

Rechnergestützte Identifikation von Böden

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)
der Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften
der Universität Bayreuth

von
Christoph Albrecht
geboren in Meißen

Bayreuth, Februar 2005

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Biologie, Chemie und Geowissenschaften der Universität Bayreuth zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften genehmigten Dissertation.

Die vorliegende Arbeit wurde von Mai 2001 bis Februar 2005 in der Abteilung Bodenphysik der Universität Bayreuth unter Leitung von Prof. Dr. B. Huwe angefertigt.

Promotionsgesuch eingereicht am: 11.02.2005

Tag des mündlichen Kolloquiums: 27.06.2005

Erstgutachter: Prof. Dr. B. Huwe

Zweitgutachter: Prof. Dr. W. Zech

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Zusammenfassung	IX
Summary	XI
I Ausführliche Zusammenfassung	1
1 Einleitung	3
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	3
1.2 <i>fuzzy sets</i> in der Bodenkunde	6
1.2.1 Unsicherheit	6
1.2.2 Literaturüberblick	9
1.3 Systematik und Klassifikation	10
1.4 Grundlagen der Deutschen Bodensystematik	13
2 Material und verwendete Methoden	15
2.1 Datengrundlage	15
2.1.1 Bodenkundliche Datensätze	15
2.1.2 Exkurs: Umrechnung von Farbinformationen	17
2.2 Bestimmungsschlüssel	17
2.3 Clusteranalyse	19
2.4 Regelbasierte Modellierung	25
3 Ergebnisse und Diskussion	29
3.1 Analyse der Bodendaten	29
3.2 Bestimmungsschlüssel	30
3.2.1 Bestimmung von Bodenhorizonten	32

3.2.2	Ermittlung von bodensystematischen Einheiten	32
3.2.3	Ergebnisse und Diskussion	34
3.3	Clusteranalysen	38
3.3.1	Anwendung zur Identifizierung von Bodentypen	38
3.3.2	Anwendung zur Identifizierung von Horizonten	38
3.3.3	Diskussion	41
3.4	Regelbasierte Modellierung	42
3.5	Methodenvergleich	48
4	Fazit	51
	Literaturverzeichnis	64
II	Veröffentlichungen	65
5	Bodensystematik und Bodenklassifikation	67
6	Zur Situation in der deutschen Bodenkunde	101
7	Zuordnung von Bodenfarben	127
8	Anwendung des FKME	135
9	Regelbasierte Horizontidentifikation	163
10	Vergleich von Ansätzen zur Bodenidentifikation	201
III	Anhang	217
11	Bestimmungsschlüssel für Bodenhorizonte	219
12	Bestimmungsschlüssel für Bodensubtypen	235
13	Prototypenmatrix für die Clusteranalyse	259
13.1	Verwendete Variablen	259
13.2	Mögliche Ausprägungen der verwendeten Variablen	259
13.3	Die Matrix C der Prototypen	262
14	Regeln zur Horizontidentifikation	267
14.1	Grundelemente der <i>fuzzy logic</i>	267
14.1.1	Die unscharfe Menge	267

14.1.2 Linguistische Variablen	269
14.1.3 Grundlegende Techniken	270
14.2 Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation	271
14.3 Definitionen der Horizonte	272

IV Erklärungen und Danksagung 293

Abbildungsverzeichnis

1.1	Bodenidentifikation mit einer Systematik und einer Klassifikation	12
2.1	Munsell-Farbraum mit Bereichen gleichen Farbnamens (schematisch)	18
2.2	Vergleich von Variationen des C-Means-Algorithmus	21
3.1	Stark vereinfachte Darstellung der Clusterung von Gley-Horizonten	43
3.2	Flowchart zum Ablauf der regelbasierten Horizontidentifikation	45
3.3	Überspringen von Parametern bei selektiven Definitionen	46
3.4	Überspringen von Parametern bei fehlenden Daten	46
14.1	Grundelemente der <i>fuzzy logic</i>	269
14.2	Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation, Teil 1	276
14.3	Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation, Teil 2	277
14.4	Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation, Teil 3	278
14.5	Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation, Teil 4	279
14.6	Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation, Teil 5	280

Tabellenverzeichnis

2.1	Überblick über die verschiedenen zur Verfügung stehenden Datensätze	16
2.2	Munsellcodes der unveränderten Farben für die automatische Zuordnung eines Munsell-Codes zu einem Farbnamen	18
2.3	Einfluss der Modifikatoren bei der automatischen Zuordnung eines Munsell-Codes zu einem Farbnamen	18
2.4	Ausgewählte ϕ -Werte für den FKME	24
3.1	Qualität der verwendeten Datensätze	30
3.2	Beispiele für Parameterausprägungen in den Bodenhorizont-Definitionen und in bodenkundlichen Datensätzen	31
3.3	Ermittlung der Hauptsymbole im Bestimmungsschlüssel für Bodenhorizonte . .	33
3.4	Höchste Ebene im Bestimmungsschlüssel für Bodensubtypen	35
3.5	Prototypen für die numerische Klassifikation nach KA4, Beispiele	39
3.6	Ergebnisse der Clusterung von Bodenhorizont-Daten	40
3.7	Horizonte, deren Ausprägung in den Datensätzen nicht mit den DBS-Definitionen oder der Beschreibung des bodenbildenden Prozesses übereinstimmt	47
3.8	Vergleich der verwendeten Methoden zur rechnergestützten Identifikation von Böden.	48
11.1	Bestimmungsschlüssel für Horizonte	220
12.1	Bestimmungsschlüssel für Bodensubtypen	236
13.1	Zur Klassifikation verwendete Variablen	260
13.2	Ausprägungen der verwendeten Variablen	261
13.3	Prototypen für die numerische Klassifikation nach KA4	263
14.1	Definitionen der Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation	273
14.2	Definitionen der Horizonte für die regelbasierte Identifizierung	281

Zusammenfassung

Das in Deutschland verwendete Ordnungssystem zur Beschreibung der Pedosphäre ist die Deutsche Bodensystematik (DBS). Damit können die Morphologie und die Entstehung der Böden sehr gut erklärt werden. Bei der praktischen Anwendung, also der Einordnung von Böden in das bestehende System, kommt es jedoch zu Problemen. Sie zeigen sich vor allem darin, dass es verschiedene Interpretationsmöglichkeiten der Profilmorphologie gibt. Die fehlende Objektivität und Reproduzierbarkeit der bodensystematischen Angabe führt dazu, dass das inhaltliche Potenzial dieser Information bei weiterführenden Anwendungen (zum Beispiel Ableitung von Pedotransferfunktionen) nicht ausgeschöpft werden kann.

Die wesentliche Ursache dafür ist eine funktionelle Überladung der DBS. Sie soll gleichermaßen die Ansprüche der wissenschaftlichen und der praktischen Bodenkunde erfüllen (umfassende Beschreibung der Böden und ihrer Beziehungen sowie schnelle und eindeutige Bodenansprache), obwohl sie nur für jeweils einen Zweck optimiert werden kann. Dieser Konflikt, zu dessen Erklärung die Ordnungssysteme Systematik und Klassifikation unterschieden werden, wird zusammen mit Lösungsmöglichkeiten in der Arbeit ausführlich dargestellt.

Bei der Bodenidentifizierung (Einordnung von Böden in ein Ordnungssystem) müssen die kategoriebildenden Merkmale messbar sein. Das ist bei bodensystematischen Angaben nur selten möglich, weil bodenbildende Prozesse kaum messbar sind. Deshalb bleiben Identifizierungen mit der DBS oft hypothetisch. Zur Lösung des Identifikationsproblems müssen entweder die Pedogenesen exakt quantifiziert werden (Beweis der Systematik) oder eine einfache Klassifikation entwickelt werden. Die erste Strategie erfordert umfangreiche Forschungsarbeiten, so dass kurzfristig nur mit einer Klassifikation zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden können. Dazu werden drei Ansätze untersucht:

1. Bei der Entwicklung von Bestimmungsschlüsseln für Bodenhorizonte und Bodensubtypen soll geprüft werden, ob sich die Definitionen der DBS strukturieren lassen.
2. Mit einer *fuzzy* Cluster-/Diskriminanzanalyse werden die vorhandenen Bodendaten statistisch analysiert.
3. Das unscharfe regelbasierte System zur Horizontidentifikation erlaubt die automatisierte Verarbeitung von messbaren Grenzwerten und verbal vorliegendem Expertenwissen.

Die verschiedenen Methoden werden anhand der Kriterien Datenbedarf, Definitionstreue, Ergebnisqualität, Robustheit und Anwendungsmöglichkeit verglichen. Dabei wird deutlich, dass der statistische Ansatz aus methodischen und praktischen Gründen nicht zur Automatisierung der Identifikation geeignet ist. Die Bestimmungsschlüssel sind einfach und sehr definitionstreu, jedoch lässt sich deren Anwendung nicht automatisieren. Es zeigt sich, dass der regelbasierte Ansatz das beste Verfahren für die rechnergestützte Bodenidentifizierung ist. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt gibt es noch Verbesserungspotenziale, aber die breiten Anwendungsmöglichkeiten, die Stabilität und die Robustheit des Verfahrens ermöglichen einen adäquaten Umgang mit den gegenwärtig verfügbaren pedologischen Informationen.

Summary

The German national soil ordering system is termed the German Soil Systematics (GSS). The principle advantage of the system is its innate ability to describe each soil's morphology and genesis in a precise and comprehensible manner. Problems nevertheless occur during the practical application of the GSS. These problems are associated with the allocation of individual soils into the existing soil ordering system. A clarification of the problem is apparent among the varying interpretations of the soil morphology by different soil scientists. The systematic information lacks objectivity and thus reproducibility. As a result the rich systematic content is insufficiently realized and often inapplicable in continuative problems such as the deduction of pedotransfer functions.

The main reason behind the problem is termed 'functional overloading'. This term indicates the GSS's inability to adequately fulfill both scientific and practical needs (extensive description of soils and their interrelationships conflicting with the necessity of fast and objective soil identifications). Nevertheless, the GSS may be optimized for only one of the two goals. The soil ordering systems 'systematics' and 'classification' criteria are distinguished in detail in order to adequately describe the conflict and to present possible long term solutions.

The soil identification (allocation of soils into the ordering system) requires the categorizing characteristics to be measured. This process is nearly impossible for systematic information since the pedogenetic processes are seldom measurable with current technologies. This difficulty is the main cause for hypothetical soil identifications with the GSS. Solving the identification problem would become possible by the quantification of pedogenetic processes (proofing the soil systematics) or by developing a classification from the systematics. The first strategy would require extensive long term research activity. The only viable short term solution is through the development of a graded classification system. Three approaches are analyzed for the latter:

- The first determines whether the GSS definitions may be structured through the development of identification keys for soil horizons and for soil subtypes.
- The second applies a fuzzy cluster/discriminate analysis for the statistical investigation of soil data.
- The third involves a fuzzy rule based system combining measurement data with verbal

expert knowledge.

The approaches are compared based on their criteria data requirements, similarity to the definitions, quality of results, overall robustness as well as their feasibility for practical application. The statistical approach is not suitable for automating the identification due to methodological and practical reasons. The identification keys are simple and optimally reproduce the systematic definitions. Unfortunately, their application is incapable of becoming automated. The rule based modelling approach presents the best results in computerized soil identification. The approach must still be validated, yet it nevertheless offers an adequate processing of pedological information concerning the widespread applicability, the robustness and the stability of the approach.

Teil I

Ausführliche Zusammenfassung

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Böden sind ein wesentlicher Teil von Ökosystemen (Blume et al., 1996). Innerhalb der Ökosphäre sind sie die Basis menschlichen und tierischen Lebens und erfüllen vielfältige Funktionen (Scheffer und Schachtschabel, 1998). Grundlage aller bodenbezogenen Aussagen und Bewertungen ist die Bereitstellung von adäquat aufbereiteten Informationen. Dieser Arbeitsschritt ist im Bereich der Bodenkunde eine besondere Herausforderung, denn die Pedosphäre ist – von Ausnahmen abgesehen – ein Kontinuum. Wenn dieses Kontinuum untersucht wird, fallen bei einer adäquaten Beschreibung große Datenmengen an. Für eine komplette Repräsentation eines räumlichen Sachverhalts würde nach Goodchild (2000) eine unendliche Datenmenge benötigt. Die bei einer Untersuchung gewonnenen Werte müssen daher in geeigneter Form reduziert werden, um die Handhabbarkeit sicherzustellen. Dazu wird oft eine Gruppenbildung benutzt, deren allgemeinsten Fall die Entwicklung eines übergreifenden wissenschaftlichen Ordnungssystems ist, welches mit den Begriffen Systematik, Klassifikation und/oder Taxonomie gekennzeichnet wird. Daneben gibt es auch spezielle Kennzeichnungsmöglichkeiten, zum Beispiel nach der Fruchtbarkeit (Acker- und Grünlandzahlen der Reichsbodenschätzung, Scheffer und Schachtschabel (1998)). In vielen Ländern der Welt existieren nationale Bodenordnungssysteme, eine Auswahl ist in Eswaran et al. (2003) zusammengestellt. Mit der *World Reference Base for Soil Resources (WRB-Klassifikation)* (ISSS/ ISCRIC/ FAO, 1998) existiert ein Vorschlag, der als internationaler Konsens gilt und weltweit gültig ist.

Das in Deutschland gültige Regelwerk zur Bodenansprache ist die Deutsche Bodensystematik (DBS), deren aktuellste Fassung im Handbuch der Bodenkunde (Arbeitskreis Bodensystematik, 2001) veröffentlicht ist. Zusammen mit der Systematik der bodenbildenden Substrate kann die Bodenform abgeleitet werden, in der Informationen zur Pedogenese und zur Beschaffenheit des Substrats integriert werden. Damit stellt die Bodenform die höchste Stufe der Integration bodenkundlicher Informationen dar.

Zur Ableitung der Substratinformation existieren klare Regeln mit festgelegten Grenzwerten, wodurch eine eindeutige Zuordnung gewährleistet wird. Probleme bei der Anwendung resultieren eher aus persönlichen als aus fachlichen Gründen (Altermann und Kühn, 1999). Demgegenüber ist die Ableitung der bodensystematischen Angabe problembehaftet. Die existierenden Definitionen erlauben unterschiedliche Ergebnisse, was sich am deutlichsten in den lebhaften Diskussionen von Bodenkundlerinnen¹ an Profilgruben zeigt². Dieses Problem ist in Deutschland sehr ausgeprägt (Albrecht et al., 2005c), wird aber auch international dokumentiert (für die Arbeit mit der *US Soil Taxonomy*: Shi et al. (2004), für die Arbeit mit der älteren russischen Bodensystematik: Goryachkin et al. (2003), für Neuseeland: Hewitt (2003), für ältere australische Klassifikationen: Mazaheri et al. (1995a)). Eine Ursache dafür ist die hohe Komplexität der Böden: Gleichzeitig laufen vielfältige biologische, chemische und physikalische Ab-, Auf- und Umbauprozesse mit zeitlich und räumlich wechselnden Intensitäten ab, die sich gegenseitig überlagern, verstärken oder abschwächen können. Die Prozesse erzeugen Merkmale, deren Ausprägungsgrad von der Intensität und der Dauer der Prozesse, den Zeichneigenschaften des Substrats und der Ausprägung der Merkmale anderer Prozesse beeinflusst wird. Simonson (1967) geht davon aus, dass an einem Standort alle bodenbildenden Prozesse gleichzeitig ablaufen, wobei sich nur deren Intensität unterscheidet. Demzufolge können prinzipiell immer Merkmale aller Prozesse vorgefunden werden, und es ist Aufgabe der Bodenkundlerin, die Vielfalt der Merkmale entsprechend ihrer Bedeutung zu wichten und so zu einer sinnvollen und belastbaren Aussage zur Einordnung des Bodens zu kommen.

Die enorme Komplexität führt oft zu subjektiven Entscheidungen, unabhängig vom verwendeten Bodenordnungssystem. An manchen Standorten treten die diagnostischen Merkmale mehrerer Prozesse mit ähnlicher Intensität auf, so dass letztendlich die persönliche Meinung oder die Vorlieben der Untersuchenden über die tatsächliche Ansprache des Bodens entscheiden. Gängige Lösungen des Problems sind die Definition der Bodeneinheiten mit festgelegten Grenzwerten oder quantitativen Beschreibungen von Phänomenen bzw. die Festlegung der Abfrage-Reihenfolge diagnostischer Kriterien. Damit wird die Komplexität aber nur scheinbar reduziert. Zwar wird die Bodenansprache eindeutig, jedoch erscheinen die Ergebnisse oft unlogisch, weil die Definitionen das kontinuierlich-komplexe Wesen des Bodens mehr negieren als erfassen. Trotzdem sind solche Ansätze sehr verbreitet, vor allem aus Mangel an Alternativen. Möglichkeiten zum Aufbau von Bodenordnungssystemen wie multiple Definitionen für eine Gruppierungseinheit oder der Einsatz hochgradig integrierender Parameter erscheinen wenig hilfreich, weil dadurch die Bodenbestimmungsanleitungen zu umfangreich werden, die Reversibilität des

¹Personenbezogene Angaben sind in der erweiterten Zusammenfassung aus Gründen der Lesbarkeit nur in der weiblichen Form aufgeführt und schließen die männliche Form selbstverständlich mit ein. Damit folgt die Notation der Satzung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft.

²Im Allgemeinen wird gesagt, dass zehn Bodenkundlerinnen am gleichen Profil zehn verschiedene bodensystematische Einheiten erkennen, wobei die Zahl der Einheiten durchaus größer sein kann.

Identifikationsprozesses verloren geht oder die benötigten Parameter nicht messbar sind. An dieser Stelle kommen Vorteile des EDV-Einsatzes wesentlich zur Geltung:

- Informationen von hoher Komplexität können schnell und einfach verarbeitet werden, so dass auch umfangreiche Datensätze und eine Vielfalt von Beobachtungen verarbeitbar werden.
- Es wird einfacher, bestehende Definitionen tatsächlich einzuhalten. Die Subjektivität, die jeder menschlichen Urteilsfindung anhaftet, kann bei entsprechend gestalteten Computerprogrammen nicht auftreten, weil hier nur vorgegebene Regeln verwendet werden.
- Der zunehmende EDV-Einsatz in der Informationsbeschaffung, -verwaltung und -nutzung erfordert bestimmte Standards. Computerprogramme können Daten entsprechend der vorgegebenen Regeln generieren und so standardkonforme Informationen bereitstellen.

Werden Boden- oder Landschaftsdaten zu grenzwertbasierten Gruppen zugeordnet, kommt es zu einem Informationsverlust, weil eine individuelle Angabe (Beschreibung des einzelnen Bodens) durch eine allgemeine (Beschreibung der Gruppe) ersetzt wird. Dieser zumeist irreversible Schritt führt dazu, dass das Kontinuum der Pedosphäre im Nachhinein nicht mehr reproduziert werden kann. Derart veränderte Daten sind nur noch eingeschränkt oder überhaupt nicht mehr für weitere Anwendungen, zum Beispiel Landschaftsbewertungen oder bodenphysikalische Modellierungen, verwendbar.

Zur Beschreibung des Kontinuums kann die von Zadeh (1965) vorgestellte *Theorie der unscharfen Mengen (fuzzy set theory)* verwendet werden. Sie erlaubt außerdem die Modellierung unscharfer Grenzen und die Verarbeitung vager oder nur verbal vorliegender Informationen. Damit ist die *fuzzy set theory* prädestiniert für den Umgang mit bodenkundlichen Fragestellungen.

In der Literatur gibt es verschiedene Versuche, sich mit rechnergestützten Verfahren an bestehende Bodenordnungssysteme anzunähern, beispielsweise von Verheyen et al. (2001) und von Carré und Girard (2002). Besonders in der erstgenannten Quelle werden aber die Ergebnisse einer statistischen Analyse von Bodendaten als Variationen einer Bodeneinheit interpretiert, ohne dass eine echte Identifikation stattgefunden hat. Ausnahmen stellen die Arbeiten von Mazaheri et al. (1995a, 1997) und Galbraith et al. (1998) dar, in denen Identifikationssysteme für die *Australian Great Soil Groups* beziehungsweise für einige *soil orders* der *US Soil Taxonomy* beschrieben werden. Beide Ansätze werden in Albrecht et al. (2005a) vorgestellt und mit dem in den Abschnitten 2.4/3.4 vorgestellten Verfahren verglichen.

Das Ziel der Untersuchungen ist es anhand verschiedener Verfahren zu testen, ob die Bodenidentifikation nach der Deutschen Bodensystematik automatisiert werden kann. Diese Verfahren

könnten dann in Experten- oder Bodeninformationssysteme einfließen, wo sie vorteilhaft zur Qualitätskontrolle, Standardisierung und Objektivierung der Bodenansprache eingesetzt werden können. Das ideale Ergebnis der Untersuchungen ist ein Verfahren, das die komplette Deutsche Bodensystematik umfasst und sowohl für die Feldarbeit als auch für Datenbankabfragen geeignet ist. Dabei sollen nicht lokal oder inhaltlich begrenzte Lösungen entwickelt werden, sondern allgemeine und bundesweit anwendbare Verfahren.

Den Untersuchungen liegen mehrere Annahmen zugrunde, die hier als Arbeitshypothesen formuliert werden:

- Hypothese 1: Es gibt einen wechselseitigen Zusammenhang zwischen den bodensystematischen Informationen und den beobachteten Bodeneigenschaften.
- Hypothese 2: Die Definitionen der DBS lassen sich so weit strukturieren, dass ihre Anwendung als Algorithmus programmierbar ist.
- Hypothese 3: Die DBS wird seit mehreren Jahrzehnten entwickelt und verbessert. Der jetzige Entwicklungsstand ermöglicht trotz der obengenannten Einschränkungen bei konsequenter Beachtung der Definitionen weitgehend reproduzierbare und objektive Bodenidentifikationen.
- Hypothese 4: Die DBS basiert auf einem Zentralbodenkonzept, das die typische Ausprägung der systematischen Einheiten beschreibt. Mit Hilfe von *fuzzy*-Techniken ist es möglich, die Ähnlichkeit beliebiger Böden zu diesen Prototypen zu quantifizieren.

Im Rahmen der Untersuchungen werden zuerst die theoretischen Grundlagen von Bodensystematik und -klassifikation erörtert (Beschreibung im Kapitel 1.3 der ausführlichen Zusammenfassung (im Folgenden Z), Veröffentlichung im Kapitel 5 des Publikationsteils (Im Folgenden P)). Anschließend werden aktuell bestehende Probleme mit der DBS erörtert (Z 3.2/P 6). Da die vorgestellten Ansätze weitgehend vorhandene Bodendaten auswerten, werden diese Daten ebenfalls analysiert und ein neu entwickeltes Zuordnungssystem für Farbnamen und Munsell-Codes vorgestellt (Z 2.1, 3.1/P 7, 8). Im praktischen Teil der Arbeit werden die Ansätze zur rechnergestützten Identifikation von Böden beschrieben: Bestimmungsschlüssel für Bodenhorizonte und Bodensubtypen (Z 2.2, 3.2/P 6), *fuzzy* Cluster-/Diskriminanzanalyse (Z 2.3, 3.3/P 8) sowie ein regelbasiertes Identifikationssystem für Bodenhorizonte (Z 2.4, 3.4/P 9).

1.2 *fuzzy sets* in der Bodenkunde

1.2.1 Unsicherheit

Unsicherheit ist ein allgemein auftretendes Phänomen, das in allen wissenschaftlichen und praktischen Bereichen zu finden ist. Bothe (1995) nennt die folgenden Arten von Unsicherheit:

- die stochastische Unschärfe (zum Beispiel Fehlertoleranz des verwendeten Messgerätes),
- die informelle Unschärfe (zum Beispiel durch mangelndes Wissen über das Systemverhalten) und
- die lexikalische Unschärfe (zum Beispiel bei unterschiedlicher Bewertung des gleichen Sachverhaltes in einem veränderten Kontext).

Im Alltag werden durch Unsicherheit erzeugte Probleme meist übergangen oder mit Faustregeln, Schätzungen oder Ähnlichem gelöst. In den exakt beschreibenden Wissenschaften sind solche Strategien nicht anwendbar, so dass nach anderen Wegen zum Umgang mit der Unsicherheit gesucht werden muss. Nach McNeill und Freiburger (1994) ist die *fuzzy-set*-Theorie besonders geeignet für die Behandlung von Mehrdeutigkeiten und Unschärfe. G. Peissker (1992, zitiert in Syrbe (1999)) nennt weitere Bedingungen, bei denen die Anwendung von *fuzzy*-Methoden vorteilhaft ist:

1. Das mathematische Prozessmodell ist zu kompliziert oder nicht aufstellbar.
2. Starke Nichtlinearitäten erschweren die Formalisierung.
3. Es gibt starke, nicht zu vernachlässigende Wechselwirkungen zwischen den Eingangsgrößen.
4. Die Messgrößen charakterisieren den Prozess nur indirekt.
5. Es existieren schwer fassbare Zeitkonstanten.

Bei der Modellierung bodenbildender Prozesse sind alle fünf Punkte anzutreffen. Weil die Anwendung der Deutschen Bodensystematik implizit eine Modellierung der Pedogenese ist, kann die Anwendung unscharfer Methoden vorteilhaft sein.

Die Quellen der Unsicherheiten sind sehr vielfältig. Die von Goodchild (2000) im Bezug auf GIS genannten Ursachen lassen sich auch auf bodenkundliche Fragestellungen übertragen: Unsicherheit entsteht,

- weil es schon wegen Ungenauigkeiten bei den Messgeräten unmöglich ist, Daten räumlich und inhaltlich präzise zu ermitteln,
- weil es Definitionsschwierigkeiten gibt (Sachverhalte lassen sich nicht allgemeingültig definieren, bei unterschiedlichen Bearbeitern gibt es unterschiedliche Definitionen des gleichen Begriffs),
- weil viele Datenbanken die zeitliche Dimension bei Landschaftsuntersuchungen ignorieren,

- weil Nutzer von GIS mit schlecht definierten Begriffen arbeiten und so bei der Verwendung von GIS-Werkzeugen unkorrekte Ergebnisse erzielen sowie
- weil Modelle, die in einem GIS verwendet werden, durch interne Generalisierungen selbst Ursache von Unsicherheit sind.

Neben der vereinfachten Verarbeitung verbaler Angaben ist ein Vorteil der *fuzzy set*-Theorie, das mit ihrer Hilfe kontinuierliche Übergänge modelliert werden können. Fisher (2000) definiert den Begriff der Ungewissheit anhand des „Sandhaufen-Paradoxes“, des *Sorites*³. Er vergleicht geographische Sachverhalte mit diesem Paradox und weist nach, dass viele von ihnen „sorit“ sind, also kontinuierliche Übergänge bei ihren Ausprägungen haben. Fisher empfiehlt die Verwendung der Theorie der unscharfen Mengen, wenn sorite Verhältnisse nachweisbar sind. Verschiedene Autoren wie De Gruijter et al. (1997), Lagacherie et al. (1997) oder Mazaheri et al. (1995a) haben Vorteile von *fuzzy*-Anwendungen in der Bodenkunde zusammengestellt. Dabei geht es vornehmlich um die Berücksichtigung der Kontinuität der Bodendecke, die Einarbeitung des Wissens von Einheimischen und Experten sowie den Umgang mit der Komplexität. Die Eignung der *fuzzy sets* erklärt sich neben den obenstehenden Aussagen auch aus dem Vorteil, dass die Möglichkeit einer exakten Feinabstimmung ihrer Operatorstruktur besteht, wodurch sie gut geeignet ist, nichtlineare, vernetzte und damit auch ökologische Zusammenhänge zu beschreiben (Bastian und Schreiber, 1999).

Obwohl in fast allen Artikeln zu Anwendungen der *fuzzy set*-Theorie die Vorteile dieses Ansatzes betont werden, ist die Anwendung doch nicht immer das Maß der Dinge. Bothe (1995) betont, dass bei einigen steuerungstechnischen Aufgaben (Arbeit mit Wenn-Dann-Regeln, Kapitel 2.4) einfache Regler besser anzuwenden sind, und Grunwald et al. (2001) stellten bei bodenkundlichen Untersuchungen fest, dass bei ausreichender Datendichte mit scharfen Cluster-Verfahren bessere Ergebnisse erzielt werden können als mit unscharfen (Kapitel 2.3). Einige Bodenkundler wie Lark und Becket (1998) überarbeiten und erweitern klassische Bodenklassifikationen trotz deutlicher Kritik aus dem „*fuzzy*-Lager“ (zum Beispiel McBratney und De Gruijter (1992), Burrough et al. (1997)).

³Fisher (2000) beschreibt das Paradox folgendermaßen: Ein Sandkorn ist kein Sandhaufen. Wird ein Sandkorn hinzugefügt, ist es immer noch kein Sandhaufen. Wird noch ein Sandkorn hinzugefügt, ist es immer noch kein Sandhaufen usw. Die allgemeine Beschreibung ist: Wenn es n Sandkörner gibt, die keinen Sandhaufen bilden, ergibt sich beim Hinzufügen eines Sandkorns auch kein Sandhaufen. Es gibt eine richtige Ausgangsbedingung (Zustand bei einem Sandkorn) und eine offensichtlich richtige Prämisse (Zustand durch Hinzufügen eines Sandkorns). Bei fortlaufender Anwendung der Prämisse kommt es zu einer falschen Schlussfolgerung, weil laut den bisherigen Aussagen 1 Mio. Sandkörner keinen Sandhaufen bilden, was offensichtlich falsch ist. Ein Paradox liegt vor, wenn eine Abfolge richtiger Prämissen zu einem falschen Schluss führt.

1.2.2 Literaturüberblick

Im Folgenden werden ausgewählte Veröffentlichungen zu *fuzzy sets* in der Bodenkunde vorgestellt. Ausführliche Informationen können den Übersichtsartikeln von McBratney und Odeh (1997) sowie McBratney et al. (2000, 2003) entnommen werden, außerdem arbeiten A.B. McBratney und I.O.A. Odeh an einem Lehrbuch über *fuzzy sets* in der Bodenkunde (mündliche Mitteilung von I.O.A. Odeh).

Nachdem bis zum Beginn der 1990er Jahre nur wenige Veröffentlichungen zur Anwendung von unscharfen Mengen im Bereich der Bodenkunde zu finden waren, wurde die entsprechende Forschung in den letzten 15 Jahren deutlich intensiviert (vergleiche den Umfang der Artikel von Burrough (1989) und McBratney und Odeh (1997)). Sehr häufig werden Bodentypen anhand der Mächtigkeit von diagnostischen Horizonten klassifiziert, zum Beispiel von McBratney et al. (1992), McBratney und De Gruijter (1992), De Gruijter et al. (1997) oder Bragato (2004). Kollias et al. (1999) haben 5 Kartiereinheiten aus Tongehalt und Tiefe des Beginns der Marmorierung abgeleitet und regionalisiert. Einzelne Horizonte sind der Untersuchungsgegenstand der Arbeit von Triantafilis et al. (2001). Sehr oft werden nicht primär bodenkundliche Parameter zur Kennzeichnung von Böden eingesetzt, zum Beispiel EM34-Daten (Triantafilis et al., 2003) oder Luftbilder (Ahn et al., 1999). Sehr beliebt ist die Verwendung topographischer Daten. Lagacherie et al. (1997) clustern Bodenstandorte anhand von pedologischen und topographischen Angaben und nutzen die gewonnenen Informationen zur Extrapolation von Bodeninformationen. Verschiedene Autoren wie De Bruin und Stein (1998), Grunwald et al. (2001) und Park et al. (2001) nutzen das Konzept der Bodenlandschaften, um mit *fuzzy* Clusteranalysen zu flächenhaften Aussagen zu kommen. Ein sehr umfangreiches Modell zur Inferenz von geologischen und Landschaftsdaten ist „SoLIM“ (*Soil Land Inference Model*, Zhu et al. (1996), Zhu (1997), Zhu et al. (2001), Shi et al. (2004)). Darauf aufbauend konnten Zhu (2000) mit künstlichen neuronalen Netzen ein Modell zur unüberwachten Bodenklassifikation entwickeln oder Zhu und Mackay (2001) die Präzision der Einzugsgebiets-Modellierung erhöhen. Mit dem Programm TRCS (*Three-dimensional Rule-based Continuous Soil modelling*, Ameskamp (1997), Ameskamp und Lamp (1998), Lamp und Ameskamp (1998)) kann die Bodendecke eines Gebietes mit mehreren km² Größe modelliert werden, wobei lokales Expertenwissen eine zentrale Rolle spielt. Sehr interessant ist die 3D-Darstellung der Verbreitung einzelner Bodenhorizonte. Erfolgreich konnten *fuzzy*-Ansätze bei der Erosionsmodellierung von Torri et al. (1997), Mitra et al. (1998), Nisar Ahamed et al. (2000a) und Tayfur et al. (2003) eingesetzt werden. Weitere Untersuchungen zu schädlichen Bodenveränderungen beinhalten beispielsweise die Anreicherung von Schwermetallen (Markus und McBratney, 1996, Hendricks Franssen et al., 1997, Hanesch et al., 2001) oder die Kontamination mit Erdöl (Hu et al., 2003).

Fuzzy sets werden auch oft zur Datenauswertung hinsichtlich spezifischer Fragestellungen eingesetzt. Nisar Ahamed et al. (2000b) haben die Landnutzungsseignung eines Untersuchungs-

gebietes bestimmt, Kollias und Kalivas (1998) konnten die Interpretation von Bodendaten mit fuzzy-Regeln verbessern. Oberthür et al. (2000) nutzen das Wissen von Bauern zur Verbesserung von Vorhersage von landwirtschaftsrelevanten Bodeneigenschaften. Lark und Stafford (1998), Lark (1999) und Van Alphen und Stoorvogel (2000) haben kleinstskalig Böden klassifiziert, um damit Informationen für präzise Landwirtschaft bereitzustellen. Assimakopoulos et al. (2003) haben in diesem Zusammenhang den Stickstoff-Düngungsbedarf als Zielkategorie ihrer Untersuchung ausgewählt.

Sehr oft stehen räumliche Informationen über Böden im Mittelpunkt des Interesses. Neben den oben genannten Möglichkeiten zur Inter- oder Extrapolation empfehlen verschiedene Autoren den Einsatz von klassischen Kriging-Verfahren (zum Beispiel Odeh et al. (1992a), McBratney et al. (1992), De Gruijter et al. (1997) und Kollias et al. (1999)). *Fuzzy-Kriging* (Diamond, 1989, Bardossy et al., 1990, Piotrowski et al., 1996) hat sich aber noch nicht durchsetzen können.

1.3 Systematik und Klassifikation

Die Systeme zur Ordnung von Böden werden als Systematik, Klassifikation oder Taxonomie bezeichnet. Dabei werden die Begriffe von verschiedenen Autoren mit wechselnden Inhalten verwendet. Der Begriff Klassifikation ist dabei dreifach belegt und umfasst

1. die statistische Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Daten,
2. das Ergebnis einer solchen Analyse oder der Festlegung von sinnvollen Grenzwerten zur Gruppenbildung sowie
3. die Zuordnung von Objekten zu existierenden Gruppen.

Letztendlich gibt es aber nur zwei Typen von Ordnungssystemen (Siebel, 1968), zu denen sich alle Vorschläge zur Gruppierung von Böden zuordnen lassen:

- **Systematiken** umfassen die grundsätzliche wissenschaftlich-deduktive Gliederung von Objekten in systematische Einheiten. Dabei soll das gesamte Wissen eines Fachgebietes in eine überschaubare Form gebracht werden, im Mittelpunkt stehen sowohl die umfassende Beschreibung einzelner Objekte als auch die Beziehungen zwischen den Objekten. Eine Systematik stellt den Maßstab dar, mit dem sich fachspezifische Sachverhalte adäquat darstellen lassen⁴. Systematische Einheiten sind Idealtypen oder „Ideen“ und damit theoretische Objekte, deren Beschreibung und Strukturierung oft auf Expertenwissen basiert. Beispiele sind die Pflanzen- und Tiersystematik (Mayr, 1975) oder das Periodensystem der Elemente (Ströker, 1968).

⁴Der Begriff „Podsolige Braunerde“ ist innerhalb der Bodenkunde sehr aussagekräftig, spielt aber in anderen Wissensgebieten keine Rolle.

- Im Gegensatz dazu sind **Klassifikationen** die zielorientiert-induktive Gliederung von Objekten. Die entstehenden Klassen werden nur anhand ausgewählter Parameter abgegrenzt, womit ein schneller Überblick bei speziellen Fragestellungen ermöglicht wird. Zur Kennzeichnung der Klassen werden externe, meist naturwissenschaftliche Maßstäbe verwendet. Die Elemente einer Klassifikation haben immer reale Entsprechungen, da sie das Ergebnis der Aggregation realer Objekte sind.

Aus den Definitionen lässt sich ableiten, dass die meisten in der Bodenkunde verwendeten Ordnungssysteme eher Klassifikationen sind. Diese Zuordnung ist immer dann berechtigt, wenn die Böden durch festgelegte Grenzwerte wie Mächtigkeitsangaben, Mindeststoffgehalte oder Texturangaben aufgeteilt werden. Beispiele dafür sind die *US Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1998) oder die *WRB-Klassifikation* (ISSS/ ISCRIC/ FAO, 1998). Zu den wenigen Ausnahmen einer reinen Bodensystematik gehört die russische Bodensystematik (Goryachkin et al., 2003). Die DBS vereint Elemente aus beiden Ordnungssystemen. Die Bezeichnung als Systematik resultiert daraus, dass die bodenbildenden Prozesse Schwerpunkt der Gruppenbildung sind. Klassifikatorische Elemente sind die Grenzwerte der diagnostischen Eigenschaften in den Horizontdefinitionen und die Mächtigkeitskriterien in den Definitionen der bodensystematischen Einheiten.

Der Typ des Ordnungssystems ist wichtig für die Zuordnung neuer Objekte zu den existierenden Gruppen. Dieser Arbeitsschritt wird hier als **Identifikation** bezeichnet. Wenn Böden auf der Basis einer bodenkundlichen Systematik identifiziert werden sollen, deren Elemente pedogenetisch definiert sind, müssen die bodenbildenden Prozesse messbar sein, um eine objektive Einordnung zu ermöglichen. Ohne Messung kann die Identifikation nicht bewiesen und nicht reproduziert werden. Wegen dieser Hindernisse wird meistens mit einer Klassifikation identifiziert. Hier können einfach zu ermittelnde Parameter verwendet werden, die eine eindeutige Zuordnung erleichtern. Zudem ist es oft einfach, aus den Klassendefinitionen einen Bestimmungsschlüssel zu entwickeln. Die Herangehensweise bei der Identifikation mit einer Systematik und einer Klassifikation ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

Zur Zeit sind bodenbildende Prozesse nur schwer oder gar nicht direkt messbar. Deshalb können sie nicht Basis der in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren sein, obwohl die Definitionen der DBS eine solche Herangehensweise erfordern. Die fehlende Messbarkeit erfordert daher die „Übersetzung“ der bodensystematischen Elemente der DBS in klassifikatorische Definitionen. Das Themengebiet Systematik/Klassifikation wird ausführlich in Albrecht et al. (2005b) vorgestellt. Schwerpunkte sind die detaillierte Beschreibung des Unterschieds zwischen den Ordnungssystemen und die Ableitung von Konsequenzen für die weitere bodenkundliche Arbeit.

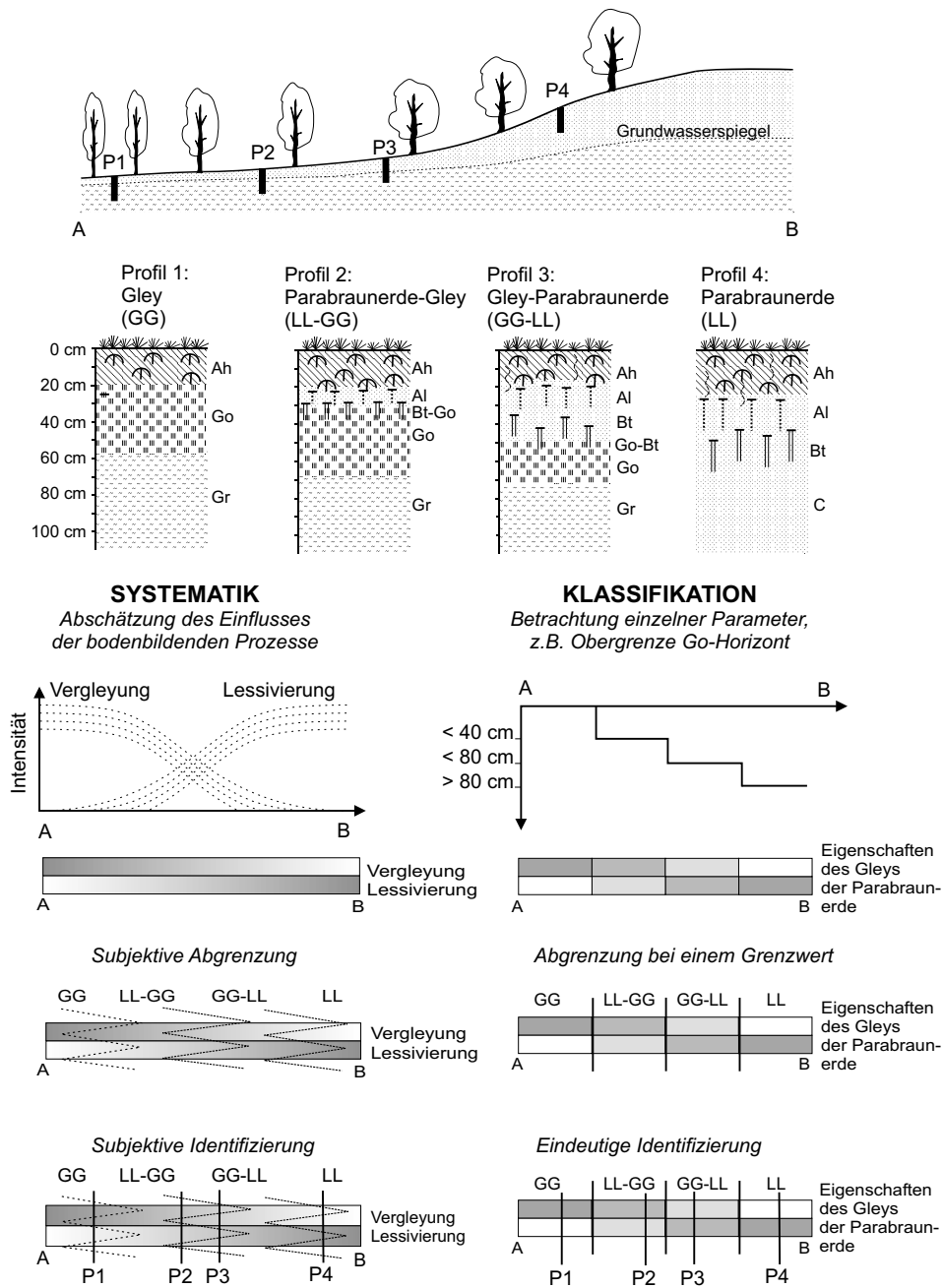


Abbildung 1.1: Bodenidentifikation mit einer Systematik und einer Klassifikation (nach Albrecht et al. (2005b), geändert). Die verwendeten Parameter sind Arbeitskreis Bodensystematik (1998) entnommen

1.4 Grundlagen der Deutschen Bodensystematik

Böden werden in Deutschland nach der Deutschen Bodensystematik identifiziert. Die wesentlichen Grundlagen stammen von Mückenhausen (1965, 1977), der die Ansätze von Kubiens (1953) für mitteleuropäische Verhältnisse adaptierte. In den letzten Jahrzehnten wurde die DBS kontinuierlich weiterentwickelt, die derzeit gültige Version ist in Arbeitskreis Bodensystematik (1998) veröffentlicht.

Der DBS liegt ein dynamisches morphogenetisches Prinzip zugrunde (Arbeitskreis Bodensystematik, 1998), im Mittelpunkt steht die Horizontfolge als Ergebnis bodenbildender Prozesse. Zur korrekten Identifizierung der Böden müssen zuerst die einzelnen Horizonte bestimmt werden. Schlichting und Blume (1979) haben dafür diagnostische Merkmale vorgeschlagen, die seitdem erweitert und konkretisiert wurden.

Aus der Horizontabfolge lassen sich systematische Einheiten auf verschiedenen Hierarchiestufen ableiten. Damit sind maßstabsabhängige Aggregationen der Informationen möglich. Die verwendeten Kategorien sind (Arbeitskreis Bodensystematik, 1998):

- **Abteilungen:** Unterscheidung nach dem Wasserregime (terrestrische, semiterrestrische und (semi)subhydrische Böden sowie Moore),
- **Klassen:** Unterscheidung nach Entwicklungsstand und Grad der Horizontdifferenzierung sowie nach dem Wasserregime (semiterrestrische Böden),
- **Typen:** Unterscheidung nach charakteristischen Horizonten und Horizontfolgen bzw. nach geogenen Merkmalen,
- **Subtypen:** Gliederung der Typen nach qualitativen Merkmalen, Kennzeichnung mit spezifischer Horizontfolge,
- **Varietäten:** Qualitative Modifikationen der Subtypen durch zusätzliche pedogene (teilweise geogene) Merkmale
- **Subvarietäten:** Quantitative Gliederung der Subtypen oder Varietäten.

Außerdem kann die Bodenform angegeben werden, die keine Kategorie der Bodensystematik ist. Sie ergibt sich aus der Kombination von Substratangabe und bodensystematischer Information aus den Kategorien Typ, Subtyp, Varietät oder Subvarietät.

Bodenkundliche Lehrbücher wie Scheffer und Schachtschabel (1998) oder Fiedler (2001) enthalten weiterführende Informationen.

Kapitel 2

Material und verwendete Methoden

2.1 Datengrundlage

2.1.1 Bodenkundliche Datensätze

Die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren beruhen auf der Auswertung bodenkundlicher Datensätze, weshalb die Qualität der zur Verfügung stehenden Daten von entscheidender Bedeutung für den Erfolg der Ansätze ist.

Die untersuchten Daten lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Der größere Teil ist verschiedenen Bodeninformationssystemen entnommen. Sie wurden zur Verfügung gestellt vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLfB), vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB) und von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Ein weiterer Datensatz ist den Exkursionsführern der DBG entnommen (Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (1991, 1993, 1995, 1997, 1999, 2001), Coburger und Kretschmer (1997), hier bezeichnet als Exkursionsdaten). Ein Vergleich der Daten (Tabelle 2.1) zeigt deutliche Heterogenitäten. Jeder Datensatz wird in einem anderen Format gespeichert, was zusätzlichen Aufwand bei der Datenhomogenisierung bedeutet. Außerdem schwankt die Anzahl der Parameter zur Profil- (4 – 41) und Horizontkennzeichnung (17 – 91) erheblich. Bei einigen Datensätzen der geologischen Dienste ist eine Verknüpfung zu Labordatenbanken dokumentiert. Werden diese Angaben mit einbezogen, erhöht sich die Anzahl der Horizontparameter. Die Daten waren für die Untersuchung aber nicht verfügbar.

Die Datensätze unterscheiden sich weiterhin in der zur Kennzeichnung der Böden verwendeten Systematik. In Tabelle 2.1 sind vier verschiedenen Ordnungssysteme aufgeführt, die nicht vollständig kompatibel sind.

Tabelle 2.1: Überblick über die verschiedenen zur Verfügung stehenden Datensätze, P: Parameter, Erläuterung der anderen Abkürzungen im Text

Quelle	Datenformat	Profile	Profil-P.	Horizont-P.	Systematik
NLfB	23 MS Excel [®] -Dateien, getrennt nach Bodentypen, mit getrennten Tabellen für Profil- und Horizontdaten	358	41	31	Niedersachsen (Müller et al., 1984)
LGRB	2 dBase [®] -Dateien, getrennt nach Profil- und Horizontdaten	59	24	20	Baden-Württemberg (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, 1995)
BGR, Datensatz I	MS Excel [®] -Datei mit 35 Tabellen, getrennt nach Bodentypen	159	4	17	KA3, KA4
BGR, Datensatz II	MS Access [®] -Datenbank mit getrennten Tabellen für Profil- und Horizontdaten	357	41	31	Niedersachsen (Müller et al., 1984)
Exkursionsdaten	2 Textdateien, getrennt nach Profil- und Horizontdaten	396	30	91	KA3, KA4, zusätzlich weitere Ordnungssysteme

2.1.2 Exkurs: Umrechnung von Farbinformationen

Die Farbe ist ein wesentliches Kriterium für die Identifizierung von Böden (Schroeder, 1983). Mit der Farbe an sich, den Farb- und Helligkeitsunterschieden zwischen den Horizonten und Variationen innerhalb der Horizonte (Flecken, Marmorierung) lassen sich Horizonte abgrenzen und Rückschlüsse auf pedogenetische Prozesse ziehen.

Farben lassen sich auf verschiedene Weise charakterisieren: Neben der nicht-standardisierten verbalen Angabe des Farbnamens gibt es eine Vielzahl von Koordinatensystemen zur Farbbeschreibung, zum Beispiel CMYK, RGB oder CIELab (Hake und Grünreich, 1994). In der Bodenkunde sind der Farbname und die Angabe des Codes aus der Munsell-Farbtafel (Fujihara Industry Company, 1970) gebräuchlich. Das Munsell-System ist standardisiert, wobei jede Farbe durch Zylinderkoordinaten gekennzeichnet wird. Dabei ist der Farbwert (Hue, *red, yellow, green, blue, purple*) als Winkel auf dem Farbkreis gegeben, die Helligkeit wird über den Value bestimmt (Ordinate), die Farbsättigung durch den Chroma-Wert (Abszisse). Abbildung 2.1 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Munsell-Farbraums. Die zylindrische Form ist nur theoretisch erreichbar. Wenn lediglich die sichtbaren Farben gezeigt werden, ist der Farbraum „ausgefranst“ (siehe Fujihara Industry Company (1970)).

Die Verwendung von Farbangaben in mathematischen und statistischen Verfahren ist nur möglich, wenn metrische Angaben vorhanden sind, also Koordinateninformationen vorliegen. Bei der Betrachtung bodenkundlicher Sachverhalte sollten demzufolge möglichst Munsell-Farbcodes verfügbar sein, was oft nicht der Fall ist. Die Berechnung des Munsell-Codes aus einem Farbnamen ist nicht zulässig (Arbeitsgruppe Boden, 1996), weil es keine Vorschrift zur Festlegung des Farbnamens gibt und deshalb die Namen nicht mit der notwendigen Präzision bestimmbar sind. Andererseits wird jeder verwendete Code benannt, so dass es möglich ist, die Codes nach Namen zu sortieren und durch einfache Mittelwertbildung den typischen Munsell-Code zu jedem Farbnamen zu bestimmen. Abbildung 2.1 zeigt schematisch die Lage von drei Farbbereichen innerhalb des Munsell-Farbraums.

Weiterhin folgt die Namensgebung bestimmten Regeln, was die Ableitung des Munsell-Codes aus beliebigen Farbnamen ermöglicht. Einzige Voraussetzung ist, dass alle Elemente des Namens in einem Regelwerk zur Code-Ableitung definiert sind. In den Tabellen 2.2 und 2.3 sind die Munsell-Codes der bodenkundlichen Grundfarben sowie der Einfluss einzelner Farbmodifikatoren aufgeführt. Die Methodenentwicklung und die sehr guten Anwendungsergebnisse sind zusammen mit einem Beispiel in Albrecht et al. (2004) dokumentiert.

2.2 Bestimmungsschlüssel

Bestimmungsschlüssel können als das klassische Werkzeug zur Identifikation von Objekten bezeichnet werden. Sie werden in nahezu allen naturwissenschaftlichen Bereichen verwendet.

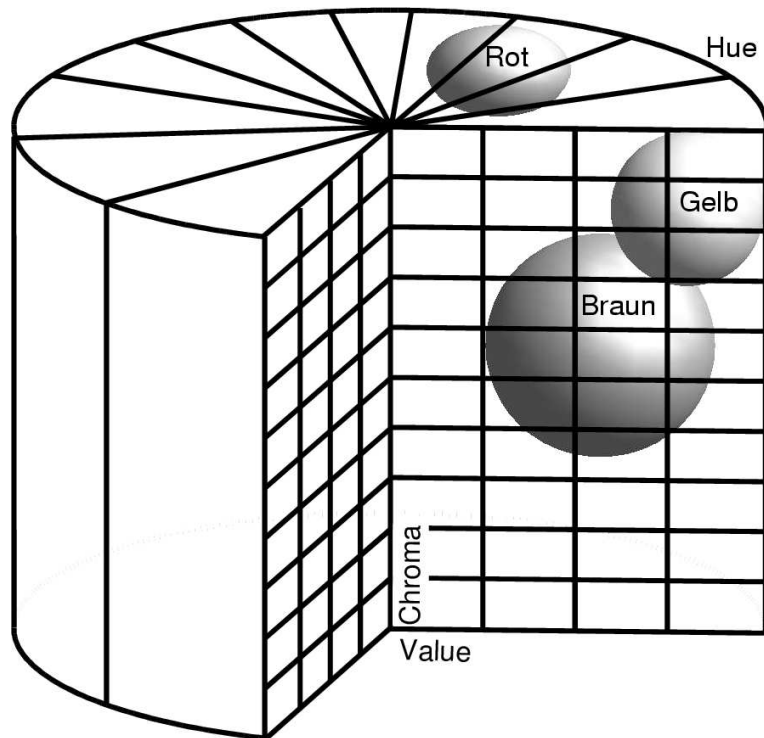


Abbildung 2.1: Munsell-Farbraum mit Bereichen gleichen Farbnamens (schematisch)

Tabelle 2.2: Munsellcodes der unveränderten Farben für die automatische Zuordnung eines Munsell-Codes zu einem Farbnamen

Farbe	Munsell-Code	Farbe	Munsell-Code	Farbe	Munsell-Code
blau	5B 6/7	braun	7.5YR 4/7	gelb	2.5Y 7.5/7
grün	5G 6/7	rot	7.5R 4/7	grau	N 5
schwarz	N 1.5	weiß	N 9	violett	5P 5.5/4.5
orange	5YR 6.5/7	oliv	5Y 4.5/5	türkis	5BG 6/7
ocker	2.5Y 5/6				

Tabelle 2.3: Einfluss der Modifikatoren bei der automatischen Zuordnung eines Munsell-Codes zu einem Farbnamen

Modifikator	Veränderung des Value-Wertes	Veränderung des Chroma-Wertes
hell	1.5	0
dunkel	-1.5	0
leuchtend	0	1.5
fahl	0	-2
schmutzig	-1	-1.5
-lich	0	-1
-stichig	0	-1

Beispiele sind die Schlüssel zur Pflanzenbestimmung (Bäßler et al., 2000) oder Gesteinsbestimmungsschlüssel (Schumann, 1997). Die bekanntesten Bestimmungsschlüssel in der Bodenkunde sind die *Keys to Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1998) und die WRB-Klassifikation (ISSS/ISCRIC/FAO, 1998).

Die automatisch erstellte Version von Bestimmungsschlüsseln heißt *decision* oder *classification trees* und wird auch in jüngster Zeit erfolgreich in verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten eingesetzt (Henderson et al., 2005, Scull et al., 2005). Ein sehr verbreiteter Vertreter sind *Classification and Regression Trees* (CART, Breiman et al. (1984)).

Dem Autor ist keine grundlegende Literatur zur Entwicklung von manuell erstellten Bestimmungsschlüsseln bekannt. Grundsätzlich müssen die Eigenschaften der Zielobjekte zusammengestellt und dabei diejenigen herausgearbeitet werden, die bei möglichst wenigen oder nur einer Kategorie auftreten. Durch eine geschickte Anordnung der Abfragen lassen sich alle Objekte eindeutig identifizieren.

Parameter, die sehr eindeutig verschiedene Gruppen von Objekten trennen, kommen dabei auf hoher Ebene, also am Beginn der Abfrage, zum Einsatz. Je spezifischer die Eigenschaften der Zielkategorie sind, desto näher wird es am Beginn des Schlüssels angeordnet. Dadurch wird es möglich, schlecht spezifizierte Kategorien mit gleicher Genauigkeit zu ermitteln, weil alle anderen bereits ausgeschlossen wurden.

2.3 Clusteranalyse

Die Clusteranalyse ist die unüberwachte Klassifizierung von Daten und deren Einordnung in Gruppen (Cluster) (Schuchard-Ficher et al., 1982). Bei der *fuzzy* Clusteranalyse können sich die Gruppen überlappen, d.h., dass die Grenzen zwischen ihnen nicht präzise festlegbar sind und einzelne Elemente zu verschiedenen Clustern gehören können (McBratney et al., 1992, McBratney und De Gruijter, 1992, McBratney und Odeh, 1997). Obwohl die unscharfe Clusterung im Übersichtsartikel zur Clusterung von Daten von Jain et al. (1999) nur eine untergeordnete Rolle spielt, geben Gao und Xie (2000) an, dass sich die Forschung zur Clusteranalyse inzwischen hauptsächlich mit unscharfen Verfahren beschäftigt. Eine ausführliche Übersicht zu diesen ist in Bezdek et al. (1999) zu finden. Einer der grundlegenden und zugleich der am weitesten verbreitete Algorithmus zur unscharfen Clusterung von Daten ist der *fuzzy c-means*-Algorithmus (FCM) (Höppner et al., 1997). Die ersten Arbeiten zu diesem Thema stammen von Ruspini (1969), Dunn (1974) und Bezdek (1974). Bezdek (1981) entwickelte die allgemeine Grundform des FCM. Eine wichtige Erweiterung war die Einführung der *extragrade*-Klasse durch De Gruijter und McBratney (1988). Damit ist es möglich, den Einfluss von Ausreißern auf das Gesamtergebnis zu minimieren, weil außerhalb der Grundgesamtheit liegende Objekte in einer separaten Klasse gesammelt werden und damit nicht die Zugehörigkeitswerte anderer Objekte

und die Clusterzentren negativ beeinflussen. Die Autoren haben den Algorithmus als *fuzzy k-means with extragrades* bezeichnet, gängige synonyme Abkürzungen sind „FKME“, „FCME“ und „fc+1m“. Da sich diese Cluster überlappen können und somit fließende Übergänge zwischen ihnen möglich sind, wird in der Literatur auch von kontinuierlichen Klassen (*continuous classes*) gesprochen (McBratney und De Gruijter, 1992).

Abbildung 2.2 zeigt den Unterschied zwischen den verschiedenen Cluster-Ansätzen. Die „harte“ Clusterung mit dem C-Means-Algorithmus (CM, Abbildung (a)) erzeugt Gruppen, in denen alle Elemente die gleiche Zugehörigkeit zum Klassenzentrum haben. Bei der Anwendung des FCM (Abbildung (b)) haben Objekte, die weit entfernt vom Klassenzentrum liegen, geringere Zugehörigkeiten als nahe liegende. Der Zugehörigkeitsgrad kann auch als Ähnlichkeit interpretiert werden. Der Vorteil des FCM fällt vor allem bei dem Objekt x ins Auge, weil es etwa in der Mitte zwischen den Klassenzentren liegt und – intuitiv sehr leicht nachvollziehbar – beiden Zentren zum etwa gleichen Grad zugeordnet wird. Der FKME (Abbildung (c)) ist bei Ausreißern (Objekt y) sehr vorteilhaft. Diese Elemente werden der *extragrade*-Klasse zugeordnet, so dass der Einfluss auf die Gruppenbildung geringer wird und die entstehenden Cluster kompakter wirken. Bei jeder Abbildung liegen die Klassenzentren (bezeichnet mit A und B) an anderer Stelle und rücken von oben nach unten mehr in die Mitte der nicht näher bezeichneten quadratischen (Cluster A) und runden (Cluster B) Objekte.

Der FKME, der zur statistischen Analyse im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, gehört zu den partitionierenden Clusterverfahren, d.h., dass eine Grundmenge von Objekten iterativ in kleinere Gruppen zerlegt wird, bis eine konsistente Einteilung vorliegt. Im Gegensatz dazu stehen die hierarchischen Verfahren, wo die einzelnen Objekte in Gruppen zusammengefasst werden (Bacher, 1994).

Die Notation erfolgt meist in Matrizenform. Gegeben sind zwei Matrizen,

- die Matrix $\mathbf{M} = (m_{ic})$ der Größe $n \times k$ (n : Anzahl der Objekte, k : Anzahl der Cluster) sowie
- die Matrix $\mathbf{C} = (c_{cv})$ der Größe $k \times p$ (k : Anzahl der Cluster, p : Anzahl der Eigenschaften).

Die Matrix \mathbf{M} enthält die Informationen, in welchem Cluster die jeweiligen Objekte liegen, in der Matrix \mathbf{C} werden die Clusterzentren lokalisiert. Die Objekte werden als k -dimensionale Vektoren beschrieben, ebenso wie die Clusterzentren. Es ist daher möglich, eine dritte Matrix $\mathbf{Z} = (z_i)$ aus allen Objekten zu erstellen, die dann die Größe $n \times p$ hat. Die Clusterbildung erfolgt durch die Minimierung der Streuung innerhalb der Cluster, also der Minimierung der Gleichung

$$J(\mathbf{Z}, \mathbf{M}, \mathbf{C}) = \alpha \sum_{i=1}^n \sum_{c=1}^k m_{ic}^{\phi} d_{ic}^2 + (1 - \alpha) \sum_{i=1}^n m_{i*}^{\phi} \sum_{c=1}^k d_{ic}^{-2} \quad (2.1)$$

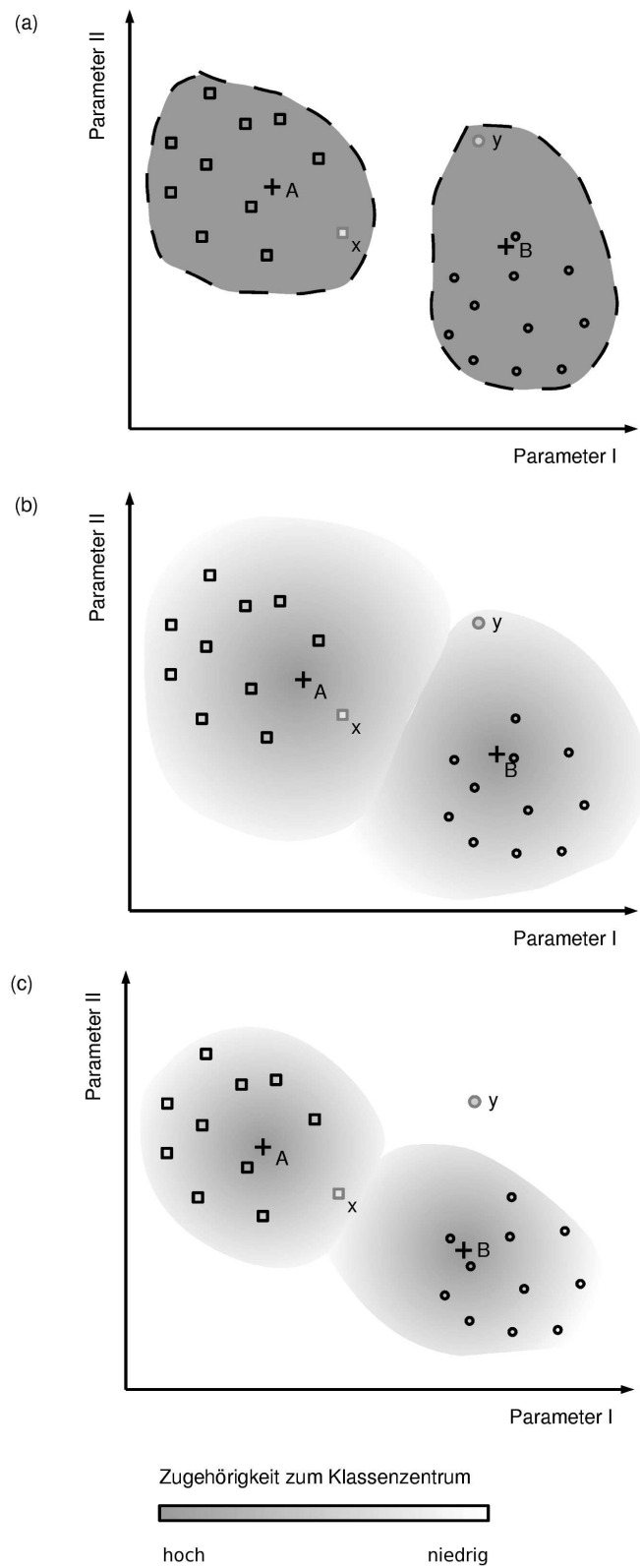


Abbildung 2.2: Vergleich der CM (a), des FCM (b) und des FKME (c) für die Clustering mit zwei Parametern und zwei Klassen, schematisch, Erläuterungen im Text

- m_{ic} Zugehörigkeit des Objektes i zum Cluster c , $m_{ic} \in [0, 1]$
 m_{i^*} Zugehörigkeit des Objektes i zur *extragrade*-Klasse
 d_{ic}^2 Distanz zwischen dem Objekt i und Clusterzentrum c entsprechend eines gewählten Distanzmaßes (siehe unten)
 φ Grad der Unschärfe, $\varphi \in [1, \infty)$
 α Einfluss der *extragrade* Klasse, $\alpha \in [0, 0.5]$

Der Exponent φ gibt den Grad der Unschärfe der Cluster an. Beträgt er 1, kommt es zu keiner Überlappung, es wird also eine nicht-*fuzzy* Analyse durchgeführt. Bei $\varphi \Rightarrow \infty$ liegt eine vollständige Überlappung vor und es können keine einzelnen Cluster bestimmt werden. Zusätzlich muss ein ε -Wert bestimmt werden. Diese Variable ist das Stopp-Kriterium des Algorithmus (siehe unten).

Bei bodenkundlichen Anwendungen des FKME wird oft die Euklidische Distanz verwendet, weil sie bei homogenen und isotropen Daten gültige Ergebnisse liefert. In Abhängigkeit von den Eigenschaften der Eingangsdaten kann es aber zu suboptimalen Klassifizierungen kommen, weil jeder Eigenschaft bei der Klassifizierung das gleiche Gewicht gegeben wird. Sind zusätzliche Informationen über die Daten vorhanden, ist eine andere Distanz zu wählen. Verschiedene Autoren empfehlen die Verwendung der Mahalanobis-Distanz (Bezdek, 1981, McBratney und De Gruijter, 1992, Mazaheri et al., 1995a), die auch in den hier beschriebenen Untersuchungen verwendet wird. Diese Distanz ist definiert als

$$d_{ic}^2 = (x_i - c_c)^T A (x_i - c_c). \quad (2.2)$$

A ist dabei die Varianz-Kovarianz-Matrix.

Nach der Bestimmung der Vorbedingungen (c , φ , ε), der Füllung der Matrizen \mathbf{C} und \mathbf{M} mit zum Beispiel Zufallszahlen und der Wahl eines geeigneten Distanzmaßes werden beim FKME bei jeder Iteration folgende Berechnungen durchgeführt:

1. Neuberechnung der Zugehörigkeitswerte in \mathbf{M} mit

$$m_{ic} = \frac{d_{ic}^{-2/(\varphi-1)}}{\sum_{j=1}^k d_{ij}^{-2/(\varphi-1)} + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \sum_{j=1}^k d_{ij}^{-2} \right)^{-1/(\varphi-1)}}, \quad i = 1, \dots, n; c = 1, \dots, k \quad (2.3)$$

$$m_{i^*} = \frac{\left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \sum_{j=1}^k d_{ij}^{-2} \right)^{-1/(\varphi-1)}}{\sum_{j=1}^k d_{ij}^{-2/(\varphi-1)} + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \sum_{j=1}^k d_{ij}^{-2} \right)^{-1/(\varphi-1)}}, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

2. (Neu)Berechnung der Clusterzentren mit

$$c_c = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ m_{ic}^\varphi - \frac{1-\alpha}{\alpha} d_{ic}^{-4} m_{i^*}^\varphi \right\} x_i}{\sum_{i=1}^n \left\{ m_{ic}^\varphi - \frac{1-\alpha}{\alpha} d_{ic}^{-4} m_{i^*}^\varphi \right\}}, \quad c = 1, \dots, k. \quad (2.5)$$

Der Algorithmus wird gestoppt, wenn $\| \mathbf{M}_l - \mathbf{M}_{l-1} \| \leq \varepsilon$. Als Ergebnis liegen die Neuberechneten Matrizen \mathbf{K} und \mathbf{M} mit den Clusterzentren und den Zugehörigkeitswerten der Objekte zu diesen Zentren vor (McBratney und De Gruijter, 1992).

Weitere Modifikationen der unscharfen Clusteranalyse beinhalten u.a. die präzise Ermittlung von *extra-* und *intragrades* (Ménard et al., 2000), die Clusterung unscharfer Objekte (Yang und Liu, 1999), die automatische Ermittlung der optimalen Clusteranzahl (Flores-Sintas et al., 1998, 2001) oder eine Clusterung, wenn der Abstand zwischen Objekt und Klassenzentrum nur unscharf gegeben ist (Kamimura und Kurano, 2001).

Es gibt eine Vielzahl von Gütemaßen für unscharfe Klassifikationen. Sehr häufig werden die *Normalisierte Klassifikations-Entropie* H' und der *fuzziness performance-Index* F' verwendet (Odeh et al. (1992b), De Bruin und Stein (1998), Grunwald et al. (2001), Lark (2001), wobei begriffliche Unterschiede zu verzeichnen sind). Mit H' wird der Grad der Disorganisation gemessen, mit F' der Grad der Unschärfe (Odeh et al., 1990). Lagacherie et al. (1997) verwenden die sogenannte *fuzzy* Entropie H zur Untersuchung ihrer Daten. De Bruin und Stein (1998) schlagen eine Erweiterung des klassischen Bestimmtheitsmaßes für unscharfe Mengen vor. In der *fuzzy*-Variante muss der Zusammenhang zwischen den Clusterzugehörigkeiten und den Ausprägungen der externen Variable per Regressionsanalyse ermittelt werden. Die Summe der Abweichungsquadrate innerhalb der Klassen wird durch die residuale Summe der Abweichungsquadrate ersetzt. Die von Ahn et al. (1999) eingeführte *S*-Funktion misst die allgemeine Kompaktheit und die Clustertrennung einer Partitionierung mit dem FCM. Mit dem *confusion index* (CI, Burrough et al. (1997)) kann der Grad der Zuordnung von Objekten zu einem Cluster ermittelt werden. Speziell für geographische Anwendungen führen Lagacherie et al. (1997) noch zwei weitere Maßzahlen ein. Mit dem *Geary-Nachbarschaftskoeffizienten* wird die kartographische Darstellbarkeit der ermittelten Cluster überprüft, welche dann gegeben ist, wenn diese räumlich kohärent sind. Das Mittel der Geary-Koeffizienten aller Cluster ergibt den *Index der geographischen Kohärenz* (IGC). Zur Messung der Stabilität oder Robustheit der Klassifizierung wird der *Zuordnungsfehler* ermittelt (Lagacherie et al., 1997). In dieser Arbeit wird nur der *confusion index* verwendet, weil die Berechnung weiterer Gütemaße nicht sinnvoll ist.

Der FCM ist kein Algorithmus, der in jedem Fall eine optimale Datenklassifikation ermöglicht. Das hat verschiedene Ursachen, die zu Kritik am FCM führt.

- Der Algorithmus kann bei unterschiedlichen Initialisierungen von \mathbf{C} und \mathbf{M} zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Die Ursache dafür ist, dass die Funktion $J(\mathbf{Z}, \mathbf{M}, \mathbf{C})$ nicht konvex ist und demzufolge mehrere lokale Minima haben kann (Groenen und Jajuga, 2001). Minasny und McBratney (2002) lösen das Problem durch mehrere aufein-

Tabelle 2.4: Ausgewählte ϕ -Werte für den FKME

ϕ	Quelle
2	Ahn et al. (1999)
1.5	McBratney und De Gruijter (1992), Lagacherie et al. (1997) Lahdenperä et al. (2001)
1.45	Hendricks Franssen et al. (1997)
1.3	Hendricks Franssen et al. (1997)
1.2	Triantafilis et al. (2001)
1.08	Mazaheri et al. (1995a)

anderfolgende FKME-Läufe mit jeweils unterschiedlichen Initialisierungen. Zahid et al. (2001) schlagen eine Erweiterung des FCM vor, bei der bei jedem Iterationsschritt mit Hilfe eines „Nächster-Nachbar-Algorithmus“ überprüft wird, ob mit dem globalen oder einem lokalen Minimum gerechnet wird. Im zweitgenannten Fall werden die Zugehörigkeiten so lange verschoben, bis das globale Minimum gefunden wird. Damit können aber die Probleme, die bei der Anwendung auf die DBS entstanden sind, nicht gelöst werden.

- Der zweite Kritikpunkt betrifft den *fuzzyfier* (Unschärfeexponenten) ϕ . Für diesen Wert gibt es keine Berechnungs- bzw. Auswahlvorschrift (Ahn et al., 1999). Bei verschiedenen Autoren werden Empfehlungen für die Wahl dieses Wertes angegeben (zum Beispiel Burrough et al. (1997), Gao und Xie (2000)). Bezdek (1981), Grunwald et al. (2001) und sehr ausführlich De Bruin und Stein (1998) zeigen den Einfluss unterschiedlicher ϕ -Werte auf das Klassifikationsergebnis. Teilweise wird versucht, anhand der oben genannten Güte- maße einen optimalen Wert zu finden. Die Grundaussage ist jedoch, dass ϕ auf empirischem Weg entsprechend der Aufgabenstellung ermittelt werden muss. Mazaheri et al. (1995a) haben den Wert über „*trial and error*“ aus einer Zahlenreihe gewonnen. Tabelle 2.4 zeigt eine Auswahl von verwendeten ϕ -Werten.
- Ein weiteres Problem ist, dass über alle Elemente in den Matrizen \mathbf{M} , \mathbf{C} und \mathbf{X} summiert wird. Das bedeutet, dass in allen Matrixfeldern gültige Einträge vorhanden sein müssen, damit der Algorithmus stabil arbeiten kann. Bei den Objekten müssen also jegliche Eigenschaften bekannt sein, der Algorithmus ist anfällig für fehlende Werte. Die Clusterung unvollständiger Datensätze ist mit dem Ansatz von Yang und Shih (2001) möglich. Dazu müssen aber die Ähnlichkeiten aller Elemente in Matrizen dargestellt werden (pro Merkmal eine Matrix) und die fehlenden Daten zuverlässig aus anderen Quellen bestimmbar sein.

- Die Zugehörigkeitswerte sind relative Zahlen. Sie lassen sich also nicht als absolut typische Werte der Zugehörigkeit eines Objektes zu einer Klasse interpretieren, sondern nur als typisch im Bezug auf den verwendeten Datensatz. Dies ist besonders zu beachten, wenn Trainingsdaten für andere Anwendungen aus Clusteranalysen gewonnen werden (Ménard et al., 2000).

2.4 Regelbasierte Modellierung

Bei der Arbeit mit regelbasierten Modellen werden die Grundelemente der *fuzzy logic* – unscharfe Menge, linguistische Variable, logischer Schluss und andere – eingesetzt. Ausführliche Informationen dazu sind in den Lehrbüchern zu diesem Thema zu finden, beispielsweise in Biewer (1997), Bothe (1995) oder Altrock und Zimmermann (1993). Im Anhang, Kapitel 14, sind die genannten Grundelemente zusammengefasst. Regelbasierte Modelle werden sehr erfolgreich zur Steuerung ingenieurtechnischer Prozesse eingesetzt (Beispiele unter anderem in Zimmermann (2001)). Im Vergleich zu *fuzzy* Clusteranalysen werden *fuzzy* regelbasierte Modelle in der Bodenkunde weitaus seltener eingesetzt. Beispiele sind die bereits erwähnten Expertensysteme zur Bodenidentifizierung mit der *US Soil Taxonomy* (Galbraith et al., 1998) und zur dreidimensionalen Modellierung der Bodendecke (TRCS, Ameskamp (1997)) oder die Identifikation degradierter Waldböden (Riedler und Jandl, 2002).

Regelbasierte Modelle können auch bezeichnet werden als direkte Umsetzung verbal vorliegenden Expertenwissens in eine rechen-technisch verarbeitbare Form. Die dabei erzielten Ergebnisse sind oft (intuitiv) besser als die Ergebnisse vergleichbarer deterministischer Beschreibungen, so dass in der Literatur keine grundsätzliche Methodenkritik zu finden ist.

Regelbasierte Modelle in der hier verwendeten Form setzen sich zusammen aus einer Menge von WENN-DANN-Regeln R , die einheitliche Prämissen A verwenden und eine einheitliche Ergebnismenge H haben. Für die Erklärung der verwendeten Begriffe wird nochmals auf Kapitel 14 im Anhang verwiesen. In der Beschreibung der regelbasierten Systeme werden die folgenden Symbole verwendet¹:

¹Die mathematische Notation und die verwendeten Begriffe sind Bardossy und Duckstein (1995) entnommen oder in Anlehnung an diese Quelle definiert.

$E = (e_1, e_2, \dots, e_k, \dots, e_K)$	Bodeneigenschaften, die als Parameter in dem System verwendet werden
K	Gesamtzahl der Bodeneigenschaften
$L = (l_1, l_2, \dots, l_k, \dots, l_K)$	Als linguistische Variablen dargestellte Parameter
$A = (a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_K)$	Prämissen der einzelnen Regeln, bestehend aus K Teilen (eine Teilprämisse pro Bodeneigenschaft)
$H = (h_1, h_2, \dots, h_n, \dots, h_N)$	Menge der als mögliches Ergebnis definierten Horizonte
N	Gesamtzahl der Horizonte
$R = (r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_I)$	Menge der Regeln zur Verknüpfung von A und H
I	Gesamtzahl der Regeln
μ_i	Zugehörigkeitswert des Horizonts i zur Menge der Horizonte nach Anwendung der Regel r_i
v_i	<i>degree of fulfillment</i> (Erfülltheitsgrad der Regel i)

Die Entwicklung eines regelbasierten Systems umfasst die Definition der drei genannten Elemente:

- Die Prämissen $A = (a_1, a_2, \dots, a_K)$ werden aus den in *fuzzy sets* dargestellten Bodeneigenschaften $E = (e_1, e_2, \dots, e_K)$ ermittelt. Dazu werden alle verwendeten Parameter E in Form von linguistischen Variablen $L = (l_1, l_2, \dots, l_K)$ dargestellt, um eine Fuzzifizierung zu ermöglichen. Die a_k sind *fuzzy sets*.
- Die möglichen Ergebnisse $H = (h_1, h_2, \dots, h_N)$ werden aus den in der DBS definierten Bodenhorizonten zusammengestellt.
- Die Prämissen und die Ergebnisse werden mit einem Satz von Regeln $R = (r_1, r_2, \dots, r_I)$ verknüpft. Jede Regel hat die Struktur

$$r_i : \text{WENN } a_1 = l_1(P) \quad \text{UND } a_2 = l_2(Q) \\ \text{UND } a_3 = l_3(R) \quad \text{UND } \dots \quad \text{UND } a_K = l_k(X)$$

$$\text{DANN } ((h_1, \mu_1), (h_2, \mu_2), \dots, (h_N, \mu_N)), \quad (2.6)$$

wobei P, Q, R und X Ausprägungen der linguistischen Variablen l_k sind, μ_n die Zugehörigkeitswerte der einzelnen Horizonte h_n zur Menge der Horizont H . Bei der Auswertung des linken Teils der Regel wird der *DOF* v_i (*degree of fulfillment* (Erfülltheitsgrad der Regel i)) bestimmt. Dazu müssen die logischen Operatoren mit geeigneten binären Operatoren ersetzt werden. Im vorgestellten Ansatz wird der min-max-Operator verwendet. Dabei wird der min-Operator als Vertreter des AND verwendet, der max-Operator als Vertreter des OR.

Aus den Definitionen lässt sich ableiten, dass jede Regel mehr als einen Horizont beschreiben kann und jeder Horizont von mehr als einer Regel definiert wird. Wenn die Möglichkeiten dieses Ansatzes voll ausgeschöpft werden, besteht die Gefahr, dass sich die Ergebnisermittlung wegen der durch die vielen Variationsmöglichkeiten entstehenden Seiteneffekte nicht mehr befriedigend steuern lässt. Deshalb werden im hier vorgestellten Ansatz die folgenden Einschränkungen vorgenommen:

$$N \stackrel{\text{def}}{=} I, \quad (2.7)$$

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & \text{wenn } i = n \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.8)$$

Damit wird ausgedrückt, dass die Anzahl der Regeln und der Ergebnisse gleich sind und jede Regel genau einen Horizont beschreibt.

Wenn alle notwendigen Elemente des Modells definiert sind, kann die Anwendung mit den folgenden Teilschritten erfolgen (mit Beispielen):

1. Zusammenstellung der Parameterausprägung eines Horizonts

$$e_{\text{Farbe}} = 10\text{YR } 5/4, e_{\text{Humus}} = 1\%, \dots$$

2. Fuzzifizierung der Parameterausprägungen

$$e_{\text{Humus}} = 1\%$$

$$\Rightarrow l_{\text{Humus}}(\text{sehr gering}; 0, 75), l_{\text{Humus}}(\text{gering}; 0, 25), l_{\text{Humus}}(\text{mittel}; 0), \dots$$

$$e_{\text{Hue}} = 10\text{YR}$$

$$\Rightarrow l_{\text{Hue}}(\text{rot}; 0, 5), l_{\text{Hue}}(\text{gelb}; 0, 5), l_{\text{Hue}}(\text{grün}; 0), \dots$$

3. Bestimmung der v_i aus r_i und l_k

$$r_1: \text{WENN Munsell_Hue} = \text{rot UND Humus} = \text{sehr gering}$$

$$\Rightarrow v_1 = \min(0, 5; 0, 75) = 0, 5$$

$$r_2: \text{WENN Munsell_Hue} = \text{grün UND Humus} = \text{sehr gering}$$

$$\Rightarrow v_2 = \min(0; 0, 75) = 0$$

4. Berechnung der Zugehörigkeiten der Horizonte h_i : Dabei kommt die „Kombination der gewichteten Summen“ zum Einsatz, die den besten Kompromiss aus den möglichen Ergebnissen auswählt (Bardossy und Duckstein, 1995). Die Berechnung erfolgt mit der Formel

$$H = \left(\left(h_1, \frac{\sum_i [v_i \mu_i(1)]}{M} \right), \left(h_2, \frac{\sum_i [v_i \mu_i(2)]}{M} \right), \dots \right), \quad (2.9)$$

wobei

$$M = \max_n \sum_i [v_i \mu_i(n)]. \quad (2.10)$$

Durch die Formeln 2.7 und 2.8 vereinfachen sich die Formeln 2.9 und 2.10 zu

$$H = \left(\left(h_1, \frac{v_1}{M} \right), \left(h_2, \frac{v_2}{M} \right), \dots \right), \quad (2.11)$$

$$M = \max_i v_i. \quad (2.12)$$

Beispiele:

r_1 : WENN Munsell_Hue = rot UND Humus = sehr gering DANN Bv

r_2 : WENN Munsell_Hue = grün UND Humus = sehr gering DANN Gr.

$$H = \left(\left(\text{Bv}, \frac{0,5}{M} \right), \left(\text{Gr}, \frac{0}{M} \right) \right),$$

$$M = \max(0,5;0)$$

$$H = ((\text{Bv}, 1), (\text{Gr}, 0))$$

5. Darstellung der Ergebnisse: Üblicherweise werden nur h_i mit $\mu_i = 1$ als gültiges Ergebnis verwendet. Wegen verschiedener Systemmodifikationen (siehe Abschnitt 3.4) wird hier ein Grenzwert $\mu_{\min} = 0,85$ verwendet. Ergebnisse mit einem kleineren Zugehörigkeitswert werden nicht dargestellt.

Kapitel 3

Ergebnisse und Diskussion

3.1 Analyse der Bodendaten

Die vorgestellten Datensätze können als Querschnitt der in Deutschland verfügbaren bodenkundlichen Datensätze angesehen werden. Aus der Charakterisierung lassen sich wesentliche Ursachen für die Probleme bei der grenzübergreifenden Zusammenarbeit bodenkundlicher Institutionen ableiten.

Die Qualität der Daten lässt sich anhand von Tabelle 3.1 beurteilen. Es fehlt eine Vielzahl von Parametern, die für das Reproduzieren der Bodenidentifikation von Bedeutung sind. Informationen zu Phänomenen wie Konkretionsbildung oder die Entwicklung von Tonbändern werden nur im Horizont- bzw. Profilnamen gespeichert, ohne dass ein separates Datenfeld im Feldaufnahmeblatt vorgesehen ist. Manchmal sind die benötigten Angaben den allgemeinen Bemerkungen zu entnehmen. Diese einfache Codierung ist durchaus sinnvoll, weil damit eine unnötige Duplizierung von Informationen verhindert wird. Wenn aber – wie in dieser Arbeit – die Festlegung des Namens nachvollzogen werden soll, kann der Datenbedarf nicht vollständig gedeckt werden. Teilweise wurden deshalb benötigte Informationen aus dem Namen abgeleitet. Dabei handelt es sich um die Parameter (in Klammern der diagnostische Buchstabe): Bänder (b), maschinelle Bearbeitung (R, p), biogener Mix (x), Unterwasserhorizonte (F), Grundwassereinfluss (G), Lage auf Ausgangsgestein (C), Plaggenmaterial (E), Tontapeten (Bt) und der Zersetzungsgrad der organischen Substanz von Auflagehorizonten (L, Of, Oh).

Die letzte Spalte der Tabelle 3.1 zeigt, dass die Vollständigkeit der Datensätze keinesfalls gewährleistet ist. Die Zahlen, die die Feldbelegung bei den Parametern der Identifikationsansätze wiedergeben, können als repräsentativ für die gesamten Datensätze angenommen werden. Die hohen Anteile an leeren Datenfeldern sind kein Zeichen für unzureichende bodenkundliche Arbeit, sondern resultieren aus den ungleich höheren Qualitätsansprüchen rechen technischer Verfahren. So ist die Bestimmung einiger Parameter entweder nicht möglich oder nicht sinnvoll (zum Beispiel die Textur von unverändertem massivem Ausgangsgestein), außerdem wird das

Tabelle 3.1: Qualität der verwendeten Datensätze, Erläuterung der Abkürzungen im Text, Beschreibung der Verfahren in den folgenden Kapiteln

Datensatz	Fehlende Parameter			Mittlere Feldbelegung bei den diagnostischen Parametern
	Clusteranalyse (Profile)	Diskriminanzanalyse (Profile)	Clusteranalyse (Horizonte)	
NLFB	2 (14%)	4 (19%)	5 (22%)	47%
LGRB	5 (36%)	11 (52%)	11 (48%)	74%
BGR I	5 (36%)	8 (38%)	10 (43%)	33%
BGR II	2 (14%)	4 (19%)	5 (22%)	47%
Exkursionsdaten	1 (7%)	5 (24%)	3 (13%)	51%

Nicht-Auftreten von Merkmalen meist nicht dokumentiert. Im zweitgenannten Fall bleibt allerdings offen, ob das Merkmal tatsächlich nicht ausgeprägt ist oder ob es eine Lücke im Datensatz gibt. Dadurch werden statistische Analysen sehr erschwert.

Es ist bemerkenswert, dass einige identifikationsrelevante Merkmale wie Farbe oder Horizontmächtigkeit in den Datenbanken gespeichert sind, andere, zum Beispiel das Auftreten von Sekundärcarbonat oder Krusten, nicht. Offensichtlich sollen damit bestimmte Charakterisierungen vertieft und vereinfacht werden. Da die Ausprägungen der gespeicherten Variablen nicht immer mit den Definitionen der Horizonte/Profile übereinstimmen (Beispiele für Horizonte in Tabelle 3.2), kann auch kein zuverlässiger Zusammenhang zwischen dem Namen und den nicht gesondert gespeicherten Merkmalen hergestellt werden. Ob hier die Anwendung von Expertensystemen zur Ableitung von Landschaftsdaten aus Bodeneinheiten (Bui et al., 1999, Bui, 2004) möglich ist, sollte Gegenstand weiterer Forschungen sein.

Als Konsequenz aus dem fehlenden Zusammenhang stellt sich die Frage, wozu Bodeninformationen überhaupt kategorisiert werden. Die Merkmale werden so weit zusammengefasst, dass bestimmte konkrete Sachverhalte nicht mehr erschlossen werden können. Der Vergleich von Merkmalen in den Definitionen und in den Datensätze lässt den Schluss zu, dass bei der Bodenidentifikation Informationen nicht nur aggregiert, sondern auch übergangen werden.

3.2 Bestimmungsschlüssel

Der Bestimmungsschlüssel ist das Ergebnis des Versuchs, die Definitionen der DBS in eine logische Struktur zu bringen. Damit soll im Wesentlichen die Frage beantwortet werden, ob es möglich ist, nur mit den vorhandenen Definitionen eine EDV-gestützte Bodenidentifikationen durchzuführen. Der hier vorgestellte Bestimmungsschlüssel hat bereits Vorgänger: In der KA4

Tabelle 3.2: Beispiele für Parameterausprägungen in den Bodenhorizont-Definitionen und in bodenkundlichen Datensätzen

Horizont-name	Definition (verkürzt)	Parameterausprägung in Datensätzen
Aeh/Ahe	violettstichig	nur in Ausnahmefällen violettstichig, normalerweise grau, braun oder eine Variante davon
Bv	gegenüber dem nach unten folgenden Horizont (bei gleichem Substrat ...) mindestens um 1 pH-Stufe saurer (pH 4-5)	pH meistens 4-5, pH-Änderung schwankt zwischen Abnahme um 0.8 Einheiten und Zunahme um 0.4 Einheiten
Cv	gegenüber dem Cn: Vorkommen von Wurzeln	meistens keine Information, Wurzeln nur in Übergangs-Cv dokumentiert
Gr	<5 Flächen-% Flecken an Wurzelbahnen	keine Information
Sd	in der Regel 50 bis 70% Rost- und Bleichflecken	oft keine Information, mittlerer Flächenanteil: f3 (2-5%), maximaler Flächenanteil: f5 (10-30%)
	marmoriert ... o d e r Marmorierung ... nicht vorhanden oder nicht erkennbar	keine Information
Quelle der Horizontdefinitionen: Arbeitskreis Bodensystematik (1998) Quelle der Bodendaten: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (1999)		
Bei der Angabe „keine Information“ muss in vielen Fällen davon ausgegangen werden, dass das Merkmal nicht ausgeprägt ist, weil im gleichen Profil in anderen Horizonten entsprechende Informationen dokumentiert sind.		

sind Bestimmungsschlüssel für die Abteilungen und für die Klassen der Abteilung *Terrestrische Böden* veröffentlicht, in der KA5 wird eine Identifizierungsanleitung bis zum Typniveau erscheinen. Diese Schlüssel sind jetzt erheblich erweitert worden.

Für die adäquate Umsetzung der DBS werden zwei Bestimmungsschlüssel benötigt. Zuerst müssen die einzelnen Horizonte identifiziert werden, anschließend werden daraus mit einem zweiten Schlüssel die bodensystematischen Einheiten abgeleitet. Implementiert sind die Definitionen der KA5. Dadurch sind die Ergebnisse im Detail nicht mit den Ergebnissen der anderen Verfahren vergleichbar, jedoch können allgemeingültige Aussagen abgeleitet werden, die in die Methodendiskussion einfließen. Im Unterschied zu den anderen Verfahren werden keine *fuzzy*-Methoden eingesetzt. Es gibt zwar Ansätze zur Entwicklung von *fuzzy*-Bäumen (Cheng und Cui, 2004, Iyatomi und Hagiwara, 2004), aber deren Anwendung ist hier nicht vorteilhaft (siehe Abschnitt 3.2.3).

Die Auswahl der Parameter erfolgt durch Zusammenstellung der Definitionen der DBS. Vorgaben für die Anordnung der Horizonte beziehungsweise der bodensystematischen Einheiten existieren nicht. Daher wurde versucht, zuerst die Parameter abzufragen, die eindeutig auf nur eine oder wenige Zielkategorien hinweisen.

3.2.1 Bestimmung von Bodenhorizonten

Mit dem Horizontschlüssel lassen sich 142 Horizonte bestimmen. Informationen zu pedogenen oder anthropogenen Merkmalen werden nicht verarbeitet. Dazu werden 92 Parameter benötigt, wobei dieser Begriff sehr weit gefasst wird. Neben einfachen Abfragen wie ' ≥ 17 bis < 35 Masse-% Ton' können auch umfangreichere Merkmalskombinationen auftreten, zum Beispiel ' ≥ 80 Flächen-% Nassbleichungsmerkmale (Flecken, schwache Nassbleichung) und Oxidationsmerkmale (Rostflecken, Konkretionen) und k_f meist ≥ 10 cm/d'. Tabelle 3.3 zeigt die Unterscheidung der Horizonte nach Hauptsymbolen, der komplette Schlüssel ist im Anhang, Kapitel 11 dargestellt.

Mit dem Bestimmungsschlüssel können nicht automatisch Übergangs-, Verzahnungs- und überprägte Horizonte identifiziert werden. Diese Information muss explizit angegeben werden, anschließend erfolgt die Identifizierung der einzelnen Teilhorizonte. Zur Bestimmung eines Horizontes müssen zwischen 3 und maximal 24 Entscheidungen getroffen werden.

3.2.2 Ermittlung von bodensystematischen Einheiten

Der Bestimmungsschlüssel für bodensystematische Einheiten erlaubt die Ableitung von 239 Bodensubtypen. Sie sind meist über die Horizontabfolge und -mächtigkeit definiert, so dass hier nur noch 16 zusätzliche Parameter benötigt werden, die im wesentlichen geologische und Lageinformationen umfassen (zum Beispiel '*Bodenbildung auf Lockergestein*' oder '*Hanglage*

Tabelle 3.3: Ermittlung der Hauptsymbole im Bestimmungsschlüssel für Bodenhorizonte

Horizonteigenschaft		Symbol
Entstanden aus torfbildenden Pflanzen unter Wasserüberschuss	ja →	H
nein ↓		
Mehr als 30 Masse-% Organische Substanz	ja →	L, O
nein ↓		
Am Gewässergrund oder im Tidebereich mit täglicher Überflutung	ja →	F
nein ↓		
Periodisch oder episodisch überflutet oder grundwasserbeeinflusst	ja →	G
nein ↓		
Zumindest zeitweise erhöhter Methan- und/oder Kohlendioxid-Gehalt	ja →	Y
nein ↓		
Mächtiger als 4 dm und durch nicht-regelmäßiges Pflügen oder Rigolen/Tiefumbruch entstanden	ja →	R
nein ↓		
Aus aufgetragenem Plaggen- oder Kompostmaterial	ja →	E
nein ↓		
Unterboden, Prismen- oder Polyedergefüge, Tongehalt mindestens 45 Masse-%, deutliche Quell- und Schrumpfdynamik	ja →	P
nein ↓		
Mit nicht-humosen Flecken	ja →	S
nein ↓		
Oberbodenhorizont	ja →	A
nein ↓		
(nahezu unverändertes) Ausgangsgestein	ja →	C
nein ↓		
Carbonatgehalt mindestens 75 Masse-% und Tongehalt mindestens 45 Masse-%	ja →	T
nein ↓		
Verwittert, verlehmt oder stoffangereichert	ja →	B
nein ↓		
Humusangereichert und mit deutlicher Schichtung	ja →	M
nein ↓		
Keine Identifikation möglich		

($\geq 9\%$ (5) *Hangneigung*)'.) Neben den oben genannten Kriterien müssen teilweise – besonders bei der Identifikation von Übergangs-Subtypen – die Tiefenlage von Horizontgrenzen und die Dominanz von Horizonten ermittelt werden. Die Dominanz leitet sich aus der Position eines Horizontnamens bei Übergangshorizonten ab. So ist bei einem Bv-Sw die Pseudovergleyung prägender, bei einem Sw-Bv die Verbraunung. Tabelle 3.4 kann die höchste Ebene der Subtyp-Bestimmung entnommen werden. Auch hier befindet sich der vollständige Schlüssel im Anhang (Kapitel 12).

Im Unterschied zu den bereits existierenden Bestimmungsschlüsseln richtet sich die Einteilung der Böden auf den höheren Entscheidungsebenen nicht nach der Gliederung der KA5 in Abteilungen und Klassen, sondern nach dem Vorhandensein bestimmter Horizonte. Demzufolge werden die terrestrischen und die semiterrestrischen Böden nicht getrennt, sondern zuerst wird das Auftreten von G-Horizonten überprüft. Die deutliche Spezifizierung der subhydrischen Böden und der Moore ist logische Folge des Auftretens von F- und H-Horizonten.

3.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Der Bestimmungsschlüssel ist als Abfolge von interaktiv zu entscheidenden Fragen implementiert. Eine automatisierte Datenbankabfrage ist nicht möglich, weil dazu alle diagnostischen Parameter in den Datensätzen erfasst sein müssen. Das ist gegenwärtig nicht der Fall (siehe Kapitel 2.1.1) und wird es auch zukünftig kaum sein. Außerdem werden in der DBS teilweise Definitionen verwendet, die sich kaum quantifizieren oder standardisieren lassen. Dazu gehören beispielsweise die Beschreibung des Sq-Horizonts (*'S-Horizont der Knickmarsch, wasserstauend und solonetzartig'*) oder des Bvt-Horizonts (*'Bt-Horizont mit Restmerkmalen des Bv-Horizonts'*).

Die Art der Implementierung ist auch die Ursache für den Verzicht auf *fuzzy*-Methoden: Wenn eine Eigenschaft nur partiell erfüllt ist, müssen beide Ausgänge des entsprechenden Knotenpunktes verfolgt werden. Dadurch steigt die Anzahl der zu treffenden Entscheidungen sehr schnell an und die Verwendung des Bestimmungsschlüssels wird unkomfortabel. Außerdem wird vorausgesetzt, dass alle Nutzerinnen mit *fuzzy* Beschreibungen umgehen können. Ein dritter Nachteil ist die Gefahr unsinniger Ergebnisse: Wenn im Horizontschlüssel nur drei Entscheidungen uneindeutig getroffen werden, kann sich das Ergebnis aus vier Namen zusammensetzen. Die DBS erlaubt maximal die Kombination von drei Namen und es ist fraglich, ob die objektive Bestimmung von mehr als drei Namen möglich ist.

Informationen zur Qualität der Bestimmungsschlüssel lassen sich nur mit hohem zeitlichen und personellen Aufwand ermitteln, weil eine Vielzahl von Entscheidungen quasi per Hand getroffen werden muss. Da die Bestimmungsschlüssel in der gegenwärtigen Fassung nur ein erster Entwurf sind, liegen noch keine statistischen Ergebnisanalysen vor. Die Verwendung von simulierten Datensätzen, in denen die Ausprägung der verwendeten Parameter gespeichert ist,

Tabelle 3.4: Höchste Ebene im Bestimmungsschlüssel für Bodensubtypen

Kriterium		Zielkategorien
Torfmächtigkeit ≥ 30 cm	ja →	Moore
nein ↓		
F-Horizont im Profil	ja →	Watten, Subhydrische Böden
nein ↓		
G-Horizont im Profil	ja →	Strandböden, Marschen, Gleye und deren Übergänge
nein ↓		
Y-Horizont im Profil	ja →	Reduktosole
nein ↓		
R-Horizont im Profil	ja →	Treposole, Rigosole und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
Untergrenze E-Horizont ≥ 40 cm	ja →	Plaggenesche und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
Untergrenze M-Horizont ≥ 40 cm	ja →	Kolluvisole und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
Untergrenze T-Horizont < 40 cm	ja →	Terrae calcis und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
S-Horizont im Profil	ja →	Pseudogleye und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
Ael-Horizont im Profil	ja →	Fahlerden und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
Al-Horizont im Profil	ja →	Parabraunerden und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
Ae-Horizont im Profil	ja →	Podsole und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
P-Horizont im Profil	ja →	Pelosole und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
Acxh-Horizont mächtiger als 40 cm	ja →	Kalktschernoseme und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
Axh-Horizont mächtiger als 40 cm	ja →	Tschernoseme und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
Bv-Horizont im Profil	ja →	Braunerden und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
Ah- u n d C-Horizont im Profil	ja →	Ah/C-Böden und deren noch nicht erfasste Übergänge
nein ↓		
Ai-Horizont im Profil	ja →	Terrestrische Rohböden
nein ↓		
O-Horizont im Profil und keiner der Horizonte A, B, E, F, G, H, L, M, P, R, S, T, Y	ja →	O/C-Böden
nein ↓		
Keine Identifikation möglich		

würde Untersuchungen der logischen Struktur der DBS oder Ähnlichkeitsanalysen erlauben. Wenn aber – wie in dieser Arbeit beabsichtigt – der Identifikationsprozess durch rechnergestützte Verfahren nachgebildet werden soll, müssen von Bodenkundlerinnen erzeugte Daten zur Beurteilung der Qualität verwendet werden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die mit den Schlüsseln erzielten Ergebnisse im Allgemeinen mit den erwarteten Identifikationen übereinstimmen.

Das Hauptziel der Schlüsselentwicklung war die Strukturierung der DBS. Die wesentlichen Ergebnisse dieses Arbeitsschritts sind daher Informationen zu kritischen Punkten in der DBS:

- **Überdefinitionen:** Besonders bei den Horizontdefinitionen müssen oft mehrere Kriterien für die Identifikation erfüllt sein, beispielsweise beim Cv-Horizont: *'Vorkommen von Wurzeln u n d physikalisch aufgelockert ...'*. Dadurch lassen sich die Zielkategorien sehr genau spezifizieren, jedoch wird teilweise die exakte Identifikation verhindert. Wenn ein oder mehrere Kriterien nicht erfüllt sind, darf ein Objekt definitionsgemäß nicht zu der fast vollständig passenden Kategorie zugeordnet werden. Die Identifikation läuft „ins Leere“. Diese Herangehensweise ist trotzdem gängige Praxis, weil keine ähnlichen Definitionen zur Verfügung stehen (siehe Tabelle 3.2). Die Definitionen in den Bestimmungsschlüsseln wurden deshalb teilweise gekürzt, um solche Zweifelsfälle zu verhindern.
- **Definitionsabschwächung:** In vielen Definitionen werden quantifizierbare Kriterien mit Worten wie *meist*, *in der Regel* oder *oft* abgeschwächt, was sicherlich eine Reaktion auf die Überdefinitionen ist. Damit kann aber kein korrekter Entscheidungsbaum aufgestellt werden, weil dort das Auftreten von Eigenschaften eindeutig festgelegt werden muss. Die abschwächenden Adjektive wurden daher aus den Definitionen entfernt.
- **Inhaltsreduktion:** In der DBS sind charakteristische Horizontfolgen für die Subtypen angegeben, die aber nicht das gesamte Spektrum der möglichen Horizontfolgen abdecken. Für die bodensystematische Einordnung sehr komplexer Horizontabfolgen fehlen verbindliche Anweisungen. Deshalb sind bei der Anwendung der Bestimmungsschlüssel unerwartete Resultate möglich, und bei der Ermittlung des Subtyps werden bestimmte Informationen gelöscht. Gleichzeitig lassen sich **Inkonsistenzen** zwischen Horizont- und Subtyp-Bestimmungsschlüssel feststellen: In den Definitionen der Horizonte gibt es *'Abweichungshorizonte'*, die zur Kennzeichnung von Abweichungssubtypen herangezogen werden (zum Beispiel Bbt), während andere *'Abweichungshorizonte'* erst auf Varietäten-Niveau beachtet werden (zum Beispiel Gmso). Das damit verbundene Problem der inkonsequenten Hierarchisierung der Horizontdefinitionen wird in Albrecht et al. (2005c) diskutiert.
- **Fehlende Prioritäten:** Die Rangfolge diagnostischer Eigenschaften bei gleichzeitigem

Auftreten ist unzureichend geregelt. Wenn beispielsweise die Horizontfolge Ah/sScw/sScd (Kalkpseudogley in Hanglage) vorgefunden wird, bleibt offen, ob das geogene oder das pedogene Merkmal stärker bewertet werden soll und es sich dann um einen Kalk- oder Hanggley handelt, die Namen kombiniert werden müssen oder eine Spezifizierung auf Varietätenniveau erfolgen soll.

- **Mehrdeutige Definitionen:** Das Problem der schwer quantifizierbaren/standardisierbaren Definitionen wurde bereits angesprochen und steht hier nur der Vollständigkeit halber.
- **Zirkelschlüsse:** Bei der Identifizierung mit der DBS sollen zuerst die Horizonte bestimmt werden und anschließend die bodensystematischen Einheiten. Einige Horizonte lassen sich aber nur festlegen, wenn der Subtyp bekannt ist. Ein Beispiel ist der Sq, der als S-Horizont der Knickmarsch beschrieben wird.
- **Fehler in der Feingliederung:** Teilweise stimmen die Definitionen der Subtypen nicht mit denen der Typen überein. So ist der Verzahnungshorizont Ael+Bt diagnostischer Horizont der Fahlerde, im Subtyp Bänderfahlerde kann er optional auftreten.
- **Überschneidungen:** Die Definition der bodensystematischen Einheiten nach Tiefenlage der Horizonte ist manchmal unlogisch. Als Beispiel werden die Übergänge von Plaggenesch und Pseudogley betrachtet. Die Übergangssubtypen sind folgendermaßen definiert:

Plaggenesch-Pseudogley (YE-SS)	Pseudogley-Plaggenesch (SS-YE)
<u>Ah/E/E-Sw/II(Sw/)Sd</u>	<u>Ah/(Sw-)E/E-Sw/IISw/Sd</u>
≥4dm	4–8 dm
<4dm	

Ein Großteil der Böden aus Plaggenmaterial mit Pseudovergleyung lässt sich beiden Subtypen zuordnen, weil sich die Tiefenangaben nicht vollständig ausschließen, zum Beispiel Ah (2dm)/E (4 dm)/E-Sw (3 dm)/IISd/Sw. Es gibt aber wenige ausgewählte Ausnahmen:

- Wenn die Mächtigkeit des Ah ≥ 4 dm ist und die Pseudovergleyung innerhalb von 8 dm beginnt, ist es immer ein SS-YE. Bei Ah ≥ 4 dm und Beginn der Pseudovergleyung zwischen 8 und 13 dm ist eine Zuordnung zum Norm-Plaggenesch möglich, sofern kein Sw-E-Horizont vorhanden ist, sonst greift keine der Definitionen. Beginnt die Pseudovergleyung ≥ 13 dm, wird sie auf Varietätenniveau des Norm-Plaggeneschs erfasst.
- Wenn der Ah ≤ 4 dm mächtig ist und die Untergrenze des E-Horizonts ohne Pseudovergleyung zwischen 8 und 13 dm liegt, ist es immer ein YE-SS. Bei diesem Profilaufbau sind die Plaggen in der Regel dominierend, was sich aber nicht im Namen des Subtyps widerspiegelt.

Aus den vorstehenden Bemerkungen lässt sich ableiten, dass sich der bodensystematische Teil der KA5 mehr als Vorschlag und nicht als Regelwerk auffassen lässt. Die Möglichkeiten, Grenzen und Resultate der praktischen Anwendung der DBS werden ausführlich mit verschiedenen Beispielen in Albrecht et al. (2005c) diskutiert.

3.3 Clusteranalysen

In Anlehnung an die erfolgreiche Anwendung des *fuzzy c-means* in verschiedenen bodenkundlichen Arbeiten, vor allem von Mazaheri et al. (1995a), wird versucht, durch Clusteranalysen zu sinnvollen Beschreibungen der Bodentypen und der Horizonte zu kommen.

3.3.1 Anwendung zur Identifizierung von Bodentypen

Bei der Charakterisierung der Bodentypen werden zwei verschiedene Wege beschritten: Zuerst erfolgt eine direkte Initialisierung der Matrix C , anschließend werden Datensätze mit dem FKME geclustert, um so die „idealen Bodentypen“ zu beschreiben. Die Auswahl der Parameter richtet sich sowohl nach den diagnostischen Eigenschaften als auch nach der Verfügbarkeit in den Datensätzen. Nach den in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Analysen ist der zweitgenannte der limitierende Faktor.

Die direkte Initialisierung der Matrix C wurde mit verschiedenen Parameterkonstellationen vorgenommen. Eine Version ist in Albrecht et al. (eingereichtb) dokumentiert, eine zweite im Anhang (Abschnitt 13). Parameter, die in beiden Ansätzen verwendet wurden, waren unter anderem der Tongehalt im Unterboden, Bänder, Verfestigungen, Humusgehalt, Farbe oder das Auftreten von Plaggen- oder Kolluvial-Horizonten. Tabelle 3.5 enthält einen Ausschnitt aus der im Anhang gezeigten Version. Dabei fallen die vielen Fragezeichen auf. Hier war es nicht möglich, eine sinnvolle Parameterausprägung anzugeben, ohne die Definitionen der DBS in unvertretbarem Maß zu verändern. Ohne Angabe eines Zahlenwertes ist es jedoch nicht möglich, die Identifizierung durchzuführen.

Aus diesem und anderen Gründen (siehe Abschnitt 3.3.3) scheiterte die Übertragung von Definitionen und Expertenwissen in Prototypen-Charakterisierungen. Deshalb wurde versucht Bodendaten mit dem FKME zu analysieren, um die dabei ermittelten Clusterzentren als Prototypen verwenden zu können. Dieser Ansatz scheiterte ebenfalls. Beispiele dazu sind in Albrecht et al. (eingereichtb) aufgeführt, die Ursachen werden ebenfalls in Abschnitt 3.3.3 diskutiert.

3.3.2 Anwendung zur Identifizierung von Horizonten

Aufbauend auf die Struktur der DBS, nach der die Bestimmung der Bodenhorizonte Voraussetzung für die Ableitung der systematischen Einheiten ist, wurden Bodenhorizonte separat

Tabelle 3.5: Prototypen für die numerische Klassifikation nach KA4, Beispiele, Erläuterung der Abkürzungen im Anhang, Kapitel 13

(Sub-)Typ	BUG	KUG	TG	TB	KUB	VF	E	HUB	MO	RO	BF	RE	HOB	F	VH	S	MA	A
Felshumusboden	0	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	222	0	0
Skeletthumusboden	0	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	222	0	0
Syrosem	1	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Lockersyrosem	4	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Ranker	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Regosol	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Tschernosem	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	1	222	0	0
Kalktschernosem	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	1	222	0	0
Pelosol	2	0	50	0	0	?	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Kalkpelosol	2	1	50	0	25	?	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Braunerde	2	0	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Parabraunerde	4	1	?	0	25	1	0	0	0	0	0	0	10	1	0	222	0	0
Fahlerde	4	1	?	0	25	1	0	0	0	0	0	0	10	2	0	222	0	0
Podsol	3	0	?	0	0	3	2	2	0	0	0	0	10	2	0	222	0	0
Terra fusca	2	2	75	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Kalk-Terra fusca	2	2	75	0	25	0	1	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Terra rossa	2	2	75	0	0	0	3	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Pseudogley	4	0	?	0	0	2	0	0	1	1	1	0	10	0	0	10-30	0	0
Anmoorpseudogley	4	0	?	0	0	2	0	0	1	1	1	0	10	0	0	0	0	0
Haftnäsepsudogley	4	0	?	0	0	2	0	0	1	1	1	0	10	0	0	10-30	0	0
Stagnogley	3	0	?	0	0	0	0	0	2	0	0	0	10	2	0	0-30	0	0
Anmoorstagnogley	3	0	?	0	0	0	0	0	2	0	0	0	10	2	0	0-30	0	0
Moorstagnogley	3	0	?	0	0	0	0	0	2	0	0	0	45	2	0	0-30	0	0
Rambla	4	?	?	0	0	0	0	0	0	1	0	1	10	0	0	80	0	1
Paternia	4	0	?	0	0	0	0	0	0	1	0	1	10	0	0	80	0	1
Kalkpaternia	4	1	?	0	25	0	0	0	0	1	0	1	10	0	0	80	0	1
Tschernitza	4	0	?	0	0	0	0	0	0	1	0	1	10	0	0	80	0	1
Vega	4	0	?	0	0	0	0	0	0	1	0	1	10	0	0	80	0	1
Gley	?	?	?	0	0	?	1	0	0	2	2	1	10	?	0	60	0	0
Oxigley	?	?	?	0	0	?	2	0	0	2	2	0	10	?	0	60	0	0
Brauneisengley	?	?	?	0	0	2	3	0	0	2	2	1	10	?	0	60	0	0
Kalkgley	?	2	?	0	25	?	1	0	0	?	?	1	10	?	0	60	0	0
Humusgley	?	?	?	0	0	?	1	0	0	?	?	1	45	?	0	60	0	0
Moorgley	?	?	?	0	0	?	0	0	0	1	0	1	40	?	0	0-20	0	0

geclustert. Dazu wurden die verwendeten Parameter an die ausführlichen Definitionen der DBS angepasst (Albrecht et al., eingereicht^b). Die Datensätze wurden aus den Exkursionsdaten extrahiert. Da nur weniger als 10% der dort gespeicherten Datensätze vollständig waren, war die Menge der clusterbaren Objekte entsprechend klein. Trotz umfangreicher Variationen der Parameter zur Steuerung der Clusteranalyse konnten keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden.

Tabelle 3.6 zeigt beispielhaft die Zusammensetzung von Horizontclustern bei wechselnder Zahl von Clustern. Außerdem kann die Neuorganisation von Clustern bei steigender Clusteranzahl beobachtet werden. Teilweise sind die Cluster sehr homogen und stabil (k, o), einige sind inhomogen und instabil (c). Dabei bezieht sich die Homogenität auf die Zusammensetzung der Cluster, die Stabilität auf die Neigung, sich bei ändernder Clusteranzahl zu verändern. Einige inhomogene Cluster vereinen Horizonte, die durch den selben Prozess entstanden sind (b), was aber nicht allgemein gültig ist (Cluster h).

Tabelle 3.6: Ergebnisse der Clusterung von Bodenhorizont-Daten (Beispiele), Erläuterungen im Text, N: Cluster-Name, G: Cluster-Größe (Anzahl enthaltener Elemente)

20 Klassen			27 Klassen			30 Klassen		
N	G	Elemente	N	G	Elemente	N	G	Elemente
a	14	Ah (2), M (6), Sw (2), Sw-Bv (2), Swd-Bv (2)	a	12	Ah (2), M (6), Sw-Bv (2), Swd-Bv (2)	a	10	Ah (2), M (6), Swd-Bv (2)
						ab	2	Sw-Bv
b	6	Ahe (2), Bh (2), Bhs (2)	b	6	Ahe (2), Bh (2), Bhs (2)	b	4	Ahe (2), Bh (2)
						bb	2	Bhs
c	18	Ae (4), Bs (2), Cv (2), Sw (8), Bs-Cv (2)	c	12	Ae (2), Bs (2), Sw (8)	c	14	Ae (4), Bs (2), Sw (8)
			ca	4	Bs-Cv (2), Cv (2)	ca	4	Bs-Cv (2), Cv (2)
			cb	2	Ae			
h	8	Ccv (2), Sd (2), P-Gro (2), Sw-Bt (2)	h	4	Ccv (2), Sd (2)	h	4	Ccv (2), Sd (2)
			ha	2	Sw-Bt	ha	2	Sw-Bt
k	12	E	k	12	E	k	12	E
o	6	Go (4), Gro (2)	o	6	Go (4), Gro (2)	o	6	Go (4), Gro (2)
q	8	Go (2), Gor (2), Gro (2), Go-Sd (2)	q	8	Go (2), Gor (2), Gro (2), Go-Sd (2)	q	8	Go (2), Gor (2), Gro (2), Go-Sd (2)

3.3.3 Diskussion

Die Anwendung des FKME war in allen Versuchen nicht erfolgreich. Dafür gibt es drei wesentliche Ursachen, die allgemein gültig sind:

1. **Datengrundlagen:** In Abschnitt 2.1.1 wurde gezeigt, dass die verfügbaren bodenkundlichen Datensätze in Bezug auf die diagnostischen Variablen sehr unvollständig sind. Der FKME erfordert aber vollständige Datensätze: Wenn Informationen fehlen, wird die Summierung in Formel 2.1 abgebrochen. Wird die fehlende Information durch einen vorher festgelegten 'Fehlercode' ersetzt, kommt es zu inhaltsverändernden Fehlzuordnungen. Außerdem spiegeln die vorhandenen Datensätze nicht das Spektrum der definierten Horizonte/bodensystematischen Einheiten wider, so dass die DBS mit Clusteranalysen nicht vollständig nachvollzogen werden kann.
2. **Struktur der DBS:** Der Aufbau der Systematik passt in mehreren Punkten nicht zu den Anforderungen der Clusteranalyse:
 - Die Horizonte/bodensystematischen Einheiten werden nicht mit einem einheitlichen Parametersatz beschrieben. So ist für die Pelosole und die Terrae calcis ein bestimmter Tongehalt im Unterboden vorgegeben, die Lessivé und Braunerden werden über eine Tongehaltdifferenz definiert, und eine Vielzahl von anderen Böden lässt sich ohne Kenntnis des Tongehalts beschreiben. Der FKME erfordert aber für alle Objekte die gleichen Parameter.
 - Die Struktur der DBS wirkt sich ungünstig auf die Parameterauswahl aus. Wenn Subtypen untersucht werden, ist die Anzahl an prinzipiell benötigten Parametern sehr groß, weil Detailinformationen wie Hanglage (Hang(pseudo)gley) oder Lagerungsdichte (Lockerbraunerde) beachtet werden müssen. Wenn stärker aggregiert werden soll und die Bodentypen untersucht werden, sind bestimmte diagnostische Variablen nicht mehr eindeutig zu spezifizieren (der KalktschernoSEM *muss* Sekundärcarbonat enthalten, Braunerden, Gleye, .. *können* Sekundärcarbonat enthalten).
 - Die in den Definitionen der DBS verwendeten diagnostischen Parameter sind in der Regel als Grenzwerte angegeben. Demgegenüber stellen die Ergebnisse der Clusteranalyse die Idealtypen der Zielkategorie dar, die durch charakteristische Mittelwerte beschrieben werden müssen. Demzufolge können die Informationen in den Definitionen oft nicht in die Clusterbeschreibungen einfließen. Die in Tabelle 3.2 gezeigten Abweichungen von Definitionen und realen Daten weisen darauf hin, dass es auch kaum möglich ist, die geforderten Angaben aus den Datensätzen zu extrahieren. Die heterogenen Cluster in Tabelle 3.6 sind ein deutlicher Beweis dafür.

- Mit den systematischen Angaben der DBS können die in Mitteleuropa anzutreffenden Böden weitgehend adäquat beschrieben werden – einschließlich reliktscher, begrabener, geschichteter oder gekappter Böden. Diese Vielfalt führt zu einer sehr hohen Zahl von möglichen Prototypen, die alle gesondert definiert werden müssen. Dann steigen die Rechenzeit bei der Clusteranalyse und die Zahl der zu verwendenden Parameter enorm an, außerdem lassen sich die Ergebnisse nicht mehr überprüfen, weil nicht ausreichend Beispiele für jeden Prototypen vorhanden sind.

3. **Anwendungsbereich:** Clusteranalysen sollen dazu verwendet werden, Zusammenhänge zwischen Daten aufzudecken (Bardossy und Duckstein, 1995). Wenn, wie in dieser Arbeit, die Zielkategorien bekannt sind, ist der Einsatz dieser statistischen Methoden unangebracht. Mit den Clusteranalysen könnte aber überprüft werden, ob sich die in der DBS definierten Einheiten signifikant trennen lassen. Dazu müssen aber die oben genannten Datenanforderungen erfüllt sein.

Abbildung 3.1 fasst einige Ursachen für das Scheitern der Clusteranalysen zusammen. Die gezeigten Gley-Horizonte sind alle definiert durch Grundwassereinfluss und haben allgemein einen Tongehalt von etwa 10%.

Wenn der Grundwasserspiegel durch Melioration abgesenkt wurde, liegen reliktsche Gleyhorizonte vor, weil sich alle anderen Eigenschaften in der kurzen Zeit nach der Absenkung noch nicht signifikant geändert haben. Der FKME kann nicht zwischen rezent und reliktsch unterscheiden, beziehungsweise ordnet das Verfahren die Gley-Horizonte wegen fehlenden Grundwassers einer anderen Horizontgruppe zu.

Der Tongehalt ist künstlich festgelegt. In den Definitionen gibt es keine Vorgaben. Auch wenn ein Tongehalt von 10% für viele Gley-Horizonte wahrscheinlich ist, widerspricht diese Angabe trotzdem der Intention der DBS.

Die Angaben der Flecken-Intensität ist in diesem Beispiel der einzige trennende Faktor. Wenn diese Information fehlt, ist keine eindeutige Identifizierung möglich. Außerdem wurden die Grenzwerte durch Mittelwerte ersetzt. So ist der Gro-Horizont definiert mit 5-10 Flächen-% Rostflecken. Wenn ein Horizont 9 Fl.-% Flecken hat, ist er in dem gezeigten Beispiel einem Go-Horizont ähnlicher als dem Gro.

3.4 Regelbasierte Modellierung

Ein *fuzzy*-regelbasiertes Modell wurde für die Identifikation von Bodenhorizonten entwickelt. Dazu wurden 89 Horizonte mit 54 Parametern definiert. Die Horizonte umfassen alle in der DBS definierten Haupt- und Abweichungshorizonte¹. Die Parameterliste ist gegenüber der Pa-

¹Abweichungshorizonte sind hier Horizonte, die als Übergang zwischen zwei Horizonten mit dem gleichen Hauptsymbol definiert sind, zum Beispiel Bvt. Sie sollen damit begrifflich von den Übergangshorizonten mit meh-

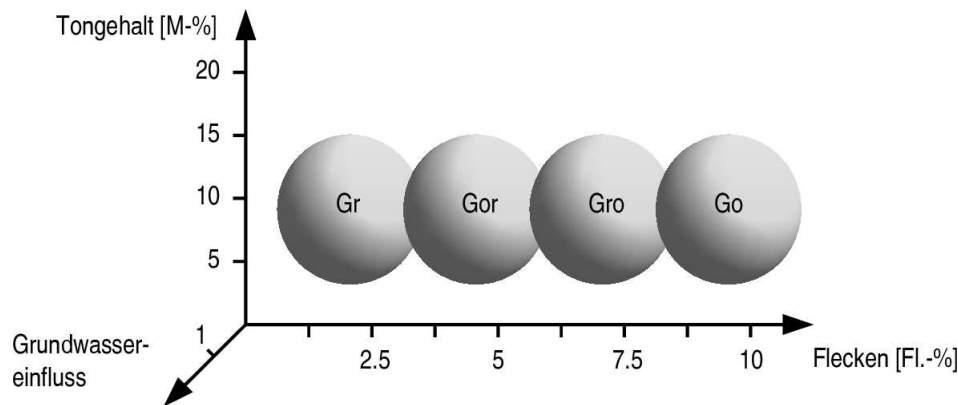


Abbildung 3.1: Stark vereinfachte Darstellung der Clusterung von Gley-Horizonten

parameterliste der Clusteranalyse erheblich erweitert worden. So wurden beispielsweise sieben Parameter nur zur Bodenfarbe verwendet (Hue, Value, Chroma, Hue-Differenz zum Horizont nach oben und nach unten, Chroma-Differenz nach oben, Quotient aus Value und Chroma). Die vollständige Liste ist in Albrecht et al. (eingereicht) veröffentlicht. Die Definitionen der linguistischen Variablen sowie das Regelwerk zur Identifikation sind im Anhang, Kapitel 14 dokumentiert.

Besonders wichtig ist die Angabe von Differenzen. Das ist bei der Clusteranalyse nicht möglich, weil naturgemäß bei dem obersten beziehungsweise untersten Horizont keine Differenz zum folgenden/vorhergehenden Horizont angegeben werden kann und damit Lücken in den Eingangsdaten entstehen. Die regelbasierten Systeme sind grundsätzlich auch so definiert, dass jede Regel mit einem einheitlichen Parametersatz operiert. Durch kleine Veränderungen an der Systemstruktur konnte die Flexibilität jedoch erheblich gesteigert werden. Diese Veränderungen umfassen die folgenden Methoden:

- **Skipping:** Das Überspringen von Parametern ist an zwei Stellen möglich: Zum einen werden die Horizonte nur mit einem verkürzten Parametersatz definiert, so dass eine gewisse Nähe zu den DBS-Definitionen erhalten bleibt. Bei der Regelauswertung werden dann nur die definierten Variablen beachtet und die nicht-definierten übersprungen. Das zweite Einsatzgebiet ist die Behandlung fehlender Parameter. Wenn ein Eingangsdatum unbekannt ist, wird es bei der Regelauswertung ausgelassen und die Identifikation nicht wegen fehlender Informationen abgebrochen. Dabei sinkt jedoch die Güte des Ergebnisses, weil ein Horizont nicht mehr wegen seiner Eigenschaften identifiziert wird, sondern weil die Software keine Anhaltspunkte findet, die gegen eine Identifikation sprechen.
- **Logisches ODER:** Da in den Definitionen der DBS häufig Grenzwerte angegeben sind und deshalb weite Spannen bei der Parameterausprägung möglich sind, können die *fuzzy*-Mengen einer linguistischen Variable mit dem logischen ODER verknüpft werden. Es

renen Hauptsymbolen unterschieden werden, zum Beispiel Sw-Bt.

ist also möglich, „Rote oder gelbe Farbe“ zu definieren, jedoch nicht „Rote Farbe oder mittlerer Tongehalt“.

- **Beabsichtigtes Skipping:** Teilweise kann bei der Identifikation kein Ergebnis erzielt werden. Dann werden alle Parameter nacheinander als „Unbekannt“ angenommen und die Identifikation wird wiederholt. Dabei findet ein beabsichtigtes Überspringen des jeweils unbekanntem Parameters statt. Damit können die störenden Einflüsse von Datenfehlern und fehlerhaften Definitionen ausgeschaltet werden. Diese Technik wird auch zur Bestimmung von Übergangshorizonten mit stark von der Definition der Haupthorizonte abweichenden Eigenschaften angewendet. Dabei werden gleichzeitig drei Parameter auf „Unbekannt“ gesetzt.
- **Verhinderung leerer Ergebnismengen:** Falls auch das beabsichtigte Skipping zu keinem Resultat führt, wird die Häufigkeit der Hauptsymbole in den Übergangshorizonten gezählt. Nach einer Normierung wird dann eines der Symbole als mögliches Ergebnis angegeben.
- **Einfacher Filter:** Die Auflagehorizonte sind nur mit wenigen Parametern definiert und weisen oft erhebliche Lücken in den Datensätzen auf. Vor allem durch das Skipping kommt es dann zu vielen Fehlidentifikationen. Da die Auflagehorizonte durch die Angabe der Horizontgrenzen sehr leicht bestimmt werden können, werden deren Namen nach der Identifikation aus den Ergebnissen unterhalb der Geländeoberfläche herausgefiltert, die Namen der anderen Horizonte werden aus den Ergebnissen oberhalb der Geländeoberfläche entfernt.

Abbildung 3.2 zeigt den Ablauf der Identifikation mit dem regelbasierten System. Zuerst werden die Bodendaten zusammengestellt und in unscharfe Mengen überführt. Bei der ersten Anwendung der Wenn-Dann-Regeln werden bereits die Methoden Skipping und Logisches ODER eingesetzt. Nach dem ersten Test, ob ein Ergebnis erzielt werden konnte, kommen die anderen genannten Methoden zum Einsatz. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Filter nicht aufgeführt.

Das Skipping war die entscheidende Änderung, um überhaupt sinnvolle Resultate zu erzielen. Die Abbildungen 3.3 und 3.4 zeigen noch einmal die Vorgehensweise. Wenn ein Horizont (h1 in Abbildung 3.3) nur mit zwei Parametern definiert ist, kann der dritte Parameter beliebig ausgeprägt sein, ohne dass sich das Identifikationsergebnis ändert. Wenn ein Parameter unbekannt ist (Abbildung 3.4), gibt es zwei Ergebnisse, weil die Horizonte h1 und h2 ähnlich definiert sind und sich lediglich in dem fehlenden Parameter unterscheiden. Da in dem Identifikationsprogramm nur die tatsächlich vorliegenden Informationen verarbeitet werden, gibt es keine Begründung, einen der beiden Horizonte als Ergebnis zu verwerfen.

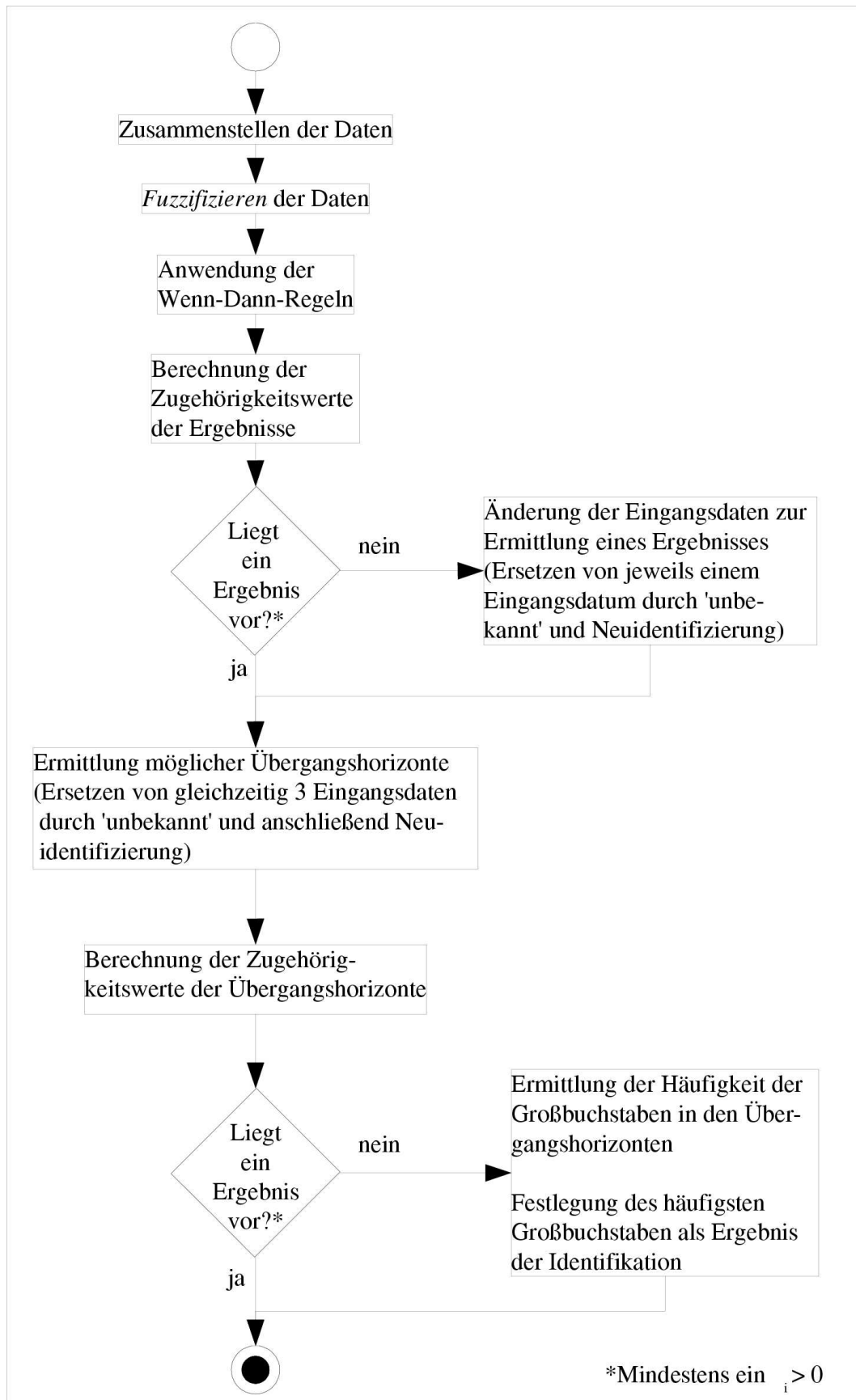


Abbildung 3.2: Flowchart zum Ablauf der regelbasierten Horizontidentifikation (nach Albrecht et al. (eingereichta), geändert)

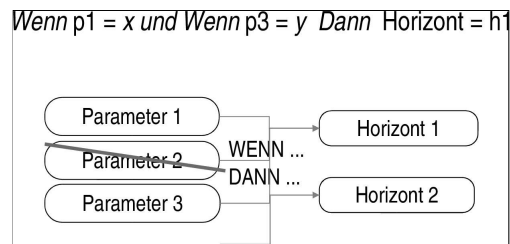


Abbildung 3.3: Überspringen von Parametern bei selektiven Definitionen

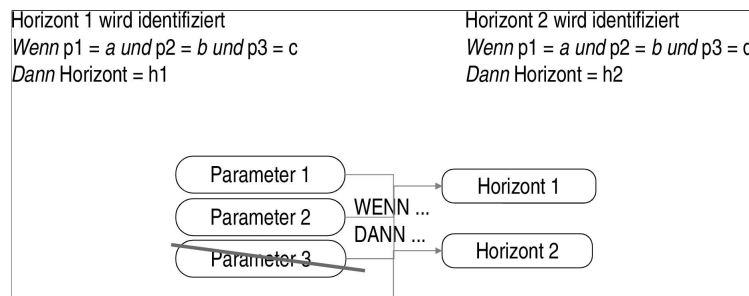


Abbildung 3.4: Überspringen von Parametern bei fehlenden Daten

Die Horizonte sind am Anfang nur anhand der DBS-Definitionen charakterisiert. Diese Kennzeichnung ist aber nicht ausreichend, weil teilweise nur wenige Parameter angegeben werden können. Wenn dann Lücken in den Datensätzen auftreten, werden die Ergebnisse unsicher und nicht mehr interpretierbar. Deshalb müssen ergänzend Informationen aus bodenkundlichen Lehrbüchern (Scheffer und Schachtschabel, 1998, Kuntze et al., 1994) und Kennzahlen aus den Datensätzen verwendet werden. Abweichungshorizonte sind teilweise in Anlehnung an die Haupthorizonte gekennzeichnet; ein Bhv-Horizont erbt also einen Teil der Eigenschaften des Bv-Horizonts. Diese Vorgehensweise ist aber nicht unproblematisch, weil die Hierarchie der Horizonte nicht konsequent gestaltet wurde (Albrecht et al., 2005c). Bei der Anwendung des Regelwerks auf die Bodendaten fällt auf, dass einige Horizonte nur dann richtig identifiziert werden, wenn in den Definitionen gegen die DBS-Angaben oder gegen die Beschreibung der bodenbildenden Prozesse verstoßen wird. Tabelle 3.7 fasst die entsprechenden Horizonte zusammen. Zusätzlich ist es bei den folgend genannten Horizonten schwierig, die Lage im Profil zu kennzeichnen, obwohl in den Definitionen „Unterboden-“ oder „Untergrund-Horizont“ vermerkt ist. Das Problem tritt auf bei Bbt-, Bh-, Bs-, Bsh-, Bsv-, Bt-, Btv-, Bv-, Bvs-, Bvt-, C-, Cv-, P-, Sg-, Srw- und Sw-Horizonten.

Die Ergebnisse, die mit dem regelbasierten System erzielt werden, sind zufriedenstellend. Der Vergleich der automatisch ermittelten mit den in den Datenbanken verfügbaren Horizontnamen zeigt teilweise eine gute Übereinstimmung, teilweise aber auch große Abweichungen (Albrecht et al., eingereichta). Die Qualität der Übereinstimmung ist besonders hoch bei Gley-, einem Teil der Pseudogley- und anthropogen beeinflussten Horizonten. Hier zeigt sich der Effekt der Ableitung von Informationen aus dem existierenden Namen sehr deutlich. Die Identifikation

Tabelle 3.7: Horizonte, deren Ausprägung in den Datensätzen nicht mit den DBS-Definitionen oder der Beschreibung des bodenbildenden Prozesses übereinstimmt

Horizont	Parameter
Ael	Humusgehalts-Differenz nach unten
Ahe	Flecken, Quotient Value/Chroma
Ahl	Tongehalts-Differenz nach unten
Al	Organische Substanz
Bbt	Tongehalts-Differenz nach oben
Bhs	Hue-Differenz nach oben, Hue-Differenz nach unten, Organische Substanz, Differenz der Organische Substanz nach oben
Bs	Hue-Differenz nach oben, Hue-Differenz nach unten
Bsh	Sesquioxid-Differenz nach oben, Verfestigungen
Bsv	Sesquioxid-Differenz nach oben
Bt	Tongehalts-Differenz nach oben
Bvs	Sesquioxid-Differenz nach oben
Gco	Flecken, Sekundärcarbonat
Go	Flecken
Gr	Flecken, Flecken nur an Wurzelbahnen
Hcr	Value-Differenz nach oben
Hr	Value-Differenz nach oben
R	Mächtigkeit
Sd	Flecken, Leitfähigkeit in cm/d, Marmorierung
Sew	Leitfähigkeit in cm/d
Sg	Lagerungsdichte, Marmorierung
Srw	Flecken, Flecken nur an Wurzelbahnen
Sw	Flecken, Verfestigungen

Tabelle 3.8: Vergleich der verwendeten Methoden zur rechnergestützten Identifikation von Böden, Bedeutung der Symbole: +: hoch, 0: mittel, -: niedrig

Kriterium	Bestimmungsschlüssel	Clusteranalyse	Regelbasierte Modellierung
Datenbedarf	+	+	+ (0)
Definitionstreue	+	-	0
Ergebnisqualität	+	-	0
Robustheit - fehlende Daten	0 (-)	-	+
Robustheit - Ausreißer	-	0	0
Anwendung - Feldarbeit	0	0	+
Anwendung - Datenbankabfrage	-	+	+

von C- und einigen A-Horizonten ist besonders schlecht. Bei diesen Bewertungen muss aber immer beachtet werden, dass die vorhandenen Namen mit einer gewissen Subjektivität behaftet sind. Die Expertenidentifikation ist nicht unbedingt richtiger als die automatische, sondern manchmal nur anders oder vielleicht sogar falsch im Sinne der DBS-Definitionen.

Die Entwicklung und die Ergebnisse der regelbasierten Modellierung sind ausführlich in Albrecht et al. (eingereicht^a) beschrieben.

3.5 Methodenvergleich

Es ist schwierig, die vorgestellten Methoden direkt zu vergleichen, weil sie nur unter unterschiedlichen Voraussetzungen anwendbar sind und unterschiedliche (oder keine) Ergebnisse erzeugen. Trotzdem sollen die Methoden anhand der Kriterien Datenbedarf, Definitionstreue, Ergebnisqualität, Robustheit und Anwendungsmöglichkeit verglichen werden. In Tabelle 3.8 ist der Vergleich übersichtsartig zusammengefasst.

Datenbedarf: Der Datenbedarf ist bei allen vorgestellten Verfahren sehr hoch. Es ist grundsätzlich nicht möglich, alle mitteleuropäischen Böden mit wenigen Parametern ausreichend zu beschreiben, weil die Vielfalt und die Komplexität der Böden eine entsprechend detaillierte Charakterisierung erfordern.

Die Anwendung der Bestimmungsschlüssel stellt die höchsten Anforderungen an die Eingangsdaten. Zum korrekten Einsatz müssen sehr viele und detaillierte Informationen vorliegen. Wegen der in Abschnitt 3.4 vorgestellten Erweiterungen benötigt das regelbasierte System die we-

nigsten Eingangsdaten. Im Prinzip kann die Identifikation ganz ohne Information durchgeführt werden. Dann ist aber das Ergebnis nicht mehr interpretierbar.

Definitionstreue: Nur in den Bestimmungsschlüsseln können die Definitionen der DBS nahezu exakt umgesetzt werden. Allerdings gilt diese Aussage nicht uneingeschränkt, weil die Abfrage-Reihenfolge der Schlüssel das Nicht-Vorhandensein bestimmter Eigenschaften impliziert. Hier kommt es zu inhaltlichen Diskrepanzen.

Die methodischen Anforderungen der Clusteranalyse erfordern immer die Angabe definitionsfremder Informationen. Bei dem regelbasierten Ansatz wird versucht, die Definitionen so zu vereinfachen, dass Datenbankabfragen möglich werden. Dabei müssen ebenfalls definitionsfremde Merkmale angegeben werden, um die Ergebnisqualität nicht übermäßig negativ zu beeinflussen.

Ergebnisqualität: Mit den Bestimmungsschlüsseln lassen sich zweifellos die besten Ergebnisse erzielen. Wenn die erforderlichen Parameter nicht subjektiv falsch eingesetzt werden, dürfte das Ergebnis immer im Bereich des Erwarteten liegen. Die Ergebnisse der Clusteranalysen lassen sich nicht als Gruppenbildung von DBS-Einheiten interpretieren. Das regelbasierte System erzeugt Resultate, die teilweise sehr gut, manchmal aber fast gar nicht mit den Identifikationen von Experten übereinstimmen. Hier bleibt allerdings offen, ob die Vergleichsdaten eine objektive Ergebnisbewertung erlauben.

Robustheit: Die Robustheit lässt sich in zwei Kategorien beurteilen:

- Die Robustheit gegenüber fehlenden Daten ist bei dem regelbasierten Ansatz am höchsten. Bei unbekanntem Eingangswert sinkt allenfalls die Sicherheit der Identifikation, die Anwendbarkeit der Methode bleibt unbeeinflusst.

Die Bestimmungsschlüssel können auch bei lückenhaften Daten korrekte Ergebnisse liefern. Voraussetzung ist aber, dass die fehlenden Informationen nicht an einer Verzweigung der Schlüssel benötigt werden. Sobald ein erwarteter Parameter nicht bestimmt werden kann, wird die Identifikation abgebrochen. Das Risiko dafür ist sehr hoch, weil in den Schlüsseln zuerst die seltenen und dann die weit verbreiteten (und damit besser verfügbaren) Phänomene erfasst werden.

Die Clusteranalyse wird bei fehlenden Werten sofort unterbrochen und liefert kein Ergebnis. Sie ist damit überhaupt nicht robust gegenüber unvollständigen Datensätzen.

- Die Robustheit gegenüber Ausreißern in den Eingangsdaten ist in allen Methoden etwa gleich. Bei den Bestimmungsschlüsseln hängt der daraus resultierende Fehler davon ab, an welcher Stelle eine falsche Information verwendet wurde. Je näher der Entscheidungsknoten am Ende einer Verzweigung steht, desto geringer ist der Fehler.

Bei den Clusteranalysen ist mit einer Veränderung der Nähe zum „richtigen“ Cluster zu rechnen. Da die Übergänge zwischen den Clustern bei der Anwendung des FKME kontinuierlich sind, ist eine vollständig fehlerhafte Einordnung unwahrscheinlich. Wenn die Eingangsdaten sehr konfus sind, erfolgt eine Zuordnung zur *extragrade*-Klasse.

Das bedingte Skipping bei den regelbasierten Ansätzen kann den störenden Einfluss von Ausreißern minimieren. Wenn jedoch beim ersten Programmdurchlauf „falsche“ Ergebnisse erzielt werden, ist keine Korrektur möglich.

Die Beurteilung der Robustheit gegenüber Ausreißern gilt auch für fehlerhafte Definitionen.

Einsatzgebiet: In der gegenwärtig vorliegenden Fassung können die Bestimmungsschlüssel nur für die Feldarbeit oder für strukturelle Untersuchungen der DBS verwendet werden. Eine automatisierte Identifikation im Sinne von Datenbankabfragen ist nicht möglich, weil eine Vielzahl von geforderten Parametern nicht in den Datenbanken geführt wird. Aber auch beim Feldeinsatz sind die Bestimmungsschlüssel unhandlich, weil sehr viele Ja/Nein-Entscheidungen quasi per Hand getroffen werden müssen. Bei einem Profil mit 5 Horizonten werden manchmal bis zu 100 Kriterien abgefragt.

Im Gegensatz dazu können die auf Clusteranalysen und auf Regelwerken aufbauenden Verfahren sowohl zur Datenbankabfrage als auch zur „manuellen“ Analyse eingesetzt werden. Die benötigten Informationen, die aus existierenden Datenbeständen extrahiert werden, können ebenso in eine entsprechend gestaltete Programmoberfläche eingegeben werden. Für die Zuordnung von Böden zu den *Australian Great Soil Groups* (Ansatz von Mazaheri et al. (1995a)) haben Mazaheri et al. (1995b) ein Beispiel vorgestellt.

Kapitel 4

Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Ansätze zur rechnergestützten Identifikation von Böden untersucht und bewertet. Die Methoden operieren unter verschiedenen Voraussetzungen mit teilweise erheblich differierenden Parametersätzen und erzeugen demzufolge sehr unterschiedliche Ergebnisse.

- Die neu entwickelten Bestimmungsschlüssel sind der Versuch einer möglichst exakten Übertragung der DBS in eine logische Struktur. Damit kommen sie den Definitionen der DBS am nächsten, jedoch ist die Anwendbarkeit – vor allem im Hinblick auf automatisierte Datenbankabfragen – sehr eingeschränkt. Trotzdem stellen die Bestimmungsschlüssel einen wichtigen Schritt zur Entwicklung von Identifikations-Software dar, weil sie zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, die Definitionen der DBS in implementierbare Algorithmen einzuarbeiten.
- Die Clusteranalysen sind nicht geeignet zur Bearbeitung bodensystematischer Fragestellungen. Neben technischen Problemen (Datenverfügbarkeit) passt vor allem die Struktur der DBS nicht zu den Anforderungen der Clusteranalyse. Viele der im Literaturüberblick (Kapitel 1.2.2) genannten Arbeiten zeigen den erfolgreichen Einsatz von Clusteranalysen, jedoch unterscheiden sich dort die Fragestellung und/oder die Einsatzbedingungen von der hier vorgestellten Studie.
- Die regelbasierte Modellierung stellt den besten Kompromiss zwischen Definitionstreue, einfacher Struktur, Einsatzmöglichkeiten und Anpassung an die Datenverfügbarkeit dar. Dabei entsprechen die Ergebnisse aber nicht immer den Erwartungen, so dass in Zukunft noch Verbesserungen an dem System vorgenommen werden müssen.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass es keinen optimalen Ansatz gibt, der alle Ansprüche von Theorie und Praxis erfüllt. Praktische Restriktionen ergeben sich vor allem aus der Verfügbarkeit diagnostischer Angaben in den Bodendatenbanken und aus der Unvollständigkeit der

Datensätze. Ein Resultat der Untersuchungen ist demzufolge die dringende Forderung nach einer Standardisierung und Homogenisierung der Datenbestände in technischer und struktureller Hinsicht.

Die theoretischen Betrachtungen des Problems führen wieder zu den Grundlagen von Systematik und Klassifikation. Eine Klassifikation lässt sich im Allgemeinen so darstellen, dass sie mit wenig Aufwand in eine computerimplementierbare Form gebracht werden kann. Die teilweise Verwendung klassifikatorischer Prinzipien in der DBS kann somit die guten Ergebnisse der rechnergestützten Ansätze erklären.

Das grundlegende Ordnungsprinzip ist aber die Systematik, also die Ordnung der Böden nach der Dominanz von bodenbildenden Prozessen. Eine konsequente Umsetzung dieses Prinzips würde es erforderlich machen, die Intensität bodenbildender Prozesse zu quantifizieren, ansonsten können keine zuverlässigen Identifikationen vorgenommen werden. Da die Prozesse aber noch nicht vollständig geklärt sind (Beispiel Tschernosemierung: Gehrt et al. (1999)) und zu deren Modellierung nur wenige Ansätze bekannt sind (Beispiel Verwitterung: Odeh et al. (2004)), liegen zum jetzigen Zeitpunkt nicht genug Informationen für eine Quantifizierung vor. Das heißt, dass sich die DBS zur Zeit einer vollständigen automatisierten Nachbildung mit digitalen Methoden entzieht.

Die Konsequenz aus der fehlenden Quantifizierung der bodenbildenden Prozesse ist, dass auch bei der klassischen Anwendung der DBS keine objektiven Identifikationsergebnisse erzielt werden können. Vor der weiteren Untersuchung von rechengestützten Verfahren muss daher erst die DBS so weit verbessert werden, dass bearbeiterunabhängig eindeutige n Identifikationen möglich sind. Dazu sind zwei Strategien denkbar: Entweder werden die bodenbildenden Prozesse vollständig geklärt, um daraus die quantitativen Grundlagen für die Identifikation mit der Systematik ableiten zu können; oder die Systematik wird – wie es in den letzten Jahren tendenziell der Fall ist – in eine Klassifikation umgewandelt. Die erste Strategie sollte Grundanliegen der bodenkundlichen Forschung sein, jedoch werden dafür umfangreiche Untersuchungen benötigt. Die zweite Strategie (Umwandlung in eine Klassifikation) führt nicht zu einer wissenschaftlich exakten Ordnung der Böden, jedoch sind reproduzierbare Identifikationen möglich, womit die Qualität der Ergebnisse steigt. Die hier vorgestellten Ansätze können helfen, diese Entwicklung zu beschleunigen und zu vereinfachen.

Die Ausführungen zeigen, dass nicht alle in der Einleitung (Kapitel 1.1) genannten Hypothesen verifizierbar sind. Die an sich trivial klingende Behauptung in Hypothese 1 (wechselseitiger Zusammenhang zwischen den bodensystematischen Informationen und den beobachteten Bodeneigenschaften) ist nur bedingt gültig. In einer Richtung ist die Beziehung leicht erkennbar, weil systematischen Einheiten aus den Eigenschaften abgeleitet werden. Dabei werden aber teilweise Beobachtungen ausgeblendet oder fehlende Informationen durch Annahmen ersetzt. Darüber hinaus sind die DBS-Definitionen so offen gestaltet, dass von keinem echten Zusammenhang

zwischen Bodenmorphologie und systematischer Einheit gesprochen werden kann. Ein Beleg für diese Aussage ist, dass die Ergebnisqualität des regelbasierten Systems nicht sehr hoch ist. Wenn der Zusammenhang vorhanden wäre, würde er sich mit den Regeln besser nachvollziehen lassen. Auch in der Gegenrichtung sind die beiden Informationsebenen unzureichend miteinander verknüpft. Die Parameterausprägungen in den Bodendaten streuen sehr stark, so dass nur selten ein belastbarer Zusammenhang zwischen Horizont/Bodeneinheit und den vorgefundenen Eigenschaften nachweisbar ist. Außerdem sind teilweise Abweichungen zwischen Definitionen und realen Daten nachweisbar, die vorhandene Korrelationen in Frage stellen können.

Die Bestimmungsschlüssel sind die Verifizierung von Hypothese 2. Mit der erfolgreichen Entwicklung ist die Strukturierbarkeit bewiesen. Demgegenüber kann nach der Untersuchung der theoretischen Grundlagen von Systematik und Klassifikation nicht an der Hypothese 3 (reproduzierbare und objektive Bodenidentifikationen mit der DBS) festgehalten werden.

Die Quantifizierung der Ähnlichkeit von beliebigen Böden zu Prototypen (Hypothese 4) ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich. Für diese Fragestellung bieten sich besonders die *fuzzy* Cluster- und Diskriminanzanalyse an. Wenn eine ausreichende und praktikable Quantifizierung der bodensystematischen Einheiten vorliegt, können diese Ansätze erfolgreich eingesetzt werden. Diese Voraussetzung ist noch nicht erfüllbar, jedoch ist auch nicht das Gegenteil bewiesen. Deshalb ist keine Aussage zur Gültigkeit von Hypothese 4 möglich.

Die vorliegende Untersuchung kann die aufgestellten Hypothesen nicht vollständig verifizieren und gibt dadurch Impulse für die weitere bodenkundliche Arbeit. Auf konzeptioneller Ebene werden Perspektiven zur Weiterentwicklung der DBS aufgezeigt. Hier muss eine Trennung der systematischen und der klassifikatorischen Aspekte erfolgen, weil sonst die wissenschaftlichen und die praktischen Ansprüche an Bodenbeschreibung und -identifikation nicht optimal erfüllt werden können.

Die vorgestellten Methoden sind Ausgangspunkt für weitere Forschungsarbeiten. Die Bestimmungsschlüsseln können nicht nur die bodenkundliche Lehre und Praxis, sondern auch für strukturelle Analysen der verwendeten Definitionen vorteilhaft eingesetzt werden. Der Einsatz von *fuzzy* Cluster- und Diskriminanzanalyse für ausgewählte Spezialfragen sollte weiter untersucht werden, um inhaltlich und räumlich hoch aufgelöste Informationen zu gewinnen. Die Erwartungen an diese Ansätze können bei der Bodenidentifikation mit der DBS nicht erfüllt werden. Das spricht aber nicht gegen die Methodik, sondern belegt nur die Diskrepanzen in den Anwendungs-Voraussetzungen. Die regelbasierte Modellierung ist intuitiv anwendbar und mit den vorgestellten Modifikationen robust gegenüber fehlenden Eingangsdaten. Damit ergeben sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten für pedologische Untersuchungen.

Es ist zu erwarten, dass in Zukunft verstärkt *fuzzy*-Methoden zur Lösung bodenkundlicher Fragestellungen eingesetzt werden, weil die Beschreibung des Kontinuums Pedosphäre und der Umgang mit den komplexen Zusammenhängen vereinfacht wird. Mit den Fortschritten der bo-

denkundlichen Forschung wird auch das Problem der rechnergestützten Bodenidentifikation noch besser gelöst werden können.

Literaturverzeichnis

- Ahn, C.; Baumgartner, M.; Biehl, F. (1999): *Delineation of soil variability using geostatistics and fuzzy clustering analysis of hyperspectral data*. Soil Science Society of America Journal 63, S. 142–150.
- Albrecht, C.; Huwe, B.; Jahn, R. (2004): *Zuordnung des Munsell-Codes zu einem Farbnamen nach bodenkundlichen Kriterien*. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 167 (1), S. 60–65.
- Albrecht, C.; Huwe, B.; Jahn, R. (2005a): *Comparison of approaches for automatic soil identification*. In: Lagacherie, P.; McBratney, A.; Voltz, M. (Hg.), *DSM, Developments in Soil Science*, Elsevier, S. 1–7.
- Albrecht, C.; Huwe, B.; Jahn, R. (eingereichta): *The fuzzy rule based identification of soil horizons*. Catena .
- Albrecht, C.; Jahn, R.; Huwe, B. (2005b): *Bodensystematik und Bodenklassifikation – Teil I: Grundlagen*. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 168 (1), S. 7–20.
- Albrecht, C.; Jahn, R.; Huwe, B. (2005c): *Bodensystematik und Bodenklassifikation – Teil II: Zur Situation in der deutschen Bodenkunde*. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 168 (2), S. 157–168.
- Albrecht, C.; Schulz, K.; Huwe, B. (eingereichtb): *Potential and limitations of applying a fuzzy soil classification method to the German soil systematic*. Geoderma .
- Altermann, M.; Kühn, D. (1999): *Über "Probleme" bei der Einführung der Substratsystematik*. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 91 (2), S. 909–912.
- Altrock, C. v.; Zimmermann, H.-J. (Hg.) (1993): *Fuzzy logic - Band 1: Technologie*. Oldenbourg, München u.a.
- Ameskamp, M. (1997): *Three-dimensional rule-based continuous soil modeling*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Germany.

- Ameskamp, M.; Lamp, J. (1998): *Three-dimensional soil prediction: fuzzy rules and a GIS*. In: Heinecke, H.; Eckelmann, W.; Thomasson, A.; Jones, R.; Montanarella, L.; Buckley, B. (Hg.), *Land Information Systems—Developments for planning the sustainable use of land resources*, European Soil Bureau, Hannover, S. 243–249.
- Arbeitsgruppe Boden (1996): *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4)*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und die Geologischen Landesämter der BRD, Hannover, 4. Aufl., (verbesserter und erweiterter Nachdruck).
- Arbeitskreis Bodensystematik (1998): *Systematik der Böden der BRD*. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 86.
- Arbeitskreis Bodensystematik (2001): *Systematik der Böden Deutschlands*. In: Blume, H. P.; Felix-Henningsen, P.; Fischer, W.; Frede, H.-G.; Horn, R.; Stahr, K. (Hg.), *Handbuch der Bodenkunde*, Kap. 3.3.2, ecomed, Landsberg/Lech, S. 1–58.
- Assimakopoulos, J.; Kalivas, D.; Kollias, V. (2003): *A GIS-based fuzzy classification for mapping the agricultural soils for N-fertilizers use*. *The Science of the Total Environment* 309, S. 19–33.
- Bacher, J. (1994): *Clusteranalyse*. Oldenbourg, München u.a.
- Bardossy, A.; Bogardi, I.; Kelly, W. (1990): *Kriging with imprecise (fuzzy) variograms*. *Mathematical Geology* 22 (1), S. 63–94.
- Bardossy, A.; Duckstein, L. (1995): *Fuzzy rule based modeling with applications to geophysical, biological and engineering systems*. CRC Press, Boca Raton, New York, London, Tokio.
- Bäßler, M.; Schuber, R.; Meusel, H.; Rothmaler, W.; Jäger, E. J. (2000): *Exkursionsflora von Deutschland*. Spektrum, Heidelberg, Berlin.
- Bastian, O.; Schreiber, K.-F. (Hg.) (1999): *Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 2. Aufl.
- Bezdek, J. (1974): *Numerical taxonomy with fuzzy sets*. *Journal of Mathematical Biology* 1, S. 57–71.
- Bezdek, J. (1981): *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Plenum press, New York.
- Bezdek, J.; Keller, J.; Krisnapuram, R.; Pal, N. (1999): *Fuzzy models and algorithms for pattern recognition and image processing*. *The handbooks of fuzzy sets series*, 4, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts.

- Biewer, B. (1997): *Fuzzy-Methoden*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Blume, H.-P.; Felix-Henningsen, P.; Fischer, W.; Frede, H.-G.; Horn, R.; Stahr, K. (Hg.) (1996): *Handbuch der Bodenkunde*. ecomed, Landsberg/Lech.
- Börcsök, J. (2000): *Fuzzy control - Theorie und Industrieinsatz*. Verlag Technik, Berlin.
- Bothe, H.-H. (1995): *Fuzzy Logic*. Springer, Berlin u.a.
- Bragato, G. (2004): *Fuzzy continuous classification and spatial interpolation in conventional soil survey for soil mapping of the lower Piave plain*. *Geoderma* 118, S. 1–16.
- Breiman, L.; Friedmann, J.; Olshen, R.; Stone, C. (1984): *Classification and Regression Trees*. Pacific Grove, Wadsworth.
- Bui, E. (2004): *Soil survey as a knowledge system*. *Geoderma* 120, S. 17–26.
- Bui, E.; Loughhead, A.; Corner, R. (1999): *Extracting soil-landscape rules from previous soil surveys*. *Australian Journal of Soil Research* 37, S. 495–508.
- Burrough, P. (1989): *Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation*. *Journal of soil science* 40, S. 477–492.
- Burrough, P.; Van Gaans, P.; Hootsmans, R. (1997): *Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries*. *Geoderma* 77, S. 115–135.
- Carré, F.; Girard, M. (2002): *Quantitative mapping of soil types based on regression kriging of taxonomic distances with landform and land cover attributes*. *Geoderma* 110, S. 241–263.
- Cheng, H.; Cui, M. (2004): *Mass lesion detection with a fuzzy neural network*. *Pattern Recognition* 37 (6), S. 1189–1200.
- Coburger, E.; Kretschmer, H. (1997): *Exkursionsführer zur Tagung des AK Stadtböden am 7./8. März 1997 in Rostock*. *Mitteilungen der DBG* 84, S. 191–208.
- De Bruin, S.; Stein, A. (1998): *Soil-landscape modelling using fuzzy c-means clustering of attribute data derived from a Digital Elevation Model DEM*. *Geoderma* 83, S. 17–33.
- De Gruijter, J.; McBratney, A. (1988): *A modified fuzzy k-means method for predictive classification*. In: Bock, H. (Hg.), *Classification and Related Methods of Data Analysis*, Elsevier, Amsterdam, S. 97–104.
- De Gruijter, J.; Walvoort, D.; Van Gaans, P. (1997): *Continuous soil maps – a fuzzy set approach to bridge the gap between aggregation levels of process and distribution models*. *Geoderma* 77, S. 169–195.

- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (1991): *Mitteilungen der DBG, Band 70*.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (1993): *Mitteilungen der DBG, Band 77*.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (1995): *Mitteilungen der DBG, Band 82*.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (1997): *Mitteilungen der DBG, Band 90*.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (1999): *Mitteilungen der DBG, Band 94*.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (2001): *Mitteilungen der DBG, Band 100*.
- Diamond, P. (1989): *Fuzzy kriging*. Fuzzy Sets and Systems 33, S. 315–332.
- Dunn, J. (1974): *A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact, well separated clusters*. Journal of Cybernetics 3, S. 22–57.
- Eswaran, H.; Rice, T.; Ahrens, R.; Stewart, B. (Hg.) (2003): *Soil Classification – a global desk reference*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washinton, D.C.
- Fiedler, H. (2001): *Böden und Bodenfunktionen*. Expert Verlag, Renningen.
- Fisher, P. (2000): *Sorites paradox and vague geographics*. Fuzzy Sets and Systems 113, S. 7–18.
- Flores-Sintas, A.; Cadenas, J.; Martin, F. (1998): *A local geometrical properties application to fuzzy clustering*. Fuzzy Sets and Systems 100, S. 245–256.
- Flores-Sintas, A.; Cadenas, J.; Martin, F. (2001): *Detecting homogeneous groups in clustering using the Euclidian distance*. Fuzzy Sets and Systems 120, S. 213–225.
- Fujihara Industry Company (1970): *Standard soil color charts*. Fujihara Industry Company, Tokio.
- Galbraith, J.; Bryant, R.; Ahrens, R. (1998): *An expert system for Soil Taxonomy*. Soil Science 163 (9), S. 748–758.
- Gao, X.; Xie, W. (2000): *Advances in theory and applications of fuzzy clustering*. Chinese Science Bulletin 45 (11), S. 961–970.
- Gehrt, E.; Beckmann, T.; Dultz, S.; Hahn, K.; Hilgers, A.; Jarmer, T.; Rathgeber, A.; Schmidt, M. (1999): *Böden der Lößbörde und des Berglandes*. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 90, S. 249 – 278.
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (1995): *Symbolschlüssel Bodenkunde*. Informationen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg 5/95, S. 37–67.

- Goodchild, M. (2000): *Introduction: special issue on 'Uncertainty in geographic information systems'*. Fuzzy Sets and Systems 113, S. 3–5.
- Goryachkin, S.; Tonkogonov, V.; Gerasimova, M.; Lebedeva, I.; Shishov, L.; Targulian, V. (2003): *Changing concepts of soil and soil classification in Russia*. In: Eswaran, H.; Rice, T.; Ahrens, R.; Stewart, B. (Hg.), *Soil Classification – a global desk reference*, Kap. 15, CRC Press, S. 187–199.
- Groenen, P.; Jajuga, K. (2001): *Fuzzy clustering with squared Minkowski distances*. Fuzzy Sets and Systems 120, S. 227–237.
- Grunwald, S.; McSweeney, K.; Rooney, D.; Lowery, B. (2001): *Soil layer models created with profile cone penetrometer data*. Geoderma 103, S. 181–201.
- Hake, G.; Grünreich, D. (1994): *Kartographie*. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Hanesch, M.; Scholger, R.; Dekkers, M. J. (2001): *The application of fuzzy c-means cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for the detection of polluted sites*. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy 26 (11–12), S. 885–891.
- Henderson, B.; Bui, E.; Moran, C.; Simon, D. (2005): *Australia-wide predictions of soil properties using decision trees*. Geoderma 124, S. 383–398.
- Hendricks Franssen, H.; van Eijnsbergen, A.; Stein, A. (1997): *Use of spatial prediction techniques and fuzzy classification for mapping soil pollutants*. Geoderma 77, S. 243–262.
- Hewitt, A. (2003): *New Zealand soil classification – purposes and principles*. In: Eswaran, H.; Rice, T.; Ahrens, R.; Stewart, B. (Hg.), *Soil Classification – a global desk reference*, Kap. 14, CRC Press, S. 179–186.
- Höppner, F.; Klawonn, F.; Kruse, R. (1997): *Fuzzy Clusteranalyse – Verfahren für die Bilderkennung, Klassifikation und Datenanalyse*. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden.
- Hu, Z.; Chan, C.; Huang, G. (2003): *A fuzzy expert system for site characterization*. Expert Systems with Applications 24, S. 123–131.
- ISSS/ ISCRIC/ FAO (Hg.) (1998): *World Reference Base for Soil Resources*. FAO, Rome.
- Iyatomi, H.; Hagiwara, M. (2004): *Adaptive fuzzy inference neural network*. Pattern Recognition 37 (10), S. 2049–2057.
- Jain, A.; Murty, M.; Flynn, P. (1999): *Data clustering: a review*. ACM Computing Surveys 31 (3), S. 264–323.

- Kamimura, H.; Kurano, M. (2001): *Clustering by a fuzzy metric*. Fuzzy Sets and Systems 120, S. 249–254.
- Kollias, V.; Kalivas, D. (1998): *The enhancement of a commercial geographical information system (ARC/INFO) with fuzzy processing capabilities for the evaluation of land resources*. Computers and electronics in agriculture 20, S. 79–95.
- Kollias, V.; Kalivas, D.; Yassoglou, N. (1999): *Mapping the soil resources of a recent aluvial plain in Greece using fuzzy sets in a GIS environment*. European Journal of Soil Science 50 (2), S. 261–273.
- Kubiena, W. (1953): *Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Kuntze, H.; Roeschmann, G.; Schwerdtfeger, G. (1994): *Bodenkunde*. Ulmer, Stuttgart.
- Lagacherie, P.; Cazemir, D.; Van Gaans, P.; Burrough, P. (1997): *Fuzzy k-means clustering of fields in an elementary catchment and extrapolation to a larger area*. Geoderma 77, S. 197–216.
- Lahdenperä, A.-M.; Tamminen, P.; Tarvainen, T. (2001): *Relationships between geochemistry of basal till and chemistry of surface soil at forested sites in Finland*. Applied Geochemistry 16, S. 123–136.
- Lamp, J.; Ameskamp, M. (1998): *Definition and use of functional soil horizons as keys in spatial land information systems*. In: Heinecke, H.; Eckelmann, W.; Thomasson, A.; Jones, R.; Montanarella, L.; Buckley, B. (Hg.), *Land Information Systems–Developments for planning the sustainable use of land resource*, European Soil Bureau, Hannover, S. 279–291.
- Lark, R. (1999): *Soil-landform relationships at within-field scales: an investigation using fuzzy sets*. Geoderma 92, S. 141–165.
- Lark, R. (2001): *Some tools for parsimonious modelling and interpretation of within-field variation of soil and crop systems*. Soil & Tillage Research 58, S. 99–111.
- Lark, R.; Becket, P. (1998): *A geostatistical descriptor of the spatial distribution of soil classes and its use in predicting the purity of possible soil map units*. Geoderma 83, S. 243–262.
- Lark, R.; Stafford, J. (1998): *Information on within-field variability from sequences of yield maps: multivariate classification as a first step of interpretation*. Nutrient Cycling in Agroecosystems 50, S. 277–281.
- Markus, J.; McBratney, A. (1996): *An urban soil study: heavy metals in Glebe, Australia*. Australian Journal of Soil Research 34, S. 453–465.

- Mayr, E. (1975): *Grundlagen der zoologischen Systematik*. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- Mazaheri, S.; Koppi, A.; McBratney, A. (1995a): *A fuzzy allocation scheme for the Australian Great Soil Groups Classification system*. *European Journal of Soil Science* 46, S. 601–612.
- Mazaheri, S.; Koppi, A.; McBratney, A.; Constable, B. (1995b): *Australian Soil Identification Spreadsheet (ASIS): a program for allocating soil profiles to Australian Great Soil Groups (GSG), Version 1.1*. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/ACSS/sphysic/asis/asis1.html>.
- Mazaheri, S.; McBratney, A.; Koppi, A. (1997): *Sensitivity of memberships to attribute variation around selected centroids and intergrades in the continuous Australian Great Soil Groups classification system*. *Geoderma* 77, S. 155–168.
- McBratney, A.; De Gruijter, J. (1992): *A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades*. *Journal of Soil Science* 43, S. 159–175.
- McBratney, A.; De Gruijter, J.; Brus, D. (1992): *Spatial prediction and mapping of continuous soil classes*. *Geoderma* 54, S. 39–64.
- McBratney, A.; Mendonça Santos, M.; Minasny, B. (2003): *On digital soil mapping*. *Geoderma* 117, S. 3–52.
- McBratney, A.; Odeh, I. (1997): *Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions*. *Geoderma* 77, S. 85–113.
- McBratney, A.; Odeh, I.; Bishop, T.; Dunbar, M.; Shatar, T. (2000): *An overview of pedometric techniques for use in soil survey*. *Geoderma* 97, S. 293–327.
- McNeill, D.; Freiburger, P. (1994): *Fuzzy logic*. Droemer Knauer, München.
- Ménard, M.; Demko, C.; Loonis, P. (2000): *The fuzzy c+2-means: solving the ambiguity rejection in clustering*. *Pattern Recognition* 33, S. 1219–1237.
- Minasny, B.; McBratney, A. (2002): *FuzME version 3.0*. Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, Australia. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>.
- Mitra, B.; Scott, H.; Dixon, J.; McKimney, J. (1998): *Application of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed*. *Geoderma* 86, S. 183–209.
- Mückenhausen, E. (1965): *The soil classification system of the Federal Republic of Germany*. *Pedologie* 3, S. 57–74.
- Mückenhausen, E. (1977): *Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland*. DLG-Verlag, Frankfurt/Main, 2. Aufl.

- Müller, W.; Lüders, R.; Benzler, J.-H. (1984): *Ein anwendungsorientiertes Klassifikationssystem für Bodentypen auf Grundlage der Quantifizierung von Bodenmerkmalen und Bodeneigenschaften*. Geologisches Jahrbuch A75, S. 663–714.
- Nisar Ahamed, T. R.; Gopal Rao, K.; Murthy, J. (2000a): *Fuzzy class membership approach to soil erosion modelling*. Agricultural Systems 63, S. 97–110.
- Nisar Ahamed, T. R.; Gopal Rao, K.; Murthy, J. (2000b): *GIS-based fuzzy membership model for crop-land suitability analysis*. Agricultural Systems 63, S. 75–95.
- Oberthür, T.; Dobermann, A.; Aylward, M. (2000): *Using auxiliary information to adjust fuzzy membership functions for improved mapping of soil qualities*. International Journal for Geographical Information Science, 14 (5), S. 431–455.
- Odeh, I.; McBratney, A.; Chittleborough, D. (1990): *Design of optimal sample spacing for mapping soil using fuzzy-k-means and regionalized variable theory*. Geoderma 47, S. 93–122.
- Odeh, I.; McBratney, A.; Chittleborough, D. (1992a): *Fuzzy-c-means and kriging for mapping soil as a continuous system*. Soil Science Society of America Journal 56, S. 1848–1854.
- Odeh, I.; McBratney, A.; Chittleborough, D. (1992b): *Soil pattern recognition with fuzzy c-means: Application to classification and Soil-Landform Interrelationships*. Soil Science Society of America Journal 56, S. 505–516.
- Odeh, I.; McBratney, A.; Minasny, B. (2004): *On pedometric approach to soil survey and modelling: advances in quantitative methods to take advantage of emerging technologies and rich sources of environmental data*. In: Eswaran, H.; Vijarnsorn, P.; Vearasilp, T.; Padmanabhan, E. (Hg.), *Innovative Techniques in Soil Survey*, Land Development Department, Chattuchack, Bangkok, S. 237–256.
- Park, S.; McSweeney, K.; Lowery, B. (2001): *Identification of the spatial distribution of soils using a process-based terrain characterization*. Geoderma 103, S. 249–272.
- Piotrowski, J.; Bartels, F.; Salski, A.; Schmidt, G. (1996): *Geostatistical regionalization of glacial aquitard thickness in Northwestern Germany, based on fuzzy kriging*. Mathematical Geology 28 (4), S. 437–452.
- Riedler, C.; Jandl, R. (2002): *Identification of degraded forest soils by means of a fuzzy-logic based model*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 165 (3), S. 320–325.
- Ruspini, E. (1969): *A new approach to clustering*. Information and Control 15, S. 22–32.

- Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 14. Aufl.
- Schlichting, E.; Blume, H.-P. (1979): *Beitrag zur Objektivierung der DBG-Bodensystematik (2. Entwurf Juli 1979)*. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 29, S. 765–774.
- Schroeder, D. (1983): *Bodenkunde in Stichworten*. Hirt, Unterägeri.
- Schuchard-Fischer, C.; Backhaus, K.; Humme, U.; Lohrberg, W.; Plinke, W.; Schreiner, W. (1982): *Multivariate Analysemethoden*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Schumann, W. (1997): *Der neue BLV Steine- und Mineralienführer*. BLV, München, Wien, Zürich.
- Scull, P.; Franklin, J.; Chadwick, O. (2005): *The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape*. Ecological Modelling 181, S. 1–15.
- Shi, X.; Zhu, A.; Burt, J.; Oi, F.; Simonson, D. (2004): *A case-based reasoning approach to fuzzy soil mapping*. Soil Science Society of America Journal 68 (3), S. 885–894.
- Siebel, W. (1968): *System, Klassifizierung und Messung*. In: Diemer, A. (Hg.), *System und Klassifikation in Wissenschaft und Dokumentation*, Verlag Anton Hain, Meisenheim am Glan, S. 120–131.
- Simonson, R. (1967): *Outline of a generalized theory of soil genesis*. In: Drew, J. (Hg.), *Selected Papers in Soil Formation and Classification*, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, S. 301–310.
- Soil Survey Staff (Hg.) (1998): *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture/Natural Resources Conservation Service, Washington, 8. Aufl.
- Ströker, E. (1968): *Zur Systemproblematik in der Chemie*. In: Diemer, A. (Hg.), *System und Klassifikation in Wissenschaft und Dokumentation*, Verlag Anton Hain, Meisenheim am Glan, S. 79–95.
- Syrbe, R.-U. (1999): *Landschaftsbewertung auf der Grundlage unscharfen Wissens – dargestellt an einem Beispielsgebiet im Oberspreewald*. Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig 59 (1), S. 150–198.
- Tayfur, G.; Ozdemir, S.; Singh, V. (2003): *Fuzzy logic algorithm for runoff-induced sediment transport from bare soil surfaces*. Advances in Water Resources 26, S. 1249–1256.

- Torri, D.; Poesen, J.; Borselli, L. (1997): *Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset*. Catena 31 (1-2), S. 1–22.
- Triantafyllis, J.; Odeh, I.; Minasny, B.; McBratney, A. (2003): *Elucidation of physiographic and hydrogeological features of the lower Namoi valley using fuzzy k-means classification of EM34 data*. Environmental Modelling & Software 18, S. 667–680.
- Triantafyllis, J.; Ward, W.; Odeh, I.; McBratney, A. (2001): *Creation and interpolation of continuous soil classes in the Lower Namoi Valley*. Soil Science Society of America Journal 65, S. 403–413.
- Van Alphen, B. J.; Stoorvogel, J. J. (2000): *A functional approach to soil characterization in support of precision agriculture*. Soil Sciences Society of America Journal 64, S. 1706–1713.
- Verheyen, K.; Adriaens, D.; Hermy, M.; Deckers, S. (2001): *High-resolution continuous soil classification using morphological soil profile descriptions*. Geoderma 101, S. 31–48.
- Yang, M.-S.; Liu, H.-H. (1999): *Fuzzy clustering procedures for conical fuzzy vector data*. Fuzzy Sets and Systems 106, S. 189–200.
- Yang, M.-S.; Shih, H.-S. (2001): *Cluster analysis based on fuzzy relations*. Fuzzy Sets and Systems 120, S. 197–212.
- Zadeh, L. (1965): *Fuzzy sets*. Information and Control 8 (3), S. 338–353.
- Zahid, N.; Abouelala, O.; Limouri, M.; Essaid, A. (2001): *Fuzzy clustering based on K-nearest-neighbours rule*. Fuzzy Sets and Systems 120, S. 239–247.
- Zhu, A.; Hudson, B.; Burt, J.; Lubich, K.; Simonson, D. (2001): *Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic*. Soil Sciences Society of America Journal 65, S. 1463–1472.
- Zhu, A.-X. (1997): *A similarity model for representing soil spatial information*. Geoderma 77, S. 217–242.
- Zhu, A.-X. (2000): *Mapping soil landscape as spatial continua: The neural network approach*. Water Resources Research 36, S. 663–677.
- Zhu, A.-X.; Band, L.; Dutton, B.; Nimlos, T. (1996): *Automated soil inference under fuzzy logic*. Ecological Modelling 90, S. 123–145.
- Zhu, A.-X.; Mackay, D. (2001): *Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling*. Journal Of Hydrology 248, S. 54–77.
- Zimmermann, H.-J. (2001): *Fuzzy set theory – and its applications*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 4. Aufl.

Teil II

Veröffentlichungen

Kapitel 5

Bodensystematik und Bodenklassifikation, Teil I: Grundlagen

In der vorliegenden Form zur Veröffentlichung angenommen bei der Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde (Journal of Plant Nutrition and Soil Science), Veröffentlichung im Heft 168 (1), derzeit im Druck. Die folgenden Seiten enthalten das revidierte Manuskript.

Bodensystematik und Bodenklassifikation

Teil I: Grundbegriffe

Christoph Albrecht^{1*}, Reinhold Jahn², Bernd Huwe¹

¹Abteilung Bodenphysik, Universität Bayreuth, 95447 Bayreuth

²Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Weidenplan 14, 06108 Halle/S.

*Korrespondenz: christoph.albrecht@uni-bayreuth.de

Schlagworte: Bodensystematik, Bodenklassifikation, Bodenidentifizierung, Taxonomie, Bodenkartierung, Pedogenese

Key words: Soil Systematic, Soil Classification, Soil Identification, Taxonomy, Soil Mapping, Pedogenesis

Zusammenfassung

Bodenordnungssysteme lassen sich meist nach zwei Prinzipien entwickeln: Entweder werden nur rein bodenkundliche Informationen als kategorisierendes Merkmal verwendet (pedogenetische Faktoren/Prozesse), oder die Kategorienbildung erfolgt problemorientiert anhand ausgewählter Parameter. Die meisten der weltweit verwendeten Bodenordnungssysteme lassen sich nach ihrer Grundausrichtung zu einem der beiden Typen zuordnen. Diese Betrachtungsweise ist nicht neu und wird in der Literatur mit unterschiedlichen Begriffen und Begriffsinhalten dargestellt.

In der vorliegenden Arbeit werden die verschiedenen Definitionen von Systematik, Klassifikation, Taxonomie und Identifizierung zusammengefasst und geordnet. Dabei fällt auf, dass die Begriffe mit sehr unterschiedlichen Inhalten oft synonym verwendet werden.

Grundgedanke unserer Überlegungen ist die Trennung von Systematik, Klassifikation und Identifizierung. Systematik ist die grundsätzliche wissenschaftlich-deduktive Gliederung von Objekten in systematische Einheiten. Dabei soll das gesamte Wissen eines Fachgebietes in eine überschaubare Form gebracht werden, im Mittelpunkt stehen sowohl die umfassende Beschreibung einzelner Objekte als auch die Beziehungen zwischen den Objekten. Im Gegensatz dazu ist eine Klassifikation die zielorientiert-induktive Gliederung von Objekten. Die entstehenden Klassen werden nur anhand ausgewählter Parameter abgegrenzt, womit ein

schneller Überblick bei speziellen Fragestellungen ermöglicht wird. Die Identifizierung ist die Einordnung von neuen Objekten in eine bestehende Systematik oder Klassifikation.

Eine zweifelsfreie Identifizierung erfordert die Messbarkeit der kategorisierenden Merkmale. Bei einer genetisch angelegten Bodensystematik sind die Merkmale die bodenbildenden Prozesse und Faktoren. Da sie beim gegenwärtigen Kenntnisstand oft nicht messbar sind, bleiben Versuche, einen Boden in eine Systematik einzuordnen, häufig hypothetisch und dadurch subjektiv. Die Ergebnisse einer Bodensystematisierung sind daher oft anfechtbar, weil sie nicht durch Messwerte verifiziert werden können. Im Gegensatz dazu erlauben Bodenklassifikationen objektive Profilsprachen. Da jedoch die Festlegung der Grenzwerte eher pragmatisch nach Zweckmäßigkeit geschieht und nicht wissenschaftlich anhand von Prozessintensitäten, ist die Verwendung als grundlegendes Ordnungssystem eines Wissenschaftsgebietes nicht möglich.

Die Bodenkunde benötigt beide Arten von Ordnungssystemen, um wissenschaftliche und praktische Ansprüche gleichermaßen erfüllen zu können, jedoch erfordern die Vollendung und Verifizierung der Systematik umfangreiche Forschungsarbeiten. Kurzfristig ist dieses Problem nur durch die Entwicklung einer kennwertbasierten Klassifikation lösbar, mit der die Kategorien der bestehenden Systematik so gut wie möglich nachgebildet werden. Langfristig ist die exakte Erforschung und Modellierung der bodenbildenden Prozesse aber unumgänglich.

Soil Systematic and Classification Systems

Chapter I: Fundamentals

Summary

Soil ordering systems are generally based and developed on one of two underlying principles: They are either categorized according to soil forming processes, or the formation of categories develops by chosen parameters. This perspective has already been established in the literature, though it is often confusing as many terms are defined and applied differently.

In this contribution the various definitions of a systematic, a classification system and a taxonomy will be clearly defined and contrasted from each other. Close attention is paid to both the differences and the similarities between a systematic and a classification system, especially pertaining to their practical applications. The systematic categorization requires that the category forming characteristics, in this case the soil forming processes, be somehow measurable. Currently, it is unfortunately not feasible to objectively quantify most soil forming processes, thus all attempts at categorizing soils into a systematic are hypothetical and highly

subjective in nature. The identification result derived with a soil systematic is open to question and contestable, since a graded measuring system does not yet exist to verify determinations. In contrast, a soil classification system does allow an objective soil profile identification, although such systems are conceived pragmatically and designed for a practical purpose (e.g. not scientifically based on process intensities). Unfortunately, the classification system cannot be applied as a universal scientific categorization system due to this method of conception.

Both categorization approaches are required in soil science in order to satisfy both the practical and the scientific aspects of the field, however substantial research must be done to complete and verify the systematic. The only viable short term solution is through the development of a graded classification system where the categories of the system are directly derived from the current systematic approach. In the long run both the exact investigation and the detailed modelling of the soil forming processes are inevitable.

When scientists discuss methods of analysing a solution for traces of phosphate, they are practical, reasonable, and unemotional. When the same men discuss the classification of soils, these virtues are liable to evaporate. Partly this is because national prestige is felt to be at stake; but still more, because so few workers are clear about what they are doing and why they are doing it.

G.W. Leeper (1956)

1 Einleitung

Grundlagen wissenschaftlichen Arbeitens sind die Abstraktion, die Darstellung von Zusammenhängen und die eindeutige Zuordnung von Objekten zu Klassen. Nur so kann die Vielfalt an Informationen aus Messungen und Beobachtungen in eine überschaubare Form gebracht werden. Ergebnisse solcher Arbeiten sind unter anderem Systematiken und Klassifikationen. In der Bodenkunde existiert eine Vielzahl von Ordnungssystemen, mit denen sich die Informationen über den komplexen Untersuchungsgegenstand in eine überschaubare, meist regional und/oder inhaltlich begrenzte Form bringen lassen sollen.

Bodenordnungssysteme werden kaum hinsichtlich ihrer praktischen Anwendbarkeit beurteilt, vielmehr scheint davon ausgegangen zu werden, dass die korrekte Beschreibung der Kategorien als Bestimmungsschlüssel ausreicht. Das trifft aber nur für Klassifikationen mit exakten Grenzwerten zu, nicht für morphogenetische Systematiken. Daraus resultieren Diskrepanzen zwischen den genetischen, prozessorientierten Informationen der Systematik und den Anforderungen an eine einfache und sichere Bodenklassifikation.

In der Literatur werden bearbeiterabhängig verschiedene Begriffe zur Beschreibung von Ordnungssystemen

verwendet, wobei diese mit den unterschiedlichsten Bedeutungen belegt sind. Ein Ziel dieser Arbeit ist es die Definitionen zusammenzufassen, um darauf aufbauend die wichtigsten Bodenordnungssysteme zu typisieren. Daraus werden deren Vor- und Nachteile in der wissenschaftlichen und praktischen Anwendung sowie Perspektiven für die weitere bodenkundliche Arbeit abgeleitet.

2 Grundbegriffe

Die Bereitstellung und Anwendung eines wissenschaftlichen Ordnungssystems wird in der Literatur im Wesentlichen mit drei Begriffen beschrieben: Systematik, Klassifikation und Taxonomie. Sie werden unterschiedlich eingesetzt, wobei die Spannweite von synonyme Behandlung bis zur genauen Spezifizierung unter Zuhilfenahme weiterer Begriffe reicht. Die Kritik an Ordnungssystemen beruht meist auf einer unterschiedlichen Auslegung der Termini. Grundsätzlich werden drei Sachverhalte betrachtet:

1. Die wissenschaftlich umfassende, expertengestützte Darstellung aller vorhandenen Informationen eines Fachgebietes, wobei besonders die (entwicklungsbedingten) Zusammenhänge zwischen den einzelnen Objekten interessieren (hier: Systematik). In der anglikanischen und auch jüngeren deutschen bodenkundlichen Literatur wird diese Art der Wissensstrukturierung oft als genetische Klassifikation bezeichnet (z.B. *Schlichting*, 1969).
2. Die zielorientierte, datengestützte Bildung von Einheiten, mit denen eine schnelle und sichere Einordnung von Objekten nach festgelegten Kriterien möglich ist, sowie das Ergebnis dieser Klassenbildung (hier: Klassifikation).
3. Der Vorgang der Einordnung von Objekten in eine Systematik oder in eine Klassifikation (hier: Identifizierung).

In Abhängigkeit vom Themengebiet kann es zu Überlagerungen der drei Punkte kommen. Beispielsweise ermöglicht eine Klassifikation durch die Angabe exakter Grenzwerte immer eine eindeutige Identifizierung. Sehr häufig kommt es vor, dass eine Klassifikation einer Systematik ähnelt. Das tritt besonders bei komplexen Sachverhalten auf, weil die Vielzahl von beschreibenden Parametern eine vollständige Erfassung der Untersuchungsgegenstände impliziert. Um im Folgenden Missverständnisse zu vermeiden, werden die Begriffe zunächst definiert und dann mit der Bodenkunde in Zusammenhang gebracht.

2.1 Systematik

Nach Übertragung einer Definition aus der Biologie (*Simpson* (1961), zit. in *Mayr* (1975)) auf den allgemeinen Fall ist Systematik die wissenschaftliche Untersuchung von Typen [Objektkategorien] und der Vielgestaltig-

keit von Objekten und sämtlicher Beziehungen untereinander. Unter Beachtung vieler, idealerweise aller Merkmale werden die Erkenntnisse eines Wissensgebietes geordnet. Aus dieser Ordnung lassen sich Gemeinsamkeiten und Unterschiede erklären, basierend auf quantifizierbaren Intensitäten der Merkmalsausprägungen. Prinzipiell sind die Objektkategorien einer Systematik theoretische Gebilde, denen reale Objekte zugeordnet werden.

Durch die deduktive Herangehensweise bei der Entwicklung einer Systematik werden nicht alle Einzelercheinungen, sondern Idealtypen oder „Ideen“ beschrieben. Die Explikationen, also die vollständigen Definitionen der Objektkategorien, enthalten alle Struktur-, Leistungs- und Relationsmerkmale. Dadurch können die Explikationen sehr umfangreich werden, weshalb sie meist verkürzt werden und nur die für die Objektkategorie relevanten Kriterien enthalten (Siebel, 1968).

In Systematiken werden Objekte zueinander in Beziehung gesetzt. Beziehungen zwischen zwei Objekten können nur anhand von beziehungsstiftenden Merkmalen gekennzeichnet werden. Werden mehr als zwei unterschiedliche Objekte betrachtet, muss zusätzlich die Intensität der Beziehung angegeben werden. Dafür wird ein metrischer Maßstab benötigt. Neue grundsätzliche Erkenntnisse können dazu führen, dass eine Systematik geändert werden muss (Siebel, 1968).

Naturwissenschaftliche Systematiken sind oft genetisch konzipiert, haben also die Entstehung der Typen und Objekte als grundsätzliches Ordnungsprinzip. Neben der fehlenden Merkmalsselektion ist das der Grund für die Bezeichnung als natürliches System. Die Abbildung 1 enthält zwei Darstellungsmöglichkeiten für Systematiken. Bild 1 (a) zeigt schematisch einen Stammbaum, wie er in den Biowissenschaften üblich ist, Bild 1 (b) visualisiert Entwicklungslinien, mit denen auch in der Bodenkunde Zusammenhänge gekennzeichnet werden. Ein Beispiel für Systematiken ist das in der Chemie verwendete Periodensystem der Elemente (Ströker, 1968). Durch die Anordnung in Gruppen und Perioden können sowohl die Zusammenhänge zwischen den Elementen als auch charakteristische Eigenschaften einzelner Elemente bestimmt werden. Der wichtigste zugrunde liegende Maßstab ist die Anzahl der Protonen, was experimentell – also durch Messung – nachgewiesen wurde.

Manchmal wird Systematik auch aufgefasst als die Wissenschaft vom Ordnen und Zusammenstellen von Objekten in Klassen oder Gruppen eines Systems nach bestimmten Gesetzen. Sie beschäftigt sich mit Klassifikation und Identifizierung sowie den theoretischen Grundlagen der beiden Methoden (Schroeder und Lamp, 1976).

Abbildung 1

2.2 Klassifikation

Der Begriff der Klassifikation wird sowohl umgangssprachlich als auch im wissenschaftlichen Kontext mit verschiedenen Bedeutungen verwendet. In der engen Auslegung handelt es sich um den Vorgang der Aufteilung einer Menge von Objekten in eine kleinere Menge von Typen, Klassen, Gruppen oder andere Klassifikationseinheiten. Sie unterscheidet sich von der einfachen Aufteilung der Objektmenge dadurch, dass Strukturen aufgedeckt und nicht willkürliche Grenzen zwischen den Klassen gezogen werden (*Gordon, 1981*).

Sehr oft wird der Begriff weiter gefasst. Dann sind auch das Ergebnis eines Klassifikationsprozesses und die Identifikation eine Klassifikation. Somit werden durch einen Begriff zwei verschiedene Prozesse und ein System beschrieben. *Bumann et al. (1968)* haben vorgeschlagen, statt dessen von Klassifikation, Klassifikat und Klassierung zu sprechen. Diese Terminologie hat sich aber nicht durchgesetzt. *Kotz und Johnson (1982)* bezeichnen die Klassifikation als deskriptive (Benennen und Zusammenfassen) und die Identifizierung als prädiktive Klassifikation (Untersuchen, Vorhersagen, Handeln). Ein weiterer häufig genutzter Begriff ist der des künstlichen Systems.

Es gibt viele Beispiele für Klassifikationen, weil dazu alle Begriffssysteme gehören, die an Hand von Beobachtungen oder nach praktischen Gesichtspunkten entwickelt werden. Das sind unter anderem die unzutreffenderweise so bezeichnete Systematik der bodenbildenden Substrate (*Arbeitskreis Bodensystematik, 1998*) und alle Klassierungen von Parametern wie Humus- oder Carbonatgehalt in der KA4 (*Arbeitsgruppe Boden, 1994*). Abbildung 1 zeigt zwei grafische Darstellungen von Klassifikationen. Der CART-Baum in Abbildung 1 (c) unterscheidet sich vom Stammbaum (Abbildung 1 (a)) dadurch, dass an jedem Knotenpunkt eine binäre Kennwertabfrage steht. Abbildung 1 (d) enthält die auf zwei Dimensionen beschränkte Darstellung des Ergebnisses einer Clusteranalyse.

Baron (1968, S. 17) nennt drei wesentliche Charakteristika von Klassifikationen:

1. Klassifikationen sind kein Ziel der Wissenschaft an sich, sondern nur Hilfsmittel, um Übersicht zu gewinnen und bestimmte Eigenschaften der behandelten Objekte hervorzuheben.
2. Sie basieren auf einer begrenzten Zahl von Objekten, nicht auf der Gesamtheit aller möglichen.
3. Auf jedem Gebiet sind viele Klassifikationen nebeneinander möglich und eine jede besitzt ihren eigenen Wert.

Nach *Gordon (1981)* sind die wesentlichen Ziele der Entwicklung einer Klassifikation Vereinfachung und Vorhersage durch Strukturierung und Gruppierung. Da die Klassifikationskriterien subjektiv ausgewählt werden, können die zugrunde liegenden Maßstäbe beliebig skaliert sein.

Ein Nachteil von Klassifikationen ist, dass sie nach der Entwicklung nur selten verändert werden und dadurch nur die zum Zeitpunkt der Aufstellung bekannten Objekte umfassen. Wegen der fehlenden Anpassung an den sich möglicherweise verändernden Kenntnisstand kann die Einordnung/Identifizierung neuer Elemente unzweckmäßig sein oder zu heterogenen Klassen führen (*Lamp*, 1972).

Die Eigenschaften, nach denen Objekte identifiziert werden, werden in sogenannten Extensionsdefinitionen zusammengefasst. Deren Aufbau und Umfang muss eine möglichst einfache, schnelle und vor allem zweifelsfreie Identifizierung zulassen (*Siebel*, 1968). Außerdem muss die Klassifikation stabil, also durch Beobachtungsfehler und neue Variablen oder Objekte nicht beeinflussbar sein, und muss das Kriterium der Objektivität erfüllen. *Gordon* (1981) verwendet diesen Begriff vor allem dahingehend, dass unabhängige Bearbeiter bei der Untersuchung des gleichen Datensatzes zu den gleichen Ergebnissen kommen sollten.

2.3 Taxonomie

Mit dem Begriff der Taxonomie wird kein eigenständiges Ordnungssystem gekennzeichnet. Allgemein wird darunter die Einordnung in eine Systematik verstanden (*Wissenschaftlicher Rat der Dudenredaktion*, 1997), oft aber auch Klassifikation im Sinne von Identifikation. Speziell im angelsächsischen Raum und bei der Betrachtung vieler Parameter werden oft Taxonomie und Systematik synonym verwendet (*Weberling* und *Stützel*, 1993). *Mayr* (1975) sowie *Schroeder* und *Lamp* (1976) definieren Taxonomie als Theorie und Praxis der Klassifikation.

2.4 Identifizierung

Identifizieren bedeutet, ein Objekt mit den Elementen eines Ordnungssystems anhand festgelegter Kriterien in Beziehung zu setzen und es dadurch einem oder mehreren Elementen des Ordnungssystems eindeutig zuzuordnen. Dazu ist ein grundlegendes Bezugssystem (Maßstab) zwingend notwendig. Die Art des verwendeten Maßstabs ist ein wesentliches Unterscheidungskriterium zwischen Systematik und Klassifikation und wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

Die Identifizierung wird bis auf wenige Ausnahmen als Klassifikation bezeichnet. Die prinzipiellen Ablaufmöglichkeiten sind der Abbildung 2 zu entnehmen. Dabei sind besonders die Unterschiede in der Datenerfassung zu beachten, aus denen ersichtlich ist, dass zur Identifikation mit einer Systematik erheblich mehr Informationen benötigt werden als bei der Klassifikation. Solange jedoch die Einordnung in die systematischen Einheiten auf Abschätzungen beruht und nicht messbar ist, kann sie nicht bewiesen werden und bleibt damit hypothetisch.

Abbildung 2

2.5 Unterschiede zwischen Systematik und Klassifikation

Bei der Darstellung der Unterschiede zwischen Systematik und Klassifikation muss zuerst deren grundlegendes Bezugssystem untersucht werden. Entscheidend ist, dass die Gliederungsprinzipien einer Systematik immer selbst das Bezugssystem darstellen, anhand dessen die systematischen Einheiten abgegrenzt werden (internes Bezugssystem), während eine Klassifikation auf Parametern mit externen Bezugssystemen aufgebaut sein kann. Diese Unterscheidung lässt sich aus den Ausführungen von *Siebel* (1968) ableiten, ohne dort explizit genannt zu werden. Auch *Laatsch* (1957) fordert, dass Bodentypen nur nach bodeneigenen, nicht nach bodenfremden Kriterien gegliedert werden sollten. Nach *Schlichting* (1970) sind Art und Ausmaß der bodenbildenden Prozesse objektive Kriterien für die Bodensystematik. Die verschiedenen Bezugssysteme sollen mit zwei Beispielen verdeutlicht werden:

1. In der deutschen Bodensystematik (*Arbeitskreis Bodensystematik*, 1998) ist der Ae-Horizont definiert als „A-Horizont, sauergebleicht, podsoliert, meist Munsell-Farbwert 4/ und mehr ... sowie Quotient aus Farbwert und Farbtiefe 2,5 und größer; meist über einem Illuvialhorizont ... liegend.“ Die dabei verwendeten Begriffe sauergebleicht, podsoliert und Illuvialhorizont sind originär bodenkundlich; Personen ohne entsprechende Vorbildung können diesen Angaben keine Informationen entnehmen. Es handelt sich damit um ein internes Bezugssystem, das innerhalb des Fachgebietes Bodenkunde eine weitreichende Aussagekraft hat, außerhalb jedoch kaum eine Rolle spielt. Im Gegensatz dazu ist die Angabe der Munsell-Farbe einem externen Bezugssystem aus der Physik bzw. der Farbenlehre entnommen. Die Information kann als Hilfsmittel zur Identifizierung verwendet werden, hat aber im Gegensatz zu Informationen wie „Podsolierung“ keine oder nur eine extrem geringe bodenkundliche Aussagekraft.

Die meisten in der Bodenkunde verwendeten Bezugssysteme sind extern, weil Erkenntnisse aus Nachbarwissenschaften verwendet werden. Erst die Aggregierung von Details aus Geologie, Klimatologie, Biologie und anderen Fachgebieten führt zu Informationen, die mit dem bodenkundlich-internen Bezugssystem sinnvoll sind.

2. Der lateinische Pflanzename *Centaurea cyanus* ist nur im Rahmen des internen Bezugssystems der Pflanzensystematik verständlich. Er integriert Informationen z.B. zum Aussehen, zu Standortanforderungen oder zur Fortpflanzung. Bei der Feldbestimmung der Pflanze Kornblume werden dagegen

Größen aus externen Bezugssystemen verwendet, beispielsweise mathematische (Anzahl und Geometrie der Blätter) oder physikalische (Farbangaben) Merkmale.

Es ist ein grundsätzliches Problem, die hochkomplexen internen Bezugssysteme zur Identifikation von Objekten zu verwenden. Die Vielzahl von enthaltenen Einzelinformationen ist zu groß, als dass sie vollständig bei jedem Identifizierungsvorgang beachtet werden kann. Außerdem erfordert die Identifizierung objektive Kriterien, um besonders in Übergangsbereichen zweifelsfreie, allgemein gültige und reproduzierbare Ergebnisse zu ermöglichen. Die internen Bezugssysteme müssen daher so weit aufgegliedert werden, bis deren vollständige Messbarkeit gewährleistet ist (Siebel, 1968). Es gibt einige weitere Eigenschaften, in denen sich die Ordnungssysteme unterscheiden. Eine Systematik, speziell auf genetischer Basis, entsteht deduktiv. Zuerst werden die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der Zusammenhänge der Objekte aufgestellt, woraus sich die Strukturen der einzelnen Objekte erklären lassen. Im Gegensatz dazu werden bei der Aufstellung eines Klassifikationssystems einzeln beobachtete Phänomene anhand ausgewählter Kriterien geordnet, es wird also induktiv gearbeitet. Eine Klassifikation kann nie die alleinige unangefochtene Grundlage eines Wissenschaftsgebietes sein, weil es immer Argumente für Änderungen bei der Grenzziehung der Klassen oder bei der Wichtung einzelner Parameter geben wird. Die einzelnen Schritte der Systementwicklung sind in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

Abbildung 3

Systematiken sind oft hierarchisch geordnet, weil einige Merkmale bei sehr vielen Objekten auftreten, wodurch eine Gruppierung und Strukturierung möglich ist. Je höher die hierarchische Stufe, desto geringer ist die Anzahl der betrachteten Parameter. Die zur Ausscheidung von untergeordneten Kategorien verwendeten Merkmale müssen nicht zwangsläufig für alle systematischen Einheiten gleich sein. Demgegenüber können Klassifikationssysteme unabgestuft sein, aber jedes einzelne Objekt wird mit den gleichen Merkmalen beschrieben. Die Diskussion um die wesentlichen Merkmale eines der beiden Systeme ist nur relevant, wenn die Klassifikation die Systematik genau widerspiegeln soll, da die Systematik prinzipiell alle Merkmale betrachtet und bei der Klassifikation ohnehin nur ausgewählte Parameter verwendet werden. Daraus lässt sich ableiten, dass eine Systematik grundsätzlich offen für verschiedenste Nutzungen ist, während eine Klassifikation für einen bestimmten Zweck entwickelt wird (Siebel, 1968).

Die biologischen Ordnungssysteme scheinen nicht in das oben aufgestellte Schema zu passen – einerseits umfassen und ordnen sie alle Arten (systematisches Element), andererseits ist eine Identifizierung oft mit

einfachen binären Abfragen möglich (klassifikatorisches Element). Hier ist zu beachten, dass die Biologie zwei grundverschiedene Ziele verfolgt, ein synthetisches (den Ausbau des natürlichen Systems ohne Rücksicht auf seine praktische Verwendbarkeit) und ein analytisches (die Anfertigung von Bestimmungsschlüsseln) (Baron, 1968, S. 22). Die biologische Systematik nutzt die Homologie von Organen als wesentliches Kriterium. Häufig sind relativ unauffällige oder schwer auffindbare Merkmale besser zur Kennzeichnung der Verwandtschaft geeignet als äußerliche Ähnlichkeiten. Mit der Systematik lassen sich die Fragen klären, warum eine Art wie aussieht und wie nah oder fern verwandt die anderen Arten sind. Gemessen werden dabei Größen wie die Form, die Länge oder die Häufigkeit des Auftretens von Organen. Bei der biologischen Klassifikation steht dagegen die einfache und sichere Handhabbarkeit im Vordergrund. Deshalb werden oft für die Systematik nebensächliche Kennzeichen zur Identifizierung verwendet. „Eine logische Analyse von ‚Bestimmungstabellen nach dem natürlichen System‘ zeigt denn auch, dass diese meist keineswegs ein Spiegelbild des natürlichen Systems darstellen, sondern in vielen Fällen recht willkürlich verfahren und den Benutzer nicht erkennen lassen, welche Merkmale für die systematische Stellung eines Organismus von Bedeutung sind.“ (Baron, 1968, S. 23)

Bei dem Vergleich biologischer und pedologischer Ordnungssysteme sind außerdem zwei wesentliche Unterschiede in den Grundvoraussetzungen zu beachten: Zum einen gibt es bei Böden keine vergleichbare Entwicklung wie die der Evolution, ausgehend von einem gemeinsamen Vorfahren (Avery, 1968). Zum anderen werden nicht Individuen untersucht, sondern ein raum-zeitliches Kontinuum, aus dem zu Untersuchungszwecken meist ein- bis zweidimensionale Informationen gewonnen werden. Dadurch kommt es zu Unsicherheiten bei der Abgrenzung.

Tabelle 1

Die wesentlichen Unterschiede zwischen einer Systematik und einer Klassifikation sind in Tabelle 1 aufgeführt. Abbildung 4 verdeutlicht die unterschiedliche Herangehensweise bei der Bodenidentifikation an einem idealisierten Beispiel. Gezeigt wird ein Profil eines baumbestandenen Hangs aus sandig-lehmigem Substrat, in dem eine Catena aus vier Bodenprofilen angelegt ist. Im unteren Bereich ist ein Gley ausgebildet, im verflachten Oberhang eine Braunerde; die beiden dazwischen liegenden Profile sind Übergangsbodentypen. Es wird deutlich, dass bei der Verwendung der Systematik Schwierigkeiten bei der exakten Abgrenzung der Übergangsbereiche bestehen, da keine eindeutige Skalierung für Verbraunung und Vergleyung vorliegt und die Kriterien für Übergangshorizonte (Bv, Go-Bv, Bv-Go, Go) unscharf sind (vgl. Definition Bv und Go in Ar-

beitskreis *Bodensystematik*, 1998). Im Gegensatz dazu können die Profile eindeutig zu Klassifikationseinheiten zugeordnet werden, da hier in diesem Falle die Bedingungen für einen Go-Horizont (>10 % Rostflecken ...) und die Tiefenlage des Auftretens klar geregelt sind. Damit ist es jedoch nicht möglich, die Kontinuität der Bodendecke systematisch zu erfassen. Eine Ausnahme stellen die *fuzzy*-Klassifikationen dar (z.B. *McBratney und Odeh*, 1997; *Grunwald et al.*, 2001). Sie ermöglichen die Modellierung fließender Übergänge und haben dadurch Vorteile gegenüber den klassischen Ansätzen. Wegen des hohen Datenbedarfs beschränkt sich ihr Einsatz bisher auf Pilotstudien, außerdem haben alle vorgestellten Arbeiten nur eine begrenzte inhaltliche oder räumliche Gültigkeit.

Abbildung 4

3 Verwendung der Begriffe in der Bodenkunde

Die Ordnungssysteme der Bodenkunde werden oft als Klassifikation bezeichnet, der Begriff Systematik ist weniger verbreitet. Das Klassieren von Böden wird im Grunde seit der Zeit vorgenommen, seit dem Menschen Böden bewusst bearbeiten und nutzen (<3000 Jahre), wobei zunächst Parameter zur Klasseneinteilung benutzt wurden, welche in der Lage sind die Bearbeitbarkeit und den Ertrag widerzuspiegeln. Mit der Realisierung der Böden als Naturkörper und damit als Ergebnis von bodenbildenden Faktoren und Prozessen entstand die Notwendigkeit der Unterscheidung zwischen angewandter bzw. effektiver Klassifikation einerseits und der genetischen Klassifikation andererseits (z.B. *Schlichting*, 1969)¹.

Die wichtigen international verwendeten Systeme *US Soil Taxonomy* (*Soil Survey Staff*, 1998) und *FAO-UNESCO/WRB* (*FAO-UNESCO*, 1997; *ISSS/ISRIC/FAO*, 1998) sind grundsätzlich Klassifikationen. Kennzeichen dafür ist die vielfache Verwendung externer Bezugssysteme zur Charakterisierung der diagnostischen Merkmale. Angaben zur Entstehung oder zur Vergesellschaftung mit anderen Horizonten sind Teil der Beschreibung, aber nicht Teil der Definitionen. Die Informationen zur Feldbestimmung erlauben teilweise verschiedene Klassifizierungen. Eventuelle Zweifel können aber mit Messungen im Labor beseitigt werden. In verschiedenen Veröffentlichungen (z.B. *Boul et al.*, 2003; *Wilding et al.*, 1983) werden die genetische Grundlagen der Bodenordnungssysteme hervorgehoben, wonach sie Systematiken im Sinne der obenstehenden Definitionen sein müssten. Bei der praktischen Anwendung kommt es jedoch nicht darauf an bodenbildende Prozesse zu erkennen, sondern nur Bodeneigenschaften, die mit den Prozessen korrelieren. Diese

¹ Die Darstellung der Geschichte der Bodenklassifikation ist nicht Anliegen dieses Artikels. Zu dem Thema erscheint in Kürze ein Aufsatz von F. Beinroth und K. Stahr.

erfassbaren Eigenschaften müssen aber nicht notwendigerweise durch die Prozesse entstanden sein, die von den Autoren der Bodenordnungssysteme damit verknüpft wurden. Dadurch sind Identifikationen möglich, denen ein morphogenetisch geprägter Bodenkundler nicht zustimmen kann. Außerdem können Böden mit gleicher Genese, aber graduell unterschiedlichen Eigenschaften auf hoher Ebene unterschiedlich identifiziert werden. Die Problematik soll am Beispiel eines *argic horizon* (Tonanreicherungshorizont nach WRB, ISSS/ISRIC/FAO, 1998) verdeutlicht werden. Zur Identifikation des Horizonts muss eine pedogen induzierte Tongehaltsänderung nachgewiesen werden, wobei der Prozess, der diese Änderung erzeugt hat, nicht festgelegt ist. In einer Systematik wird dagegen gefordert, dass der Prozess der Lessivierung angegeben wird. Außerdem sind in der Definition bestimmte Mächtigkeitskriterien (Mächtigkeit von 7.5 cm) zwingend vorgeschrieben. Das bedeutet, dass ein an sich homogener Horizont, dessen Mächtigkeit sich kleinräumig ändert, an einer Stelle ein *argic horizon* ist und an anderer Stelle nicht. Pedogenetische Informationen verlieren dadurch ihre Bedeutung.

Im Gegensatz zu den kennwertbasierten Klassifikationen sind viele der europäischen Bodenordnungssysteme – so auch die deutsche Bodensystematik – genetisch aufgebaut und damit von ihrer Grundanlage her eine Systematik. Kennzeichen sind unter anderem die Verwendung des internen Bezugssystems „bodenbildende Prozesse“ oder die theoretische Beschreibung der Objektkategorien (Lamp, 1972). Die Definitionen der Horizonte sind dadurch gekennzeichnet, dass die Angaben zum Bildungsprozess wichtiger sind als die teilweise angegebenen Kennwerte zur Erleichterung der Abgrenzung und der Identifikation.

Ansätze, die auf statistischen Auswertungen von Bodendaten beruhen, also numerische Klassifikationen (Lamp, 1972; Verheyen et al., 2001) oder koordinatenbasierte Systeme (FitzPatrick, 1988), sind reine Klassifikationen. Die Identifizierung wird anhand ausgewählter Parameter vorgenommen, die für alle Horizonte gleich sind. Hier ist das *fuzzy* Zuordnungsschema für die australischen *Great Soil Groups* von Mazaheri et al. (1995) hervorzuheben, mit dem systematische Einheiten sehr wirklichkeitsnah abgebildet werden können. Das wird möglich, weil in dem Modell die Grenzen zwischen den einzelnen *Great Soil Groups* fließend sind. Für verschiedene Autoren gibt es in der Bodenkunde keine Systematik, sondern nur Klassifikationen (Leeper, 1956; Avery, 1968; Schroeder und Lamp, 1976). Systematiken sind solche Klassifikationen, die genetische Kriterien zur Klassenbildung verwenden. Gemessen an der gegenwärtigen Ausgestaltung der Ordnungssysteme muss dieser Typisierung zugestimmt werden, jedoch nicht unter Beachtung von deren wissenschaftlicher Bedeutung. Die in den Arbeiten von Leeper (1956) und Avery (1968) geäußerte Kritik an genetischen Systematiken beruht vor allem auf der Gleichsetzung von Phylogenese (Stammesgeschichte) und Pedogenese.

Bodensystematik und –klassifikation werden in verschiedenen Quellen unterschiedlich definiert. Geowissenschaftliche Lexika erklären den Begriff Bodenklassifikation meist als systematische Anordnung von Böden (Gregorich et al., 2002; Clark, 1989), aber auch als typologische Gliederung der Böden (Hintermaier-Erhard und Zech, 1997) oder Grundlage eines Bodenordnungssystems (Brunotte et al., 2002). Der Begriff der Bodensystematik (*soil systematic* oder *soil taxonomy*) wird in den verwendeten englischsprachigen Nachschlagewerken nicht definiert, in Deutschland ist es das Teilgebiet der Bodenkunde, das sich mit der Gliederung der Böden beschäftigt (Ehwald, 1989; Hintermaier-Erhard und Zech, 1997). Nach Lamp (1983) ist Bodensystematik die Lehre vom Sammeln, Ordnen und Verteilen von Bodeninformationen.

Bei der Arbeit mit englischsprachiger Literatur ist zu beachten, dass dort der Begriff *classification* oft als Oberbegriff für Ordnungssysteme verwendet wird. Die Unterscheidung in Systematik und Klassifikation wie in dieser Arbeit wird meist nicht vorgenommen. Zum Teil wird der Unterschied durch Begriffspaare wie *natural/artificial classification*, *universal/special classification* oder *taxonomy/classification* verdeutlicht (vgl. Eswaran et al., 2003). Aus der Aufzählung der Begriffe und Definitionen wird deutlich, dass auch in der englischsprachigen Literatur keine eindeutige Trennung der verschiedenen Ordnungssysteme zu finden ist. Eine Liste von Definitionen zu relevanten Begriffen ist von Buol et al. (2003, S. 17f) veröffentlicht. Dort werden bei der allgemeinen Beschreibung *categorization* (in etwa Systematik) und *classification* (Klassifikation) unterschieden, in der weiteren Diskussion wird aber nur der Begriff *classification* für beide Ordnungssysteme verwendet (*natural/scientific* und *technical classification*). Unter dem Begriff *taxonomy* verstehen Buol et al. (2003, S. 17) „ein bestimmtes formalisiertes System der Klassifikation, entwickelt für einen bestimmten Zweck und kategorisiert unter Verwendung von vorher bestimmten trennenden Eigenschaften; ein formalisiertes System der Kategorisierung oder die Wissenschaft der Klassifikation und Kategorisierung“. Dabei wird deutlich, dass der Terminus *taxonomy* auch im Englischen ohne genaue Zuordnung zu einem Ordnungssystem verwendet wird.

Einige Autoren unterscheiden die bodenkundlichen Ordnungssysteme im Sinne der oben stehenden Definitionen (Kubierna, 1953; Schlichting, 1969; Mückenhausen, 1985; Buol et al., 2003), während an anderer Stelle die Begriffe Systematik und Klassifikation inhaltlich nicht mehr getrennt werden (z.B. Scheffer und Schachtschabel, 1998; Rehfuess, 1981). In den Beiträgen sind zwei Tendenzen zu erkennen:

- Trotz der teilweise korrekten Definitionen kommt es bei der Beschreibung der Ordnungssysteme zu Fehlern bei der Begriffsverwendung.
- Nach der Abwägung von Vor- und Nachteilen von Systematiken und Klassifikationen steht die Ent-

scheidung für oder gegen eines der Ordnungssysteme im Vordergrund. Zur Abschwächung von Nachteilen werden anschließend Elemente aus beiden Ansätzen gemischt.

Schroeder (1984) unterteilt Bodenordnungssysteme in faktorbasierte, merkmalsbasierte und kombinierte Systeme, die alle unter dem Oberbegriff der pedogenetischen Klassifizierungen zusammengefasst werden. Die in *Schroeder und Lamp* (1976) vorgestellte Struktur eines idealen Klassifikationssystems, wonach isogene, isomorphe, isofunktionale und isotope Böden zusammengefasst werden, kann mit einer konsequent ausgearbeiteten Bodensystematik erreicht werden.

Die Vermischung der systematischen und klassifikatorischen Aspekte ist an verschiedenen Stellen zu beobachten:

- In den Systematiken wird Hilfe zur Identifizierung in Form von Entscheidungsbäumen sowie Mess- und Grenzwerten gegeben, welche typisch für Klassifikationen sind. Da jedoch die grundsätzliche Einordnung von Objekten nicht auf Messung beruht, können Anforderungen wie Objektivität nicht vollständig befriedigt werden.
- Die genannten Bodenklassifikationen versuchen, das gesamte Spektrum der Böden abzudecken und haben dadurch einen ausgeprägten systematischen Charakter. Die Zusammenhänge zwischen Objektkategorien entstehen aus Überlagerungen von Parameterausprägungen, stützen sich aber nur auf ausgewählte Beobachtungen. Weitere systematische Elemente in den Bodenklassifikationen sind umfangreiche Parametersätze, Vernachlässigung von Parametern bei einzelnen Definitionen oder eine Identifizierung oft nur mithilfe von Laboranalysen.

Dabei zeigt sich ein Grundproblem der Strukturierung bodenkundlichen Wissens: ohne eine Zusammenfassung ist die Komplexität des Mediums Boden nicht fassbar; wenn jedoch Grenzwerte verwendet werden, wirken sie oft subjektiv und können die Kontinuität der Bodendecke nicht richtig widerspiegeln. Zur Lösung dieses Konflikts werden in Bodenordnungssystemen häufig Elemente aus Systematiken und aus Klassifikationen parallel verwendet. Eine weitere Ursache von Verwechslungen ist die Tatsache, dass die Identifizierung von Böden in allen allgemeinen Bodenordnungssystemen auf einem Ansatz beruht, nach dem die bodenbildenden Prozesse charakteristische Kennzeichen in Form von diagnostischen Horizonten oder Eigenschaften hinterlassen. Diese Kennzeichen können durch beobachtbare oder messbare Parameter erfasst werden (*Ahrens et al., 2003*), wobei die Parameter in den Systematiken und Klassifikationen identisch sein können. Hierbei scheinen aber oft die *direkte* Erfassung der bodenbildenden Prozesse und die Erfassung der *Ergebnisse* bodenbildender Prozesse gleichgesetzt zu werden.

4 Die Deutsche Bodensystematik – Systematik oder Klassifikation ?

Es ist bereits erwähnt worden, dass die deutsche Bodensystematik in ihren Grundzügen eine echte Systematik ist. Die vielen Grenzwerte, vor allem in den Horizontdefinitionen, deuten aber eher auf eine Klassifikation hin. Das Problem der unklaren Zuordnung zeigt sich in exzellenter Weise auf dem Titelblatt von Band 86 der Mitteilungen der DBG (*Arbeitskreis Bodensystematik*, 1998), indem:

- Zwei deutlich unterschiedliche Inhalte (Bodensystematik, Substratklassifikation) mit dem selben Namen (Systematik) belegt werden,
- Substrat damit als etwas nicht zum Boden gehörendes suggeriert wird (... und ...), obwohl Substrate im Text S. 137 definiert sind als „... bodenbildende Ausgangsgesteine sowie deren Verwitterungs- ... zustand ..., auch Eigenschaften ..., die das Ergebnis von Bodenbildungsprozessen sind ...“,
- Unklar ist, inwieweit beide „Systematiken“ eigentlich der Definitionen von Systematik und Klassifikation genügen bzw. was sie wirklich sind.

Die Ausführungen sowohl in *Arbeitskreis Bodensystematik* (1998) als auch in *Scheffer und Schachtschabel* (1998) und anderen Werken belegen eindeutig eine unklare Stellung zwischen Systematik und Klassifikation, welche durch die Entwicklung des Bodenordnungssystems bedingt ist. Es basiert auf einem morphogenetischem Zentralbodenkonzept, das – aufbauend auf Arbeiten von *Kubierna* (1953) – bis in die Mückenhausen-Ära verfolgt wurde. Letzterer unterscheidet noch in *Mückenhausen* (1985) in Systematik und Klassifikation, so dass man davon ausgehen kann, dass Mückenhausen den Titel mit Bedacht als „Systematik“ gewählt hat. Tatsächlich fehlen hier noch klare Abgrenzungen, die Beschreibungen der Böden enthalten oft den Begriff „meist ...“ (was noch heute in vielen Definitionen zu finden ist) und sind verbal gehalten. *Mückenhausen* (1977) weist darauf hin, dass die Bodensystematik noch verifiziert werden muss, ohne auf die Notwendigkeit der Messbarkeit der bodenbildenden Prozesse einzugehen.

Die älteren deutschen Arbeiten zum Thema Bodensystematik/Bodenklassifikation stellen die Bedeutung einer wissenschaftlich-systematischen Ordnung der Böden in den Vordergrund. *Kubierna* (1953) und *Laatsch* (1957) legen Wert auf die konsequente Verwendung bodeneigener Kriterien, wobei nur die bodenbildenden Prozesse zur Gliederung verwendet werden sollen und nicht Kenntnisse über bodenbildende Faktoren. Nur zwei Jahre nach der Herausgabe der vierten Auflage seines Lehrbuchs fordert W. Laatsch, dass auch lithogene und eingeschränkt phytogene Merkmale Teil einer wissenschaftlichen Bodensystematik sein sollten (*Laatsch und Schlichting*, 1959), weil gleichmäßig ablaufende Prozesse bei unterschiedlichen Bildungsbedingungen zu signifikanten Unterschieden in den Böden führen. Die Arbeit von *Ehwald* (1958), der eine merkmalsbasierte Ordnung der Böden entwirft – mit einer Typabgrenzung explizit ohne Faktoren und Prozesse –

wird als nicht bodenkundlich kritisiert. Wesentlich für die Weiterentwicklung der deutschen Bodensystematik war u.a. ein Artikel von *Schlichting* (1969), der zur Verbesserung die stärkere Berücksichtigung der lithologischen Merkmale, des Kultureinflusses und ausgewählter diagnostischer Merkmale vorschlägt.

Eine Auseinandersetzung mit den Konsequenzen für die praktische Anwendung wird nicht vorgenommen. Zwar sind die bestehenden Unsicherheiten bekannt (*Ganssen*, 1965; *Anonymus*, 1970; *Müller*, 1970), jedoch werden kaum Lösungsmöglichkeiten genannt. Zum Teil wird darauf verwiesen, dass im Zweifelsfall das subjektive Ermessen des Bodenkundlers oder durch Übereinkünfte festgelegte Grenzwerte für eine korrekte Identifizierung ausreichend sind (z.B. *Laatsch* und *Schlichting*, 1959).

Eine entscheidende Änderung trat nach der Veröffentlichung von *Schlichting* und *Blume* (1979) ein, indem in KA 3 (*Arbeitsgruppe Bodenkunde*, 1982) und *Arbeitskreis Bodensystematik* (1985) diagnostische Merkmale als Grenzdefinitionen für Horizonte eingeführt wurden. Damit verließ die Deutsche Bodensystematik den Zustand einer natürlichen Systematik, in der lediglich nach Profilmorphologien hierarchisch geordnet wird, und entwickelte sich in Richtung Klassifikation, nach der man durch Werte-Vergleiche Horizonte identifizieren und durch Vergleich von Horizontfolgen klassifizieren konnte. Die Verwendung von Grenzwerten ist in sehr eingeschränktem Maße schon lange Teil der deutschen Bodensystematik. So lassen sich in der KA 2 (*Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde*, 1971) teilweise Mächtigungsangaben in den Bodentypenbeschreibungen finden, in seltenen Fällen auch Angaben zu Farbe, Humusgehalt und anderen Parametern. Die Horizontdefinitionen sind aber vollständig qualitativ-verbal gehalten. Als weiteres Indiz kann die inkonsequente Verwendung von Textur und Gestein als pedogenem und lithogenem Faktor aufgefasst werden (*Mückenhausen*, 1985; *Altermann* und *Kühn*, 1999).

Ein weiterer wesentlicher Schritt, der in seiner Tragweite kaum realisiert wurde, erfolgte in *Arbeitsgruppe Boden* (1994) und *Arbeitskreis Bodensystematik* (1998) mit der Einführung von Bestimmungsschlüsseln für die Abteilungen und Klassen. Hierdurch wurde die offene Kubiena- und Mückenhausen-Systematik zu einer geschlossenen Klassifikation, in der die Einführung einer neuen systematischen Einheit nicht mehr durch Addition, sondern nur noch durch Aufteilung einer bestehenden Einheit möglich ist.

5 Perspektiven für die bodenkundliche Arbeit

5.1 Zusammenhang zwischen Systematik und Klassifikation

Trotz oder wegen der Unterschiede zwischen den beiden Ordnungssystemtypen besteht ein enger Zusammenhang zwischen Systematik und Klassifikation (*Baron*, 1968; *Siebel*, 1968). Am Beispiel der Biologie wurde bereits angemerkt, dass in komplexen Wissensgebieten parallel synthetisch und analytisch gearbeitet

werden muss. Eine allgemeingültige und akzeptierte Ordnung von Erkenntnissen eines Wissensgebietes ist nur mit einer Systematik möglich. Wenn die Systematik ausgearbeitet ist, ist auch bekannt, mit welchen Objektkategorien sinnvoll gearbeitet werden kann. Auf der Basis dieses Wissens ist es dann möglich, einen Bestimmungsschlüssel zu entwickeln, der einheitlich genutzt wird und universell einsetzbar ist. Die Objektkategorien können zusätzlich nach bestimmten Gesichtspunkten klassifiziert werden, ohne dass sich etwas an der Systematik und am grundlegenden Bestimmungsschlüssel ändert.

Diese Zusammenhänge werden in Abbildung 5 dargestellt. Systematiken werden anhand der gängigen Theorien aufgestellt, gleichzeitig werden Theorien von den vorgefundenen Ordnungsmustern beeinflusst. Systematiken erzeugen die grundsätzliche Struktur eines Wissensgebietes, wofür dann mit den Mitteln der Klassifikation mehr oder weniger einfache Bestimmungsschlüssel entworfen werden können. Diese Betrachtungen werden auf der wissenschaftlichen Ebene durchgeführt. Der Bezug zur Praxis wird an verschiedenen Stellen hergestellt. Reale Objekte können durch die Systematik in einen allgemeinen Bedeutungszusammenhang gebracht werden. Gleichzeitig ist es möglich, dass die Systematik im Rahmen einer umfassenden Beschreibung von Objekten geändert werden muss, weil ein bisher unbekanntes Phänomen beobachtet wird. Spezielle Klassifikationen können praktische Anwendungen vorbereiten. Im Gegenzug werden bei Anwendungen Beobachtungen gemacht, die sich wiederum in neuen Klassifikationen niederschlagen. Anwendungen und Objekte hängen zusammen, weil die Kenntnis der Objekteigenschaften bestimmte Nutzungen erlaubt, während Anwendungen wegen der spezifischen Anforderungen an bestimmte Objekte gebunden sind. Die Entwicklung von Klassifikationen ist auch durch die statistische Analyse von Objektmengen möglich.

Abbildung 5

5.2 Konsequenzen für die Bodenkunde

Die Bodenkunde benötigt – so wie andere Wissenschaftsgebiete auch – sowohl eine Systematik als auch eine Klassifikation, um alle wissenschaftlichen und praktischen Fragestellungen befriedigend beantworten zu können. Bei der Betrachtung der wichtigen Bodenordnungssysteme zeigt sich, dass zur Zeit versucht wird, beide Typen von Ordnungssystemen in einer Kategorisierungsvorschrift zu verknüpfen. Dabei stoßen die Bodenordnungssysteme immer wieder an Grenzen, weil der Entwicklungsschwerpunkt entweder bei der Systematik oder bei der Klassifikation liegt und die Konzentration auf ein Ordnungssystem nicht sinnvoll ist.

Die eindeutige Identifikation von Böden ist ebenfalls noch nicht befriedigend gelöst, unabhängig von dem verwendeten Bodenordnungssystem. Die kennwertbasierten Ansätze wie die *US Soil Taxonomy* erlauben

zwar weitgehend zweifelsfrei reproduzierbare Zuordnungen, jedoch können dabei künstliche Grenzen zwischen einzelnen Bodeneinheiten gezogen werden, die nicht dem kontinuierlichen Charakter der Pedosphäre entsprechen. Weiterhin ist es trotz der exakten Anweisungen möglich, dass Böden in einem Untersuchungsgebiet von verschiedenen Experten unterschiedlich identifiziert werden (*Shi et al., 2004*).

Bei den morphogenetischen Systematiken besteht das Problem, dass der Gesamtkomplex aus bodenbildenden Faktoren und Prozessen und den resultierenden Ergebnissen für die Identifikation in Betracht gezogen werden muss. Während die Faktoren und die Ergebnisse mit relativ hoher Genauigkeit bestimmt werden können, fehlt die Formalisierung der Prozessbestimmung. Dadurch kommt es zu subjektiven Zuordnungen. Prozesse müssen ähnlich genau wie Pflanzen oder geomorphologische Formen bestimmbar sein, um besonders in Zweifelsfällen exakte Zuordnungen zu ermöglichen. Diese Quantifizierung ist auch unter einem weiteren Gesichtspunkt wichtig: Nach dem Ansatz von *Simonson (1967)* laufen in den meisten (vielleicht sogar allen) Böden alle bodenbildenden Prozesse gleichzeitig ab, und ihre relative Intensität bestimmt die Charakteristik eines Bodens. Für eine exakte Identifizierung muss daher eine Methode gefunden werden, mit der die Intensität der Prozesse hinreichend genau bestimmt werden kann.

Die Aufgabe der Bodenkunde ist es daher, die Hypothesen zur Bodengenese zu beweisen, um darauf aufbauend das bodenkundliche Wissen optimal zu strukturieren. Damit ist es dann möglich, eine Klassifikation der Böden zu entwickeln. Wegen der spezifischen Eigenschaften des Untersuchungsgegenstandes Boden ist es eventuell von Vorteil, regionale Bestimmungsschlüssel zu entwickeln, ähnlich den bereits in Deutschland verwendeten Übersetzungsvorgaben von Daten der Reichsbodenschätzung in bodensystematische Informationen. Dafür spricht auch, dass der WRB-Schlüssel (*ISSS/ISRIC/FAO, 1998*) als weltweites Klassifikationssystem nicht für die Arbeit in großen Maßstäben konzipiert ist und in sehr vielen Staaten nationale Bodenordnungssysteme existieren. Weiterhin sollte versucht werden, möglichst einfache Klassifikationsschlüssel zu entwickeln, um die schnelle und sichere Identifikation von Böden zu ermöglichen.

6 Fazit

Systematik und Klassifikation sind unterschiedliche Ansätze zur Ordnung von Böden. Sie stellen unterschiedliche Anforderungen an die Einordnung von Objekten in das Ordnungssystem. Dieser Unterschied wird von der Bodenkunde bisher nicht ausreichend beachtet. Wesentlich ist, dass die Identifizierung die Messbarkeit der kategorisierenden Merkmale voraussetzt. Das heißt, dass bei der Verwendung einer Bodensystematik der Einfluss der verschiedenen pedogenetischen Prozesse durch Messung genau und zweifelsfrei bestimmt werden muss. Wegen verschiedener offener Fragen ist daher die objektive Einordnung von Böden in eine

Bodensystematik mit dem gegenwärtigen Kenntnisstand nicht immer möglich.

Die Bodenkunde steht vor dem Problem, dass einerseits die Morphologie und die Verteilung der Böden nur verstanden werden kann, wenn die Pedogenese zur Erklärung herangezogen wird. Andererseits sind die systematischen Informationen zu komplex, um in der Praxis eingesetzt zu werden. Dafür werden eine Klassifikation oder ein Bestimmungsschlüssel benötigt.

Tatsächlich ist die Untersuchung der Pedogenese eine der dringendsten Aufgaben der modernen Bodenkunde. Eine gut ausgearbeitete Bodensystematik erlaubt einen schnellen Informationstransfer (*Schlichting*, 1953), eine wechselseitig gültige Verknüpfung von Bodenformen mit Bodeneigenschaften erleichtert die Ableitung von Sekundärinformationen aus bodensystematischen Angaben. Wenn weiterhin nur Altdaten oder hypothetische Angaben als Grundinformation genutzt werden, besteht die Gefahr, dass die Bodenkunde wegen mangelnder Relevanz an Bedeutung verliert. Die Systematik ist gegenwärtig zu lückenhaft und hypothetisch. Sie muss vervollständigt und ständig aktualisiert werden. Prozesse müssen soweit wie möglich nachgewiesen werden, damit ein allgemein anerkannter Bestimmungsschlüssel entwickelt werden kann. Wenn ein bodenbildender Prozess mit Hilfe charakteristischer Eigenschaften erkannt werden soll, müssen diese Eigenschaften nachweislich nur Ergebnis dieses einen Prozesses sein, weil sonst Mehrfachzuordnungen und daraus resultierend Ungenauigkeiten möglich sind. Dabei kann die Erweiterung der Definitionen der bodensystematischen Einheiten sinnvoll sein, um bei der Identifizierung die Einflüsse subjektiver Annahmen, z.B. wegen der unterschiedlichen Zeichneigenschaften der Substrate, zu minimieren.

Die Bedeutung von Klassifikationen für die Bodenkunde ist ähnlich hoch einzustufen wie die der Systematik. Wenn es kein Hilfsmittel gibt, mit dem die Untersuchungsgegenstände einfach und sicher identifiziert werden, werden Böden in der Praxis wegen des finanziellen und zeitlichen Aufwandes nicht mehr ausreichend untersucht. Dann kann zwar über die Bedeutung und Gefährdung der Böden spekuliert werden, wegen der fehlenden genaueren Informationen sind die Handlungsmöglichkeiten aber eingeschränkt. Bisher basiert bei Bodenklassifikationen die Parameterauswahl auf mehr oder weniger systematischen Beobachtungen und Hypothesen. Die definierten Klassengrenzen sind weder statistisch noch theoretisch unterlegt. Ähnlichkeiten ergeben sich aus der Überlappung von Merkmalsausprägungen, wodurch ein quasi-systematischer Charakter entsteht. Die verwendeten Objektkategorien können ähnliche Böden trennen und unterschiedliche Böden zusammenfassen. Wegen der Orientierung auf analytisch erfassbare Kenngrößen ist es kaum möglich, Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zu kennzeichnen.

Es gibt verschiedene Arbeiten, aus denen die benötigten methodischen Grundbausteine für die Weiterentwicklung und Verknüpfung von Bodensystematik und Bodenklassifikation abgeleitet werden können. So be-

schäftigen sich *Fiedler et al.* (2002) mit der Verknüpfung von Bodensystematik und Prozessdynamik. *Müller et al.* (1984) veröffentlichten eine Klassifikation, die die Prinzipien der deutschen Bodensystematik aufgreift und die Bodenhorizonte nach quantitativen Kriterien definiert. Sie ist aber nur für den nordwestdeutschen Raum gültig und gleichnamige Horizonte werden je nach Bodentyp unterschiedlich definiert. Die Entwicklung kontinuierlicher Bodenkarten ist mit dem Modellierungsprogramm TRCS möglich, dass von *Ameskamp* (1997) vorgestellt wurde. Dort sind auch verschiedene Möglichkeiten zur kartographischen Darstellung von Kontinuen zu finden. Hervorzuheben ist auch die Arbeit von *McBratney et al.* (2003). Sie beschreiben allgemeine Prinzipien zur flächenhaften Quantifizierung von Zusammenhängen zwischen den bodenbildenden Faktoren (*Jenny*, 1941) und Böden.

Die Zusammenstellung der Definitionen zu Systematik und Klassifikation macht deutlich, dass die Begriffe nicht einheitlich verwendet werden. Dadurch kommt es zu Missverständnissen bei der Diskussion dieses Themas. Auch wenn es schwierig ist, sprachliche Gewohnheiten zu ändern, schlagen wir die folgenden Definitionen vor:

1. *Bodensystematik*: Hierarchisch aufgebautes Ordnungssystem für Böden, dass die Einflüsse aller bodenbildenden Faktoren erfasst und sowohl die Zusammenhänge zwischen den als auch die Struktur der einzelnen Böden als Naturkörper erklärt. Zur Beschreibung der systematischen Einheiten werden nur rein bodenkundliche Informationen verwendet (internes Bezugssystem). In einer genetisch angelegten Systematik umfassen die systematischen Einheiten Böden mit gleichen Bildungsbedingungen und –prozessen und daraus resultierend gleichen Eigenschaften.
2. *Bodenklassifikation*: (Hierarchisch aufgebautes) Ordnungsschema bzw. Werkzeug, mit dem Böden so geordnet werden, dass anhand der gebildeten Einheiten Aussagen zu vorher festgelegten Fragestellungen möglich sind. Die zur Trennung der klassifikatorischen Einheiten verwendeten Kriterien müssen nicht originär bodenkundlich sein (Verwendung externer Bezugssysteme). Die klassifikatorischen Einheiten umfassen Böden mit gleichen Eigenschaften im Sinne der zu bearbeitenden Fragestellung. Die Klassifikation kann wie die Systematik genetisch angelegt sein (*genetische Klassifikation*), aber auch im Falle einer *effektiven Klassifikation* sich zweckgerichteter Kriterien bedienen.
3. *Bodenidentifizierung*: Zuordnung eines Bodens zu einer oder mehreren Einheiten einer Bodensystematik oder einer –klassifikation. Für eine zweifelsfreie und reproduzierbare Zuordnung ist es notwendig, dass das verwendete Bezugssystem eine Messung der Intensität der relevanten Gruppierungsmerkmale erlaubt.

Die Entwicklung der zwei voneinander abhängenden Ordnungssysteme ist nur durch längerfristig angelegte umfangreiche Forschung möglich. Sowohl die systematische Darstellung der Wissensinhalte als auch die schnelle und zweifelsfreie Identifizierung einzelner Objekte sind aktuell wichtig für die Anerkennung der Bodenkunde als Wissenschaft. Die Objektkategorisierung muss hierbei die potentiellen Nutzer von Bodeninformationen im Auge behalten, damit auch pedogenetische Informationen bei den aktuellen Aufgaben in der Umweltplanung und im Bodenschutz genutzt werden können.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung (Projekt Hu-636/8-2). Weiterhin danken wir Herrn Benny Selle (Bayreuth), der sich trotz umfangreicher Verpflichtungen Zeit für anregende Diskussionen und Kommentare zu dem Manuskript genommen hat. Den Gutachtern Karl Stahr, Wolfgang Fleck und einem anonymen Gutachter danken wir für ihre umfangreichen und kritischen Hinweise.

Literatur

- Ahrens, R. J., T. J. Rice* und *H. Eswaran* (2003): Soil classification: past and present, in: Eswaran, H., T. J. Rice, R. J. Ahrens und B. A. Stewart (Hg.): Soil classification – a global desk reference. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.
- Altermann, M.*, und *D. Kühn* (1999): Über „Probleme“ bei der Einführung der Substratsystematik. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 91, 909–912.
- Ameskamp, M.* (1997): Three-dimensional rule-based continuous soil modeling. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- Anonymus* (1970): Bodenklassifikation – Bodenkartierung – Bodennutzungsplanung. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 10, 4-5.
- Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde* (1971): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 2). Bundesanstalt für Bodenforschung und die Geologischen Landesämter der BRD, Hannover, 169 S.
- Arbeitsgruppe Boden* (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 4). Schweizerbart, Stuttgart, 392 S.
- Arbeitsgruppe Bodenkunde* (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 3). Schweizerbart, Stuttgart, 331 S.
- Arbeitskreis Bodensystematik* (1985): Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 44, 1-91.
- Arbeitskreis Bodensystematik* (1998): Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate Deutschlands. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 86, 1-192.
- Avery, B.* (1968): General soil classification: hierarchical and co-ordinate systems. *Transactions of the 9th International Congress of Soil Science IV*, S. 169–175.
- Baron, W.* (1968): Probleme der Begriffsbildung in der Biologie. In: Diemer, A. (Hg.): System und Klassifikation in Wissenschaft und Dokumentation. Anton Hain, Meisenheim am Glan.
- Brunotte, E., H. Gebhardt, M. Meurer, P. Meusburger* und *J. Nipper* (Hg.) (2002): Lexikon der Geographie, Bd. 1. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.
- Bumann, W., A. Diemer, L. Geldsetzer, R. Heinz, N. Henrichs, G. König, G.* und *A. von der Stein* (1968): System und Klassifikation – Versuch einer terminologischen und thematischen Klärung des Begriffsfeldes, in: Diemer, A. (Hg.): System und Klassifikation in Wissenschaft und Dokumentation, Anton Hain, Meisenheim am Glan.
- Buol, S. W., F. D. Hole, R. J. McCracken* und *R. J. Southard* (2003): Soil Genesis and Classification. Iowa State Press, Ames.
- Clark, A. N.* (1989): Longman dictionary of geography. Longman, Harlow.

- Ehwald, E.* (1958): Bemerkungen zur Abgrenzung und Gliederung der wichtigsten Bodentypen Mitteleuropas unter dem Gesichtspunkt einer internationalen Annäherung in der Bodensystematik. *Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenk.* 80, 18-42.
- Ehwald, E.* (1989): Bodengenetik, Bodensystematik, Bodengeographie, in: Autorenkollektiv: *Bodenkunde*. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- Eswaran, H., T. J. Rice, R. J. Ahrens und B. A. Stewart* (Hg.) (2003): *Soil classification – a global desk reference*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.
- FAO-UNESCO* (Hg.) (1997): *FAO/UNESCO Soil Map of the World, Revised Legend*. ISRIC, Wageningen.
- Fiedler, S., H. Jungkunst, R. Jahn, M. Kleber, M. Sommer und K. Stahr* (2002): Linking soil classification and soil dynamics – pedological and ecological perspectives. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 517–529.
- FitzPatrick, E.* (1988): Soil Horizon Designation and Classification. Nr. 17 in Technical paper of ISRIC, International Soil Reference and Information Center (ISRIC), Wageningen.
- Ganssen, R.* (1965): *Grundsätze der Bodenbildung*. Bibliographisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich.
- Gordon, A.* (1981): *Classification*. Chapman and Hall, London, New York.
- Gregorich, E. G., L. W. Turchenek, M. R. Carter und D. A. Angers* (Hg.) (2002): *Soil and Environmental Science Dictionary*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington.
- Grunwald, S., K. McSweeney, D. J. Rooney, und B. Lowery* (2001): Soil layer models created with profile cone penetrometer data. *Geoderma* 103, 181–201.
- Hintermaier-Erhard, G., und W. Zech* (1997): *Wörterbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- ISSS/ISRIC/FAO* (Hg.) (1998): *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resources Report 84, FAO, Rom.
- Jenny, H.* (1941): *Factors of soil formation*. Dover, New York.
- Kotz, S., und J. Johnson* (Hg.) (1982): *Encyclopedia of statistical sciences*, Bd. 2. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- Kubiśna, W.* (1953): *Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Laatsch, W.* (1957): *Dynamik der mitteleuropäischen Mineralböden*. Theodor Steinkopf, Dresden, Leipzig.
- Laatsch, W. und E. Schlichting* (1959): Bodentypus und Bodensystematik. *Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenk.* 87, 97-109.
- Lamp, J.* (1972): *Untersuchungen zur numerischen Taxonomie von Böden*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel.

- Lamp, J.* (1983): Zwölf Thesen zur Bodensystematik – gestützt auf morphometrische Auswertungen von Horizontklassifikationen. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 38, 519-524.
- Leeper, G.* (1956): The classification of soils. *J. Soil Sci.* 7, 59–64.
- Mayr, E.* (1975): Grundlagen der zoologischen Systematik. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- Mazaheri, S. A., A. J. Koppi* und *A. B. McBratney* (1995): A fuzzy allocation scheme for the Australian Great Soil Groups Classification system. *Eur. J. Soil Sci.* 46, 601–612.
- McBratney, A. B., M. L. Mendonça Santos* und *B. Minasny* (2003): On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- McBratney, A. B.*, und *I. O. A. Odeh* (1997): Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma* 77, 85–113.
- Mückenhausen, E.* (1977): Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland. DLG-Verlag, Frankfurt/Main.
- Mückenhausen, E.* (1985): Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- Müller, S.* (1970): Öko-Serien der baden-württembergischen forstlichen Standortskartierung am Beispiel der Kalkverwitterungslehme. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 10, 43-46.
- Müller, W., R. Lüders* und *J.-H. Benzler* (1984): Ein anwendungsorientiertes Klassifikationssystem für Bodentypen auf Grundlage der Quantifizierung von Bodenmerkmalen und Bodeneigenschaften. *Geol. Jahrb.* A75, 663–714.
- Rehfuess, K. E.* (1981): Waldböden. Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- Scheffer, F.*, und *P. Schachtschabel* (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Schlichting, E.* (1953): Soil properties and soil classification. *Soils and Fertilizers* 16, 414-415.
- Schlichting, E.* (1969): Genetische und effektive Klassifikation von Böden. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 123, 220-231.
- Schlichting, E.* (1970): Bodensystematik und Bodensoziologie. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 127, 1-9.
- Schlichting, E.*, und *H.-P. Blume* (1979): Beitrag zur Objektivierung der DBG-Bodensystematik. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 29, 765–774.
- Schroeder, D.* (1984): Bodenkunde in Stichworten. Ferdinand Hirt, Unterägeri.
- Schroeder, D.*, und *J. Lamp* (1976): Prinzipien der Aufstellung von Bodenklassifikationssystemen. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 139, 617–630.

- Shi, X., A-X. Zhu, J.E. Burt, F. Qi und D. Simonson* (2004): A case-based reasoning approach to fuzzy soil mapping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 885-894.
- Siebel, W.* (1968): System, Klassifizierung und Messung, in: Diemer, A. (Hg.), *System und Klassifikation in Wissenschaft und Dokumentation*. Anton Hain, Meisenheim am Glan.
- Simonson, R.* (1967): Outline of a generalized theory of soil genesis, In: Drew, J.V. (Hg.), *Selected papers in soil formation and classification*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Soil Survey Staff* (Hg.) (1998): *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture/Natural Resources Conservation Service, Washington.
- Ströker, E.* (1968): Zur Systemproblematik in der Chemie, in: Diemer, A. (Hg.), *System und Klassifikation in Wissenschaft und Dokumentation*, Anton Hain, Meisenheim am Glan.
- Verheyen, K., D. Adriaens, M. Hermy und S. Deckers* (2001): High-resolution continuous soil classification using morphological soil profile descriptions. *Geoderma* 101, 31–48.
- Weberling, F., und T. Stützel* (1993): *Biologische Systematik*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Wilding, L.P., N.E. Smeck und G.F. Hall* (Hg.) (1983): *Pedogenesis and Soil Taxonomy, I. Concepts and Interactions*. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York.
- Wissenschaftlicher Rat der Dudenredaktion* (Hg.) (1997): *Duden - Fremdwörterbuch, Bd. 5 von Der Duden*. Dudenverlag, Mannheim, Wien, Zürich.

Tabelle 1: Unterschiede zwischen Systematik und Klassifikation

Table 1: Contrasting systematic and classification systems

	Systematik	Klassifikation
Zweck	Darstellung der Bezüge zwischen den Objekten sowie der Struktur der einzelnen Gegenstände	Zuordnung von Gegenständen zu Begriffen, Typen oder Klassen, um Objekte für spezielle Fragestellungen zu ordnen
Inhalt	Gesamtheit der Forschungsgegenstände	begriffliche Festlegung von Anforderungen an den Untersuchungsgegenstand
Art der Gruppenbildung	deduktiv	induktiv
Grundlage der Kategoriebildung	Intensitätsunterschiede bei der Parameterausprägung	Klassenmerkmale
zu Grunde liegendes Bezugssystem	intern (fachspezifisch)	intern und/oder extern (beliebig)
Anwendungsgebiet	verschiedenste Nutzungen (wissenschaftlich - theoretische Ausrichtung)	verschiedenste Nutzungen (genetisch) oder auf einen bestimmten Zweck ausgerichtet (praktische Ausrichtung, effektiv)
weitere häufig verwendete Bezeichnungen (Auswahl)	natürliches System, genetische Klassifikation, Taxonomie	künstliches System, Clusterung

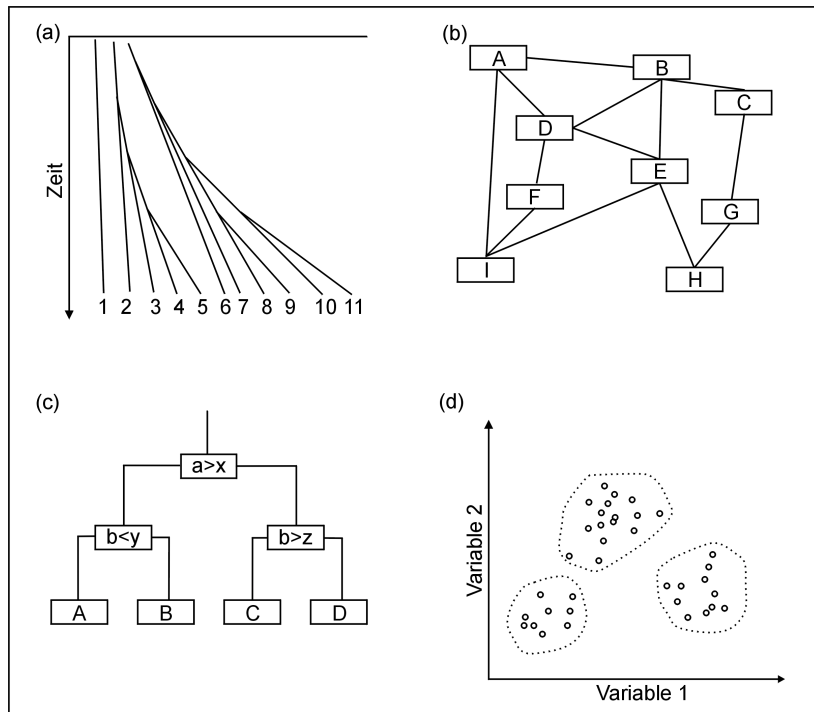


Abbildung 1

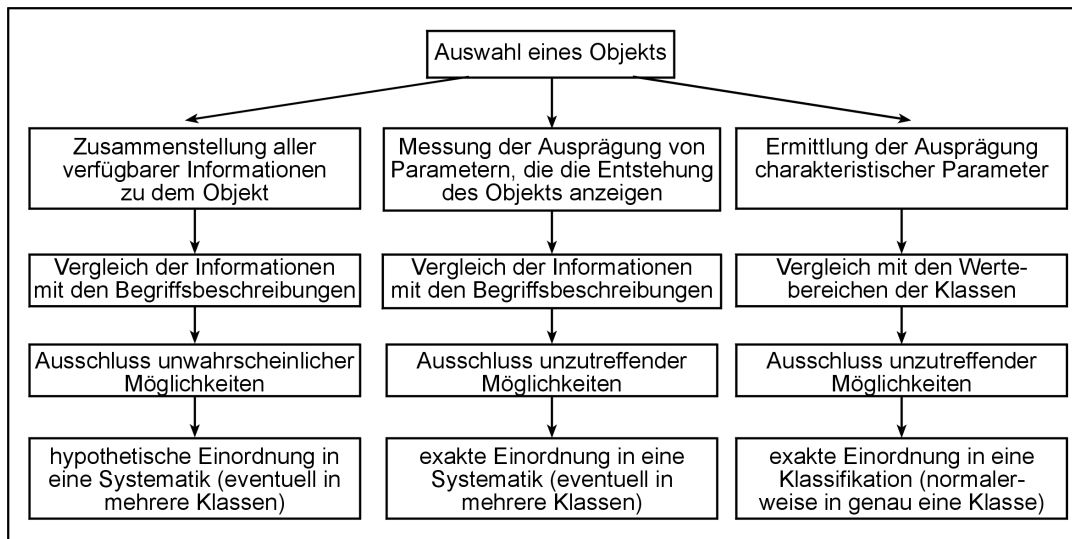


Abbildung 2

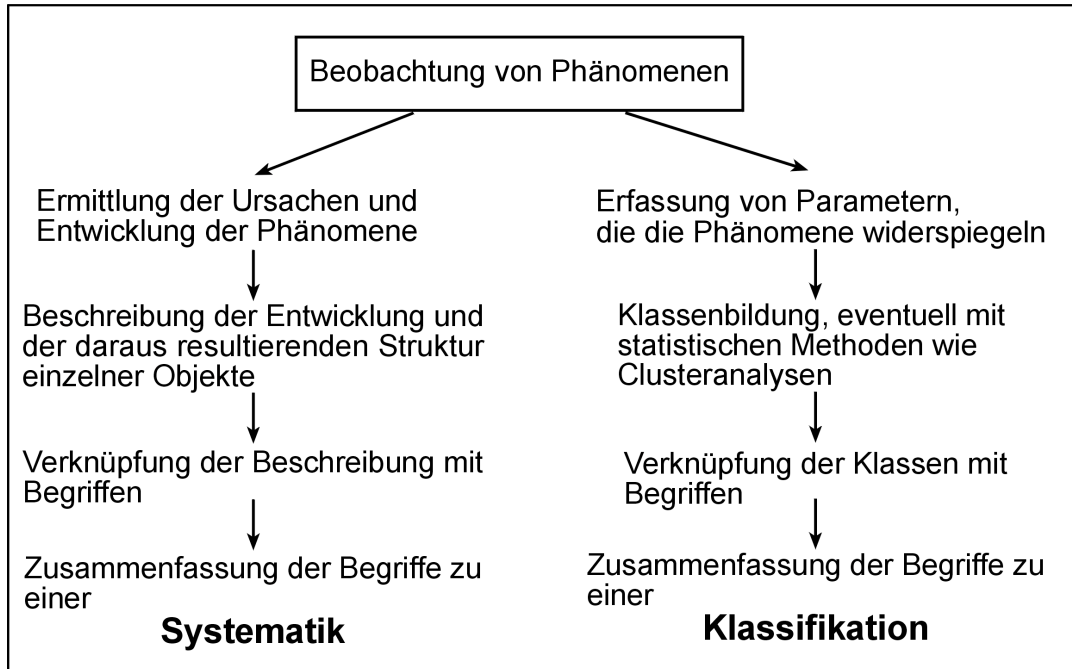


Abbildung 3

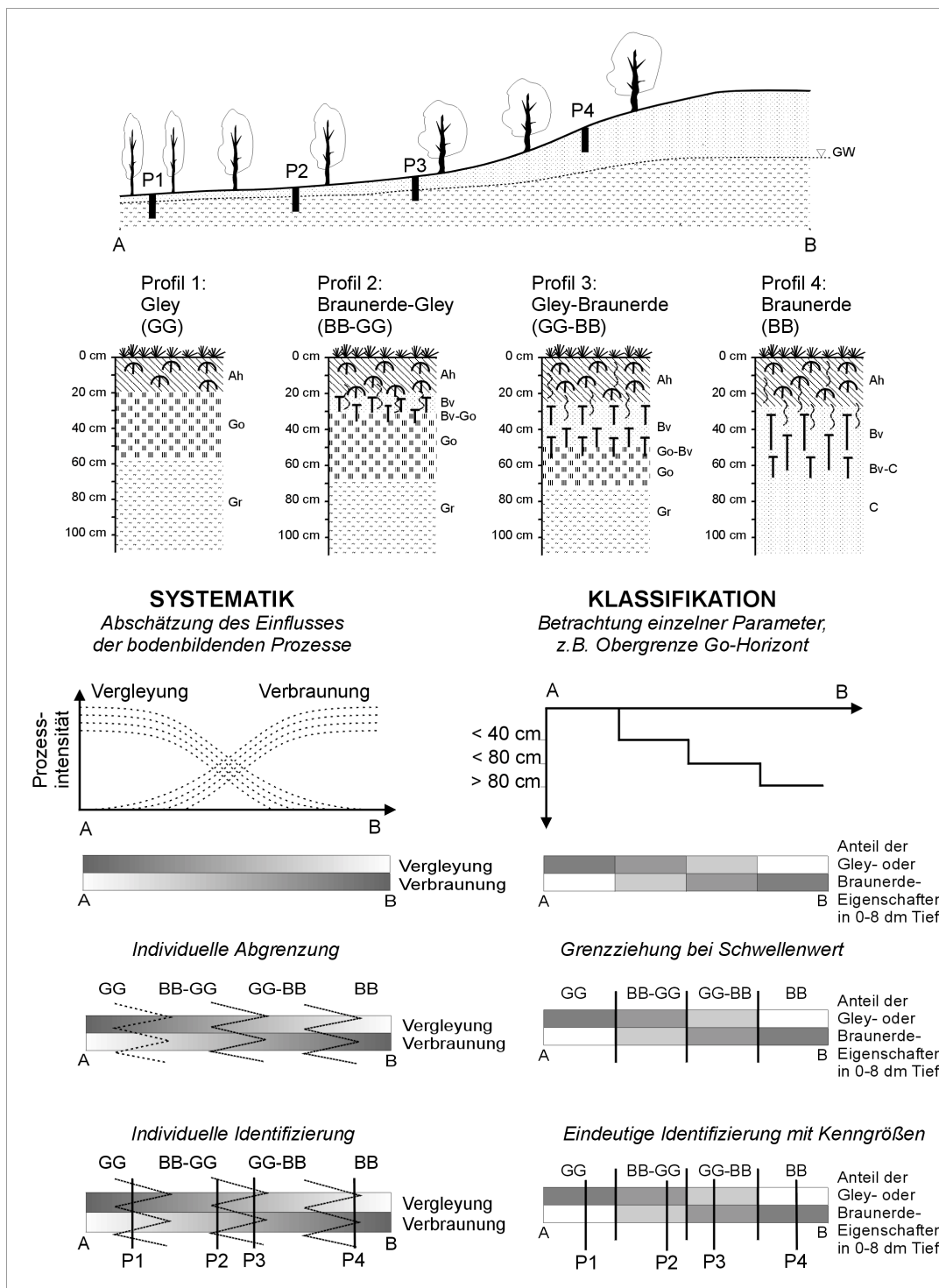


Abbildung 4

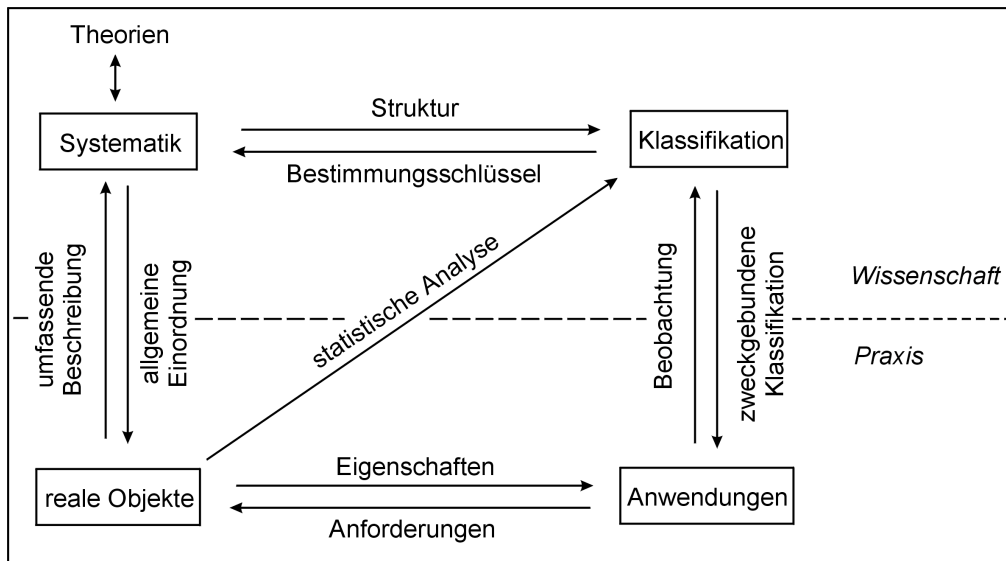


Abbildung 5

Abbildung 1: Möglichkeiten der graphischen Darstellung von Systematiken (Bild a und b) und Klassifikationen (Bild c und d)

(a) Stammbaum, (b) Entwicklungslinien, (c) CART-Baum, (d) Cluster

Figure 1: Possible graphic displays of systematics (a and b) and classifications (c and d)

(a) genealogy tree, (b) evolutionary development lines, (c) CART flow chart, (d) cluster analysis

Abbildung 2: Möglicher Ablauf der Identifizierung

Figure 2: Identification methods

Abbildung 3: Ablauf der Entwicklung einer Systematik und einer Klassifikation

Figure 3: Successive development of a systematic and a classification system

Abbildung 4: Bodenidentifizierung mit einer Systematik und einer Klassifikation (hier nach *Arbeitskreis Bodensystematik*, 1998)

Figure 4: Identifying a soil with a systematic and a classification system (via *Arbeitskreis Bodensystematik*, 1998)

Abbildung 5: Zusammenhänge zwischen Systematik und Klassifikation und ihre wissenschaftlichen und praktischen Bezüge

Figure 5: Relationships between systematic and classification systems, focus on scientific and practical applications

Kapitel 6

Bodensystematik und Bodenklassifikation, Teil II: Zur Situation in der deutschen Bodenkunde

In der vorliegenden Form zur Veröffentlichung angenommen bei der Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde (Journal of Plant Nutrition and Soil Science), Veröffentlichung im Heft 168 (2). Die folgenden Seiten enthalten das revidierte Manuskript.

Bodensystematik und Bodenklassifikation

Teil II: Zur Situation in der deutschen Bodenkunde

Christoph Albrecht^{1*}, Reinhold Jahn², Bernd Huwe¹

¹Abteilung Bodenphysik, Universität Bayreuth, 95447 Bayreuth

²Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Weidenplan 14, 06108 Halle/S.

*Korrespondenz: christoph.albrecht@uni-bayreuth.de

Schlagworte: Systematik, Klassifikation, Deutsche Bodensystematik, Bodenkundliche Kartieranleitung, Bodenkartierung, Pedogenese

Key Words: systematic, classification system, German soil systematic, German Handbook of Soil Mapping, soil mapping, pedogenesis

Zusammenfassung

In Deutschland werden Böden mit einem Ordnungssystem beschrieben, das eine Mischung aus einer Systematik und einer Klassifikation ist. Damit wird versucht, gleichzeitig auf wissenschaftliche und praktische Anforderungen zu reagieren. Die Definitionen der Bodenhorizonte und -profile haben eine Struktur, mit der subjektive Interpretationen und ein relativ freier Umgang mit vorhandenen Grenzwerten möglich ist. Infolgedessen kommt es zu Inkonsistenzen beim Aufbau des Bodenordnungssystems und zu Problemen bei der Bodenansprache. Den bodensystematischen Angaben fehlt dann oft die Qualität, die für die Nutzung in weiteren Anwendungen nötig wäre.

Mit Fallbeispielen werden Probleme bei der Klassifikation von Horizonten und Böden aufgezeigt und zur Problemlösung vorgeschlagen, sowohl eine wissenschaftlich-beschreibende Bodensystematik als auch einfach und objektiv anwendbare Bestimmungsschlüssel für Horizonte und Böden zu entwickeln bzw. weiterzuentwickeln. Seit längerem ist in der deutschen Bodenkunde eine Entwicklung weg von der deskriptiven Systematik zu einer grenzwertbasierten Klassifikation zu erkennen, obwohl beide Ordnungssysteme parallel verwendet werden sollten. Diese Tendenz zeigt sich auch in der in Kürze erscheinenden 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung, die einen Bestimmungsschlüssel für die Abteilungen, Klassen und Typen der deutschen Bodensystematik enthält. Eigenschaften und Bedeutung des Schlüssels werden kurz be-

trachtet und weitere Notwendigkeiten für die Strukturierung bodenkundlichen Wissens und deren Weitergabe an die Praxis erörtert.

Soil Systematic and Classification Systems

Part II: The German Soil Science Situation

Summary

In Germany soils are categorized with an ordering system which is based both on the principles of a systematic and on those of a classification system. The goal is to meet both the scientific and the practical demands. The soil horizon and profile definitions are structured allowing both subjective interpretations and threshold values. As a consequence the configuration of the system is somehow inconsequent and leads to identification problems. As a result the soil systematic specifications often lack the quality needed for their application in other fields or disciplines. We suggest that the best solution would be to develop simultaneously both a scientifically based soil systematic as well as a simple to use and objective classification key. The German soil science has long been transitioning from a descriptive systematic to a threshold based classification system, although both categorization systems should be applied in tandem. This tendency is shown prominently in the recently printed 5th edition of the German Handbook of Soil Mapping, which contains a classification key for the soil groups (*Abteilungen*), classes (*Klassen*), and types (*Typen*). The Handbook's new features and their impact is also of importance and will be discussed. Further deliberations will be conducted concerning any soil scientific organisational requirements, with a focus placed on easing and improving the transfer of knowledge across the gap from pure science to practical applications.

1 Einleitung

Im ersten Teil dieses Artikels wurden die Grundbegriffe zum Thema Systematik und Klassifikation definiert und auf die Bodenkunde bezogen. Vor diesem Hintergrund soll die Qualität der deutschen Bodensystematik bewertet und künftige Aufgaben für deren Weiterentwicklung aufgezeigt werden. Da die Ansprüche an Ordnungssysteme bereits beschrieben wurden, spielen dabei vor allem die Konflikte zwischen Bedürfnissen und Realisierungsmöglichkeiten eine Rolle.

Bei dem deutschen Bodenordnungssystem handelt es sich wegen der primär deduktiven Klassenbildung um eine Systematik, die jedoch viele klassifikatorische Elemente enthält. Die praktische Anwendung im boden-

kundlichen Alltag führt oft zu unbefriedigenden Ergebnissen, die sich auf Identifizierungsprobleme zurückführen lassen. Dem Vorteil der schnellen Einordnung in die Systematik steht die nicht einheitliche Objektzuordnung durch unterschiedliche Bearbeiter gegenüber. Weiterhin fällt auf, dass die zentrale Information bodenkundlicher Arbeit – die Bodenform – auf digital erstellten Karten abgebildet wird, aber im weiteren Prozess der rechnergestützten Informationsverarbeitung zu selten genutzt wird. So werden seit längerem Pedo-Transfer-Funktionen erfolgreich aus Landschafts- und bodenphysikalischen Daten abgeleitet, während Funktionen auf der Basis bodenchemischer, -biologischer und -mineralogischer Bodenzustände kaum bekannt sind. Eine mögliche Ursache ist die Unschärfe der genetischen Information und deren Klassierung, die zu wenig Rückschlüsse auf konkrete Eigenschaften des Bodens zulässt. Hilfsmittel für die Verknüpfung der bodenbildenden Prozesse mit den daraus resultierenden Merkmalsausprägungen sind nicht ausreichend entwickelt.

Der Aspekt der Anwendbarkeit sowohl der Identifizierungsanleitung für Böden als auch der Ergebnisse der Bodenklassifizierung wird kaum diskutiert, obwohl hier ein Schlüssel zur Akzeptanz der Bodenkunde als Wissenschaft liegt. Die Lösung von Konflikten, die sich aus der gegenwärtigen Gestaltung der deutschen Bodensystematik ergeben, kann helfen, die Ergebnisse wissenschaftlich-bodenkundlicher Arbeit besser auf praktische Belange abzustimmen.

2 Grundlagen der deutschen Bodensystematik

Die gegenwärtig gültige deutsche Bodensystematik (*Arbeitskreis Bodensystematik*, 2001) geht auf die Arbeiten von *Kubiens* (1953) und *Mückenhausen* (1977) zurück und wird vom Arbeitskreis Bodensystematik der DBG für das Gebiet der Bundesrepublik laufend fortgeschrieben (*Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde*, 1965, 1971; *Arbeitsgruppe Bodenkunde* 1982; *Arbeitsgruppe Boden*, 1994, 1996; *Arbeitskreis Bodensystematik*, 1985, 1998).

Die Diskussion um die grundsätzliche Struktur des Ordnungssystems ist weitgehend abgeschlossen, auch wenn im Detail weiterhin Änderungen vorgenommen werden. Nach intensiven Auseinandersetzungen um die Vor- und Nachteile einer genetischen oder effektiven Konzeption hat sich im Arbeitskreis Bodensystematik der DBG die Erkenntnis durchgesetzt, dass eine umfassende wissenschaftliche Ordnung der Böden nur mit einem sogenannten natürlichen System durchführbar ist (*Mückenhausen*, 1977). Die Fokussierung auf wissenschaftliche Belange hat zu einer relativ theoretischen Beschreibung der einzelnen Kategorien geführt.

Mückenhausen unterstreicht in seiner Arbeit die Bedeutung der genetischen Ausprägung der Systematik, da sonst kein „sicherer Leitfaden“ vorhanden ist. Da die Ordnung der Böden immer nur nach dem gegenwärtigen

gen Kenntnisstand der Genese erfolgen kann, muss es zu Veränderungen kommen, die in den verschiedenen Fortschreibungen dokumentiert sind. Diese Korrekturbedürftigkeit ist den Ergebnissen wissenschaftlichen Arbeitens immanent. Wünschenswert wäre eine Formalisierung der Inhalte von einer Entwicklungsstufe zur nächsten, wie sie für den Vergleich von Bodenformen der ehemaligen DDR mit dem jeweils aktuellen System der BRD vorliegt (*Altermann und Kühn, 1994; Hartmann und Kainz, 1997*).

Im Laufe der Jahre haben sich die Fassungen der deutschen Bodensystematik dahingehend verändert, dass am Anfang die Beschreibung der typischen Böden im Vordergrund stand (Zentralbodenkonzept), während jetzt die Abgrenzung zwischen den systematischen Einheiten dominiert (Betonung der Grenzdefinitionen). Im Sinne der obenstehenden Definitionen wurde also der systematische Aspekt mehr und mehr durch einen klassifikatorischen ersetzt. Eine mögliche Ursache ist die mangelnde Praktikabilität der systematischen Definitionen. Mit dem Zentralbodenkonzept werden Prototypen gekennzeichnet, mit denen eine genaue Vorstellung vom typischen Aussehen der Böden erzeugt werden kann, wobei Abweichungs- und Übergangsböden nur schwer zugeordnet werden können. Grenzdefinitionen dagegen haben den Vorteil einer eindeutigen Klassierung, jedoch den Nachteil, dass eine Art „Negativ-Schlüssel“ entsteht, nach dessen Analyse bekannt ist, wie die verschiedenen Böden *nicht* sind. Dieser Sachverhalt ist besonders in Klassifikationen wie der *US Soil Taxonomy* (*Soil Survey Staff, 1998*) und der *World Reference Base for Soil Resources* (*ISSS/ISRIC/FAO, 1998*) ausgeprägt.

Das dominierende Ordnungsprinzip ist die Bodengenese (*Arbeitskreis Bodensystematik, 1998; Fiedler, 2001*). Auf der höchsten Ebene werden dabei vier Abteilungen ausgeschieden, wobei die Land-, Grundwasser- und Unterwasserböden wegen des unterschiedlichen Wasserregimes und die Moorböden wegen der spezifischen Materialien und Entstehung als eigenständig betrachtet werden. Die weitere Diversifizierung ist möglich mit

- Klassen (Böden mit gleicher oder ähnlicher Horizontfolge),
- Typen (Böden mit einer charakteristischen Horizontfolge und spezifischen Eigenschaften der Horizonte),
- Subtypen (qualitative Modifikationen der Typen mit spezifischer Horizontfolge),
- Varietäten (Modifikationen der Subtypen nach qualitativen Kriterien oder beim Hinzutreten weiterer Pedogenesen) und
- Subvarietäten (quantitative Modifikationen der Varietäten).

Eine eigenständige Kategorie bildet die Bodenform, die aus der Kombination einer bodensystematischen Einordnung beliebigen Niveaus und der Substratangabe besteht.

Die deutsche Bodensystematik erlaubt die adäquate Darstellung der Kontinuität der Bodendecke, wie sie meist in der Landschaft anzutreffen ist. Dazu sind auf Subtypen-Ebene Abweichungen und Übergänge definiert. Wenn ein zu beschreibender Boden nicht von den vorgegebenen Mustern erfasst wird, können auch neue (Sub-)Typen oder (Sub-)Varietäten definiert werden.

3 Identifizierung von Böden mit der deutschen Bodensystematik

3.1 Allgemeines

Entsprechend der allgemeinen Grundsätze werden Böden bei Kartierarbeiten im mittleren Maßstab meist nur bis zur Subtypenebene identifiziert. Das heißt, dass vornehmlich qualitative Angaben genutzt und die Böden in eine Systematik eingeordnet werden. Dieser Arbeitsschritt setzt die Messbarkeit der Abgrenzungsprinzipien, also der bodenbildenden Prozesse, voraus. Diese sind aber nur schwierig oder überhaupt nicht messbar. Die Identifizierung ist also bei dem gegenwärtigen Kenntnisstand nur sehr eingeschränkt möglich, und wenn überhaupt, dann nur durch die Nutzung von Labordaten. Beispielsweise kann die Intensität der Verbräunung anhand des Unterschiedes zwischen Fe_d -Gehalt von Boden und Ausgangsmaterial bestimmt werden, die Aktualität des Prozesses vielfach anhand des $Fe_{o/d}$ -Verhältnisses. Die Verwendung rekonstruktiver Methoden zum Nachweis bodenbildender Prozesse (Vergleich der Horizonte mit einem (rekonstruierten) Ausgangsgestein, vergl. *Blume* und *Schlichting*, 1965) kann in vielen, aber nicht allen Fällen offene Fragen beantworten. Die Intensität von Prozessen wie (Stau)Vergleyung lässt sich beispielsweise noch nicht ausreichend quantifizieren (*Müller et al.*, 1984), stellenweise bestehen sogar noch offene Fragen zur Genese von Bodentypen (z.B. *Gehrt et al.*, 1999).

Mückenhausen (1965) stellt fest, dass die Bodenkunde durch die starke Konzentration auf die Bodengenese spekulativ wirken kann. Er setzt deshalb die durch Untersuchungen zu verifizierende Hypothese an den Beginn bodenkundlicher Arbeit. Da die Bestätigung wegen der eingeschränkten Messbarkeit nicht möglich ist, ist die Konsequenz, dass alle abgeleiteten Informationen wie Bodenkarten, Planungsgrundlagen oder Funktionsbestimmungen ebenfalls hypothetischen Charakter haben. An anderer Stelle weist *Mückenhausen* darauf hin, dass die Subjektivität der Systematik zunimmt, wenn die Kategoriebildung anhand der am meisten hervortretenden Merkmale vorgenommen wird. Sich selbst widersprechend argumentiert er, dass durch diese Strategie das eigene Ermessen des Wissenschaftlers ausgeschaltet wird (*Mückenhausen*, 1977, S. 33).

Um die theoretischen Definitionen der Bodentypen handhabbar zu machen, wurden in der deutschen Bodensystematik nach *Schlichting* und *Blume* (1979) diagnostische Merkmale in Form von Kennzahlen und Grenz-

werten eingefügt. Sie sollen die Spezifizierung von Horizonten und den Umgang mit Grenzfällen ermöglichen. Dadurch wird versucht, ein Klassifikationssystem bereitzustellen, mit dem Bodentypen zuverlässig identifiziert werden. Die Kategorien von Systematik und Klassifikation wurden hierbei allerdings vermengt.

In der aktuellen Ausführung haben die konkreten Werte aus verschiedenen Gründen eher den Charakter eines „Angebots“:

- Es kommt zu einer Mischung von Ordnungssystemen, wobei in den unteren Hierarchieebenen eine Präzision erwartet wird, die systembedingt in den oberen Ebenen nicht erreicht werden kann.
- Die wissenschaftlich-theoretische Beschreibung der Systematisierungseinheiten setzt ein hohes Maß an Wissen und Erfahrung für die Nutzung der Kartieranleitung voraus. Unerfahrene Kartierer finden Bestätigungen für verschiedene Hypothesen, aber zu wenig Anhaltspunkte für eine zweifelsfreie Identifizierung.
- Die genetisch orientierte Identifizierung führt teilweise zu Ergebnissen, die zu Diskrepanzen zwischen den Grenzwerten in den Definitionen und den tatsächlichen Befunden führen. Dann wird der systematische Aspekt oft stärker als der klassifikatorische gewertet, d.h. Grenz- und Kennwerte werden nicht beachtet. Tabelle 5 enthält ausgewählte Beispiele.
- Die festgelegten Grenzen können die bodenkundlichen Informationen unangemessen verändern. So ist die Verwendung von Mächtigkeitskriterien zur Kategorisierung von Böden kritisch zu hinterfragen. Sehr ähnliche Böden können dadurch unterschiedlich typisiert werden, bei geringen Änderungen werden vorhandene bodenbildende Prozesse nicht mehr beachtet. Diese Herangehensweise, die an sich typisch für Klassifikationen ist, führt zu Informationsverlusten, die den Wert der systematischen Information herabsetzen.

Die Unsicherheiten bei der Identifizierung zeigen sich in den Diskussionen während der Feldarbeit. Es wird salopp gesagt, dass zehn erfahrene Bodenkundler am gleichen Grabloch zu zehn richtigen, aber verschiedenen Klassifikationsergebnissen kommen. Konsequenterweise kann für den Nutzer eine Profildokumentation nur richtig sein, wenn seine Vorstellung von der Genese mit der des protokollführenden Bearbeiters übereinstimmt. Aussagen zur Korrektheit werden damit hinfällig. Erschwerend kommt hinzu, dass der Identifizierungsprozess nicht dokumentiert wird und somit weder zurückverfolgt noch reproduziert werden kann. Dadurch ist keine Kontrolle möglich.

3.2 Ursachen und Auswirkungen der Probleme bei der Anwendung der deutschen Bodensystematik

3.2.1 Fallbeispiel

Die Tabellen 1 und 2 zeigen beispielhaft die Identifizierung eines Bodens anhand üblicherweise in DBG-Exkursionsführern mitgeteilter Daten. Die Daten sind dem Exkursionsführer der Jahrestagung der DBG 1999 (*Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 1999) entnommen und stammen von einer Pseudogley-Schwarzerde, wie sie auf einem Ackerstandort nordöstlich von Hildesheim gefunden wurde. Es zeigt stellvertretend für viele mitgeteilte Bodenprofile erhebliche Probleme der Identifikation. Während die Einordnung (unter Verwendung des veröffentlichten Datensatzes) in die FAO-Klassifikation eindeutig ist, kommt es bei der Identifizierung nach Arbeitsgruppe Boden (1994) auf verschiedenen Ebenen des Identifizierungsprozesses zu Problemen.

Das Fallbeispiel in Tabelle 1 zeigt außerdem exemplarisch, dass Profilbeschreibungen oft nicht den vorgegebenen Standards entsprechen (z.B. Farbe „marmoriertbraun“) und nicht alle zur Identifikation benötigten Parameter dokumentiert sind (fehlende Angaben z.B. zum Gefüge oder zur Intensität der Fleckung).

Tabelle 1

Tabelle 2

3.2.2 Horizontdefinitionen

Die Definitionen der Horizonte in der deutschen Bodensystematik enthalten die Angabe zu den Prozessen, die zu ihrer Bildung geführt haben und zusätzlich Identifizierungshilfen in Form von Grenzwerten. Diese sind lediglich als Richtwerte und nicht als Definitionsvorgabe zu betrachten (*Arbeitskreis Bodensystematik*, 1998, S.7). Einige Prozesse sind jedoch prinzipiell nicht direkt feststellbar. So lassen sich z.B. Al- und Ax-Merkmale in einem Ap-Horizont häufig nicht objektiv beobachten, sondern auf deren Vorhandensein kann dann nur aus der darunter liegenden Profilmorphologie und geschätztem Erosionsstadium geschlossen werden. Übergänge wie im obigen Fallbeispiel von Ax nach Bt sind nicht geregelt.

In Tabelle 3 wird beispielhaft vergleichend die Definition eines Illuvialhorizontes, des Bhs-Horizontes nach *Arbeitskreis Bodensystematik* (1998) und des *Spodic Horizon* nach *WRB (ISSS/ISRIC/FAO, 1998)* gezeigt. Dabei sollen die Definitionen nur in ihrem Aufbau miteinander verglichen werden, da die Begriffsinhalte des *Spodic Horizon* und des Bhs-Horizonts nicht deckungsgleich sind. Die Anzahl der diagnostischen Merkmale nach WRB ist länger und inhaltlich präziser als bei der deutschen Definition, bei der eine starke Vermengung

von Angaben zur Pedogenese und Definition festzustellen ist. Zusätzlich tritt das Problem widersprüchlicher Definitionen in der Hierarchie von Bhs, Bs und B auf (siehe Angaben zu Humusstoffanreicherung und Cp:Fep-Verhältnis), so dass im Grunde der Bhs-Horizont nicht wie vorgesehen als eine Untereinheit des Bs-Horizontes verstanden werden kann.

Tabelle 3

Die Problematik der Definition aus der deutschen Systematik zeigt sich darin, dass der Prozess der Stoffanreicherung zweifelsfrei erkannt werden muss und dass die gegebenen Grenzwerte nicht zwangsläufig auf den Bs-Horizont verweisen. Anhand von Humusgehalt und der Farbe ist auch die Identifizierung eines Bv-Horizontes möglich. Die Ermittlung des pyrophosphatlöslichen Anteils an Kohlenstoff und Eisen ist zu aufwändig für die Feldarbeit und wird auch im Labor nur selten durchgeführt. Abgesehen davon gibt es seit Jahren fundierte analytische Bedenken bezüglich der Aussagekraft von Pyrophosphat-Extrakten (*Schuppli et al., 1983; Kaiser und Zech, 1996*).

Weiterhin erlauben die Definitionen nicht immer eine ausreichende Abgrenzung der Horizonte gegeneinander. In Tabelle 4 sind dazu die Definitionen des Bs-, des Bh- und deren Übergangshorizonte aufgeführt. Da das Kriterium der morphologischen Erkennbarkeit nicht näher gekennzeichnet ist, bleibt unklar, ob sehr geringe Sesquioxid- oder Humusgehalte die Zuordnung zu einem Haupthorizont oder zu einem der Übergangshorizonte erzwingen. Bei der Entscheidung für oder gegen einen der Übergangshorizonte bleibt offen, bis wann eine Stoffgruppe „durch Umlagerung angereichert“ oder nur „morphologisch erkennbar“ ist. Die Bestimmung des $C_p:Fe_p$ -Verhältnisses kann wegen der identischen Vorgaben nicht als klassifizierendes Kriterium hinzugezogen werden.

Bei den Definitionen der Haupthorizonte in Tabelle 4 wird weiterhin das Problem der „Über-Definition“ deutlich, dass bei der Profilkennzeichnung noch viel stärker auftritt (s.u.). Damit ist gemeint, dass ein Horizont relativ präzise gekennzeichnet wird, aber bei der Nicht-Erfüllung eines Teils der Vorgaben kein anderer Horizont mit ähnlicher Definition zur Identifizierung hinzugezogen werden kann. Wegen der dabei entstehenden Lücken in den Definitionen kann nicht jeder gefundene Horizont zu einer systematischen Einheit zugeordnet werden. So wird beim Bh-Horizont vorausgesetzt, dass darüber immer ein Ae-Horizont liegt und dass der Gehalt an organischer Substanz gegenüber diesem Horizont zunimmt. Wenn beispielsweise die Horizontfolge Ah/Ahe/Bh/... mit identischen Humusgehalten gefunden wird, kann der Bh laut Definition nicht als solcher identifiziert werden.

Tabelle 4

3.2.3 Datenlage und Definitionsvorgaben

Das Formblatt für bodenkundliche Profilaufnahmen (*Arbeitsgruppe Boden*, 1994) weist 23 Datenfelder auf, welche je nach Herkunft der Daten häufig nicht vollständig und in der gewünschten Qualität gefüllt werden können. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn es sich um aus der Bodenschätzung abgeleitete Daten handelt. So lassen z.B. auch in dem angeführten Beispiel (Tabelle 1) die quantitativen Angaben der Hydromorphiemerkmale zu wünschen übrig. Das Datenblatt lässt offen, ob pedogenetisch wesentliche Informationen, z.B. Bioturbation oder Tonbeläge, vermerkt werden, während z.B. die für eine substratsystematische Einordnung erforderlichen Daten eingefordert werden.

Das Horizontsymbol wird (anders als das Substratsymbol) offensichtlich als eigene Informationsebene verwendet, welches nicht zwangsläufig regelbasiert aus den aufgenommenen Primärdaten ableitbar ist. Die fehlende Verbindlichkeit der Horizontdefinitionen erlaubt damit eine Subjektivität des Bearbeiters in der Einschätzung der pedogenetischen Sachverhalte. Die Nachvollziehbarkeit der Einordnung ist nicht gegeben. Bei Änderungen des Klassifikationssystems kann nicht überprüft werden, ob das Horizontsymbol noch korrekt ist, für eine Nachbearbeitung fehlt die Datenbasis.

Wir überprüften an insgesamt 584 Datensätzen aus einem Exkursionsführer der DBG (*Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 1999), inwieweit die angegebenen Datensätze in der Lage sind die Horizontdefinitionen abzusichern. Ausgewählte Ergebnisse sind in Tabelle 5 aufgeführt. Die Daten bestätigen das bisher gesagte. Einige der in der Definition der Horizonte geforderten Parameter sind nicht dokumentiert, so dass offen bleibt, ob sie tatsächlich als Klassifizierungskriterium herangezogen wurden. Wegen der oft fehlenden Daten ist keine abgesicherte Aussage zur Übereinstimmung von Definitionen und realen Daten möglich. Bemerkenswert ist dabei, dass fehlende Informationen in anderen Horizonten der entsprechenden Profile aufgeführt sind, z.B. ist das Auftreten von Flecken in verschiedenen Gley-Horizonten protokolliert, jedoch nicht in Gr-Horizonten.

Aus den Beispielen in Tabelle 5 ist weiterhin ersichtlich, dass die vorhandenen Grenzwerte oft keine Rolle bei der Horizontklassifizierung spielen. Wenn die entsprechenden Informationen in der Horizontbeschreibung vermerkt sind, werden Diskrepanzen zwischen den Horizont-Definitionen und den tatsächlichen Parameterausprägungen deutlich.

In diesem Zusammenhang ist es interessant, dass noch in der KA 2 (*Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde*,

1971, S. 28) angegeben wird, dass die „exakte Zuordnung ... [von realen Horizonten zu Horizontdefinitionen] bei der Kartierung häufig nicht möglich“ ist. Diese Aussage bezieht sich auf die damals noch vollständig verbalen Horizontdefinitionen. Bei Beachtung der relativ freien Verwendung der in der KA4 vorhandenen Grenzwerte ist diese Aussage immer noch aktuell.

Tabelle 5

3.2.4 Übergangsböden

Das Fallbeispiel in Tabelle 1 ist nach der ausgewiesenen Horizontsymbolik pedogenetisch in einem vierdimensionalen Raum zwischen Tschernosem, Parabraunerde, Pseudogley und Braunerde angesiedelt, wobei es klassifikatorisch offensichtlich einem Tschernosem am nächsten und einer Braunerde am fernsten steht, die Gesamtausprägung jedoch systematisch einer Pseudogley-Parabraunerde am nächsten kommt. Die Kontinuen von einerseits Parabraunerde und Braunerde und andererseits Pseudogley nach Tschernosem machten nach den vorgenommenen Horizontbezeichnungen offensichtlich Schwierigkeiten bei der Einordnung nach den in *Arbeitsgruppe Boden* (1994) vorgesehenen Horizontfolgen. Über die Berücksichtigung des zeitlichen Ablaufs der unterschiedlichen Pedogenesen (Lessivierung, Pseudovergleyung, Verbraunung, Bioturbation) ließen sich zwar Argumente für die systematische Einordnung gewinnen, sind jedoch für den Kartierer zum Zeitpunkt der Klassifikation mangels ausreichender Daten größtenteils nicht verifizierbar.

Generell sind bezüglich der Übergangsböden in der Deutschen Bodensystematik zwei unterschiedliche Vorgehensweisen festzustellen. Bei Braunerde-Gley-Übergängen werden z.B. die Übergänge über die Tiefenlage des Go-Horizontes geregelt. Bei Braunerde-Parabraunerde-Übergängen haben dagegen Übergangshorizonte (Al-Bv, Bv-Al, Btv, Bvt) diagnostischen Charakter. Bei Parabraunerde-Pseudogley-Übergängen kann nach beiden Schemata verfahren werden. Zwischen und zu den A/C-Böden sind weitgehend nur einseitige Übergänge definiert.

3.2.5 Verschiedene Systematiken

Ein weiterer kritischer Punkt ist, dass die im föderalen Deutschland verwendeten Systematiken fast so heterogen sind wie der Untersuchungsgegenstand selbst. Neben der allgemeinen deutschen Bodensystematik gibt es in einigen Bundesländern regionale Systematiken, die auf der Erstgenannten aufbauen und teilweise die gleichen Begriffe bei geringfügig abweichenden Definitionen verwenden (z.B. *Geologisches Landesamt Baden-Württemberg*, 1995, Müller et al., 1984). Bei der Neuaufnahme von Bodenprofilen werden für die I-

identifizierung nach der deutschen Bodensystematik aktuell vier Fassungen parallel verwendet: in seltenen Fällen noch die KA3 (*Arbeitsgruppe Bodenkunde*, 1982), die KA4, von der zwei sich geringfügig unterscheidende Varianten existieren (*Arbeitsgruppe Boden*, 1994, 1996), sowie die in den Mitteilungen der DBG veröffentlichte Systematik der Böden Deutschlands (*Arbeitskreis Bodensystematik*, 1998). Meist fehlt die Information zur verwendeten Systematik, obwohl sich – vor allem bei den regionalen Systematiken – manchmal Hinweise aus den Horizont- oder Profilbezeichnungen ableiten lassen.

3.2.6 Erstellung von Bodenkarten

Der Prozess der Herstellung von Bodenkarten ist ebenfalls eine Quelle für Identifikationsfehler. *Wilding* (1985) sieht in diesem Vorgang ein künstlerisches Element, weil sich der Kartierer ein persönliches Bild und mentales Modell der Landschaft macht, welches er auf der Bodenkarte wiedergibt. Während der Vorbereitung werden üblicherweise bereits vorhandene Quellen ausgewertet. Dazu zählen Daten von vorhergegangenen, z.T. speziellen Bodenaufnahmen oder verschiedene thematische und topografische Karten. Damit und mit einer Übersichtsbegehung im Gelände lernt der Kartierer das Untersuchungsgebiet kennen und kann mit dem erworbenen Wissen eine Konzeptbodenkarte erstellen. Sie basiert auf der Vorstellung, welche bodenbildenden Prozesse unter den gegebenen Bedingungen abgelaufen sein können, unterstützt von den Informationen aus verschiedenen Aufschlüssen und Bohrungen. Durch die Entnahme weiterer Proben muss diese Konzeptkarte verifiziert werden. Diese interaktive, erfahrungsbasierte Kartierung ist sehr zeit- und kostensparend. Der Nachteil ist, dass bei der Verifizierung die Hypothesen des Kartierers überprüft werden sollen und deshalb bei der Probenahme eine gewisse Erwartungshaltung an das vorgefundene Profil besteht. Mess- und beschreibbare Erscheinungen im Profil werden bei der Identifizierung möglicherweise ausgeblendet und auch nicht im Aufnahmeblatt vermerkt. Da die Wichtung der unterschiedlichen Quellen und die Auswahl der Probenpunkte von der Einschätzung des Kartierers abhängen, ist ein subjektiver Einfluss bei der Kartenerstellung unvermeidbar.

3.2.7 Maßstabsproblematik

Die Probleme bei der praktischen Anwendung der Bodensystematik sind in gewisser Hinsicht ein Maßstabsproblem. *Wilding* (1994, zit. in *Young und Hammer* (2000)) hat bei einer Untersuchung von H. Jennys Konzept der bodenbildenden Faktoren (*Jenny*, 1941) funktionale Einschränkungen festgestellt. Demzufolge können mit diesem Ansatz Aussagen im regionalen Maßstab getroffen werden, jedoch nicht auf der Ebene von Catenen oder kleinen Ackerschlägen. Bei Verallgemeinerung dieser Beobachtung auf die deutsche Boden-

systematik wird deutlich, dass die Ergebnisse von detaillierten Untersuchungen im Maßstab 1 : 10 000 nicht adäquat wiedergegeben werden können, allenfalls die Ergebnisse der bodenkundlichen Landesaufnahme in mittleren und kleinen Maßstäben. Die Aussageschärfe dieser Karten entspricht aber häufig nicht den Anforderungen von der Nutzerseite für Planung und Gesetzesvollzug. Zur Vereinfachung der notwendigen Arbeitsschritte werden dort üblicherweise geographische Informationssysteme zur Datenspeicherung und -verarbeitung verwendet, mit denen sich Relief- oder Hydrologische Informationen mit ungleich höherer Auflösung darstellen lassen. Bodenkundliche Angaben werden dann wegen der fehlenden Genauigkeit möglicherweise vernachlässigt.

3.3 Ansatz zur Lösung der bestehenden Probleme

Die Bodenkunde in Deutschland verfügt über ein hierarchisch tiefgestaffeltes grundlegendes Ordnungssystem, mit dem sich der gegenwärtige Kenntnisstand systematisch repräsentieren lässt. Durch die Prozessorientierung ist die Erweiterung um bisher unbekannte Phänomene durch Aufteilung von Abteilungen, Klassen und Typen grundsätzlich möglich, ohne dass es zu grundlegenden Änderungen kommt. Neben den oben ausgeführten praktischen Schwierigkeiten bei der Klassifikation beschränkt sich die allgemeine Kritik darauf, dass bestimmte Bodenbildungen bisher nicht nomenklatorisch erfasst werden (z.B. *Ahl und Meyer, 2001; Jahn und Fiedler, 2001*).

Der Nachteil der Fokussierung auf die Pedogenese ist, dass zur exakten Identifizierung von Böden Messungen durchgeführt werden müssen. Sonst können Böden nicht zweifelsfrei zu einer Kategorie zugeordnet werden. Die Messbarkeit der bodenbildenden Prozesse ist jedoch sehr eingeschränkt. Dadurch sind die praktisch arbeitenden Bodenkundler auf ein Werkzeug angewiesen, mit dem sich Ergebnisse erzielen lassen, die weder befriedigend noch in vollem Umfang wissenschaftlich korrekt sind.

Im ersten Teil dieses Artikels wurde herausgestellt, dass mit Hilfe von zwei aufeinander aufbauenden Ordnungssystemen - einer Bodensystematik und einer Bodenklassifikation - bestehende Unsicherheiten beseitigt werden können. Es ist jedoch anzunehmen, dass die dafür notwendigen Forschungsarbeiten einen sehr weitreichenden Zeitrahmen erfordern. Außerdem ist es sinnvoll international zu kooperieren, um weltweit einheitliche Ordnungssysteme zu entwickeln, ähnlich denen der Biologie. Dadurch ändert sich aber kurzfristig nichts an der gegenwärtigen unbefriedigenden Situation.

Eine relativ schnelle Objektivierung der Identifizierungsergebnisse ist möglich unter der Annahme, dass die deutsche Bodensystematik richtig und nur unbewiesen ist. Dann können die genetischen und effektiven Teile der Horizont- und Profildefinitionen getrennt werden. Die genetischen Informationen würden dann zur Weiterentwicklung der Systematik zur Verfügung stehen, während die effektiven Informationen die Basis der

Entwicklung einer reinen Klassifikation darstellen. Mit dieser neuen Klassifikation kann es zu Identifizierungsergebnissen kommen, die im Sinne der Systematik falsch sind. Insgesamt wird aber die Qualität der Klassifikationsergebnisse steigen, weil bei einem anzunehmenden gleichbleibenden Fehler die Objektivität und die Reproduzierbarkeit zunehmen.

In den vergangenen Dekaden ist in der deutschen Bodensystematik mit der Einführung diagnostischer Merkmale (*Schlichting* und *Blume*, 1979) und eines Bestimmungsschlüssels für Bodenklassen (*Arbeitsgruppe Boden*, 1994) eine Entwicklung zu einer Klassifikation aufgetreten, die sich vornehmlich im zunehmenden Umfang von verwendeten Grenzwerten zeigt. Ein weiterer Schritt in diese Richtung wird die Veröffentlichung eines vollständigen Bestimmungsschlüssels für Abteilungen, Klassen und Typen in der KA5 sein.

Der Bestimmungsschlüssel fragt hierarchisch die definierten Merkmale der einzelnen Kategorien ab und erlaubt im Ausschlussverfahren die Zuordnung eines Bodenprofils zu einer der definierten Kategorien. Tabelle 6 zeigt den ersten Teil des Bestimmungsschlüssels.

Der Bestimmungsschlüssel erweitert die bisher zur Klassifizierung zu verwendenden Entscheidungsbäume (*Arbeitskreis Bodensystematik*, 1998, Abb. 1 – 3) bis auf das Niveau der Bodentypen. Mit dem neuen Hilfsmittel zur Bodenidentifizierung wird der Umgang mit einigen der oben genannten Probleme vereinfacht.

- Durch die Verwendung des Ausschlussprinzips müssen weniger Hypothesen geprüft werden, was die Arbeit für unerfahrene Kartierer erheblich erleichtert.
- Die in die Systematik eingearbeiteten Grenzwerte werden in komprimierter Art dargestellt und dadurch besonders hervorgehoben. Bei der stärkeren Präsenz der Daten ist davon auszugehen, dass sie wesentlich öfter als Klassifikationskriterium herangezogen werden.
- Bei der Verwendung der festgelegten Regeln zur Bodenklassifikation nehmen Objektivität und Reproduzierbarkeit zu.
- Die einfache Handhabung des Bestimmungsschlüssels wird zu einer beschleunigten Verbreitung der aktuellen Version der deutschen Bodensystematik führen und damit die Phase der parallelen Verwendung von verschiedenen Fassungen der Systematik verkürzen.

Tabelle 6

Trotz der genannten Vorteile ergeben sich bei der Analyse des Bestimmungsschlüssels Problemstellen, die im Wesentlichen in der zu Grunde liegenden Systematik begründet sind.

Hier ist zuerst das bereits erwähnte Problem der „Über-Definition“ zu nennen. Zur Identifizierung vieler Bo-

dentypen ist mehr als eine Bedingung zu erfüllen, wobei die jeweiligen Bedingungen in keiner anderen Definition genannt werden. Dadurch ist der Bestimmungsschlüssel weitgehend in sich geschlossen, es fehlt jedoch meist ein Bodentyp, der das Klassifikationsergebnis ist, wenn alle vorherigen Abfragen negativ beantwortet werden müssen. Das dem Schlüssel zugrunde liegende Ordnungssystem ist damit unvollständig, weil nicht für jede mögliche Parameterkonstellation ein Klassifizierungsergebnis ermittelt werden kann. Soll beispielsweise ein Hochmoor-Profil aus mehreren nicht vererdeten/vermulmten hH-Horizonten mit einem pH-Wert > 4 mit dem Bestimmungsschlüssel (Tabelle 6) klassifiziert werden, sind die Bedingungen für die Zuordnung zur Abteilung der Moore und zur Klasse der Natürlichen Moore erfüllt, aber die Zuordnung zu einem Typ ist nicht möglich, weil entweder der pH-Wert zu hoch ist oder hH- statt nH-/uH-Horizonte vorgefunden werden.

Die zweite Beschränkung der Anwendbarkeit des Bestimmungsschlüssels resultiert aus der Tatsache, dass für die Klassifikation korrekte Horizontbezeichnungen erforderlich sind. Den bisherigen Ausführungen ist zu entnehmen, dass die Korrektheit zur Zeit sehr subjektiv und nicht durch entsprechende Datensätze überprüfbar ist. Der Bestimmungsschlüssel ermöglicht daher weiterhin unterschiedliche Klassifikationen durch unterschiedliche Bearbeiter. Abhilfe könnte hier ein Bestimmungsschlüssel für Horizonte schaffen.

Die Deutsche Bodensystematik umfasst derzeit 51 Bodentypen und 203 Subtypen. Zu deren Identifizierung sind in *Arbeitskreis Bodensystematik* (1998) 15 Haupthorizonte mit 118 Unterhorizonten mehr oder weniger ausreichend gut definiert. Bei den bestehenden Schwierigkeiten, insbesondere im Bereich der Übergangshorizonte, besteht die berechtigte Frage ob dieses System noch wesentlich zu schärfen und auszubauen ist. Zum Vergleich benötigt die WRB (*ISSS/ISRIC/FAO*, 1998) nur 59 relativ eindeutig definierte *diagnostic horizons, properties* und *materials*, um 30 *reference units* und mit einigen weiteren Bedingungen (z.B. Tiefenlage) insgesamt 578 *subunits* zu definieren. Durch Ein- und Ausschlusskriterien (*having..., no diagnostic horizons other than ...*) ist die Effizienz der diagnostischen Klassifikationsmodule wesentlich höher. Horizontsymbole werden hierbei nicht zur Klassifikation eingesetzt. Es wäre also ein Ansatz, ähnlich zu verfahren und neben der Horizontsymbolik für die Klassifikation ein System von diagnostischen Merkmalen aufzubauen und dies mit den Angaben in Datenblättern in Einklang zu bringen. Damit wäre auch das Problem von Überdefinitionen bei den Horizonten und den für einen Typ oder Subtyp angegebenen Horizontfolgen lösbar. Vollständige (idealisierte) Horizontfolgen könnten in der Systematik beibehalten werden, während sich die Klassifikation auf die diagnostischen Horizonte beschränkt.

Derzeit ist die Verwendung pedogenetischer Informationen für praktische Anwendungen begrenzt. Zwar können z.B. bei A/C-Böden auf Grund ihrer Definition Angaben zur Gründigkeit, bei Gleyen und Pseudogleyen

zur Tiefenlage des Grund- und Stauwassers entnommen werden, weitere Aussagen stoßen jedoch schnell auf Grenzen. So kann z.B. von Braunerden nicht ohne weiteres auf Versauerung geschlossen werden, da auch Kalkbraunerden im Typ Braunerden enthalten sind. Es fehlt bislang eine bundesweite statistische Auswertung der verfügbaren Datensätze um zu überprüfen, ob die derzeitigen Klassifikationsgrenzen sinnvoll gesetzt sind, ob Häufungen von Daten andere Grenzen sinnvoll erscheinen lassen, oder ob bestimmte Untereinheiten besser anderen Einheiten zugeordnet werden sollten.

Mit der parallelen Ausarbeitung der Systematik und einer Klassifikation können die in der Praxis auftretenden Probleme zumindest teilweise gelöst werden:

- Die Horizontdefinitionen werden klar gefasst und gegeneinander abgegrenzt. Bei konsequenter Anwendung ist eine eindeutige und reproduzierbare Zuordnung von Profilbefunden zu Klassifikationseinheiten möglich.
- Beim Grad der Vollständigkeit bodenkundlicher Datensätze ist keine wesentliche Änderung zu erwarten. Jedoch wird es möglich, bestimmte Parameterausprägungen aus den Klassifikationseinheiten abzuleiten, weil die Kriterien zur Identifizierung eindeutig festgelegt sind.
- Bei der Entwicklung der Ordnungssysteme ist eine weitgehende Standardisierung zu erwarten. Dann können bestehende Inkonsistenzen, z.B. bei der Verwendung von Substratangaben in der Bodentypenansprache oder bei der Ansprache der Übergangsböden, einheitlich geregelt werden. Ein allgemein akzeptierter Standard trägt dazu bei, die Vielfalt der verwendeten Systematiken zu verringern.
- Bei der Erstellung von Bodenkarten müssen neue Wege gegangen werden. Die exakte flächenhafte Darstellung bodenbildender Prozesse erfordert den verstärkten Einsatz von Simulationen und geostatistischen Methoden. Außerdem sollte die Kontinuität der Pedosphäre auf *fuzzy*-Karten (Hannemann, 2003) wiedergegeben werden.
- Das genannte Maßstabsproblem dürfte keine Rolle mehr spielen, weil die Arbeit mit Grenzwerten auch in großen Maßstäben eine adäquate Wiedergabe von Informationen ermöglicht. Dabei ist es wichtig, die Klassifikation hierarchisch aufzubauen, um maßstabsabhängig zu aggregieren. Die bereits in der Bodentypenbenennung vorhandenen Prinzipien müssen dann auch auf die Bodenhorizonte übertragen werden.

4 Fazit

Die deutsche Bodensystematik verwendet genetische Informationen und Grenzwertdefinitionen zur Kennzeichnung der Böden. Damit wird versucht, einerseits die Eigenschaften der Böden und ihre Beziehungen untereinander umfassend darzustellen, und andererseits eine einfache Identifizierung zu ermöglichen. Wegen der Mischung systematischer und klassifikatorischer Elemente ist die praktische Anwendbarkeit eingeschränkt. Die Identifizierungsanleitung hat eine Struktur, die einerseits zu subjektiven Klassifikationen führt und andererseits keine konsequente Beachtung vorhandener Grenzwerte erlaubt. Damit erzielte Klassifikationsergebnisse haben nicht die erforderliche Qualität zur Verwendung in weiteren Verfahren. Die Folge ist, dass zwar einerseits mit der Substratklassifikation relativ gut hydropedologische Pedo-Transfer-Funktionen angewendet werden können, andererseits aber die pedogenetischen Informationen kaum für die aktuellen Aufgaben in der Landschaftsplanung und im Bodenschutz eingesetzt werden. Dadurch sind bodenkundliche Informationen in den relevanten praktischen Bereichen weiterhin unterrepräsentiert. Die bestehenden Probleme lassen sich zum großen Teil aus der Struktur der deutschen Bodensystematik erklären und sind damit nicht von den Anwendern induziert. Hier ist die wissenschaftliche Bodenkunde gefordert, sowohl ihre eigenen Interessen an einem Ordnungssystem zu verfolgen als auch der Praxis einen Bestimmungsschlüssel mit der erforderlichen Qualität zur Verfügung zu stellen.

Eine mögliche Lösung der bestehenden Probleme ist die parallele Verwendung einer Bodensystematik und eines Klassifikationsschlüssels. Die bestehende Systematik muss verifiziert und die teilweise vorhandene Klassifikation vervollständigt werden, um wissenschaftliche und praktische Ansprüche gleichermaßen zu erfüllen. Ein endgültiger Klassifikationsschlüssel kann erst entwickelt werden, wenn der systematische Teil ausgebaut und bewiesen ist. Bis zum Abschluss der Verifikation ist die Verbesserung der vorliegenden Klassifikationen wichtig für die reproduzierbare Strukturierung bodenkundlichen Wissens. Letztendlich können aber bodenkundliche Informationen nur dann Anwendung finden, wenn sie einerseits objektiv ermittelt sind und sich andererseits auch in einen größeren Bedeutungszusammenhang bringen lassen.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung (Projekt Hu-636/8-2). Den Gutachtern Karl Stahr, Wolfgang Fleck und einem anonymen Gutachter danken wir für ihre umfangreichen und kritischen Hinweise.

Literatur

- Ahl, C., und B. Meyer (2001): Die Systematik der Böden der BRD und Probleme der Anwendung ihrer Nomenklatur auf die Charakterisierung weit verbreiteter Böden. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 96, 463–464.
- Altermann, M., und D. Kühn (1994): Vergleich der bodensystematischen Einheiten der ehemaligen DDR mit denen der Bundesrepublik Deutschland. *Zeitschrift für angewandte Geologie* 40, 1–11.
- Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde* (1965): *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 1)*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und die Geologischen Landesämter der BRD, Hannover.
- Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde* (1971): *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 2)*. Bundesanstalt für Bodenforschung und die Geologischen Landesämter der BRD, Hannover.
- Arbeitsgruppe Boden* (1994): *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 4)*. Schweizerbart, Stuttgart.
- Arbeitsgruppe Boden* (1996): *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 4, verbesserter und erweiterter Nachdruck)*. Schweizerbart, Stuttgart.
- Arbeitsgruppe Bodenkunde* (1982): *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 3)*. Schweizerbart, Stuttgart, 331 S.
- Arbeitskreis Bodensystematik* (1985): *Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland*. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 44, 1-91.
- Arbeitskreis Bodensystematik* (1998): *Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate Deutschlands*. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 86, 1-192.
- Arbeitskreis Bodensystematik* (2001): *Systematik der Böden Deutschlands*, in: Blume, H. P., P. Felix-Henningsen, W. R. Fischer, H.-G. Frede, R. Horn und K. Stahr (Hg.): *Handbuch der Bodenkunde*. ecomed, Landsberg/Lech, S. 1-58 (Kap. 3.2.2).
- Blume, H. P. und E. Schlichting (1965): The relationship between historical and experimental pedology, in: Hallsworth, E. G. und D. V. Crawford (Hg.): *Experimental Pedology*. Butterworths, London.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft* (Hg.) (1999): *Exkursionsführer zur Jahrestagung der DBG 1999 in Hannover*. *Mitteilungen der DBG*, Band 90.
- Fiedler, H. (2001): *Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten*. Expert, Renningen.
- Gehrt, E., T. Beckmann, S. Dultz, K. Hahn, A. Hilgers, T. Jarmer, A. Rathgeber und M. Schmidt (1999): Böden der Lößbörde und des Berglandes. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 90, 249 – 278.
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg* (1995): *Symbolschlüssel Bodenkunde*. *Informationen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg* 5/95, 37–67.

- Hannemann, J.* (2003): Die Berücksichtigung inhaltlicher und räumlicher Unschärfen bei der GIS-gestützten Erstellung der bodengeologischen Karte von Brandenburg im Maßstab 1 : 50 000 (BK 50) – ein Test am Beispiel des Blatts Königs Wusterhausen. *Brandenburger Geowiss. Beitr.* 10, 61-76.
- Hartmann, K.-J.*, und *W. Kainz* (1997): Konzept zur Übertragung bodenkundlicher Daten aus dem Sprachgebrauch der früheren DDR in die aktuelle deutsche Nomenklatur. *Z. f. angewandte Geologie* 43, 112–117.
- ISSS/ISRIC/FAO* (Hg.) (1998): World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report 84. FAO, Rom.
- Jahn, R.*, und *S. Fiedler* (2001): Zur systematischen Einordnung und Abgrenzung von Ockererden. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 96, 509-510.
- Jenny, H.* (1941): *Factors of soil formation.* Dover, New York.
- Kaiser, K.*, und *W. Zech* (1996): Defects in estimation of aluminum in humus complexes of podsollic soils by pyrophosphate extraction. *Soil Sci.* 161, 452-458
- Kubierna, W.* (1953): *Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas.* Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Mückenhausen, E.* (1965): The soil classification system of the Federal Republic of Germany. *Pedologie* 3, 57–74.
- Mückenhausen, E.* (1977): *Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland.* DLG-Verlag, Frankfurt/Main.
- Müller, W.*, *R. Lüders* und *J.-H. Benzler* (1984): Ein anwendungsorientiertes Klassifikationssystem für Bodentypen auf Grundlage der Quantifizierung von Bodenmerkmalen und Bodeneigenschaften. *Geol. Jahrb.* A75, 663–714.
- Schlichting, E.*, und *H.-P. Blume* (1979): Beitrag zur Objektivierung der DBG-Bodensystematik. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 29, 765–774.
- Schuppli, P. A.*, *G. J. Ross* und *J. A. McKeague* (1983): The effective removal of suspended materials from pyrophosphate extracts of soils from tropical and temperate regions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 1026-1032.
- Soil Survey Staff* (Hg.) (1998): *Keys to Soil Taxonomy.* United States Department of Agriculture/Natural Resources Conservation Service, Washington.

- Wilding, L.* (1985): Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys, in:
Nielsen, D., und J. Bouma (Hg.): Soil spatial variability. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- Young, F., und R. Hammer* (2000): Defining Geographic Soil Bodies by Landscape Position, Soil Taxonomy, and Cluster Analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, S. 989–998.

Tabelle 1: Profildaten einer Pseudogley-Schwarzerde (aus *Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 1999, S. 255), BS: Basensättigung

Table 1: Profile data of a Stagnic Phaeozem (source: *Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 1999, S. 255), BS: base saturation

Standortbeschreibung			
Lage:	Hildesheimer Börde, ca. 10 km nordöstlich von Hildesheim, TK 3726, R: 3568742, H: 5794190		
Relief:	Höhe ü. NN: 80 m; flach nach Süden einfallende Fläche, Neigung ca. 1 %		
Klima:	Jahresniederschlag: 640 mm, Jahresmitteltemperatur: 8,8 °C, Klimatische Wasserbilanz/Sommerhalbjahr: -40 bis -60 mm		
Nutzung:	Acker, Fruchtfolge: Weizen – Weizen – Zuckerrüben		
Bodenschätzung:	Klassenzeichen: L 3 LÖD 74/77		
Profilbeschreibung			
Horizont	Löß-Schicht	Tiefe (cm)	Beschreibung
Alxp	V	0-30	schluffiger Lehm, dunkelgrau (10YR 5/2 (3/2)), mittel humos, BS: 91%
Alxh	V	-50	schluffiger Lehm, dunkelgrau (10YR 3/3 (5/2)), mittel humos, BS: 91%
Bht-Axh	IV	-60	schluffiger Lehm, schwarz (10YR 3/2 (5/2)), mittel humos, sehr schwach eisenfleckig, BS: 93%
Ahx-Bht	IV	-75	schluffiger Lehm, z.T. lehmiger Schluff, schmutzigbraungrau (10YR 3/3 (4/2)), durchsetzt mit schwarz, schwach humos, schwach eisenfleckig, BS: 93%
Sw-Bhtv	IV	-85	schluffiger Lehm, Tonüberzüge, schmutzigbraungrau (10YR 3/4 (5/3)), Überzüge schwarz, sehr schwach humos, schwach eisenfleckig, BS: 97%
Bhtv-Sw	II	-90	stark lehmiger Sand, stark kiesig, schmutzigbraungrau (10YR 4/4 (5/4)), Überzüge schwarz, mittel eisen- und sehr schwach manganfleckig, Konkretionen, BS: keine Angabe
Sd	0	-110	stark sandiger Lehm, schwach kiesig, marmoriertbraun (10YR 4/4 (5/3)), fleckig schwarz, mittel eisen- und schwach manganfleckig, Konkretionen, BS: 97%
Bodentyp:	KA4:	(LL? -)SS-TT: Lessivierter? Pseudogley-Tschernosem (Subtyp nicht vorgesehen)	
	FAO:	Stagnic Phaeozem	
	NLFB:	S-L-T 35: Mittlere Pseudogley-Parabraunerde-Schwarzerde, sehr tief entkalkt	
Ausgangsgestein:	Los/Lo/p(Lg): Sandlöß über Löß über tiefer Kryoturbationsdecke aus Geschiebelehm		
Substrattyp:	p-sö/p-ö//p-kl(Lg): Sandlöß über Löß über tiefem, schwach kiesführendem Kryolehm (aus Geschiebelehm)		

Tabelle 2: Identifizierung eines Bodenprofils anhand der Daten aus Tabelle 1 (stark verkürzt, Teilschritte der Identifizierung entsprechend Abbildung 2 in Teil I dieses Beitrags)

Table 2: Soil profile identification utilizing the data from table 1 (abbreviated, step by step identification coincidental to figure 2 in part I)

	Systematik (hier: <i>Arbeitskreis Bodensystematik</i> , 1998)	Klassifikation (hier: <i>ISSS/ISRIC/FAO</i> , 1998)
Ermittlung der benötigten Informationen	<ul style="list-style-type: none"> - schwache Ton- und Humusverlagerung - Flecken- und Konkretionsbildung, Marmorierung - Bildung von Tonüberzügen - tiefreichende Humusakkumulation - pH-Werte im neutralen Bereich 	<ul style="list-style-type: none"> - Basensättigung im Profil >90 % - 2 – 4 % Humus im Oberboden - Mächtigkeit des Oberbodenhorizontes > 50 cm - Calciumcarbonat < 0.2 % - steigende Munsell-Chroma-Werte mit zunehmender Tiefe
Vergleich mit Beschreibungen	<ul style="list-style-type: none"> - Lessivé: Tonverlagerung, Überzüge - Tschernoseme: Ausgangssubstrat, Humusakkumulation, Landschaftsgeschichte - Pseudogleye: Flecken, Marmorierung 	<ul style="list-style-type: none"> - mollic A: Humusgehalt, Farbe, Mächtigkeit des Oberbodens - Phaeozem: Basensättigung im Profil > 50 % - stagnic properties: steigende Munsell-Chroma-Werte mit zunehmender Tiefe
Ausschluss von Möglichkeiten	<ul style="list-style-type: none"> - Podsole: Ausgangsgestein, keine Verlagerung von C, Al und Fe - Gleye: nicht im Grundwasserbereich - Terraes Calcis: keine Lösungsrückstände von Carbonatgestein 	<ul style="list-style-type: none"> - Cambisols: kein cambic B wegen der dunklen Farben im oberen Profilteil - Chernozems: kein calcic oder petrocalcic Horizont wegen geringem Calciumcarbonatgehalt - Gleysols: keine gleyic properties innerhalb 50 cm unter GOF
Identifizierung	Lessivierter? Pseudogley-Tschernosem	Stagnic Phaeozem
Offene Fragen	<ul style="list-style-type: none"> - Flächenprozent der Flecken entsprechen nicht der KA4-Definition - Die Tongehalte der Horizonte 4 und 5 sind jeweils niedriger als in den darüber liegenden Horizonten (Widerspruch zur Definition) - Flecken in den Horizonten 3 und 4 zeigen sich nicht in den Horizontbezeichnungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Identifikation des mollic A ist wegen der doppelten Farbangaben nicht sicher

Tabelle 3: Beispiele für eine Horizontdefinition aus einer Bodenklassifikation und einer –systematik

Table 3: Horizon definition examples for both a soil systematic and classification system

	Deutsche Bodensystematik	WRB-Klassifikation
	Bhs-Horizont (<i>Arbeitskreis Bodensystematik</i> , 1998)	Spodic horizon (<i>ISSS/ISRIC/FAO</i> , 1998)
Informationen zur Pedogenese	mineralischer Unterbodenhorizont, Veränderung der Farbe und des Stoffbestandes im Vergleich zum Ausgangsgestein durch Stoffanreicherung, mit Sesquioxiden durch Umlagerung angereichert	Dunkelgefärbter Unterbodenhorizont, welcher illuviale amorphe Substanzen aus organischer Substanz und Aluminiumoxiden, mit oder ohne Eisenoxiden, enthält
diagnostische Merkmale	<p>B:</p> <ul style="list-style-type: none"> - frei von lithogenem Carbonat der Feinerde <p>Bs:</p> <ul style="list-style-type: none"> - B-Horizont, - keine Humusanreicherung erkennbar, - Munsell-Hue mindestens eine Stufe stärker rot als beim darüber und darunter folgenden Horizont, und - $C_p:Fe_p < 3$ <p>Bhs:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bs-Horizont, - mit morphologisch erkennbarer Humusstoffanreicherung, - $C_p:Fe_p = 3 - 10$ 	<p>1. a. entweder Munsell-Hue von 7.5YR oder röter bei Munsell-Value von 5 oder weniger und Munsell-Chroma von 4 oder weniger (feuchtes, loses Material); oder Munsell-Hue von 10YR bei Munsell-Value von 3 oder weniger und Munsell-Chroma von 2 oder weniger (feuchtes, loses Material); oder</p> <p>b. mindestens 2.5 cm mächtiger Teilhorizont, der vollständig durch organisches Material und Aluminium, mit oder ohne Eisen, zementiert ist (Ortstein); oder</p> <p>c. deutliche organische Pellets zwischen den Sandkörnern; und</p> <p>2. mindestens 0.6 % organische Substanz; und</p> <p>3. pH (H₂O): 5.9 oder niedriger; und</p> <p>4. a. Summe aus oxalatlöslichem Al (Al_{ox}) + ½ oxalatlöslichem Fe (Fe_{ox}) mindestens 0.50 % und mindestens doppelt so viel Al_{ox} + ½ Fe_{ox} wie der darüber liegende <i>umbric</i>, <i>ochric</i>, <i>albic</i> oder <i>anthropedogenic</i> Horizont; oder</p> <p>b. bei der optischen Dichte des Oxalatextraktes einen Wert von mindestens 0.25, der ebenfalls mindestens doppelt so hoch ist wie bei dem darüber liegenden Horizont; und</p> <p>5. Mächtigkeit von mindestens 2.5 cm, Obergrenze unterhalb 10 cm unter der Obergrenze des Mineralbodens, außer wenn Permafrost innerhalb von 200 cm im Gesamtprofil auftritt</p>

Tabelle 4: Vergleich der Definitionen der Horizonte Bs, Bhs, Bsh und Bh (Cp: pyrophosphatlöslicher Kohlenstoff, Fep: pyrophosphatlösliches Eisen)

Table 4: Comparison of definitions for the Bs, Bhs, Bsh and Bh horizons (Cp: pyrophosphate extracted carbon, Fep: pyrophosphate extracted iron)

Bs	Bhs	Bsh	Bh
Mineralischer Unterbodenhorizont, Veränderung der Farbe und des Stoffbestandes im Vergleich zum Ausgangsgestein durch ... Stoffanreicherung; frei von lithogenem Carbonat in der Feinerde (... Illuvialhorizont)			
mit Sesquioxiden durch Umlagerung angereichert ..., Munsell-Farbton mindestens eine Stufe stärker rot als beim darüber und darunter folgenden Horizont,		durch Einwaschung mit Humusstoffen angereichert ..., die organische Substanz nimmt gegenüber dem Ae-Horizont zu,	
keine Humusanreicherung erkennbar,	mit morphologischer Humusanreicherung,	mit morphologisch erkennbarer Sesquioxidanreicherung	morphologisch keine Fe-Anreicherung erkennbar
$C_p:Fe_p < 3$	$C_p:Fe_p 3 - 10$	$C_p:Fe_p 3 - 10$	$C_p:Fe_p > 10$

Tabelle 5: Beispiele für Parameterausprägungen in den Bodenhorizont-Definitionen und in bodenkundlichen Datensätzen

Table 5: Parameter characteristics in soil horiozon definitions and in pedo-data sets (examples)

Horizontname	Definition (verkürzt)	Parameterausprägung in Datensätzen
Aeh/Ahe	violettstichig	nur in Ausnahmefällen violettstichig, normalerweise grau, braun oder eine Variante davon
Bv	gegenüber dem nach unten folgenden Horizont (bei gleichem Substrat ...) mindestens um 1 pH-Stufe saurer (pH 4-5)	pH meistens 4-5, pH-Änderung schwankt zwischen Abnahme um 0.8 Einheiten und Zunahme um 0.4 Einheiten
Cv	gegenüber dem Cn: Vorkommen von Wurzeln	meistens keine Information, Wurzeln nur in Übergangs-Cv dokumentiert
Gr	<5 Flächen-% Flecken an Wurzelbahnen	keine Information
Sd	in der Regel 50 bis 70% Rost- und Bleichflecken	oft keine Information, mittlerer Flächenanteil: f3 (2-5%), maximaler Flächenanteil: f5 (10-30%)
	marmoriert ... o d e r Marmorierung ... nicht vorhanden oder nicht erkennbar	keine Information
Quelle der Horizontdefinitionen: <i>Arbeitskreis Bodensystematik</i> (1998)		
Quelle der Bodendaten: Profilbeschreibungen im Exkursionsführer zur Jahrestagung der DBG 1999 in Hannover (<i>Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft</i> , 1999)		
Bei der Angabe „keine Information“ muss in vielen Fällen davon ausgegangen werden, dass das Merkmal nicht ausgeprägt ist, weil im gleichen Profil in anderen Horizonten entsprechende Informationen dokumentiert sind.		

Tabelle 6: Bestimmungsschlüssel für Abteilungen, Klassen und Typen der Deutschen Bodensystematik nach KA5 (Ausschnitt)

Table 6: German soil classification key for groups (Abteilungen), classes (Klassen), and types (Typen) as published in the 5th edition of the German Handbook of Soil Mapping (excerpt)

		Abteilung	Klasse	Typ	
H-Horizonte ≥ 3 dm mächtig und an der GOF oder innerhalb < 2 dm unter GOF beginnend.	ja	Moore			
	→	↓			
		Vererdete und/oder vermulmte H-Hor. im Oberboden \rightarrow und diese ≥ 1 dm mächtig.	ja	K; Erd- und Mulmmoore	
			↓		
			nHv- oder nHvp-Horizont vorhanden	ja	KV; Erdniedermoor nHv/(nHt)/nHw/...
			↓ nein		
			nHm- oder nHmp-Horizont vorhanden	ja	KM; Mulmniedermoor nHm/nHa/nHt/nHw/...
			↓ nein		
			hHv- oder hHvp-Horizont vorhanden	ja	KH; Erdhochmoor hHv/hHw/(hHr)/(uHr)/...
			↓ nein		
	Vererdete u./o. vermulmte H-Hor. im Oberboden < 1 dm mächtig oder fehlend.	ja	H; Natürliche Moore		
		↓			
		hH-Horizonte, pH < 4	ja	HH; Hochmoor hH/(lInH)/...	
		↓ nein			
		nH- oder uH-Horizonte	ja	HN; Niedermoor nH,uH/...	
		↓ nein			
↓ nein					
Am Grunde von Gewässern und/oder im Tidebereich mit täglicher Überflutung vorkommend und Solum aus F-Horizonten bestehend	ja	Semisubhydrische u. Subhydrische Böden			
	→	↓			
		Am Grunde von Gewässern, nahezu oder ganzjährig allseitig von Wasser durchdrungen, aus Sedimenten von Binnengewässern entstanden.	ja	J; Subhydrische Böden	
			↓		
			Fi-Horizont	ja	JP; Protopedon Fi/...
			↓ nein		
			Durch Fe ^{III} -Mischoxide oliv gefärbter Fo>-Horizont, rH ≥ 13	ja	JG; Gyttja Fo/...;
			↓ nein		
			Durch Sulfid schwarz gefärbter Fr>-Horizont, rH < 13	ja	JS; Sapropel Fr/...
			↓ nein		
		Fh-Horizont rH < 19	ja	JD; Dy Fh/...	
		↓ nein			
	Im Tidebereich zwischen MNW u. MHW, täglich zeitweise allseitig von Wasser durchdrungen und aus Sedimenten des Meer-, Brack- und Flusswassers entstanden (tm, tb, tpX-Horizonte).	ja	I; Semisubhydrische Böden		
		↓			
		Fr-Horizont	ja	IW; Watt ((z)(e)Fo)/(z)(e)Fr	
		↓ nein			
↓ nein					

Kapitel 7

Zuordnung des Munsell-Codes zu einem Farbnamen nach bodenkundlichen Kriterien

In der vorliegenden Form veröffentlicht in der Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde (Journal of Plant Nutrition and Soil Science), Heft 167 (1), S. 60–65. Die folgenden Seiten enthalten den Sonderdruck des Artikels.

Zuordnung des Munsell-Codes zu einem Farbnamen nach bodenkundlichen Kriterien

Christoph Albrecht^{1*}, Bernd Huwe¹ und Reinhold Jahn²

¹ Abteilung Bodenphysik, Universität Bayreuth, D-95447 Bayreuth, Germany

² Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Weidenplan 14, D-06108 Halle/S., Germany

Angenommen: 8. Dezember 2003

Zusammenfassung – Summary

Eine der zentralen Informationen für die Bodenklassifikation ist die Farbe. Bei Profilaufnahmen wird sie entweder verbal oder durch den Munsell-Code beschrieben. Während der Name schnell und ohne Hilfsmittel zu bestimmen ist, hat der Munsell-Code den Vorteil, dass er auf einem standardisierten Farbraum basiert und deshalb numerische Vergleiche zwischen einzelnen Farben gezogen werden können. Da in vielen bodenkundlichen Datensätzen nur der Farbname angegeben ist, ist die rechnergestützte Auswertung dieser Information oft nicht möglich. Um dieses Problem zu umgehen, wurde ein System entwickelt, mit dem zu jedem bodenkundlichen Farbnamen der mittlere Munsell-Code bestimmt werden kann. Es ist in der plattformübergreifenden Programmiersprache Tcl/Tk als freie Software programmiert.

Schlagwörter: Bodenfarbe / Farbname / Munsell-Code / Software

Allocation of the Munsell code to a color name according to pedological criteria

Soil color is one of the central information for soil classification. Normally, it is described by name or by Munsell code. The Munsell code is based on a standardized color space, and therefore it is possible to compare colors numerically. The advantage of the verbal description is the very fast determination without any aids. As many soil science records contain only the name, the computationally interpretation is often impossible. In order to solve this problem, a system was developed that determines the central Munsell code to every color name considering soil science criteria. It is programmed with the platform-independent language Tcl/Tk as free software.

Key words: soil color / color name / Munsell code / software

PNSS P131/5B

1 Einleitung

Die Farbe ist ein wichtiges Kriterium für die Bodenklassifikation (Schröder, 1983). Dabei sind nicht nur die Eigenfarben der Horizonte bedeutsam, sondern auch die Farbänderungen, die sowohl zwischen als auch innerhalb der Horizonte, z. B. als Marmorierung, auftreten. In Deutschland werden zwei Systeme zur Beschreibung verwendet: Zum einen werden die Farben benannt (hier: System nach KA4 (AG Boden, 1996)), zum anderen werden mit Hilfe von Farbtafeln die Codes des metrischen Munsell-Farbsystems ermittelt. Während mit den KA4-Farben nur eingeschränkt Vergleiche in Helligkeit und Farbintensität möglich sind, können mit den metrischen Farbcodes auch Unterschiede im Farbton zahlenmäßig gekennzeichnet werden. Außerdem ist die automatisierte Auswertung einfacher, vor allem im Hinblick auf die Darstellung in verschiedenen Farbsystemen und Darstellungsmedien.

Laut der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4) ist es möglich, Farbnamen aus Munsell-Codes abzuleiten, der umgekehrte Vorgang ist nicht zulässig. Diese Restriktion beruht auf der Annahme, dass mit Farbtafeln sehr präzise bestimmt wird, während der Name eine grobe Schätzung der vorhan-

den Farbe ist. Durch den unterschiedlichen Genauigkeitsgrad ist nur die Ableitung der „Schätzung“ aus der „Messung“ problemlos möglich. Andererseits kann mit den Farbcodes – im Unterschied zum KA4-System – nicht jede gefundene Farbe beschrieben werden. Die normalerweise bei der Feldansprache verwendeten Farbtafeln beinhalten lediglich diskrete Ausschnitte aus einem ausgewählten Teil des Gesamtfarbraums, so dass teilweise der Code der nächstliegenden Farbe verwendet werden muss.

Die Verwendung von Farbtafeln ist nur für die Klassifikation und Beschreibung von Leitprofilen vorgeschrieben (AG Boden, 1996, S. 106). Daher existieren viele bodenkundliche Datensätze, die nur Farbnamen enthalten. In der vorliegenden Arbeit wird ein System vorgestellt, mit dem der mittlere Munsell-Code zu jedem bodenkundlich relevanten Farbnamen ermittelt werden kann. Diese sollen damit für numerische Vergleiche nutzbar gemacht werden.

2 Methoden der Farbbestimmung

2.1 Regeln für die Farbbezeichnung in der KA4

Um die relative Vergleichbarkeit von Farbangaben zu gewährleisten, sind in der KA4 Regeln festgelegt. Zur Beschreibung sollen 13 Farben verwendet werden, die mit 8 Modifikatoren näher gekennzeichnet werden können. Alle Namen und Begriffe sind frei kombinierbar. Daher ist davon auszuge-

* Korrespondenz: C. Albrecht;
E-mail: christoph.albrecht@uni-bayreuth.de

J. Plant Nutr. Soil Sci. 2004, 167, 60–65

Tabelle 1: Farbbezeichnung nach KA4 (AG Boden, 1996, S. 106).
Table 1: Terms for soil color description used in the KA4 (AG Boden, 1996, p. 106).

Symbol	Bezeichnung	Symbol	Bezeichnung	Symbol	Bezeichnung
bl	blau	ro	rot	vi	violett
bn	braun	gr	grau	or	orange
ge	gelb	sw	schwarz	ol	oliv
gn	grün	we	weiß	tk	türkis
oc	ocker				
Zusätze vor Farbangabe					
h	hell	hh	sehr hell		
d	dunkel	dd	sehr dunkel		
le	leuchtend	fa	fahl	sm	schmutzig
Zusätze nach Farbangabe					
li	-lich, -stichig				

hen, dass alle mitteleuropäischen Böden mit diesem System beschrieben werden können.

Die KA4 sieht die in Tab. 1 genannten Farben, Bezeichnungen und Kürzel vor. Es können bis zu drei Farben kombiniert werden, wobei die letztgenannte die Hauptfarbe ist. Bei der Farbbestimmung mit dieser Methode beschreibt der Bearbeiter seinen visuellen Eindruck von der betrachteten Bodenprobe. Dabei werden teilweise zusätzliche Farbnamen verwendet, z. B. „rostfarben“ oder „beige“.

2.2 Das Munsell-Farbsystem

Der amerikanische Maler Albert H. Munsell entwickelte zu Beginn des 20. Jahrhunderts ein nach ihm benanntes System zur Beschreibung von Farben. Es teilt das Spektrum der sichtbaren Farben auf einem Kreis in 100 gleiche Teile, wobei jede Hauptfarbe (rot, gelb, grün, blau, purpur) und jede Übergangsfarbe je 10 Skalenanteile erhalten. Zusätzlich zu den Spektralfarben (bezeichnet als Hue) werden die Helligkeit (Value) und die Farbtintensität (Chroma) angegeben. Durch diese dreidimensionale Beschreibung wird jeder Farbe eine exakte Position in einem zylinderförmigen Farbraum zugewiesen.

Es gibt eine für bodenkundliche Belange angepasste Farbtafel, die einen Ausschnitt aus der Gesamttafel darstellt (Fuji-hara Industry Company, 1970). Sie enthält kleine Rechtecke mit Farbbeispielen zu ausgewählten Munsell-Codes. Weiterhin finden sich dort auch Tabellen mit zu den Munsell-Codes gehörenden Farbnamen aus Japan und den USA. Die Benennung von Bodenfarben im japanischen System, in den originalen *Munsell Soil Color Charts* und im Munsell-Standardfarbsystem (PCCS) unterscheidet sich teilweise erheblich.

Der richtige Munsell-Code wird bestimmt, indem eine angefeuchtete Bodenprobe neben die Farbplättchen gelegt wird oder indem die Farbtafel an das Bodenprofil gehalten wird.

Zuordnung des Munsell-Codes zu einem Farbnamen 61

Dann wird der Code derjenigen Farbe, die am wenigsten von der Bodenprobe abweicht, ausgewählt.

Neben dem Munsell-System existieren noch weitere Möglichkeiten zur Codierung von Farben. Dazu zählen unter anderem das RGB-System (Angabe des Rot-, Grün- und Blauanteils der Farbe, subtraktive Farbmischung), das HSV-System (Angabe von Farbwert, Sättigung und Helligkeit) oder das CMY-System (Angabe des Cyan-, Magenta- und Yellow-Anteils der Farbe, additive Farbmischung) (Hake und Grünreich, 1994). Diese haben aber innerhalb der Bodenkunde keine Bedeutung.

2.3 Colormetrie

Wenn die Farbe sehr genau bestimmt werden soll, wird bei Bodenuntersuchungen ein Farbmessgerät verwendet. Dabei wird eine Bodenprobe mit einem definierten Licht bestrahlt. Von dem reflektierten Licht werden die Wellenlängen gemessen und daraus die Bodenfarben berechnet. Dieses Verfahren ist vor allem im Bereich der Kalibrierung von Bedeutung.

2.4 Methodenvergleich

Abbildung 1 zeigt einen schematischen Vergleich der vorgestellten Methoden. Die Farbmessung ist am genauesten und wenigsten subjektiv, wird aber wegen des hohen Aufwands am seltensten durchgeführt. Die Verwendung von Farbtafeln nimmt bei den genannten Kriterien eine Mittelstellung ein, während das KA4-System sehr häufig angewendet wird. Die sehr einfache Nutzung ist jedoch nur auf Kosten der Genauigkeit und Objektivität möglich.

Nur bei der Nutzung eines geeichten Farbmessgerätes kann die wirkliche Farbe einer Bodenprobe festgestellt werden. Die anderen beiden Methoden sind sehr fehleranfällig. Hauptursachen sind Belichtungsunterschiede, Verteilungsform und Art der Bodenoberfläche (Kuntze et al., 1994; Simonson, 1993). Die Benennung der Farben nach KA4 hängt auch vom subjektiven Befinden des Bearbeiters ab. Zudem ist zu beachten, dass sich die Farberkennung durch das menschliche Auge von Bearbeiter zu Bearbeiter unterscheidet, dass, speziell bei Männern, ein gewisser Grad an Farbblindheit nicht selten ist und dass es mit zunehmendem Alter eine Verschiebung der Farberkennung zum Gelb hin gibt (Melville und Atkinson, 1985). Außerdem kann häufig nicht der korrekte Munsell-Code bestimmt werden, weil in den üblichen bodenkundlichen Farbtafeln nicht der vollständige Munsell-Farbraum gezeigt wird.

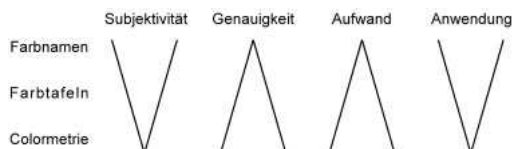


Abbildung 1: Vergleich der Methoden zur Farbbestimmung.
Figure 1: Comparison between different methods of soil color determination.

3 Bestimmung des mittleren Munsell-Codes

3.1 Grundannahme

Das KA4-System unterscheidet sich vom Munsell-System und den anderen in Abschnitt 2 genannten, weil es keinen standardisierten Farbraum beschreibt. Diese Standardisierung wird aber für die Umrechnungen von einem Farbraum in einen anderen benötigt. Um dieses Problem zu umgehen, wird hier Folgendes angenommen: Grundlage der Übertragung von einem Farbsystem in das andere ist der Farbraum, der mit Wellenlängen des sichtbaren Lichtes gekennzeichnet wird. Kleine, abgegrenzte Ausschnitte aus diesem Farbraum lassen sich sowohl mit Farbnamen als auch mit einer mehr oder weniger großen Menge von Munsell-Codes beschreiben. Das zeigt sich auch in den *Munsell Soil Color Charts*, wo verschiedene Codes mit dem gleichen Namen belegt sind. Wenn vorausgesetzt wird, dass Namen und Codes den gleichen Ausschnitt aus dem Farbraum der Wellenlängen kennzeichnen, kann zu einem „mittleren Farbnamen“, der einheitlich für den gewählten Ausschnitt aus dem Farbspektrum ist, der mittlere Munsell-Code, der als Mittelwert aus allen zugehörigen Codes darstellbar ist, bestimmt werden.

Es kann zu Überschneidungen, d. h. doppelten Zuordnungen von Codes zu verschiedenen Farbnamen, kommen. Wegen der Vielfalt an möglichen Namenskombinationen, die die Anzahl der vorhandenen Munsell-Codes deutlich übersteigt, lässt sich das nicht verhindern, besonders bei den Kombinationen aus rot, gelb und braun. Ohne Techniken der *fuzzy-Mathematik* zu nutzen, werden die Farben daher als unscharfe Mengen aufgefasst, wodurch die Exklusivität der Mengenzugehörigkeit hinfällig wird und es möglich ist, dass ein Element (hier: Farbcode) zu verschiedenen Mengen (hier: Farbnamen) gehört.

3.2 Methodik

Die Berechnung der mittleren Munsell-Codes zu den Farbnamen erfolgt in drei Schritten:

1. Zusammenstellung aller zu einem Namen gehörenden Codes aus verschiedenen Quellen,
2. Berechnung der Mittelwerte von Hue, Chroma und Value,
3. Vergleich der Ergebnisse mit realen Daten.

Die verwendeten Farbnamen sind zusammengestellt aus den Standardnamen (Tab. 1), den Farbnamen in den *Munsell Soil Color Charts* (*Fujihara Industry Company*, 1970) sowie den Namen der Vergleichsdaten, die dem Exkursionsführer der DBG-Tagung 1999 entnommen sind (*Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 1999). Zusätzlich werden Begriffe verwendet, die aus unterschiedlichen Übersetzungsmöglichkeiten von englischen Bezeichnungen resultieren (s. u.).

Als Quelle für die Munsell-Codes wird die *Munsell Soil Color Chart* verwendet. Die Angaben aus der in der KA4 (*AG Boden*, 1996, S. 106) veröffentlichten Tabelle können allenfalls als Anhaltspunkte genutzt werden, weil sie nur für Farben mit dem Value 5 gelten und nur eine geringe Anzahl an Farbnamen enthalten. Nicht verwendet werden die Daten aus dem Exkursionsführer, weil einerseits nicht bekannt ist, ob sie geeicht sind und weil sie andererseits später für den Test des Systems als unabhängige Daten zur Verfügung stehen sollen.

Die Berechnung des Mittelwerts von Hue, Value und Chroma ist problemlos möglich, weil der Hue-Wert in einer anderen Schreibweise einen Winkel im Farbzylinder angibt und der Munsell-Code somit die Zylinderkoordinaten einer Farbe repräsentiert. Entsprechend der üblichen Handhabung wird

Tabelle 2: Zuordnung von Munsell-Codes zu Farbnamen (Beispiele).
Table 2: Assignment of Munsell codes to color names (examples).

Farbname	Munsell-Codes	mittlerer Munsell-Code	Anmerkungen
bläulichdunkelgrau	5PB 4/1, 5PB 3/1, 5BG 4/1, 5BG 3/1, 5B 4/1, 5B 3/1, 10BG 4/1, 10BG 3/1	4B 3.5/1	abgeleitet aus bläulichgrau, niedrigerer Value
bläulichgrau	5PB 6/1, 5PB 5/1, 5BG 6/1, 5BG 5/1, 5B 6/1, 5B 5/1, 10BG 6/1, 10BG 5/1	4B 5.5/1	Farbbenennung wie im japanischen System, wie graubläulich
braun	7.5YR 5/4, 7.5YR 5/2, 10YR 5/3, 10YR 4/3	7.5YR 4/7	entsprechend KA4, S. 106 korrigiert
braungelb	10YR 6/8	10YR 6/8	
bräunlichgrau	7.5YR 6/1, 7.5YR 5/1, 7.5YR 4/1, 5YR 6/1, 5YR 5/1, 5YR 4/1, 10YR 6/1, 10YR 5/1, 10YR 4/1	7.5YR 5/1	Farbbenennung wie im japanischen System
bräunlichhellgrau	2.5Y 6/2	2.5Y 6/2	wie hell bräunlichgrau
dunkelgrau	N4, 5YR 4/1, 5Y 4/1, 10YR 4/1	10YR 4/1	
fahlgelb	5Y 8/4, 5Y 8/3, 5Y 7/4, 5Y 7/3, 2.5Y 8/4, 2.5Y 7/4	4Y 7.5/3.5	
hell bräunlichgrau	2.5Y 6/2	2.5Y 6/2	
schmutzigbraun	10YR 4/3	10YR 4/3	„dunkles fahlbraun“
sehr fahlbraun	10YR 8/4, 10YR 8/3, 10YR 7/4, 10YR 7/3	10YR 7.5/3.5	

der Winkel relativ zum Hue-Wert 5R angegeben (*Fujihara Industry Company*, 1970, S. 9). Wenn der Mittelwert in Widerspruch zu der Abbildung in der *Munsell Soil Color Chart* steht (z. B. bei der Ableitung von fahlen Farben aus anderen Farben), nicht den KA4-Vorgaben entspricht oder wenn es nicht begründbare doppelte Zuordnungen gibt, müssen Korrekturen vorgenommen werden. Dazu werden die Werte von Value, Chroma und selten Hue einzeln oder gleichzeitig geringfügig verändert. Wenn die Abbildung des neuen Codes in der *Munsell Soil Color Chart* mit dem Farbnamen übereinstimmt, wird der neue Code dem Farbnamen zugeordnet. Tabelle 2 enthält einen Ausschnitt aus der Liste der Farbnamen-zuordnungen.

3.3 Besonderheiten bei der Zuordnung von Farbnamen

Wie oben erwähnt, stehen nur englischsprachige Farbnamen aus den amerikanischen und japanischen bodenkundlichen Farbtafeln sowie aus dem PCCS-System zur Verfügung. Daher sind neben den Bedeutungsunterschieden die ungenauen Übersetzungen eine Fehlerquelle. Außerdem werden einige Begriffe nur in einer Sprache verwendet. Daher werden die folgenden Begriffspaare für die Übertragung der englischen Namen ins Deutsche gleich gesetzt: *dunkel fahl* und *schmutzig* sowie *ocker* und *gelbbraun*. Das englische Adjektiv *dusky* wird, abhängig vom Chroma, mit *dunkel* oder *dunkel grau* übersetzt. Wie unten dargestellt, werden Fehler durch die Mittelwertbildung meist vernachlässigbar klein.

In der Bodenkunde im englischsprachigen Raum wird die nach KA4 zulässige Form der Kombination von Farbnamen in nicht abgeschwächter Form (z. B. *rotbraun*) kaum verwendet. Dort wird die weniger dominante Farbe meistens mit dem Zusatz *-lich* versehen (z. B. *rötlichbraun*). Diesem sprachlichen Unterschied wird folgendermaßen Rechnung getragen:

- Bei der Kombination einer Farbe mit grau oder schwarz: Die Farbcodes mit höheren/niedrigeren Chroma-Werten werden der nicht abgeschwächten Form im Deutschen zugeordnet, die anderen Codes zur entsprechend wortwörtlich übersetzten Farbe. Wo das nicht möglich ist (z. B. *bläulichgrau/blaugrau*), werden Codes mit veränderten Chroma-Werten verwendet.
- Bei der Kombination einer Farbe mit einer anderen Farbe: Die Farbcodes mit höheren/niedrigeren Value-Werten werden der nicht abgeschwächten Form im Deutschen zugeordnet, die anderen Codes zur entsprechend wortwörtlich übersetzten Farbe. Wo das nicht möglich ist (z. B. *bräunlichgelb/braungelb*), werden Codes mit veränderten Value-Werten verwendet.

Es wird versucht, weitestgehend die übersetzten Farbnamen aus der *Munsell Soil Color Chart* zu nutzen. Das ist nicht immer möglich, weil sich die in Tab. 2 genannten Farben teilweise nicht in dem Munsell-System widerspiegeln. Dann wird der gesuchte Code aus bekannten Codes abgeleitet (beispielsweise ergibt sich *hell blaugrau* aus *blaugrau* mit höheren Values).

Farben, die die gleichen Wortkombinationen aufweisen, werden synonym behandelt, sofern es sich um eine Kombination

von zwei Farben handelt und eine der beiden Farben mit dem Nachsatz *-lich* versehen ist (z. B. (*hell*) *bläulichgrau*, *bläulich* (*hell*)*grau*, (*hell*) *graubläulich*, ...). Nach KA4 ist bei der Kombination von Namen immer die letztgenannte dominant. Wenn aber eine Farbe nur schwachen Einfluss hat (Zusatz *-lich*), kann sie im Vergleich zu der anderen genannten, unabhängig von ihrer Position im Namen, nicht wichtiger sein.

3.4 Umsetzung des Zuordnungssystems in einer Software

Die oben genannten Konzepte sind in einer in der plattformunabhängigen Sprache Tcl/Tk programmierten Software umgesetzt. Sie kann sowohl den mittleren Munsell-Code zu einem Farbnamen anzeigen als auch den Namen zu einem Code. Wenn das Programm mit einem Parameter aufgerufen wird, ermittelt es automatisch den Typ des Parameters (Name oder Munsell-Code) und gibt den jeweils anderen Wert zurück. Anderenfalls erscheint eine grafische Oberfläche, wo der Nutzer zur Eingabe einer Anfrage aufgefordert wird. Abbildung 2 zeigt einen Screenshot des Hauptfensters der Software. Sie ist unter der Adresse <http://www.geo.uni-bayreuth.de/~albrecht> frei verfügbar.

Die Munsell-Codes, zu denen der Name angezeigt wird, entsprechen in ihrem Umfang der *Munsell Soil Color Chart*. Andere Codes können nicht verarbeitet werden. Die zugehörigen Namen sind Übersetzungen der englischen Namen und werden in Deutsch und Englisch angegeben, wobei zwischen abgeschwächter und nicht abgeschwächter Form der Namenskombination unterschieden wird (siehe Abschnitt 3.3).

Wenn es nicht gelingt, den mittleren Munsell-Code zu einem Farbnamen anzuzeigen, werden folgende Möglichkeiten zur Lösung des Problems angeboten:

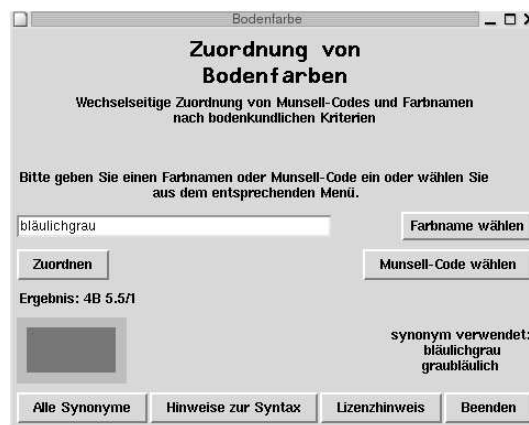


Abbildung 2: Screenshot des Hauptfensters der Software zur wechselseitigen Zuordnung von Farbname und Munsell-Code.

Figure 2: Screenshot of the main window of the software for mutual assignment of color names and Munsell codes.

1. Wenn der zugehörige Munsell-Code aus einer anderen Quelle bekannt ist, kann er eingegeben und in der Datenbank abgespeichert werden.
2. Aus der Datenbank kann eine ähnliche Farbe ausgewählt werden. Der Farbname kann mit dem Code der anderen Farbe abgespeichert werden.
3. Der Code kann von der Software ermittelt und in die Datenbank geschrieben werden.

Die automatische Suche ist in einem Standard- und einem Expertenmodus möglich. Zunächst wird der Farbname in seine einzelnen Bestandteile aufgeteilt. Farbbezeichnungen werden mit den Modifikatoren verrechnet, und anschließend wird das gewichtete Mittel der einzelnen Farben berechnet. Dabei werden Hue (ausgedrückt als Winkel auf dem Farbkreis), Value und Chroma getrennt betrachtet. Die Gewichte bilden eine geometrische Reihe, deren Glieder $(2^N/2^n)/2^{N-1}$ sind und sich zu 1 aufsummieren. Dabei ist N die Gesamtzahl der Farbbezeichnungen im Suchbegriff und n die Position im Suchbegriff. Da in umgekehrter Reihenfolge gezählt wird, wird die letztgenannte Farbe zur Hauptfarbe. Die beiden folgenden Tab. 3 und 4 zeigen die Munsell-Codes, die die Basis der Berechnungen bilden, sowie die durch die Modifikatoren bedingten Veränderungen. Im Expertenmodus ist es möglich, alle Parameter frei zu wählen und die Wichtung der einzelnen Farben zu verändern. Das Vorgehen wird beispielhaft an der Ermittlung des Munsell-Codes der Farbe *gelblich-dunkelbraungrau* gezeigt.

1. Aufteilung des Farbnamens in die einzelnen Bestandteile
2. Zuordnung der Munsell-Codes der Grundfarben
gelb: 2.5Y 7.5/7, braun: 9YR 4/6, grau: N5
3. Zuordnung der Veränderungen der Modifikatoren
-lich: Chroma -1, dunkel: Value -1.5
4. Verrechnung der Modifikatoren mit den Munsell-Codes
gelblich: 2.5Y 7.5/6, dunkelbraun: 9YR 2.5/6
5. Umwandlung der Hues in Winkel
gelblich: H 81, V 7.5, C 6, dunkelbraun: H 68.4, V 2.5, C 6, grau: H -, V 5, C 0
6. Zuordnung der Gewichte
gelblich: 1, dunkelbraun: 2, grau: 4
7. Berechnung des gewichteten Mittels (da der Munsell-Code von *grau* (N5) keine Winkel-Angabe beinhaltet, werden unterschiedliche Gewichte für die Berechnung des Hue- bzw. des Value- und Chroma-Wertes verwendet)
Hue: $81 \times 1/3 + 68.4 \times 2/3 = 72.6$
Value: $7.5 \times 1/7 + 2.5 \times 2/7 + 5 \times 4/7 = 4.6$
Chroma: $6 \times 1/7 + 6 \times 2/7 + 0 \times 4/7 = 2.6$
8. Umwandlung des Winkels in einen Hue-Wert, Rundung des Value- und Chroma-Wertes
0.5Y 4.5/2.5

Tabelle 3: Munsell-Codes der Grundfarben für die automatische Zuordnung eines Munsell-Codes zu einem Farbnamen.

Table 3: Munsell codes of the basic colors, as used by the automatic assignment of Munsell codes to color names.

Farbe	Munsell-Code	Farbe	Munsell-Code	Farbe	Munsell-Code
blau	5B 6/7	braun	7.5YR 4/7	gelb	2.5Y 7.5/7
grün	5G 6/7	rot	7.5R 4/7	grau	N 5
schwarz	N 1.5	weiß	N 9	violett	5P 5.5/4.5
orange	5YR 6.5/7	oliv	5Y 4.5/5	türkis	5BG 6/7
ocker	2.5Y 5/6				

Tabelle 4: Einfluss der Modifikatoren bei der automatischen Zuordnung eines Munsell-Codes zu einem Farbnamen.

Table 4: Influence of modifications to the colors, as used by the automatic assignment of Munsell codes to color names.

Modifikator	Veränderung des Value-Wertes	Veränderung des Chroma-Wertes
hell	1.5	0
dunkel	-1.5	0
leuchtend	0	1.5
fahl	0	-2
schmutzig	-1	-1.5
-lich	0	-1
-stichig	0	-1

3.5 Qualität des Zuordnungssystems

Anhand von 184 Datensätzen, bei denen Farbname und Munsell-Code angegeben sind, wurde die Genauigkeit der Ermittlung des Munsell-Codes überprüft. Die Angaben wurden dem Exkursionsführer der DBG-Tagung 1999 entnommen (*Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 1999). Dabei wurde zuerst die Abweichung der tatsächlichen Codes von den mittleren Codes ermittelt. Es ergab sich eine insgesamt gute Übereinstimmung. Die Mittelwerte der Abweichung von Hue, Value und Chroma liegen nahezu bei 0, die mittlere absolute Abweichung ist beim Hue etwa 2, beim Value etwa 0,6 und beim Chroma etwa 1. Das entspricht fast immer einer Abweichung von weniger als 10% (Tab. 5). Als Basis für die Berechnung des relativen Fehlers wurde 100, 9 und 5 für Hue, Value und Chroma gewählt, wobei der letztgenannte dem mittleren maximal gezeigten Chroma-Wert in den zentralen Farbtafeln 7.5R bis 5Y entspricht. Da der Chroma-Wert in Abhängigkeit von Hue und Value zwischen 2 und 12 schwankt, kann in vielen Fällen eine höhere Genauigkeit angenommen werden.

Die Abweichung bei den mit der automatischen Suche ermittelten Werten ist nur unwesentlich größer (Tab. 6). Für die Relativangaben gilt das gleiche wie oben.

Zu beachten ist, dass einige Angaben in den Referenzdaten kritisch zu hinterfragen sind. Beispielsweise wurde der Farbe „sehr dunkelbraun“ der Munsell-Code 7.5YR 5/8 zugeordnet (nach KA4, S. 106 ein „leuchtendes braun“).

Tabelle 5: Vergleich der mittleren Munsell-Codes mit den Referenzdaten.

Table 5: Comparison between the central Munsell codes and the reference data.

	Hue	Value	Chroma
mittlere Abweichung	0.1 Einheiten (< 1 %)	0.2 Einheiten (2 %)	0.3 Einheiten (6 %)
mittlere absolute Abweichung	2.0 Einheiten (2 %)	0.6 Einheiten (7 %)	1.0 Einheiten (20 %)

Tabelle 6: Vergleich der automatisch ermittelten Munsell-Codes mit den Referenzdaten.

Table 6: Comparison between automatically determined Munsell codes and the reference data.

	Hue	Value	Chroma
mittlere Abweichung	0.3 Einheiten (< 1 %)	0.0 Einheiten (0 %)	0.6 Einheiten (12 %)
mittlere absolute Abweichung	1.8 Einheiten (2 %)	0.8 Einheiten (9 %)	1.4 Einheiten (28 %)

4 Verwendung der ermittelten Munsell-Codes

Mit dem vorliegenden System lassen sich plausible Munsell-Codes aus Farbnamen ermitteln. Trotzdem handelt es sich um Mittelwerte, die bei der weiteren Verwendung auch als solche behandelt werden sollten. Die genaue Bestimmung des Munsell-Codes der Bodenprobe kann nicht ersetzt werden. Die ermittelten Werte stellen nicht das Ergebnis einer genauen „Übersetzung“ vom KA4- zum Munsell-System dar. Ein solcher Vorgang ist aus den oben genannten Gründen

nicht möglich. Die ermittelten Munsell-Codes sollten als Hilfsgrößen für weitere Nutzungen von Bodendaten, vorzugsweise in *fuzzy*-Systemen, aufgefasst werden.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wird von der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* finanziell unterstützt (Projekt Hu 636/8–1).

Literatur

- AG Boden (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4). Schweizerbart, Stuttgart, 392 S.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (Hrsg.)(1999): Exkursionsführer, Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Hannover, 1999. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 90, 490 S.
- Fujihara Industry Company (1970): Standard Soil Color Charts. Fujihara Industry Company, Tokio, 88 p.
- Hake, G., und D. Grünreich (1994): Kartographie. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 600 S.
- Kuntze, H., G. Roeschmann und G. Schwerdtfeger (1994): Bodenkunde. Ulmer, Stuttgart, 424 S.
- Melville, M. D., and G. Atkinson (1985): Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space. J. Soil Sci. 36, 495–512.
- Schröder, D. (1983): Bodenkunde in Stichworten. Hirt, Unterägeri, 160 S.
- Simonsen, R. W. (1993): Soil color standards and terms for field use – history of their development, in J. M. Bigham und E. J. Ciolkosz (eds): Soil Color. Soil Science Society of America, Madison, p. 1–20.

Kapitel 8

Anwendung des FKME

In der vorliegenden Form eingereicht bei der Zeitschrift Geoderma als: C. Albrecht, K. Schultz und B. Huwe: Potential and limitations of applying a fuzzy soil classification method to the German soil systematic. Die folgenden Seiten enthalten das eingereichte Manuskript.

Potential and Limitations of Applying a Fuzzy Soil Classification Method to the German Soil Systematic

Christoph Albrecht^{a*}, Karsten Schulz^b, Bernd Huwe^a

^a*Soil Physics Group, University of Bayreuth, D-95440 Bayreuth, Germany*

^b*Department of Applied Landscape Ecology, Centre of Environmental Research (UFZ), Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, Germany.*

Abstract

Fuzzy clustering methods have recently been successfully applied to soil data. The potential of the FKME (fuzzy-k-means with extragrades) method to establish an automated identification system for the German Soil Systematic (GSS) is here investigated. Based on practical needs only general available data sets and soil information are used. Several strategies including the direct definition of soil profiles, the clustering of soil profile data and the clustering of soil horizon data are tested. While all strategies failed, three main limitations could be identified: a) insufficient data quality of standard soil surveys based on the GSS, b) the structure of the GSS being unsuitable to be combined with the FKME and, c) the inability to model specific soil morphological phenomena within the FKME. This mismatch between the descriptive nature of the GSS and the requirements of automated fuzzy classification systems suggests future changes in the GSS towards more stringent quantitative attributes.

* Corresponding author. Tel. ++49-(0)921-552193, fax: . ++49-(0)921-552246

Email addresses: christoph.albrecht@uni-bayreuth.de (Christoph Albrecht), kschulz@ufz.de (Karsten Schulz), bernd.huwe@uni-bayreuth.de (Bernd Huwe)

1. Introduction

The current trend in soil science is a combination of expert knowledge with the calculating capacity of computers (McBratney et al., 2000, 2003). Quantitative methods developed for soil survey are termed *pedometrics*, which describes the fast growing branch of soil science dealing with related mathematical approaches (McBratney et al., 2000). Automated quantification in soil science is a logical result of the increasing use of computers in the geosciences with their advantage being the ability to easily process large amounts of data. It is also an apparent sign for the trend to simplify, automate and most importantly integrate the processes of data mining, data evaluation, and data interpretation into a coherent and easily accessed data system.

One important group of pedometric techniques comprises numerical soil classifications. Most of them have a limited spatial and/or thematic validity. The former indicates that soil samples are taken within a small area with a high density of sampling points. The classification results pertaining to the soil information are only thus valid for that specific investigation area. The disadvantage being that any transfer of information (e.g. for up-scaling and regionalization) to another area would require new sampling, while the advantage to the approach is the accurate information it provides (e.g. for precision agriculture). Excellent examples for this approach were published by De Gruijter et al. (1997) who developed a high resolution continuous soil map for a 1200 ha area or by Odeh et al. (1992b) who classified soils along two transects in southern Australia.

The term 'limited thematic validity' describes the fact that most classifications use only a few key variables, such as the concentration of heavy metals (Markus and McBratney, 1996), the occurrence of specific soil horizons (McBratney and de Gruijter, 1992) or the description of soil horizons with twelve soil chemical and textural parameters (Triantafyllis et al., 2001).

Only two approaches currently serve as allocation schemes for a general soil classification. They are the 'Fuzzy allocation scheme for the Australian Great Soil Groups Classification system' by Mazaheri et al. (1995a) and the 'Expert System for Soil Taxonomy' by Galbraith et al. (1998). The former takes into account all Australian Great Soil Groups (AGSG) and is based on a fuzzy clustering algorithm, which will be more thoroughly described in chapter 2.2. The latter is a pilot study to identify four soil orders from the US Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1998). The software implementation is done with decision trees and added expert rules.

In Germany, a morphogenetic soil systematic is used to categorize and order soil types (German Soil Systematics, GSS) often leading to large ambiguities in the soil identification even under experts (Albrecht et al., 2005b). These problems during the practical application are mainly caused by the descriptive (and not deterministic) character of the definitions (see also chapter 2.1). In order to at least partly improve this situation, our research investigates the potential of applying an automated Classification System to the GSS.

While computerised approaches such as those based on a cluster analysis, neural networks, or other forms of expert systems all require data, we did not attempt to develop optimal data acquisition and information categorizing strategies. We rather built on currently available soil databases from German federal and regional institutions reflecting the information usually considered and provided by soil surveyors. Our research is driven by two questions:

1. Are the data provided by standard soil surveys sufficient to establish an automatic soil identification system thereon?
2. Does the available data reflect the arrangement of soils in groups as intended by the GSS?

In regards to the excellent approach developed by Mazaheri et al. (1995a) we decided to adapt the Australian Soil Identification Spreadsheet (ASIS) for use with the GSS. The reasons for our decision were:

- Good representation of the continuity of the pedosphere through the use of fuzzy sets,
- Handy application with only a few easily observed variables,
- Easily adaptable to the GSS through straightforward underlying mathematical methods and through the quick editing of an existing spreadsheet with the source code of the application (Mazaheri et al., 1995b).

In the following, we first describe the fundamentals of the German Soil Systematic, the mathematical background of the automated classification algorithm used and soil attributes including their quantitative criteria (Section 2). Section 3 shows the results of the algorithm application, which will be discussed in Section 4.

2. Materials and Methods

2.1 Fundamentals of the German Soil Systematic (GSS)

The GSS is based on the work of Kubiena (1953) and was initially developed by Prof. Eduard Mückenhausen. The first complete systematic was first published in 1962 with an expanded version following 15 years later (Mückenhausen, 1977). Since then several updates have been published. The most recent version was released in 1998 (Arbeitskreis Bodensystematik, 1998).

The soils are ordered in a hierarchy of six levels. The highest level is termed '*Bodenabteilungen*' (Soil Orders) followed by '*Bodenklassen*' (Soil Suborders) where the soils are distinguished by their percolation regime or by their progress of genesis and by morphologic characteristics, respectively. The next level in the hierarchy comprise the '*Bodentypen*' (Soil Types) which are distinguished by characteristic soil horizons and soil sequences. The intergrades between the types and variations are described with '*Bodensubtypen*' (Soil Subtypes). The subordinated '*Bodenvarietäten*' (Soil Varieties) and even further subordinated '*Bodensubvarietäten*' (Soil Subvarieties) are the last two levels in the hierarchy which use further qualitative and quantitative criteria for a more exact designation of the soils. In general, the type or the subtype is determined when a soil identification is accomplished with the GSS.

The identification is completed in two distinct steps. At first the single horizons are classified. Afterwards the unit of the soil systematic is derived from the horizon sequence when the thickness of diagnostic horizons is taken into consideration.

As stated above, the GSS is a morphogenetic ordering scheme. Information on the soil forming processes and the soil forming factors is not only used for a general soil description, but is also an integral part of the soil horizon definition. This definition is typically bifocal with information regarding the genesis and some statements on selected properties. The later is intended to aid in preventing misclassifications. A typical example is the definition of the podsollic topsoil horizon, with the nomenclature *Ae: a mineral topsoil horizon characterized by humus depletion,, bleached*

by acids, stamped by podsolization, typically possessing a Munsell value of 4/ or higher and a ratio between value and chroma 2.5 or higher, typically lying above an illuvial horizon. These somewhat vague or imprecise soil descriptions are certain to lead to practical problems during identification. There is often a 'mostly' or a 'normally' or a 'typically' modifier bound in the definitions. Thus, each soil surveyor has a large degree of freedom in making their decisions on whether a soil characteristic is important or not and the identification of the pedogenetic processes has higher precedence than the recognition of specific properties. This approach leads to difficulties during the practical application. Each soil surveyor designates subjectively the influence of the different pedogenetic processes, especially since no scale exists to verify one surveyors view (nor can one currently be realistically created). To put this problem in a practical perspective, if a single soil profile were to be identified by two or more soil surveyors the odds are very good that two or more *reasonable* results would be attained. This situation arises so often that it is expected that two professionals arrive at two contrasting conclusions and most astonishingly, that both are "correct", which naturally often leads to an energetic and often heated discussion concerning their contrasting conclusions. Therefore, each and every soil identification and derived products – such as soil maps – are (from a theoretical viewpoint) hypothetical, uncertain and somewhat imprecise. One striking consequence is the decreasing use of conventional soil maps within modern applications, such as for the designation of soil functions (Albrecht et al., 2005a).

The soils in Germany are usually described with additional information which pertains to the soil forming substrate. This specification comprises of data like soil texture, parent material, primary carbonate content, etc. The fields sometimes partly overlap with the decisive variables of the Soil Systematics. Following the arguments of Altermann and Kühn (1999) it is somewhat possible to simplify the German Soil Systematics when these overlaps are resolved. During our research we merged a few soil types which only differed in substrate information in order to simplify the whole allocation system. The proposed changes are as follows:

- *Felshumusboden* (craggy humic soil) and *Skeletthumusboden* (residual structured parent material humic soil) differ only in the residual structured parent material in the overlying humus horizon and are treated as equal in the allocation system.
- *Syrosem* and *Lockersyrosem* are equal except for the cohesion of the parent material which allows the merging of the two.
- The following pairs *Tschernosem/Kalktschernosem*, *Paternalia/Kalkpaternalia*, and *Kleimarsch/Kalkmarsch* are grouped together due to their similarity, their only differing aspects dealing with their primary carbonate content.
- *Ranker*, *Rendzina*, *Regosol*, *Pararendzina* all possess the same soil horizon sequence but differ in their cohesion and their carbonate content, both in respect to the parent material. They are thus merged into one group.

2.2 Fundamental Algorithm

The mathematical approach underlying ASIS and our approach is based on the fuzzy-c-means algorithm or FCM (Bezdek, 1981), which is a clustering algorithm that is widely used. It allows the partition of a set of individuals into overlapping classes. The FCM provides a good perspective

view on data representing continuous issues. The objects lying between the prototypes, otherwise known as intergrades, may belong to a class either partly, fully, or not at all.

De Gruijter and McBratney (1988) introduced a major modification when they extended the algorithm with an extragrade class. They replaced the c with a k and called it the fuzzy- k -means with extragrades or FKME. As the name states the extragrade class is used to collect objects which lie outside the main body of data points. This collection reduces the influence of outliers to the result.

The FKME minimizes the within-class sum of square errors function

$$J(Z, M, K) = \alpha \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k m_{ik}^u d_{ik}^2 + (1-\alpha) \sum_{i=1}^n m_{i*} \sum_{j=1}^k d_{ik}^2 \quad (1)$$

with the convention that the second term on the right-hand side in formula 1 equals zero if both

m_i and d_{ik} are zero. The individual variables and components of the equation are defined as

Z $n \times p$ - matrix of the properties of the individuals with n representing the number of individuals and p representing the number of parameters

M $n \times k$ -matrix of the membership of the individuals to the class centres with k representing the number of class centres

K $k \times p$ -matrix of the properties of the class centres

m_{ik} membership of individual i to class k , $m_{ik} \in [0, 1]$

m_{i*} membership of individual i to the extragrade class

d_{ik}^2 square distance between individual i and class centre k according to a chosen definition of distance (see below)

φ degree of fuzziness, $\varphi \in [1, \infty)$

α contribution of the extragrade class, $\alpha \in [0, 0.5]$

The memberships and the class centres are calculated with

$$m_{ik} = \frac{d_{ik}^{-2/(u-1)}}{d_{ij}^{-2/(u-1)} + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} d_{ij}^{-2} \right)^{-1/(u-1)}} \quad i = 1, \dots, n; c = 1, \dots, k \quad (2)$$

$$m_{i*} = \frac{\left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \sum d_{ij}^{-2} \right)^{-1/(u-1)}}{\sum d_{ij}^{-2/(u-1)} + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \sum d_{ij}^{-2} \right)^{-1/(u-1)}} \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$k_k = \frac{\left\{ m_{ik} - \frac{1-\alpha}{\alpha} d_{ij}^{-4} m_{ik} \right\} x_i}{\left\{ m_{ik} - \frac{1-\alpha}{\alpha} d_{ij}^{-4} m_{ik} \right\}} \quad c = 1, \dots, k. \quad (4)$$

Taking these equations the FKME is accomplished in the following sequence (De Gruijter and

McBratney, 1988).

1. Select a definition of the distance in the variable-space and select a value for k , for ϕ , and for the stopping criterion ϵ .
2. Initialise the matrix $M=M^0$ with any values, e.g. random memberships.
3. At iteration $l = 1, 2, 3, \dots$: (re)calculate $K = K^l$ using equation (4) and M^{l-1} .
4. Recalculate $M = M^l$ using equations (2) and (3) and the matrix K^l .
5. Compare M^l to M^{l-1} in a convenient matrix norm. If $\|M^l - M^{l-1}\| \leq \epsilon$, then stop; otherwise return to step 3.

There exist a large number of indexes describing the quality of fuzzy cluster analyses (e.g. Odeh et al., 1992a, Triantafilis et al., 2003). We chose the confusion index CI (Burrough et al., 1997) to characterize the arrangement of soils into distinct groups. The CI is defined as follows:

$$CI = \left[1 - \left(\mu_{\max_i} - \mu_{(\max-1)_i} \right) \right] \quad (5)$$

μ_{\max_i} is the maximum membership of element i to one cluster, and $\mu_{(\max-1)_i}$ is the second-largest membership value of the same element. The relationship shows that the allocation of the element to only one cluster improves with any decrease in the CI. Since the CI is defined for one cluster, we take into account all indexes of one clustering at the same time.

The distance d , usually given as norm, must be chosen according to the structure of the investigated data. Frequently, the Euclidian distance is applied. The main drawback of this metric is the insensitivity to statistical dependent variables and the equal weight given to all measured variables (De Gruijter and McBratney, 1988). These two facts contradict the structure of soil data. Therefore the better choice for our work is the Mahalanobis distance accounting for correlations among the variables. Odeh et al. (1992b) discuss in detail the choice of the distance metric in a soil science background. Gao and Xie (2000) provide further information on the topic.

Mazaheri et al. (1995a) applied a modified version of the algorithm. They directly filled the matrix K of the class centres. Calculating only m_{ik} and m_{i*} , they performed a discriminate analysis in fact. We will also investigate the practicability of this approach.

The FKME is no approach providing optimal results in either case. Some criticism concerning the FCM can be carried forward:

- The function $J(Z, M, K)$ (Equation 1) is not convex and can have several local minima. Thus, the algorithm can have different results for different initialisations of M (Groenen, 2001). One solution of the problem are multiple runnings with changing initialisations (as implemented in the software FuzME (Minasny and McBratney, 2002). Zahid et al. (2001) propose the incorporation of a next-neighbour-algorithm to detect global or local minima.
- There exist no instruction for choosing the optimal exponent ϕ (degree of fuzziness) (Ahn et al., 1999) in spite of the strong influence on the classification result (Bezdek, 1981, Grunwald et al., 2001, De Bruin et al., 1998). Some authors give recommendations (e.g. Burrough et al., 1997, Gao and Xi, 2000), but the value must be chosen empirical or by "trial-and-error".
- All elements in the matrices M , X and K are summarised. This means, all matrices must be filled completely and the algorithm is very vulnerable for missing values.
- The membership values are relative numbers with regard to the data set. This could lead to

serious problems while generating membership functions from training data (Ménard et al., 2000).

3.3 Data Sets

Mazaheri et al. (1995a) filled the matrix K with information out of a collection of Australian soil profile descriptions (Stace et al., 1968). In Germany, there exists a comparable textbook (Mückenhausen, 1977), nevertheless it may not be used as the basis for our work for the following reasons. Firstly, it does not contain enough sample soil profiles incorporating all main soil subtypes. Secondly, it describes the soils with too few variables. Thirdly, the soils are classified with a key which is no longer in use.

Therefore other soil data had to be used with the premise of wide ranging spatial representation. We used two different kinds of data. The first source was collected from several German excursion guides (DBG, 1991, 1993, 1995, 1997, 1999, 2001) and will be called excursion data. The data set comprises of 396 soil profiles with a total of 2652 horizons. The data offers a wide range of common soil information together with physical and chemical parameters.

The second source of soil data came from the data bases of the regional soil information systems in Germany (administration data). They were kindly provided by the Soil Survey Staff of the German federal states Lower Saxony (NLfB) and Baden-Wuerttemberg (LGRB) and the German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR). These data sets represent the current German standard with regard to availability and quality of soil information. There exist more comparable soil data bases in Germany. The data sets analysed here can be taken as representative examples. A total of 933 data sets were made available for the research. They are very heterogeneous concerning both the data format and the number of parameters. Table 1 provides an overview of the data and their structure.

The data sets were prepared for querying by merging the single tables into one file for profile and horizon data, respectively. During the development of the classification system these new files were searched automatically for the parameters (see next section) according to the system requirements.

3.4 Soil Attributes and their Quantitative Criteria

Initially, we attempted to use the same soil attributes for the modelling as Mazaheri et al. (1995a). Taking into account the differences between the GSS and the AGSG, this approach was unfortunately not feasible.

We developed a new set of attributes which had to fulfil two main requirements; 1) a good representation of the German soil classification units and 2) a good availability in the soil data bases. To accomplish the first requirement we searched the German Handbook for Soil Mapping (*Bodenkundliche Kartieranleitung* (Arbeitsgemeinschaft Boden, 1996)) for diagnostic properties. Since the GSS is morphogenetic, the definitions of the classification units emphasize pedogenetic processes and not diagnostic properties. Additionally, most quantitative information is weakened with words like 'mostly', 'often', 'normally', or 'typically'. Therefore only a few attributes could be applied directly. Classification units often had to be described with the binary variable 'occurrence of process x ' instead of with measurable attributes.

The second requirement dealing with the soil attributes strongly shortened the set of attributes. The

only information almost always available was the name of the classification unit, the names of the horizons, and the depth of the horizons. Other important attributes like colour, clay content, or mottling were sporadically present. The need for the consideration of the data availability stems from two ideas. On the one hand, the classification system should be used as a form of quality assurance for soil data bases. Therefore it should be adjusted to the real available data. On the other hand the soil data bases exist as a result of daily scientific work. They reflect the intensity of data mining. The application of rarely recorded attributes is disadvantageous when considering the practical needs of the identification system.

The attribute sets for profile and horizon classification differ. That is because soil profiles have a general definition which leaves space for short range variations of soil attributes. The descriptions of soil horizons on the other hand are much more detailed and contain specific information on soil properties which nevertheless are not important for the allocation of a soil profile. It is not possible to allocate all soil horizons with the set of attributes used in our research. The soil types developed under direct anthropogenic influence were not studied due to their minor occurrence in data bases with the exception of plaggen horizons.

The attributes used for the development of the system are shown in tables 2 and 3 for the profiles and the horizons, respectively. The parameter set for soil profile classification depends on the method applied to the data. The differences will be explained in chapter 3.2.

The soil colour is usually given as Munsell code. For numerical analyses, it must be converted to CIE Lab coordinates in order to provide more uniformity of scale. Melville and Atkinson (1985) provided a method for conversion, Mazaheri et al. (1995) describe the method in detail with an example.

A large number of soil data sets does not contain the Munsell code but only the name of the soil colour. Albrecht et al. (2004) developed a method to assign the mean Munsell code to a colour name in order to make these data sets applicable for computerised methods. All codes connected with a name were collected, the mean code were determined by taking the mean value of all hues, values and chromas, separately. Thus, the mean grey is assessed as 9YR 5.5/1 out of the single codes N6, N5, 5YR 6/1, 5YR 5/1, 5Y 5/1 and 10YR 5/1.

4. Results

4.1 Comparison of the Data Sets

The first step of our research was to detect the suitability of the data sets for the statistical methods. The results are summarized in Table 4. Unfortunately, the values shown in the table are not optimal. The main observation is that no data set possesses all the information required by the GSS definitions. The excursion data seems best suited for the analysis. For the discriminate analyses the data sets 'NLfB' and 'BGR II' hold the highest number of parameters. Nevertheless, we did not apply the analysis on these two data sets because they are not classified according to the common GSS but rather according to a local key derived from the GSS. This fact applies to the LGRB data set as well. The local keys are not fully comparable to the common GSS. The clustering of the three data sets would lead to results which would be useful and interesting but unfortunately not universally applicable.

The mean percentage assignment of diagnostic parameter fields violates the condition that every parameter must be known for the application of the FKME algorithm. The LGRB data sets are relatively good but nevertheless possess many missing parameters. Altogether the excursion data set is the best data base in terms of quality and completeness.

We decided to derive some information from the soil horizon names in order to make the data applicable. This action became necessary although it is not consistent with the goals of our research. We only selected parameters which do not occur in the parameter field of the data. Additionally, their ascertainment in the field must be easy and unambiguous. Finally, we chose the parameters secondary carbonate, influence of groundwater, soil cultivation, location on unchanged parent material, plaggen epipedon and the horizons attributed in table 3.

4.2 Soil types

Following the work of Mazaheri et al. (1995a) we first developed a matrix K for soil profile allocation. We concentrated on the detection of soil types due to the data situation (see chapter 2.3). The level of soil types is not the level we planned to work with since it aggregates information from the level of soil subtypes. Nevertheless, the data demands are much easier to meet. Table 5 shows some exemplary definitions. The parameter set is developed concerning the minimum requirements in order to characterize soils without dominant anthropogenic influence. Certainly this selection could become the subject of criticism, yet we debated that any further development would not be useful. The solution of problems for one certain soil type would entail problems with other soil types.

During the composition of the definitions we noticed some inconsistencies which will be shown with two examples:

- The subsoil clay content is a diagnostic variable for the *Pelosol*. The definition in the GSS is 'at least 45% clay'. Therefore the given value of 55% could be false in several cases. The subsoil clay content of other soil types like *Braunerde*, *Podsol* or *Gley* is a mean value derived from the data sets. The value fluctuates widely and is a reason for the misallocation of existing soils. The soil types are not classified with respect to their clay content, but rather with respect to other parameters.
- The occurrence of secondary carbonate is diagnostic for the *Kalktschernosem* on the level of soil types. Other soil types like *Braunerde*, *Pseudogley* or *Gley* have subtypes with secondary carbonate which make it impossible to determine the intensity of the variable.

The specification of several variables is done to meet the values in the data sets as best as possible. This leads to partially satisfying results but also results in an over-fitting of the method. Further unsolved problems are the handling of layered and buried soils with topsoil properties in the subsoil and the soil identification according to the thickness of diagnostic horizons.

The next approach was to fill the matrix C automatically with a cluster analysis. Our goal was to find a logical structure within the data set and to eliminate the influence of misidentifications by experts. We clustered the data with the FKME-algorithm (De Gruijter and McBratney, 1988) with random start (5 trials) using the Mahalanobis distance. The α - values were fixed to 0.2 in order to allow a moderate influence of the extragrade class. The number of classes and ϕ were changed, the

former in increments of 1 from 20 to 30, the latter in increments of 0.1 from 1.1 to 1.9. The sample data set used for the cluster analysis was extracted from the excursion data. The data set is comprised of 124 records with 27 defined soil types. The soil types occur both in their typical form as well as in different combinations. We used the software FuzME (Minasny and McBratney, 2002) for the computation of the results.

We show the behaviour of the method with two examples. We chose the *Parabraunerde* and the *Gley* soil types with 7 and 3 occurrences in the data set, respectively. Both soil types are significantly different since the *Parabraunerde* is characterized by clay removal from the topsoil and the *Gley* is dominated by the influence of groundwater. We expected both soil types to be merged into one group each.

Figure 1 summarizes the results. The *Gley* soils (GGn 1-3) are always arranged into 3 groups, which indicates that every sample is allocated to a different cluster. The *Parabraunerde* soils (LLn 1-7) are partly grouped together (LLn 3/4 and LLn 5/6). If 30 classes are assumed, all LLn appear in different clusters. One *Gley* (GGn 1) and one *Parabraunerde* (LLn 7) partly fall together into one group. The confusion indexes almost always remain very low ($CI < 0.1$). If we compare the result with the supposition of establishing two groups only, the result is poor.

The figure assumes that for the given parameter constellation the number of 25 clusters is insignificant approximated to our expectations. Here, the minimum number of clusters occurs (8) and both soil types are separated. The values in Table 6 show the local character of this optimum. The *Gley* soils are grouped together with many other soil types. These types are only partly similar. We do not want to go into the details of the GSS and its nomenclature because we think the differences in the letters adequately display the heterogeneity of the clusters.

4.3 Soil Horizons

Taking into account the results from the soil subtype examination we attempted to cluster only the soil horizon data. The data for the clustering was extracted from the excursion data set. We were able to use only complete horizons, which meant that no parameter from table 3 remained empty. Only 174 of the 2652 recordings in the data set fulfilled this condition. The data set for clustering comprised of 26 'normal' horizons and 17 transition horizons (horizons dominated by multiple pedogenetic processes). The settings for the soil horizon clustering were equal to the settings for the soil type clustering (see chapter 3.2)

The variation of φ resulted in a fast change from nearly crisp partitioning ($\varphi = 1.1$) to equally distributed memberships (every horizon has the same membership to every cluster centre at $\varphi \geq 1.5$). The variation of the number of classes led to partially deviating assignments but did not change the clusters in principle.

The results of the clustering process are summarized in Tables 7, 8 and 9. We only show examples of the results for $\varphi = 1.3$ with 20, 27 and 30 classes. The membership of the extragrade class is always 0.0. The cluster names in table 9 are not comparable to the cluster names in the other two tables since we changed the names for better visualization.

Most of the 'normal' horizons are grouped into one cluster each. Unfortunately, this clustering holds true only for horizons with few examples in the data set. If the number of samples increases, then the number of clusters with allocations from the horizon also increases. The data set is too small to

determine whether these examples are singularities or if every horizon would be allocated to several clusters in the case of many occurrences. The confusion indexes remain small with only a few exceptions. This result indicates that the horizons are divided into distinct groups.

The allocation of transition horizons (table 8) is sub optimal. The allocation to cluster centres is similar to the allocation of 'normal' horizons with partly higher confusion indexes. We expected more ambiguous allocations and higher values for the CI because the transition horizons should lie between the 'normal' horizons.

If the number of classes is low, the transition horizons are allocated as expected, but the grouping of 'normal' horizons is false to some extent. The increasing number of classes leads to specific clusters for transition horizons which is also unintentional.

The summary in table 9 assists the last proposition. Some clusters are divided with an increasing number of classes, yet without any logical new groups evolving. Partly the transition horizons are merged in a group (e.g. clusters a and h) or 'normal' horizons are taken out of a cluster (e.g. cluster c). Most clusters are stable, this stability indicates that the composition does not change. The cluster composition remains heterogeneous. Some clusters consist of only one horizon or very similar horizons (e.g. cluster k and o). Some clusters combine horizons stamped by the same pedogenetic process (e.g. cluster b [podsolization] and q [gleyzation]). Some horizon combinations can not be explained in terms of pedogenesis (e.g. cluster c with spodic properties (Ae, Bs), weathering of parent material (Cv) and stagnic properties (Sw)).

5. Discussion

The results achieved with the different methods lack satisfactory quality. We could neither initialise the matrix C with respect to the GSS definitions nor find structures in the soil data which accurately reproduced the units of the GSS. The results can be explained considering the data requirements and quality, the structure of the GSS and methodical aspects.

5.1 Data Requirements and Quality

The comparison of soil data sets (Table 4) showed that it is impossible to establish a data based soil identification method for the current GSS.

There exists a significant gap between the recorded parameters and the parameters required by the definitions of systematic units. This discrepancy occurs since the name of the systematic unit or soil horizon depends on certain circumstances which must not be recorded further during normal field identification. Criticism is warranted because;

- it is illogical to record several parameters (e.g. colour, clay content) while other parameters are neglected for record (e.g. cutanic features, salt accumulation).
- the recorded soil data frequently differ from the values in the definitions. It is unclear whether the unrecorded parameter values actually appear.
- the subjectivity in soil identification with the GSS is often very high (Albrecht et al., 2005b).

The poor data quality is also a main drawback for the application of the FKME. Recall that less than 10 percent of the records in a high quality soil data set are applicable for the clustering. Several reasons are conceivable, for example;

- some parameters are indeterminable or their determination is meaningless (e.g. the intensive

laboratory analyses of nearly unchanged parent material).

- temporal and/or financial pressures during the survey only feasibly allow the observation of selected key parameters.
- The 'Non-occurrence' of parameters is typically not reported. Thus, empty parameter fields can not be interpreted properly.

We expect an improvement of the current situation with further developments in soil information systems.

5.2 Structure of the GSS

At first glance the GSS appears predestined for modelling with the FKME. Due to its historical development the 'central concept' of the systematic units is emphasized, despite efforts spent on separating properties in the last few years (Albrecht et al., 2005b). Both the FKME and the GSS definitions are based on the prototype description, but several special cases avoid the application of the mathematical approach. The first and main reason is the focus on soil forming processes in the GSS. The description of the process results thus leads to differences in the diagnostic parameters. Take for example the soil type *Parabraunerde*. If the process of clay translocation is detected, the degree of parent material weathering or the intensity of humus accumulation becomes unimportant and irrelevant to any further identification. Furthermore, it appears to be insufficient to interpret selected soil properties as a key for the detection of soil forming processes. Soil surveyors integrate much more information such as climate, geologic or vegetation data. Certainly, it is possible to integrate this information in an identification system, but experience, local knowledge and a sense for the investigation area can hardly be incorporated into a generally applicable soil identification system.

Another reason is the quantifiable information in the GSS definitions. These data requirements are usually given as threshold values which act as an orientation. In contrast, the FKME requires typical values given as a statistic mean or median. This information can neither be extracted from the GSS definitions nor from the soil data sets.

A third reason is our current inability to exactly and distinctly measure soil forming processes. This information is required for any definitive description of pedogenetic process soil units.

5.3 Methodical Aspects

The FKME and related methods proved to be useful applications for the characterization of soils but they do not meet the practical conditions of soil identification for the GSS. Since the FKME based method focuses on the typical properties of the defined units, it is unable to consider common exceptions.

- Soils can have complex and complicated horizon sequences due to a long time period of soil development. Experienced soil surveyors can detect relic or buried soils, while the FKME based method can not distinguish between historic and recently acquired soil properties.
- The same problem occurs with recent short-term changes of properties (going back up to a few years). A good example is the influence of ground water. If the depth of ground water decreases as a result of land improvement the soil will nevertheless retain gleyic properties for several years. The FKME based method would identify a gleyic soil although the main requirement,

that of ground water influence, is no longer present.

The specification of some soil properties depends on the ability of the soil to retain indicator information. The incorporation of these variations would lead to multiple definitions of the same unit, which would swell the identification system.

Another purpose behind our research was to determine the feasibility and viability of the FKME for quality assessment. We are not able to present results since they depend on a successful application of the algorithm. Therefore we only draw conclusions conceptually. One fundamental principle of the GSS is that a certain landscape property combined with certain processes will always result in a distinct soil type possessing a distinct set of properties. The data used in our study does not reflect this interrelationship, otherwise the clustering would have been successful. We trace the problem back and attribute it mainly to the subjectivity present in the interpretation of soil properties by soil surveyors which is a widely known issue (Shi et al. 2004; Albrecht et al., 2005b). A further conclusion can be drawn by turning the question towards the quality of the GSS: Does the structure of the soil systematic allow for high quality soil data? The question can be answered with both yes and no. The positive answer stems from the basics of the GSS. The orientation on pedogenesis is optimal in scientific terms. The rich experience of many soil scientists integrated in the GSS describes almost all soils located in Germany at a satisfactory rate. The negative answer is due to the missing engagement of the definitions and the existing threshold values. An extensive inspection of the matter is published by Albrecht et al. (2005a, b).

6. Conclusions

Our research showed that it is highly unlikely and extremely difficult, if possible at all, to establish a soil identification system for the GSS using the FKME based methods. We concluded that the FKME and the GSS are incompatible for obtaining reliable, detailed and exact results, despite the fact that both approaches worked fine in their optimal field of application. Recapitulating the discussion of our research, the main arguments for the conclusion are:

- The data quality and circumference demands can not be achieved both during standard soil surveys and by querying soil data bases. Only special studies can provide sufficient data for the FKME.
- The GSS rests on the consideration of soil forming processes. Since these processes are often immeasurable, the required information is not available.
- The structure of GSS definitions and of FKME class definitions is not equal.
- The wide variety of soils requires a large number of prototypes to be defined for the FKME. This fact contradicts the goal of soil identification simplification.

Extrapolating the results of our study we think that the application of the FKME will be restricted to the identification of soils in small or mid-sized investigation areas or for an identification dependant on specific selected properties. Most of the publications concerning the FKME can be allocated to these fields of investigation. The motivation for our statement is twofold. The first argument is based on the data quality just mentioned. The second argument deals with the structure of the soil taxonomies. A soil taxonomy based on the FKME must highlight the typical representatives of the taxonomic units. Most taxonomies throughout the world emphasize threshold values for the

separation of soils and thus prevent the proper application of the method. The work of Mazaheri et al. (1995a) is an exception, and the transfer of the approach to other soil taxonomies requires a sufficient high quality data collection, such as that found by Stace et al. (1968). The advantage of large scale investigations is the use of arbitrary taxonomic units independent from existing soil ordering systems.

In addition to our structural remarks we can draw conclusions on the GSS definitions. There seem to be further problems if the soil ordering system can not be modelled with a statistical approach. The GSS defines soils in a conceptual way and therefore meets mainly scientific needs. In contrast, it is advantageous to have easy-to-follow, clear cut instructions for the practical application. The gap results in the often occurring inability to derive soil properties from the soil systematic information. In our opinion the currently used parameters should be revised in order to satisfy the objectivity and repeatability of soil identifications. An improvement of statistical analysis is then almost surely.

Taking into account this arguments, the statistical analysis proved well suited for the investigation of the quality of the GSS. The disappointment associated with its limited application turned into an encouraging success at detecting failures and illogical structures.

We believe the results will contribute to developing a better GSS. Furthermore, we recommend the application of the FKME for modelling the soil identification process in order to increase the quality of all future forms of soil data, both data that is collected during field work and most especially that stored in data bases.

Acknowledgements

The first author is supported by the German Research Foundation (*Deutsche Forschungsgemeinschaft - DFG*) (project Hu-636/8). We thank the Soil Survey Staff of Lower Saxony (Dr. J. Boess) and of Baden-Wuerttemberg (Dr. C. Fritz) as well as the German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (Dr. J. Utermann) for providing soil data. Chris Tarn helped to improve the quality of the paper.

References

- Ahn, C.W., Baumgartner, M.F., Biehl, F.F., 1999. Delineation of soil variability using geostatistics and fuzzy clustering analysis of hyperspectral data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 163, 142-150.
- Albrecht, C., Huwe, B., Jahn, R., 2004. Allocation of the Munsell code to a color name according to pedological criteria. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167 (1), 60-65.
- Albrecht, C., Jahn, R., Huwe, B., 2005a. Soil systematic and classification systems - Part I: Fundamentals. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168 (1), in press.
- Albrecht, C., Jahn, R., Huwe, B., 2005b. Soil systematic and classification systems - Part II: The German soil science situation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168 (2), accepted.
- Altermann, M., Kühn D., 1999. Über "Probleme" bei der Einführung der Substratsystematik. *Mitt. DBG* 91(2), 909-912.
- Arbeitsgemeinschaft Boden, 1996. *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4)*. 4th edition. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und die Geologischen Landesämter der BRD, Hannover.

- Arbeitskreis Bodensystematik, 1998. Systematik der Böden der BRD. Mitt. DBG 86.
- Bezdek, J.C., 1981. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Plenum press, New York.
- Burrough, P.A., Van Gaans, P.F.M., Hootsmans, R.M., 1997. Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries. *Geoderma* 77, 115-135.
- De Bruin, S., Stein, A., 1998. Soil-landscape modelling using fuzzy-c-means clustering of attribute data derived from a Digital Elevation Model. *Geoderma* 83, 17-33.
- De Gruijter, J.J., McBratney, A.B., 1988. A modified fuzzy *k*-means method for predictive classification. In: Bock, H.H. (Editor), *Classification and Related Methods of Data Analysis*. Elsevier, Amsterdam, pp. 97-104.
- De Gruijter, J.J., Walvoort, D.J.J., Van Gaans, P.F.M., 1997. Continuous soil maps: a fuzzy set approach to bridge the gap between aggregation levels of process and distribution models. *Geoderma* 77, 169-195.
- DBG (Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft), 1991. Exkursionsführer. Mitt. DBG 70.
- DBG (Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft), 1993. Exkursionsführer. Mitt. DBG 77.
- DBG (Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft), 1995. Exkursionsführer. Mitt. DBG 82.
- DBG (Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft), 1997. Exkursionsführer. Mitt. DBG 90.
- DBG (Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft), 1999. Exkursionsführer. Mitt. DBG 94.
- DBG (Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft), 2001. Exkursionsführer. Mitt. DBG 100.
- Galbraith, J.M., Bryant, R.B., Ahrens, R.J., 1998. An expert system for Soil Taxonomy. *Soil Sci.* 163 (9), 748-758.
- Gao, X., Xie, W., 2000. Advances in theory and applications of fuzzy clustering. *Chin. Sci. Bull.* 45 (11), 961-970.
- Groenen, P.J.F., Jajuga, K., 2001. Fuzzy clustering with squared Minkowski distances. *Fuzzy Sets and Systems* 120, 227-237.
- Grunwald, S., McSweeney, K., Rooney, D.J., Lowery, B., 2001. Soil layer models created with profile cone penetrometer data. *Geoderma* 103, 181-201.
- Kubierna, W. 1953. *Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Markus, J.A., McBratney, A.B., 1996. An urban soil study: heavy metals in Glebe, Australia. *Aust. J. Soil Res.* 34, 453-465.
- Mazaheri, S.A., Koppi, A.J., McBratney, A.B., 1995a. A fuzzy allocation scheme for the Australian Great Soil Groups Classification system. *Eur. J. Soil Sci.* 46, 601-612.
- Mazaheri, S.A., Koppi, A.J., McBratney, A.B., Constable, B., 1995b. Australian Soil Identification Spreadsheet (ASIS): a program for allocating soil profiles to Australian Great Soil Groups (GSG), version 1.1. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/ACSS/sphysic/asis/asis1.html>.
- McBratney, A.B., De Gruijter, J.J., 1992. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy *k*-means with extragrades. *J. Soil Sci.* 43, 159-175.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.
- McBratney, A.B., Odeh, I.O.A., Bishop, T.F.A., Dunbar, M.S., Shatar, T.M., 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97, 293-327.

- Melville, M.D., Atkinson, G., 1985. Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space. *J. Soil Sci.* 36, 495-512.
- Ménard, M., Demko, C., Loonis, P., 2000. The fuzzy c+2-means: solving the ambiguity rejection in clustering. *Pattern Recognition* 33, 1219-1237.
- Minasny, B., McBratney, A.B., 2002. FuzME version 3.0. Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, Australia.
- Mückenhausen, E., 1977. Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland. 2nd edition. DLG-Verlag, Frankfurt/Main.
- Odeh, I.O.A., McBratney, A.B., Chittleborough, D.J., 1992a. Fuzzy-c-means and kriging for mapping soil as a continuous system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1848-1854.
- Odeh, I.O.A., McBratney, A.B., Chittleborough, D.J., 1992b. Soil pattern recognition with fuzzy c-means: application to classification and soil-landform interrelationships *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 505-516.
- Shi, X., Zhu, A.X., Burt, J.E., Oi, F., Simonson, D., 2004. A case-based reasoning approach to fuzzy soil mapping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68 (3), 885-894.
- Soil Survey Staff (Editor), 1998. Keys to Soil Taxonomy. 8th edition. United States Department of Agriculture / Natural Resources Conservation Service, Washington.
- Stace, H.T.C., Hubble, G.D., Brewer, R., Northcote, K.H., Sleeman, J.R., Mulcahy, M.J., Hallsworth, E.G., 1968. A handbook of Australian soils. Rellim Technical Publications, Glenside, South Australia.
- Triantafylis, J., Odeh, I.O.A., Minasny, B., McBratney, A.B., 2003. Elucidation of physiographic and hydrogeological features of the lower Namoi valley using fuzzy *k*-means classification of EM34 data. *Environ. Model. Software* 18, 667-680.
- Triantafylis, J., Ward, W.T., Odeh, I.O.A., McBratney, A.B., 2001. Creation and interpolation of continuous soil classes in the Lower Namoi Valley. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 403-413.
- Zahid, N., Abouelala, O., Limouri, M., Essaid, A., 2001. Fuzzy clustering based on nearest neighbours rule. *Fuzzy Sets and Systems* 120, 239-247.

Table 1: Overview of the data sets used in the study. Abbreviations are explained in the text.

Source	Data format	Number of profiles	Number of profile parameters	Number of horizon parameters
NLfB	23 MS Excel files, one for each soil type, with separate tables for profile and horizon data	358	41	31
LGRB	2 dBase files, each one for profile and horizon data	59	24	20
BGR I	MS Excel file with 35 tables, one for each soil type	159	4	17
BGR II	MS Access data base with separate tables for profile and horizon data	357	41	31
Excursion data	2 plain text files, one for profile and one for horizon data	396	30	91

Table 2: Attributes for soil profile classification and their quantitative criteria; CA: cluster analyses;
DA: discriminate analyses

Attribute	Application	Variables	Code or value	Abbreviation
Secondary carbonate	both procedures	None	0	SC
		Some	1	
		Many	2	
Subsoil clay content	both procedures	-	%	CC
Lamellae	CA	absent	0	L
		present	1	
Crust	DA	None	0	CR
		Some	1	
		Many	2	
Concretions	both procedures	None Present	0 1	CO
Topsoil humus content	both procedures	-	%	THC
Subsoil humus content	both procedures	-	%	SHC
Mottling	both procedures	None	% of area	MO
Mottling due to stagnant water	both	None	0	MSW
	procedures	Present	1	
Subsoil dithionite extractable iron	both procedures	-	mg/g	DEI
Colour	CA	Distance to the mean red, brown, grey and RE, BR, GY, green. Determination of the mean colours GR according to Albrecht et al. (2004), determination of distance according to Mazaheri et al. (1995a)		
Eluvial horizon	both	absent	0	EH
	procedures	present	1	
Plaggen horizon	CA	absent	0	PH
		present	1	
Colluvial horizon	both	absent	0	CH
	procedures	present	1	
Deep cultivated horizon	CA	absent	0	DH
		present	1	
Position in a floodplain	both	no	0	PF
	procedures	yes	1	
Thickness of topsoil horizon	DA	-	cm	TTH
Influence of non-percolating water	CA	-	cm surface	under SGW
Influence of salt water	DA	no	0	SW
		yes	1	
Interlocked/ interfingered horizons	DA	no	0	IH
		yes	1	
Raised bog plants	DA	no	0	RP
		yes	1	
Fen plants	DA	no	0	FP
		yes	1	

Table 3: Attributes for soil horizon classification and their quantitative criteria

Attribute	Variables	Code or value
Base saturation	-	%
Soil cultivation	0	never
	1	irregular
	2	regular
Accumulation of sesquioxides under oxidative conditions	0	no
	1	yes
Munsell - hue	-	-
Munsell - value	-	-
Munsell - chroma	-	-
Spots	-	% of area
Structure ¹	0	no
	1	yes
Influence of ground water	0	no
	1	yes
Location on unchanged parent material	0	no
	1	yes
Location in the profile	-	Calculation with: (number of actual horizon - 1)/(total number of horizons - 1)
Bulk density	-	g/cm ³
Horizon thickness	-	cm
Soil cultivation by deep (>4 dm) working machines	0	no
	1	yes
Organic matter	-	% of weight
Plaggen epipedon	0	no
	1	yes
Secondary carbonate	0	no
	1	yes
Dithionite extractable iron	-	mg/g
Clay	-	% of weight
Concretions	0	none
	1	few
	2	much (hardpan)
Roots	0	no
	1	yes

¹ One parameter per structure for crumbly, single-grain, lumpy, coherent, aggregate, prismatic, and sub-prismatic soil structures

Table 4: Quality of the data sets. Please refer to chapter 2.3 for an explanation of the abbreviations.

Data set	Missing parameters			Mean percentage assignment of diagnostic parameter fields
	Soil profile cluster analysis	Soil profile discriminate analysis	Soil horizon cluster analysis	
NLFB	2 (14%)	4 (19%)	5 (22%)	47%
LGRB	5 (36%)	11 (52%)	11 (48%)	74%
BGR I	5 (36%)	8 (38%)	10 (43%)	33%
BGR II	2 (14%)	4 (19%)	5 (22%)	47%
Excursion data	1 (7%)	5 (24%)	3 (13%)	51%

Table 5: Matrix C for the soil types of the GSS (extract). Please refer to table 2 for an explanation of the abbreviations.

Soil type	CC	SC	CO	DEI	SHC	MSW	MO	TTH	THC	EH	FP	RP	CH	IH	SW	PF
<i>O/C-Boden</i>	2.5	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pelosol</i>	55	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0
<i>Braunerde</i>	4	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0
<i>Parabraunerde</i>	20	4	0	0	0	0	0	2	3	1	0	0	0	0	0	0
<i>Podsol</i>	2.5	0	1	2	2	0	0	1	3	2	0	0	0	0	0	0
<i>Pseudogley</i>	21	0	1	1	0	2	3	1	3	0	0	0	0	0	0	0
<i>Gley</i>	6.5	0	3	3	1	0	1	1	4	0	0	0	0	0	0	0
<i>Hochmoor</i>	2.5	0	0	0	0	0	0	2	7	0	0	1	0	0	0	0

Table 6: Cluster composition of three clusters with Gley soils; $\alpha = 0.2$, $\varphi = 1.1$, number of clusters = 25. Please refer to the text for the abbreviations.

Cluster	Cluster Elements
1	GGn, BBn (2 times), YEn, PP-LL, GG-AB
2	GGn, BBc, LLn ABn, HNn, SS-LLd, SS-BB, GNn
3	GGn, YKn, MD-MN, SS-BB, MKn, PP-LL-BB

Table 7: Aggregated samples for soil horizon clustering - 'normal' horizons; NS: Number of samples in the data set; CMM: Cluster of maximum membership; CI's: occurring confusion indexes.

Name	20 Classes			27 Classes			30 Classes		
	NS	CMM	CI's	CMM	CI's	CMM	CI's		
Ae	4	p	0.18, 0.99	d, j	0, 0.14	s	0.08, 0.81		
Ah	2	d	0.01	b	0	n	0		
Bbt	4	j	0	aa	0	w	0		
Bh	2	k	0.08	n	0.03	x	0.03		
Bhs	4	k, o	0.01, 0.19	n, p	0.98, 0.02	e, ac	0, 0.02		
Bv	2	r	0.87	z	0.07	aa	0.07		
C	2	c	0.17	u	0.2	u	0.21		
Cv	6	p, s, r	0, 0.04, 0.15	o, t, y	0, 0.03	a	0, 0.02		
E	24	e, l, n	0, 0.03, 0.89	c, i, w	0, 0.03, 0.89	p, t, v	0, 0.03, 0.88		
Go	8	a, i, m	0, 0.03	f, l, s	0, 0.04	d, i, r	0, 0.05		
Gr	2	m	0	l	0.01	i	0.01		
M	6	d	0, 0.46	b	0, 0.37	n	0, 0.34		
Sd	14	f, g, q, r	0, 0.01, 0.06, 0.22, 0.99	a, e, m, v	0, 0.01, 0.03, 0.23	b, f, h, o, ab	0, 0.01, 0.02, 0.03		
Sw	26	c, d, e, g, p	0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.1, 0.82, 0.94	d, i, u, v, x	0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.1, 0.58	c, f, p, s, u	0, 0.01, 0.03, 0.04, 0.05, 0.54		

Table 8: Aggregated samples for soil horizon clustering - transition horizons; NS: Number of samples in the data set; CMM: Cluster of maximum membership; CI's: occurring confusion indexes.

Name	20 classes			27 classes		30 classes	
	NS	CMM	CI's	CMM	CI's	CMM	CI's
Ah-T	2	b	0.26	q	0.33	z	0.41
Bbhs-Bsv	2	j	0.72	aa	0.78	w	0.80
B-Cv	2	s	0	t	0	m	0
Bs-Cv	2	p	0.38	o	0	a	0
Bt-Sd	2	g	0.82	v	0.83	h	0.01
Go-Sd	2	i	0	s	0	r	0
P-Gro	2	q	0.98	r	0	y	0
Sd-Bt	2	b	0.03	q	0.026	z	0.02
Sd-fAh-B	2	b	0.01	q	0.01	z	0.01
Sw-Bv	4	d, t	0.02, 0.86	b, k	0.03, 0.83	g, ad	0, 0.03

Table 9: Aggregated samples for soil horizon clustering - cluster description; CN: cluster name.

20 Classes		27 Classes		30 Classes	
CN	Size Names	CN	Size Names	CN	Size Names
a	14 Ah (2), M (6), Sw (2), Sw-Bv (2), Swd-Bv (2)	a	12 Ah (2), M (6), Sw-Bv (2), Swd-Bv (2)	a	10 Ah (2), M (6), Swd-Bv (2)
				ab	2 Sw-Bv
b	6 Ahe (2), Bh (2), Bhs (2)	b	6 Ahe (2), Bh (2), Bhs (2)	b	4 Ahe (2), Bh (2)
				bb	2 Bhs
c	18 Ae (4), Bs (2), Cv (2), Sw (8), Bs-Cv (2)	c	12 Ae (2), Bs (2), Sw (8)	c	14 Ae (4), Bs (2), Sw (8)
		ca	4 Bs-Cv (2), Cv (2)	ca	4 Bs-Cv (2), Cv (2)
		cb	2 Ae		
h	8 Ccv (2), Sd (2), P-Gro (2), Sw-Bt (2)	h	4 Ccv (2), Sd (2)	h	4 Ccv (2), Sd (2)
		ha	2 Sw-Bt	ha	2 Sw-Bt
k	12 E	k	12 E	k	12 E
o	6 Go (4), Gro (2)	o	6 Go (4), Gro (2)	o	6 Go (4), Gro (2)
q	8 Go (2), Gor (2), Gro (2), Go-Sd (2)	q	8 Go (2), Gor (2), Gro (2), Go-Sd (2)	q	8 Go (2), Gor (2), Gro (2), Go-Sd (2)

Figure captions

Figure 1: Arrangement of Parabraunerde (LLn) and Gley (GGn) soils on different clusters for $\alpha = 0.2$, $\varphi = 1.1$. Cluster names are established with respect to optimal visualization, cluster 11 is the extragrade class

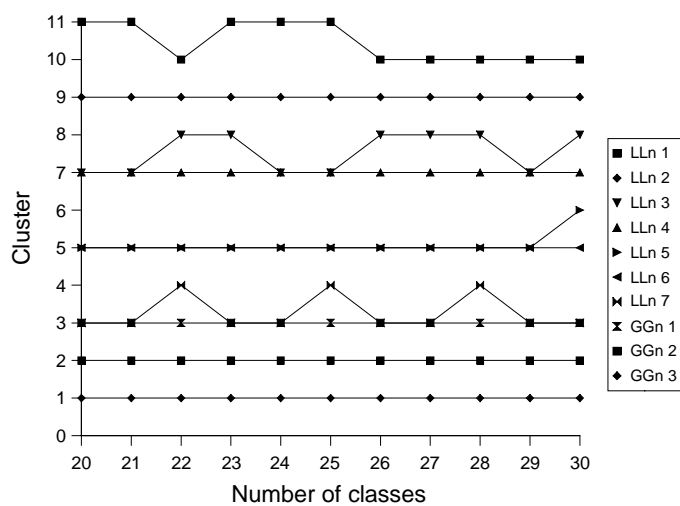


Figure 1, Albrecht et al.

Kapitel 9

Regelbasierte Horizontidentifikation

In der vorliegenden Form eingereicht bei der Zeitschrift Catena als: C. Albrecht, B. Huwe und R. Jahn: The Fuzzy Rule Based Identification of Soil Horizons. Die folgenden Seiten enthalten das eingereichte Manuskript.

The Fuzzy Rule Based Identification of Soil Horizons

Christoph Albrecht^{a*}, Bernd Huwe^a, Reinhold Jahn^b

^a*Soil Physics Group, University of Bayreuth, D-95440 Bayreuth, Germany*

^b*Institute of Soil Science and Plant Nutrition, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, Weidenplan 14, D-06108 Halle, Germany*

Abstract

The German Soil Systematics (GSS) is based on genetically defined units. The basic principle behind it is the division of soil types according to their soil forming processes (e.g. podzolisation). Thus, both soil profiles and single horizons must be identified by their genesis. To do so, soil scientists have to hypothesize on the genesis based on their knowledge about the soil forming factors and some observations on the soil profile. The main disadvantage of this approach is the likelihood of obtaining contrasting opinions from different soil scientists. The resulting problem of this situation is that many of the conclusions may prove correct since pedogenetic processes are for the most part immeasurable.

We therefore propose a new identification system for the German soil taxonomy. The goal for it is to become simple, fast, and use only a few key variables, while the objectivity increases. Furthermore it should repeatable identifications utilizing the same units as the current German Soil Systematics. Another key aim is to handle soil information computationally in a manner similar to that done by soil scientists. As a first step, we focus on the identification of single horizons.

As defined in the German Handbook of Soil Mapping (Bodenkundliche Kartieranleitung), about 30 parameters are required in order to delineate all possible horizons. Many of those parameters possess only a verbal description. Additionally, only few clear threshold values differentiate the existing GSS units. The ambiguity in these characteristics is best overcome with the application of fuzzy set theory in a mathematical/numerical identification framework. Given the large number of fuzzy methods the rule based modeling shows the best results. It demonstrates an approximation of the way to think accomplished by a soil scientist identifying a profile or horizon in the field while also remaining very flexible and stable, even in the case of missing data or empty sets.

Some basic parameters are given numerically in the horizon definition. Otherwise the identification would only be possible for a few very experienced soil scientists due to the theoretic horizon description. They are used for the definition of the If-Then-rules for horizon identification. Other ways to define rules are through the direct use of verbal descriptions or the computation of statistical values.

* Corresponding author. Tel. ++49-(0)921-552193, fax: . ++49-(0)921-552246

Email addresses: christoph.albrecht@uni-bayreuth.de (Christoph Albrecht), bernd.huwe@uni-bayreuth.de (Bernd Huwe), jahn@landw.uni-bayreuth.de (Reinhold Jahn)

We will present the basics of rule derivation, rule programming, and rule testing. The results are tested with a set of 2652 well-classified soil horizons. In most cases the rules match the horizon's name or they represent the responsible pedogenetic process. It is possible to identify transitions between horizons as well as to deal with unsuccessful or failed identifications. Problems do occur with poor profile documentations (source data) and due to subjective profile genesis explanations. The approach presented details a method of dealing with genetically defined horizon definitions for automated identification. It will help in obtaining standardised results quickly and with a minimum of effort.

Keywords: soil classification, soil systematics, genetically defined horizons, automated identification, fuzzy rule-based modelling

1. Introduction

Users of soil related information require relevant high quality data preferably covering a large area (e.g. entire catchment areas, provinces) while retaining a high spatial resolution. These requirements result in the need for approaches or methods for providing such information. New methods should be timesaving, easy to access while producing reasonable, accurate results. During the last few decades the demand on the soil data quality has dramatically increased, mainly due to the ever increasing application of geographic information systems (GIS). In that time many methods have been developed in order to automate the information retrieval and interpretation. The usefulness of mathematical and statistical approaches is beyond doubt or discussion. The techniques are subsumed under the term *pedometrics*. McBratney et al. (2000) give an extensive overview over the recent developments in this field, while McBratney et al. (2003) provided an excellent review of pedometric approaches related to digital soil mapping.

The target variables of pedometric studies vary drastically. Often the occurrence or the intensity of one or more single parameter is considered, such as the organic matter, pH in topsoil, topsoil thickness (Hengl et al., 2004) or the available water capacity of the rooting zone (Friedrich et al., 2002). Other authors focus on the absence, presence and/or thickness of particular soil horizons (Triantafilis et al., 2001, Carré and Girard 2002). In most cases, the defined soil horizons are a result of statistical grouping and do not reflect any units of a general soil taxonomy.

However, one basic source of soil information is the knowledge on the systematic or taxonomic unit of a soil. The unit of the soil ordering system – together with information on the soil substrate – allows the deduction of characteristics such as nutrient content, soil water balance, or the demand for land improvement (Schlichting, 1969). It also often integrates information on the soil forming factors and soil forming processes. Despite the wide ranging information content the systematic unit of a soil ordering system is rarely used in conjunction with pedometric approaches. Possible reasons are;

- the high information complexity,
- the poor quality of field work results from inexperienced or subjective experts and
- the difficulties in deriving universal interpretations of taxonomic information.

Discussing the problem of the practical applicability of soil maps Bui (2004) argued that the derivation of mapping units requires a soil science knowledge system, which will not be understood without a strong pedological background. The interpretation of taxonomic information may be improved if the knowledge system is conveyed to allow conclusions on several soil properties impacting their utilization.

The focus of our paper is on the second argument, that of the soil identification quality. Soil identification is the distinct allocation of an individual soil to one or more classes of a predefined soil ordering system. Since the term classification is often used synonymous with taxonomy we prefer the term identification in order to clearly distinguish between the allocation and the grouping of soils according to specific criteria. The soil identification quality is not a measurable parameter since no framework exists to decide on whether the identification is good or not. Soils are very complex and definitions of taxonomic units are only able to describe a narrow set of characteristics. Therefore, parameter combinations may exist which allow more than one identification. Due to

personal, or subjective, weighting several soil surveyors may reach different results investigating the same object. Thus, the allocation process becomes highly subjective, which is a major drawback in soil identification. The problem has been reported by several authors (see Shi et al., 2004) and is also very common in Germany (Albrecht et al., 2005). An easy to use identification tool would greatly help to establish a universally accepted standard. The results will be even more useful for pedometric applications, since their onset is comprehensible.

Only two approaches reproducing a universal taxonomy were found in the literature by the authors. They were published by Mazaheri et al. (1995) and by Galbraith et al. (1998) and model the Australian Great Soil Groups (AGSG) Classification system and the US Soil Taxonomy, respectively. The approaches can not be carried over to the German Soil Systematics due problems concerning mathematical preconditions, the field of application and the available data base. The German identification instruction configuration is very qualitative and does not prescribe the consideration of every given threshold value. Consequently, one unsolved problem still remaining deals with the subjective interpretations and resulting disputes among soil scientists when identifying a soil. Unfortunately, one result of this problem is that it is extremely difficult to determine the quality of German soil maps.

We suggest a new and improved automated identification system derived from the German Soil Systematics identification instructions. Our preliminary goals and work are as follows:

- High speed performance. Briefly stated, the work with the new identification system should be at least as fast as the identification done by an experienced soil scientist with the current system.
- Parameter parsimony. About 30 parameters are used for the definition of soils In the German Handbook for Soil Mapping (*Bodenkundliche Kartieranleitung*, Arbeitsgemeinschaft Boden, 1996) for the definition of soils. If possible, no additional variables should be added.
- Simplicity. The acceptance of the system depends on its ease of use and robust operating efficiency.
- Stability. Missing values should not detrimentally affect the identification result.
- Accuracy. Taking the other characteristics into account, the automated system should be transferable to other identification systems with similar units.

These simple requirements seem to contradict with the complexity of soils. The most exact solution to identify soils would be the assignment of simple variables to the soil forming processes. However, this might be difficult to achieve as these processes are for the most part immeasurable and decisive variables difficult to find. One method of solving such ambiguous complex problems is through the application of fuzzy sets (Zadeh, 1965) and related methods. Considering the number and quality of datasets, the fuzzy rule based modeling system was deemed to be the most appropriate method to implement our automated identification system. Fuzzy rule based systems were successfully used in different fields of soil science and related topics, e.g. in large scale three dimensional soil modelling (Ameskamp, 1997), the estimation of runoff-induced sediment transport (Tayfur et al., 2003), or the identification of degraded forest soils (Riedler and Jandl, 2002).

The German Soil Systematics is defined dynamic-morphogenetically, i.e. the recognition of soil forming processes has a higher precedence than the recognition of defined threshold values during soil identification. In contrast, a rule based system depends on given values and value domains. The best solution would be the direct incorporation of the soil forming processes as rule parameters. This goal is hard to achieve since the quantification of some processes is difficult (Müller et al., 1984), the genesis of some soils is still under discussion (e.g. the Tchernozems, see Gehrt et al., 1999) and pedogenetic processes are often impossible to measure. That means distinct identification values and terms must be assigned to current taxonomic terms. Great care and consideration must be taken in determining which variables and parameters are applicable, otherwise the accuracy of the new system would suffer.

A taxonomy system includes the whole knowledge of a scientific domain and describes the objects as well as all relationships between them. In contrast, a classification system is primarily developed for a specific purpose (goal oriented design) and thus utilizes only a limited select set of parameters (Siebel, 1968). Therefore, a taxonomic system is much more extensive in breadth and depth, and the modification of it towards a classification would lead to a loss of information. However, both taxonomic and classification systems have one important fact in common: Both of them use parameters when describing units, and these parameters are either observable or measurable. If the parameters used are the same in both systems, then the identification system would become an exact model of the taxonomic system devoid of identification errors.

The identification of soil horizons will become the central task of the identification system. It must produce accurate results for all horizons and must continue the computation in the case of invalid or missing values. The overall performance of the automated system will mainly be dependant on the accuracy of horizon determinations.

Parameter extraction and the design of the system must be done very carefully. Soils are very complex. Therefore, the sensitivity of each parameter increases with a decreasing amount of information. The final concept will be a result of the experience and discussions from soil surveyors and scientists.

The theoretical background of fuzzy sets will not be addressed here in great detail, since many textbooks on fuzzy set theory and fuzzy logic exist, we instead refer any who are interested to the Bardossy and Duckstein (1995) or Yuan and Klir (1995) for an in-depth description on the topic. After a brief description of the basics of the German Soil Taxonomy we will focus on the derivation of fuzzy rules, the special requirements for the system design, and the discussion of the results.

2. Basics of the German Soil Taxonomy

The German Soil Systematics is a genetically defined system. Its foundations were developed in the fifties and sixties of the last century (Kubiens, 1953; Mückenhausen, 1965; AG Bodenkunde, 1965) and have been refined continuously ever since (until AG Boden, 1996; DBG, 1998).

The German Soil Taxonomy was developed to arrange soils according to their genesis and to

explain their interrelationships. It has a hierarchy of six categories (Wittmann, 1997):

- The **soil orders** (*Abteilungen*) form the highest category. The criterion for distinguishing the soils is dependant on the water regime and is subdivided into three main divisions (terrestrial, semi-terrestrial and sub-hydric soils) and one supplementary division dependant on exceptional parent material and genesis (bog soils).
- The **soil suborders** (*Klassen*) are the next level down in the hierarchy. Soils are distinguished by their level of genesis and degree of horizon differentiation or by further differentiation within the water regime.
- The **soil types** (*Typen*) form the core of the German Soil Taxonomy. They represent the transformation products from the lithosphere and show the impact of the pedogenetic processes and the parent material. Soils of the same type possess the same characteristic horizons and the same major horizon sequence.
- The **soil types** are further distinguished and subdivided into soil sub-types (*Subtypen*). They often differ from the typical unit by the occurrence of additional characteristics (variation subtype) or they possess intergrades from two or more soil types (transition subtypes).
- Taking into account qualitative aspects, soil subtypes can then be further divided into **soil varieties** (*Varietäten*). In a soil variety each horizon is specified with up to three soil forming processes (either current or fossil processes).
- The **soil sub-varieties** (*Subvarietäten*) are the lowest category of identification. It is in this category that quantitative differences and modifications become necessary for an exact identification.

The substrate series (*Bodenformen*) form an independent or stand-alone category. They are derived from one of the systematic categories and from information pertaining to texture and parent material according to a separate classification of the substrate.

2.1 German Soil Designations

The designation of soils in Germany is exemplified with LFn (German *Fahlerde*), which is the equivalent of an Albeluvisol (FAO) with a typical horizon sequence of Ah/Ael/Ael+Bt/Bt/C.

The first capital letter (L) denotes the soil class as that of *Lessivés*, which is a class of soils having an argic horizon. The second capital letter (F) stands for the soil type. The (F) soil type denotes the soil to be a *Fahlerde* (Albeluvisol). The third letter in the designation (n) stands for the soil subtype, which is in this example a normal or typical albeluvic soil with the horizon sequence Ah/Ael/Ael+Bt/Bt/C.

The topsoil horizon (Ah) may be an ochric, umbric or mollic horizon. The second soil horizon (Ael) is an albic horizon, the lower cases (e and l) stand for eluvation and *lessivierung* (removal of clay). The third horizon designated as (Ael+Bt) stands for the transition from the albic to the argic horizon with albeluvic tonguing. The fourth horizon (Bt) is an argic horizon (t = *tonanreicherung* [illuvial accumulation of clay]). The fifth and last horizon with the symbol (C) is where the nearly unchanged parent material begins. The lower case letters in the horizon designations represent the pedogenetic properties.

2.2 Soil Horizon Definitions

There are 108 possible soil horizons defined in the German Handbook for Soil Mapping (AG Boden, 1996). They include 'normal' horizons as well as intergrades. If observations are made outside of these definitions it is possible to allocate new horizons. Each subtype is defined with a unique specific diagnostic horizon or a specific sequence of horizons.

The definitions of the horizons contain only a few quantifiable parameters. The first part of a definition most often pertains to the process forming the horizon. The second part includes some information on the soil's specific properties. They are often only clues and described with highly subjective terms such as 'mostly' or 'normally'. A typical example is shown here (the definition of a horizon called Ae, which is the subsurface horizon of a podzol): *Ae: mineral topsoil horizon characterised by humus depletion, bleached by acids, stamped by podzolization, Munsell value mostly 4/ or higher, ratio between Munsell value and Munsell chroma 2.5 or higher, mostly lying above an illuvial horizon.*

3. Materials and Methods

3.1 Data set

The datasets used for analysis and validation were not obtained from a special investigation area. However, one major goal of our work is the reproduction of a taxonomic system valid for the whole area of Germany. Therefore we tried to obtain data covering the soil situation in the many different landscapes of Germany. The best data sets available are published in the excursion guides of the German Soil Science Society (*Deutsche Bodenkunde Gesellschaft* -DBG). Every two year, the DBG organizes a conference, the results of which become later publications. Several excursions occur with the conference. The extensive documentations of the soils shown there are published in the information for members of the DBG (*Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, MDBG). We used the soil data from the last seven conferences of the DBG (*Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 1991-2003). The data set comprises of a total of 2652 horizons. They cover 89 of the 108 predefined horizons, although in a few cases the horizons are only available as part of a transition horizon.

The data was stored in a simple data base. We did not use a special storage format in order to allow platform independent use in different software programs and operating systems.

The data sets comprise of detailed profile and horizon descriptions as well as extensive laboratory data. However, they have two main disadvantages. The set of parameters used for the description is very heterogeneous, also within the horizon description of one profile. Furthermore, the frequency of special cases is above average, meaning that the soil profiles are more often atypical than typical examples.

In Germany there also exists various soil data sets collected by the geological services. In many cases they only comprise of a minimum parameter set and are therefore too small to be considered here. However, the final parameter set used for identification should take into account these restrictions.

3.2 Basics of Fuzzy Rule Based Systems

Three key concepts are noteworthy in fuzzy rule based systems:

- *Fuzzy sets* are the basic unit. A fuzzy set is a class with a continuum of membership grades (Zadeh, 1965). The single membership grades are merged to form membership functions. The presented identification system uses linear functions whereby the fuzzy sets are represented as fuzzy numbers or as a trapezoidal fuzzy set (Zimmermann, 2001, pg. 59f). For programming purposes they are defined as a quadruple, which is composed of the lower left / upper left / upper right / lower right threshold. In case of fuzzy numbers, the upper left and the upper right value are equal.
- *Linguistic variables* are variables whose states are fuzzy sets assigned to relevant linguistic terms (Klir and Yuan, 1995). In other words they are formed from the set of all states a parameter can have, which is split into reasonable parts. In our approach a linguistic variable consists of 2 - 6 single fuzzy sets with a maximum of only two sets that can overlap at one point.
- *Rule based systems* are formed from a set of rules operating on the same premises and having responses from the same set. Single fuzzy rules consist of a set of arguments in the form of fuzzy sets (IF-component) and a consequence also in the form of a fuzzy set (THEN-component). The arguments may be combined with the logical operators AND, OR, XOR, "MOST OF" or "AT LEAST A FEW" (Bardossy and Duckstein, 1995). Our identification system uses the AND-operator for the combination of different parameters. We use some specific approaches to handle the problems resulting from soil science and soil data prerequisites. They are described below in chapter 3.4.

Figure 1 shows the development of a rule-based system in principle. First, decisive parameters must be determined. They should cover the whole field of interest and are split into single fuzzy sets to simplify things. The definition of the membership functions determines the fuzziness of the system and is important for the quality of the identification. Errors in threshold values would lead to false results, though fuzzy sets are less sensitive to threshold changes than crisp sets. Once the so-called "linguistic variables" are defined, the classification rules must then be specified. The knowledge of experts may be directly included, since the variables are described verbally. The final step is the testing of the rules and a possible improvement or refinement of the system.

Fuzzy rule based systems may be used for directly linking expert knowledge for computational use. In this case the soil scientist's manner of thinking will be modeled. The design of the system is kept as simple as possible. It would be possible to use non-linear functions or to overlap more variables, but that would generate misleading results, which would be more detailed than the data used for the computation thereby giving a false impression of accuracy.

3.3 Calculation of memberships and combination of rule responses

Except when otherwise denoted the mathematical background in this chapter is taken from Bardossy and Duckstein (1995). The textbook contains extensive descriptions and numerous examples to establish the understanding of the matter.

The rule-based system presented here consists of three parts:

- A set A of K soil horizon properties a_1, a_2, \dots, a_K . Examples are the base saturation or the soil color. The soil horizon properties are linguistic variables. The properties are described in detail in chapter 3.7, the full list of properties is shown in table 2.
- A set H of N predefined soil horizons h_1, h_2, \dots, h_N . Examples are the horizons Ah, Ael, Bt and C from chapter 2.1. The single predefined horizons are fuzzy sets consisting of the name and the membership value. Logically, the set H is a linguistic variable.
- A set R of I rules r_1, r_2, \dots, r_I to define the state of H depending on the characteristics of the soil horizon properties A . The evaluation of a rule is the combination of membership values derived from A with appropriate operators. The result is the degree of fulfillment of the rule (DOF, signed with v_i) which influences the membership value of the predefined horizons.

Each rule r_i has the following structure:

IF a_1 is O AND a_2 is P AND ... THEN $((h_1, \mu_i(1)), (h_2, \mu_i(2)), \dots, (h_N, \mu_i(N)))$ (1)

with $\mu_i(n)$ being the membership value of the n th predefined horizon in the i th rule. If the OR-operator (chapter 3.4.2) is used, the rule structure changes to (example):

IF a_1 is O AND (a_2 is P OR a_2 is Q) AND ... THEN $((h_1, \mu_i(1)), (h_2, \mu_i(2)), \dots, (h_N, \mu_i(N)))$. (2)

Thus, each horizon can be matched by several rules and each rule can have several results in principle. For the sake of clarity we defined

$$\mu_i(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } i = n \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

Therefore each horizon is defined only one time and each rule has only one result. In other words each horizon has its own specific definition. Every other structure of the rule based system would increase the complexity and decrease the manageability of the system.

The identification result is assessed in a two-stage procedure. First all v_i are determined depending on the current stage of all a_k , afterwards the final memberships of all h_n are calculated. The DOF's are delineated with the min-max inference. This means, all AND operators are replaced with a min operator, and all OR operators are replaced with a max-operator. Thus, the evaluation of the IF-part of equation 2 is done with

$$v = \min(\mu_i(a_1), \max(\mu_i(a_2(P)), \mu_i(a_2(Q))), \dots) \quad (4)$$

If one or more soil properties doesn't match the conditions of a rule, their a_i is 0. Therefore the DOF of that rule is also 0 and the result of the rule is not taken as valid identification result.

The preferred method for the combination of rule responses is the weighted sum combination (Bardossy and Duckstein, 1995). It returns the best 'compromise' of all individual rules. The formula for the calculation is

$$H = \left(\left(h_1, \frac{[v_i \mu_i(1)]}{M} \right), \left(h_2, \frac{[v_i \mu_i(2)]}{M} \right), \dots \right) \quad (5)$$

with

$$M = \max_n [v_i \mu_i(n)] \quad (6)$$

Taking into account the definition of $\mu_i(n)$ in formula 3, we can simplify formula 5 to

$$H = \left(\left(h_1, \frac{v_1}{M} \right), \left(h_2, \frac{v_2}{M} \right), \dots \right) \quad (7)$$

Logically, M is now defined as

$$M = \max_i v_i \quad (8)$$

Normally, only full membership responses ($\mu_i = 1$) are a result of the rule. In this approach, we will determine the threshold value for the membership according to the quality of the results (see chapter 5). Results with a membership value below this threshold value are no valid identification result. An example showing the application of the formulae in detail is given in figure 4.

3.4 Specific approaches

3.4.1 Skipping

Taking into account the complexity of soils some specific approaches must be used, since genetically defined soil horizons may not be described with a unique parameter set. Relevant information for one horizon is not necessary or significant for other horizons. This relationship conflicts with the definition of a rule-based system determining all rules to operate on the same set of premises. A simple solution would be the development of independent rules, one for each horizon definition. Yet this solution would require some kind of prior information in order to choose the right parameters for rule evaluation. Since no other prior information is used, all parameters must be considered simultaneously. Therefore, the rule based system must be able to run several rules with differing IF-parts. We introduce a modification for rule based systems termed “skipping” in order to achieve this goal. Skipping means that a rule must not query all defined parameters but only the values defined by an expert. This modification allows higher flexibility in the system design, but also introduces the possibility of arbitrary results. The choice of optimal parameters and the designation of linguistic variables will prevent misidentifications in many cases. If a part of a rule is skipped, $\mu_i(a_k)$ is set to 1 in order to prevent an influence on the min-operator. The skipping-method is also appropriate in the case of missing values. As stated above, the soil data sets are very heterogeneous. In addition, some parameters required for exact identification are not recorded at all. Therefore the occurrence of missing values is a very common phenomenon. We allow a rule to ignore IF-parts when a parameter value is indeterminable. The identification procedure will not terminate, instead a higher degree of uncertainty is involved.

3.4.2 Logical OR

Some parameters are defined very strictly in the horizon definitions, while they can have wide ranging values due to other definitions. In order to increase the flexibility of the system, the logical OR is used for the combination of single one parameter expressions. This implementation means that the program is not allowed to combine two parameters such as organic matter and color with the OR-operator. The program may combine two stages of one parameter like “none or little organic matter”. Thus the use of wide ranged parameter states becomes feasible.

3.4.3 Prevention of empty set results and the detection of intergrade horizons

Sometimes the automated identification system will not produce any result. In order to avoid this failure as much as possible, the system will be able to set all variables as missing values, one parameter at a time, and the identification would repeat itself until a result is produced. The same technique is used to detect intermediate horizons with partially contradicting definitions, where three parameters are skipped simultaneously. The results are reasonable, even though the number of iterations greatly increases.

Another method is based on the fact that the uppercase letters in the horizon names are a sign for a specific pedogenetic process. The occurrence of the capitals in the computed intergrade horizons is tracked. These values are normalized with the total number of defined horizons with the specific uppercase letter. The maximum result is set to be the name of the horizon. The second method for the prevention of missing values is applied after the detection of intergrade horizons.

3.4.4 Simple filtering

The non-peat organic soil horizons covering the soil profile are also called overlay horizons. They are very susceptible to misidentifications due to the few diagnostic variables and the poor documentation sometimes found in the data sets. Therefore, additional information is required by the software on whether a horizon is an overlaying horizon or not. With this information it is easy to detect wrongly occurring results and then delete them.

3.5 Flowchart of the identification procedure

The system is applied in practice as summarized in figure 2:

- Data mining or extraction from databases.
- Fuzzification of the data: fuzzy sets are assigned to the data and the membership grades are computed.
- Application of the IF-THEN-rules: all rules are tested on whether all of their premises are fulfilled with a degree higher than zero. If any of the arguments cannot be satisfied the rules DOF becomes zero and the consequence is not included in the identification process. If a parameter is undefined or a missing value occurs, the IF-part is then skipped and treated as a fulfilled premise.
- Computation of the membership grades of the rule responses
- Detection of possible intergrade horizons.
- Application of variant approaches for getting a result as described in chapter 3.4.3.

3.6 Assessment of the result quality

3.6.1 The Index of Missing Essential Parameters (IMEP)

One possibility of assessing the quality of the results is derived from the number of required but skipped parameters. We propose a simple index IMEP for a first overall view on the results. It shows the proportion of unknown variables on the number of important parameters of a rule in percent. The parameter IMEP is calculated by

$$IMEP = \frac{u_i}{z_i} \cdot 100 \quad (9)$$

with z_i being the number of IF-parts required to be known in the rule and u_i being the number of

parameters which are unknown while being required (missing essential parameters). Thus, if a rule requires the four parameters Munsell chroma, base saturation, horizon thickness and organic matter contents while the Munsell chroma is unknown, $u_i = 1$, $z_i = 4$, and $IMEP = 25$ since one of four required parameters is not determined. The state and/or the value of other parameters like bulk density or Munsell hue is irrelevant for the calculation.

A IMEP of 0% means that every piece of information needed for the identification is available in the data set. The resulting horizon is identified according to all defined parameters. Logically, a IMEP of 100% designates a data set lacking of all essential parameters. The horizon is not identified because the parameter constellation points out to the definition, but only because the software found no information on whether any condition is violated. If a horizon is identified by counting the number of uppercase letters (see chapter 3.4.3), the IMEP is set to 100%.

3.6.2 Estimation of the result quality

It is very difficult to measure or assess the result accuracy of the identification process since no universal quantifiable scale exists which would provide the basis for measurements. Therefore we compare the results with the expert's identifications in the data sets. The comparison can only give a certain clue for the quality, because the soil surveyors often disagree in naming soil horizons and the information in the data sets represents the position of only one or a few persons.

We express the similarity between the expert's and the computed result with the self-defined index q which is composed out of the similarity of the uppercase and the lowercase letters:

- If the uppercase letters in both horizon names are equal, q is 0.6, if they are not equal, q is 0.
- If the lowercase letters in both horizons are identical in letter and order, 0.4 is added to q .
- If the lowercase letters in both horizon names have the same letters but a different order or if they are partly equal, 0.2 is added to q .

Examples for different q are summarised in table 1. If the identification process has more than one result, the mean value of q will be shown as the mean quality of all results.

3.7 Parameter Extraction and Definition of Linguistic Variables

The identification systems require scalable parameters, regardless of which level they operate at (nominal, ordinal, or metric). Further requirements considered here are:

- High significance (in some cases only for special topics),
- Simple ascertainment (by observation, estimation, or measurement),
- High occurrence/frequency in soil databases.

The last point is difficult to achieve because soil databases in Germany are very heterogeneous and often have missing values. Some information is observed only during field work and is not recorded, except in the name of the horizon. Such identifications are unreliable due to the subjectivity involved and they are thus generally not used for the development of the identification system. However, in some cases the name is the only data containing detailed specifications and their use in the development and test purposes cannot be avoided.

The parameters for the identification system were derived from the horizon definitions. Each

definition was investigated for the occurrence of information such as color, clay content, or humus content. If possible, processes were described by simple parameters; for example 'gleyzation' by the binary information 'influence of groundwater'. Table 2 shows all parameters together with information on the number and the names of the subsets of the parameters. Some parameters such as bulk density are suitable for the detection of only one or two horizons, while others (e.g. color) can be used for a large variety of horizons.

The assessment of the variables was accomplished with information from the German Handbook for Soil Mapping (AG Boden, 1996). The book contains tables where almost all pedological parameters are conveniently listed. These groups have sharp threshold values and are designated with a short symbol. The groups were used to form the basic outline of the variable design. The limits of the fuzzy intervals were derived from the parameters' groups. Once the point or the interval was assessed, which incorporated the most credible value(s) of the variables, the overlapping areas were then defined. Their borders correspond to the points with the first or last occurrence of the membership value 1 in the fuzzy variables. During the rule testing process the same variables were merged and/or their borders were changed. Some parameters such as sesquioxide do not have a pre-definition. They were nevertheless optimized by trial-and-error.

Figure 3 shows the graphical model of the linguistic variables 'clay content' and 'base saturation'. It can be seen that all variables must have an underlying metric scale. They are needed for the right assignment of a parameter value to one or two variables. It is sufficient to use percentile information.

3.8 Rule Derivation and Testing

The rules were derived in a three step procedure. At this stage of development any membership values was extraneous, only the verbal combination of knowledge was done.

First, the occurrence of the parameters in the definitions was again investigated, but this time the information about the intensity of the parameter was added. Following that step simple IF-THEN-rules for the detection of the horizons could then be created. Most of them had just one to four IF-parts, which often was insufficient for exact identifications. Therefore, additional information from soil science textbooks (Scheffer and Schachtschabel, 1998, Kuntze et al., 1994, Mückenhausen, 1985) was added. The information was often extracted from descriptions of horizons or whole profiles which consisted of typical observations. Normally, parameter descriptions are simple verbal descriptions devoid of threshold values. In this case the use of fuzzy methods simplified their handling. The definition of the subhydric horizons are still under discussion and therefore not yet incorporated in the system. We also did not test soils which developed on technogenic parent materials.

The third step of rule derivation was the incorporation of statistical values which coincided with rule testing. A total of 1000 data sets with horizon information from different landscapes in Central Europe were investigated for means, medians, and threshold values. Rarely occurring horizons were not included in the dataset. Furthermore, the parameter values within all examples of single soil horizons were given wide ranges since the soil forming processes occurred under different environmental conditions. As a result only a few values could be used and characteristics often had

to be interpolated from basic horizons to intermediate horizons. Nevertheless, an improvement of some of the IF-THEN-rules was achieved.

Rule testing was done via comparison of computed identification results for the data sets against horizon identifications made available from experienced soil scientists. The first tests generated many misidentifications, mainly due to errors in the design of the system but also due to discrepancies between horizon definitions and actual soil data. The rules were then improved step by step applying a statistical analysis of the results and by trial-and-error. We did not automate the procedure in order to avoid overfitting.

4. Examples

Only a few examples can be shown since 90 horizons were defined by 56 single linguistic variables, resulting in 5040 IF-parts. The definitions of some typical horizons are:

- **Ae** (subsurface horizon of the podzol, see chapter 2): low base saturation, no lamellae, no cultivation, no accumulation of sesquioxides under oxidative conditions, bright and sallow color, brighter than the horizon lying above, no influence of ground water, medium bulk density, topsoil horizon, no salinity, thin or medium thickness, no mottling, no organic matter, no secondary carbonate, little clay, no peat, no concretions.
- **Bt** (argic horizon): no lamellae, no cultivation, no accumulation of sesquioxides under oxidative conditions, red Munsell hue, medium Munsell value, no mottling, no influence of ground water, medium bulk density, situated in the upper-middle or middle of the profile, no salinity, medium thickness, no organic matter, no secondary carbonate, medium to high clay content, containing significantly more clay than in the overlying horizon, no peat.
- **Go** (gleyic horizon): no lamellae, no cultivation, yellowish sallow color, very few to no spots, influence of ground water, not lying on unchanged parent material, medium bulk density, no salinity, medium thickness, none or little organic matter, no secondary carbonate.

It is easy to notice that the parameters differ in each definition. It is one of the advantages of the rule-based system that undefined subjects need not be taken under consideration.

Figure 4 exemplifies the identification of a horizon. For clarity the example is limited to four parameters and to the horizon definitions from the first example. In the first line real parameter values can be seen. Most of them are measured during laboratory work but can be replaced by appraised values. The fuzzification is denoted by the graphical representation of linguistic variables. Once the fuzzy sets are determined through comparison with threshold values the membership grades may then be computed. They are presented below in the diagrams. The first term represents the name of the fuzzy set, the second term the membership grade. Real parameter values are often assigned to two fuzzy sets. In order to clarify the use of IF-THEN-rules the short definitions are also given. If their single parts coincide together with the names of the fuzzy sets then those parts of the rule are classified as true, otherwise they are handled as false. The complete rule is true only if all parts are true. Therefore, this example has only one possible result, that being the horizon with the German designation Ae. Its membership value is computed from the membership grades of the single fuzzy sets, divided by the maximum response membership grade.

Table 3 illustrates a third example. The identification of all horizons in a soil profile is presented. The results are computed with data gathered from a profile description (*Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft - DBG*, 1990). The first column contains the horizon number. The next displays the horizon identification by an expert. The third column shows all valid rule responses in combination with their membership grades and the fourth one shows any detected intergrade horizons. The profile is mainly formed by podzolisation. The horizons L, Of, and Oh form the humus body. Ae and Ahe are equivalents of an albic horizon, while sesquioxides have accumulated in the Bs and Bhs horizons. The horizons named Bv and Bfv are the equivalents of a cambic horizon. Cv is a weathered C horizon. In the column of intergrade horizons the S stands for stagnic and the G for gleyic properties. The Al is for an eluvic horizon, the E stands for plaggen (mulch), the M signifies the accumulated soil materials of Colluvisols, and the C represents nearly unchanged parent material.

All horizons are matched by the automatic identification system. The only exception is horizon number 5, but the overall soil forming processes are identical in the identification from the experts and in the automatic identification. The possible intergrade horizons were initially misclassified for the most part. Since their appearance is very implausible in the context of the other matches they will be easily filtered out as false intermediate results when combining soil profiles from soil horizons.

5. Results

5.1 *Quality of the input values*

The input values are characterized by the number of missing values (table 4). The term 'value list' is used for the combination of the single values. Unfortunately, no value list is complete and the number of missing values is often high. The main reason is that some parameters are not recorded in the data sets and are observed only during fieldwork. Another reason is due to gaps in the data sets.

The horizons with the most missing values are the organic horizons at the soil surface with missing values > 50%. The best documented horizons are the plaggen, tchernosemic, luvic and gleyic horizons. The availability of the parameters in the data sets is shown in table 5. It is easy to note that the most important variables such as color, organic matter or groundwater influence are recorded for more than 75% of the horizons. The table contains some enhanced key figures, since some parameters are extracted from the existing horizon name. Altogether the quality of the input variables is not at its best but allows the computation of reasonable results.

5.2 *Number and quality of the results*

The number and the quality of the results depends on the chosen threshold value for the membership of the rule responses. If the membership value is below the threshold value, the result will be deleted, otherwise it is taken as a valid result. Figure 5 shows the dependence of this information together with the ratio $q/\text{No. of results}$.

It is easy to notice that q and the number of results show nearly no change up to a threshold of 0.6, which means that most of the valid results have a high membership to the set of all results. The

different decreasing curves between membership 0.6 and 1.0 indicate more wrong results deleted than correct ones. Nevertheless, some correct results are also filtered out, wherefore q is decreasing. In some cases the so called 'second method to avoid empty results' nevertheless leads to wrong results.

We propose to take a membership of 0.85 as the overall threshold value. Here, the first considerable increase in the ratio q/No of results may be observed and q is not too low. Naturally, the optimum is reached at a membership of 1.0, but here the quality of the results is significantly lower. We prefer a certain number of wrong results instead of deleting too many correct results.

The identification quality differs from horizon to horizon. Table 6 gives an overview over the mean match of the computed result and the expert's identification of selected horizons. A q of 1.0 is only reached in a few cases (horizons *Acxh*, *Axp*, *Bbs*, *Bbt*, *R*). Unfortunately, these horizons are seldom found in the field. On the other hand the smallest q occur mostly in very rare horizons. This correlation signifies that the most common horizons are identified with a medium to good quality.

It seems to be easy to detect gleyic (*G...*), stagnic (*S...*), and anthropogenic influenced horizons (*Ap*, *E*, *R*). Horizons which were difficult to define (e.g. *M* and *Sq*) are also not identified well in general. The *C*-horizons have a low q . This low q happens due to the fact that a *C*-horizon represents the (nearly) unaltered parent material. On the one hand it becomes therefore difficult to describe the horizon adequately in terms of soil science. On the other hand there are often only a few parameters given for the description of the horizons. This lack leads to a large number of unknown parameters which allows the identification of 'wrong' horizons.

It is interesting to take the horizons in the context of complete soil profiles. Table 7 incorporates some examples. The column 'horizon sequence' shows an example for an ideal sequence as defined in the German Soil Systematics. A very interesting observation may be made for the *Parabraunerde* and the *Podsol*. Both soil types are stamped by a process which depends on vertical water and matter fluxes in contrast to the other examples shown. In both cases the illuvation horizons (*Bhs*, *Bsh*, *Bt*) have a higher quality than the eluvation horizons (*Ahe*, *Ae*, *Al*).

5.3 Index of Missing Essential Parameters

The IMEP is not very high. The mean value is 17, that means about 30% of the required variables are missing. The IMEP varies from 0% to 100%, whereas the maximum only occurs after the application of the second method to avoid empty results. It is not possible to give any information on the most uncertain type of horizon (e.g. gleyic or podzolic horizons) because the values spread widely over the total set of horizons.

Figure 6 and 7 allow further interpretations of the IMEP. Figure 6 shows the dependence between the number of missing values and the IMEP. As to be expected, there is a positive correlation. Nevertheless, the number of missing values increases stronger than the IMEP. We take this value as an indicator on the flexibility of the identification system. The IMEP remains moderate even if the number of missing values increases. The vertical lines in figure 6 originate in the integers of the number of missing values. The horizontal lines are artefacts which can not be assigned to specific horizons.

We assumed a correlation between the IMEP and the quality of the results. Our hypothesis was:

The more parameters are missing, the poorer is the quality since the rule-based system can not eliminate 'wrong' results. But there is not such a correlation as to be seen in figure 7. The diagram shows two positive characteristics of the identification system:

- It is not overfitted. Otherwise the quality of the results would probably decrease with decreasing IMEP.
- It is powerful and flexible. Otherwise the quality of the results would decrease with increasing IMEP.

The wide ranging values in both figures are also a sign for the variety in the expert's identifications. Another point of interest is the need to use the functions to avoid empty results. The matter is characterized with the values shown in table 8. More than 50 percent of the horizons were identified without the additional methods, and almost all horizons had a result after the first identification extension. In a few cases no result could be computed due to the filtering of overlaying horizons.

6. Conclusions and Perspectives

We presented a new approach to model the identification of genetically defined horizons. Using fuzzy sets the verbal horizon definitions were successfully translated into IF-THEN-rules. Those rule sets were utilized to develop a computer program for soil identification. The results generated by the new system are both reliable and reasonable. It was not our goal to introduce a totally new approach for classifying soils, since we believe the German soil ordering system is a good representation of soil properties. However, we were able:

- to handle genetic and qualitative soil horizon definitions,
- to achieve objective soil horizon identifications with exact definitions,
- to utilize one identification tool both for field work and data base observations,
- to handle incomplete data sets and
- to prevent blank identifications.

Our approach will help improve the current German Soil Taxonomy. The missing and overlapping components of the definitions will be eliminated during further development and testing of the rule based system for soil horizon identification. Ambiguous definition interpretations will be replaced with precise designation rules. The parameters list for soil horizon identification (table 1) provides an overview of the minimum parameter set required for the proper identification of soil horizons or soil profiles.

The methods used in our approach at first appeared to introduce an uncertainty in the identification results. This uncertainty was no greater than the uncertainty and error generated with the current system. Taking into account that the current horizon definitions lead to subjective identification results the quality of our identification model is actually higher than the results produced with the old system. With an increasing knowledge of the soil forming processes the uncertainty will be improved upon.

The next step in our current work is the combination of the soil horizons to determine specific profiles to complete the soil identification model. Later extended tests must follow. Ideally soil scientists and those involved with soil surveying will use the system for automated identification

and generate feedback into the ongoing model development. It is our hope that this continuous improvement and feedback will increase the quality and the acceptance of the new approach.

Acknowledgements

We thank the *German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft - DFG)* for their financial support. Chris Tarn helped to improve the quality of the paper.

References

- Arbeitsgemeinschaft Boden, 1996. Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und die Geologischen Landesämter der BRD, 4th Eds., Hannover.
- AG Bodenkunde, 1965. Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover.
- Albrecht, C., Jahn, R. and B. Huwe, 2005. Soil Systematics and Soil Classification, Part II: The German soil science situation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, in press (in German with English abstract).
- Ameskamp, M., 1997. Three-dimensional rule-based continuous soil modelling. Uplish. PhD. Thesis, Christian-Albrechts-University, Kiel.
- Bardossy, A. and L. Duckstein, 1995. Fuzzy rule based modeling with applications to geophysical, biological and engineering systems. CRC Press, Boca Raton, New York, London, Tokyo.
- Elisabeth N. Bui, 2004. Soil survey as a knowledge system. *Geoderma* 120, 17-26.
- Carré, F., Girard, M.C., 2002. Quantitative mapping of soil types based on regression kriging of taxonomic distances with landform and land cover attributes. *Geoderma* 110, 241-263
- DBG (Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft) 1998. Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate Deutschlands. *Mitteilungen der DBG, Band 86* (in German).
- DBG (Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft) 1991-2001. Exkursionsführer. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.*, 70, 77, 82, 84, 90, 94, 100 (in German).
- Friedrich, C., Fohrer, N., Frede, H.-G., 2002. Quantification of soil properties based on external information by means of fuzzy-set theory. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 511-516.
- Galbraith, J.M., Bryant, R.B., Ahrens, R.J., 1998. An expert system for Soil Taxonomy. *Soil Sci.* 163 (9), 749 – 758.
- Gehrt, E., Beckmann, T., Dultz, S., Hahn, K., Hilgers, A., Jarmer, T., Rathgeber, A., Schmidt, M., 1999. Böden der Lößbörde und des Berglandes. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 90, 249 – 278 (in German).
- Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., Stein, A, 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 120, 75-93
- Klir, G.J., Yuan, B. 1995. Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Kubiens, W., 1953. Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas. Ferdinand Enke Verlag,

- Stuttgart, Germany (in German).
- Kuntze, H., G. Roeschmann and G. Schwerdtfeger, 1994. *Bodenkunde*. Ulmer, Stuttgart, Germany (in German).
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.
- McBratney, A.B., Odeh, I.O.A., Bishop, T.F.A., Dunbar, M.S., Shatar, T.M., 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97, 293-327.
- Mazaheri, S.A., Koppi, A.J., McBratney, A.B., 1995. A fuzzy allocation scheme for the Australian Great Soil Groups Classification system. *European J. Soil Sci.* 46, 601 – 612.
- Mückenhausen, E., 1965. The soil classification system of the Federal Republic of Germany. *Pedologie* 3, 57-74.
- Mückenhausen, E., 1985. *Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen*. 3rd Eds., DLG-Verlag, Frankfurt am Main, Germany (in German).
- Müller, W., Lüders, R., Benzler, J.-J., 1984. Ein anwendungsorientiertes Klassifikationssystem für Bodentypen auf Grundlage der Quantifizierung von Bodenmerkmalen und Bodeneigenschaften. *Geol. Jahrb.* A75, 663-714 (in German with English abstract).
- Riedler, C., Jandl, R., 2002. Identification of degraded forest soils by means of a fuzzy-logic based model. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 320-325.
- Scheffer, F. and P. Schachtschabel, 1998. *Lehrbuch der Bodenkunde*, 14th Eds. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, Germany (in German).
- Shi, X., Zhu, A.X., Burt, J.E., Qi, F., Simonson, D., 2004. A Case-based Reasoning Approach to Fuzzy Soil Mapping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 885-894.
- Schlichting, E. (1969): Genetische und effektive Klassifikation von Böden. *Zeitschr. Pflanzenern. Bodenk.* 123, 3, 221-231 (in German with English abstract).
- Siebel, W., 1968. System, Klassifizierung und Messung. In: Diemer, A. (Ed.), *System und Klassifikation in Wissenschaft und Dokumentation*, Verlag Anton Hain, Meisenheim am Glan, Germany, pp. 120-131 (in German).
- Tayfur, G., Ozdemir, S., Singh, V.P., 2003. Fuzzy logic algorithm for runoff-induced sediment transport from bare soil surfaces. *Adv. Water Res.* 26, 1249-1256.
- Triantafilis, J., Ward, W.T., Odeh, I.O.A., McBratney, A.B., 2001. Creation and Interpolation of Continuous Soil Layer Classes in the Lower Namoi Valley. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 403-413.
- Wittman, O. (1997): Soil classification of the Federal Republic of Germany. *Mitt. DBG*, 84, 253-276.
- Zadeh, L., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8 (3), 338-353.
- Zimmermann, H. J., 2001. *Fuzzy set theory - and its applications*, 4 Eds. Kluwer Academic Publishers, Boston.

Table 1: Examples for the similarity q as a measurement for the quality of the identification result.
For further explanation please refer to the text.

<i>Expert's identification</i>	<i>Computed result</i>	q
Ahe	Ahe	1
Ahe	Aeh, Ah, Ae, Ael	0.8
Ahe	Ai, Al, Ap	0.6
Ahe	Bh, Ghr	0.2
Ahe	Sw, Cv, Bs	0

Table 2: Parameters for soil horizon identification and their individual representation as linguistic variables

Parameter	Number of fuzzy sets	Names of fuzzy sets	Notes
Lamellae horizons	2	yes / no	
Base-saturation	3	low / middle / high	
Soil cultivation	3	never / irregular / regular	Up till now only extractable from the horizon name
Biogenic admixture	2	yes / no	Up till now only extractable from the horizon name
Accumulation of sesquioxides under oxidative conditions	2	yes/ no	
Munsell - hue	5	red / yellow / green / blue / purple	
Munsell - value	3	dark / middle / bright	
Munsell - chroma	3	sallow / middle / bright	
Hue change	3	lower hue / unchanging / higher hue	one parameter per ratio of the Munsell-value from the actual horizon and the horizon laying above and the horizon laying below
Color change	3	darker / unchanging / brighter	/ratio of the Munsell-value from the actual horizon and the horizon laying above
Ratio value/chroma	3	low / middle / high	
Spots	6	none / very few / few / middle / much / very much	
Spots only on root channels	2	yes / no	
Structure	2	yes / no	one parameter per structure for crumb, single-grain, lump, coherent, aggregate, prismatic, and sub-prismatic structure
Location on the base of waters	2	yes / no	
Influence of ground water	2	yes / no	

Parameter	Number of fuzzy sets	Names of fuzzy sets	Notes
Humus distribution	3	horizontal non-uniform / vertical non-uniform	/no information in the data
Saturated hydraulic conductivity	3	low / middle / high	
Location on unchanged parent material	2	yes / no	
Location in the profile	5	top / top - middle / middle/middle - sub / sub	
Bulk density	3	low / middle / high	
Salinity	4	none / low / middle / high	
Horizon thickness	3	thin / middle / thick	
Mottling due to stagnant water	2	yes / no	
Soil cultivation by deep (>4dm) working machines	2	yes / no	Up until now only extractable from the horizon name
Mineralic horizon	2	yes / no	
Organic matter	5	none / few / middle / much / organic	
Organic matter change			
Plaggen epipedon	2	yes / no	Up until now only extractable from the horizon name
Layering	2	yes / no	no information in the data
Silt	4	few / medium / much / very much	
Secondary carbonate	3	none / few / much	
Sesquioxide change	3	fewer / unchanging / more	one parameter per ratio of the sesquioxide content from the actual horizon and the horizon laying above and the horizon laying below
Clay	4	few / medium / much / very much	

Parameter	Number of fuzzy sets	Names of fuzzy sets	Notes
Clay change	5	much less / less / more	/one parameter per ratio of the clay content from the actual horizon and the horizon laying above and the horizon laying below
Cutanic features	2	yes / no	Up till now only extractable from the horizon name
Peat	3	none / few / much	
Concretions	3	none / few / much	many concretions signifies a hardpan
Weathering	3	no / middle / strong	Up till now only extractable from the horizon name
Roots	2	yes / no	
Decomposition of organic matter	4	little / middle / strong / no OM	

Table 3: Example of an automated horizon identification

Horizon number	Expert classification	Automatic identification	Possible intergrade horizons		
1	L	L	1		
2	Of	Of	1		
3	Oh	Oh	1		
4	(Ahe)Ae	Ahe	1	Sw	0.458
		Alh	0.468		
5	Bhs	Ahe	1	Sw	0.681
6	Bs	Bs	1	Al	0.391
		Bvt	0.736	Bhs	0.744
		Sw	0.378	Bs	1
				C	0.112
				E	0.072
				Go	0.244
				Gw	0.306
				M	0.661
				Sd	0.233
		Sw	0.529		
7	Bv	Bfv	1	Ah	0.565
		Bv	1	Al	0.515
				Go	0.404
				Sw	0.578
8	BvCv	Bfv	1	Ah	0.466
		Bv	1	Al	0.435
		Cv	0.416	Bv	1
				Go	0.607
				Sw	0.424

Table 4: Missing values in the input values for the automatic soil horizon identification

Proportion of missing values	Number of horizons	Proportion of all horizons [%]
< 10%	110	4.5
10 - < 20%	691	28.5
20 - < 30%	525	21.6
30 - < 40%	331	13.6
40 - < 50%	282	11.6
50 - < 60%	392	16.2
≥ 60%	95	3.9

Table 5: Availability of selected input variables

Variable	Availability [%]
Base-saturation	55
Soil color	75
Spots	94.7
Structure	54
Saturated hydraulic conductivity	20
Bulk density	28
Horizon thickness	95.8
Influence of ground water	99.79
Organic matter	78
Silt	72
Clay	75
Roots	34

Table 6: Mean quality of the identification results for selected soil horizons

Name	No.	Mean <i>q</i>	Name	No.	Mean <i>q</i>	Name	No.	Mean <i>q</i>	Name	No.	Mean <i>q</i>
Aa	5	0.73	Bbs	3	1	C	80	0.31	Ha	2	0.7
Acxh	4	1	Bbt	6	1	Cc	17	0.27	Hcr	5	0.38
Ae	15	0.28	Bcv	2	0.36	Ccv	20	0.22	Hr	15	0.29
Aeh	40	0.4	Bh	8	0.47	Ckc	13	0.18	Ht	2	0.53
Ael	2	0.25	Bhs	24	0.46	Cn	27	0.22	Hv	4	0.89
Ah	141	0.4	Bht	4	0.41	Cv	154	0.21	Hw	8	0.69
Ahe	32	0.33	Bs	16	0.34	E	14	0.75	L	45	0.04
Ahl	6	0.28	Bsh	18	0.4	Gco	4	0.55	M	33	0.11
Ai	7	0.12	Bsv	15	0.41	Gcr	2	0.8	Of	47	0.86
Al	17	0.21	Bt	26	0.65	Go	123	0.68	Oh	58	0.75
Alh	2	0.2	Btv	8	0.47	Gor	44	0.85	P	3	0
Ap	111	0.89	Bv	93	0.33	Gr	69	0.83	R	4	1
Axh	27	0.81	Bvs	2	0.41	Gro	28	0.77			
Axp	23	1	Bvt	8	0.86						

Table 7: Identification quality in the context of whole soil profiles. The mean q of the profile is the arithmetic mean of the values in the third column.

Soil	Horizon sequence	q of the single horizons	Mean q of the profile
<i>Ranker</i>	<i>Ah/C</i>	0.4 / 0.31	0.36
<i>Tschernosem</i>	<i>Axh/Axh+C/C</i>	0.81 / 0.56 / 0.31	0.56
<i>Braunerde</i>	<i>Ah/Bv/C</i>	0.4 / 0.33 / 0.31	0.35
<i>Parabraunerde</i>	<i>Ah/Al/Bt/C</i>	0.4 / 0.21/ 0.65 / 0.31	0.39
<i>Podsol</i>	<i>Ahe/Ae/Bsh/Bhs/C</i>	0.33 / 0.28 / 0.4 / 0.46 / 0.31	0.36
<i>Pseudogley</i>	<i>Ah/Sw/Sd</i>	0.4 / 0.74 / 0.49	0.54
<i>Gley</i>	<i>Ah/Go/Gr</i>	0.4 / 0.68 / 0.83	0.64

Table 8: Demand of the extended approaches to avoid empty results

Applied method	Number	%
after normal identification	1240	51.1
after identification with 'relaxed definition'	1071	44.2
after detection of intergrade horizons	100	4.1
no result after filtering	15	0.6

Figure captions

Figure 1: Development of a rule-based system

Figure 2: Flow chart of the algorithm for the automated soil horizon identification

Figure 3: The linguistic variables 'clay content' and 'base saturation'

Figure 4: Sample identification of a soil horizon

Figure 5: Dependence of the quality and the number of results on the membership. q and the number of results are standardized.

Figure 6: Influence of the number of missing values on the uncertainty of the result, $R^2 = 0.77$.

Figure 7: Correlation between the uncertainty of the input variables and the quality of the result, $R^2 = -0.18$.

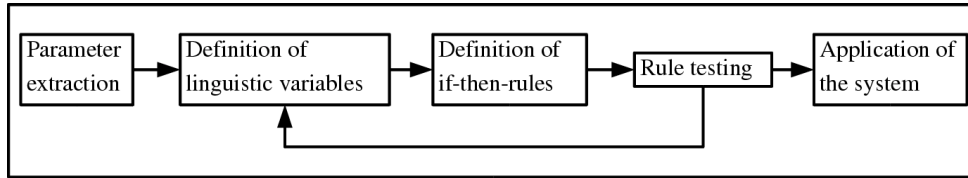


Figure 1, Albrecht et al.

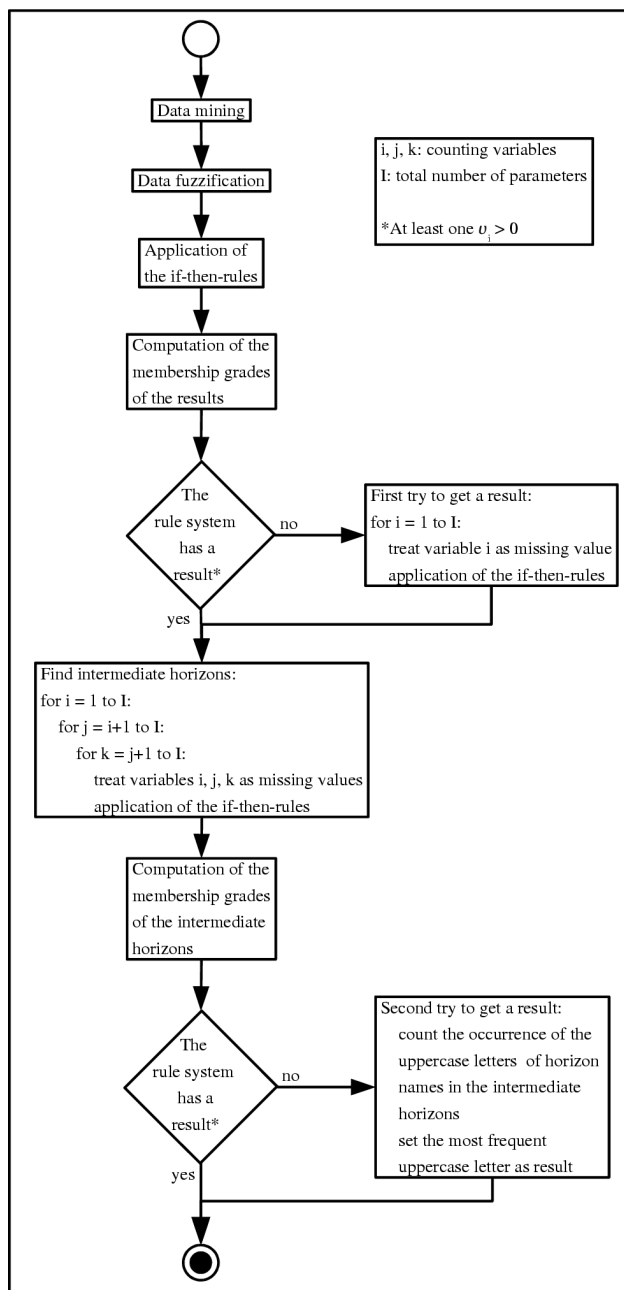


Figure 2, Albrecht et al.

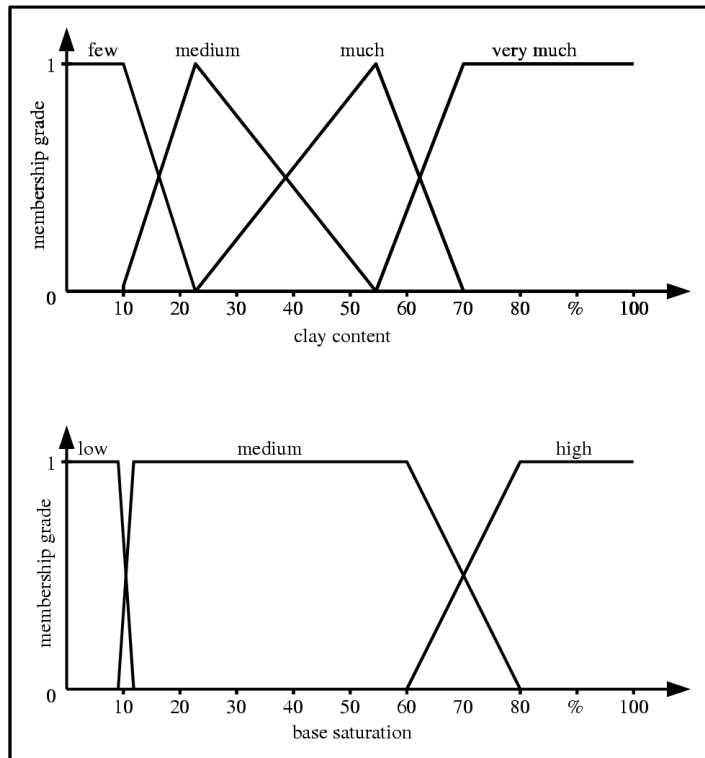


Figure 3, Albrecht et al.

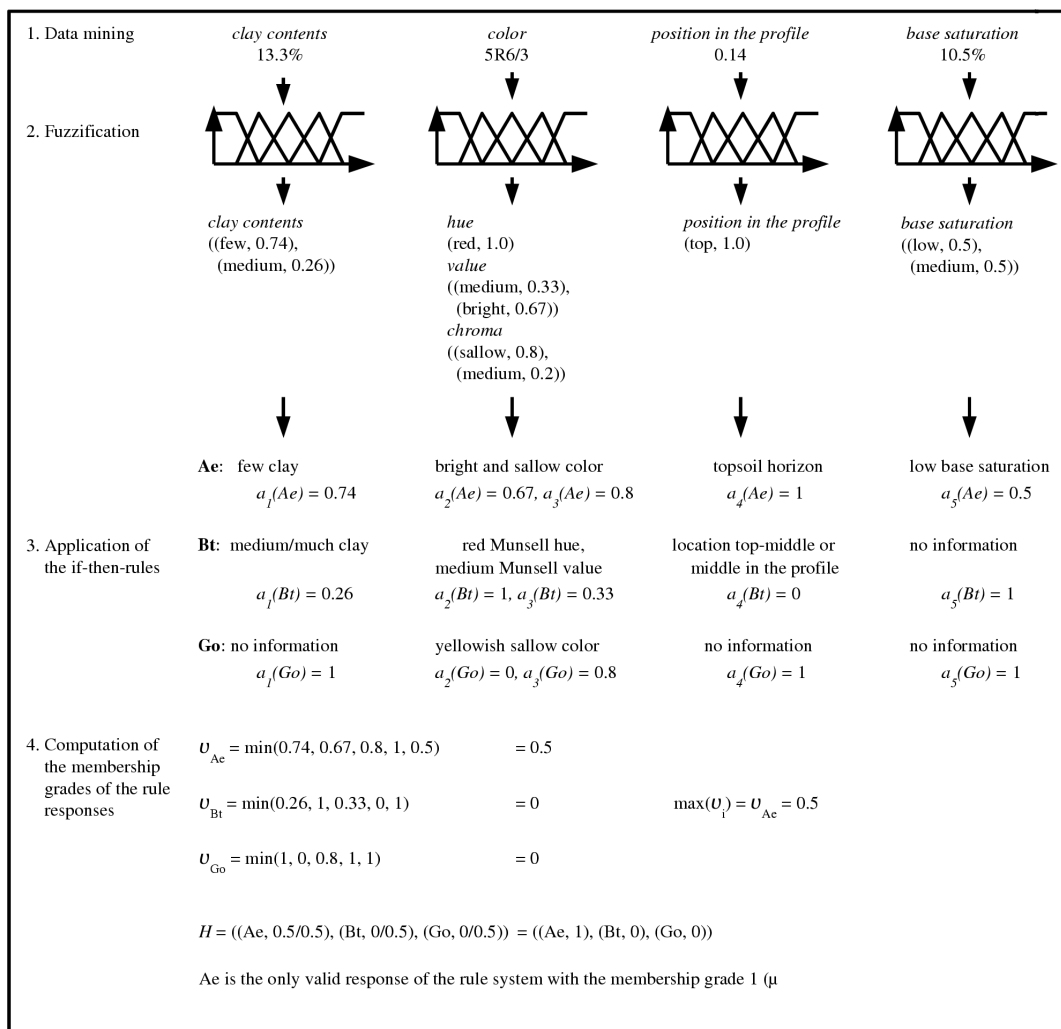


Figure 4, Albrecht et al.

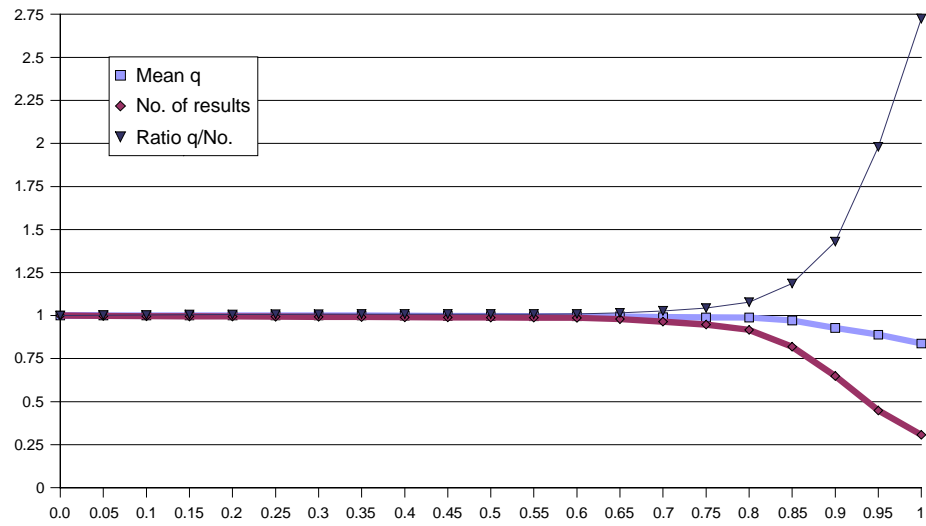


Figure 5, Albrecht et al.

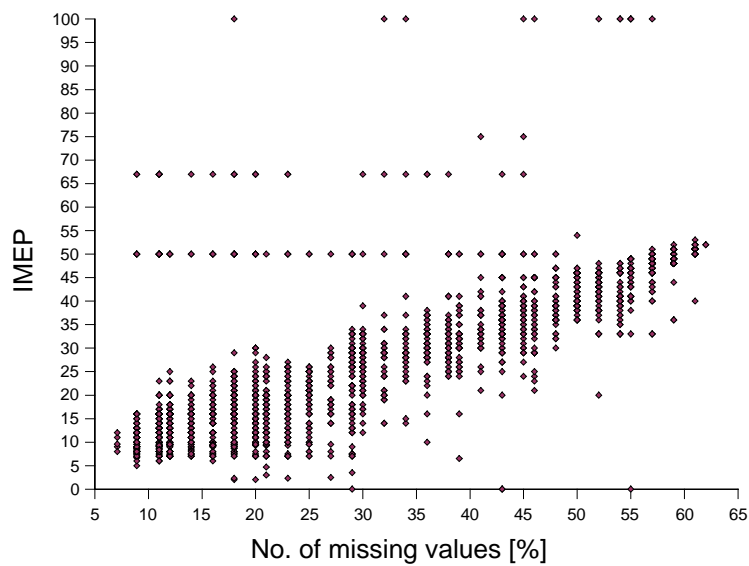


Figure 6, Albrecht et al.

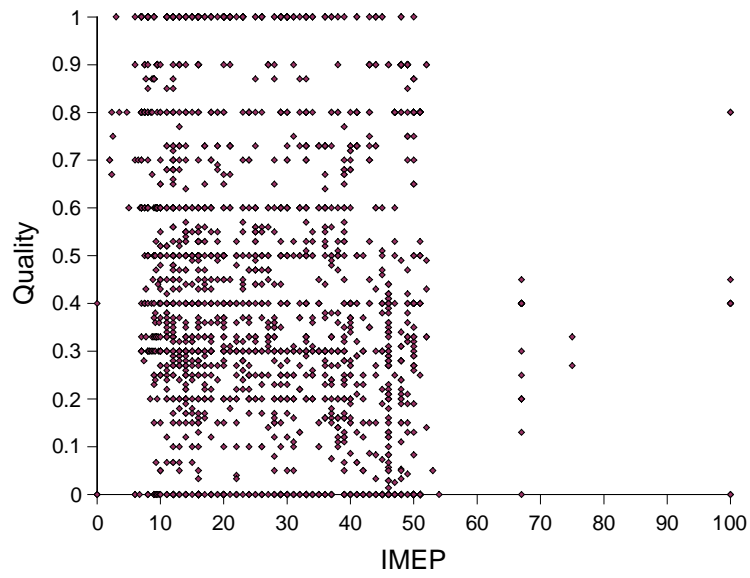


Figure 7, Albrecht et al.

Kapitel 10

Vergleich von Ansätzen zur Bodenidentifikation

In der vorliegenden Form vorläufig angenommen zur Veröffentlichung in: P. Lagacherie, A.B. McBratney und M. Voltz (Hrsg.): Band xx der 'Developments in Soil Science'. Elsevier, Amsterdam. Die Veröffentlichungen in diesem Band durchlaufen das normale Review-Verfahren. Die folgenden Seiten enthalten das eingereichte Manuskript.

Comparison of Approaches for Automated Soil Identification

Christoph Albrecht^{a*}, Bernd Huwe^a, Reinhold Jahn^b

^a*Soil Physics Group, University of Bayreuth, D-95440 Bayreuth, Germany*

^b*Institute of Soil Science and Plant Nutrition, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, Weidenplan 14, D-06108 Halle, Germany*

1 Abstract

Pedometric methods are often used for the classification of soils. One application is the allocation of individual soil profiles to the taxonomic units of a national soil taxonomy which we term identification. We compare three identification approaches from Australia, the USA, and Germany on whether they are capable of reproducing the conventional soil identification process. We also investigate the data requirements and the significance of the results.

Key words: soil classification, Australian Great Groups Classification, US Soil Taxonomy, German Soil Systematics, fuzzy k-means, expert system, rule based system

* Corresponding author. Soil Physics Group, University of Bayreuth, D-95440 Bayreuth, Germany, Tel. ++49-(0)921-552193, fax: . ++49-(0)921-552246
Email addresses: christoph.albrecht@uni-bayreuth.de (Christoph Albrecht), bernd.huwe@uni-bayreuth.de (Bernd Huwe), jahn@landw.uni-bayreuth.de (Reinhold Jahn)

2 Introduction

During the last few decades many efforts were undertaken to develop program systems which would automate the classification and identification of soils. Most of them are only valid for specific purposes or for narrowly defined areas. Common examples of such systems would be the classification of soils according to their heavy metal concentration by Markus and McBratney (1996) or the classification of soils on an alluvial plain in Greece by Kollias et al. (1999). Only two approaches exist modelling national soil taxonomies. The first is the fuzzy allocation scheme for the Australian Great Soil Groups (AGSG) Classification system developed by Mazaheri et al. (1995a). The second is the Expert System for Soil Taxonomy developed by Galbraith et al. (1998). At present a third system for automated identification is under development. It is applicable for the German Soil Systematics and based on fuzzy If-Then-rules (Albrecht et al., 2004).

The approaches possess varying structure and require different amounts of data. These criteria are not a scientific exercise testing the advantages of different methods and to achieve the highest accuracy, but rather are a consequence of the varying conditions and prerequisites of each national soil taxonomy.

The approaches considered here do not enable the creation of whole soil maps as described in McBratney et al. (2003). The goal of our research is to compare approaches for automatic soil profile identification. The advantages of such tools are widespread. It is possible:

- to combine modern techniques with grown-up nomenclatures,
- to easily translate old data into modern nomenclatures ,
- to provide high quality standardized input data for other approaches and
- to accelerate the soil identification process.

Another field of application would be the quality assessment of soil data.

3 Approaches for automated soil identification

3.1 The fuzzy allocation scheme for the Australian Great Soil Groups Classification system

The AGSG Classification system is based on the concepts developed by Dokuchaev. It possesses different hierarchical levels, whereas all levels except the Great Groups find little practical use. Despite certain disadvantages it remains very popular in Australia (Moore et al., 1983). It has officially been replaced by the new Australian Soil Classification (Isbell, 1996).

The allocation scheme was published by Mazaheri et al. (1995a). The Great Soil Groups are characterised by a set of 20 properties such as soil colour or carbonate content. The Groups are defined as a whole profile without regards to diagnostic horizons or information pertaining to the depth. Fifty prototypes of the Great Groups were determined while taking into account the modes and means of the parameter values as well as information from the general description of the Great Groups. New individuals may be allocated by computing the distance between the individual and the prototypes in a multi-dimensional space. Figure 1 shows the identification procedure in principle.

The mathematical background rests on the clustering algorithm fuzzy *k*-means with extragrades, which is described in detail in a number of publications, e.g. De Gruijter and McBratney (1988) or McBratney and De Gruijter (1992). The allocation scheme was programmed in a spreadsheet with a user interface (Mazaheri et al. 1995b). It allows the identification of one soil profile at a time.

3.2 The Expert System for Soil Taxonomy

The US Soil Taxonomy (USDA, 1998) is one of the most well known soil ordering systems in the world. The taxonomic units are defined by the occurrence of diagnostic horizons or properties. A sophisticated system for the combination of syllables is used for the labelling of these units at different hierarchical levels. Soil profiles are identified by querying a sequence of single-access, eliminatory keys which is a classification key.

The computational design of the Expert System adapts this structure (Galbraith et al., 1998). The definitions of the Keys to Soil Taxonomy are translated into decision trees. Added heuristic knowledge in the form of expert rules prevents indecision. Seventy independent properties must be known to identify twenty-seven subsections from the Histosol, Spodosol, Andisol, and Oxisol soil orders. A minimum data set is required when using only the expert rules, which consists of 13 properties, predetermined default values for 20 other properties and estimated values for three particle size properties.

The Expert System is intended to query soil data bases under consideration of the large amount of data. A strongly simplified illustration of the system is given in figure 2.

3.3 The Identification System for the German Soil Systematics

The German Soil Systematics is a morphogenetic soil ordering system comprising six levels of hierarchy (AG Boden, 1998; Scheffer and Schachtschabel, 1998). The central category consists of the soil types (*Bodentypen*) which are roughly equivalent to the Great Groups in the US Soil Taxonomy. The identification process is accomplished in two steps. At first the single horizons are identified. Afterwards the unit of the soil systematic is derived from the horizon sequence under consideration of the diagnostic horizons' depth.

The soil horizons and profiles are described for the most part verbally as a consequence of the morphogenetic character of the systematics. The focus of each definition lies on the processes which determine the soil properties. In addition a certain number of vague threshold values are given to aid in the soil identification. They are treated as assisting or guiding values.

Currently we are developing an identification software program, the first component of which is fully described in Albrecht et al. (2004). The two-step procedure identifies soil horizons and profiles separately (figures 3 and 4). A set of 89 If-Then-rules with 27 If-components is defined for the first step (horizon identification), one for each horizon. The results of which are used as parameters for the second step, which is the delineation of soil profiles. At that stage no additional information is

required. The main challenge is to translate the process-based definitions into property-based rules. Decisive parameters must replace the descriptive pedogenetic information. Nevertheless, the identification system should be as simple as possible in order to be applicable both during field and computational work. We developed two special techniques for ensuring proper identifications:

- Single parameter values may be set to as unknown to prevent outliers in the profile descriptions.
- Single If-components may be skipped in order to handle inconsistent definitions and to prevent the influence of absent values.

Due to the mostly verbal descriptions of the taxonomic units the vagueness of the systematics is high. The use of fuzzy methods is thus essential.

The identification system is designed to operate both on single soil profiles and on large soil data bases. The first tests show a satisfying performance. Regardless of these promising first results some improvements still need to be accomplished.

4 Differences between the identification approaches

4.1 The structure of the underlying soil ordering system

The identification schemes for the soil taxonomies possess a different structure. The fuzzy allocation scheme requires a unique parameterized description of the taxonomic units. This requirement is achieved using the descriptions of the Great Groups in Stace et al. (1968). Taking into account the structure of the underlying soil ordering system the fuzzy allocation scheme is not a viable choice in reproducing either the German Soil Systematics or the US Soil Tax. For the first system, the lack of quantifiable information is a fundamental drawback. The US Soil Tax is structured as a key, therefore it is easier to determine which properties a soil does *not* have than to determine its typical appearance.

In Germany and in the USA a sufficient set of soil profile descriptions could form the basis of a cluster analysis which would become the basis for a fuzzy allocation scheme. This goal is difficult

to achieve since the single soil profile descriptions differ in their set of required parameters. This difference leads to irregular datasets and violates the demand for unique profile descriptions. Furthermore, single parameters have a different weight in different definitions which may result in wide ranging parameter values. This result could have a strong influence on the identification. Lastly, a likely problem exists when one wishes to obtain a data set both unique and large enough to achieve statistical validity.

As stated above the US Soil Taxonomy is designed as a classification key. Adapted to a programmable version it becomes a decision tree. The other possible programming approaches are not expected to be better suited since an adequate reproduction of the US Soil Tax requires a sequence of queries on whether particular conditions are matched or not. The use of a rule based system is disadvantageous since some queries are dependant on others.

For the German Soil Taxonomy, only a set of If-Then-rules is an appropriate tool in reproducing the identification process. The given definitions focus heavily on the soil forming processes and their differentiating properties. Therefore any computational identification process would only be able to test the appearance of selected parameter values.

The single taxonomic units do possess a stand-alone definition. That means the relationships between different soil types are easy to describe, yet are neither part of the definition nor of the soil profile identification. Therefore the If-Then-rules must be queried in tandem or parallel. The use of decision trees would lead to poor results due to the non-hierarchical structure of the identification instruction. In contrast to the allocation scheme of the AGSG the fuzzy approach is not applicable to model the continuity of the pedosphere but rather to only handle the verbal descriptions. This goal should likely be the task of further studies.

4.2 Required parameters

The consideration of required parameters may be divided into two components; the number of

parameters and the quality of the data sets.

The Australian approach places the highest demand on the data quality. The discriminate analysis equations become insolvable when a single gap occurs in the soil profile description. This fact is most likely a problem since soil data bases are often incomplete. During the field work the soil surveyor could falsely use a default parameter value preliminary provided by the software instead of choosing the correct one. Such misuse of the software would lead to misidentifications.

The other identification systems have built-in prevention mechanisms for the case of absent values. The continuation of the computation is guaranteed by assuming default values or skipping unknown parameters, respectively. The American approach requires a minimum of 13 parameters to be known, whereas the German identification system has no preconditions regarding the completeness of the parameter set. The successful completion of the identification must be paid with a higher uncertainty or a lower accuracy.

As stated above, the identification procedures require 20, 70, and 27 parameters to be known, respectively. In the first two cases, the number is valid for a whole profile, whereas the parameters must be determined for each soil horizon separately in the latter case. The small number in the Australian approach represents the minimum data set required to adequately separate the Great Soil Groups. The number of parameters required for the other identification systems results from the aggregation of all parameters used in the definitions. It is easy to notice that the American identification system requires much more information, which is a direct consequence of the extensive and detailed definition of the taxonomic units.

4.3 Significance of the identification result

The American Expert System provides the best results when one takes into account its ability to reproduce the underlying soil ordering system. The decision trees used are practically an exact duplication of the structure of the US Soil Taxonomy. The main disadvantage of both the Australian

and the German approaches is the likelihood of subjective interpretations made by different soil surveyors. This subjectivity can hardly be implemented in a computer program. Aside from this drawback the identification process is well translated in all approaches.

Another aspect of interest is the comparison between the computed results and the results determined by a soil surveyor. The fuzzy allocation scheme for the AGSG clearly distinguishes from that of the other approaches. The calculation of the distance between an individual soil and the prototypes allows the quantitative characterization of gradual transitions. Therefore the information content of the computed results is higher and more precise than the information content of the results determined conventionally. The Expert System for Soil Taxonomy can not produce better results than that done by a soil surveyor since the identification rules are the same both in the Expert System and in the Keys to Soil Taxonomy. The advantages lie in the fast identification and the consequent consideration of all threshold values by the computer program. The results of the German identification program may achieve the quality of the Australian program. The parallel querying of several fuzzy If-Then-rules results in several outcomes with different membership grades. It is thus possible to characterize intergrades between soil types, although the quantification of similarity is restricted due to several circumstances.

5 Conclusions

Several approaches exist generally automating soil identification. They differ in their structure and required parameters. It is not possible to compare the identification systems directly since they are optimized to operate on different soil ordering systems under varying conditions. The results of one approach may not be readily adapted to those of another approach.

Scientists who aim to develop a soil identification system should carefully analyze the structure of the underlying soil ordering system as well as the availability of soil data. The former is meaningful for the decision concerning the appropriate approach and the latter is important in assessing the quality of the results. The use of fuzzy sets is strongly recommended in order to incorporate vague verbal descriptions which are almost always a component of soil identification schemes.

We propose the Australian approach for the development of a new identification system where no pre-existing rules must be considered and a good soil data base is available. The resulting information would most closely resemble the continuous nature of the pedosphere.

6 Acknowledgements

We thank the *German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft - DFG)* for financial support. Chris Tarn helped to increase the quality of the paper.

7 References

- AG Boden, 1998. Systematik der Böden der BRD. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 86.
- Albrecht, C., Huwe, B., Jahn, R., 2004. Automatic Classification of Genetically Defined Soil Horizons. In: Proceedings of the International Conference on Innovative Soil Resource Research, Cha-am, Thailand. In press.
- De Gruijter, J.J., McBratney, A.B., 1988. A modified fuzzy k-means method for predictive classification. In: Bock, H.H. (Ed.), Classification and Related Methods of Data Analysis. Elsevier, Amsterdam, pp. 97-104.
- Galbraith, J.M., Bryant, R.B., Ahrens, R.J., 1998. An expert system for Soil Taxonomy. Soil Science 163 (9), 749 – 758.
- Isbell, R.F., 1996. The Australian Soil Classification. CSIRO Melbourne.
- Kollias, V.J., Kalivas, D.P., Yassoglou, N.J., 1999. Mapping the soil resources of a recent alluvial plain in Greece using fuzzy sets in a GIS environment. European Journal of Soil Science 50, 261 – 273.
- Markus, J.A., McBratney, A.B., 1996. An urban soil study: heavy metals in Glebe, Australia.

- Australian Journal of Soil Research 34, 453 – 465.
- Mazaheri, S.A., Koppi, A.J., McBratney, A.B., 1995a. A fuzzy allocation scheme for the Australian Great Soil Groups Classification system. *European Journal of Soil Science* 46, 601 – 612.
- Mazaheri, S.A., Koppi, A.J., McBratney, A.B., Constable, B., 1995b. Australian Soil Identification Spreadsheet (ASIS): a program for allocating soil profiles to Australian Great Soil Groups(GSG), version 1.1.
- McBratney, A.B., De Gruijter, J.J., 1992. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades. *Journal of Soil Science* 43, 159 – 175.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3 – 52.
- Moore, A.W., Isbell, R.F., Northcote, K.H., 1983. Classification of Australian Soils. In: *Soils: an Australian Viewpoint*. Division of Soils, CSIRO, pp. 253 – 266. (CSIRO: Melbourne/Academic Press: London.)
- Soil Survey Staff (ed.), 1998. *Keys to Soil Taxonomy*, 8th ed. United States Department of Agriculture/Natural Resources Conservation Service, Washington.
- Stace, H.T.C., Hubble, G.D., Brewer, R., Northcote, K.H., Sleeman, J.R., Mulcahy, M.J., Hallsworth, E.G., 1968. *A handbook of Australian soils*. Rellim Technical Publications, Glenside, South Australia.

Figure captions

Figure 1: Identification of individual soils with the fuzzy allocation scheme for the Australian Great Soil Groups Classification system, schematic illustration

Figure 2: Identification of individual soils with the Expert System for Soil Taxonomy, schematic illustration

Figure 3: Identification of soil horizons with the Identification System for the German Soil Systematics, schematic illustration

Figure 4: Delineation of soils types with the Identification System for the German Soil Systematics, schematic illustration

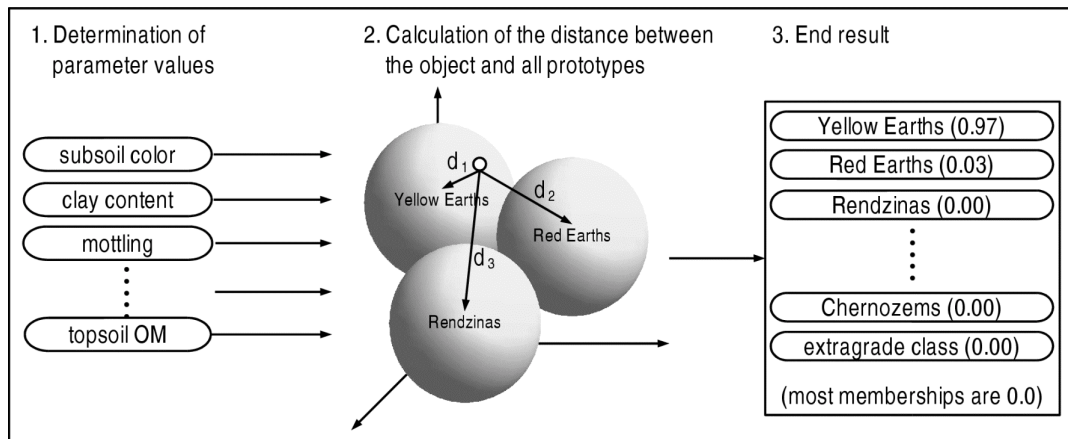


Figure 1, Albrecht et al.

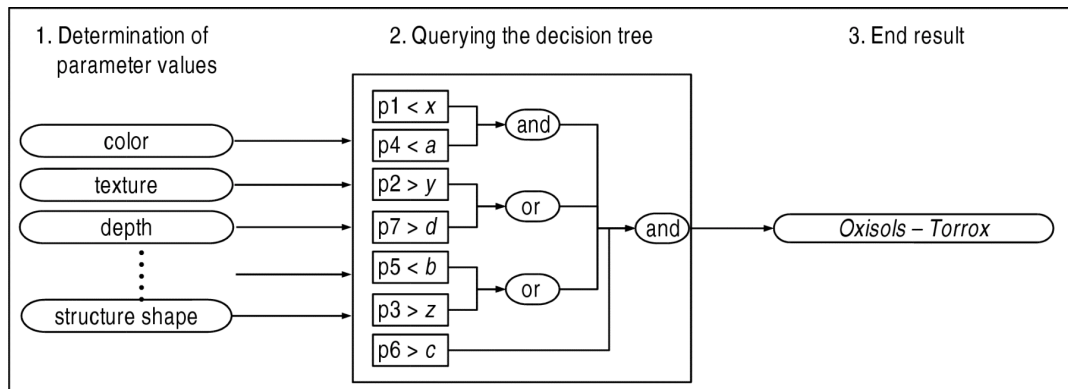


Figure 2, Albrecht et al.

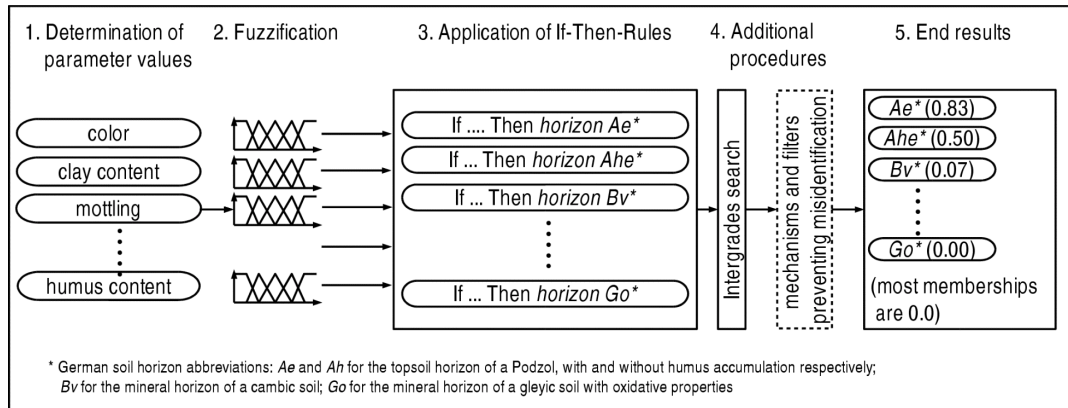


Figure 3, Albrecht et al.

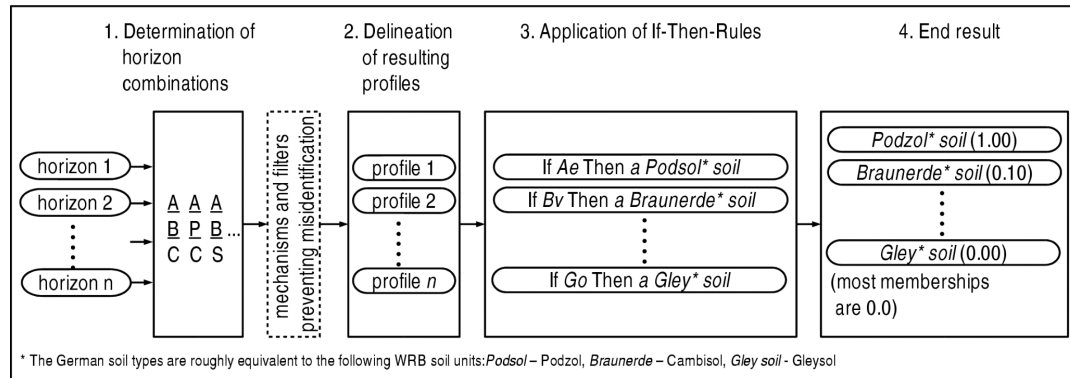


Figure 4, Albrecht et al.

Teil III

Anhang

Kapitel 11

Bestimmungsschlüssel für Bodenhorizonte

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Horizonte nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung.

Organische Substanz > 30 M-%	ja →	Resten aus Pflanzen unter Wasserschutz entstanden	ja →	regelmäßige Düngung, aber keine regelmäßige Pflugbearbeitung	ja →	Hk
	↓ nein		ja →	erkennbare sekundäre Oxidationsmerkmale, dunkler als der Horizont darunter	ja →	Hcr
	↓ nein		ja →	erkennbare sekundäre Reduktionsmerkmale, heller als der Horizont darüber	ja →	Hcr
	↓ nein		ja →	Übergang zu krümeliger bis feinpolyedrisch-körniger Aggregatgefüge	ja →	Hcvm
	↓ nein		ja →	Kohärentgefüge	ja →	Hvm
	↓ nein		ja →	erkennbare sekundäre Anreicherung von Salzen	ja →	Hcr
	↓ nein		ja →	erkennbare sekundäre Anreicherung von Salzen	ja →	Hcr
	↓ nein		ja →	Übergang zu krümeliger bis feinpolyedrisch-körniger Aggregatgefüge	ja →	Hcvm
	↓ nein		ja →	Kohärentgefüge	ja →	Hvm

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

	er erkennbare sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja →	Hcm
		nein →	Him
↓ nein	erkennbare sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja →	Hcvp
krümeliges bis feinpolyedrisch-körniges Aggregatgefüge	regelmäßige Pflugbearbeitung	ja →	Hcvp
		nein →	Hcv
↓ nein	regelmäßige Pflugbearbeitung	ja →	Hvp
		nein →	Hv
↓ nein	erkennbare sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja →	Hca
Absonderungsgefüge, Gefügekörper grob- bis feinpolyedrisch	sekundäre Anreicherung von Salzen	ja →	Hza
		nein →	Ha
↓ nein	erkennbare sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja →	Hct
grob-prismatisch gegliedertes Rissgefüge	sekundäre Anreicherung von Salzen	ja →	Hzt
		nein →	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

Ht	nein →	
Hcp	ja →	erkennbare sekundäre Anreicherung von Carbonaten
Hp	nein →	
H	nein →	
L	↓ nein OS besteht zu < 10 V-% aus Feinsubstanz →	
Ovh	ja →	Kontakt zu mCn oder xC oder Ah, über Carbonatgestein tiefschwarz, über saurem Gestein braun
Oh	↓ nein Feinsubstanz →	
Of	ja →	Feinsubstanz deutlich erkennbar
O	↓ nein nein →	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung (Fortsetzung).

Am Grunde von Gewässern und/oder im Tidebereich mit täglicher Überflutung vorkommend, i.d.R. \geq 5 M-% OS	ja \rightarrow	Humus nicht sichtbar, Horizont durch Mikroorganismen besiedelt	ja \rightarrow	Fi
	\downarrow nein	schwarz bis dunkelgrau (sauerstoffarme Bedingungen)	ja \rightarrow	Fr
	\downarrow nein	olivgrün, grau oder braun	ja \rightarrow	Fo
	\downarrow nein	angereichert mit dunkelbraunen Huminstoffen	ja \rightarrow	Fh
	\downarrow nein	zeitweilig mit Luft erfüllt	ja \rightarrow	Fw
		nein \rightarrow		F
\downarrow nein	ja \rightarrow	Reduktionsfarben $>$ 95 F-%	ja \rightarrow	Ghr
Im Tide- oder Auenbereich mit periodischer oder episodischer Überflutung liegend oder Quälwasser (falls eingedeicht) oder durch Grund-, Hang- oder Quellwasserspiegel beeinflusst			sekundäre Anreicherung an Humusstoffen	
			\downarrow nein	
			sekundäre Anreicherung von Carbonaten	Gcr
			\downarrow nein	
			sekundäre Anreicherung von Salzen	Gzr
			nein \rightarrow	Gr
			\downarrow nein	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

↓ nein Reduktionsfarben > 50 F-%	ja → sekundäre Anreicherung an Humusstoffen	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Salzen	ja → nein →	Ghor Gcor Gzor Gor
	ja → sekundäre Anreicherung an Humusstoffen	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Salzen	ja → nein →	Ghro Gcro Gzro Gro
	ja → sekundäre Anreicherung an Humusstoffen	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Salzen	ja → gebanktes Sekundärcarbonat ja → nein →	Gho Gmco Gco
	ja → sekundäre Anreicherung an Humusstoffen	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja → ↓ nein	ja → ↓ nein	Ghor Gcor Gzor Gor
↓ nein Reduktionsfarben ≥ 10 F-%	ja → sekundäre Anreicherung an Humusstoffen	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Salzen	ja → nein →	Ghro Gcro Gzro Gro
	ja → sekundäre Anreicherung an Humusstoffen	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Salzen	ja → gebanktes Sekundärcarbonat ja → nein →	Gho Gmco Gco
	ja → sekundäre Anreicherung an Humusstoffen	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Salzen	ja → gebanktes Sekundärcarbonat ja → nein →	Gho Gmco Gco
	ja → sekundäre Anreicherung an Humusstoffen	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung von Salzen	ja → gebanktes Sekundärcarbonat ja → nein →	Gho Gmco Gco

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

		sekundäre Anreicherung von Brauneisen	ja →	Raseneisenstein-Konkretionen	ja →	Gkso
				↓ nein		
				Brauneisen gebankt	ja →	Gmso
					nein →	Gso
			nein →			Go
			↓ nein			
		keine positive Reaktion beim α - α -Dipyridyl-Test	ja →			Gw
			nein →			G
			ja →	Reduktionsfarben, Reduktionsmerkmale und sehr hoher CH_4/CO_2 -Gehalt	ja →	Yr
			↓ nein			
		Bodenluft zumindest zeitweilig erhöht (≥ 10 Vol.-%)	ja →	rotbraun, Oxidationsmerkmale	ja →	Yo
			nein →			Y
			ja →	Oberbodenhorizont, MOS	ja →	R-Ah
			↓ nein			
		Mächtigkeit > 4 dm, durch nicht regelmäßiges Pflügen oder Rigolen/Tiefumbruch entstanden	ja →		nein →	R
			↓ nein			

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

Ex	ja ↑	ausgeprägte Bioturbation	ja →	nein →	E
			nein →		
P	ja ↑	ausgeprägte Bioturbation	ja →	nein →	P
	↓ nein	ausgeprägte Bioturbation	ja →	nein →	
Sq	ja ↑	wasserstauend und solo-netzartig	ja →	nein →	Sq
	↓ nein	wasserstauend und solo-netzartig	ja →	nein →	
Sdg	ja ↑	Flächen-% Nassbleichungs- und Oxidationsmerkmale, Bleich- und Rostflecken	ja →	nein →	Sdg
	↓ nein	Flächen-% Nassbleichungs- und Oxidationsmerkmale, Bleich- und Rostflecken	ja →	nein →	
Sg	ja ↑	Flächen-% Nassbleichungs- und Oxidationsmerkmale, Bleich- und Rostflecken	ja →	nein →	Sg
	↓ nein	Flächen-% Nassbleichungs- und Oxidationsmerkmale, Bleich- und Rostflecken	ja →	nein →	
Scd	ja ↑	sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja →	nein →	Scd
	↓ nein	sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja →	nein →	
Swd	ja ↑	Flächen-% Nassbleichungs- und Oxidationsmerkmale, Bleich- und Rostflecken	ja →	nein →	Swd
	↓ nein	Flächen-% Nassbleichungs- und Oxidationsmerkmale, Bleich- und Rostflecken	ja →	nein →	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

Srd	Reduktionsmerkmale	ja → nein →	
Sd			
Serw	Rostflecken nur an Wurzelbahnen	ja → nein →	sesquioxid-verarmt ja → nein →
Srw			
Ssw	Anreicherung mit Sesquioxiden	ja → nein →	
Scw	sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja → nein →	
Sew	sesquioxidverarmt, Eluvialfarben, < 5 Flächen-% Rostflecken und/oder Konkretionen	ja → nein →	
Sdw	Kf ≈ 10 cm/d	ja → nein →	
Sw			
S	Nassbleichungsmerkmale (Flecken, schwache Nassbleichung) und Oxidationsmerkmale (Rostflecken, Konkretionen) u n d kf meist ≥ 10 cm/d	ja → nein →	
			nein →

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung (Fortsetzung).

Oberbodenhorizont	ja	regelmäßige Pflugbearbeitung	ja	sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja	→	Acxp
	→		→	→	→	→	
			ja	sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja	→	Axp
			→	→	→	→	
			ja	sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja	→	Acp
			→	→	→	→	
			ja	über G- oder S-Horizont und $\geq 15 M\%$ OS	ja	→	Aap
			→	→	→	→	
			ja	nein	nein	→	Ap
			→	→	→	→	
			ja	MOS, horizontal ungleichmäßig humos, violettstichig, mit diffus-wolkigen Bleichflecken, deren Farbe dem Ae entspricht	ja	→	Ahe
			→	→	→	→	
			ja	nein	nein	→	Ae
			→	→	→	→	
			ja	mit Resthumus	ja	→	Ahl
			→	→	→	→	
			ja	sehr stark aufgehellte, hohe Tongehaltsdifferenz	ja	→	Ael
			→	→	→	→	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung (Fortsetzung).

	nein →	Al
↓ nein Mächtigkeit < 2 cm oder ja Humusgehalt unter MOS → oder Humus nicht sichtbar, jedoch von Mikroorganismen besiedelt		Al
↓ nein über G- oder S-Horizont und ≥ 15 M-% OS	ja → regelmäßige Düngung, aber keine regelmäßige Pflugbearbeitung →	Aka
	nein →	Aa
↓ nein MOS	ja → regelmäßige Düngung, aber keine regelmäßige Pflugbearbeitung →	Akh
	↓ nein ≥ 1 dm mächtig und Basensättigung ≥ 50 %, → stabiles Aggregatgefüge und mit ausgeprägter Bioturbation (Regenwurmtätigkeit), unter Wald: Humusform L-Mull	Acxh
	ja → sekundäre Anreicherung von Carbonaten →	Axh
	↓ nein sekundäre Anreicherung von Carbonaten →	Ach
	↓ nein violettstichig, vertikal ungleichmäßig humos →	Aeh

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung (Fortsetzung).

↓ nein (nahezu unverändertes Ausgangsgestein)	ja →	sekundäre Anreicherung von Carbonaten	ja →	Konkretionen aus Sekundärcarbonat	ja →	Ckc
			nein →		nein →	Cc
↓ nein	ja →	unverwittertes Locker- oder Festgestein	ja →	Locker- oder Festgestein	ja →	Cn
			↓ nein	weitgehend kaolinitisiert	ja →	Cj
↓ nein	ja →	Torgehalt Differenz nach unten > 0 und < TD	ja →		ja →	Alh
			↓ nein	etwa 2 cm mächtig, organische Substanz vorwiegend Pflanzenreste	ja →	Alh
↓ nein	ja →	dunkelgrau bis schwärzlich (viel OS)	ja →		ja →	Aah
			↓ nein	Basensättigung bekannt	ja →	Ah<
↓ nein	ja →	Basensättigung < 50 %	ja →		ja →	Ah>
			nein →		nein →	Ah
↓ nein	ja →				nein →	A

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der
in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung
(Fortsetzung).

	ja	↑	ja	↑	Cbtv
	nein	↑	nein	↑	Ctv
		↑	nein	↑	Cv
		↑	nein	↑	C
		↑	ja	↑	Tu
↓ nein	Carbonatgehalt > 75 M-% und Tongehalt ≥ 45 M-%	↑	ja	↑	Tev
↓ nein	Munsell-Hue röter als 5YR	↑	ja	↑	Tv
↓ nein	leuchtend gelbliche bis rötlichbraune Farben	↑	ja	↑	T
↓ nein	sekundäre Anreicherung von Carbonaten	↑	ja	↑	Bj
↓ nein	weitgehend kaolinisiert oder stoffangereichert	↑	ja	↑	
↓ nein		↑	nein	↑	

Vorkommen von Wurzeln u n d physikalisch aufgelockert

schwache Tonanreicherung

Tonbänder

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

<p>Struktur des Ausgangsgesteins nicht mehr vorhanden u n d weniger als 5 Vol.-% Festgesteinsreste u n d Munsell-Hue zwei und mehr Stufen stärker rot als beim weiter unten folgenden Horizont sowie Farbwert (feucht) 4/ oder weniger bei einem höchstens um eine Stufe höheren Wert im trockenen Zustand u n d Gehalt an verwitterbaren Mineralien unter 3 % ↓ nein</p>	<p>sesquioxidangereicht ja → nein →</p>	<p>Bku Bu</p>
<p>ausgeprägte Tonhäute oder Tonbrücken zwischen Sandkörnern u n d TG ↓ nein</p>	<p>bänderförmige Tonanreicherung ja → ↓ nein sekundäre Anreicherung an Humusstoffen → ↓ nein Restmerkmale eines Bv ja → nein →</p>	<p>Bbt Bht Bvt Bt</p>
<p>↓ nein sesquioxidangereicht, Munsell-Hue mindestens eine Stufe stärker rot als beim darüber und darunter folgenden Horizont</p>	<p>sekundäre Anreicherung an Humusstoffen ja → ↓ nein bandförmige (meist < 2 cm) Sesquioxidanreicherung ja → massiv verfestigt (Ortsteinband) ja → nein →</p>	<p>Bhs Bbms Bbs</p>

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung (Fortsetzung).

↓ nein	massive Sesquioxid-Verfestigung	ja →	Bhms
↓ nein	Restmerkmale (siehe dort)	Bv ja → nein →	Bvs Bs
↓ nein	bänderförmige Humusanreicherung	ja →	Bbh
↓ nein	$C_p \cdot Fe_p = 3 \text{ bis } 10$	ja → nein →	Bsh Bh
↓ nein	Tonanreicherung > 0 und < TD	ja →	Btv
↓ nein	sesquioxidangereicht	ja → nein →	Bhsv Bsv
↓ nein	sekundäre Anreicherung an Humusstoffen	ja →	Bhv
↓ nein	Trockenraumgewicht $< 0.9 \text{ g/cm}^3$ oder Porenvolumen $\geq 60 \%$	ja →	Bfv
↓ nein	Munsell-Farbiton stärker rot, bei rotgefärbten Gesteinen stärker gelb oder intensivere Farbtiefe oder (und) höherer Tongehalt und/oder 2 Cromastufen höher (mindestens um einen/eine Farbitonstufe, bei rot eine Stufe in Richtung gelb, bei gelb eine Stufe in Richtung rot) und totale (potentielle) Kationenaustauschkapazität der Tonfraktion $\geq 16 \text{ cmolc/kg}$ (= $\text{mval}/100 \text{ g}$) oder Muskovitgehalt der Feinerde $\geq 6 \%$ oder Gehalt an verwitterbaren Mineralen $\geq 3 \%$	ja →	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 11.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

	↓ nein sekundäre Anreicherung von Carbonaten ja → nein →	Bcv Bv B
↓ nein MOS oder Farbe deutlich braun (Chroma ≥ 3) und mit erkennbarer Schichtung und keine dominanten Merkmale anderer Mineralbodenhorizonte ↓ nein	ja → sekundäre Anreicherung von Carbonaten nein →	Mc M
Horizont umfassend beschreiben und dem AK Bodensystematik zur Diskussion vorlegen		

Kapitel 12

Bestimmungsschlüssel für Bodensubtypen

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung.

Torfmächtigkeit >=30 cm	ja →	Hv- oder Hm- Horizont im Oberboden	ja →	Hv- Horizont im Profil	ja →	Hm-Horizont	ja →	KV-KM Erdniedermoor- Mulmniedermoor
	nein ↓		nein ↓		nein ↓		nein ↓	
	ja →	nein ↓	ja →	Hm- Horizont im Profil	ja →	Moorbildung aus Hoch- u n d Niedermoorpflanzen	ja →	KVu Übergangserdmoor
	nein ↓		nein ↓		nein ↓		nein ↓	
	ja →	nein ↓	ja →	Hm- Horizont im Profil	ja →	Moorbildung aus Hochmoor-Pflanzen	ja →	KVC Kalkerdniedermoor
	nein ↓		nein ↓		nein ↓		nein ↓	
	ja →	nein ↓	ja →	Hm- Horizont im Profil	ja →	Moorbildung aus Hoch- u n d Niedermoorpflanzen	ja →	KVn Normerdniedermoor
	nein ↓		nein ↓		nein ↓		nein ↓	
	ja →	nein ↓	ja →	Hm- Horizont im Profil	ja →	Moorbildung aus Hoch- u n d Niedermoorpflanzen	ja →	KHn Normerdhochmoor
	nein ↓		nein ↓		nein ↓		nein ↓	
	ja →	nein ↓	ja →	Hm- Horizont im Profil	ja →	Moorbildung aus Hoch- u n d Niedermoorpflanzen	ja →	KMn Übergangsmulmoor
	nein ↓		nein ↓		nein ↓		nein ↓	
	ja →	nein ↓	ja →	Hm- Horizont im Profil	ja →	Moorbildung aus Hoch- u n d Niedermoorpflanzen	ja →	KMc Kalkmulmniedermoor
	nein ↓		nein ↓		nein ↓		nein ↓	
	ja →	nein ↓	ja →	Hm- Horizont im Profil	ja →	Moorbildung aus Hoch- u n d Niedermoorpflanzen	ja →	KMn Normmulmniedermoor
	nein ↓		nein ↓		nein ↓		nein ↓	
	ja →	nein ↓	ja →	Hm- Horizont im Profil	ja →	Moorbildung aus Hoch- u n d Niedermoorpflanzen	ja →	K Erd- und Mulmoor
	nein ↓		nein ↓		nein ↓		nein ↓	
	ja →	nein ↓	ja →	Hm- Horizont im Profil	ja →	Moorbildung aus Hoch- u n d Niedermoorpflanzen	ja →	HNu Übergangsmoor
	nein ↓		nein ↓		nein ↓		nein ↓	
	ja →	nein ↓	ja →	Hm- Horizont im Profil	ja →	Moorbildung aus Hochmoor-Pflanzen	ja →	HHn Normhochmoor
	nein ↓		nein ↓		nein ↓		nein ↓	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der
in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung
(Fortsetzung).

Moorbildung aus Niedermoor-Pflanzen	ja	Hc*-Horizont im Profil	ja	Hc*-Horizont im Profil	ja	Hc*-Horizont im Profil	Hc*-Horizont im Profil	Hnc
	nein		nein		nein			nein
F-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	Fr-Horizont im Profil	H
	nein		nein		nein			nein
F-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	Fr-Horizont im Profil	IWF
	nein		nein		nein			nein
F-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	Fr-Horizont im Profil	IWb
	nein		nein		nein			nein
F-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	Fr-Horizont im Profil	IWn
	nein		nein		nein			nein
F-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	Fr-Horizont im Profil	I
	nein		nein		nein			nein
F-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	Fr-Horizont im Profil	JS
	nein		nein		nein			nein
F-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	Fr-Horizont im Profil	JDn
	nein		nein		nein			nein
F-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	ja	Fr-Horizont im Profil	Fr-Horizont im Profil	JG
	nein		nein		nein			nein

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

		nein ↓ Fi-Horizont im Profil	ja ↑		JP Protopedon
		nein →			J
		nein →	ja ↑	Subhydrischer Boden	ÜAf Flussstrand
G-Horizont im Profil	ja ↑	nein ↓	ja ↑	Profil liegt im Gezeitenrückstaube reich der Flüsse	ÜAb Brackstrand
nein ↓	ja ↑	nein ↓	ja ↑	Profil liegt im brackischen Sedimentationsbereich des Unterlaufes von Flüssen und an Küsten mit unterirdischem Süßwasserzufluss	
		nein →			ÜAn Normstrand
		nein →			Ü
		nein →			Strandboden
		nein →			MKn Normknickmarsch
		ja ↑			MRf Flussrohmarsch
		nein ↓	ja ↑	Go-Horizont im Oberboden	
G-Horizont oberhalb 40 cm	ja ↑	nein ↓	ja ↑	Profil liegt im Gezeitenrückstaube reich der Flüsse	
		nein ↓			

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung (Fortsetzung).

nein ↓		<p>MRb Brackrohmarsh</p> <p>ja → Profil liegt im brackischen Sedimentationsbereich des Unterlaufes von Flüssen und an Küsten mit unterirdischem Süßwasserzufluss nein ↓</p>
		<p>MRn Normrohmarsh</p> <p>ja → Profil liegt im marinen und brackisch-marinen Sedimentationsbereich nein →</p>
		<p>MR Rohmarsh</p> <p>nein →</p>
	ja →	<p>MO Normorganomarsch</p> <p>ja → Gesamtes Profil organisch-sedimentär nein ↓</p>
	ja →	<p>MBf Flusshafnässemarsch</p> <p>ja → Profil liegt im Gezeitenrückstaube reich der Flüsse nein ↓</p>
	nein ↓	<p>MBb Brackhafnässemarsch</p> <p>ja → Profil liegt im brackischen Sedimentationsbereich des Unterlaufes von Flüssen und an Küsten mit unterirdischem Süßwasserzufluss nein ↓</p>
	nein ↓	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

	ja →	MBn Normhaftnässemarsch
Profil liegt im marinen und brackisch-marinen Sedimentationsbereich		
nein →		MB Haftnässemarsch
	ja →	MCf Flusskalkmarsch
Profil liegt im Gezeitenrückstaube reich der Flüsse		
nein ↓	ja →	MCb Brackkalkmarsch
Profil liegt im brackischen Sedimentationsbereich des Unterlaufes von Flüssen und an Küsten mit unterirdischem Süßwasserzufluss		
nein ↓	ja →	MCn Normkalkmarsch
Profil liegt im marinen und brackisch-marinen Sedimentationsbereich		
nein →		MC Kalkmarsch
	ja →	MNf Flusskleimarsch
Profil liegt im Gezeitenrückstaube reich der Flüsse		
nein ↓		
	ja →	
Obergrenze der Carbonatführung oberhalb 40 cm unter GOF		
nein ↓		
	nein →	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

		ja →	MNb Brackkleimarsch
	Profil liegt im brackischen Sedimentationsbereich des Unterlaufes von Flüssen und an Küsten mit unterirdischem Süßwasserzfluss	ja →	
	nein ↓	ja →	MNn Normkleimarsch
	Profil liegt im marinen und brackisch-marinen Sedimentationsbereich	ja →	
	nein →		MN Kleimarsch
	Sd-Horizont im Profil	ja →	MDn Normdwegmarsch
	nein →		M Marsch
	nein →	ja →	AB-GG Vega-Gley
	Profil unterliegt einer Auendynamik (stark schwankende Grundwasserstände)	ja →	
	nein ↓	ja →	AT-GG Tschernitza-Gley
	Obergrenze G-Horizont oberhalb 40 cm	ja →	
	nein ↓	ja →	AO-GG Rambla-Gley
	nein ↓	ja →	AZ-GG Kalkpaternia-Gley
	nein ↓	ja →	
	Ax*-Horizont im Profil	ja →	
	nein ↓	ja →	
	C-Horizont im Profil	ja →	
	nein ↓	ja →	
	Mergliges Ausgangsgestein	ja →	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

nein →	nein →	AQ-GG Paternia-Gley
nein →	ja	GGa Auengley
nein →	ja	GG-AT Gley-Tschernitza
nein →	ja	ATn Normtschernitza
nein →	ja	GG-AO Gley-Rambla
nein →	ja	AOa Normrambla
nein →	ja	SS-AB Pseudogley-Vega
nein →	ja	GG-AB Gley-Vega
nein →	ja	AQ-AB Paternia-Vega
nein →	ja	ABn Normvega
nein →	ja	GG-AZ Gley-Kalkpaternia
nein →	ja	AZn Normkalkpaternia
nein →	ja	GG-AQ Gley-Paternia
nein →	ja	AQn Normpaternia

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

Obergrenze G-Horizont oberhalb 40 cm	ja →					GHg Hangmoorgley
	nein ↓	H-Horizont im Profil	ja →	Profil befindet sich in Hanglage ($\geq 9\%$ (5° Hangneigung))	ja →	
				Profil liegt im Einflussgebiet einer Quelle	ja →	GHn Quellenmoorgley
				nein ↓		
				Moorbildung aus Niedermoorpflanzen	ja →	GHn Niedermoorgley
				nein ↓		
				Moorbildung aus Hochmoorpflanzen	ja →	GHh Hochmoorgley
				nein ↓		
				nein →		GH Moorgley
		Aa-Horizont im Profil	ja →	Profil befindet sich in Hanglage ($\geq 9\%$ (5° Hangneigung))	ja →	GMg Hanganmoorgley
				nein ↓		
				Profil liegt im Einflussgebiet einer Quelle	ja →	GMn Quellenanmoorgley
				nein ↓		
				Gc*-Horizont im Profil	ja →	GMc Kalkanmoorgley
				nein →		GMn Normanmoorgley
		Go-Horizont im Profil und Obergrenze Gr-Horizont oberhalb 40 cm	ja →	Profil befindet sich in Hanglage ($\geq 9\%$ (5° Hangneigung))	ja →	GNg Hangnassgley
				nein ↓		

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

Profil liegt im Einflussgebiet einer Quelle	ja →	GnN Quellennassgley
nein ↓		
Gc*-Horizont im Profil	ja →	GnC Kalknassgley
nein ↓		
Ah-Gr-Horizont im Profil	ja →	GnH Humusnassgley
nein ↓		
		GnN Normnassgley
E-Horizont im Profil	ja →	YE-GG Plaggenesch-Gley
nein ↓		
M-Horizont im Profil	ja →	YK-GG Kollusivol-Gley
nein ↓		
Sw-Horizont im Profil	ja →	SS-GG Pseudogley-Gley
nein ↓		
Ael-Horizont im Profil	ja →	LF-GG Fahlerde-Gley
nein ↓		
Ae-Horizont im Profil	ja →	PP-GG Podsol-Gley
nein ↓		
Al-Horizont im Profil	ja →	LL-GG Parabraunerde-Gley
nein ↓		
Bv-Horizont im Profil	ja →	BB-GG Braunerde-Gley
nein ↓		
P-Horizont im Profil	ja →	DD-GG Pelosol-Gley

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

nein ↓ Ax*-Horizont im Profil	ja →		TT-GG Tschernosem-Gley
nein ↓ C-Horizont im Profil	ja →	Mergliges Ausgangsgestein →	RZ-GG Pararendzina-Gley
nein ↓		Carbonatisches Ausgangsgestein →	RR-GG Rendzina-Gley
		nein →	RQ-GG Regosol-Gley
Profil befindet sich in Hanglage (>= 9% (5°) Hangneigung)	ja →		GGg Hanggley
nein ↓ Profil liegt im Einflussgebiet einer Quelle	ja →		GGq Quellengley
nein ↓ Gc*-Horizont im Profil	ja →		GGc Kalkgley
nein ↓ Gw-Horizont im Profil	ja →		GGi Bleichgley
nein ↓ Gso-Horizont im Profil	ja →		GGi Brauneisengley
nein ↓ Ah-Go-Horizont im Profil	ja →		GGh Humusgley
nein ↓ Stark schwankender Grundwasserstand	ja →		GGw Wechselgley
nein ↓			

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

Kein Gr-Horizont im Profil	ja →	GGo Oxigley
nein →		GGn Normgley
R-Horizont im Profil	ja →	GG-YU Trepisol aus Gley
nein ↓		
E-Horizont im Profil	ja →	GG-YE Gley-Plaggensch
nein ↓		
M-Horizont im Profil	ja →	GG-YK Gley-Kolluvisol
nein ↓		
Sg-Horizont im Profil	ja →	GG-SH Gley-Haftpseudogley
nein ↓		
Sr-Horizont im Profil	ja →	GG-SG Gley-Stagnogley
nein ↓		
Obergrenze S-Horizont oberhalb 40 cm	ja →	GG-SS Gley-Pseudogley
nein ↓		
Ael-Horizont im Profil	ja →	GG-LF Gley-Fahlerde
nein ↓		
Ae-Horizont im Profil	ja →	GG-PP Gley-Podsol
nein ↓		
Al-Horizont im Profil	ja →	GG-LL Gley-Parabraunerde
nein ↓		
P-Horizont im Profil	ja →	GG-PP Gley-Pelosol

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

			nein ↓ Acxh-Horizont im Profil, Mächtigkeit > 40 cm	ja →	GG-TC Gley-Kalktschernosem
			nein ↓ Axh-Horizont im Profil, Mächtigkeit > 40 cm	ja →	GG-TC Gley-Tschernosem
			nein ↓ Bv-Horizont im Profil	ja →	GG-BB Gley-Braunerde
			nein ↓ Mergliges Ausgangsgestein	ja →	GG-RZ Gley-Pararendzina
			nein ↓ Carbonatisches Ausgangsgestein	ja →	GG-RR Gley-Rendzina
			nein →		GG-RQ Gley-Regosol
				Ai-Horizont im Profil ja →	XXt Rohreduktosol
			nein ↓ Kein Yo-Horizont im Profil	ja →	XXu Fahreduktosol
			nein ↓ Untergrenze Yo-Horizont >= 40 cm	ja →	XXx Ockerreduktosol
			nein →		XXn Normreduktosol
			R-Horizont ist mit anderen Horizonten verzahnt	ja →	PP-YU Trepasol aus Podsol
				Ael-Horizont im Profil ja →	LF-YU Trepasol aus Fahlerde
Y-Horizont im Profil	ja →				
nein ↓					
R-Horizont im Profil	ja →				
nein ↓					

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung (Fortsetzung).

		Bt-Horizont im Profil	ja ↑	LL-YU Treposol aus Parabraunerde
			nein →	YUn Normtreposol (prinzipiell sind Kombinationen mit anderen Bodentypen möglich)
			nein →	YYn Normrigosol (prinzipiell sind Kombinationen mit anderen Bodentypen möglich)
		Ex-Horizont im Profil	ja ↑	YOn Normhorthisol
			nein ↓	
		S-Horizont im Profil	ja ↑	SS-YE oder YE-SS Pseudogley- Plaggensch oder Plaggensch- Pseudogley (Die Definitionen erlauben z.Zt. keine eindeutige Trennung.)
			nein ↓	
		B(h)s-Horizont im Profil	ja ↑	PP-YE oder YE-PP Podsol-Plaggensch oder Plaggensch- Podsol (Die Definitionen erlauben z.Zt. keine eindeutige Trennung.)
			nein ↓	
Untergrenze E- Horizont >= 40 cm	ja ↑			
	nein ↓			

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung (Fortsetzung).

Untergrenze M-Horizont >= 40 cm	ja ↑	nein →	YEn Normplaggenesch SS-YK oder YK-SS Pseudogley-Kolluvisol oder Kolluvisol- Pseudogley (Die Definitionen erlauben z.Zt. keine eindeutige Trennung.)
nein ↓		S-Horizont im Profil ja ↑	PP-YK oder YK-SS Podsol-Kolluvisol oder Kolluvisol-Podsol (Die Definitionen erlauben z.Zt. keine eindeutige Trennung.)
Untergrenze T-Horizont < 40 cm	ja ↑	nein ↓ B(h)s-Horizont im Profil ja ↑	YKn Normkolluvisol
nein ↓		Tu-Horizont im Profil ja ↑	CRn Normterra rossa
		nein ↓ S-Horizont im Profil ja ↑	CF-SS Terra fusca- Pseudogley
		nein ↓	SS-CF Pseudogley-Terra fusca
		Bv-Horizont im Profil ja ↑	BB-CF Braunerde-Terra fusca
		nein ↓ Bt-Horizont im Profil ja ↑	CF-LL Terra fusca- Parabraunerde

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

				LL-CF Parabraunerde-Terra fusca
	nein →			
	Tv-Horizont dominiert nicht im gesamten Profil	ja →		CF-RR Terra fusca-Rendzina
	nein ↓			
	Tc-Horizont im Profil	ja →		CFc Kalkterra fusca
	nein →			CFn Normterra fusca
	Sg-Horizont im Profil	ja →	Ael-Horizont im Profil	LF-SH Fahlerde- Haftpseudogley
S-Horizont im Profil	ja →			
	nein ↓		nein ↓ Al-Horizont im Profil	LL-SH Parabraunerde- Haftpseudogley
			nein ↓ Bv-Horizont im Profil	BB-SH Braunerde- Haftpseudogley
			nein ↓ Untergrenze Ah- Horizont >= 40 cm	SHh Humushaftpseudogley
			nein ↓ C-Horizont im Profil	SHn Normhaftpseudogley
			nein →	SH Haftpseudogley
	Sr-Horizont im Profil	ja →	H-Horizont im Profil	HH-SG Hochmoor-Stagnogley
			ja →	
			Moorbildung aus Hochmoorpflanzen	
			ja →	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der
in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

nein ↓	nein ↓	nein →	HN-SG Niedermoor- Stagnogley
		ja →	SG-PP Stagnogley-Podsol
	Ae-Horizont im Profil	ja →	SGd Bändchenstagnogley
	nein ↓	ja →	SGn Normstagnogley
	Bb*-Horizont im Profil	ja →	SS-DD Pseudogley-Pelosol
	nein →		DD-SS Pelosol-Pseudogley
	P-Horizont dominiert innerhalb der ersten 80 cm	ja →	SS-TT Pseudogley- Tschernosem
	nein ↓	ja →	TT-SS Tschernosem- Pseudogley
	Ax*-Horizont dominiert innerhalb der ersten 80 cm	ja →	SS-LF Pseudogley-Fahlerde
	nein →		LF-SS Fahlerde-Pseudogley
	Ael-Horizont dominiert innerhalb der ersten 80 cm	ja →	SS-LL Pseudogley- Parabraunerde
	nein ↓	ja →	LL-SS Parabraunerde- Pseudogley
	nein →		SS-PP Pseudogley-Podsol
	B(h)s-Horizont dominiert innerhalb der ersten 80 cm	ja →	
	nein ↓	ja →	
	Al-Horizont im Profil	ja →	
	nein ↓	ja →	
	B(h)s-Horizont im Profil	ja →	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

nein ↓	nein →	PP-SS Podsol-Pseudogley
Bv-Horizont im Profil ja →	Bv-Horizont dominiert innerhalb der ersten 80 cm ja →	SS-BB Pseudogley-Braunerde
nein ↓	nein →	BB-SS Braunerde-Pseudogley
Untergrenze Cv-Horizont ≤ 80 cm und n d im Profil keiner der Horizonte B, E, F, G, H, M, P, R, T, Y ja →		SS-RZ Pseudogley-Pararendzina
nein ↓		SS-RQ Pseudogley-Regosol
Untergrenze C-Horizont ≤ 80 cm und n d kein dominierender S-Horizont innerhalb von 80 cm ja →		SSg Hangpseudogley
nein ↓		SSm Anmoorpseudogley
Profil befindet sich in Hanglage (>= 9% (5° Hangneigung) ja →		SSc Kalkpseudogley
nein ↓		SSh Humuspseudogley
Aa-Horizont im Profil ja →		SSn Normpseudogley
nein ↓		
Sc*-Horizont im Profil ja →		
nein ↓		
Untergrenze Ah-Horizont >= 40 cm ja →		
nein →		

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung (Fortsetzung).

Ael-Horizont im Profil nein ↓	ja →	B(h)s-Horizont im Profil nein ↓	ja →	PP-LF Podsol-Fahlerde
		Bv-Horizont im Profil nein ↓	ja →	LF-BB Fahlerde-Braunerde
		Bbt-Horizont im Profil nein ↓	ja →	BB-LF Braunerde-Fahlerde
			ja →	LFd Bänderfahlerde
			nein →	LFn Normfahlerde
Al-Horizont im Profil nein ↓	ja →	Ae*-Horizont im Profil nein ↓	ja →	PP-LL Podsol-Parabraunerde
		Bv-Horizont im Profil nein ↓	ja →	LL-PP Parabraunerde-Podsol
			ja →	LL-BB Parabraunerde-Braunerde
			nein →	BB-LL Braunerde-Parabraunerde
		Axh-Horizont im Profil nein ↓	ja →	TT-LL Tschernosem-Parabraunerde
			ja →	LL-TC Parabraunerde-Kalktschernosem
			nein →	LL-TT Parabraunerde-Tschernosem
		Untergrenze Alh >= 40 cm	ja →	LLh Humusparabraunerde

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

Ae-Horizont im Profil	ja	↑		LLn Normparabraunerde
	nein ↓		Die Untergrenze der Horizonte Bs, Bh, Bsh oder Bhs ist > 15 cm	BB-PP Braunerde-Podsol
	nein ↓		nein →	PP-BB Podsol-Braunerde
	Cv-Horizont im Profil und kein dominierender B-Horizont im Profil	ja	↑	PP-RN Podsol-Ranker
	nein ↓		Bodenbildung auf Festgestein	
	nein ↓		nein →	PP-RQ Podsol-Regosol
	Bb*-Horizont im Profil	ja	↑	PPd Bändchenpodsol
	nein ↓		Kein Bs-Horizont im Profil	
	nein ↓		Kein Bh-Horizont im Profil	PPh Humuspodsol
	nein ↓		Kein Bh-Horizont im Profil	PPe Eisenpodsol
	nein ↓		nein →	PPn Normpodsol
P-Horizont im Profil	ja	↑	Acxh-Horizont im Profil	DD-TC Pelosol-Kalktschernosem
	nein ↓		nein →	
	Axh-Horizont im Profil	ja	↑	DD-TT Pelosol-Tschernosem
	nein ↓		Bv-Horizont im Profil	
	nein ↓		Bv-Horizont dominiert im Profil	DD-BB Pelosol-Braunerde

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

	nein →	nein →	BB-DD Braunerde-Pelosol
	C-Horizont im Profil	ja →	RZ-DD Pararendzina-Pelosol
	nein ↓	Mergliges Ausgangsgestein ja → nein ↓ Bodenbildung auf Festgestein ja →	RN-DD Ranker-Pelosol
	Untergrenze Ah > 40 cm	ja →	RQ-DD Regosol-Pelosol
	nein →	nein →	DDh Humuspelosol
	nein →	nein →	DDn Normpelosol
Acxh-Horizont mächtiger als 40 cm	ja →	ja →	BB-TC Braunerde-Kalktschernosem
nein ↓	nein →	nein →	TCn Normkalktschernosem
Axh-Horizont mächtiger als 40 cm	ja →	ja →	BB-TT Braunerde-Tschernosem
nein ↓	nein →	nein →	TTn Normtschernosem
Bv-Horizont im Profil	ja →	Carbonatisches Ausgangsgestein ja →	BB-RR Braunerde-Rendzina
nein ↓	Bv-Horizont dominiert nicht im Profil	nein ↓ Mergliges Ausgangsgestein ja → nein ↓ Bodenbildung auf Festgestein ja →	BB-RZ Braunerde-Pararendzina
nein ↓	nein ↓	nein ↓	BB-RN Braunerde-Ranker

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

	nein →					BB-RQ Braunerde-Regosol
	ja →					BBI Lockerbraunerde
Bfv-Horizont im Profil nein ↓	ja →					BBc Kalkbraunerde
Bcv-Horizont im Profil nein ↓	ja →					BBh Humusbraunerde
Untergrenze Ah- Horizont > 40 cm	ja →					BBn Normbraunerde
nein →						OO-RR Syrosem-Rendzina
Carbonatisches Ausgangsgestein nein ↓	ja →	Ah-Horizont im Profil nein ↓	ja ↑	Bodenbildung auf Festgestein nein →		OL-RR Lockersyrosem- Rendzina
						RRs Sauerrendzina
		Ah<-Horizont im Profil nein ↓	ja ↑			RRn Normrendzina
		Ah->Horizont im Profil nein ↓	ja ↑			RR Rendzina
		nein →				OO-RZ Syrosem-Pararendzina
Mergliges Ausgangsgestein nein ↓	ja →	Ah-Horizont im Profil nein ↓	ja ↑	Bodenbildung auf Festgestein nein →		OL-RZ Lockersyrosem- Pararendzina
		Ah<-Horizont im Profil nein ↓	ja ↑			RZs Sauerpararendzina
		Ah->Horizont im Profil nein ↓	ja ↑			RZn Normpararendzina
Ah- u n d C-Horizont im Profil nein ↓	ja →					

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

						RZ
						Pararendzina
						OO-RZ
					ja →	Syrosem-Ranker
					nein →	OL-RZ
					ja →	Lockersyrosem-Ranker
					nein →	RNs
					ja →	Euranker
					nein →	
					ja →	RNn
					nein →	Normranker
					ja →	RN
					nein →	Ranker
					ja →	OL-RQ
					nein →	Lockersyrosem-Regosol
					ja →	RQs
					nein →	Euregosol
					ja →	RQn
					nein →	Normregosol
					ja →	RQ
					nein →	Regosol
					ja →	OOp
					nein →	Protosyrosem
					ja →	
					nein →	OOn
					ja →	Normsyrosem
					nein →	OLn
					ja →	Normlockersyrosem
					nein →	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 12.1: Bestimmungsschlüssel für Subtypen nach der Deutschen Bodensystematik in der in der 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung veröffentlichten Fassung

(Fortsetzung).

<p>O-Horizont und keiner der Horizonte A, B, E, F, G, H, L, M, P, R, S, T, Y im Profil</p>	<p>ja →</p>	<p>xC+O-Horizont im Profil</p>	<p>ja →</p>	<p>FSn Normskeletthumusboden</p>
<p>nein →</p>	<p>nein →</p>	<p>Mit der gegebenen Horizontfolge ist keine Bodentypenableitung möglich.</p>	<p>FFn Normfelshumusboden</p>	<p>nein →</p>

Kapitel 13

Beispiel für die Initialisierung einer Prototypenmatrix für die DBS

13.1 Verwendete Variablen

Die folgende Tabelle 13.1 zeigt die für die Klassifikation verwendeten Variablen. Sie sind entsprechend ihrer Zuordnung zu bestimmten Bereichen des Solums (Untergrund, Unterboden, Oberboden, gesamtes Profil) geordnet. Tritt eine Aufgliederung eines Bereiches in verschiedene Horizonte auf, ist bei entsprechenden Variablen (z.B. Tongehalt) der Mittelwert für den gesamten Bereich des Profils zu verwenden.

In der ersten Spalte von Tabelle 13.1 werden die verwendeten Variablen genannt, in Spalte 2 wird eine Begründung für ihre Auswahl gegeben. Die Ausprägung der Variablen wird für jeden Subtyp vollständig festgelegt. Daher müssen in Tabelle 13.1 nicht alle Subtypen erscheinen, weil sie sich auch durch das Nicht- oder nur teilweise Vorhandensein bestimmter Merkmale klassifizieren lassen.

Es wurde darauf geachtet, dass die Ausprägungen der Variablen möglichst einfach, also weitestgehend im Feld bestimmbar sind. Es wird angenommen, dass dadurch auch die Nutzung von Daten aus unvollständigen Bodeninventuren ermöglicht wird und so vorhandenen Profildaten nicht von vornherein von der Klassifizierung ausgeschlossen sind.

13.2 Mögliche Ausprägungen der verwendeten Variablen

Da mit dem FKME eine numerische Klassifikation durchgeführt wird, müssen alle verwendeten Variablen mindestens rational skalierbar sein. Verbale Beschreibungen werden deshalb entsprechend der ihnen zugrunde liegenden Informationen geordnet. Das ist auch eine Bedingung für die Auswahl der Variablen.

Die Tabelle 13.2 zeigt die Werte, die von den einzelnen Variablen angenommen werden kön-

Tabelle 13.1: Zur Klassifikation verwendete Variablen

Untergrund	
Beschaffenheit	ist der Boden auf einem Locker- oder Festgestein entstanden und wie stark ist der Verwitterungsgrad im zweiten Fall
Karbonatgehalt	zur Unterscheidung von nicht- und karbonathaltigen Böden
Unterboden	
Tongehalt	zur Unterscheidung der Horizonte B, P, T
Tonbänder	zur Diagnose von Fahl- und Parabraunerde und Bändchenstau- podsol
Karbonatgehalt	zur Unterscheidung nicht- und kalkhaltiger Subtypen
Verfestigungen (nicht Ske- lett)	zur Diagnose von Gleyen, Staugleyen und Podsolen
Anreicherungen von Eisen- verbindungen	Vorkommen von sowohl Sesquioxiden als auch Brauneisen
Anreicherung von Humus	zur Diagnose von Podsolen
Marmorierung	zur Diagnose von Staugleyen
Rostflecken	zur Diagnose von Gleyen und Staugleyen
Bleichflecken	zur Diagnose von Gleyen und Staugleyen
Reduktionsfarben erkenn- bar	zur Diagnose von Gleyen
Oberboden	
Humusgehalt	zur Unterscheidung von organischen, anmoorigen und humo- sen Oberbodenhorizonten
Vorhandensein eines gefahl- ten Bereiches	zur Diagnose von Podsolen, Fahl- und Parabraunerden
Teile des Materials verlagert	zur Diagnose des M-Horizontes
Plaggenmaterial vorhanden	zur Diagnose der Plaggenböden
allgemein	
Verzahnungshorizont zwischen Ober- und Unter- boden	zur Diagnose von Fahlerden, Tschernosemen und Subtypen in anderen Klassen
Sickerwasserprägung	zur Unterscheidung von terrestrischen und anderen Böden so- wie zwischen Staugleyen und anderen terrestrischen Böden
mariner Einfluss erkennbar	zur Unterscheidung zwischen Watt, Marsch und anderen Bö- den
Lage in einer Aue	zur Unterscheidung von Auen- und anderen Böden
Tiefenumbruch erkennbar	zur Diagnose rigolter Böden
Einfluss von Reduktgasen erkennbar	zur Diagnose von Reduktosolen

nen. Teilweise ist eine einfache Zahlenangabe ausreichend. Wo Beschreibungen aufgeführt sind, werden die einzelnen durch Semikola abgetrennten Ausprägungen im FKME durch natürliche Zahlen von 0 bis n ersetzt, wobei 0 die links stehende Ausprägung bedeutet, die höchste Zahl die rechts stehende.

Tabelle 13.2: Ausprägungen der verwendeten Variablen

Untergrund	
Beschaffenheit	fest; angewittert; mäßig verwittert; stark verwittert; locker
Karbonatgehalt	silikatisch; mergelig; karbonatisch
Unterboden	
Tongehalt	%
Tonbänder	nein; ja
Karbonatgehalt	%
Verfestigungen (nicht Skelett)	keine; vereinzelt; viele; flächenhaft
Anreicherungen von Eisenverbindungen	keine; wenig; mittel; viele
Anreicherung von Humus	keine; wenig; mittel; viele
Marmorierung	keine; angedeutet; deutlich
Rostflecken	keine; wenig; mittel; viel
Bleichflecken	keine; wenig; mittel; viel
Reduktionsfarben erkennbar	nicht; undeutlich; deutlich
Oberboden	
Humusgehalt	%
Vorhandensein eines gefahlten Bereiches	nein; undeutlich (gefahlt); deutlich (gefahlt und eluviiert)
Teile des Materials verlagert	nein; ja
Plaggenmaterial vorhanden	nein; ja
allgemein	
Verzahnungshorizont zwischen Ober- und Unterboden	nein; ja
Sickerwasserprägung	bis cm unter GOK (222 cm: gesamtes Profil)
mariner Einfluss erkennbar	keiner; perimarin; brackisch; marin
Lage in einer Aue	nein; ja
Tiefenumbruch erkennbar	nein; ja
Einfluss von Reduktgasen erkennbar	nein; ja

13.3 Die Matrix C der Prototypen

Tabelle 13.3 zeigt die Ausprägung der einzelnen Variablen aus Tabelle 13.1 für die Subtypen. Die Abkürzungen im Tabellenkopf haben die folgende Bedeutung:

- BUG Beschaffenheit des Untergrundes
- KUG Karbonatgehalt des Untergrundes
- TG Tongehalt
- TB Tonbänder
- KUB Karbonatgehalt des Unterbodens
- VF Verfestigungen (nicht Skelett)
- E Anreicherungen von Eisenverbindungen
- HUB Anreicherung von Humus im Unterboden
- MO Marmorierung
- RO Rostflecken
- BF Bleichflecken
- RE Reduktionsfarben erkennbar
- HOB Humusgehalt im Oberboden
- F Vorhandensein eines gefahlten Bereiches
- VH Verzahnungshorizont zwischen Ober- und Unterboden
- S Sickerwasserprägung
- MA mariner Einfluss erkennbar
- A Lage in einer Aue

Neben der KA4 wurden auch Angaben aus Scheffer und Schachtschabel (1998) für die Entwicklung der Matrix genutzt.

Tabelle 13.3: Prototypen für die numerische Klassifikation nach KA4

(Sub-)Typ	BUG	KUG	TG	TB	KUB	VF	E	HUB	MO	RO	BF	RE	HOB	F	VH	S	MA	A
Felshumusboden	0	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	222	0	0
Skelethumusboden	0	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	222	0	0
Syrosem	1	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Lockersyrosem	4	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Ranker	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Regosol	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Rendzina	?	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Pararendzina	?	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Tschernosem	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	1	222	0	0
Kalktschernosem	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	1	222	0	0
Pelosol	2	0	50	0	0	?	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Kalkpelosol	2	1	50	0	25	?	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Braunerde	2	0	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Kalkbraunerde	2	1	?	0	25	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Humusbraunerde	2	0	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Lockerbraunerde	2	0	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Parabraunerde	4	1	?	0	25	1	0	0	0	0	0	0	10	1	0	222	0	0
Bänderparabraunerde	4	1	?	1	25	1	0	0	0	0	0	0	10	1	1	222	0	0
Fahlerde	4	1	?	0	25	1	0	0	0	0	0	0	10	2	0	222	0	0
Bänderfahlerde	4	1	?	1	25	1	0	0	0	0	0	0	10	2	1	222	0	0
Podsol	3	0	?	0	0	3	2	2	0	0	0	0	10	2	0	222	0	0
Eisenpodsol	3	0	?	0	0	3	3	0	0	0	0	0	10	2	0	222	0	0
Humuspodsol	3	0	?	0	0	3	0	3	0	0	0	0	10	2	0	222	0	0
Staupodsol	3	0	?	0	0	4	1	1	1	0	0	0	10	1	0	10-30	0	0
Bändchenstaupodsol	3	0	?	1	0	3	1	1	1	0	0	0	10	1	0	10-30	0	0
Terra fusca	2	2	75	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Kalk-Terra fusca	2	2	75	0	25	0	1	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Terra rossa	2	2	75	0	0	0	3	0	0	0	0	0	10	0	0	222	0	0
Pseudogley	4	0	?	0	0	2	0	0	1	1	1	0	10	0	0	10-30	0	0
Kalkpseudogley	4	1	?	0	25	2	0	0	1	1	1	0	10	0	0	10-30	0	0
Humuspseudogley	4	0	?	0	0	2	0	0	1	1	1	0	10	0	0	10-30	0	0
Anmoorpseudogley	4	0	?	0	0	2	0	0	1	1	1	0	10	0	0	0	0	0
Haftnässepseudogley	4	0	?	0	0	2	0	0	1	1	1	0	10	0	0	10-30	0	0
Humushaftnässepseudogley	4	0	?	0	0	2	0	0	1	1	1	0	10	0	0	10-30	0	0

Tabelle 13.3: Prototypen für die numerische Klassifikation nach KA4 (Fortsetzung)

(Sub-)Typ	BUG	KUG	TG	TB	KUB	VF	E	HUB	MO	RO	BF	RE	HOB	F	VH	S	MA	A
Stagnogley	3	0	?	0	0	0	0	0	2	0	0	0	10	2	0	0-30	0	0
Anmoorstagnogley	3	0	?	0	0	0	0	0	2	0	0	0	10	2	0	0-30	0	0
Moorstagnogley	3	0	?	0	0	0	0	0	2	0	0	0	45	2	0	0-30	0	0
Rambia	4	?	?	0	0	0	0	0	1	0	0	1	10	0	0	80	0	1
Paternia	4	0	?	0	0	0	0	0	1	0	1	1	10	0	0	80	0	1
Kalkpaternia	4	1	?	0	25	0	0	0	1	0	1	1	10	0	0	80	0	1
Tschernitza	4	0	?	0	0	0	0	0	1	0	1	1	10	0	0	80	0	1
Vega	4	0	?	0	0	0	0	0	1	0	1	1	10	0	0	80	0	1
Gley	?	?	?	0	0	?	1	0	2	2	1	1	10	?	0	60	0	0
Oxigley	?	?	?	0	0	?	2	0	2	2	0	0	10	?	0	60	0	0
Brauneisengley	?	?	?	0	0	2	3	0	2	2	1	1	10	?	0	60	0	0
Bleichgley	?	?	?	0	0	?	0	0	1	1	1	1	10	?	0	60	0	0
Wechselgley	?	?	?	0	0	?	1	0	2	2	0	0	10	?	0	60	0	0
Kalkgley	?	2	?	0	25	?	1	0	0	0	1	1	10	?	0	60	0	0
Humusgley	?	?	?	0	0	?	1	0	0	0	1	1	45	?	0	60	0	0
Auen-gley	?	?	?	0	0	?	1	0	0	0	1	1	10	?	0	40	0	1
Quellengley	?	?	?	0	0	?	1	0	2	2	1	1	10	?	0	?	0	0
Nassgley	?	?	?	0	0	?	1	0	0	0	1	1	10	?	0	0-20	0	0
Anmoorgley	?	?	?	0	0	?	1	0	0	0	1	1	10	?	0	0-20	0	0
Kalkanmoorgley	?	2	?	0	25	?	1	0	0	0	1	1	10	?	0	0-20	0	0
Quellenanmoorgley	?	?	?	0	0	?	1	0	0	0	1	1	10	?	0	0-20	0	0
Moorgley	?	?	?	0	0	?	0	0	1	0	1	1	40	?	0	0-20	0	0
Quellenmoorgley	?	?	?	0	0	?	0	0	1	0	1	1	40	?	0	0-20	0	0
Rohmarsch	4	1	?	0	5	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	3	0
Brackrohrmarsch	4	1	?	0	5	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	2	0
Flussrohrmarsch	4	1	?	0	5	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	1	0
Kalkmarsch	4	1	?	0	25	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	3	0
Brackkalkmarsch	4	1	?	0	25	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	2	0
Flusskalkmarsch	4	1	?	0	25	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	1	0
Kleimarsch	4	0	?	0	0	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	3	0
Brackkleimarsch	4	0	?	0	0	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	2	0
Flusskleimarsch	4	0	?	0	0	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	1	0
Hafnäsemarsch	4	1	?	0	5	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	3	0
Brackhafnäsemarsch	4	1	?	0	5	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	2	0

Tabelle 13.3: Prototypen für die numerische Klassifikation nach KA4 (Fortsetzung)

(Sub-)Typ	BUG	KUG	TG	TB	KUB	VF	E	HUB	MO	RO	BF	RE	HOB	F	VH	S	MA	A
Flusshafnässemarsch	4	1	?	0	5	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	1	0
Dwogmarsch	4	0-1	?	0	2	0	1	0	1	1	1	1	10	?	0	?	1	0
Knickmarsch	4	0-1	?	0	0-2	0	0	0	1	2	2	2	10	?	0	?	2	0
Organomarsch	4	0	?	0	0	0	0	0	0	1	1	1	45	?	0	?	2	0
Watt	4	1	?	0	25	0	0	0	0	0	0	0	25	?	0	?	3	0
Brackwatt	4	1	?	0	25	0	0	0	0	0	0	0	25	?	0	?	2	0
Flusswatt	4	1	?	0	25	0	0	0	0	0	0	0	25	?	0	?	1	0

Kapitel 14

Definitionen zur regelbasierten Identifikation von Horizonten

14.1 Grundelemente der *fuzzy logic*

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen sind zusammengestellt aus Börcsök (2000), Bothe (1995), Altrock und Zimmermann (1993), Biewer (1997) und Bardossy und Duckstein (1995).

14.1.1 Die unscharfe Menge

Die kleinste Einheit der *fuzzy logic* ist nicht mehr eine Zahl, sondern die unscharfe Menge (hier: M). Zu ihrer Bestimmung müssen

- eine aus beliebig vielen Werten bestehende, eindeutige und messbare abstrakte Größe X ,
 $X = x_1, x_2, x_3, \dots$,
- ein sogenannter linguistischer Wert (Name der Menge) und
- der Grad der Zugehörigkeit der abstrakten Größe zum linguistischen Wert $\mu_M(x)$

bekannt sein bzw. ermittelt werden.

Die abstrakte Größe ist der zu betrachtende Sachverhalt, z.B. die Bodentextur. Eindeutigkeit bedeutet dabei, dass diese Größe immer genau einen Wert annimmt, und unter Messbarkeit wird verstanden, dass immer feststellbar ist, welcher Wert angenommen wird. Das bedeutet lediglich, dass immer ein konkreter Eingangswert vorhanden sein muss. Dieser muss kein instrumentell ermittelter Messwert sein, es können auch geschätzte Werte (Textur nach Fingerprobe) oder nicht bzw. nur schwer quantifizierbare Daten (Untergrundgestein: Granit) verarbeitet werden. Der linguistische Wert ist eine meist verbale Beschreibung eines Zustandes der abstrakten Größe, wie der Begriff *Bauerfuß* Beschreibung des Boden-pH-Wertes.

Mit dem "Grad der Zugehörigkeit" kommt ein im Vergleich zur klassischen Mengenlehre neues Element hinzu. Es beschreibt die Intensität, mit der der Messwert der abstrakten Größe zu dem linguistischen Wert gehört, also ob z.B. Boden mit $\text{pH} = 3.5$ als ein zu den sehr oder zu den weniger sauren Standorten gehörender Boden beschreibbar ist. Dieser Zugehörigkeitswert ist meistens – aber nicht zwingend – normiert, er ist also eine reelle Zahl zwischen 0 (keine Zugehörigkeit von x zu M) und 1 (volle Zugehörigkeit von x zu M).

Unschärfe Mengen sind nur in Ausnahmefällen eine Einermenge, meist bestehen sie aus mehreren Elementen der Grundwertmenge. In diesem Fall liegt auch eine entsprechende Menge von Zugehörigkeitswerten $\mu_M(x)$ vor, aus deren Zusammenfassung sich eine Funktion, die sogenannte Zugehörigkeitsfunktion, ableiten lässt. Dieses Verfahren ist anwendbar, wenn genügend Zugehörigkeitswerte aus Messungen oder anderen Quellen bekannt sind. Anderenfalls kann auch auf der Basis von Abschätzungen bestimmt werden, bei welchen Eingangswerten $\mu_M(x) = 0$ und $\mu_M(x) = 1$ auftritt. Anhand einer grafischen Verbindung dieser Extremwerte der unscharfen Menge ist dann die Funktionsbestimmung möglich.

Wenn eine unscharfe Menge normalisiert ist, die Zugehörigkeitsfunktion nur an einer Stelle den Wert 1 (volle Zugehörigkeit von M zu x) annimmt und $\mu_M(x)$ stückweise stetig ist, wird die unscharfe Menge als unscharfe Zahl bezeichnet.

Zugehörigkeitsfunktionen können als Wertetabelle, als mathematische Formulierung, als programmierte Anweisung oder als Grafik dargestellt werden. Obwohl Zugehörigkeitsfunktionen beliebig ermittelt werden können, haben sich in der Praxis Funktionen mit linearem Verlauf durchgesetzt. Sie haben eine Dreiecks-, Trapez-, Z- oder S-Form. In Abbildung 14.1 hat die unscharfe Variable „viel Organische Substanz (OS)“ die Dreiecksform, die *fuzzy sets* „wenig“ und „mittel OS“ sind trapezförmig, die Variablen „keine“ und „sehr viel OS“ sind jeweils Z- und S-förmig. Die mathematische Darstellung der gezeigten unscharfen Menge „mittlerer Gehalt an organischer Substanz“ lautet

$$\mu_{\text{OS_mittel}}(x) = \begin{cases} 0; & x < 3, x > 20 \\ \frac{x-3}{2}; & 3 \leq x < 5 \\ 1; & 5 \leq x < 7 \\ \frac{20-x}{13}; & 7 \leq x \leq 20 \end{cases} \quad (14.1)$$

Wichtige Parameter zur Kennzeichnung von *fuzzy sets* sind der Trägerbereich oder *support* sowie der Kernbereich (*core*). Der *support* ist definiert als

$$\text{supp}(M) = x \in X | \mu_M(x) > 0, \quad (14.2)$$

er umfasst also alle Elemente der Grundgesamtheit, zu denen die Menge eine Zugehörigkeit ungleich Null hat. Der *core*, definiert als

$$\text{core}(M) = x \in X | \mu_M(x) = 1, \quad (14.3)$$

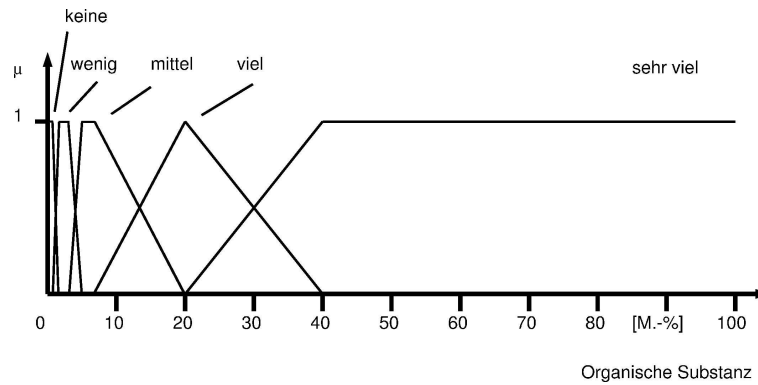


Abbildung 14.1: Grundelemente der *fuzzy logic* am Beispiel der linguistischen Variable „Gehalt an organischer Substanz“

besteht aus allen Elementen mit der Zugehörigkeit 1. Der *support* des „mittleren Gehalts an organischer Substanz“ liegt im Bereich 3 – 20 M.-% OS, der *core* im Bereich 5 – 7 M.-% OS. Wenn lineare Zugehörigkeitsfunktionen mit begrenztem *support* verwendet werden, lässt sich die unscharfe Menge auch als Quadrupel aus unterer *support*-Grenze, unterer *core*-Grenze, oberer *core*-Grenze und oberer *support*-Grenze darstellen. Bei triangularen *fuzzy sets* fallen die beiden *core*-Grenzen zusammen. Die vereinfachte Darstellung des „mittleren Gehalts an organischer Substanz“ lautet

$$\mu_{OS_mittel}(x) = 3; 5; 7; 20. \quad (14.4)$$

Diese Darstellung wird in der vorliegenden Arbeit verwendet.

14.1.2 Linguistische Variablen

Bei der Zusammenfassung mehrerer unscharfer Mengen mit der gleichen Grundmenge X entstehen linguistische Variablen. Sie bestehen aus

- der Grundmenge der linguistischen Werte, die gleichzeitig die Grundwertmenge sein kann und der Linguistischen Variablen einen Namen gibt (z.B. Tongehalt) und aus der die Namen der unscharfen Mengen (oder auch Terme) resultieren,
- den einzelnen unscharfen Mengen mit den oben genannten Bestandteilen (z.B. niedrig, mittel, hoch). Die Namen der unscharfen Mengen können mit Modifikatoren wie „behröder etwas“ kombiniert werden. Dadurch entstehen entweder neue unscharfe Mengen, oder die Zugehörigkeitsfunktionen werden definiert modifiziert.

Bei der graphischen Darstellung werden meistens alle Terme einer linguistischen Variable gemeinsam in einem Diagramm dargestellt. Auf der Abszissenachse des Diagramms wird die Grundmenge X eingetragen, auf der Ordinatenachse die Werte der Zugehörigkeitsfunktion $\mu(x)$. Abbildung 14.1 zeigt die linguistische Variable „Gehalt an organischer Substanz“.

14.1.3 Grundlegende Techniken

Fuzzifizierung

Der Vorgang, bei dem die Zahlen auf eine sprachliche Ebene überführt und somit in unscharfe Mengen umgewandelt werden, heißt Fuzzifizierung. Dazu werden die Terme ausgewählt, in deren Wertebereich die Zahl liegt, und mit Hilfe der Zugehörigkeitsfunktion wird der entsprechende $\mu(x)$ -Wert ermittelt. Damit können dann unscharfe Mengen entsprechend der obenstehenden Vorschrift erzeugt werden. Als Ergebnis liegen sehr oft mehrere unscharfe Mengen vor, weil die Eingangswerte durch die Überlappung der Zugehörigkeitsfunktionen zu verschiedenen unscharfen Mengen zugeordnet werden.

Inferenz

Die Verknüpfung der Eingangsvariablen zu Zielvariablen, welche ebenfalls linguistische Variablen sind, wird als Inferenz bezeichnet. Sie erfolgt auf einer rein sprachlichen Ebene und entspricht der Schlußfolgerung der klassischen Logik. Meist wird sich der Methode des Vorwärtsschließens (Modus ponens) bedient. Dabei wird eine wahre Aussage vorausgesetzt, und aus einer gegebenen Bedingung, die ein Teil der wahren Aussage ist, kann man eine Folgerung ableiten.

Die mathematische Grundlage ist die von der Booleschen Logik bekannte Implikation, welche sprachlich in der Form „Wenn Prämisse Dann Konklusion“ ausgedrückt wird. Für die Anwendung in der *fuzzy logic* sind die folgenden Vorbedingungen zu beachten:

- Die Verknüpfung ist stets wahr.
- Der Wahrheitswert 1 tritt nur ein, wenn sowohl Prämisse als auch Konklusion wahr sind.

Für die praktische Anwendung bedeutet dies, dass ein Regelwerk aufgestellt wird, bestehend aus einer Reihe von Wenn-Dann-Regeln für alle zu erwartenden Konstellationen der Eingangswerte. Da diese Regeln auf der Basis von Messreihen oder von Expertenwissen aufgestellt werden, kann davon ausgegangen werden, dass sie stets wahr sind. Unwahre Implikationen sind im Regelwerk nicht zugelassen.

Die Bedeutung der zweiten Vorbedingung ist, dass die Wenn-Dann-Regel nur zur Anwendung kommt, wenn die Prämisse wahr ist. In diesem Fall haben Bedingung und Folgerung zunächst die Zugehörigkeit $\mu_M(x) = 1$.

Bei der Arbeit mit unscharfen Eingangswerten ist der Zugehörigkeitswert oft nicht gleich 1. In diesem Fall wird ein „unscharfer Schluss“ gezogen, also ausgehend von der scharfen Wenn-Dann-Regel aus der unscharfen Prämisse eine unscharfe Konklusion abgeleitet. Zur Ermittlung des Zugehörigkeitswertes der Konklusion werden dazu die Zugehörigkeiten von Prämisse und Konklusion mit Hilfe eines geeigneten Operators verknüpft.

Es ist auch möglich, mit zusammengesetzten Bedingungen und Folgerungen zu arbeiten, z.B. mit: "Wenn der Hang steil ist Und der Boden vegetationsfrei ist Und Reifenspuren deutlich ausgeprägt sind, Dann ist die Erosionsgefahr sehr hoch". In diesem Fall müssen zuerst die Zugehörigkeitswerte der Prämisse verknüpft werden und ergeben den Erfülltheitsgrad der Regel v (*degree of fulfillment*, DOF), welcher dann als Eingangswert für die Implikation verwendet wird.

Defuzzifizierung

Häufig ist es notwendig, die unscharf vorliegenden Ergebnisse der Inferenz wieder in „scharfe“ Werte umzuwandeln. Dieser als Defuzzifizierung bezeichnete Vorgang stellt an sich die Umkehrung der Fuzzifizierung dar, nur ist die „Retransformation“ unscharfer in scharfe Informationen weniger trivial als die Transformation. Da aus meist mehreren Mengen und den Zugehörigkeiten nur ein Ausgangswert abgeleitet wird, ist dieser Vorgang immer mit einem Informationsverlust verbunden.

Besonders gebräuchlich sind die Verfahren Center-of-Gravity, Center-of-Maximum sowie Mean-of-Maximum in verschiedenen Varianten. Die Defuzzifizierung wird nicht näher beschrieben, weil sie nicht in der Arbeit verwendet wird. Nähere Informationen können der oben genannten Literatur entnommen werden.

14.2 Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation

Die folgenden Seiten enthalten die Definitionen der Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation in tabellarischer (Tabelle 14.1) und graphischer Form (Abbildung 14.2–14.6). Bei der tabellarischen Darstellung werden die nur die Begrenzungen des *support* und des *core* angegeben. Die *fuzzy sets* sind nummeriert, um in Tabelle 14.2 eine vereinfachte Darstellung zu ermöglichen. Im einzelnen werden die folgenden Abkürzungen verwendet:

Nr	Fortlaufende Nummer der <i>fuzzy sets</i>
US	untere <i>support</i> -Grenze
UC	untere <i>core</i> -Grenze
OC	obere <i>core</i> -Grenze
OS	obere <i>support</i> -Grenze
F-%	Flächen-%
M-%	Masse-%

14.3 Definitionen der Horizonte

Tabelle 14.2 zeigt die Definitionen der Horizonte, also die Regeln, die zur Horizontidentifizierung verwendet werden. Aus drucktechnischen Gründen ist die Tabelle so gesetzt, dass die einzelnen Teile der Definition untereinander stehen. Die aufgeführten Ziffern sind die Nummern der *fuzzy sets* aus Tabelle 14.1. Das Zeichen E bedeutet, dass der Parameter für die Definition keine Rolle spielt („Egal“) und übersprungen wird (skipping, Kapitel 3.4). Die Definition des Aa-Horizontes lautet demzufolge

Wenn es keine Bänder gibt und der Horizont nicht bearbeitet ist und keine Brauneisenanreicherung stattgefunden hat und der Munsell Hue gelb ist und der Munsell Value dunkel ist und der Munsell Chroma blass ist und der Horizont keine Flecken aufweist ... Dann ist es ein Aa-Horizont.

Die weiteren verwendeten Abkürzungen sind:

- | | |
|---------------|--|
| Unterschied o | Unterschied zum darüber liegenden Horizont, |
| Unterschied u | Unterschied zum nach unten folgenden Horizont, |
| Ausgest | Ausgangsgestein, |
| OS | Organische Substanz. |

Tabelle 14.1: Definitionen der Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation. Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Parameter/Einheit	Name	Nr	US	UC	OC	OS
Bänder [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Basensättigung [%]	sehr gering	0	0	0	9	12
	mittel	1	9	12	60	80
	hoch	2	60	80	100	100
Bearbeitung	keine	0	0	0	33,3	50
	unregelmäßig	1	33,3	50	50	66,6
	regelmäßig	2	50	66,6	100	100
Biogener Mix [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Brauneisenanreicherung [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Munsell Hue [° (Winkel auf dem Farbkreis)]	rot	0	324	360	36	72
	gelb	1	36	72	108	144
	grün	2	108	144	180	216
	blau	3	180	216	252	288
	violett	4	252	288	324	360
Munsell Value	dunkel	0	0	0	2,5	5
	mittel	1	2,5	5	5	6,5
	hell	2	5	6,5	9	9
Munsell Chroma	blass	0	0	0	2,5	5
	mittel	1	2,5	5	5	6,5
	leuchtend	2	5	6,5	12	12
Hue Unterschied o [%]	Änd.-richtg. rot	0	0	0	48	50
	keine Änd.	1	48	50	50	52
	Änd.-richtg. violett	2	50	52	100	100
Hue Unterschied u [%]	Änd.-richtg. rot	0	0	0	48	50
	keine Änd.	1	48	50	50	52
	Änd.-richtg. violett	2	50	52	100	100
Value Unterschied [%]	dunkler werdend	0	0	0	44	50
	keine Änd.	1	44	50	50	56
	heller werdend	2	50	56	100	100
Quotient Value Chroma	gering	0	0	0	2	2,5
	mittel	1	2	2,5	2,5	3
	hoch	2	2,5	3	9	9
Flecken [F-%]	keine	0	0	0	0,5	1
	sehr wenig	1	0,5	1	1,5	6
	wenig	2	1,5	6	6	11,5
	mittel	3	6	11,5	11,5	33
	viele	4	11,5	33	33	75
sehr viele	5	33	75	100	100	
Flecken nur an Wurzelbahnen [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Bröckelgefüge [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Einzelkorngefüge [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Kittgefüge [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Klumpengefüge [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100

Fortsetzung auf der nächsten Seite

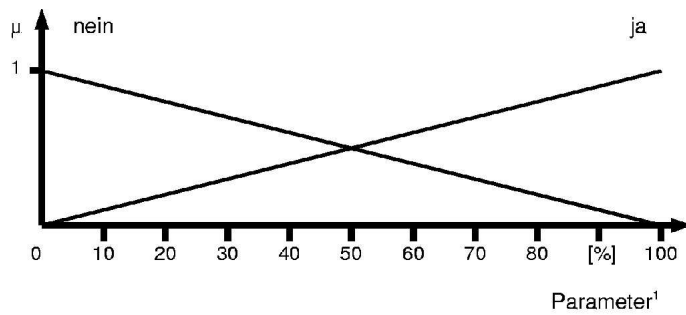
Tabelle 14.1: Definitionen der Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation (Fortsetzung).
Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Parameter/Einheit	Name	Nr	US	UC	OC	OS
Kohärentgefüge [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Krümelgefüge [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Polyedergefüge [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Prismengefüge [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Rissgefüge [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Subpolyedergefüge [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Gewässergrund [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Grundwassereinfluss [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Humusverteilung	horizontal ungleichmäßig	0	0	0	33,3	50
	gleichmäßig	1	33,3	50	50	66,6
	vertikal ungleichmäßig	2	50	66,6	100	100
Wasserleitfähigkeit [kf/d]	sehr gering	0	0	0	9	10
	gering	1	9	10	10	11
	hoch	2	10	11	10000	10000
Lage auf Ausgest [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Lagerungsdichte [Rohdichte $\rho_t + 0,009\%$ Ton]	gering	0	0	0	1	1,4
	mittel	1	1	1,4	1,7	2
	hoch	2	1,7	2	10	10
Lage im Profil	oben	0	0	0	0,17	0,33
	oben–mitte	1	0,17	0,33	0,33	0,5
	mitte	2	0,33	0,5	0,5	0,67
	mitte–unten	3	0,5	0,67	0,67	0,83
	unten	4	0,67	0,83	1	1
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt [mS/cm]	gering	0	0	0	0,5	1
	mittel	1	0,5	1	3	5
	hoch	2	3	5	100	100
Mächtigkeit [cm]	sehr gering	0	0	0	2	3
	mittel	1	2	3	30	50
	hoch	2	30	50	200	200
Marmorierung [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Maschinelle Bearbeitung [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Mineralischer Horizont [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Organische Substanz M.-%	keine	0	0	0	0,5	1,25
	wenig	1	0,5	1,25	3	5
	mittel	2	3	5	7	20
	viel	3	7	20	20	40
	sehr viel	4	20	40	100	100

Fortsetzung auf der nächsten Seite

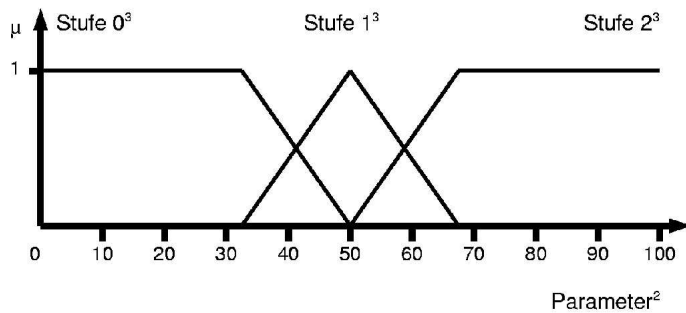
Tabelle 14.1: Definitionen der Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation (Fortsetzung).
Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Parameter/Einheit	Name	Nr	US	UC	OC	OS
OS Unterschied o [%]	weniger werdend	0	0	0	49	50
	keine Änd.	1	49	50	50	51
	mehr werdend	2	50	51	100	100
OS Unterschied u [%]	weniger werdend	0	0	0	49	50
	keine Änd.	1	49	50	50	51
	mehr werdend	2	50	51	100	100
Plaggenmaterial [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Schichtung [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Schluffgehalt [M-% Feinboden]	gering	0	0	0	10	22,5
	mittel	1	10	22,5	22,5	55
	hoch	2	22,5	55	55	70
	sehr hoch	3	55	70	100	100
Sekundärcarbonat [%]	wenig	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Sesquioxid Unterschied o [%]	weniger werdend	0	0	0	48	50
	keine Änd.	1	48	50	50	52
	Änd.-richtg. violett	2	50	52	100	100
Sesquioxid Unterschied u [%]	weniger werdend	0	0	0	48	50
	keine Änd.	1	48	50	50	52
	Änd.-richtg. violett	2	50	52	100	100
Tongehalt [M-% Feinboden]	gering	0	0	0	10	22,5
	mittel	1	10	22,5	22,5	55
	hoch	2	22,5	55	55	70
	sehr hoch	3	55	70	100	100
Tongehalt Unterschied o [%]	viel weniger werdend	0	0	0	48,5	49,25
	weniger werdend	1	48,5	49,25	49,25	50
	keine Änd.	2	49,25	50	50	50,75
	mehr werdend	3	50	50,75	50,75	51,5
	viel mehr werdend	4	50,75	51,5	100	100
Tongehalt Unterschied u [%]	viel weniger werdend	0	0	0	48,5	49,25
	weniger werdend	1	48,5	49,25	49,25	50
	keine Änd.	2	49,25	50	50	50,75
	mehr werdend	3	50	50,75	50,75	51,5
	viel mehr werdend	4	50,75	51,5	100	100
Tonhäutchen/Tontapeten	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Torf	nein	0	0	0	33,33	50
	anmoorig	1	33,33	50	50	66,66
	ja	2	50	66,66	100	100
Verfestigungen	nein	0	0	0	33,3	50
	wenige	1	33,3	50	50	66,6
	viele	2	50	66,6	100	100
Verwitterungsgrad	gering	0	0	0	33,3	50
	mittel	1	33,3	50	50	66,6
	stark	2	50	66,6	100	100
Wurzeln [%]	nein	0	0	0	0	100
	ja	1	0	100	100	100
Zersetzungsgrad der OS [%]	gering	0	0	0	20	40
	mittel	1	20	40	40	60
	hoch	2	40	60	60	80
	sehr hoch	3	60	80	100	100



¹Die graphische Darstellung gilt für die Parameter:

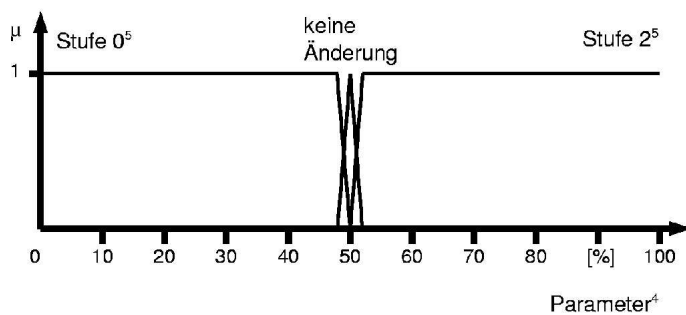
- Bänder,
- Biogener Mix
- Brauneisenanreicherung
- Flecken nur an Wurzelbahnen
- Gefüge (Bröckel, Einzelkorn, Kitt, Klumpen, Kohärent, Krümel, Polyeder, Prismen, Riss, Subpolyeder),
- Lage auf Ausgangsgestein,
- Marmorierung,
- Maschinelle Bearbeitung,
- Mineralischer Horizont,
- Plaggenmaterial,
- Schichtung,
- Sekundärcarbonat,
- Tonhäutchen/Tontapeten,
- Wurzeln.



²Die graphische Darstellung gilt für die Parameter:

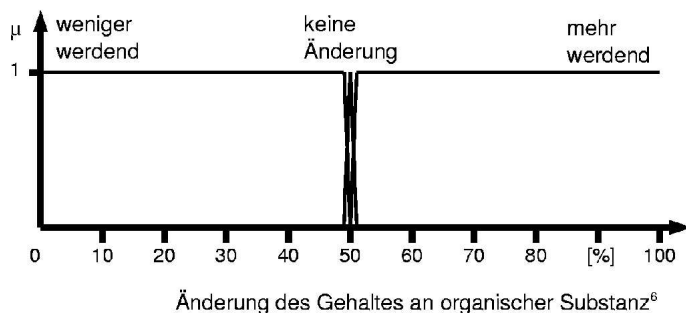
- Bearbeitung,
- Humusverteilung,
- Torf,
- Verfestigungen,
- Verwitterungsgrad.

³Die Namen der unscharfen Variablen sind in der Definitionstabelle aufgeführt.



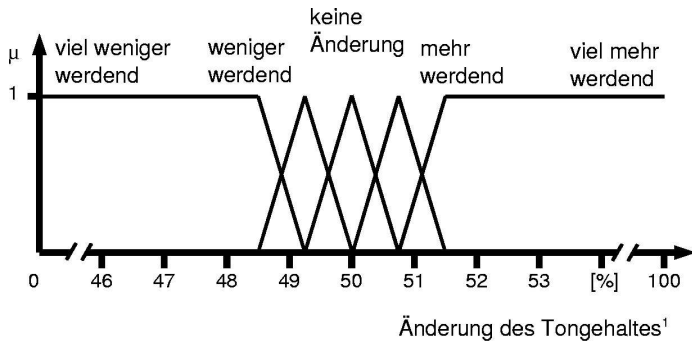
⁴Die graphische Darstellung gilt für die Hue-Änderung nach oben und nach unten sowie für die Änderung des Sesquioxid-Gehalts nach oben und nach unten.

⁵Die Namen der unscharfen Variablen sind in der Definitionstabelle aufgeführt.

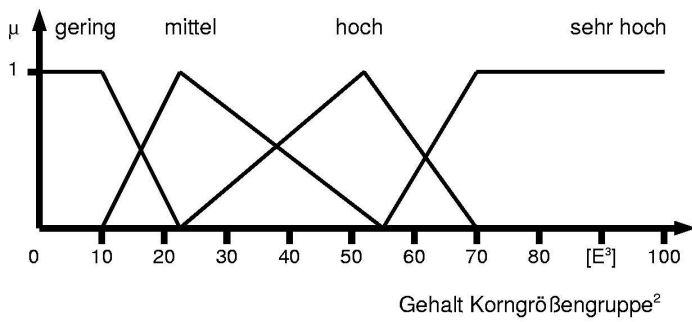


⁶Die graphische Darstellung gilt für die Änderung des Gehalts an organischer Substanz nach oben und nach unten.

Abbildung 14.2: Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation, Teil 1

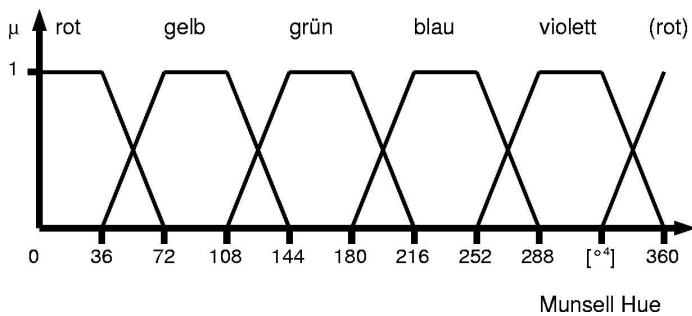
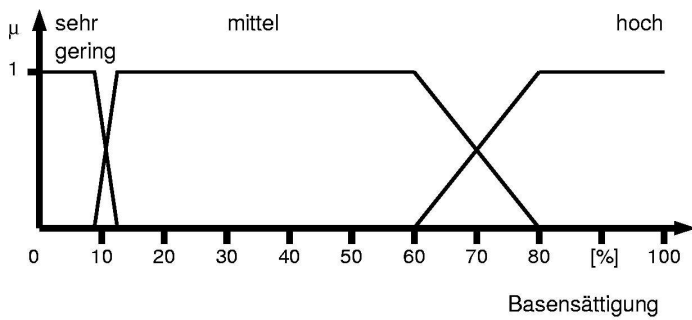


¹Die graphische Darstellung gilt für die Änderung des Tongehaltes nach oben und nach unten.



²Die graphische Darstellung gilt für die Schluff- und die Tongehalte.

³Die Gehalte werden in M-% Feinboden angegeben.



⁴Die Munsell-Hue-Werte werden als Winkel auf dem Farbkreis angegeben.

Abbildung 14.3: Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation, Teil 2

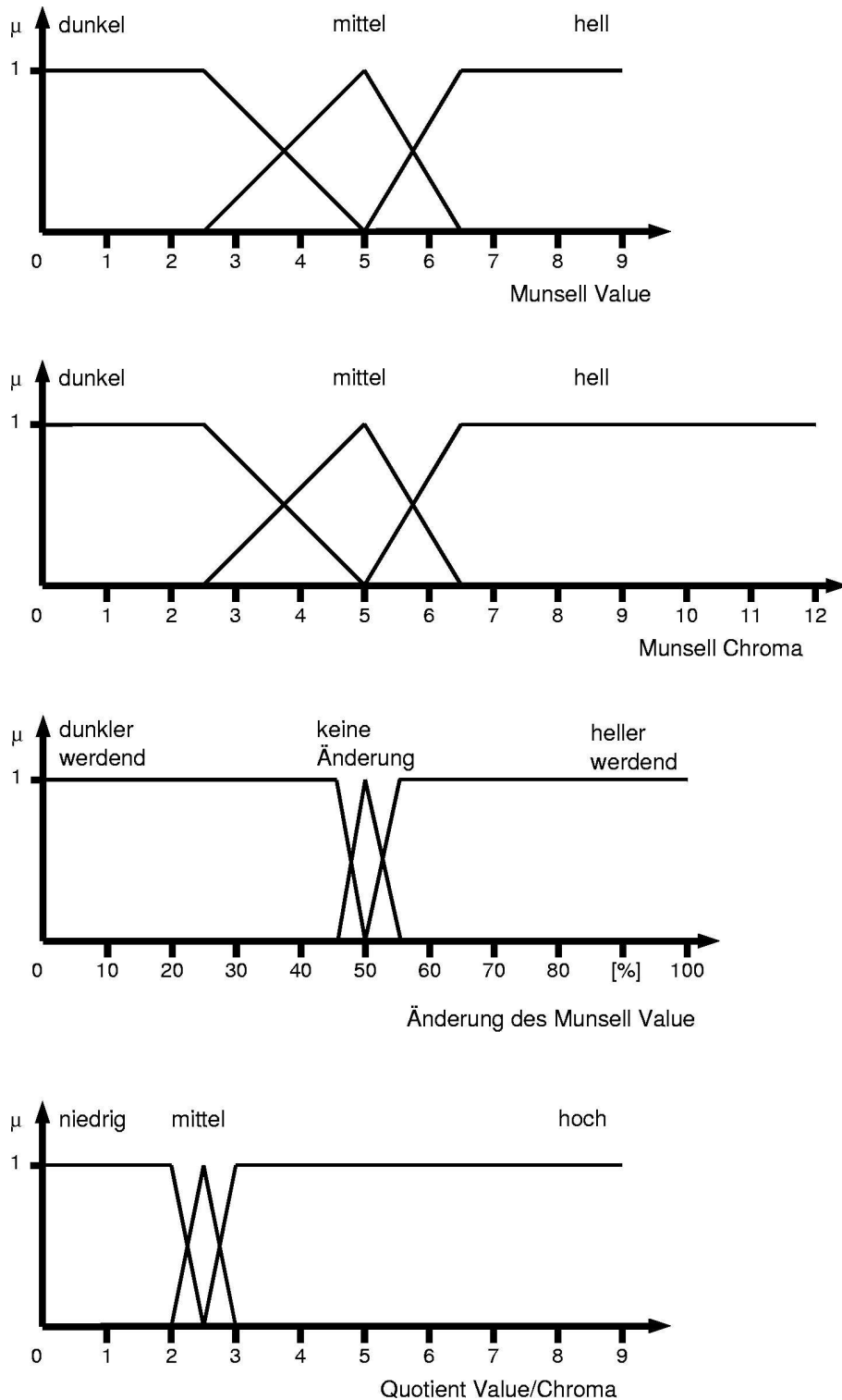
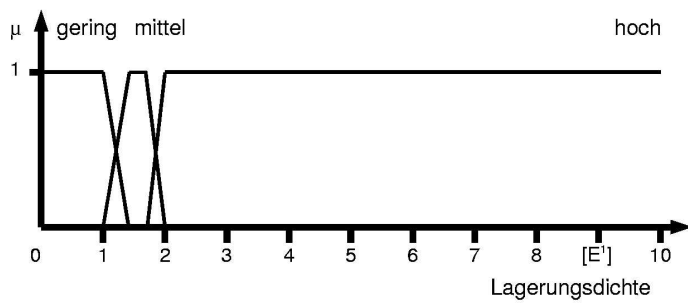
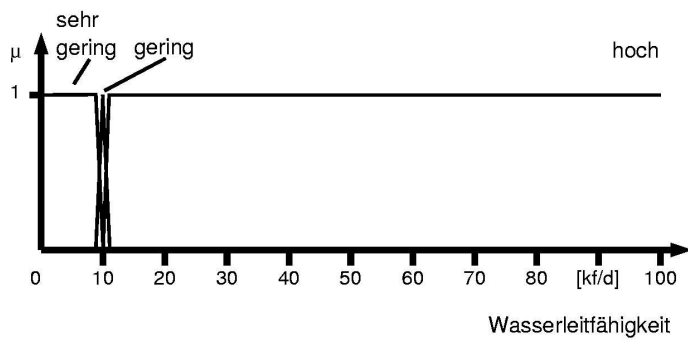
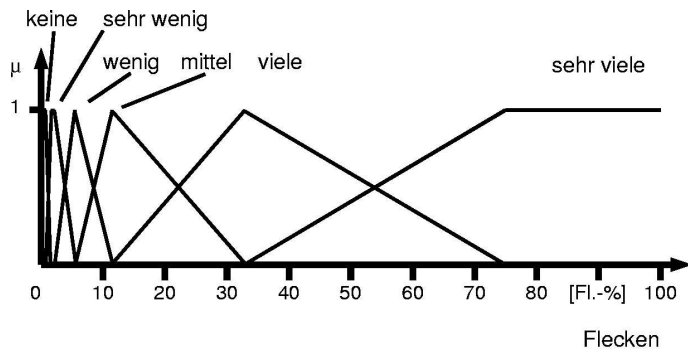
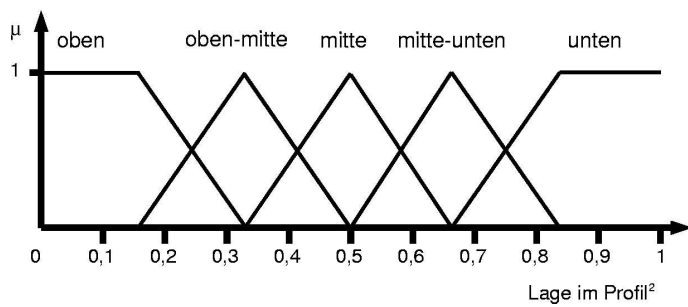


Abbildung 14.4: Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation, Teil 3



¹Die Lagerungsdichte wird angegeben in Rohdichte $\rho_t + 0,009\%$ Ton.



²Die Lage im Profil wird berechnet mit $(n-1)/(N-1)$, n: laufende Nummer des Horizonts, N: Gesamtzahl der Horizonte.

Abbildung 14.5: Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation, Teil 4

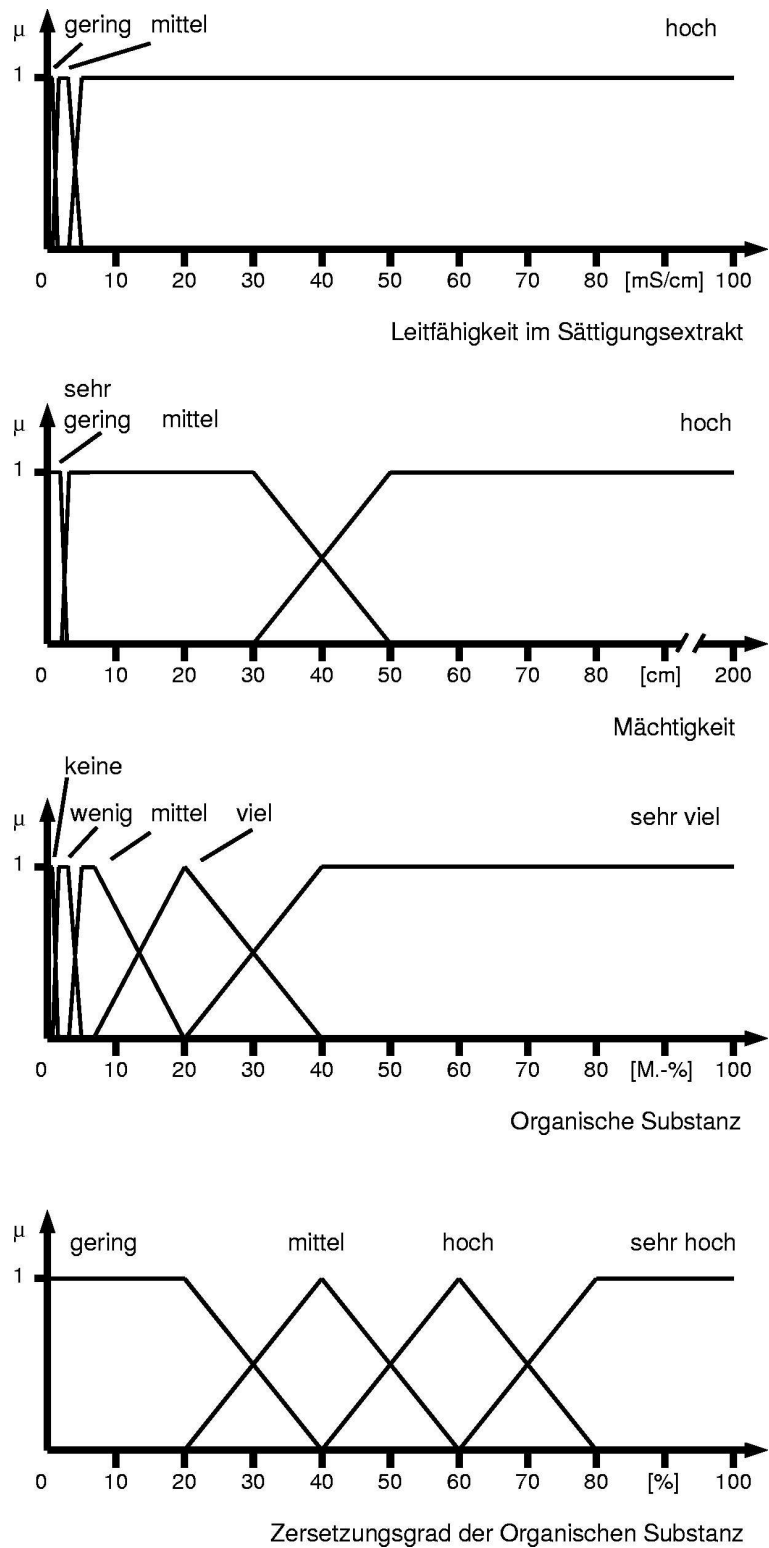


Abbildung 14.6: Parameter für die regelbasierte Horizontidentifikation, Teil 5

Tabelle 14.2: Definitionen der Horizonte für die regelbasierte Identifizierung. Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Horizontname	Aa	Aah	Ach	Acxh	Ae	Aeh	Ael	Ah
Bänder	0	0	0	0	0	0	0	0
Basensättigung	E	E	1 o. 2	2	E	0 o. 1	E	E
Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Biogener Mix	E	0	E	1	0	E	E	E
Brauneisenanreicherung	0	0	0	0	0	0	0	0
Munsell Hue	1	1	1	1	E	0 o. 4	1	0 o. 1
Munsell Value	0	0	E	0	1 o. 2	E	2	E
Munsell Chroma	0	0	E	0	0	0	0 o. 1	0 o. 1
Hue-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Hue-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Chroma-Unterschied	E	E	1	1	2	E	2	E
Quotient Value/Chroma	E	E	E	E	1 o. 2	E	0	0
Flecken	0	0	0	0	0	0	E	0
Flecken nur an Wurzelbahnen	0	0	0	0	0	0	0	0
Bröckelgefüge	0	0	0	0	0	0	E	E
Einzelkorngefüge	0	E	E	0	1	E	E	E
Kittgefüge	0	E	E	E	0	0	0	0
Klumpengefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Kohärentgefüge	E	E	E	0	0	E	0	E
Krümelfgefüge	E	E	E	E	0	E	0	E
Polyedergefüge	E	E	E	E	0	0	E	E
Prismengefüge	E	E	E	E	0	0	E	0
Rissgefüge	0	E	E	E	0	0	0	0
Subpolyedergefüge	E	E	E	E	0	E	E	E
Gewässergrund	0	0	0	0	0	0	0	0
Grundwassereinfluss	0	0	0	0	0	0	0	0
Humusverteilung	1	1	1	1	E	2	E	1
Wasserleitfähigkeit	E	E	E	E	E	E	E	E
Lage auf Ausggest	0	E	E	E	0	0	0	E
Lagerungsdichte	1	1	0 o. 1	1	E	E	0 o. 1	E
Lage im Profil	0	0	0	E	0 o. 1	0	0 o. 1	0
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt	0	0	0	0	0	0	0	0
Mächtigkeit	E	1	E	1 o. 2	E	0 o. 1	E	0 o. 1
Marmorierung	0	0	0	0	0	0	0	0
Maschinelle Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Mineralischer Horizont	1	1	1	1	1	1	1	1
OrganischeSubstanz	3	2	E	1 o. 2	0	1 o. 2	0 o. 1	1 o. 2
OS-Unterschied o	E	E	E	E	0 o. 1	E	0	E
OS-Unterschied u	1 o. 2	1 o. 2	1 o. 2	1 o. 2	0 o. 1	E	E	1 o. 2
Plaggenmaterial	0	0	0	0	0	0	0	0
Schichtung	0	0	0	0	0	0	0	0
Schluffgehalt	E	E	E	2	0 o. 1	E	E	E
Sekundärcarbonat	0	E	1	2	0	0	0	0
Sesquioxid-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Sesquioxid-Unterschied u	E	E	E	E	0	0	0	E
Tongehalt	E	E	E	1	0	0	0	0 o. 1
Tongehalt-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	0	E
Tonhäutchen/Tontapeten	0	0	0	0	0	0	0	0
Torf	0	0	0	0	0	0	0	0
Verfestigungen	0	0	0	0	0	0	E	E
Verwitterungsgrad	2	2	2	2	2	2	2	2
Wurzeln	1	E	1	1	E	1	1	1
Zersetzungsgrad der OS	2	2	2	2	3	2	E	2

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 14.2: Definitionen der Horizonte für die regelbasierte Identifizierung (Fortsetzung). Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Horizontname	Ahe	Ahl	Ahz	Ai	Aih	Aiz	Al	Alh
Bänder	0	0	0	0	0	0	0	0
Basensättigung	0 o. 1	1 o. 2	E	E	1 o. 2	E	E	E
Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Biogener Mix	0	E	E	E	E	E	E	E
Brauneisenanreicherung	0	0	0	0	0	0	0	0
Munsell Hue	0 o. 4	1	1	E	1	E	1	1
Munsell Value	E	1 o. 2	E	0	E	0	1 o. 2	1 o. 2
Munsell Chroma	0	1	E	0	E	0	E	1
Hue-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Hue-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	1 o. 2	E
Chroma-Unterschied	E	2	1	E	1	E	2	2
Quotient Value/Chroma	E	0 o. 1	E	E	E	E	0 o. 1	E
Flecken	0	0	0	0	0	0	0	0
Flecken nur an Wurzelbahnen	0	0	0	0	0	0	0	0
Bröckelgefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Einzelkorngefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Kittgefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Klumpengefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Kohärentgefüge	E	E	E	0	E	0	0	0
Krümelgefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Polyedergefüge	0	E	E	E	0	0	E	E
Prismengefüge	0	0	E	0	0	0	E	0
Rissgefüge	0	0	E	0	0	0	0	0
Subpolyedergefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Gewässergrund	0	0	0	0	0	0	0	0
Grundwassereinfluss	0	0	0	0	0	0	0	0
Humusverteilung	0	E	1	1	1	1	E	1
Wasserleitfähigkeit	E	E	E	E	E	E	2	E
Lage auf Ausggest	0	0	E	1	1	1	0	0
Lagerungsdichte	E	0 o. 1	0 o. 1	E	0 o. 1	E	1	0 o. 1
Lage im Profil	0 o. 1	0 o. 1	0	0	0	0	0 o. 1	0 o. 1
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt	0	0	2	0	0	2	0	0
Mächtigkeit	E	E	E	0	0	0	E	1
Marmorierung	0	0	0	0	0	0	0	0
Maschinelle Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Mineralischer Horizont	1	1	1	1	1	1	1	1
OrganischeSubstanz	1 o. 2	1	E	0 o. 1	0 o. 1	0 o. 1	0 o. 1	1 o. 2
OS-Unterschied o	E	0 o. 1	E	E	E	E	0	E
OS-Unterschied u	0 o. 1	1 o. 2	1 o. 2	1 o. 2	1 o. 2	1 o. 2	E	1 o. 2
Plaggenmaterial	0	0	0	0	0	0	0	0
Schichtung	0	0	0	0	0	0	0	0
Schluffgehalt	E	E	E	E	E	E	E	E
Sekundärcarbonat	0	0	0	0	0	E	0	0
Sesquioxid-Unterschied o	0	E	E	E	E	E	E	E
Sesquioxid-Unterschied u	0	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt	0	0 o. 1	E	E	E	E	0 o. 1	E
Tongehalt-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	1
Tongehalt-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	0	1
Tonhäutchen/Tontapeten	0	0	0	0	0	0	0	0
Torf	0	0	0	0	0	0	0	0
Verfestigungen	0	0	0	0	0	0	0	0
Verwitterungsgrad	2	2	2	2	2	2	2	2
Wurzeln	E	1	E	E	E	E	E	E
Zersetzungsgrad der OS	2	2	2	2	1	2	3	2

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 14.2: Definitionen der Horizonte für die regelbasierte Identifizierung (Fortsetzung). Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Horizontname	Ap	Axh	Axp	Azh	Azi	Bhms	Bbh	Bbms
Bänder	0	0	0	0	0	0	1	1
Basensättigung	E	2	2	E	E	0 o. 1	E	0 o. 1
Bearbeitung	2	0	2	0	0	0	0	0
Biogener Mix	0	1	1	E	E	0	0	0
Brauneisenanreicherung	E	0	0	0	0	0	0	0
Munsell Hue	0 o. 1	1	1	1	E	0	E	0
Munsell Value	0 o. 1	0	0 o. 1	E	0	1 o. 2	0	1 o. 2
Munsell Chroma	E	0	0 o. 1	E	0	1 o. 2	0	2
Hue-Unterschied o	E	E	E	E	E	0	E	0
Hue-Unterschied u	E	E	E	E	E	0	E	0
Chroma-Unterschied	E	1	1	1	E	E	0	E
Quotient Value/Chroma	0 o. 1	E	E	E	E	E	E	E
Flecken	E	0	0	0	0	0	0	0
Flecken nur an Wurzelbahnen	0	E	0	0	0	0	0	0
Bröckelgefüge	E	0	E	0	0	0	0	0
Einzelkorngefüge	E	0	0	E	E	E	E	E
Kittgefüge	0	0	0	0	0	E	E	E
Klumpengefüge	E	0	E	0	0	0	0	0
Kohärentgefüge	E	0	0	0	0	E	0	E
Krümelfgefüge	E	E	E	E	E	0	E	E
Polyedergefüge	E	E	0	E	E	0	E	E
Prismengefüge	0	E	0	0	0	0	0	0
Rissgefüge	0	E	0	0	0	0	0	0
Subpolyedergefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Gewässergrund	0	0	0	0	0	0	0	0
Grundwassereinfluss	0	0	0	0	0	0	0	0
Humusverteilung	1	1	1	1	1	1	E	1
Wasserleitfähigkeit	E	E	E	E	E	E	E	E
Lage auf Ausggest	E	E	E	E	1	E	E	E
Lagerungsdichte	1	1	1	0 o. 1	E	2	E	2
Lage im Profil	0	0 o. 1	0	0	0	2 o. 3	1 o. 2	1 o. 2
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt	0	0	0	1	1	0	0	0
Mächtigkeit	1	1 o. 2	1	E	0	1	0	1
Marmorierung	0	0	0	0	0	0	0	0
Maschinelle Bearbeitung	1	0	1	0	0	0	0	0
Mineralischer Horizont	1	1	1	1	1	1	1	1
OrganischeSubstanz	1	E	1 o. 2	E	0 o. 1	0 o. 1	1 o. 2	0
OS-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	2	E
OS-Unterschied u	1	1 o. 2	E	1 o. 2	1 o. 2	E	2	E
Plaggenmaterial	0	0	0	0	0	0	0	0
Schichtung	0	0	0	0	0	0	0	0
Schluffgehalt	E	E	E	E	E	E	E	E
Sekundärcarbonat	0	0	0	0	E	0	0	0
Sesquioxid-Unterschied o	E	E	E	E	E	2	E	2
Sesquioxid-Unterschied u	E	E	E	E	E	0	E	2
Tongehalt	E	E	0 o. 1	E	E	E	E	E
Tongehalt-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Tonhäutchen/Tontapeten	0	0	0	0	0	0	0	0
Torf	0	0	0	0	0	0	0	0
Verfestigungen	E	0	0	0	0	2	0	2
Verwitterungsgrad	2	2	2	2	2	2	2	2
Wurzeln	1	1	1	E	E	0	E	0
Zersetzungsgrad der OS	2	2	2	2	2	2	2	3

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 14.2: Definitionen der Horizonte für die regelbasierte Identifizierung (Fortsetzung). Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Horizontname	Bbs	Bbt	Bcv	Bfv	Bh	Bhs	Bht	Bhv
Bänder	1	1	0	0	0	0	0	0
Basensättigung	0 o. 1	0 o. 1	E	E	0	0 o. 1	1 o. 2	E
Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Biogener Mix	0	0	0	0	0	0	0	0
Brauneisenanreicherung	0	0	0	0	0	0	0	0
Munsell Hue	0 o. 1	0	1	1	0	0	0 o. 1	1
Munsell Value	1 o. 2	1 o. 2	1	1	0	1	1	1
Munsell Chroma	2	1 o. 2	2	2	0	1 o. 2	E	1 o. 2
Hue-Unterschied o	0	E	E	E	E	0 o. 1	E	E
Hue-Unterschied u	0	E	0	0	E	0 o. 1	E	0
Chroma-Unterschied	E	0 o. 1	2	0	0	E	E	2
Quotient Value/Chroma	E	0	E	E	0 o. 1	0	0	E
Flecken	0	0	0	0	0	0	0	0
Flecken nur an Wurzelbahnen	0	0	0	0	0	0	0	0
Bröckelgefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Einzelkorngefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Kittgefüge	E	E	0	0	E	E	0	0
Klumpengefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Kohärentgefüge	E	E	0	E	E	E	0	0
Krümelgefüge	E	E	E	E	0	E	E	E
Polyedergefüge	E	0	E	E	E	0	E	E
Prismengefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Rissgefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Subpolyedergefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Gewässergrund	0	0	0	0	0	0	0	0
Grundwassereinfluss	0	0	0	0	0	0	0	0
Humusverteilung	1	1	E	E	E	E	E	E
Wasserleitfähigkeit	E	E	E	E	E	2	E	E
Lage auf Ausggest	E	E	E	E	E	E	E	E
Lagerungsdichte	1 o. 2	1	1	0	0 o. 1	E	E	1
Lage im Profil	3 o. 4	E	2 o. 3	2 o. 3	E	E	2 o. 3	1 o. 2
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt	0	0	0	0	0	0	0	0
Mächtigkeit	E	E	1	1	E	0 o. 1	1	1
Marmorierung	0	0	0	0	0	0	0	0
Maschinelle Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Mineralischer Horizont	1	1	1	1	1	1	1	1
OrganischeSubstanz	0	0	0	0	1 o. 2	E	1	1
OS-Unterschied o	E	E	0 o. 1	E	2	E	E	1 o. 2
OS-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	2
Plaggenmaterial	0	0	0	0	0	0	0	0
Schichtung	0	0	0	0	0	0	0	0
Schluffgehalt	0	E	E	E	0 o. 1	E	E	E
Sekundärcarbonat	0	0	1	0	0	0	E	0
Sesquioxid-Unterschied o	2	E	E	E	E	2	E	E
Sesquioxid-Unterschied u	2	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt	0 o. 1	0 o. 1	0 o. 1	0 o. 1	0	0	1	0 o. 1
Tongehalt-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	3	E
Tongehalt-Unterschied u	E	2	E	E	E	E	E	E
Tonhäutchen/Tontapeten	0	1	0	0	0	0	1	0
Torf	0	0	0	0	0	0	0	0
Verfestigungen	0	0	0	0	0	0	E	0
Verwitterungsgrad	2	2	2	2	2	2	2	2
Wurzeln	E	E	E	E	E	E	E	E
Zersetzungsgrad der OS	3	3	3	E	2	2	2	2

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 14.2: Definitionen der Horizonte für die regelbasierte Identifizierung (Fortsetzung). Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Horizontname	Bs	Bsh	Bsv	Bt	Btv	Bv	Bvs	Bvt
Bänder	0	0	0	0	0	0	0	0
Basensättigung	0 o. 1	0	0	E	E	E	0	1 o. 2
Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Biogener Mix	0	0	0	0	0	E	0	0
Brauneisenanreicherung	0	0	0	0	0	0	0	0
Munsell Hue	0 o. 1	0	0 o. 1	0	0	1	0 o. 1	1
Munsell Value	1 o. 2	0 o. 1	1 o. 2	1	1	1 o. 2	1 o. 2	1 o. 2
Munsell Chroma	1 o. 2	E	1 o. 2	1 o. 2	E	1 o. 2	2	1 o. 2
Hue-Unterschied o	0 o. 1	E	E	E	0 o. 1	E	2	E
Hue-Unterschied u	0 o. 1	E	E	E	E	E	2	E
Chroma-Unterschied	E	E	E	0	E	1 o. 2	2	E
Quotient Value/Chroma	0 o. 1	0	0	0	0	0	E	0
Flecken	0	0	0	0	0	0	0	0
Flecken nur an Wurzelbahnen	0	0	0	0	0	0	0	0
Bröckelgefüge	0	0	0	0	0	E	0	0
Einzelkorngefüge	E	E	E	E	0	E	E	E
Kittgefüge	E	E	E	E	E	0	E	E
Klumpengefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Kohärentgefüge	E	E	E	E	E	E	0	E
Krümelfgefüge	0	E	0	0	0	E	E	E
Polyedergefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Prismengefüge	0	0	0	E	E	0	0	E
Rissgefüge	0	0	0	E	0	0	0	0
Subpolyedergefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Gewässergrund	0	0	0	0	0	0	0	0
Grundwassereinfluss	0	0	0	0	0	0	0	0
Humusverteilung	E	E	E	E	E	E	E	E
Wasserleitfähigkeit	E	E	E	E	E	2	E	E
Lage auf Ausggest	E	E	E	E	E	E	E	E
Lagerungsdichte	E	E	E	1 o. 2	1 o. 2	1 o. 2	1	1
Lage im Profil	E	E	E	E	E	E	E	E
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt	0	0	0	0	0	0	0	0
Mächtigkeit	1	E	1	1	1	1	1	1
Marmorierung	0	0	0	0	0	0	0	0
Maschinelle Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Mineralischer Horizont	1	1	1	1	1	1	1	1
OrganischeSubstanz	0	1	0	0	0	0	0	0
OS-Unterschied o	E	2	E	E	E	0 o. 1	E	E
OS-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Plaggenmaterial	0	0	0	0	0	0	0	0
Schichtung	0	0	0	0	0	0	0	0
Schluffgehalt	E	0 o. 1	E	E	3 o. 4	E	0 o. 1	1 o. 2
Sekundärcarbonat	0	0	0	0	0	0	0	0
Sesquioxid-Unterschied o	2	E	E	E	E	E	E	E
Sesquioxid-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	2
Tongehalt	0 o. 1	0	0	0 o. 1	0 o. 1	E	0	0 o. 1
Tongehalt-Unterschied o	E	E	E	3 o. 4	3	E	E	3 o. 4
Tongehalt-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	3 o. 4
Tonhäutchen/Tontapeten	0	0	0	1	E	0	0	1
Torf	0	0	0	0	0	0	0	0
Verfestigungen	0	E	0	E	E	E	0	E
Verwitterungsgrad	2	2	2	2	2	2	2	2
Wurzeln	E	E	E	E	E	E	E	E
Zersetzungsgrad der OS	E	2	E	E	E	E	E	E

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 14.2: Definitionen der Horizonte für die regelbasierte Identifizierung (Fortsetzung). Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Horizontname	C	Cc	Ckc	Cn	Cv	E	Gco	Gcor
Bänder	0	0	0	0	0	0	0	0
Basensättigung	E	2	2	E	E	0 o. 1	E	E
Bearbeitung	0	0	0	0	0	E	0	0
Biogener Mix	0	0	0	0	0	E	0	0
Brauneisenanreicherung	0	0	0	0	0	0	0	0
Munsell Hue	E	0 o. 1	0 o. 1	0	0 o. 1	0 o. 1	E	E
Munsell Value	E	1 o. 2	1	E	E	E	1 o. 2	E
Munsell Chroma	E	1	E	E	E	E	0	0
Hue-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Hue-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Chroma-Unterschied	E	E	E	E	E	E	2	E
Quotient Value/Chroma	E	0 o. 1	E	E	E	0 o. 1	0 o. 1	E
Flecken	0	0	0	0	0	0	0	1
Flecken nur an Wurzelbahnen	0	0	0	0	0	0	0	0
Bröckelgefüge	E	E	0	0	E	E	0	0
Einzelkorngefüge	E	E	0	E	E	E	E	E
Kittgefüge	E	E	E	E	E	0	E	E
Klumpengefüge	0	0	0	0	E	0	0	0
Kohärentgefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Krümelgefüge	E	0	0	0	E	0	0	0
Polyedergefüge	E	E	0	0	E	E	E	E
Prismengefüge	0	0	0	0	0	E	E	E
Rissgefüge	0	0	0	0	0	0	E	E
Subpolyedergefüge	E	E	E	0	E	E	E	E
Gewässergrund	0	0	0	0	0	0	0	0
Grundwassereinfluss	0	0	0	0	0	0	1	1
Humusverteilung	E	E	E	E	E	1	E	E
Wasserleitfähigkeit	E	E	2	E	E	E	E	E
Lage auf Ausgest	1	1	1	1	1	0	0	E
Lagerungsdichte	E	E	E	E	E	0 o. 1	E	E
Lage im Profil	E	3 o. 4	3 o. 4	4	E	E	E	E
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt	0	E	0	E	0	0	E	E
Mächtigkeit	E	E	E	E	E	1 o. 2	1 o. 2	1 o. 2
Marmorierung	0	0	0	0	0	0	0	0
Maschinelle Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Mineralischer Horizont	1	1	1	1	1	1	1	1
Organische Substanz	0	0	0	0	0	1 o. 2	0	0
OS-Unterschied o	E	E	E	E	E	0 o. 1	E	E
OS-Unterschied u	E	E	E	E	E	1 o. 2	E	E
Plaggenmaterial	0	0	0	0	0	1	0	0
Schichtung	0	0	0	0	0	E	0	0
Schluffgehalt	E	E	2 o. 3	E	E	E	E	E
Sekundärcarbonat	0	2	1	0	0	0	0	1
Sesquioxid-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Sesquioxid-Unterschied u	E	E	E	E	E	1 o. 2	E	E
Tongehalt	0 o. 1	E	0 o. 1	E	E	0	E	E
Tongehalt-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Tonhäutchen/Tontapeten	0	0	0	0	0	0	0	0
Torf	0	0	0	0	0	0	0	0
Verfestigungen	E	0	1	0	E	0	0	0
Verwitterungsgrad	E	E	E	0	1 o. 2	2	2	2
Wurzeln	E	E	E	0	1	1	E	E
Zersetzungsgrad der OS	E	E	E	E	E	2	E	E

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 14.2: Definitionen der Horizonte für die regelbasierte Identifizierung (Fortsetzung). Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Horizontname	Gcr	Ghor	Ghr	Gkso	Gmso	Go	Gor	Gr
Bänder	0	0	0	E	0	0	0	0
Basensättigung	E	E	E	E	E	E	E	E
Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Biogener Mix	0	0	0	0	0	0	0	0
Brauneisenanreicherung	0	0	0	1	1	0	0	0
Munsell Hue	E	E	E	0 o. 1	0 o. 1	0 o. 1	E	E
Munsell Value	E	E	E	E	E	1 o. 2	E	E
Munsell Chroma	0	0	0	0 o. 1	0 o. 1	E	0	0
Hue-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Hue-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Chroma-Unterschied	E	E	E	E	E	0	E	E
Quotient Value/Chroma	E	E	E	E	E	E	E	E
Flecken	1	1	1	2 o. 3	2 o. 3	E	1	0
Flecken nur an Wurzelbahnen	1	0	1	0	0	0	0	E
Bröckelgefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Einzelkorngefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Kittgefüge	E	0	0	0	E	E	0	E
Klumpengefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Kohärentgefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Krümelgefüge	0	0	0	0	0	E	0	0
Polyedergefüge	E	E	E	E	E	E	E	0
Prismengefüge	E	E	E	E	E	E	E	0
Rissgefüge	E	E	E	E	E	0	E	0
Subpolyedergefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Gewässergrund	0	0	0	0	0	0	0	0
Grundwassereinfluss	1	1	1	1	1	1	1	1
Humusverteilung	E	E	E	E	E	E	E	E
Wasserleitfähigkeit	E	E	E	E	E	E	E	E
Lage auf Ausggest	0	0	E	0	0	E	0	E
Lagerungsdichte	E	E	E	2	2	E	E	E
Lage im Profil	3 o. 4	E	3 o. 4	E	E	E	E	3 o. 4
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt	E	E	E	E	E	E	E	E
Mächtigkeit	1 o. 2	1	1 o. 2	0 o. 1	0 o. 1	1 o. 2	E	1 o. 2
Marmorierung	0	0	0	0	0	0	0	0
Maschinelle Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Mineralischer Horizont	1	1	1	1	1	1	1	1
OrganischeSubstanz	0	1	1	0	0	0	0	0
OS-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
OS-Unterschied u	2	2	2	E	E	E	E	E
Plaggenmaterial	0	0	0	0	0	0	0	0
Schichtung	0	0	0	0	0	0	0	0
Schluffgehalt	E	E	E	E	E	E	E	E
Sekundärcarbonat	1	0	0	0	0	0	0	0
Sesquioxid-Unterschied o	E	E	E	2	2	E	E	E
Sesquioxid-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt	E	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Tonhäutchen/Tontapeten	0	0	0	0	0	0	0	0
Torf	0	0	0	0	0	0	0	0
Verfestigungen	0	0	0	1	2	E	E	0
Verwitterungsgrad	2	2	2	2	2	2	2	2
Wurzeln	E	E	E	0	E	E	E	E
Zersetzungsgrad der OS	E	2	2	E	E	E	E	E

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 14.2: Definitionen der Horizonte für die regelbasierte Identifizierung (Fortsetzung). Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Horizontname	Gro	Gso	Gw	Gzor	H	Ha	Hcr	Hcw
Bänder	0	0	0	0	0	0	0	0
Basensättigung	E	E	E	E	E	E	2	E
Bearbeitung	0	0	0	0	E	0	0	0
Biogener Mix	0	0	0	0	0	0	0	0
Brauneisenanreicherung	E	1	0	0	E	0	0	0
Munsell Hue	E	0 o. 1	E	E	E	E	0 o. 1	E
Munsell Value	1 o. 2	E	2	E	E	0	E	E
Munsell Chroma	0	0 o. 1	0	0	E	0	0	E
Hue-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Hue-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Chroma-Unterschied	E	E	2	E	E	E	E	E
Quotient Value/Chroma	E	E	E	E	E	E	E	E
Flecken	1	2 o. 3	0	1	0	0	0	0
Flecken nur an Wurzelbahnen	0	0	0	0	0	0	0	0
Bröckelgefüge	0	0	0	0	E	0	0	0
Einzelkorngefüge	E	E	E	E	E	0	E	E
Kittgefüge	0	E	0	0	E	0	E	E
Klumpengefüge	0	0	0	0	E	0	0	0
Kohärentgefüge	E	E	E	E	E	0	E	E
Krümelgefüge	0	0	0	0	E	0	E	E
Polyedergefüge	E	0	E	E	E	E	E	E
Prismengefüge	E	E	E	E	E	0	E	E
Rissgefüge	0	E	E	E	E	0	E	E
Subpolyedergefüge	E	E	E	E	E	E	E	E
Gewässergrund	0	0	E	0	E	0	0	0
Grundwassereinfluss	1	1	1	1	E	0	E	E
Humusverteilung	E	E	E	E	E	1	1	1
Wasserleitfähigkeit	E	E	E	E	E	E	E	E
Lage auf Ausggest	0	0	0	E	E	0	0	0
Lagerungsdichte	1 o. 2	2	E	E	E	E	E	E
Lage im Profil	E	E	1 o. 2	E	E	3 o. 4	3 o. 4	1 o. 2
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt	E	E	E	1	E	E	0	0
Mächtigkeit	1 o. 2	1	E	1 o. 2	E	E	E	E
Marmorierung	0	0	0	0	0	0	0	0
Maschinelle Bearbeitung	0	0	0	0	E	0	0	0
Mineralischer Horizont	1	1	1	1	0	0	0	0
OrganischeSubstanz	0	0	0	0	4	4	4	4
OS-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
OS-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Plaggenmaterial	0	0	0	0	0	0	0	0
Schichtung	0	0	0	0	E	E	E	E
Schluffgehalt	E	E	E	E	E	E	E	E
Sekundärcarbonat	0	0	0	0	E	E	1	1
Sesquioxid-Unterschied o	E	2	E	E	E	E	E	E
Sesquioxid-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt	E	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Tonhäutchen/Tontapeten	0	0	0	0	0	0	0	0
Torf	0	0	0	0	2	2	2	2
Verfestigungen	E	0	0	0	E	0	0	0
Verwitterungsgrad	2	2	2	2	E	E	E	E
Wurzeln	E	E	E	E	E	E	E	E
Zersetzungsgrad der OS	E	E	E	E	E	E	E	E

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 14.2: Definitionen der Horizonte für die regelbasierte Identifizierung (Fortsetzung). Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Horizontname	Hm	Hp	Hr	Hs	Ht	Hv	Hw	HZR	Hzw
Bänder	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Basensättigung	E	E	0 o. 1	E	E	E	E	E	E
Bearbeitung	E	1	0	0	0	E	0	0	0
Biogener Mix	E	E	0	0	0	0	0	0	0
Brauneisenanreicherung	0	E	0	1	0	0	0	0	0
Munsell Hue	E	E	0	E	E	0 o. 1	0 o. 1	E	E
Munsell Value	0	0	0 o. 1	E	E	0	E	E	E
Munsell Chroma	0	0	E	E	E	0	E	E	E
Hue-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Hue-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Chroma-Unterschied	E	E	1 o. 2	E	E	E	E	2	E
Quotient Value/Chroma	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Flecken	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flecken nur an Wurzelbahnen	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bröckelgefüge	E	E	0	0	0	0	0	0	0
Einzelkorngefüge	0	E	0	E	0	E	E	E	E
Kittgefüge	0	E	E	E	0	0	E	E	E
Klumpengefüge	E	E	0	0	0	0	0	0	0
Kohärentgefüge	0	E	E	E	0	0	E	E	E
Krümelfgefüge	0	E	0	E	0	E	E	E	E
Polyedergefüge	0	E	E	E	0	0	E	E	E
Prismengefüge	0	E	E	E	E	0	E	E	E
Rissgefüge	0	E	E	E	E	0	E	E	E
Subpolyedergefüge	0	E	E	E	0	E	E	E	E
Gewässergrund	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grundwassereinfluss	0	0	E	E	E	E	E	E	E
Humusverteilung	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Wasserleitfähigkeit	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Lage auf Ausggest	0	E	0	E	E	0	0	0	0
Lagerungsdichte	E	E	0	E	E	E	E	E	E
Lage im Profil	0 o. 1	E	E	E	3 o. 4	0 o. 1	E	E	1 o. 2
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt	0	E	0	0	0	0	0	1	1
Mächtigkeit	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Marmorierung	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maschinelle Bearbeitung	E	1	0	0	0	E	0	0	0
Mineralischer Horizont	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OrganischeSubstanz	4	4	4	4	4	4	4	4	4
OS-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E	E
OS-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Plaggenmaterial	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Schichtung	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Schluffgehalt	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Sekundärcarbonat	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sesquioxid-Unterschied o	E	E	E	2	E	E	E	E	E
Sesquioxid-Unterschied u	E	E	E	2	E	E	E	E	E
Tongehalt	E	E	E	E	E	E	E	0	E
Tongehalt-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	0	E
Tongehalt-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Tonhäutchen/Tontapeten	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Torf	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Verfestigungen	0	0	0	E	0	E	0	0	0
Verwitterungsgrad	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Wurzeln	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Zersetzungsgrad der OS	E	E	E	E	E	E	E	E	E

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 14.2: Definitionen der Horizonte für die regelbasierte Identifizierung (Fortsetzung). Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Horizontname	L	M	Mc	O	Oh	Of	Ovh	P
Bänder	0	0	0	0	0	0	0	0
Basensättigung	E	E	2	E	E	E	E	2
Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Biogener Mix	E	0	0	E	E	E	E	0
Brauneisenanreicherung	0	E	E	0	0	0	0	0
Munsell Hue	0 o. 1	0 o. 1	0 o. 1	E	0	0 o. 1	E	0 o. 1
Munsell Value	E	E	1	0	E	E	E	1
Munsell Chroma	E	E	1 o. 2	0	E	E	E	0 o. 1
Hue-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Hue-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Chroma-Unterschied	E	1 o. 2	1 o. 2	E	E	E	E	E
Quotient Value/Chroma	E	0 o. 1	E	E	0 o. 1	E	E	E
Flecken	0	0	0	0	0	0	0	0 o. 1
Flecken nur an Wurzelbahnen	0	0	0	0	0	0	0	0
Bröckelgefüge	0	E	0	0	0	0	0	0
Einzelkorngefüge	0	E	E	0	0	0	0	0
Kittgefüge	0	0	E	0	0	0	0	0
Klumpengefüge	0	0	0	0	0	0	0	0
Kohärentgefüge	0	E	E	0	0	0	0	0
Krümelfgefüge	0	E	E	0	0	0	E	0
Polyedergefüge	0	E	E	0	0	0	0	E
Prismengefüge	0	E	0	0	0	0	0	E
Rissgefüge	0	0	0	0	0	0	0	E
Subpolyedergefüge	0	E	E	0	0	0	0	0
Gewässergrund	0	0	0	0	0	0	0	0
Grundwassereinfluss	0	0	0	0	0	0	0	0
Humusverteilung	1	1	1	1	1	1	1	E
Wasserleitfähigkeit	E	2	E	E	E	E	E	E
Lage auf Ausggest	0	E	E	E	E	0	E	E
Lagerungsdichte	E	1	1	E	E	0	E	E
Lage im Profil	0	E	2 o. 3	0	0	0	0	3 o. 4
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt	0	0	0	0	0	0	0	0
Mächtigkeit	0	1 o. 2	1	0 o. 1	0 o. 1	0 o. 1	0 o. 1	E
Marmorierung	0	0	0	0	0	0	0	0
Maschinelle Bearbeitung	0	0	0	0	0	0	0	0
Mineralischer Horizont	0	1	1	0	0	0	0	1
OrganischeSubstanz	4	1 o. 2	1 o. 2	4	4	4	4	0
OS-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
OS-Unterschied u	E	2	2	E	E	E	E	E
Plaggenmaterial	0	0	0	0	0	0	0	0
Schichtung	E	1	1	E	E	E	E	0
Schluffgehalt	0	E	E	0	E	0	0	1 o. 2
Sekundärcarbonat	0	0	1	E	E	0	E	0
Sesquioxid-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Sesquioxid-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt	0	0 o. 1	E	0	E	0	0	2 o. 3
Tongehalt-Unterschied o	E	E	E	E	E	E	E	E
Tongehalt-Unterschied u	E	E	E	E	E	E	E	E
Tonhäutchen/Tontapeten	0	0	0	0	0	0	0	0
Torf	0	0	0	0	0	0	0	0
Verfestigungen	0	E	0	0	0	0	0	E
Verwitterungsgrad	E	2	2	E	E	E	E	2
Wurzeln	1	E	E	E	E	E	E	E
Zersetzungsgrad der OS	0	E	E	E	2	1	2	E

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Teil IV

Erklärungen und Danksagung

Erklärung I

Diese Doktorarbeit wird als kumulative Dissertation eingereicht. Die folgenden Artikel sind Teil der Arbeit:

1. C. Albrecht, B. Huwe und R. Jahn (2004): *Zuordnung des Munsell-Codes zu einem Farbnamen nach bodenkundlichen Kriterien*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 167 (1), S. 60–65.
2. C. Albrecht, R. Jahn und B. Huwe (2005a): *Bodensystematik und Bodenklassifikation, Teil I: Grundlagen*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 168 (1), im Druck.
3. C. Albrecht, R. Jahn und B. Huwe (2005b): *Bodensystematik und Bodenklassifikation, Teil II: Zur Situation in der deutschen Bodenkunde*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 168 (2), angenommen.
4. C. Albrecht, B. Huwe und R. Jahn (vorläufig angenommen): *Comparision of approaches for automatic soil identification*. In: P. Lagacherie, A.B. McBratney und M. Voltz (Hrsg.): Band xx der 'Developments in Soil Science'. Elsevier, Amsterdam.
5. C. Albrecht, B. Huwe und R. Jahn (eingereicht): *The Fuzzy Rule Based Identification of Soil Horizons*. Catena.
6. C. Albrecht, K. Schulz und B. Huwe (eingereicht): *Potential and limitations of applying a fuzzy soil classification method to the German soil systematic*. Geoderma.

An diesen Artikeln habe ich folgenden Eigenanteil erbracht:

- Artikel 1: Datenanalyse und Programmierung des Ansatzes, Verfassen des Manuskripts,
- Artikel 2 – 4: Verfassen der Manuskripte,
- Artikel 5: Entwicklung und Programmierung des Identifikationssystems, Verfassen des Manuskripts,
- Artikel 6: Vorbereitung und Durchführung der statistischen Analysen, Verfassen des Manuskripts.

Der Anteil der Co-Autoren umfasst:

- Koordination der Forschungsarbeiten,
- Überarbeitung der Manuskripte,
- Tests und Verbesserungen der Software-Pakete.

Erklärung II

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst habe und keine anderen Quellen und Hilfsmittel außer den angegeben verwendet habe. Ich habe nicht diese oder eine gleichartige Prüfung an einer anderen Hochschule endgültig nicht bestanden.

Bayreuth, 9. Februar 2005

Danksagung

In den letzten Jahren habe ich vielfältige Unterstützung erfahren. Den folgenden Personen möchte ich besonders danken:

- HERR PROF. DR. BERND HUWE hat mir das Thema zur Bearbeitung überlassen und in wissenschaftlicher und technischer Hinsicht für ein optimales Arbeitsumfeld gesorgt. Darüber hinaus hat er mir vollständige wissenschaftliche Freiheit gewährt und damit entscheidend für Kreativität, Motivation und Eigeninitiative gesorgt.
- PROF. DR. REINHOLD JAHN danke ich wertvolle Hinweise und Anregungen zur Deutschen Bodensystematik. DR. KARSTEN SCHULZ hat als Projekt-Betreuer immer sehr schnell auf meine zu kurzfristigen Anfragen reagiert.
- Mit PROF. DR. MARTIN SCHLATHER habe ich den größten Teil der Promotionszeit das Büro geteilt. Ich verdanke ihm viele Programmiergrundlagen, meine L^AT_EX-Kenntnisse und die Begeisterung für Linux und Open-Source-Software.
- BENNY SELLE hat alle meine schriftlichen Arbeiten Korrektur gelesen und sich Zeit für umfangreiche (Grundlagen-)Diskussionen genommen. Durch die vielen Gedankenanstöße und kritischen Hinweise hat er wesentlichen Anteil am Erfolg der Arbeit. Genauso wichtig war, dass er mich vom Nutzen regelmäßigen Sports überzeugt und ab und zu zu einem Bier im 'Oskar' überredet hat.
- Meine HiWi's haben mich bei notwendigen technischen Vorgängen unterstützt. CHRIS TARN hat die englischsprachigen Texte korrigiert und verbessert. STEFFI MARQUARDT, MARKUS KOLLER und CHRISTIAN ERKENBRECHER haben Daten eingetippt. LUKAS GUDMUNDSSON hat darüber hinaus einen Teil der Programmierarbeiten übernommen und die Daten aufbereitet.
- DR. JÜRGEN BOESS (Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung), DR. CHRISTIAN FRITZ (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg) und DR. JENS UTERMANN (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) stellten freundlicherweise Auszüge aus ihren Bodendatenbanken zur Verfügung.
- Die DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT hat die Forschungsarbeiten großzügig finanziell gefördert (Projekte Hu 636/8-1 und 8-2).
- Meiner Frau CHRISTINE danke ich für die viele Geduld, die aufmunternden Worte und den Freiraum, den sie mir gelassen hat. Durch kurze Verständnisfragen hat sie zur Beschäftigung mit wesentlichen Theorie-Fragen angeregt. Unserem Sohn JONATHAN danke

ich für sehr elternfreundliche Schlafenszeiten und für das allmorgendliche Motivationslächeln.