0,5
2	4	BB	0,1
3	1	BB	0,5
3	2	GG	0,3
3	3	LF	0,3
3	4	PP	0,2
4	1	LF	1,0
4	2	PP	1,0
4	3	GG	0,7
4	4	BB	0,2
5	1	PP	0,4
5	2	BB	0,3
5	3	GG	0,2
5	4	LF	0,2

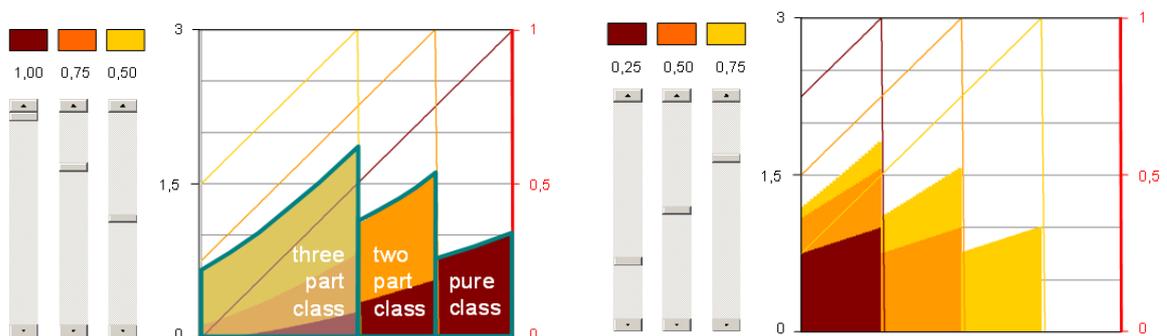
Bei der flächenobjekt- oder pixelbezogenen Attributtabelle 5.14 wird neben dem Zugehörigkeitswert die Bezeichnung für die Zielkategorie mitgeführt. Die abgeleiteten Werte werden in die Attributtabelle des GIS geschrieben. Die Flächenobjekte, die aus der Anwendung des Prinzips der kleinsten Flächen hervorgegangen sind, besitzen damit n Zugehörigkeitswerte. Ein Zugehörigkeitswert von 0 bewirkt, dass diese Zielkategorie keinen Rang erhält.

Diese Vorgehensweise impliziert die Heterogenität der Flächen und versucht die Brücke zum Gesellschaftsansatz zu schlagen. Bereits in diesem Stadium könnten diese Werte theoretisch in den Sprachgebrauch der gültigen Nomenklatur rückübersetzt werden, so dass man eine Bodenformkarte erhält. Beispiele für diese Rückübersetzung von Teilelementen der Bodenform zeigen die Tabellen 5.12 und 5.13 und die Abbildung 5.17. Für die Erstellung der Konzeptbodenkarte müssen die Bodenformen zu Legendeneinheiten (Zielklassen) zusammengefasst werden. Dafür sind Regeln aufzustellen, die die Zielklassen definieren. Im Folgenden ist das Regelprinzip für die Zielkategorien Lessivierung, Verbraunung und Podsolierung graphisch dargestellt. Es werden lineare Zugehörigkeitsfunktionen (0 bis 1 bzw. keine bis hoch) angenommen.



(a) Regel-Interferenz von linearen Zugehörigkeitsfunktionen der Zielkategorien Lessivierung (luvisols), Verbraunung (cambisols) und Podsolierung (podzols)

(b) Min-Max-Gleichgewicht der Zielkategorien. Diese Konstellation führt zu problematischen Konklusionen (siehe auch Tabelle 5.16 und Abbildung 5.19)



(c) graduell-kaskadierter Einfluss der Zugehörigkeitsfunktion der Zielkategorien auf die Zielklasse

(d) Insgesamt abgeschwächter Einfluss

Abb. 5.18: Auswirkung der Regelinterferenz von Zugehörigkeitsfunktionen auf die Zielklassen

5 Ergebnisse

Die Abbildung 5.18 verdeutlicht die Auswirkung der Regelinterferenz von Zugehörigkeitsfunktionen auf die Zielklassen. Dabei werden die Zugehörigkeitsfunktionen als dreieckige, rechts-referente Fuzzy-Mengen aufgefasst. Diese Funktionen sind gegeneinander entlang der x-Achse verschiebbar, so dass sich für die Zielklasse unterschiedliche Einflüsse ergeben (Abbildung 5.18 (c)). Diese Klassifizierung führt zu einer reinen Klasse (Fahlerde), einer Zwei-Komponenten-Klasse (Fahlerde-Braunerde) und einer Drei-Komponenten-Klasse (lessivierter Braunerde-Podsol).

Als problematisch sind die Fälle einzustufen, die auf Grund gleicher Zugehörigkeitsgrade keine eindeutige Einstufung zulassen (siehe Tabelle 5.16). Dieser Sachverhalt muss ebenfalls bei der Ausweisung der Aussagesicherheit Berücksichtigung finden.

Tab. 5.16: Regelmatrix zur Ableitung der Bodensystematischen Einheit (hier Vergleyung und Verbraunung). Die Beispiele aus den Abbildungen 5.17 (a) und (b) führen hier demnach zu einem b2XX-GG (schwach verbrauchter XX-Gley). Die Zeichen „XX“ stehen stellvertretend für eine weitere Pedogenese. Die grau hinterlegten Felder markieren problematische Konklusionen.

		Vergleyung						
		keine	sehr schwach	schwach	mittel	stark	sehr stark	voll
Verbraunung	keine	XX	g2XX	g3XX	g4XX	GG-XX	XX-GG	GG
	sehr schwach	b2XX	b2g2XX	b2g3XX	b2g4XX	b2GG-XX	b2XX-GG	b2GG
	schwach	b3XX	g2b3XX	b3g3XX	b3g4XX	b3GG-XX	b3XX-GG	b3GG
	mittel	b4XX	g2b4XX	g3b4XX	b4g4XX	b4GG-XX	b4XX-GG	b4GG
	stark	BB-XX	g2BB-XX	g3BB-XX	g4BB-XX	GG-BB, BB-GG	BB-GG	BB-GG
	sehr stark	XX-BB	g2XX-BB	g3XX-BB	g4XX-BB	GG-BB	GG-BB, BB-GG	BB-GG
	voll	BB	g2BB	g3BB	g4BB	GG-BB	GG-BB	BB, GG

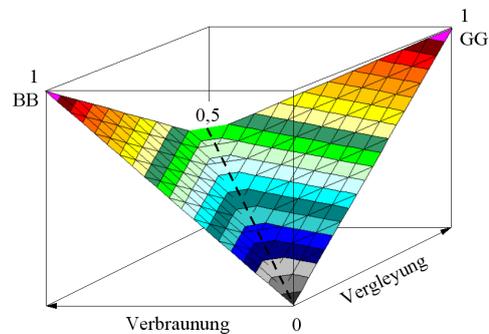


Abb. 5.19: Grafische Darstellung der in Tabelle 5.16 dargestellten Regelmatrix. Die gestrichelte Linie markiert in Analogie zur Tabelle problematische Konklusionen.

5.2.1.2 Räumliche Regelbasis

Regeln, wie sie für die inhaltliche Komponente, also der Ableitung von Bodensystematischen Einheiten aus den Horizontdefinitionen oder der Einstufung von Bodenformen über z. B. die Tiefenstufen, angewendet werden können, existieren für die Abgrenzung von

Bodenarealen nicht. Ein Grund dafür ist möglicherweise darin zu sehen, dass die Gesetzmäßigkeiten des vertikalen Aufbaus der Bodendecke einfacher in Regeln zu fassen sind, als die der horizontalen Verbreitung der Böden. So können z. B. H-Horizonte (Moor-Horizonte) direkt über oder unter Bv-Horizonten (Verbraunungshorizonten) mit Ausnahme begrabener Böden ausgeschlossen werden. Areale von Mooren neben Braunerden können jedoch vorkommen. Mit Hinweis auf den Bodengesellschaftsansatz müsste für künftige Arbeiten zumindest ein Rahmen erarbeitet werden, der zulässige Zusammenfassungen von Böden in einer Bodengesellschaft regelt. Die Untersuchungen von BURAK (2005), die Böden auch unter Berücksichtigung 'ihrer Grenzlinienverhältnisse' zusammenfasst, können darin einbezogen werden.

Bisher erfolgt die Abgrenzung auf Basis inhaltlicher Kriterien bzw. der Berücksichtigung von Flächenanteilen innerhalb bestimmter Einheiten. Nach BURGER (1992) besteht das Problem hier ebenfalls in der geeigneten Schwellenwertwahl aus punkthaften Geländeaufnahmen eines kontinuierlichen quantitativen Wertefeldes (z. B. Bodentiefe) oder eines diskreten qualitativen Wertefeldes (z. B. Bodentyp) Isolinien zu konstruieren. Ein weiteres Problem ist die Verknüpfung der inhaltlichen mit den räumlichen Regeln. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Die räumlichen Abgrenzungsregeln für die in dieser Arbeit zu erstellende Bodenkonzeptkarte liefert der Segmentierungsalgorithmus von *eCognition*. Es werden Flächeneinheiten gebildet, in denen die inhaltliche und räumliche Distanz der Pixel des Ebenenstapels minimal wird. Dieser Sachverhalt wird dem Bodengesellschaftsansatz jedoch nur bedingt gerecht, da Extremwerte nicht berücksichtigt werden können. Auch hier spiegelt sich das Phänomen der ortsscharfen Beprobung und deren räumlicher In-Beziehung-Setzung wider. Im Prinzip stellt jedes Segment (Fläche bzw. Klasse) des Segmentierungsergebnisses eine Bodengesellschaft dar, die durch die Zugehörigkeitsfunktionen der Zielkategorien (Pixelzugehörigkeit) charakterisiert wird. Jedes Pixel repräsentiert eine Bodenform als Individuum innerhalb einer (Segment-/Klassen-)Gesellschaft. In den unterschiedlichen Maßstäben sind die Zugehörigkeiten mehr oder weniger stark, so dass sich auch räumlich unterschiedliche Gesellschaften ergeben. Der Schritt einer Rückübersetzung erfolgt prinzipiell erst mit der durch die Segmentierung berechneten Legendeneinheiten, die durch eine 'mittlere' Bodenform charakterisiert werden und benachbarte, ähnliche Bodenformen zusammenfassen. Die in dieser Arbeit durchgeführte Segmentierung dient primär dazu, Flächen für einen definierten Maßstab zu finden. Dem Bodengesellschaftsaspekt kann dadurch Rechnung getragen werden, indem das Segment als lokale Hülle, quasi als 'gesellschaftlicher Überbau' über den Pixelverband (Individuen) aufgefasst wird. So können auch Flächenanteile für die Pixelverbände berechnet werden.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht darin, zu klären in wie weit generell die Angabe und Vorhaltung einer berechneten, mittleren, flächengewichteten Bodenform, auch bei Anwendung des Gesellschaftsprinzips, sinnvoll ist. Die mittlere Bodenform nivelliert zwar die Heterogenität der Bodeneinheit, erlaubt jedoch eine einfache und schnelle Flächenbewertung im Kontext des gesamten Untersuchungsraumes.

5.3 Informationsauswertung

5.3.1 Defuzzifizierung

5.3.1.1 Aggregierung *Schritt 11*

Die zu erstellende Bodenkarte wird als synthetisches Bild aufgefasst, so dass Bildverarbeitungsverfahren angewendet werden können. Als reale Bilder werden solche betrachtet, die mit physikalischen Aufnahmetechniken gewonnen werden. Definierte Spektralbereiche des elektromagnetischen Spektrums bilden die Aufnahmekanäle des Kamerasystems. Dazu zählen als Satelliten- und Luftbilder, sowie Bodenprofilfotos. STOLZ (1998) verwendet für die Landnutzungsklassifizierung von Satellitenbildern eine sog. Multisource Fuzzy-Logic Classification. Zunächst erfolgt hier eine Maximum-Likelihood- Classification bei der spektrale Wahrscheinlichkeiten die Zuordnung der Pixel zur jeweiligen Klasse bestimmen. Der danach angesetzte Algorithmus ENPOC (*Environmental Possibility Classifier*) bezieht zusätzlich die Zugehörigkeitsfunktionen weiterer Geofaktoren ein, so dass über Fuzzy-Operatoren kombinierte 'possibilities' bestimmt werden können.

Synthetische Bilder besitzen keinen originären Bildcharakter im visuellen Sinn. Sie entstehen durch die Komposition verschiedener Informationsebenen, die ihrerseits eine gewisse Interpretation aus einer Wissens- und Regelbasis heraus durchlaufen haben. Die in dieser Arbeit eingesetzten Bildverarbeitungsverfahren haben hauptsächlich eine Aggregierung zum Ziel.

Der Charakter der Bodendecke wird durch stabile und labile Faktoren gekennzeichnet, d. h. er besitzt eine mehr oder weniger ausgeprägte räumliche und zeitliche Konstanz. Demzufolge müsste eine Modellierung, respektive eine Aggregierung, also der Zusammenfassung von Merkmalen, beide Komponenten berücksichtigen. In dieser Arbeit wird jedoch lediglich der Ist-Zustand des Bodens gekennzeichnet und nicht dessen Veränderung. Die räumliche Ausdehnung eines Bodenareals, bezieht sich auf den horizontalen und vertikalen Verlauf der Merkmale. Die tiefenbezogene, vertikale Aggregierung ist die Voraussetzung für die horizontale Aggregierung, die mit Hilfe von Cluster- und Segmentierungsalgorithmen durchgeführt wird. Sie liefert einen für das Pixel oder Polygon bezogenen Wert, der über die Schwerpunkte der durch die Tiefenfunktionen der Merkmale aufgespannten Flächen bestimmt wird. Das bedeutet, dass ein oberflächennaher Schwerpunkt einen größeren Einfluss auf die horizontale Aggregierung besitzt als ein tief liegender. Der Vorteil der tiefenbezogenen Aggregierung mittels Schwerpunktmethodologie liegt in der gleichrangigen Einbeziehung von Intensität, Tiefenlage und Mächtigkeit des betrachteten Merkmals. Dazu wird der Zentroidindex Z_v eingeführt. Die tiefenbezogene, vertikale Aggregierung ist zeitlich vor der horizontalen durchzuführen. Die angesetzten Kriterien müssen gleich sein. Bei der Einbeziehung sehr vieler Merkmale muss eine Gewichtung der Schwerpunkte vorgenommen werden. Diese Gewichtung ist in der ho-

rizontalen Aggregation adäquat durchzuführen. Nach SCHMIDT (2002) sind „Angaben zum Bodensubstrat für ökologische Fragestellungen aussagekräftiger als solche zum Bodentyp, da letzterer eine nur sehr begrenzt objektivierbare und umweltchemisch deutbare Bezeichnung für eine empirisch fassbare Kombination pedogenetisch interpretierbarer Merkmale ist. Dem gegenüber charakterisiert die Bodenart die Pedosphäre bezüglich ihrer bodenphysikalischen Eigenschaften ... Aus fachlicher Sicht ist die Verwendung der Bodenart am sinnvollsten, da weitere relevante bodenphysikalische Kennwerte aus dieser Größe abgeleitet werden können.“

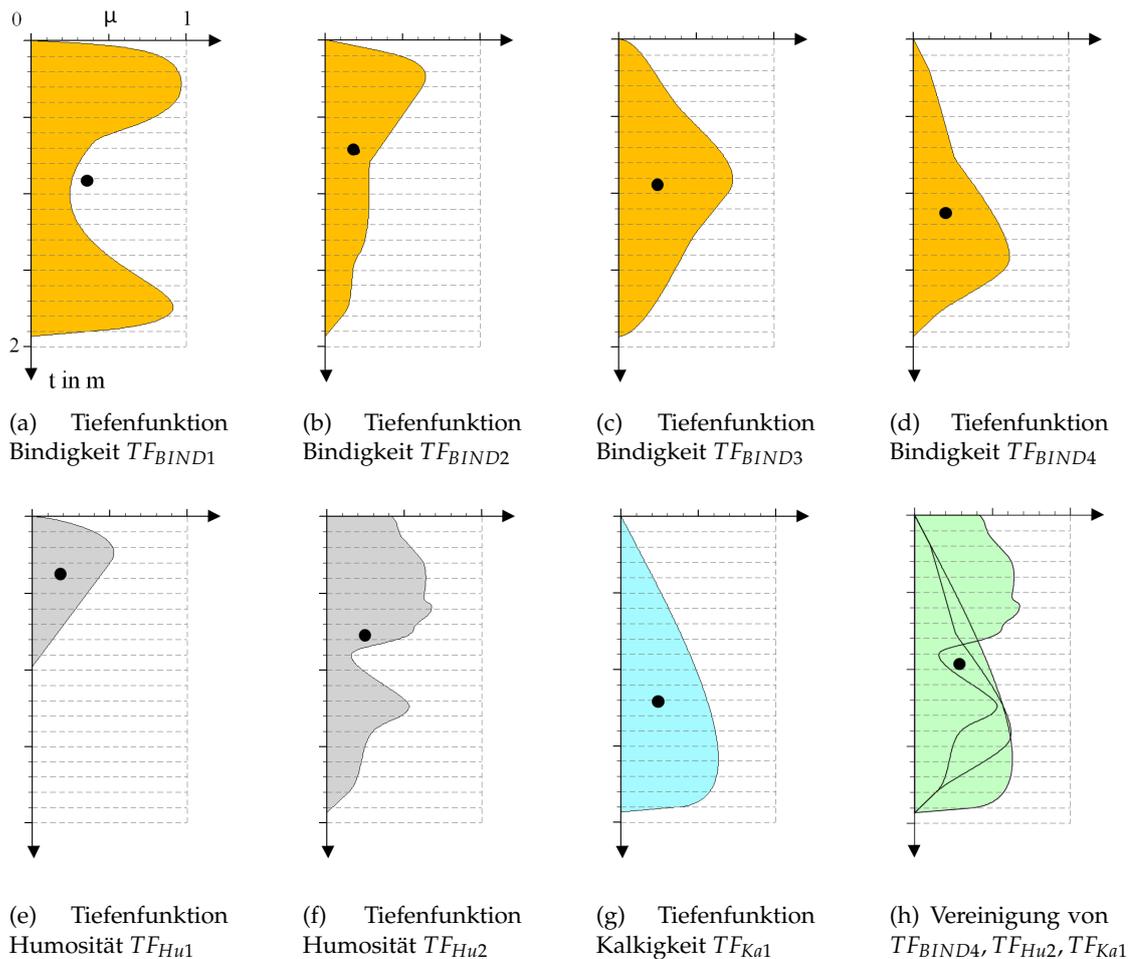


Abb. 5.20: Prinzip der tiefenbezogenen Aggregation. Die Tiefenfunktionen spannen Flächen auf, die als Fuzzy-Mengen aufgefasst werden. (μ : Zugehörigkeitswert der Zielkategorie, t : Tiefe, \bullet Schwerpunkt Z_v)

5 Ergebnisse

$$Z_v = \frac{\mu_M}{t} \quad (5.6)$$

mit

Z_v : Zentroidindex (vertikal); μ_M : resultierender Zugehörigkeitswert des Merkmals; t : resultierende Tiefenlage des Merkmals

Die Abbildung 5.21 verdeutlicht, dass bei einer Aggregation prinzipiell die drei Komponenten Inhalt (Zielkategorie), Raum (Flächenkontur) und Tiefe zu berücksichtigen sind. Die Schwerpunkte dieser Komponenten sind stets verschoben. Je näher diese liegen desto besser ist die Aggregierungsqualität.

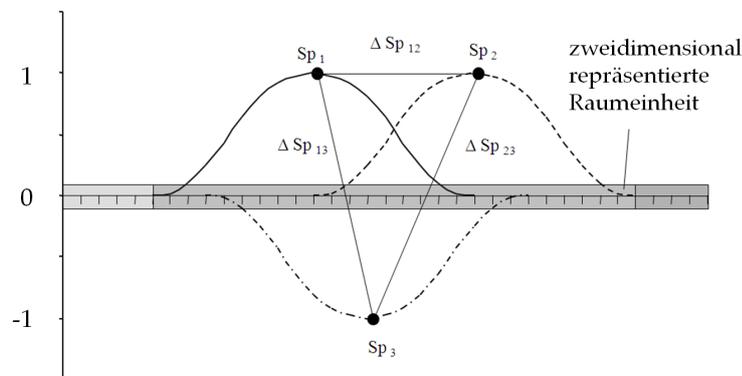


Abb. 5.21: Schwerpunktetripel einer Flächeneinheit, gebildet aus den Komponenten Inhalt, Raum und Tiefe. Minimale Koordinatendifferenzen der Schwerpunkte sind Ausdruck eines guten Aggregationsergebnisses. (Sp_1 : Inhaltsschwerpunkt; Sp_2 : Raumschwerpunkt; Sp_3 : Tiefenschwerpunkt)

5.3.1.1 Zentralperspektivische Aggregation

Die visuelle Wahrnehmung ist einer der wichtigsten Sinne des Menschen überhaupt. Die bildliche Repräsentation der Realität besitzt in der Widerspiegelung dieser eine entscheidende Bedeutung. Die Interpretation erfolgt dabei meist durch die Erkennung bzw. Widererkennung von Mustern, die in ihrer Komposition verwertbare Informationen liefern. Eine sehr wichtige Rolle spielt dabei auch die Zentralperspektive, dessen Rahmenbedingungen bereits LEONARDO DA VINCI nach REHKÄMPER (2002) erkannte:

- „ (1) Ein Auge muss sich an einem fest vorgegebenen Punkt, dem zentralen Projektionspunkt, befinden ...
- (2) Dieses Bild muss ein Durchschnitt des Sehkegels sein.
- (3) Der Abstand Auge-Bild und die Lage der beiden zueinander müssen den Originalbedingungen entsprechen.“

Der Ansatz der zentralperspektivischen Aggregation, der als Teilergebnis der Arbeit nur exemplarisch behandelt werden kann und Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen liefert, stützt sich dabei auf den Umstand, dass ausgehend von einem Punkt mit zunehmender Entfernung die Grenzen der Objekte bzw. die Objekte selbst verschwimmen, unscharf werden oder gar verschwinden und in sehr großer Entfernung, d. h. im kleinen Maßstabsbereich, eine 'Neuordnung' ergeben. Die bisher angewendeten Verfahren zur Maßstabsverkleinerung bei Rasterdaten stützen sich weitestgehend auf die Klassifizierung der Objekte auf höherem hierarchischem Niveau. Es tritt eine Vergrößerung auf, wobei die die Pixeldimensionen in der Regel erhalten bleiben und Grenzen sich stets an bestehende Verläufe orientieren. Die zentralperspektivische Aggregation hingegen verschiebt die Objekte (Pixel) gegeneinander, wodurch sich ein neuer Inhalt und eine neue Grenze ableiten. Der Verschiebungsbetrag richtet sich nach dem Verkleinerungsgrad (Maßstab). Die Pixelwerte (Zugehörigkeitsgrade) an sich werden durch eine symmetrische, pyramidale und gleitende Mittelwertbildung berechnet. Diese Art der Aggregation bildet indirekt den Grad der Nachbarschaft der Pixel ab. Mit kleiner werdendem Maßstab wird der Grad der Nachbarschaft geringer gewichtet. Die Folge ist eine Kontrastverringering und eine Nivellierung des Pixelwertereliefs. Das Symmetriezentrum ist der Brennpunkt Z, der der bereits auf S. 47 erwähnten Konfusion gleich kommt (Abbildung 5.22).

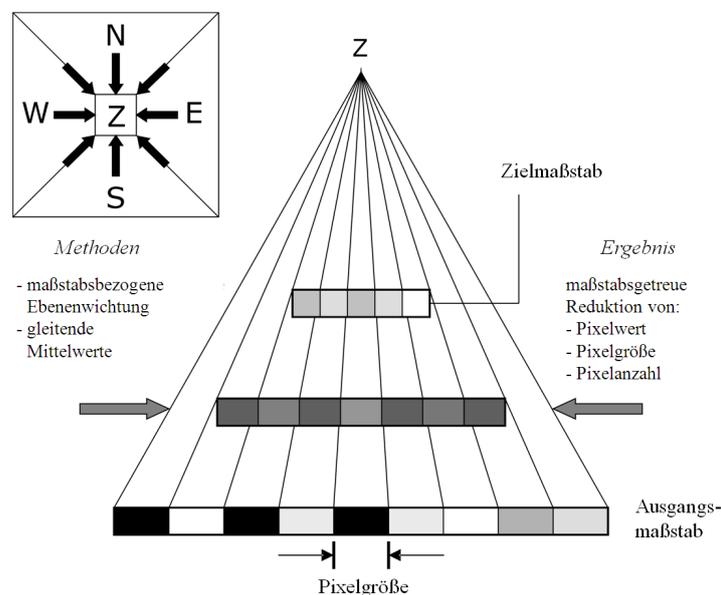


Abb. 5.22: Prinzip der zentralperspektivischen Aggregation (Zentralisierung)

5 Ergebnisse

Die Konfusion ist Ausdruck der extremsten Raum-Inhalt-Unschärfe. Die Abbildung 5.23 zeigt die zentralperspektivische Aggregation in West (W) - Ost (E) - und Ost (E) - West (W)- Richtung (links- und rechtsreferent) Die jeweils übergeordnete Ebene wird durch gleitende Mittelwertbildung abgeleitet. Die Randpixel fallen dadurch weg bzw. verringern ihre Dimension. Die Diagramme zeigen die Pixelwerte der jeweiligen Maßstabsebenen. Bemerkenswert ist, dass sich die Wertesummen ab der 7. Ebene verschieben.

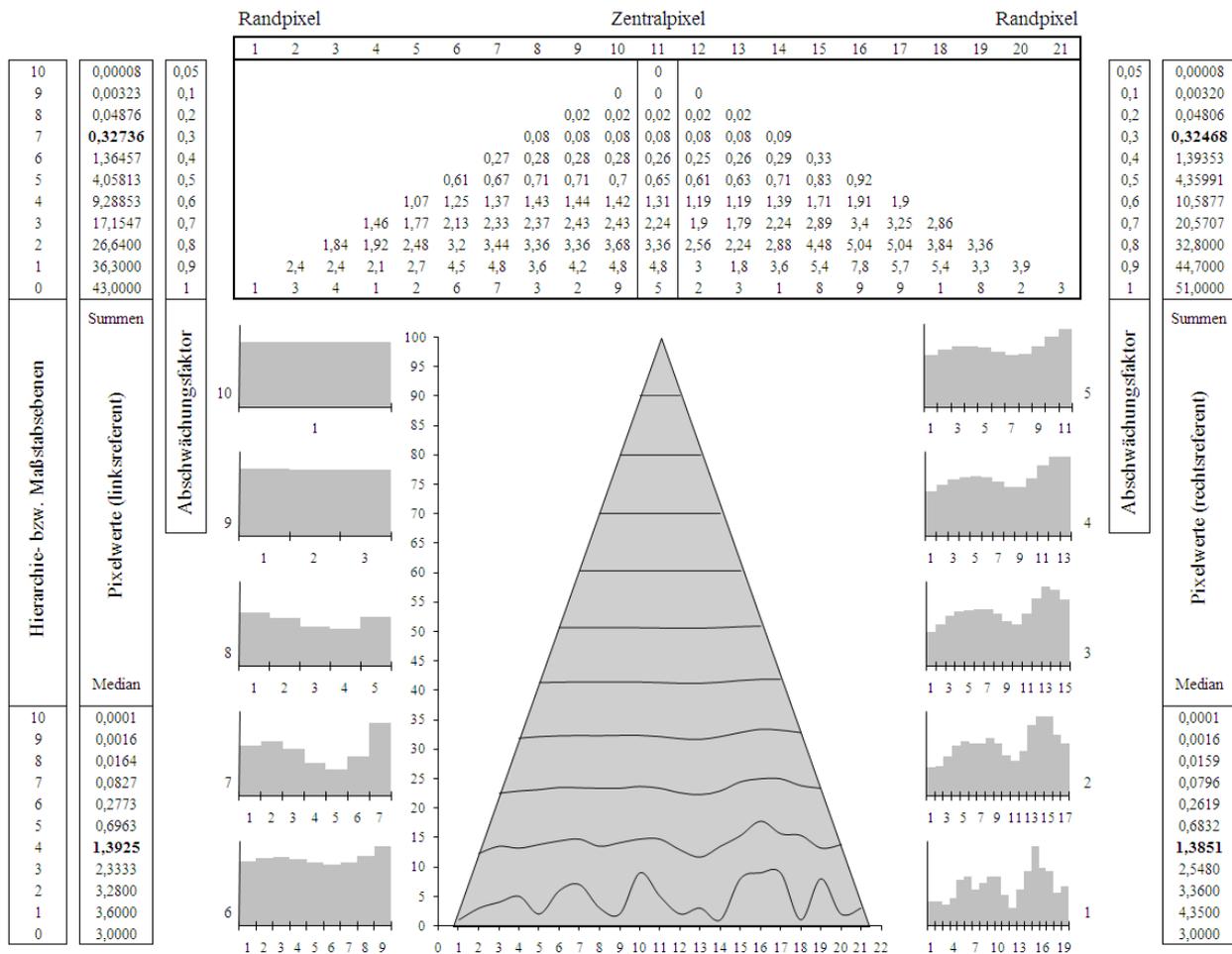


Abb. 5.23: Beispiel der zentralperspektivischen Aggregation (gleitende Mittelwertbildung). Bei einer Nivellierung des Datenrelief tritt je nach verwendeter Methode (Summe, Median etc.) in einem bestimmten Maßstabsbereich ein aggregierungsbedingter Werteumschlag (Reliefumkehr) ein.

Die Methode kann mit dem Lichtkegel eines Projektors verglichen werden, in den verschiedene vertikale Schnittebenen gelegt werden. Die zum Fokus hin liegenden Ebenen werden dabei jedoch nicht nur verkleinert, sondern gehen durch Mittelwertbildung der Pixel aus den „darunter“ liegenden Ebenen hervor.

Die Abbildung 5.24 zeigt die Überschneidungseffekte von Objekten (z.B. Kernbereichen). Die Objektgrößen bleiben hier jedoch erhalten. Die Schwerpunkte der Flächen werden zentralisiert. Es ergeben sich Überschneidungsbereiche mit neuem Inhalt.

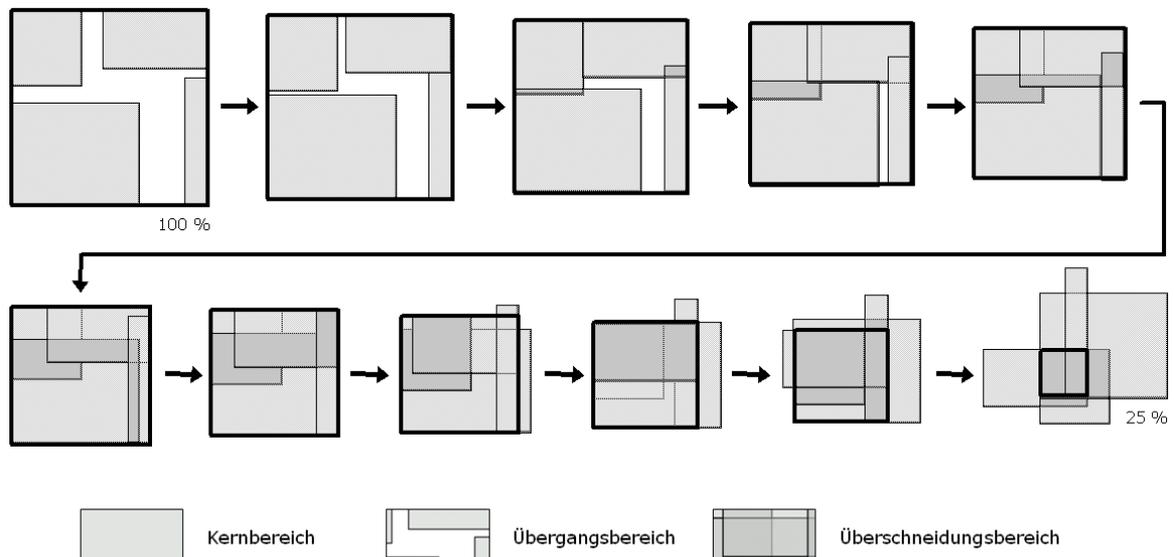


Abb. 5.24: Überschneidung als Ergebnis der zentralperspektivischen Aggregation von Kern- und Übergangsbereichen. Ein möglicherweise monokategorialer Übergangsbereich wird zum multikategorialen Überschneidungsbereich.

5.3.1.1.2 Clusteranalyse

Die Clusteranalyse und auch das im folgenden Abschnitt beschriebene Verfahren der Segmentierung basieren auf der Analyse der Ähnlichkeit. Ähnlichkeit bezeichnet die Tatsache, dass Sachverhalte in der Mehrheit bestimmter Eigenschaften und in bestimmter Hinsicht tendenziell identisch sind. Je größer die Menge der Eigenschaften, in denen die Sachverhalte identisch sind, im Verhältnis zur Menge der Eigenschaften, in denen sie sich voneinander unterscheiden, desto ähnlicher sind sich diese Sachverhalte. Die Analyse der Ähnlichkeit erfolgt über Distanzmaße. Die Clusteranalyse beinhaltet multivariate Verfahren der Datenanalyse für die Ermittlung von Gruppen (Cluster) zusammengehöriger Objekte aus einer Menge von numerisch beschriebenen Objekten. Die Objekte können Messwerte, Bildpunkte (Pixel) oder auch empirisch ermittelte Werte sein, in denen geordnete Ansammlungen oder Hierarchien gefunden werden müssen. Oft kann es vorkommen, dass die Objekte aufgrund mehrdeutiger Datenbefunde für keines der ermittelten Cluster typisch sind und mehreren Clustern zugeordnet werden können. Beim sog. Fuzzy-Clustering werden die Objekte mit einem bestimmten Zugehörigkeitsgrad auf Cluster verteilt. Im Spezialfall der Zugehörigkeit = 1 bzw. der Zugehörigkeit = 0 ist das Element einem Cluster vollständig bzw. überhaupt nicht zugehörig. Ein

5 Ergebnisse

geeignetes Programm für das unscharfe Clustern ist *FuzMe* (Version 3.5b)²⁷, das von MINASNY & MCBRATNEY (2002) vom Australian Centre for Precision Agriculture in Sydney entwickelt wurde. Es wird jedoch nicht der Fuzzy-c-Means-Algorithmus (FCM) genutzt, sondern der auf GUSTAFSON & KESSEL (1979) zurück gehende Fuzzy-k-Means-Algorithmus (FKM). Dieser besitzt nach HÖPPNER *et al.* (1996) bessere Anpassungseigenschaften der Distanzfunktion bei nicht kreisförmigen Clustern. BREGATO (2004) nutzt *FuzMe* für eine kontinuierliche Klassifikation und Interpolation. Das Programm *FuzMe* ist in dieser Arbeit testweise für das Clustern des Stapels der Zugehörigkeitsebenen verwendet worden.

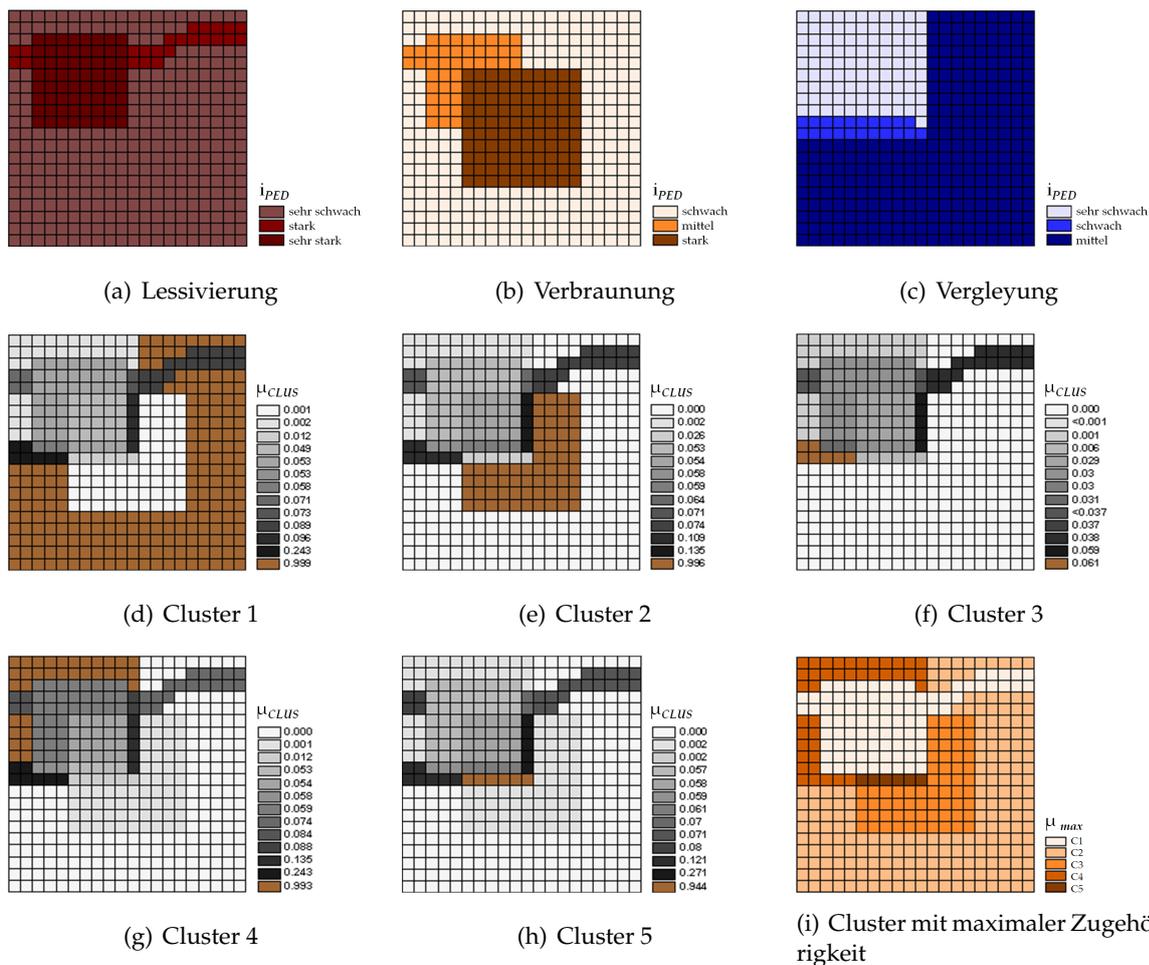


Abb. 5.25: Unscharfe Clusternung mit *FuzMe*. Die Clusternung der Zielkategorieebenen Lessivierung (a), Verbraunung (b) und Vergleyung (c) zu 5 Klassen ergeben die räumliche Repräsentation in den Abbildungen (d) bis (h). Abbildung (i) zeigt die Clusterbereiche mit den maximalen Zugehörigkeiten.

Beim Clustern mit diesem Programm erhielten die Pixelobjekte neben dem Zugehörigkeitswert für die Pedogenese eine eindeutige Identifikationsnummer, so dass diese wieder mit den Clusterzugehörigkeitswerten verknüpft werden konnten. Hier wird die Schwäche des Clus-

²⁷<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/fkme/program.html>

terns überhaupt deutlich, da nur nach inhaltlichen Kriterien zusammengefasst wird. FIEDLER *et al.* (1997) führen Ähnlichkeitsanalysen durch die Überlagerung unscharfer Vektoren durch und heben hervor, dass hinsichtlich des mathematischen Apparates die unscharfen Mengen gegenüber traditionellen statistischen Methoden wesentlich einfacher und hinsichtlich ihrer Ähnlichkeitsmaße und Gruppierungsprozeduren entscheidend plausibler und verständlicher für den Geowissenschaftler sind.

5.3.1.1.3 Segmentierung

Die Segmentierung ist ein Verfahren der Bildverarbeitung. Es werden inhaltlich zusammenhängende Regionen durch Zusammenfassung benachbarter Pixel oder Voxel entsprechend einem bestimmten Homogenitätskriterium erzeugt. Die Objekte innerhalb dieser Regionen besitzen eine inhaltliche, wertbezogene und räumliche, nachbarschaftliche Ähnlichkeit. MÖLLER (2008) leitet aus der Segmentierung sog. multi-skalare Objektstrukturen ab, die „räumlich-zeitliche Lückenschlüsse funktionaler Hierarchien“ erlauben.

Das in *eCognition* verwendete regionenbasierte Verfahren nutzt den sog. *Region-Growing-Algorithmus*. Nach NEUBERT (2006) werden zunächst Saatzellen (*seed pixel*) statistisch oder regelmäßig über das Bild verteilt. Ausgehend von diesen erfolgt ein Vergleich mit den Nachbarpixeln in alle Richtungen, der zur Verschmelzung oder Zurückweisung führt. Nicht zuzuordnende Pixel werden wiederum als Saatzelle verwendet. Sind alle Pixel zugeordnet ist die Segmentierung beendet. Bei der Verschmelzung von Segmenten ist das Vereinigungskriterium die Heterogenität. Ist der Anstieg dieser minimal erfolgt eine Verschmelzung. Wird ein gesetzter Schwellenwert, der *Scale*-Parameter, überschritten erfolgt der Abbruch. Der *Scale*-Parameter bestimmt also die Größe der Objekte. So ist es möglich eine maßstabsangepasste Segmentierung vorzunehmen, die dem Umstand gerecht wird, dass mit größer werden Segmenten (Flächen) die Bodenheterogenität zunimmt. Das Segmentierungsergebnis kann weiterhin durch die Parameter Farbe (*color*) und Form (*shape*), sowie Kompaktheit (*compactness*) und Segmentglätte (*smoothness*) beeinflusst werden (vgl. Abbildung 5.30). Die Optimierung der segmentierten Objekte hinsichtlich der Werteheterogenität bzw. -kontinuität (inhaltlich) und der räumlichen Heterogenität (Kontinuität) erfolgt dabei durch eine Analyse der Selbstähnlichkeit. Dieser Sachverhalt favorisiert die Segmentierung gegenüber der Clusteranalyse, da hier zusätzlich Raumcluster gebildet werden und so dieses Verfahren für eine Ausgrenzung von Bodenarealen eindeutig besser geeignet erscheint. Ein generelles Problem besteht jedoch darin, dass die Minimierungsprozedur (Min-Operator) hinsichtlich der Heterogenität, d. h. für Inhalt und Raum nicht gleichzeitig zu 100% lösbar ist. Ein höherer Schwellenwert an Wertekontinuität bedeutet gröbere Objekte, ein höherer Schwellenwert an Raum-(Form)heterogenität liefert hingegen komplexe Formen, während ein niedriger Schwellenwert an Raum-(Form)heterogenität kompakte Objekte zur Folge hat (BLASCHKE (2000)).

5 Ergebnisse

Segmentierungen wurden in dieser Arbeit an Bodenprofilfotos und an dem als synthetisches Bild aufgefassten Zielkategorienstapel vorgenommen. Die Auswertung der Bodenprofilfotos dient dabei einer objektivierten Horizontabgrenzung und der Bestimmung der Tiefenfunktion visuell in Erscheinung tretender Bodenmerkmale. Sie dient der Untersetzung einer tiefenbezogenen Aggregierung (vgl. Abbildung 5.20). Ziel ist es, auch die Segmentierung in einem sehr großen Maßstabbereich durchzuführen. Dazu wurden Fotosegmentierungen durchgeführt.

Fotosegmentierung

Verwendet werden Fotos unterschiedlicher Auflösung von Schürfgruben oder anderen Aufschlüssen. Nach einem nachträglichen Weißabgleich wird das Profil einerseits über die gesamte Bildlänge, sowie andererseits in einzelnen, ausgewählten Bildbereichen bildanalytisch untersucht. Es wird davon ausgegangen, dass dabei die Merkmale Humus, Kalk, Eisen und Bleichung als besonders farbsensitiv einzustufen sind.

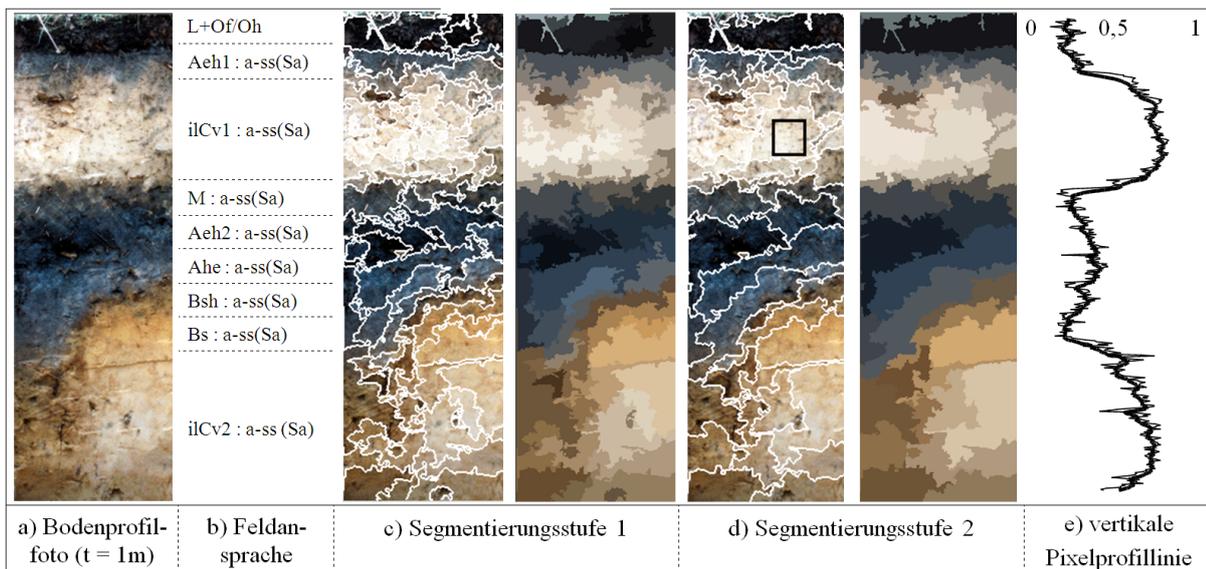


Abb. 5.26: Regionen- und trendorientierte Analyse eines Bodenprofilfotos, c) $sp = 60, s = 0,8, c = 0,2, sn = 0,9, cn = 0,1$, d) $sp = 75, s = 0,6, c = 0,4, sn = 0,9, cn = 0,1$; e) normiert und geglättet (fett); $sp =$ scale parameter, $c =$ color, $s =$ shape, $sn =$ smoothness, $cn =$ compactness.

Die regionenorientierte Bildanalyse (Segmentierung) weist Bereiche (Segmente) aus, wo unter Umständen eine weitere Horizontunterteilung, eine neue Horizontabgrenzung und differenziertere Probenahme vorzunehmen ist (vgl. Abbildung 5.26 d,e). Die Analyse der so gewonnenen Proben erlaubt dabei Korrelationsuntersuchungen zu den unter Merkmalen Humus, Kalk, Eisen und Bleichung, sowie zu den bodenkundlich gebräuchlichen MUNSELL-Codes (ALBRECHT *et al.*, 2004) und Farbmessungen am Profil. Die im Feld vorgenommenen Einstufungen und Analysenwerte können mit den Fotos abgeglichen werden. Die RGB-Werte-Verteilung in Abbildung 5.27 (Kennlinien) stellt einen „Fingerabdruck“ typischer Horizontbereiche bzw.

Segmente dar und erlaubt dabei die Übertragung der Horizontklassifikation auf andere Bilder mit Bereichen gleichen Kennlinienspektrums. Die Segmente werden mit ihren Kennlinienspektren in einer Datenbank vorgehalten und dienen so als Identifikationsmuster für die Horizonte.

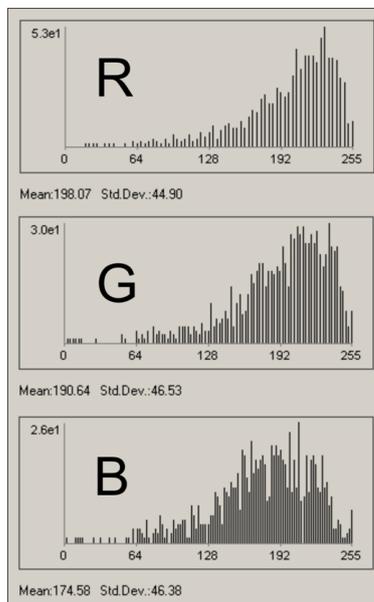


Abb. 5.27: RGB- Werteverteilung als „Fingerabdruck“ für Horizonte, Horizontbereiche oder Segmente (hier Rechteck aus Abbildung 5.26 d).

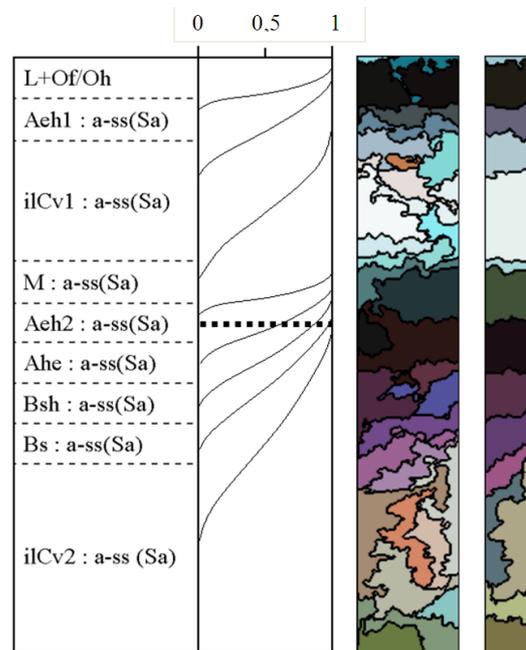


Abb. 5.28: Fuzzy-Profile (*links*: als Funktion von Tiefe und Klassifizierung; *Mitte*: als zweifach und *rechts*: als vierfach überlagerte und segmentierte vertikale Bildstreifen).

Bei der trendorientierten Bildanalyse wird das Bild in verschiedenen Streifen, die unterschiedliche Richtung haben können, geschnitten. Vom rechten Bildbereich wurde eine Linie mit der Software Pixel-Profil²⁸ 'abgenommen'. Der Verlauf der Pixel-Profillinie (vgl. Abbildung 5.26 e) charakterisiert den Farbverlauf entlang eines vertikalen Schnittes und markiert den Trend der tiefenbezogenen Farbentwicklung. Weiterhin ist zu klären, inwieweit beispielsweise die Tiefenfunktion von Kalk-, Humus- und Eisengehalt diesem Trend folgt. Dargestellt sind die summierten Werte des Rot-Anteils (R) und der Helligkeit (H). Sie dienen unter anderem auch der Ableitung von Fuzzy-Profilen (AMESKAMP, 1997; AMESKAMP & LAMP, 1998). Diese Profile berücksichtigen die kontinuierlichen Merkmalsübergänge durch die Definition von Zugehörigkeitsgraden der jeweils hangenden bzw. liegenden Horizonte, u. a. bei unterschiedlichen Tiefen bzw. Mächtigkeiten (vgl. Abbildung 5.28 (links)). Die gestrichelte Linie symbolisiert die Mehrfachzugehörigkeiten von Horizonten in einer bestimmten Tiefe. Die Abbildungen 5.28 (Mitte) und (rechts) zeigen das Ergebnis einer vertikalen Teilung des Originalbildes aus Abbildung 5.26 in zwei und vier gleichbreite Streifen, deren Überlagerung und Segmentierung. Ziel der so erzeugten synthetischen Profile ist dabei eine quasi gemittelte Grenzfindung der Hori-

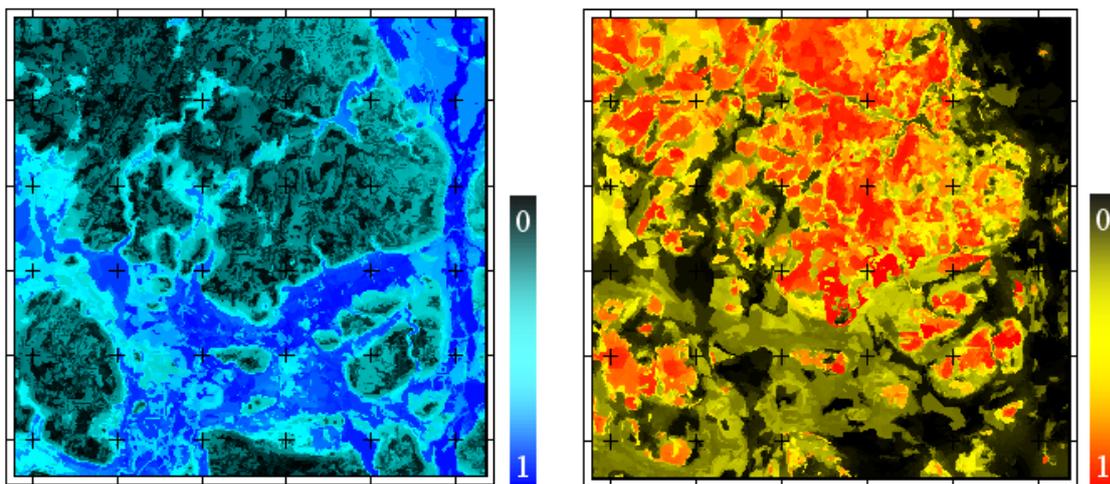
²⁸<http://www.efg2.com/Lab/ImageProcessing/PixelProfile.htm>

5 Ergebnisse

zonte. Im Fortgang der Arbeiten wird versucht, diese Methode auch über mehrere Bilder zur weiteren flächenmäßigen Charakterisierung von Bodeneinheiten heranzuziehen.

Kartensegmentierung

Die Ebenen der Zielkategorien mit den Zugehörigkeiten werden als synthetische Bilder in die Software *eCognition* eingeladen und entsprechend der aufgestellten Rangfolge (1. Wassereinfluss, 2. Bindigkeit, 3. Humosität, 4. Kalkigkeit, 5. terrestrische Pedogenesen) gewichtet. Dabei erhält der Wassereinfluss den höchsten Wichtungsfaktor. Die terrestrischen Pedogenesen werden gleichrangig gering gewichtet. Als Ergebnis liegt nun ein Bild vor, das in jedem Pixel eine Bodenform beinhaltet.



(a) Zielkategorie Wassereinfluss; (Dunkelblau: hoch, Hellblau: mittel, Schwarz: kein)

(b) Zielkategorie Bindigkeit; (Rot: hoch, Gelb: mittel, Schwarz: keine)

Abb. 5.29: Ergebnis (normiert) der zielkategorienbezogenen, additiven Vereinigung der bewerteten Ebenen (vgl. Karten IW13 und IW14 im Anhang).

An dieser Stelle wird an die in Abschnitt 3.2.3 (S. 40) gemachten Aussagen angeknüpft. Die Abbildung 5.29 zeigt die hierarchisch relativ hoch angesiedelten Zielkategorien 'Wassereinfluss' (Grundwassereinfluss, Stauwassereinfluss) und 'Bindigkeit' (Sand, Lehm, Schluff, Ton). Die Entscheidung über die zu erwartende Bodenform erfolgt dabei kontextbezogen durch den Experten, z. B.: hoher Wassereinfluss + geringe Bindigkeit = *Gley aus Sand*; hoher Wassereinfluss + hohe Bindigkeit = *Pseudogley aus Ton* etc..

Ein großer Vorteil der Software *eCognition* ist, dass diese vom Experten aufgestellten Regeln in die durch die Wahl der entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen definierbaren Klassen münden. Der Segmentierungsalgorithmus wird nach der Festlegung der Klassendefinitionen (vgl. Abbildung 5.32) gestartet. Damit wird der Rahmen für die inhaltliche Aggregation vorgegeben. Mögliche Parametereinstellungen für die Segmente eines Detailausschnittes, die den räumlichen Rahmen bestimmen, zeigen die folgenden Abbildungen.

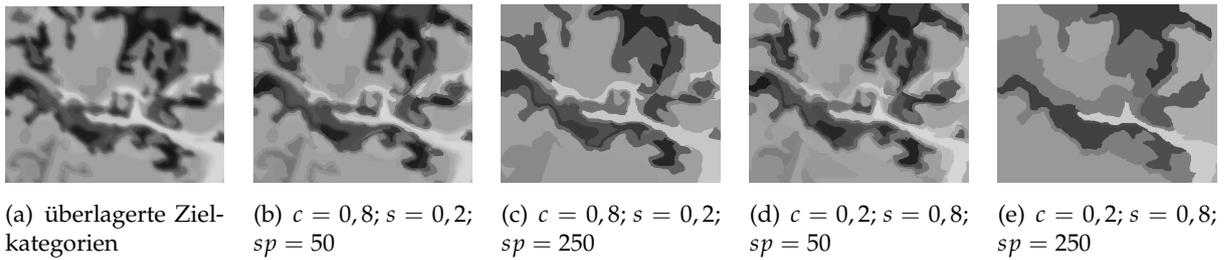
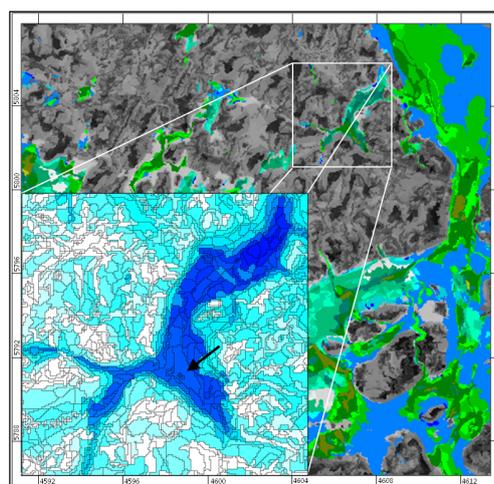


Abb. 5.30: Segmentierungsergebnisse unter Verwendung verschiedener Parametereinstellungen in *eCognition* für einen 2,5 x 1,5 km großen Ausschnitt im Nordosten des Blattes Königs Wusterhausen (vgl. Abbildung 4.7, S.81); sp = scale parameter, c = color, s = shape

Mit der Segmentierung liegt für jedes Segment ein Datensatz vor, der die ebenenbezogenen Ergebniswichtungswerte (Tabelle neben der Abbildung 5.31), die Zugehörigkeitswerte der Zielkategorien (Tabelle 5.17), sowie die Zugehörigkeitsgrade der Zielklassen (Tabelle 5.18) beinhaltet. Der Unterschied zwischen Zielkategorie und Zielklasse wurde bereits in Abschnitt 3.2.2.1.1 erläutert.



Ebenen-Nr.	Ebene	ω
1	BB_[GK-BSK]_F_0_25	0,00
2	BIND_[GK]_F_15_25	35,62
3	BIND_[GK]_F_25_25	80,64
4	BIND_[GK]_T1_15	0,00
5	BIND_[GK]_T1_25	0,00
6	BIND_[GK]_T1_35	0,00
7	BIND_[GK]_T1_45	0,00
8	BIND_[GK-BSK]_F_0_25	0,06
9	BIND_[MMK]_F_0_100	5,00
10	BIND_[GK]_FT1_15	0,92
11	BIND_[GK]_F_0_300	0,00
12	GG_[GK-BSK]_F_0_25	188,62
13	GG_[HYK]_F_0_50	50,00
14	HA_[GK-BSK]_F_0_25	0,00
15	HH_[GK]_T1_15_25	83,86
16	HH_[GK-BSK]_F_0_25	163,24
17	HH_[Moor]_F_MA	0,00
18	HH_[MoorMae]_F_MA	0,00
19	HT_[GK-BSK]_F_0_25	0,00
20	Ka_[GK-BSK]_T1_15_25	3,21
21	Ka_[GK-BSK]_F_0_25	0,00
22	LF_[GK-BSK]_F_0_25	0,00
23	GG_[BFI]_G_0_25	88,25
24	GG_[GMK]_G_0_25	75,61
25	rGG_[GK-BSK]_F_0_25	0,00
26	SS_[GK-BSK]_F_0_25	0,00
27	YY_[TK]_F_0_25	0,00
28	HT_[GMK]_G_0_25	24,77

Abb. 5.31: Ausschnittsvergrößerung des segmentierten Ebenenstapels der Landschaftseinheit *Niederung*. In der nebenstehenden Tabelle sind die ebenenbezogenen Ergebniswichtungswerte ω für das durch den Pfeil markierte Segment (ID-Nr.: 27238) angegeben. Die Tabellen 5.17 und 5.18 gelten ebenfalls für dieses Segment. Namensgebung, Herkunft, Ausgangswichtung und Bedeutung der Ebenen sind in den Tabellen A.1, A.2 und A.6 im Anhang erläutert.

5.3.1.1.4 Klassifizierung

Die Klassifizierung der mit dem Pixelstapel vorliegenden Bodenformen dient der Legendenbildung. Die Legendeneinheiten stellen die Zielklassen dar. Diese werden durch die Zugehörigkeitsfunktionen der Zielkategorien,

5 Ergebnisse

Tab. 5.17: Intensitätswerte i_{ZK} (Merkmalsausprägungen) der Zielkategorien (nicht normiert) für das in Abbildung 5.31 markierte Segment. Diese Werte bilden die Abszissenwerte der Abbildung 5.32 (S. 148). Die Gesamtheit der Zielkategorien einschließlich der Abkürzungen ist in Tabelle 5.2 (S. 108) dargestellt.

Zielkategorie	i_{ZK}
Wassereinfluss (Wa)	2287,88
Bindigkeit (BIND)	323,48
Hydrogener Humus (HH)	1734,13
Terrigener Humus (HT)	247,71
Kalkigkeit (Ka)	16,04
Podsolierung (PP)	0,00
Verbraunung (BB)	0,00
Versiegelung (YY)	0,00

die durch den UND(min)-Operator verknüpft werden, beschrieben (Abbildung 5.32). Sie bilden Bodengesellschaften ab. Die Fuzzy-Logik ermöglicht dabei die gleichzeitige Zuordnung zu mehreren Klassen (vgl. auch Tabelle 5.18). Dem Objekt mit dem höchsten Erfülltheitsgrad der definierten Regel wird die entsprechende Klasse durch den ODER(max)-Operator zugewiesen. Die Definition der Zugehörigkeitsfunktionen in *eCognition* erfolgt über eine stützpunktbasierte Modifizierung vorgegebener Typen für die Wertebereiche der Pixel und deren Zugehörigkeiten. Das Dialogfenster ist auf S. 119 dargestellt. Die Funktionen wurden empirisch bestimmt.

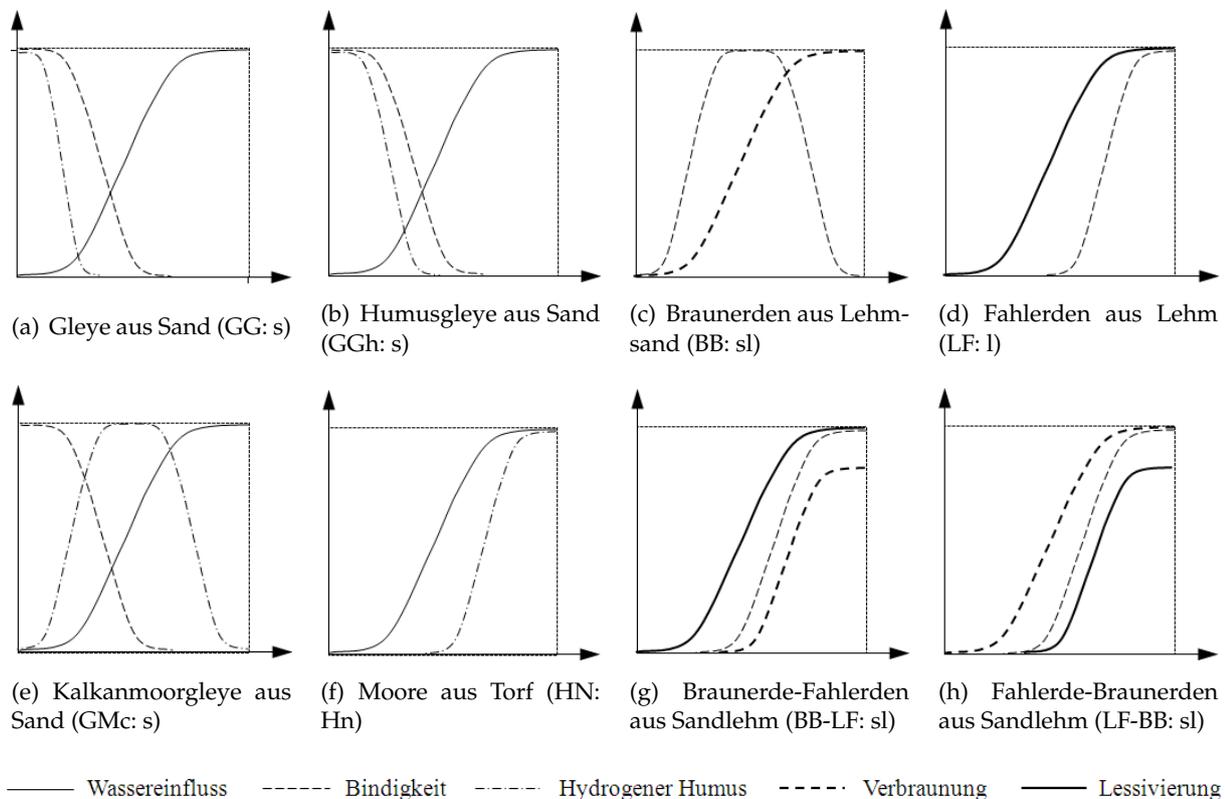


Abb. 5.32: Zielklassen und deren Zugehörigkeitsfunktionen. Die Ordinate trägt die Zugehörigkeitsgrade zur Zielklasse, die Abszisse die normierten Werte der gewichteten Überlagerung der Zielkategorien.

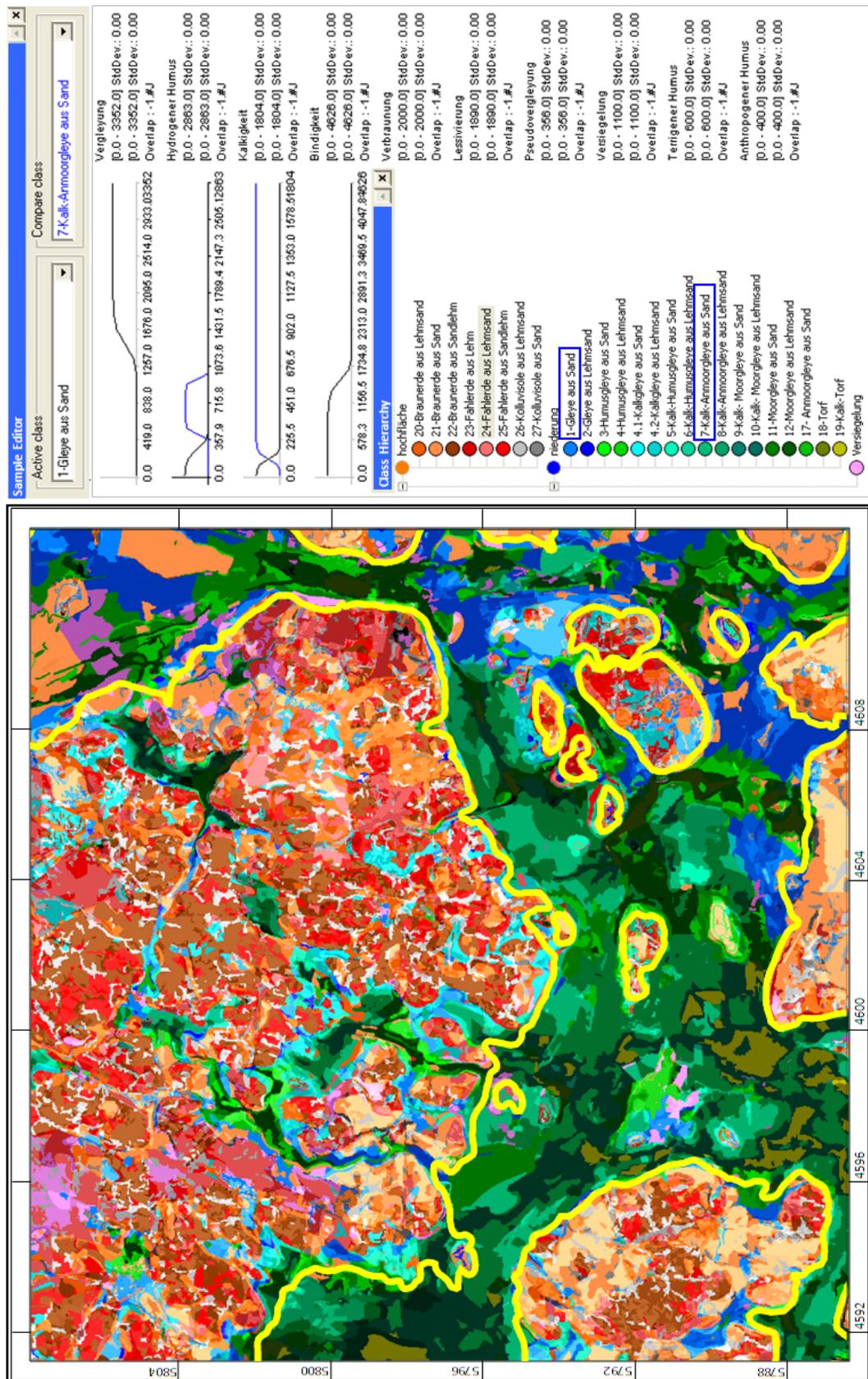


Abb. 5.33: Klassifiziertes synthetisches Bild der Konzeptbodenkarte als Hauptergebnis mit einem Layer manuell abgegrenzter Hochflächen und Niederungen (Gelbe Linie); Rechts: Teil des GUI von eCognition

5 Ergebnisse

Für die Definition der Zugehörigkeitsfunktionen der Zielklassen ist es vorteilhaft die Wertebereiche zu normieren und für diese Bereiche Funktionsverläufe zu wählen, wie sie in Abbildung 5.32 dargestellt sind. Die Normierung als eine Art der Datentransformation ist im Abschnitt 3.2.2.1 (S.34) erläutert worden.

Die segmentbasierte Klassifizierung des Blattes KW als Ergebnis der gewichteten Ebenenvereinigung (Abbildung 5.31), der Parametereinstellungen (Abbildung 5.30) und der Definition der Zugehörigkeitsfunktionen (Abbildung 5.32) für die Zielklassen (Legendeneinheiten) zeigt die Abbildung 5.33.

Das Prinzip der Abstufung durchzieht konsequent den Methodenablauf. Auch im letzten Schritt wird es für die Ordnung der Blattlegendeneinheiten herangezogen. Abbildung 5.34 verdeutlicht eine mögliche Präferenzordnung (vgl. auch Abschnitt 3.2.3, S. 39) der Legendeneinheiten der Bodenkarte. Dabei werden die Zielkategorien in eine vom Experten aufgestellte Rangfolge gebracht (vgl. Abschnitt 3.2.2.1, S. 106). Diese Rangfolge spiegelt den Einfluss der Zielkategorien auf die konkrete Legendenklasse dar. Die Zielkategorien werden hier durch trianguläre Zugehörigkeitsfunktionen dargestellt. Das stellt einen Idealfall dar. Er verdeutlicht den Anstieg der Zugehörigkeitswerte einer Zielkategorie bis zu einem Maximum, das den Kerninhalt der konkreten Legendenklasse bildet. Mit steigenden Legendenklassen nimmt der Einfluss wieder ab, während andere Zielkategorien hinzukommen und an Einfluss gewinnen.

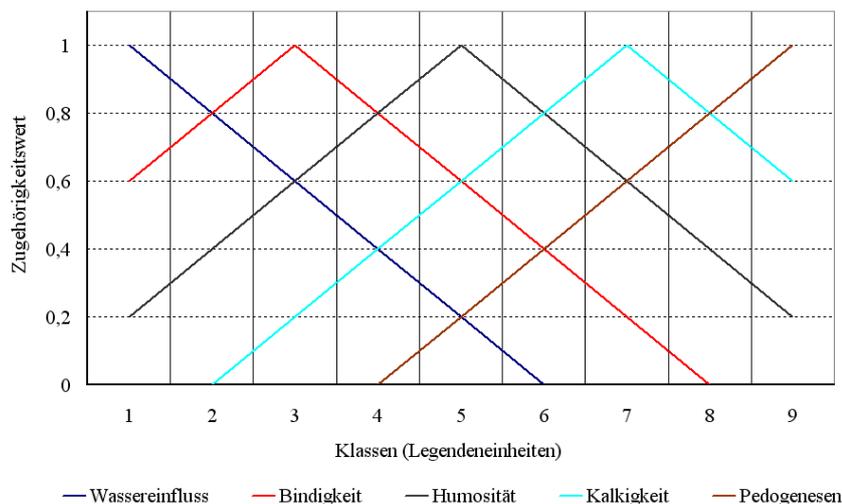


Abb. 5.34: Triangulär fuzzifizierte Präferenzordnung der Legende einer Bodenkarte (idealisiert).

Diese Art der Präferenzordnung folgt dem Prinzip des graduell-kaskadierten Einflusses der Zugehörigkeitsfunktionen der Zielkategorien auf die Zielklasse (vgl. Abbildung 5.18, S. 133). Die Legendeneinheiten als Ergebnis der Klassifizierung (Zielklassen) werden einem Rang zugeordnet. In dieser Reihenfolge erscheinen die Legendeneinheiten auf der Karte. Die Klasse 'Moorgleye aus Sand', aufgeführt in der folgenden Tabelle, bildet demnach die Legendeneinheit Nr. 10.

Tab. 5.18: Klassenzugehörigkeitswerte (μ_{ZC}) des durch den Pfeil markierten Segmentes aus Abbildung 5.31

Zielklasse	μ_{ZC}	Legendenrang
Gleye aus Kalklehmsand	0,00	1
Gleye aus Lehmsand	0,00	2
Gleye aus Kalksand	0,00	3
Gleye aus Sand	0,00	4
Niedermoore aus Kalktorf	0,01	5
Niedermoore aus Torf	0,62	6
Moorgleye aus Kalklehmsand	0,00	7
Moorgleye aus Lehmsand	0,00	8
Moorgleye aus Kalksand	0,01	9
Moorgleye aus Sand	0,93	10
Anmoorgleye aus Kacklehm	0,00	11
Anmoorgleye aus Kalksand	0,00	12
Anmoorgleye aus Sand	0,00	13
Humusgleye aus Kalklehmsand	0,00	14
Humusgleye aus Lehmsand	0,00	15
Humusgleye aus Kalksand	0,00	16
Humusgleye aus Sand	0,00	17
Fahlerde aus Lehm	0,00	18
Fahlerde aus Sandlehm	0,00	19
Braunerde aus Sandlehm	0,00	20
Kolluvisole aus Lehmsand	0,00	21
Fahlerde aus Lehmsand	0,00	22
Braunerde aus Lehmsand	0,00	23
Kolluvisole aus Sand	0,00	24
Braunerde aus Sand	0,00	25

5.3.1.2 Ausweisung der Kern- und Übergangsbereiche *Schritt 11 (und 12)*

Wie in dieser Arbeit gezeigt, können die vereinigten Datenebenen als Datenrelief aufgefasst werden, so dass vom Prinzip her Verfahren, wie sie für die Geomorphographische Karte verwendet werden, so modifiziert werden könnten, dass die Kernbereiche durch die Scheitellbereiche und die Übergangsbereiche durch die intermediären Bereiche ausgewiesen werden. Dieser Ansatz konnte in dieser Arbeit nur hergeleitet, nicht aber praktisch umgesetzt werden. Er bietet jedoch weiteres Untersuchungspotenzial.

Kern- und Übergangsbereiche werden in dieser Arbeit durch die Zugehörigkeitswerte der Segmente zu den Klassen definiert. Hohe Werte kennzeichnen dabei die Kernbereiche, mittlere die Übergangsbereiche. Die Schwellenwerte können dabei, wie in dieser Arbeit, gesetzt oder aber entsprechend der in der Abbildung 3.17 (S. 43) erläuterten Methode ermittelt werden.

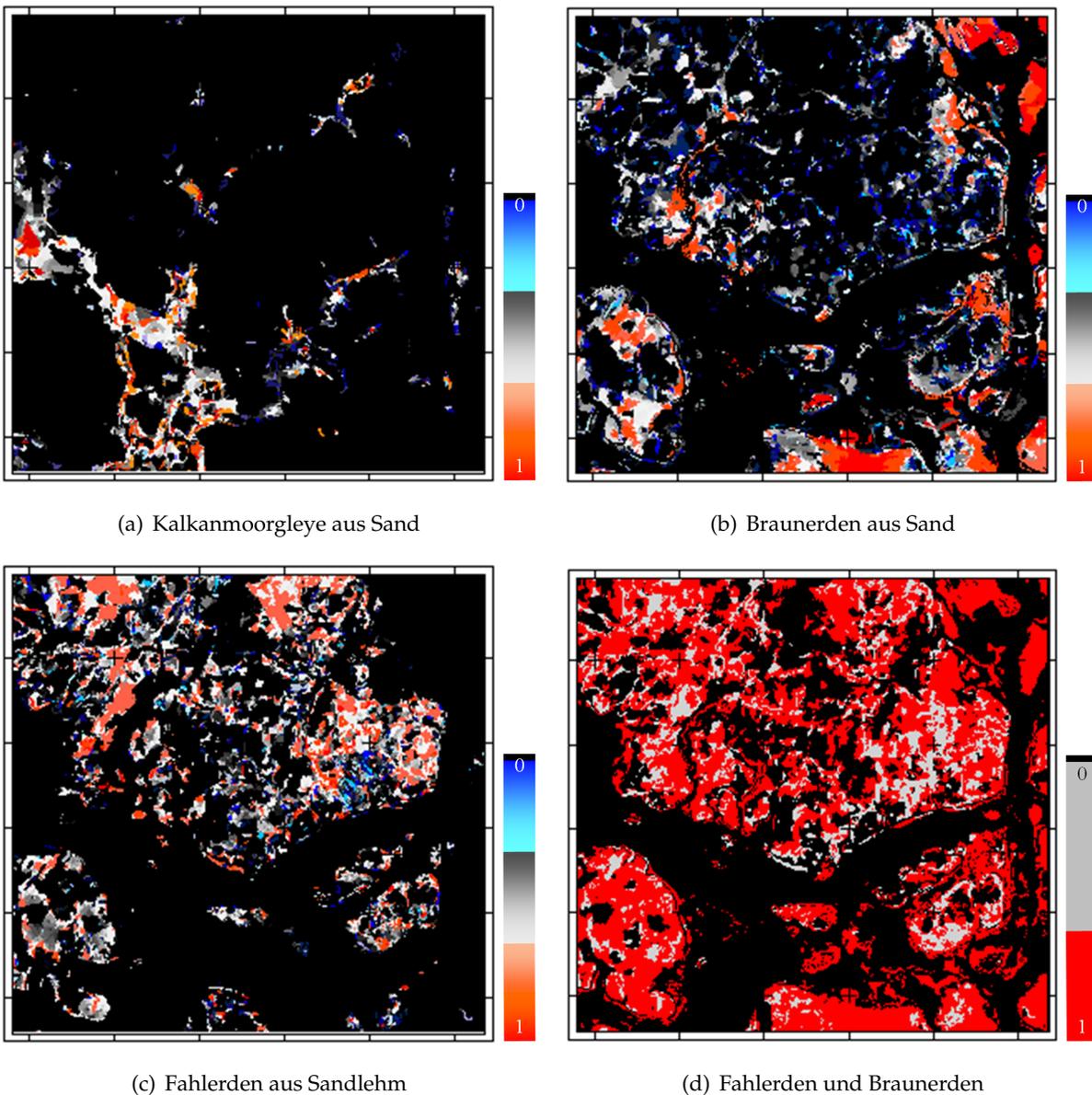


Abb. 5.35: Ausgewählte Kern- und Übergangsbereiche des Blattes KW. Die Kernbereiche werden durch hohe Zugehörigkeitsgrade (rot) gebildet, die Übergangsbereiche besitzen mittlere Zugehörigkeitswerte (grau). Die blauen Areale besitzen nur marginalen Einfluss auf die Bildung der jeweiligen Zielklasse (vgl. Karten IW16 bis IW19 im Anhang).

In gleicher Weise kann die Klassifizierung von Karten der Aussagesicherheit, in der ebenfalls in jedem Pixel eine Aussage zur Datendichte und -qualität fixiert ist, erfolgen. Um eine arealbezogene Aussage zu erhalten, wird das Bild segmentiert. Die Stufen der Segmentierungsschritte (Parametereinstellungen) können dabei adaptiv verschiedene Maßstäbe bedienen.

5.3.2 Validierung

5.3.2.1 Überprüfung des Ergebnisses mit Geländebefunden *Schritt 13*

Die Validierung wird als finaler Prozess der Kartenerstellung betrachtet. Als Ergebnis weist sie die inhaltlich-räumliche Aussagesicherheit aus. Im Hinblick auf die Validierung des Kartenergebnisses, der Quantifizierung der Übergänge und der Charakterisierung der Bodenvariabilität wurde ein ca. 2 km langes Transekt angelegt, das von der Glienicker Platte über die Niederung der Rangsdorf-Thyrower-Abflussbahn bis zum Lindenberg reichte (vgl. Abbildung 2.1, S.9). KOFALK (1998) führte Transektuntersuchungen in unterschiedlichen Skalenbereichen auf einem Grundmoränenstandort durch und kam u. a. zu dem Ergebnis, dass Probenanzahl, Probenahmedistanz und Transektlänge großen Einfluss auf die Erfassung der Variabilität der Landschaft haben.

Der Abstand der Sondierungspunkte für das in dieser Arbeit verwendete Transekt betrug 25 m. Dabei wurden vorwiegend qualitative Daten entsprechend des Kurzaufnahmeformulars des Dezernates Bodengeologie des LBGR erhoben. Beschrieben wurden mindestens die Horizonte und Substrate, der Humusgehalt und der Kalkgehalt in den Stufen der KA5 (S. 112 und 169), sowie der Grundwasserstand. Lokal wurden Proben entnommen, um die Humus- und Kalkansprachen durch Analysenwerte abzusichern.

Zur Validierung wurden die Klassifizierungsergebnisse der Segmentierung, die ohne Einbeziehung der Geländeerhebungen erfolgte, an Hand der Transektdaten überprüft. Die Abbildung 5.36 zeigt ausgewählte Zielklassen und deren Zugehörigkeitswerte. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den ausgewählten Segmentierungsklassen und den Bodenformen der Geländeerhebung. Diese Übereinstimmung ist jedoch auch dem relativ groben Klassenniveau zuzuschreiben, so dass durch weitere Unterteilungen der Klassen differenziertere Zusammenhänge erfasst werden können. Die Abbildung 5.36 (S. 155) wird folgend von unten nach oben erläutert.

In Abbildung 5.36 (f) sind die Transektpunkte (Darstellung idealisiert) mit den Bodenformen und den korrespondierenden Flächendaten der Bodenschätzung (untere Ebene) und der Geologischen Karte dargestellt. Die Abbildung (e) zeigt die quantifizierten Bindigkeiten von Flächeneinheiten (*Grün*: Bodenschätzung, *Blau*: Geologie), Sondierungspunkten (*Rot*: gepunktet) und deren additiver Überlagerung (*Schwarz*). Die Schichtung wurde nicht berücksichtigt. Es wird sowohl der Trend der Werte mit relativ großen Amplituden in den Übergangszonen (Punkt 5 bis 17 und 41 bis 56) als auch die relative Wertekonstanz in der Kernbereichen (Punkt 18 bis 22 und 24 bis 40) dieser Zielkategorie deutlich. Im Zuge weiterer Untersuchungen wäre es wünschenswert den Ansatz von KOFALK (1998) dahingehend aufzugreifen, dass Untersuchungen besonders in den Zonen durchgeführt werden in denen sich aus der Datenlage oder 'augenscheinlich' eine Tendenzveränderung ergibt.

5 Ergebnisse

Den Punktdaten wurden die Ergebnisse der Segmentierung gegenübergestellt. Die Transektpunkte wurden mit den Segmentzugehörigkeiten für jede Klasse verknüpft. Bei den Abbildungen 5.36 (a) bis (c) handelt sich um folgende Klassen: (a): Braunerden aus Lehmsand, (b) Kalkhumusgleye aus Sand, (c) Kalkanmoorgleye aus Sand. Auf den Ordinaten sind die Zugehörigkeitswerte (0-1) aufgetragen. Die Abbildung d) zeigt die gewichtete und additive Überlagerung (nicht normiert) der aus den bewerteten Flächendaten abgeleiteten Zielkategorieebenen im Bereich des Transektes. (Dunkelblau: *Vergleyung*, Hellblau: *Kalkigkeit*, Grün: *Hydrogener Humus*, Rot: *Bindigkeit*; Rotbraun: *Lessivierung*; Braun: *Verbraunung*; Schwarz: *Terrigener Humus*). Die Daten wurden nicht normiert um die Differenz zwischen den Zielkategorien zu erhalten, die u. U. bei einer intrakategorialen Normierung so verringert werden würde, dass eine Klassentrennung erschwert werden könnte.

Die Gegenüberstellung zeigt eine gute Übereinstimmung der Segment- mit den Punktdaten. Die ausgewählten Klassen sind im Bereich des Transektes mit Zugehörigkeiten von $\mu > 0.6$ vertreten. Der Grund ist darin zu sehen, dass zum Einen das Klassenniveau relativ grob gewählt wurde und zum Anderen der Transektbereich als eine Art *Locus typicus* für die Klassen aufgefasst werden kann.

Es tritt hier auch die erwähnte Problematik bei Klassifizierungen in Erscheinung. Die 'Einbrüche' der Werte im Transektbereich 22 bis 23 und 40 bis 41 werden nivelliert. Empfehlenswert wäre hier eine an Hand von Sondierungspunkten zu optimierende Segmentierung von Flächendaten.

5 Ergebnisse

Die Gegenüberstellung der Punkt- und Flächendaten (vgl. Abbildung 5.36 (e)) für das Transekt ist Ausdruck der bereits erwähnten Aufmodulation einer „feinen“ Funktion (Punktdaten) auf eine „gröbere“ (Flächendaten)-Funktion. Das Prinzip wird deshalb so verfolgt, um bei Maßstabstransformationen zu erreichen, dass die Grenzen jeder Informationsebene zur Grenzziehung der betreffenden Maßstabsstufe beitragen.

Die folgende Abbildung 5.37 visualisiert die Übereinstimmung/Nichtübereinstimmung von auf gleichem Niveau abgefragten Punktbodenformen und Segmentklassen. Sie zeigt das Problem der Über- bzw. Unterklassifizierungen. Punkte ohne entsprechende Segmente, weisen auf eine Unterklassifizierung hin. Eine analoge Aussage ist jedoch auf Überklassifizierungen nicht übertragbar, da es auch sein kann, dass kein Bodenprofil im betreffenden Segment aufgenommen wurde.

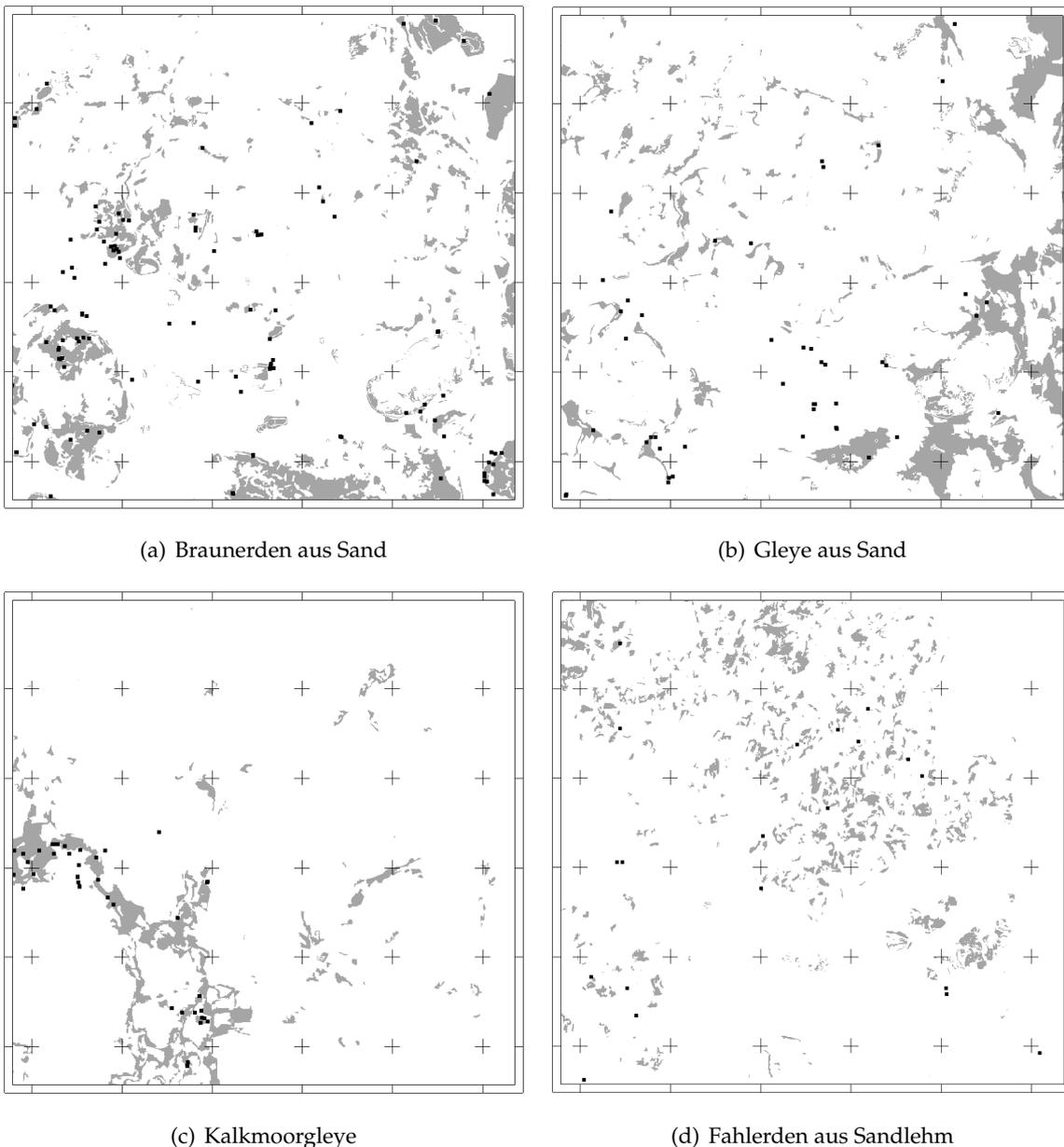


Abb. 5.37: Validierung der Punktbodenformen (schwarze Quadrate) mit den Segmentklassen (grau)

Eine weitere Überprüfungsmöglichkeit besteht in einem Vergleich zu konventionell erstellten Karten, z. B. der Bodengeologischen Karte 1 : 50 000 (Blatt Potsdam). Datengrundlagen sind hier vorwiegend das Geologische Messtischblatt, Bodenschätzungskarten und Karten der Forstlichen Standortkartierung. Die Einheiten sind scharf abgegrenzt, die Inhalte über Bodenformeninventare beschrieben. Des Weiteren kann mit einem Vergleich von Karten unterschiedlicher Nomenklaturen und Maßstäbe auch die Güte der Flächenabgrenzungen untersucht werden. Hierfür bieten sich besonders geologische Karten, wie das Geologische Messtischblatt 1 : 25 000 (Blatt 3746, Zossen), die Geologische Übersichtskarte von Brandenburg 1 : 50 000 (Blatt 0908-2, Zossen) und die Geologische Übersichtskarte 1 : 100 000 (Blatt Teltow-Fläming) an, da diese i. d. R. monotypisch beschrieben werden und eine Prüfung einfacher gestalten. Ziel ist dabei die Quantifizierung der informellen und maßstäblichen Unschärfe. Die Legendeneinheiten werden dabei über ein einheitliches, hierarchisches Schlüsselssystem codiert.

5.3.2.2 Aussagesicherheit *Schritt 14*

Die raumbezogene Angabe von Datenqualitäten besitzt einen ebenso hohen Status wie die Fachinformation selbst. Das muss bei nach geschalteten Auswertungen, besonders auch bei bodenschutzrelevanten Fragestellungen, berücksichtigt werden. Somit ergibt sich die Notwendigkeit, das künftig jeder raumbezogenen Darstellung von Geoinformationen eine raumbezogene Darstellung der Aussagesicherheiten beigefügt wird. Das Konzept der Kern- und Übergangsbereiche impliziert die Beurteilung der Aussagesicherheit. So weisen die hohen Zugehörigkeitsgrade der Kernbereiche eine hohe Aussagesicherheit, die geringen Zugehörigkeitsgrade der Übergangsbereiche eine geringere Aussagesicherheit aus. Ggf. kann es aber notwendig sein, nicht nur die Gesamtaussagesicherheit einzuschätzen, sondern eine Beurteilung auf Grundlage der prinzipiell validesten Daten, den Punktdaten, vorzunehmen. Ein Beispiel dafür zeigt die folgende Abbildung.

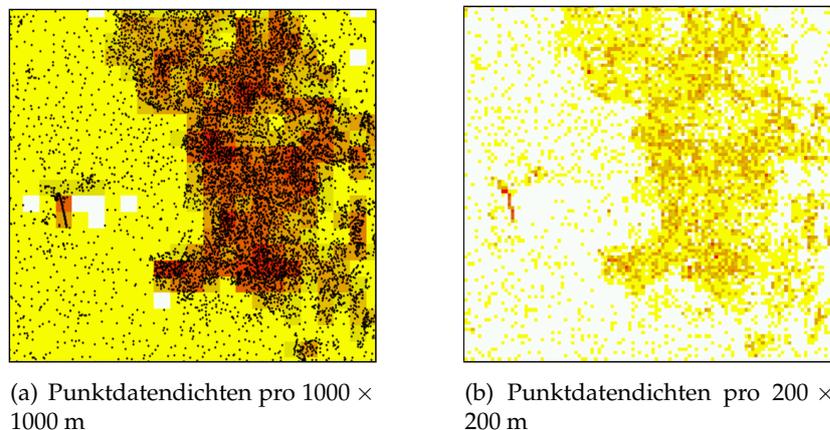


Abb. 5.38: Karten der Aussagesicherheiten in unterschiedlichen Rasterweiten (weiß: keine Punktinformationen im Rasterquadrat, gelb: wenige und rot: viele; Blatt Königs Wusterhausen)

5 Ergebnisse

Die Abbildung 5.39 zeigt ein Beispiel für die Ausweisung von Arealen unterschiedlicher Aussagesicherheit in unterschiedlichen Maßstäben mit der Software *eCognition*. Dabei erfolgt mit kleiner werdendem Maßstab eine Zusammenfassung inhaltlich und räumlich ähnlicher Aussagesicherheiten. Für die Segmentierung wurde das bereits in Abbildung 3.27 (c) gezeigte Bild verwendet, hier jedoch im Hinblick auf die Aussagesicherheiten.

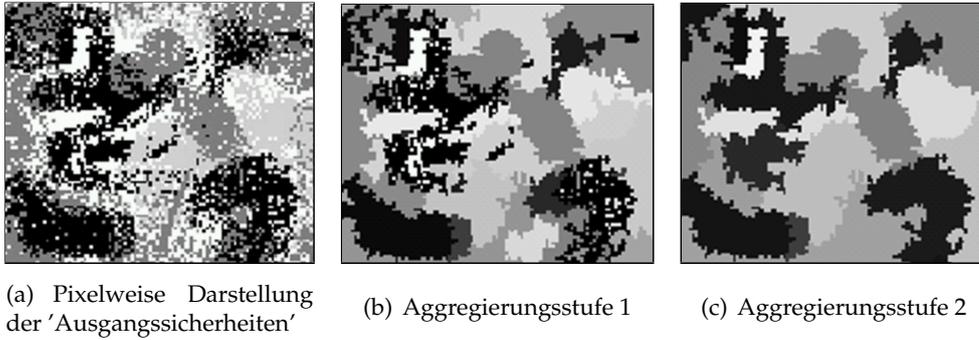


Abb. 5.39: Beispiel für die Aggregierung des synthetischen Bildes der Aussagesicherheit

6 Diskussion

Die Arbeit versucht auf den Zusammenhang und die Behandlung von inhaltlicher und räumlicher Unschärfe bei der Kartenerstellung zu fokussieren. Besondere Beachtung fanden die räumlichen Übergänge, deren Behandlung in den Ausgangsdaten durch die Verfahren der *Verpunktung*, der *Interpolation* und des *Pufferns* erläutert wurden. Es bleibt zu klären, ob die Erfassung der Übergänge natürlicher Böden in anderen Maßstabsbereichen beispielsweise durch Veränderung der Rasterweite und anschließende Interpolation erfolgen könnte. Denkbar ist es auch, unregelmäßige Raster oder Puffer beispielsweise in Abhängigkeit zu den Nachbar-einheiten und unter Berücksichtigung von Übergangstypen zu verwenden. Es konnte gezeigt werden, dass die vereinigten Datenebenen als Datenrelief aufgefasst werden können. Das bietet die Möglichkeit verschiedene Reliefauswertungsverfahren, wie sie originär für die Analyse der Landschaftsoberfläche genutzt werden, anzuwenden. Die Berechnung der Neigung liefert zum Beispiel die Grundlage für die Ausgrenzung von Kern- und Übergangsbereichen. Denkbar ist die Anwendung solcher Verfahren auch für Simulationen des Stoffflusses, der fast immer durch Gradienten beeinflusst wird.

Aus Gründen der einfachen Generierbarkeit einer glatten Oberfläche und des Oberflächenverlaufs durch die Datenpunkte wurde die *Inverse Distanz Wichtung* als Interpolationsmethode favorisiert. BARTELS (1997) entwickelte mit FUZZEKS²⁹ ein Fuzzy-Auswertungs- und Kriging-system, das die Einbeziehung unsicherer Informationen erlaubt. Durch das bereits erwähnte, künstlich erzeugte Punktraster wird hier eine relativ gleichmäßige Punkteverteilung erreicht, wodurch die Kriging-Varianz minimiert und eine gute Qualität der Variogramme erreicht werden könnte. Bei der Erstellung des experimentellen Variogramms werden der größt- und kleinstmögliche Wert sowie die Anzahl der einbezogenen Datenpunkte berücksichtigt. SALSKI (1999) unterstreicht die Nutzerfreundlichkeit von FUZZEKS und sieht dies als wichtigen Beitrag für die forcierte Anwendung von Fuzzy-Logik in der angewandten Modellierung von Umweltdaten. AHRENDT & PESCH (2001) nutzt dieses Werkzeug für die Modellierung der geologischen Entwicklung der Insel Sylt. Die Anwendungsmöglichkeiten von Fuzzy-Methoden in der Geologie werden von DEMICCO & KLIR (2003) dargestellt. Wünschenswert wäre eine stärkere Berücksichtigung dieser Methoden auch in Deutschland. Als Nachteil in der Fuzzy-Logik muss der mitunter erhöhte Rechenaufwand gegenüber konventionellen Verfahren angesehen werden. In Zeiten immer leistungsfähigerer Rechner dürfte sich dieses Problem jedoch relativieren. Eine gut angepasste Zugehörigkeitsfunktion bietet zudem auch einen Informationsgewinn. Als weiterer Nachteil von Fuzzy-Systemen ist anzusehen, dass diese nicht lernfähig sind. Ansätze hierzu liefern sog. Neuro-Fuzzy-Systeme (HEIDER, 1997). Schwierig ist es auch die Funktionalität eines Fuzzy-Regelwerkes nachzuweisen, da auch Widersprüche in den Regeln möglich sind. Eine im Prozess der Defuzzifizierung angewendete Schwerpunkt-

²⁹Fuzzy Evaluation and Kriging System; <http://www.fuzzeks.de>

6 Diskussion

methode hat möglicherweise einen derart nivellierenden Effekt, dass letztlich keine sinnvolle Entscheidung getroffen werden kann. Die Güte des Fuzzy-Systems, einschließlich der Wahl der Zugehörigkeitsfunktionen, der Operatoren, Modifikatoren und Methoden, kann erst mit dem Vorliegen des Ergebnisses beurteilt werden. Aber auch wenn man das Ergebnis nur als Annäherung betrachten kann, ist zu berücksichtigen, dass bestimmte Sachverhalte nur geschätzt werden können.

Das Programm SAGA, das im Rahmen dieser Arbeit vorwiegend für diverse Gridoperationen verwendet wurde, bietet eine große Palette von Funktionalitäten, die eine sehr effektive Verarbeitung von Rasterdaten unter Berücksichtigung von kontinuierlichen Eigenschaften erlaubt. Die Analyse - und Anwendungsmöglichkeiten von SAGA werden ausführlich von BÖHNER *et al.* (2006) und CONRAD (2006) dargestellt.

Es wurde herausgestellt, dass eine möglichst weiche Datenhaltung und -behandlung zu realisieren ist und dass eine Aggregation resp. Klassifizierung stets als finaler Schritt durchzuführen ist. Die Aggregation wird in dieser Arbeit als Defuzzifizierungsschritt betrachtet und für die Legendenbildung der zu erstellenden Bodenkarte herangezogen. Die inhaltlich-räumlich exaktesten Bodeninformationen (Bodenformen) werden jedoch bereits im Inferenzprozess generiert und liegen in den als kleinste Raumeinheiten aufgefassten Pixeln vor. Da insgesamt für die flächenmäßige Informationsgenerierung zunehmend Rasterverfahren verwendet werden, dürfte der Bedarf an und der Einfluss von Bildverarbeitungsverfahren steigen.

Mit der Software *eCognition* wurde eine Segmentierung durchgeführt. Die Klassendefinitionen sind durch Zugehörigkeitsfunktionen erfolgt. Kern- und Übergangsbereiche wurden hier durch die Unterscheidung der Klassenzugehörigkeiten der Segmente ausgewiesen. Das Problem der bei Klassifikationen resp. Segmentierungen auftretenden Nivellierungseffekte kann in Form von Über- oder Unterklassifizierungen auftreten. Dies zeigt sich um so deutlicher, je über- oder unterrepräsentierter eine Klasse in einem betrachteten Ausschnitt ist bzw. je schlechter das Spektrum der ausweisbaren Klassen (z.B. Bodeneinheiten) abgebildet werden kann.

Kernbereiche sind dabei durch ihre flächenmäßigen, tiefenbezogenen und inhaltlichen Schwerpunkte gekennzeichnet, die räumlich nicht zusammenfallen. Diese Inhalt-Raum-Inkongruenz kann als intrinsische Unschärfe betrachtet werden, die nicht aufgelöst werden kann.

In dem vorgestellten methodischen Ansatz wurde versucht, Catena- und Gesellschaftsprinzip gleichermaßen zu verwenden. Das Catena-Konzept kann in der Weise als digital erweitert betrachtet werden, als das einerseits durch Betrachtung der räumlichen Übergänge und andererseits durch die Anwendung von WENN-DANN-Regeln die Übertragung von Merkmalen und Bodenentwicklungen möglich ist. Dies geschieht im Wesentlichen im Prozess der Datenaufbereitung. Als Ergebnis der Datenauswertung werden Flächen (Segmente) gebildet, die Bodenformengesellschaften bilden.

Die Methode erlaubt über die Ausweisung von Zugehörigkeitsgraden zu unterschiedlichen Zielkategorien qualitativ neue Analyse- und Interpretationsperspektiven im Kontext der Landschaftsökologie, aber auch anderer naturwissenschaftlicher Bereiche. Sie ist exemplarisch für die Erstellung von Bodenkarten bei Verwendung bestimmter Zielkategorien entwickelt worden. Das Spektrum dieser Zielkategorien kann jedoch beliebig erweitert und unterteilt, die Zielkategorien können neu in Beziehung gesetzt werden. Damit ergibt sich eine große Auswertungspalette und qualifiziert die Methode zu einer Art „offenem“ und „dynamischem“ Expertensystem, das sich auf die drei Hauptkomponenten zielkategorienbezogene Zugehörigkeitsfunktionen, Verknüpfung und Regeln stützt. Der Ansatz bietet weiterhin die Möglichkeit der adaptiven Modellierung des Wirkungsgefüges von Ursache- Wirkungszusammenhängen innerhalb landschaftsökologischer Betrachtungen. Anpassungen der Zugehörigkeitsfunktionen durch Schieberegler und/oder die Veränderung ihrer Stützpunkte ermöglichen die Auswirkungen veränderter Umweltbedingungen auf die Verbreitung von Lebensgemeinschaften zu simulieren. Diese Szenarien wiederum können die Grundlage für Betrachtungen allgemeiner Landschaftsentwicklungen oder auch für mesoklimatische Prognosen und deren Rückkopplungen bilden. Potenzial bietet die Methode auch im sog. Upscaling und in der Spezifizierung der naturräumlichen Gliederung.

7 Ausblick

Zunehmende Bedeutung bei der Bereitstellung von Informationen generell wird die Einschätzung bzw. Quantifizierung von Aussagesicherheiten erlangen. Wie gezeigt wurde, ist Information nicht gleich Information. Daraus resultiert, dass gleiche Informationsergebnisse nicht zwangsläufig gleich gut abgeleitet wurden. Entscheidend ist auch die Genauigkeit der verwendeten Informationsgrundlagen. Für die Kartierung heißt das, dass gezielt Gebiete untersucht werden können, die auf Grund der Datenlage und evtl. Widersprüche, eine geringe Aussagesicherheit aufweisen. Dadurch kann der Aufwand im Gelände und bei der Erstellung des Manuskripts gesenkt werden.

Neben der Anwendung der Methode für großmaßstäbige Aspekte, z. B. der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung (*Precision Farming*), aber auch kleinmaßstäbige Karten, besteht Potenzial darin die Methode so zu qualifizieren, dass sie nicht nur für bodenkundliche Fragestellungen (Boden- und deren Auswertekarten) nutzbringend eingesetzt werden kann. Nahe liegt hier vor allem die Nutzung für geologische, landschaftliche, planerische und Umweltfragestellungen. Anwendungspotenzial ergibt sich vor allem auch für Risikoabschätzungen, wie z. B. Erosions- und Überflutungsgefährdungen, aber auch Lawinengefährdungen.

Anwendungen sind prinzipiell dort gegeben, wo eine Vielzahl von Faktoren inhaltlicher und räumlicher Art gegeneinander abgewogen und eventuelle Konfliktpotenziale aufgedeckt und gelöst werden müssen.

Eine weitere Möglichkeit der Anwendung der Methode liegt in der hydrologischen Modellierung. Die Arbeit versteht sich auch im Sinne von BOURNA (1989) als Beitrag vorhandene Daten in Daten zu transferieren die gebraucht werden. Sie liefert einen Ansatz Pedotransferfunktionen (PTF), die bisher vorwiegend für den großskaligen Bereich ermittelt werden, in kleinere Maßstäbe zu übertragen. Dabei ist weiterer Forschungsbedarf darin zu sehen, Transferfunktionen zu finden, die die wechselnden Kriterien in den unterschiedlichen Maßstabsbereichen berücksichtigen. Weiterhin könnten die hier behandelten Methoden dazu beitragen, Bodenmerkmale bzw. -eigenschaften über PTF zu regionalisieren. Anknüpfungspunkte ergeben sich hier vor allem an die von SINOWSKI (1995) behandelten Regionalisierungsmethoden. Dabei könnten sowohl die in Tabelle 4.10 (S.94) aufgezeigten Beziehungen als auch die auf Seite 95 beschriebenen Gütemaße, wie Gestaltindex, Kompaktheit, Weichheit, Berücksichtigung finden. Die Definition und Aufstellung eines Regelwerkes für diese Kartengütemaße resp. der räumlichen Übertragungsgüte von Inhaltswerten (Merkmale, Eigenschaften) liefern Ausgangspunkte für weitere Arbeiten.

Der Ansatz von SCHMIDT & JAHN (2004) zur Bodengesellschaftssystematik findet bisher in den Bodenwissenschaften zu wenig Berücksichtigung. Zukünftig wird es einen streng definierten Kriterienkatalog für die Ausgrenzung von Bodeneinheiten in unterschiedlichen Maßstäben geben müssen. Dabei sind die Fragen zu stellen, wie dabei mit einer kontinuier-

lichen Maßstabsfunktion und regional unterschiedlichen Kriterien umzugehen ist. Bei der Aufstellung des *Kriterien-Rankings* müssen dabei quantitative und qualitative Kriterien, sowie deren Umschlag im (wahrscheinlich) mittleren Maßstabsbereich im Sinne von BURGER (1992) berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 3.1.1, S. 19). Die hier beispielhaft vorgestellte Methode der zentralperspektivischen Aggregation könnte hierzu einen Beitrag leisten.

Die Verwendung und In-Beziehung-Setzung sämtlicher verfügbarer Daten hat den Vorteil, dass zunächst keine Informationen verloren gehen. Im Prozess der Wissensgenerierung findet jedes Datum Berücksichtigung und qualifiziert so mehr oder weniger das System. Da man in der Wissenschaft immer mit dem Problem konfrontiert ist mit einem Manko an gemessenen Daten auszukommen sind, muss der Verknüpfung dieser zu qualitativen Daten eine essentielle Bedeutung beigegeben werden. Für weiterführende Arbeiten ist deshalb die stärkere Einbeziehung von Messwerten anzustreben um die Bestimmung der Zugehörigkeitsgrade objektiver zu gestalten. Dies kann z.B. durch die Ableitung einfacher statistischer Parameter, wie Minimalwert, Maximalwert, Median etc. erfolgen. Generell ist jedoch zu betrachten in wie weit auch Messwerte als objektiv angesehen werden können, da die Messgeräte ein vom Menschen umgesetztes Messprinzip benutzen, bei dem bereits auch gewisse Annahmen gemacht werden müssen und Verallgemeinerungen vorgenommen werden. Die Temperatur beispielsweise ist streng genommen der verallgemeinerte Wert von Gitterschwingungen der Atome oder Molekülbewegungen. Des Weiteren ist eine Sensitivitätsanalyse in Betracht zu ziehen, die durch die Veränderung der Zugehörigkeitsfunktionen, Operatoren, Modifikatoren und Methoden die Anpassung des Gesamtergebnisses auf detailkartierte Areale erlaubt. Dies könnte z.B. mit der auf Seite 123 beschriebenen Methode erfolgen.

Im Zuge der weiteren Klärung der Skalenabhängigkeit von Landschaftsprozessen könnten die Erosionsuntersuchungen von HELMING (1992), die eine nur geringe Beeinflussung des Mikroreliefs auf das Ausmaß des Bodenabtrages ergaben, aufgegriffen werden. Dabei scheint eine Kopplung der Ansätze von MÖLLER *et al.* (2008), MÖLLER (2008), MACMILLAN *et al.* (2004) und MACMILLAN *et al.* (2000) sinnvoll.

Die Methode ist als eine mögliche Variante einer Bodenlandschaftsmodellierung zu sehen. Sie wurde auf der Grundlage eines umfangreichen Datenmaterials entwickelt. Die Anwendbarkeit der Methode auf Kartierungsgebiete bei denen wenige Vorkenntnisse vorliegen, wäre zu testen. Hier muss jedoch mit einem Mangel an Information umgegangen werden, so dass sich kaum Interferenzeffekte einstellen dürften und die noch stärkere Einbeziehung von Expertenwissen gefragt ist. Die durch die moderne Sattelitentechnik fast erdflächendeckend vorliegenden, teilweise hoch auflösenden, DEMs und Fernerkundungsdaten können als Minimaldatensatz angesehen werden und stehen für eine Modellierung zu Verfügung. Einen Ansatz Bodenverbreitungen an Hand von Relief- und hydrologischen Parametern unter Nutzung eines CART-Klassifikationsalgorithmus zeigt LIESS *et al.* (2009).

7 Ausblick

In naher Zukunft werden die zweidimensionalen Karten zunehmend durch 3D-Modelle ersetzt werden. Dies trifft auch für die Ausweisung von Kern- und Übergangsbereichen zu. Das hat zum einen den Vorteil, dass zumindest die Darstellungsunschärfe minimiert wird und zum anderen eine realitätsnähere Darstellung stattfindet, die auch eine Vereinfachung des Prozessverständnisses ermöglicht. Diese Modelle werden eher Horizont bezogene, stratiforme Darstellungen verwenden (vgl. AMESKAMP (1997)). Die Auseinandersetzung mit der Ausweisung von Bodengesellschaften wird in diesem Zusammenhang erneut erfolgen müssen. Möglicherweise sind hier unterschiedliche Herangehensweisen bei Prozess orientierten Beurteilungen und Pedon bezogenen Standortbewertungen notwendig.

Insgesamt dürften sich die Verfahren der Bildverarbeitung in Zukunft stärker in der Raumanalyse etablieren. Das gilt für reale und synthetische Bilder gleichermaßen. Die Darstellungs- und Analysemöglichkeiten von Rasterdaten sind flexibler und vielfältiger als bei Vektordaten. Zum einen haben sich die bildgebenden Verfahren u. a. in Auflösungsvermögen und abgedecktes Aufnahmespektrum sehr verbessert, so dass der Bedarf an Bildauswertungen auch im bodenkundlichen Bereich zunehmen wird. Zum anderen eignen sich Rasterdaten besser dazu räumliche Phänomene abzubilden.

Literatur

- AHRENDT, K., & PESCH, R. 2001. Das GIS als Methode für die Rekonstruktion geologischer Entwicklungen - Beispiel Sylt / Deutsche Bucht. *Meyniana*, **53**, 5–30.
- ALBRECHT, CH. 2005. *Mündliche Aussage*.
- ALBRECHT, CH., HUWE, B., & JAHN, R. 2004. Allocation of the Munsell code to a color name according to pedological criteria. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **167**(1), 60–65.
- ALBRECHT, CH., JAHN, R., & HUWE, B. 2005a. Soil systematics and classification systems, Part I: Fundamentals. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **168**(1), 7–20.
- ALBRECHT, CH., JAHN, R., & HUWE, B. 2005b. Soil systematics and classification systems, Part II: The German soil-science situation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **168**(2), 157–168.
- ALIEV, R., BONFIG, K.-W., & ALIEV, F. 2000. *Soft-Computing - Eine grundlegende Einführung*. Berlin: Verlag Technik.
- AMESKAMP, M. 1997. *Three-dimensional rule-based continuous soil modelling*. Ph.D. thesis, Christian-Albrechts-Universität Kiel. Institut für Informatik und Praktische Mathematik.
- AMESKAMP, M., & LAMP, J. 1998. *Three-dimensional Soil Prediction - Fuzzy-Rules and a GIS*. Tech. rept.
- ARMAND, A. D. 1992. Sharp and Gradual Mountain Timberlines as a Result of Species Interaction. Pages 360–378 of: HANSEN, A.J., & DI CASTRI, F. (eds), *Landscape Boundaries: Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows*. New York: Springer-Verlag.
- BARDOSSY, A., GIESE, H., GRIMM-STRELE, J., & K.-P., BARUFKE. 2003. SIMIK+ -GIS- implementierte Interpolation von Grundwasserparametern mit Hilfe von Landnutzungs- und Geologiedaten. *Hydrogeologie und Wasser*, **47**(1).
- BARTELS, F. 1997. *Ein Fuzzy- Auswertungs- und Krigingsystem für raumbezogene Daten*. M.Phil. thesis, Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- BÄSSMANN, H., & KREYSS, J. 2004. *Bildverarbeitung Ad oculus*. 4 edn. Springer-Verlag.
- BASTIAN, O. 1999. Geographie und Landschaftsplanung - Gedanken von Ernst Neef im Spiegel der modernen Landschaftsplanung -. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **294**, 13–35.
- BAUER, J., ROHDENBURG, H., & BORK, H.-R. 1985. Ein Digitales Reliefmodell als Voraussetzung für ein deterministisches Modell der Wasser- und Stoff-Flüsse. *Landschaftsgenese und Landschaftsökologie*, **10**, 1–15.

Literatur

- BAURIEGEL, A. 2003. *Methoden zur Ableitung und Parametrisierung von flächenbezogenen Profil- und Horizontdaten*. Ph.D. thesis, Humboldt-Universität Berlin.
- BEHRENS, T., & SCHOLTEN, TH. 2006. Digital soil mapping in Germany - a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **169**(3), 434–443.
- BEHRENS, T., FÖRSTER, H., SCHOLTEN, T., STEINRÜCKEN, U., & SPIES, E.-D. 2005. Digital soil mapping using artificial neuronal networks. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **168**(1), 21–33.
- BENNE, I., HEINEKE, H.-J., & NETTELMANN, R. 1990. *Die DV-gestützte Auswertung der Bodenschätzung - Erfassungsanweisung und Übersetzungsschlüssel*. Tech. rept. Hannover.
- BERNHARDT, H., & JÄGER, K.-D. 1985. Zur gesellschaftlichen Einflußnahme auf den Landschaftswandel in Mitteleuropa in Vergangenheit und Gegenwart. Beiträge zum Problemkreis des Landschaftswandels. *Pages 5–56 of: Sitzungsber. d. Sächs. Akad. d. Wiss. zu Leipzig*. Berlin: Akademie-Verlag.
- BEVEN, K J., & KIRKBY, M J. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, **24**(1), 43–69.
- BILL, R. 1999. *Grundlagen der Geo-Informationssysteme: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen*. 2 edn. Heidelberg: Wichmann-Verlag.
- BLASCHKE, TH. 2000. Objektextraktion und regelbasierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten - Neue Möglichkeiten für GIS-Anwender und Planer. *Pages 159– 168 of: 5. Symposium Computergestützte RaumplanungCORP 2000*. Wien: Wien.
- BLUM, W. 2002. *Die Grammatik der Logik*. 3 edn. München: Deutscher Taschenbuchverlag.
- BOGENA, H., HERBST, M., KUNKEL, R., VERECKEN, H., & WENDL, F. 2003. *Skalenabhängige Modellierung des Wasserhaushalts im Flusseinzugsgebiet der Rur*. Tech. rept. Kassel.
- BÖHNER, J., & KÖTHE, R. 2003. Bodenregionalisierung und Prozessmodellierung: Instrumente für den Bodenschutz. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **147**(3).
- BÖHNER, J., MCCLOY, K.R., & STROBL, J. 2006. *SAGA - Analysis and Modelling Applications*. Göttingen: Verlag Erich Goltze GmbH & Co. KG.
- BOURNA, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.*, **9**, 177–213.
- BREBURDA, J. 1983. *Bodenerosion und Bodenerhaltung*. Frankfurt/Main: DLG-Verlag.
- BREGATO, G. 2004. Fuzzy continuous classification and spatial interpolation in conventional soil survey for soil mapping of the lower Piave plain. *Geoderma*, **118**, 1–16.

- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J.H., OHLSEN, R.A., & STONE, C.J. 1984. *Classification and Regression Trees*. Wadsworth, Monterey.
- BROWN, D.J. 2006. A historical perspective on soil-landscape modeling. Pages 61–103 of: GRUNWALD, S. (ed), *Environmental Soil-Landscape Modeling - Geographic Information Technologies and Pedometrics*. Boca Raton-London-New York: CRC Press.
- BULLINGER, A. 2000. *Vergleich von Interpolationsverfahren und digitalen Geländemodellen für Wattgebiete - GIS-gestützte Untersuchungen am Beispiel der morphologischen Modellierung von Tidebecken in Schleswig-Holstein*. M.Phil. thesis, Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- BURAK, A. 2005. *Eine prozessorientierte landschaftsökologische Gliederung Deutschlands*. Flensburg: Deutsche Akademie für Landeskunde - Selbstverlag.
- BURGER, H., & SCHAFMEISTER, M.-TH. 2000. Gerichtete Interpolation zur verbesserten Darstellung strömungsabhängiger Grundwasserbeschaffenheitsmerkmale. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*, 2, 79–85.
- BURGER, R. 1992. Einbeziehung von Geoinformation und Geowissen in die Klassifikation von Satellitenbildern mit Hilfe eines evidenztheoretischen Ansatzes. Pages 111–145 of: GÜNTHER, O., & RIEKERT, W.-F. (eds), *Wissensbasierte Methoden zur Fernerkundung der Umwelt*. Karlsruhe: Wichmann-Verlag.
- BURROUGH, P.A. 1983a. Multiscale sources of spatial variation in soil. i. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *Journal of Soil Science*, 34, 577–597.
- BURROUGH, P.A. 1983b. Problems of superimposed effects in the statistical study of the spatial variation of soil. *Agricultural Water Management*, 6, 123–143.
- BURROUGH, P.A. 1993. Soil variability: a late 20th century view. *Soil & Fertilizers*, 56(5), 529–562.
- CHENG, T., MOLENAAR, M., & LIN, H. 2001. Formalizing fuzzy objects from uncertain classification results. *Int. J. Geographical Information Science*, 15(1), 27–42.
- COLE, N.J., & BOETTINGER, J.L. 2007. Pedogenetic understanding raster classification methodology for mapping soils, powder river basin, Wyoming, USA. Pages 377–388 of: LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A.B., & VOLTZ, M. (eds), *Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective*, vol. 31. Amsterdam: Elsevier.
- CONRAD, O. 2006. *SAGA: Entwurf, Funktionsumfang und Anwendung eines Systems für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen*. Ph.D. thesis, Georg-August Universität Göttingen.
- DE LANGE, N., NOETZEL, U., SLOPIANKA, B., & WIGGER, C. 1997. Grundlagen von Geo-Informationssystemen. *OSG - Materialien*, 35.

Literatur

- DEHNER, U., HARTMANN, K.-J., GEHRT, E., & KRUG, D. 2001. Zur Hinterlegung der Bodenübersichtskarte 1 : 200 000 (BÜK 200) mit bodenkundlichen Flächendatensätzen. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, **47**(2), 121–126.
- DEMICO, R. V., & KLIR, G. J. 2003. *Fuzzy Logic in Geology*. San Diego: Elsevier Academic Press.
- DOBERS, E.S. 2005. Verbesserung und Erweiterung digitaler Bodenkarten unter Verwendung des Transferable Belief Model. *Mitt. Dt. Bodenkdl. Gesell.*, **106**, 67–68.
- DOLLINGER, F. 1997. Zur Anwendung der Theorie der geographischen Dimension in der Raumplanung mittels Geographischer Informationstechnologie. In: *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung*. Salzburg: Selbstverlag.
- DREXLER, O., GROTTENTHALER, W., GRUBER, H.-P., MARTIN, W., & SCHMIDT, F. 2000. Die bodenkundliche Landesaufnahme - Grundlage für Bodenschutz und Daseinsvorsorge. *Geologica Bavarica*, 363–378.
- DREYHAUPT, J. 2002. *Die Bedeutung der Heterogenität von Boden, Klima und Landnutzung für die Regionalisierung von Modellzustandsgrößen*. Ph.D. thesis, Universität Bayreuth.
- DUDEN, C. 1991. *Duden - Die deutsche Rechtschreibung*. 20 edn. Mannheim: Brockhaus AG.
- DUFF, D., & GUESGEN, H. 2002. An evaluation of buffering algorithms in fuzzy GIS. *Pages 80–92 of: Proceedings of the International Conference on Geographic Information Science (GIScience-02)*. Boulder, Colorado: Springer-Verlag.
- DUTTMANN, R., & MOSIMANN, T. 1994. Die ökologische Bewertung und dynamische Modellierung von Teilfunktionen und -prozessen des Landschaftshaushaltes - Anwendungen und Perspektiven eines geoökologischen Informationssystems in der Praxis. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **138**(1), 3–17.
- ERDMANN, K., & MÜLLER, U. 2000. Leitfaden zur Berücksichtigung von Bodeninformationen im Rahmen der Agrarstrukturplanung in Niedersachsen. *Arbeitshefte Boden*, **3**.
- FIEDLER, R., BANDEMER, H., SCHREIBER, A., & KÜHL, A. 1997. Theorie unscharfer Mengen und intelligenzgesteuerte Datenanalysen in der Geologie - Rayonierung und strukturgeologische Bewertung des Wildenfesler Kalksteingebietes bei Zwickau. *Freiberger Forschungshefte*, **469**.
- FINKE, P.A. 2007. Quality assessment of digital soil maps: Producers and users perspectives. In: LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A.B., & VOLTZ, M. (eds), *Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective*. Amsterdam: Elsevier.
- FISHER, P.F. 2003. Data quality and uncertainty: ships passing in the night! *Page 13 of: Proceedings of ISSDQ*.

- FLECKENSTEIN, J.H. 2004. *Modeling river-aquifer interactions geologic heterogeneity in an alluvial fan system, Cosumnes River, CA*. Ph.D. thesis, University of California.
- FÖRSTER, A. 2004. *Rekonstruktion des potentiell natürlichen Bodenmosaiks als Beitrag des Bodenschutzes bei Planungsprozessen am Beispiel der Stadt Leipzig*. M.Phil. thesis, Technische Universität Dresden.
- FRANK, H. 2002. *Fuzzy-Methoden in der Wirtschaftsmathematik*. Braunschweig-Wiesbaden: Vieweg-Verlag.
- FREIBERGER, P., & MCNEILL, D. 1998. *Fuzzy Logic*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- FRIEDRICH, C. 2001. *GIS-basierte Regionalisierung und Quantifizierung unscharfer Bodeninformationen mit Hilfe der Fuzzy-Set-Theorie*. Ph.D. thesis, Justus-Liebig-Universität Gießen.
- FRIEDRICH, K. 1996. *Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten*. Ph.D. thesis, Goethe-Universität Frankfurt/Main. Physische Geographie.
- FRITSCH, D. 1991. *Hybride Datenstrukturen in Geo-Informationssystemen*. Pages 33–46 of: KILCHENMANN, A. (ed), *Technologie Geographischer Informationssysteme*. Springer-Verlag.
- FRITSCH, D., GLEMSE, M., KLEIN, U., SESTER, M., & STRUNZ, G. 1998. *Zur Integration von Unsicherheit bei Vektor- und Rasterdaten*. Tech. rept. Stuttgart-Oberpfaffenhofen.
- 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 -*. Ph.D. thesis, Freie Universität Berlin. Institut für Geologische Wissenschaften.
- GEHRT, E., OELKERS, K.-H., & SPONAGEL, H.J. 1992. *Pedoregionale Gliederung Niedersachsens*. Unveröffentlichtes Manuskript des NLFb. Archivnr. 109628.
- GENIESSER, K., & MIELECKE, W. 1957. *Die Elbekiese auf der Teltowhochfläche südlich von Berlin*. *Berichte der geologischen Gesellschaft*, **4**, 242–263.
- GERIGHAUSEN, H. 2004. *Objektbasierte Standortcharakterisierung mit Methoden der Fernerkundung*. M.Phil. thesis, Universität Potsdam.
- GRUNWALD, S., & LAMSAL, S. 2006. *The impact of emerging geographic information technology on soil-landscape modeling*. Pages 127–154 of: GRUNWALD, S. (ed), *Environmental soil-landscape modeling - geographic information technologies and pedometrics* environmental Soil-Landscape Modeling - Geographic Information Technologies and Pedometrics. Boca Raton-London-New York: CRC Press.
- GUESGEN, H. W., HERTZBERG, J., LOBB, R., & MANTLER, A. 2003. *Buffering Fuzzy Maps in GIS*. *Spatial Cognition and Computation*, **3**, 207–222.

Literatur

- GUSTAFSON, D.E., & KESSEL, W. 1979. Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix. *Pages 761–766 of: IEEE CDC.*
- HAASE, G. 1978. Zur Ableitung und Kennzeichnung von Naturraumpotentialen. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **122**(2), 113–124.
- HAASE, G., & MANNSFELD, K. 2002. Naturraumeinheiten, Landschaftsfunktionen und Leitbilder am Beispiel von Sachsen. *Forsch. z. deutschen Landeskunde*, **250**.
- HAASE, G. ET AL. 1991. *Naturraumerkundung und Landnutzung. Geochorologische Verfahren zur Analyse, Kartierung und Bewertung von Naturräumen*. Berlin: Akademie-Verlag.
- HADER, S., DEBES, K., & STEPHAN, V. 1998. Realisierung einer Hindernisvermeidung und globaler Navigationsaufgaben mittels Fuzzy-Algorithmen für den Miniaturroboter Khepera. *In: Fuzzy-Logik und neuronale Netze in Robotik und Automation.*
- HALBFASS, S. 2005. *Entwicklung eines GIS-gestützten Modells zur Quantifizierung diffuser Phosphoreinträge in Oberflächengewässer im mittleren Maßstab unter Berücksichtigung*. Ph.D. thesis, Technische Universität Dresden.
- HALKE, E. 2002. *Historischer Landnutzungswandel und dessen Einfluss auf ausgewählte Landschaftsfunktionen - dargestellt am Beispielblatt Oelsnitz (1 : 25 000)*. M.Phil. thesis, Humboldt-Universität Berlin.
- HARTMANN, K.-J., & KAINZ, W. 1997. Konzept zur Übertragung bodenkundlicher Daten aus dem Sprachgebrauch der früheren DDR in die aktuelle deutsche Nomenklatur. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, **43**(2), 112–117.
- HEIDER, H. 1997. *Automatische Generierung von Fuzzy-Systemen mit evolutionären und neuronalen Algorithmen*. Ph.D. thesis, Technische Universität Clausthal.
- HEITHECKER, J. 1993. Fuzzy Logic und der „Tierhalter“. *KI*, **3**, 7–10.
- HELMING, K. 1992. *Die Bedeutung des Mikroreliefs für die Regentropfenerosion*. Ph.D. thesis, Technische Universität Berlin.
- HEMETSBERGER, M., KLINGER, G., & NIEDERER, S. 2002. Risk Assessment of Avalanches - A Fuzzy GIS Application. *Pages 1–8 of: Proceedings of the FLINS 2002 Conference*. World Scientific.
- HERBST, M. 2001. *Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Berücksichtigung geomorphometrischer Strukturen für die Modellierung der Wasserflüsse eines mikroskaligen Einzugsgebietes*. Ph.D. thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- HEUVELINK, G.B.M., & BROWN, J.D. 2007. Towards a soil information system for uncertain soil data. *Pages 97–106 of: LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A.B., & VOLTZ, M. (eds), Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective*, vol. 31. Amsterdam: Elsevier.

- HINTERDING, A., MÜLLER, A. GERLACH, N., & GABEL, F. 2003. Geostatistische und statistische Methoden und Auswerteverfahren für Geodaten mit Punkt- bzw. Flächenbezug; Abschlussbericht, Teil 1: Grundlagen. *Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)*, 39.
- HÖPPNER, F., KLAWONN, F., & KRUSE, R. 1996. *Fuzzy-Clusteranalyse; Verfahren für die Bilderkennung, Klassifikation und Datenanalyse*. Braunschweig-Wiesbaden: Vieweg-Verlag.
- HUWE, B. 1992. Deterministische und stochastische Ansätze zur Modellierung des Stickstoffhaushaltes landwirtschaftlich genutzter flächen auf unterschiedlichem Skalenniveau. *Mitteilungen des Institutes für Wasserbau*, 77.
- JIANG, B. 1998. Visualisation of Fuzzy Boundaries of Geographic Objects. *Cartography*, 27(2), 41–46.
- JUSCHUS, O. 2000. *Das Jungmoränenland südlich von Berlin*. Ph.D. thesis, Humboldt-Universität Berlin.
- KA5, AUTORENGRUPPE. 2004. *KA5, Bodenkundliche Kartieranleitung, Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland*. 5 edn. Hannover: Schweitzerbartsche Verlagsbuchhandlung.
- KÄGI, J. 1999. *Naturlandschaft Sihlwald: Konventionelle und digitale Bodenkartierung mit Hilfe eines geographischen Informationssystems*. M.Phil. thesis, Universität Zürich.
- KAISER, B. 2001. *Werttheorie und Bewertungstheorie als Grundlagen der Waldbewertung*. Ph.D. thesis, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- KASCH, W. 1971. *Erläuterungen und Hinweise zur Arbeitsrichtlinie zur Durchführung der Standortkundlichen Ergänzung der Bodenschätzung*.
- KLEEFISCH, B. 1994. Die Konstruktion und Auswertung digitaler Bodenkarten. Methoden und Verfahren für den Aufbau und Einsatz von Bodeninformationssystemen. *ZALF-Berichte*, 9, 16.
- KOFALK, S. 1998. *Einfluß von Bodenvariabilität und Relief auf Wasserhaushalt und Stickstoffgehalte eines Grundmoränenstandortes*. Ph.D. thesis, Technische Universität Berlin.
- KÖHLER, S. 2003. *Nutzung von Prozessparametern automatischer Melksysteme für die Erkennung von Eutererkrankungen unter Verwendung der Fuzzy Logic*. Ph.D. thesis, Humboldt-Universität Berlin.
- KOPP, D., & JOCHHEIM, H. 2002. *Forstliche Boden- und Standortformen des nordostdeutschen Tieflands als Datenbasis für die Landschaftsmodellierung*. Verlag Dr. Kessel.

Literatur

- KOPP, D., & SCHWANECKE, W. 1994. *Standörtlich-naturräumliche Grundlagen ökologischer Forstwirtschaft*. Verlag Dr. Kessel.
- KOPP, D., JÄGER, K.-D., & SUCCOW, M. 1982. *Naturräumliche Grundlagen der Landnutzung*. Berlin: Akademie Verlag.
- KÖTHER, R. 2007. *Dokumentation Digitale Geomorphographische Karte (GMK25) und Reliefeinheiten von Brandenburg auf Basis des DGM25*. unveröffentlichter Bericht.
- KÖTHER, R., & BÖHNER, J. 2001. *Funktionale Bodenkonzeptkarten auf der Basis von punktuellen Bodenmerkmalen und flächenhaften, bodenrelevanten Geodaten*. Vortrag zur Jahrestagung des AK Bodengeographie der DGfG in Dresden (unveröff. Manuskript).
- KÖTHER, R., & LEHMEIER, F. 1993. SARA - Ein Programmsystem zur Automatischen Relief-Analyse. *Zeitschrift für angewandte Geographie*, **4**, 11–21.
- KÖTHER, R., GEHRT, E., & BÖHNER, J. 1996. Automatische Reliefanalyse für geowissenschaftliche Kartierungen - derzeitiger Stand und Weiterentwicklung des Programms SARA. *Arbeitshefte Geologie*, **1**, 31–37.
- KRÜNITZ, D.J.G. 1803. *Ökonomisch-technologische Enzyklopädie*. <http://www.kruenitz1.uni-trier.de>.
- KUGLER, H. 1974. *Das Georelief und seine kartographische Modellierung*. Ph.D. thesis, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg.
- KÜHN, D. 1990. Stand und Vorstellungen zur rechnergestützten bodengeologischen Kartierung für die Landwirtschaft in den ostdeutschen Ländern. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, **36**(11), 424–427.
- KÜHN, D. 1995. *Anleitung zur Erarbeitung einer Bodenkarte im Maßstab 1 : 50 000 (BÜK 50) für das Land Brandenburg*. LBGR Kleinmachnow.
- KYLANDER, K., & KYLANDER, O.S. 2001. *GIMP-Das offizielle Benutzerhandbuch*. 2 edn. Bonn: mitp-Verlag.
- LEMBKE, H. 1936. *Von der „Urspreewald“ zum heutigen Spreelauf - Festschrift für Norbert Krebs zum 60. Geburtstag*.
- LESER, H. 1987. *DIERCKE-Wörterbuch der Allgemeinen Geographie, Bd. I und II*. Braunschweig: Deutscher Taschenbuchverlag.
- LI, W., ZHANG, C., BURT, J.E., ZHU, A.-X., & FEYEN, J. 2004. Two-dimensional Markov Chain simulation of soil type distribution. *Soil Science Society of America Journal*, **68**, 1479–1490.
- LIEDTKE, H. 1984. Naturraumpotential, Naturraumtypen und Naturregionen in der DDR. *Geographische Rundschau*, **36**(12), 606–612.

- LIESS, M., GLASER, B., & HUWE, B. 2009. Digital soil mapping in Ecuador. *Erdkunde*, **63**(4), 309–319.
- LINEISEN, H. 2002. *Entwicklung eines Management-Informationssystems für Entscheidungen im Precision Farming*. Ph.D. thesis, Technische Universität München.
- LÜCK, E., EISENREICH, M. DOMSCH, H., & BLUMENSTEIN, O. 2000. Geophysik für Landwirtschaft und Bodenkunde. In: *Stoffdynamik in Geosystemen*.
- MACMILLAN, R., PETTAPIECE, W., NOLAN, S., & GODDARD, T. 2000. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landforms elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, **113**(81), 81–109.
- MACMILLAN, R., JONES, R., & MCNABB, D. 2004. Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modeling using digital elevation models (DEMs). *Computers, Environment and Urban Systems*, **28**, 175–200.
- MANDL, P. 2004. *Räumliche Entscheidungsunterstützung mit GIS: Nutzwertanalyse und Fuzzy-Entscheidungsmodellierung*. Universität Salzburg, www.sbg.ac.at/geo/agit/papers94/mandel.htm.
- MARCINEK, J. 1968. Entwicklungsphasen eines Gewässernetzes - Das Flussnetz im Nordostraum der DDR. *Wissenschaft und Fortschritt*, **10**.
- MARKS, R., MÜLLER, M.J., LESER, H., & KLINK, H.J. 1992. Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes. *Forsch. z. deutschen Landeskunde*, **229**.
- MCBRATNEY, A.B., & MENDONCA SANTOS, M.L.; MINASNY, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, **117**, 3–52.
- MCBRATNEY, A.B., & ODEH, I.O.A. 1997. Application of Fuzzy sets in Soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*, **77**, 85–113.
- MCKENZIE, N.J., & GALLANT, J.C. 2007. Digital soil mapping with improved environmental predictors and models of pedogenesis. *Pages 327–349 of: LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A.B., & VOLTZ, M. (eds), Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective*, vol. 31. Amsterdam: Elsevier.
- MILNE, G. 1935. Composite units for the mapping of complex soil associations. *Pages 345–347 of: Transactions of the 3rd International Congress of Soil Science*.
- MINASNY, B., & MCBRATNEY, A.B. 2002. *FuzMe*. Tech. rept. Sydney.
- MÖLLER, M. 2005. Disaggregation von Bodeninformationen auf der Grundlage digitaler Reliefdaten. *Pages 67–89 of: MÖLLER, M., & HELBIG, H. (eds), GIS-gestützte Bewertung von Bodenfunktionen - Datengrundlagen und Lösungsansätze*. Heidelberg: Wichmann-Verlag.

Literatur

- MÖLLER, M. 2008. *Maßstabsspezifische Ableitung von thematischen Grundlegendaten für Landschaftsanalysen*. Ph.D. thesis, Eberhard-Karls-Universität Tübingen.
- MÖLLER, M., VOLK, M., FRIEDRICH, K., & LYMBURNER, M. 2008. Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **171**, 419–430.
- MONSE, M., & SCHULTZ-STERBERG, R. 2000. *Oberböden des Landes Brandenburg - Flächenhafte Darstellung punktbezogener Daten mittels Kriging*. Tech. rept. Berlin.
- MONSE, M., HIRSCH, A.K., & SCHMIDT, R. 2000. Regionalisierung von Bodenbelastungen als fachliche Grundlage für gebietsbezogene Maßnahmen nach BBodSchG in Brandenburg. In: *Bericht der Fachhochschule Eberswalde zum Forschungsvorhaben A4-1/98 im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg*.
- MORSTEIN, K.H. 2007. *Bodenschätzung in Brandenburg und ihre Digitalisierung*. Vortrag im Rahmen der Kleinmachnower Gespräche am 20.03.2007.
- NAUCK, D., KLAWONN, F., & KRUSE, R. 1996. *Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme; Grundlagen des Konnektionismus, Neuronaler Fuzzy-Systeme und der Kopplung mit wissensbasierten Methoden*. Braunschweig-Wiesbaden: Vieweg-Verlag.
- NEEF, E. 1963. Topologische und chorologische Arbeitsweisen in der Landschaftsforschung. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **107**(4), 249–259.
- NEEF, E. 1967. *Die Theoretischen Grundlagen der Landschaftslehre*. Gotha-Leipzig: VEB Hermann Haack.
- NEUBERT, M. 2006. *Bewertung, Verarbeitung und segmentbasierte Auswertung sehr hoch auflösender Satellitenbilddaten vor dem Hintergrund landschaftsplanerischer und landschaftsökologischer Anwendungen*. Ph.D. thesis, Technische Universität Dresden.
- OBERGUGGENBERGER, M. 2000. Fuzzy Logik, Statistik, Risiko und Unschärfe. In: *Workshop „Alpine Sicherheit - Naturgefahrenmanagement“*.
- OLSON, C.G. 2006. Geomorphological soil-landscape models. Pages 105–124 of: GRUNWALD, S. (ed), *Environmental Soil-Landscape Modeling - Geographic Information Technologies and Pedometrics*. Boca Raton-London-New York: CRC Press.
- OTTE, F. 1988. *Über die quantitative Erfassung der Bodenvariabilität und Gütemaße für großmaßstäbige Karten*. Ph.D. thesis, Christian-Albrechts-Universität Kiel. Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde.
- PFEIFFER, E.-M., SAUER, S., & ENGEL, E. 2003. *Bodenschätzung und Bodenbewertung - Nutzung und Erhebung von Bodenschätzungsdaten*. Wiesbaden: Chmielorz-Verlag.

- REHKÄMPER, K. 2002. *Bilder, Ähnlichkeit und Perspektive - Auf dem Weg zu einer neuen Theorie der bildhaften Repräsentation*. Deutscher Universitäts-Verlag.
- RICHTER, R., & ROST, J.-M. 2002. *Komplexe Systeme*. Frankfurt/M.: Fischer-Verlag.
- RIEDL, L. 1999. *Leap's MapModels, User Manual, Version 1.1 beta*. Tech. rept. Wien.
- RÖHRING, A., & GAILING, L. 2006. *Kulturlandschaften in Berlin und Brandenburg - Kriterien und Vorschläge zur handlungsräumlichen Abgrenzung*. Forschungsexpertise des Instituts für Regionalentwicklung und Strukturplanung Erkner.
- ROMMELFANGER, H.-J., & EICKEMEIER, S.-H. 2001. *Entscheidungstheorie - Klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- RÖSCH, A., & KURT, F. 1941. *Reichbodenschätzung und Reichskataster - Gesetze mit amtlicher Begründung, Durchführungsbestimmungen und Verwaltungsvorschriften nach dem neuesten Stand*. 2 edn. Berlin: Carl Heymanns Verlag.
- ROSNER, H.-J. 1999. *GIS Geographische Informationssysteme - eine Einführung*. Universität Tübingen.
- ROTHKEGEL, W. 1950. *Geschichtliche Entwicklung der Bodenbonitierungen und Wesen und Bedeutung der deutschen Bodenschätzung*. Verlag Ulmer.
- SADOWNIKOW, I.F. 1958. *Bodenkundliche Untersuchungen sowie deren Auswertung durch Bodenkarten., Dt. von E. Kahn*. Berlin: Akademie-Verlag.
- SALSKI, A. 1999. Fuzzy logic approach to data analysis and ecological modelling. *Page Create of: Proceedings of European Symposium on Intelligent Techniques (ESIT'99)*.
- SCHMIDT, D. 1995. *Kopplung eines Fuzzy-Klassifikationsmodells mit einem Geographischen Informationssystem zur Modellierung eines unscharfen Entscheidungsprozesses*. Tech. rept. Salzburg.
- SCHMIDT, F., & GEBBERS, R. 2000. Erstellung und Auswertung von digitalen Geländemodellen. *In: Beitrag zum 3. Rostocker GPS-Tag*.
- SCHMIDT, G. 2002. *Eine multivariat-statistisch abgeleitete ökologische Raumgliederung für Deutschland*. Ph.D. thesis, Hochschule Vechta.
- SCHMIDT, R. 1978. Geographische Aspekte der mittelmaßstäbigen landwirtschaftlichen Standortkartierung. *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*.
- SCHMIDT, R. 1991. Genese und anthropogene Entwicklung der Bodendecke am Beispiel einer typischen Bodencatena des Norddeutschen Tieflandes. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **133**, 29–37.

Literatur

- SCHMIDT, R. 2000. Bodengeographie als Beitrag zu einer integrativen Bodenkunde. In: BAURIEGEL, A., ILSEMANN, J., MICHEL, C., & VAN DER PLOEG, R.R. (eds), *Boden - Objekt menschlicher Nutzung und Forschung, Festschrift zu Ehren von Herrn M. Altermann*, vol. 3. Osnabrück: Der Andere Verlag.
- SCHMIDT, R., & JAHN, R. 2004. Statuspapier zum Bearbeitungsstand der Bodengesellschaftssystematik. *Mitt. Dt. Bodenkdl. Gesell.*, **103**, 3–16.
- SCHOBESBERGER, N. 2007. *Unschärfe in Geodaten - Visualisierung von Unschärfe in der Kartographie*. Seminar aus Karthographie und Geoinformation.
- SCHÖLL, O. 2004. *Ein Überblick über imperfekte Daten in Datenbanken*. Universität Karlsruhe.
- SCHOLTEN, TH., & BEHRENS, T. 2005. Methoden der GIS-gestützten Erstellung von Bodenprognosekarten am Beispiel des Ostharzes und des Schwarzerdegebiets in Sachsen-Anhalt. Pages 45–66 of: MÖLLER, M., & HELBIG, H. (eds), *GIS-gestützte Bewertung von Bodenfunktionen - Datengrundlagen und Lösungsansätze*. Heidelberg: Wichmann-Verlag.
- SCHÖPF, F. 2006. *Erzeugen von Entscheidungsbäumen mit Soft-Splitting*. FGBU, Medizinische Universität Innsbruck.
- SCHRAA, H.-H. 2000. Recherchesystem bodenkundlicher Kennwerte (REBOK). *Geologica Bavarica*, 395–401.
- SCHRÖDER, D., & BLUM, W.E.H. 1992. *Bodenkunde in Stichworten*. Berlin-Stuttgart: Ferdinand Hirt, Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung.
- SCHROEDER, D., & LAMP, J. 1976. Prinzipien der Aufstellung von Bodenklassifikationssystemen. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **139**, 617–630.
- SCHULZ, K., & HUWE, B. 1999. Uncertainty and sensitivity analysis of water transport modeling in a layered soil profile using fuzzy set theory. *Journal of Hydroinformatics*, **1**(2), 127–138.
- SCHULZ, K., HUWE, B., & PFEIFFER, S. 1999. Parameter uncertainty in chemical equilibrium calculations using fuzzy set theory. *Journal of Hydrology*, **217**, 119–134.
- SCHULZE, G., & KOPP, D. 1996. *Anleitung für die forstliche Standortserkundung im nordostdeutschen Tiefland (Standortserkundungsanleitung) SEA 95, Band A, B, C und D*. Tech. rept. Schwerin und Eberswalde.
- SCHWAMM, D. 1994. *Fuzzy Logic und neuronale Netze*.
- SELLE, B., MORGAN, R., & HUWE, B. 2006. Regionalising the available water capacity from readily available data. *Geoderma*, **132**, 391–405.
- SINOWSKI, W. 1995. *Die dreidimensionale Variabilität von Bodeneigenschaften - Ausmaß, Ursachen und Interpolation*. Ph.D. thesis, Technische Universität München.

- SOMMER, M. 1992. *Musterbildung und Stofftransporte in Bodengesellschaften Baden-Württembergs*. Ph.D. thesis, Universität Hohenheim.
- SOMMER, M., WERHAN, M., ZIPPRICH, M., WELLER, U., ZU CASTELL, W., EHRLICH, S., TANDLER, B., & SELIGE, B. 2003. Hierarchical data fusion for mapping soil units at field scale. *Geoderma*, **112**, 179–196.
- SOWA, R., & SCHÜBEL, G. 1972. *Erläuterungsband zur Standortskarte der Staatlichen Forstwirtschaftsbetriebe Königs Wusterhausen und Fürstenwalde (Teil 1)*. Tech. rept. Potsdam.
- SPIES, M. 1989b. Wolkiges Wissen - Faustregeln in Expertensystemen. *Bild der Wissenschaft*, **10**, 60–72.
- SPONAGEL, H., GEHRT, E., FUCHS, M., SOMMER, M., & BÖHNER, J. 1999. Bodenarealabgrenzungen - Parameter zur Ableitung von Bodengesellschaften. *Mitt. Dt. Bodenkdl. Gesell.*, **91**(2), 1108–1111.
- STACKEBRANDT, W., EHMKE, G., & MANHENKE, V. 1997. *Atlas zur Geologie von Brandenburg*. Kleinmachnow: Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg.
- STEINHARDT, U., BLUMENSTEIN, O., & BARSCH, H. 2004. *Lehrbuch der Landschaftsökologie*. 1 edn. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- STOLZ, R. 1998. *Die Verwendung der Fuzzy Logic Theorie zur wissensbasierten Klassifikation von Fernerkundungsdaten - Ein methodischer Ansatz zur Verbesserung von Landnutzungsklassifikationen in mesoskaligen heterogenen Räumen, dargestellt am Einzugsgebiet der Ammer*. Ph.D. thesis, Ludwigs-Maximilians-Universität München.
- STRAHL, J. 2004. *Bericht zur pollenanalytischen Untersuchung von drei Proben aus dem Aufschluss Saalow-Graben II, Profil 2430059, Land Brandenburg*. LBGR Kleinmachnow.
- STRAHL, J. 2005. *Bericht zur pollenanalytischen Untersuchung einer Probe aus dem Profil Zossen, Punkt 4, Horizont 3 (Land Brandenburg)*. LBGR Kleinmachnow.
- SUNILA, R., & HORTTANAINEN, P. 2003. Fuzzy Model of Soil Polygons for Managing the Imprecision. In: *StatGIS: Interfacing Geostatistics, GIS and Spatial Databases. International Workshop*.
- SUNILA, R., E., LAINE., & KREMENOVA, O. 2004. Fuzzy Model and Kriging for imprecise soil polygon boundaries. Pages 489–495 of: *Proceedings 12th International Conference on Geoinformatics. Geospatial Information Research: Bridging the Pacific Atlantic*.
- SYRBE, R.-U. 1996. Fuzzy-Bewertungsmethoden für Landschaftsökologie und Landschaftsplanung. *Archiv für Naturschutz und Landschaftspflege*, **34**, 181–206.

Literatur

- SYRBE, R.-U. 1998. *Fuzzy-Bewertungsmethodik für heterogene Naturräume - dargestellt am Beispiel der Erosionsbewertung im Westlausitzer Hügel- und Bergland*. Sächsische Akademie der Wissenschaften.
- SZIBALSKI, M. 2000. *Großmaßstäbige Regionalisierung labiler Bodenkennwerte in standörtlich hochdiversen Kulturlandschaften*. Ph.D. thesis, Justus-Liebig-Universität Gießen. Naturwissenschaftliche Fakultät.
- TILSCH, H. 1994. *Ausgewählte bodenkundliche Untersuchungen zur Erstellung einer Konzeptbodenkarte im Gebiet des Meßtischblattes Borna-Ost (TK 4841) unter Berücksichtigung von DV-technischen Auswertungen der Reichsbodenschätzung*. M.Phil. thesis, Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- TIZHOOSH, H. R. 1998. *Fuzzy-Bildverarbeitung - Einführung in Theorie und Praxis*. Springer-Verlag.
- TORRA, V., & NARUKAWA, Y. 2007. *Modeling Decisions - Information Fusion and Aggregation Operators*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- TRAEGER, D. H. 1993. *Einführung in die Fuzzy Logik*. Stuttgart: Teubner-Verlag Stuttgart.
- TUFTE, E. R. 2001. *The Visual Display of Quantitative Information*. 2 edn. Cheshire, Connecticut: Graphic Press.
- VETTERLEIN, E. 1986. Bodenphysikalische Parameter auf der Grundlage von Substrat-Horizont-Gruppen. Pages 241–248 of: *Tagungsbericht der AdL, Standortkennzeichnung für die intensive Pflanzenproduktion*.
- VIERTL, R., & HARETER, D. 2005. *Beschreibung und Analyse unscharfer Information - Statistische Methoden für unscharfe Daten*. Wien-New York: Springer-Verlag.
- WÄLDER, O. 2006. Fortpflanzung der 'Unschärfe' von Messdaten auf abgeleitete differential-geometrische Größen. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 6, 491–499.
- WALLBAUM, E. 1992. *Ableitung von Informationen zur Bodenkartierung aus Ergebnissen der Reichsbodenschätzung*. Ph.D. thesis, Humboldt-Universität Berlin. Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau.
- WALTHER, C. 1994. *Vergleich automatisch ermittelter morphographischer Reliefeinheiten mit Ergebnissen der bodenkundlichen Kartierung mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS)*. M.Phil. thesis, Georg-August-Universität Göttingen.
- WELLER, U., ZIPPRICH, M., SOMMER, M., ZU CASTELL, W., & WERHAHN, M. 2007. Mapping Clay Content across Boundaries at the Landscape Scale with Electromagnetic Induction. *Soil Science Society of America Journal*, 71(6).

- WOLF, W., & PEYKE, G. 1999. *Genauere Aussagen in der Geographie durch Betrachtung der Unschärfe - Plädoyer für eine vermehrte Anwendung der Fuzzy-Theorie.*
- ZEITZ, J., & KÜHN, D. 2000. Erarbeitung einer Methode zur Verwendung von Altdaten der Moore für die Kennzeichnung von Flächenbodenformen. *Archiv Acker-Pflanzenbau und Bodenkunde*, 223–238.
- ZHU, A.X., HUDSON, B., BURT, J.E., LUBICH, K., & SIMONSON, D. 2001. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. *Soil Science Society of America Journal*, **65**, 1463–1472.
- ZHU, A.X., MOORE, A., & BURT, J.E. 2006. Prediction of soil properties using fuzzy membership. *In: Proceedings of the 2nd Global Workshop on Digital Soil Mapping, july 4-7.*
- ZIMMERMANN, D., PAVLIK, C., RUGGLES, A., & ARMSTRONG, M. P. 1999. An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting. *Mathematical Geology*, **31**(4).

A Anhang

A.1 Tabellen

Tab. A.1: Namenskonventionen Geometriedaten (GK: Geologische Karte, BSK: Bodenschätzungskarte, DGM: Digitales Geländemodell; BFI: Bodenfeuchteindex (Wassereinfluss); S: Schicht). Die Abkürzungen für die Zielkategorien werden in der Tabelle 5.2 erläutert. Bei Vektordaten wird der Maßstab in Tausend, bei Griddaten die Pixelgröße in Metern angegeben.

Ordnungszahl	Herkunft	Zielkategorie	Geometrie-Art	Maßstab/Pixelgröße
001	GK	BIND	P <i>Punkt</i>	25
002	BSK	BIND	F <i>Fläche</i>	25
003	DGM	Höhe	G <i>Grid</i>	25
004	DGM	Wa (BFI)	G <i>Grid</i>	25
005	GK	HuTiefe (S1)	G <i>Grid</i>	25
006	GK	KaTiefe (S2)	T <i>Thiessen-Polygon</i>	25
007	GK	HuTiefe	T <i>Thiessen-Polygon</i>	25
008	GK	SgTiefe (Schicht3)	T <i>Thiessen-Polygon</i>	25

Tab. A.2: Namenskonventionen Sachdaten (Roh: Originaltabelle, Sep: merkmalssepariert, LX: Schlüsselstabelle). Der Statusbezeichnung wird ggf. die Geometrie-Art (vgl. Tabelle A.1) nachgestellt. Ein möglicher Hierarchieschlüssel wird mit LXH_... gekennzeichnet. Die Zahlenangabe hinter der Geometrie-Art *P* stellt eine Spezifikation der Punktdaten dar (1: Agronomische Einschreibungen, 2: Eintragungen der Arbeitsblätter). Dementsprechend werden auch die anderen Datenarten spezifiziert.

Ordnungszahl	Status	Herkunft	Zielkategorie	Sach-Art
001	Roh	GEO	BIND_P1	INT Merkmalsintensität
002	Sep	GEO	Hu_P2	INT_MA Merkmalsintensität, -mächtigkeit
003	LX	BS	BIND	INT Merkmalsintensität
004	LX	BS	Ka	INT Merkmalsintensität
005	LX	BS	BB	INT Merkmalsintensität

Tab. A.3: Auswahl der zu verschlüsselnden Bodenformen der Forstlichen Standortskartierung mit Übersetzung nach KA5 (BSE: *Bodensystematische Einheit*)

Fein- bodenform	Haupt- bodenform	Hauptbodenform (verbal, separiert nach Substrat und BSE)		Nr. in SEA	KA5- Bodenform
BäS	sB	Sand	Braunerde	60	BB: ss
BbtL	s/IF	Tieflehm	Fahlerde	194	LF-BB: ss/esl
BiS	sRP	Sand	Rostpodsol	73	PP-BB: ss
BsS	sRRE	Sand	Rumpfrosterde	63	BB: ss
CfS	sRa	Sand	Ranker	57	RQ: ss
CpS	bsB	Bändersand	Braunerde	85	lBB: ls
FdSB	sGRa	Sand	Gley-Ranker	211	GG-RQ: ss
FkSU	sUG	Sand	Graugley	305	GG-rGG: ss
GmS	sB	Sand	Braunerde	60	BB: ss
GoSU	sUG	Sand	Graugley	307	GG-rGG: ss
HdSB	sGB	Sand	Braungley	215	GG-BB: ss
KdS	sRa	Sand	Ranker	57	RQ: ss
KgSB	sGFP	Sand	Gley-Podsol	240	GG-PP: ss
KöS	bsRa	Bändersand	Ranker	84	lRQ: ls
KrSG	sHG	Sand	Humusgley	352	GGhh: ss
LhSU	sUG	Sand	Graugley	305	GG-rGG: ss
LuSB	sGRP	Sand	Gley-Rostpodsol	232	rGG-PP: ss
LwS	sB	Sand	Braunerde	60	BB: ss
MuSB	sGB	Sand	Braungley	215	GG-BB: ss
NaSG	sHG	Sand	Humusgley	352	GGhh: ss
NeS	sB	Sand	Braunerde	60	BB: ss
NeSB	sGRRE	Sand	Rumpfrosterde	219	rGG-BB: ss
PaS	bsRa	Bändersand	Ranker	84	lRQ: ls
PhSU	osUG	Klocksand	Graugley	303	GG-rGG: us
RüS	sRRE	Sand	Rumpfrosterde	63	BB: ss
SA		Sand	armer Sand		RQ: ss
ScSG	sHG	Sand	Humusgley	353	GGhh: ss
SeS	bsB	Bändersand	Braunerde	85	BB: ls
SnS	bsB	Bändersand	Braunerde	85	BB: ls
SöS	gB	Grand	Braunerde	130	BB: (k2)ss
SöSB	sGRP	Sand	Gley-Rostpodsol	232	rGG-PP: ss
SpS	sÜP	Sand	Rügpodsol (Braunpodsol)	80	BB-PP: ss
SpSU	sUG	Sand	Graugley	307	GG-rGG: ss
SuS	bsÜP	Bändersand	Rügpodsol	94	BB-PP: ls
SuSU	sUG	Sand	Graugley	305	GG-rGG: ss
SwS	sRa	Sand	Ranker	57	RQ: ss
SwtL	s/IF	Tieflehm	Fahlerde	194	LF-BB: ss/esl
SzS	os V o. K	Klocksand		53	grGGh: us
TeS	sRRE	Sand	Rumpfrosterde	63	BB: ss
WdSB	usGB	Fuchsand	Halbgley	217	GG-BB: ss
WhS	bsRa	Bändersand	Ranker	84	RQ: ls
WhSU	sUG	Sand	Graugley	305	GG-rGG: ss
ZiS	gB	Grand	Braunerde	130	BB: (k2)ss

A Anhang

Tab. A.4: Ordinal- und intervallskalierter Schlüssel für Flächendaten des Geologisches Messtischblattes. Es erfolgte u.a. die Verknüpfung mit dem Hierarchieschlüssel LXH_Sg (Tabelle A.5, S. 183) und dem Schlüssel LXF_BIND (Tabelle 5.6, S. 113). Siehe die Spalten 5 und 7. Die Tabellen für die Zielkategorien K(Kies), Hu(Humosität) und Ka(Kalkigkeit) wurden nicht angegeben.

Rang	Flächenobjekt	Zielkategorien						
		ordinalskaliert			intervallskaliert			
		Sg (nach LXH_Sg)		BIND (nach LXF_BIND)	K	BIND	Hu	Ka
		Stufe 1	Stufe 2	Stufe 0				
1	See	1	1	1	0	0,000	0	0
2	Torf	1	1	1	0	0,000	1	0
3	Humus	1	1	1	0	0,000	0,9	0
4	humoser Boden	1	1	1	0	0,000	0,4	0
5	Moorboden	1	1	2	0	0,077	0,8	0
6	Moorerde	1	1	2	0	0,077	0,7	0
7	kalkiger Moorboden	1	1	2	0	0,077	0,8	0,6
8	Moormergelnester	1	1	2	0	0,077	0,5	0,5
9	Moormergel	1	1	2	0	0,077	0,6	0,7
10	Wiesenmergel	2	1	5	0	0,308	0	0,8
11	Wiesentonmergel	2	1	14	0	1,000	0	0,9
12	Wiesenkalk	2	1	5	0	0,308	0	1
13	Raseneisenstein	3	1	5	0	0,308	0	0
14	Flusssand	3	1	5	0	0,308	0	0
15	Talsand	3	1	5	0	0,308	0	0
16	Talsand, grandig	3	1	3	0,8	0,154	0	0
17	Flugsanddecke	4	2	5	0	0,308	0,15	0
18	Düne	4	2	5	0	0,308	0,2	0
19	Sand	6	3	5	0	0,308	0	0
20	Vorschüttsand	6	3	5	0	0,308	0	0
21	Rinnensand	6	3	5	0	0,308	0	0
22	Rinnenbeckensand	6	3	5	0	0,308	0	0
23	Nachschüttsand	6	3	5	0	0,308	0	0
24	Steinbestreuung	6	3	3	0,9	0,154	0	0
25	Grandbestreuung	6	3	3	0,9	0,154	0	0
26	Kies	6	3	4	1	0,231	0	0
27	Grand	6	3	3	1	0,154	0	0
28	Abschlamm Massen	5	4	8	0	0,538	0,1	0
29	Geschiebemergel (unspezifiziert)	7	3	11	0	0,769	0	0,4
30	unterer Geschiebemergel	7	3	12	0	0,846	0	0,4
31	oberer Geschiebemergel	7	3	11	0	0,769	0	0,4
32	unterer Geschiebemergel (tonig)	7	3	13	0	0,923	0	0,4
33	Glindower Ton	6	3	14	0	1,000	0	0
34	Geschiebedecksand	5	3	6	0	0,385	0	0
35	Fließerde	5	3	10	0	0,692	0	0

Tab. A.5: Hierarchieschlüssel LXH_Sg (Substratgenese). Dieser Schlüssel ist stufig aufgebaut. Die Stufe 0 ist die differenzierteste. Die Objekte werden entsprechend einer vom Experten vorgegebenen Rangfolge fortlaufend nummeriert. Danach folgt die Zuordnung zu hierarchisch höher angesiedelten Kategorien (Stufe 1, Stufe 2, ...)

Genese	Stufe 0 (verbal)	Stufe 0 (Code)	Stufe 1 (verbal)	Stufe 1 (Code)	Stufe 2 (verbal)	Stufe 2 (Code)
og	organogen, biogen	1	Moor	1	Niederung	1
qw	krenogen	2	Wiesenmangel	2	Niederung	1
fl	lakustrisch	3	Fluss...	3	Niederung	1
ff	fluviatil ohne Auen	4	Fluss...	3	Niederung	1
fo	fluviatil in Auen	5	Fluss...	3	Niederung	1
fu	Urstromtalbildungen	6	Fluss...	3	Niederung	1
a	äolisch	7	Flug...	4	Flug...	2
pky	kryoturbar	8	periglaziär	5	Hochfläche	3
pfl	solifluidal, solimixtiv	9	periglaziär	5	Hochfläche	3
pas	deluvial (abgespült)	10	periglaziär	5	Hochfläche	3
fgl	glazilakustrisch	11	fluviglazigen	6	Hochfläche	3
fg	glazifluviatil	12	fluviglazigen	6	Hochfläche	3
gm	abgelagert als Grundmoräne	13	glazigen	7	Hochfläche	3
gs	abgelagert als Stauchmoräne	14	glazigen	7	Hochfläche	3
ge	abgelagert als Endmoräne	15	glazigen	7	Hochfläche	3
uk	kolluvial	16	natürlich umgelagert	8	umgelagert	4
uz	abgeschlämmt, abgeschwemmt	17	natürlich umgelagert	8	umgelagert	4
uar	abgerutscht	18	natürlich umgelagert	8	umgelagert	4
uhg	hangabgelagert	19	natürlich umgelagert	8	umgelagert	4
oj	anthropogen umgelagerte natürliche Substrate	20	anthropogen umgel.	9	umgelagert	4
oy	anthropogen abgelagerte technologische Substrate	21	anthropogen umgel.	9	umgelagert	4

Tab. A.6: Ausgangswichtung und Herkunft der Zielkategorie-Ebenen

Ebenen-Nr	Ebene	Wichtung	Zielkategorie	Herkunft
1	BB_[GK-BSK]_F_0_25	19	Verbraunung	Geologische Karte, Bodenschätzungskarte, M 1 : 25 000
2	BIND_[GK]_F_1S_25	28,5	Bindigkeit	Geologische Karte, 1. Schicht, M 1 : 25 000
3	BIND_[GK]_F_2S_25	28,6	Bindigkeit	Geologische Karte, 2. Schicht, M 1 : 25 000
4	BIND_[GK]_T1_1S	28,1	Bindigkeit	Agronom. Profile (Thiessen-Polygone), 1. Schicht
5	BIND_[GK]_T1_2S	28,2	Bindigkeit	Agronom. Profile (Thiessen-Polygone), 2. Schicht
6	BIND_[GK]_T1_3S	28,3	Bindigkeit	Agronom. Profile (Thiessen-Polygone), 3. Schicht
7	BIND_[GK]_T1_4S	28,4	Bindigkeit	Agronom. Profile (Thiessen-Polygone), 4. Schicht
8	BIND_[GK-BSK]_F_0_25	28,7	Bindigkeit	Geologische Karte, Bodenschätzungskarte, M 1 : 25 000
9	BIND_[MMK]_F_0_100	27	Bindigkeit	MMK, M 1 : 100 000
10	BIND_[GK]_FT1_1S	29	Bindigkeit	Geologische Karte, M 1 : 25 000
11	BIND_[GK]_F_0_300	26	Bindigkeit	Geologie, M 1 : 300 000
12	GG_[GK-BSK]_F_0_25	30	Wassereinfluss (Grundwasser)	Geologische Karte, Bodenschätzungskarte, M 1 : 25 000
13	GG_[HYK]_F_0_50	30	Wassereinfluss (Grundwasser)	Hydrogeologische Karte, M 1 : 50 000
14	HA_[GK-BSK]_F_0_25	18	Humosität (anthropogen)	Geologische Karte, Bodenschätzungskarte, M 1 : 25 000
15	HH_[GK]_T1_1S_25	23	Humosität (hydrogen)	Geologische Karte, 1. Schicht, M 1 : 25 000
16	HH_[GK-BSK]_F_0_25	24	Humosität (hydrogen)	Geologische Karte, Bodenschätzungskarte, M 1 : 25 000
17	HH_[MoorMael]_F_MA	0	Humosität (hydrogen)	Moorkarte (Humboldt-Universität Berlin)
18	HH_[MoorMael]_F_MA	25	Humosität (hydrogen)	Moornächtigkeitskarte (Humboldt-Universität Berlin)
19	HT_[GK-BSK]_F_0_25	18	Humosität (terrigen)	Geologische Karte, Bodenschätzungskarte, M 1 : 25 000
20	Ka_[GK-BSK]_T1_1S_25	21	Kalkigkeit	Geologische Karte, 1. Schicht, M 1 : 25 000
21	Ka_[GK-BSK]_F_0_25	22	Kalkigkeit	Geologische Karte, Bodenschätzungskarte, M 1 : 25 000
22	LF_[GK-BSK]_F_0_25	19	Lesivierung	Geologische Karte, Bodenschätzungskarte, M 1 : 25 000
23	GG_[BFI]_G_0_25	20	Wassereinfluss	Bodenfeuchteindex
24	GG_[GKM]_G_0_25	31	Wassereinfluss	Geomorphographische Karte
25	rGG_[GK-BSK]_F_0_25	30	Wassereinfluss (reliktisches Grundwasser)	Geologische Karte, Bodenschätzungskarte, M 1 : 25 000
26	SS_[GK-BSK]_F_0_25	20	Wassereinfluss (Stauwasser)	Geologische Karte, Bodenschätzungskarte, M 1 : 25 000
27	YY_[TK]_F_0_25	18	Versiegelung	Topographische Karte, M 1 : 25 000
28	HT_[GKM]_G_0_25	15	Humosität (terrigen)	Geomorphographische Karte

Tab. A.7: Spezifikation des DGM 25

DGM 25	
Anordnung der Gitterpunkte:	quadratisch
Gitterweite:	25 m
Höhengenaugigkeit:	$< \pm 2m$
Bezugssystem:	Lage: ETRS 89; Höhe: HN 76

A.2 Quellen

Topografische Karten

- Q1 Topografische Karte 1 : 50 000, Ausgabe 1994, Blatt L3736, Hrsg. LGB Brandenburg
- Q2 Topografische Karte 1 : 25 000, Ausgabe 1994, Blätter 3646, 3647, 3746, 3747; Hrsg. LGB Brandenburg

Luftbilder

- Q3 Digitale Orthofotos 1 : 10 000, Ausgabe 1995, Befliegung 1994; Blätter 3646-NO, 3646-NW, 3646-SO, 3646-SW, 3647-NO, 3647-NW, 3647-SO, 3647-SW, 3746-NO, 3746-NW, 3746-SO, 3746-SW, 3747-NO, 3747-NW, 3747-SO, 3747-SW; Hrsg. LGB Brandenburg

Geologische Karten

- Q4 Geologische Specialkarte von Preußen, BERENDT, G. & DULK, L., Blatt 3646, Ausgabe 1878
- Q5 Geologische Specialkarte von Preußen und den Thüringischen Staaten 1 : 25 000, BERENDT, G. & BRAUNS, D. (Erläuterungen von BERENDT, G.), Blatt 3746, Ausgabe 1882
- Q6 Geologische Specialkarte von Preußen, WAHNSCHAFFE, F., Blatt 3747, Ausgabe 1883
- Q7 Geologische Specialkarte von Preußen und den benachbarten Bundesstaaten 1 : 25 000, , Blatt 3647
- Q8 Geologische Übersichtskarte von Brandenburg 1 : 50 000, HERMSDORF, N., Blatt 0908-2, Ausgabe 1993
- Q9 Geologische Übersichtskarte Landkreis Teltow-Fläming 1 : 100 000, HERMSDORF, N., Ausgabe 2004
- Q10 Geologische Übersichtskarte von Berlin und Umgebung 1 : 100 000, LIPPSTREU, L., Ausgabe 1995
- Q11 Geologische Übersichtskarte des Landes Brandenburg 1 : 300 000, LIPPSTREU, L., HERMSDORF, N. & SONNTAG, A., Ausgabe 1997
- Q12 Atlas zur Geologie von Brandenburg im Maßstab 1 : 100 000, STACKEBRANDT, W. & MANHENKE, V., 2. Auflage, 2002
- Q13 Hydrogeologische Karte von Brandenburg 1 : 50 000, REYES, S., Ausgabe 1999

Bodenkarten

- Q14 Bodenschätzungskarte 1 : 25 000, Blätter 3646, 3647, 3746, 3747, Ausgabe 1933
- Q15 Moorkartierung, Ausschnitt L3746, LEHRKAMP, H. & ZEITZ, J., Humboldt-Universität Berlin, 2003
- Q16 Diplom-Kartierungen, SCHWEITZER, K., BORCHARD, N. & HELMHART, H., 2004
- Q17 Karten des Berichtes „Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Deponie Schöneiche“, FROHSE, L., 1996
- Q18 Umweltatlas Berlin, Karte der Bodengesellschaften, 1 : 50 000, GRENIUS, R., 1995, Hrsg. Senat für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin
- Q19 Mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung 1 : 100 000, SCHMIDT, R. & DIEMANN, R., 1978
- Q20 Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg 1 : 200 000, BAURIEGEL, A., KÜHN, D., HANNEMANN, J. & KAINZ, W., 2001; Hrsg. BGR der Bundesrepublik Deutschland

Bodenkarten (Fortsetzung)

- Q21 Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg 1 : 300 000, BAURIEGEL, A., KÜHN, D., SCHMIDT, R., HERING, J. & HANNEMANN, J., 2001
- Q22 Forstliche Standortskartierung 1 : 10 000, Blätter 1.01 Schmöckwitz 1(1); 1.02 Grünau 1(1); 2.02 Müggelheim 1(1); 3.05 Motzen 1(2), 2(2); 4.04 Kallinchen 1(2), 2(2); 4.05 Zossen 1(3), 2(3), 3(3); 5.02 Zernsdorf 3(3); 5.03 Senzig 1(2), 2(2) ; 5.04 Königs Wusterhausen 1(3), 2(3), 3(3); 5.05 Wüstemark 1(3), 2(3), 3(3); 6.01 Jühnsdorf 1(4), 2(4), 3(4), 4(4); 6.02 Märkisch Wilmersdorf 1(3), 2(3), 3(3); 6.04 Großbeeren 1(3), 2(3), 3(3); 1991

Reliefdaten

- Q23 Digitales Geländemodell (DGM 25), Ausschnitt L3746, Hrsg. LGB Brandenburg (siehe auch Tabelle A.7)

Ableitungen des DGM25 durch die scilands GmbH Göttingen

- Q24 Geomorphographische Karte
- Q25 Hangneigung
- Q26 Exposition
- Q27 Bodenfeuchteindex
- Q28 Höhe über Tiefenlinie
- Q29 Terrain Classification Index

Punktdaten

- Q30 Punktdatenbanken des LBGR

A Anhang

A.3 Karten

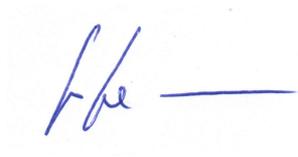
Folgende Karten befinden sich auf der beigelegten CD-ROM. Zum Anzeigen der Karten wird der Adobe® Reader®³⁰ benötigt.

<i>Informationsgrundlagen</i>		<i>Quellen (siehe S. 186)</i>
IG1	Geologisches Messtischblatt	Q4, Q5, Q6, Q7
IG2	Bodenschätzungskarte	Q14
IG3	MMK	Q19
IG4	Luftbilder (Digitale Orthofotos)	Q3
IG5	Moormächtigkeiten und Gewässer	Q2, Q15
IG6	Geomorphologie	Q12
IG7	Geologie	Q11
IG8	Hydrogeologische Karte - Grundwasserisohypsen -	Q13
IG9	Relief	Q23
IG10	Plattengliederung mit geologischen Einheiten	Q4, Q5, Q6, Q7, Q23
IG11	Platten und Niederungen	Q23
IG12	Punktdaten	Q30
<i>Informationsaufbereitung</i>		
IA1	Anthropogene Landschaftsüberprägung	Q2
IA2	Geologie (1.Schicht)	Q4, Q5, Q6, Q7
IA3	Geologie (2.Schicht)	Q4, Q5, Q6, Q7
IA4	Geologie (3.Schicht)	Q4, Q5, Q6, Q7
IA5	Bodenschätzung - Nutzung -	Q14
IA6	Bodenschätzung - Zustandsstufen -	Q14
IA7	Bodenschätzung - Genese -	Q14
IA8	Bodenschätzung - Wasserstufen des Grünlandes -	Q14
IA9	Bodenschätzung/Forstliche Standortkartierung - Bodenarten (u. sonst. Nutzg.) -	Q14
IA10	Relief - Geomorphographische Karte -	Q24
IA11	Relief - Bodenfeuchteindex -	Q27
IA12	Relief - Hangneigung -	Q25
IA13	Relief - Exposition -	Q26
IA14	Relief - Höhe über Tiefenlinie -	Q28
IA15	gepufferte Gewässerlinien	Q1
<i>Informationsauswertung</i>		
IW1	Bodenschätzung und Geologie - Bindigkeit	Q4, Q5, Q6, Q7, Q14
IW2	Bodenschätzung und Geologie - Hydrogener Humus	Q4, Q5, Q6, Q7, Q14
IW3	Bodenschätzung und Geologie - Kalkigkeit	Q4, Q5, Q6, Q7, Q14
IW4	Bodenschätzung und Geologie - Verbraunung	Q4, Q5, Q6, Q7, Q14
IW5	Thiessen-Polygone der Agronomischen Profile	Q4, Q5, Q6, Q7
IW6	Verschneidung IW1 und IW5	Q4, Q5, Q6, Q7, Q14
IW7	Geologische Einheiten - Hexagonales Raster -	Q4, Q5, Q6, Q7
IW8	Humosität der Agronomischen Profile	Q4, Q5, Q6, Q7
IW9	Bindigkeit der Agronomischen Profile (1. Schicht)	Q4, Q5, Q6, Q7
IW10	Kalkigkeit der Agronomischen Profile (1. Schicht)	Q4, Q5, Q6, Q7
IW11	Legendeninvertierung Bindigkeit und Kalkigkeit	Q4, Q5, Q6, Q7
IW12	Verschneidung, Schwerpunktbestimmung und Interpolation der Bindigkeit	Q4, Q5, Q6, Q7, Q14
IW13	Gesamtwassereinfluss	siehe Tabelle A.6
IW14	Gesamtbindigkeit	siehe Tabelle A.6
IW15	Segmentierungsergebnis	siehe Tabelle A.6
IW16	Kern- und Übergangsbereiche von Kalkanmoorgleyen aus Sand	siehe Tabelle A.6
IW17	Kern- und Übergangsbereiche von Braunerden aus Sand	siehe Tabelle A.6
IW18	Kern- und Übergangsbereiche von Fahlerden aus Sandlehm	siehe Tabelle A.6
IW19	Kern- und Übergangsbereiche von Fahlerden und Braunerden	siehe Tabelle A.6
<i>Informationsvisualisierung</i>		
IV1	DGM	Q23
IV2	DGM, Luftbild	Q3, Q23
IV3	DGM, Luftbild und Klassenflächen der Bodenschätzung	Q3, Q19, Q23
IV4	DGM, Luftbild und Einheiten des Geologischen Messtischblattes	Q3, Q5, Q23
IV5	DGM und Hangneigung	Q23, Q25
IV6	DGM, Luftbild und Moormächtigkeiten	Q3, Q15, Q23

³⁰<http://www.adobe.com/de/products/reader/>

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Des Weiteren habe ich nicht versucht diese Dissertation anderweitig einzureichen, auch habe ich keine gleichartige Doktorprüfung an einer anderen Hochschule nicht bestanden.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'H' followed by a horizontal line.

Finowfurt, den 10.02.2009