

**Großmaßstäbige Regionalisierung labiler Bodenkennwerte  
in standörtlich hochdiversen Kulturlandschaften**

Inaugural-Dissertation  
zur  
Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von  
Martin Szibalski

Gießen, August 2000

Dekan: Prof. Dr. Albrecht Beutelspacher

I. Berichterstatter: Prof. Dr. Peter Felix-Henningsen

II. Berichterstatter: Prof. Dr. Lorenz King

## **Vorwort**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Peter Felix-Henningsen für seine fachliche Betreuung, anhaltende Diskussionsbereitschaft und stets aufmunternde Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit. Herrn Prof. Dr. Lorenz King möchte ich meinen Dank für die Übernahme des Zweitgutachtens aussprechen.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen wissenschaftlichen, administrativen und technischen Mitarbeitern sowie den Diplomanden und studentischen Hilfskräften des Institutes für Bodenkunde und Bodenerhaltung, ohne deren unermüdliche Hilfe und Mitarbeit bei wissenschaftlichen und technischen Fragen sowie im Labor und während der Geländearbeit die Anfertigung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes danke ich Frau Katharina Harsdorf M.A., Frau Dipl.-Ing. agr. Andrea Malkmus und Herrn Dipl.-Ing. agr. Thorsten Behrens.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 299 der Deutschen Forschungsgemeinschaft erstellt, der ich hiermit für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens danke.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	1
1 Einleitung .....	3
1.1 Veranlassung und Ziele des Vorhabens .....	3
1.2 Großmaßstäbige Regionalisierung labiler Bodenkennwerte .....	5
1.2.1 Erhebung von Bodenkennwerten .....	5
1.2.1.1 Probenanzahl .....	6
1.2.1.2 Anordnung der Probenahmestellen .....	8
1.2.1.3 Probenahme .....	9
1.2.2 Übertragung punktuell erhobener Bodenkennwerte in die Fläche .....	10
1.2.2.1 Extrapolation .....	12
1.2.2.2 Lokale Interpolation .....	13
1.2.2.3 Globale Interpolation .....	14
1.2.2.4 Geostatistische Interpolation .....	14
1.2.3 Integrative Regionalisierungskonzepte .....	16
1.3 Regionalisierungsgüte .....	17
1.4 Flächenbezogene Bewertung von Vorsorgewerten des Bundes-Bodenschutzgesetzes .....	19
2 Die Untersuchungsregion und die Untersuchungsgebiete .....	21
2.1 Lage .....	21
2.2 Klima .....	22
2.3 Geologie und Böden .....	22
2.4 Landnutzung .....	25
3 Methoden und Methodenentwicklung .....	27
3.1 Methodisches Konzept zur Regionalisierung der labilen Bodenkennwerte .....	27
3.2 Erzeugung der Erhebungs- und Extrapolationsgrundlage .....	29
3.2.1 Indikatorenbestimmung .....	29
3.2.2 Rasterweite .....	34
3.2.3 Ausweisung von Pufferzonen und nicht beprobaren Bereichen .....	35
3.2.4 Erzeugung und Auswahl der Raumeinheiten .....	37
3.3 Ermittlung repräsentativer Probenahmestellen .....	38
3.3.1 Prinzip der nachbarschaftsanalytischen Berechnungen und Ermittlung des Nachbarschaftsradius .....	40
3.3.2 Berechnung der Repräsentanzindices .....	42
3.3.3 Bestimmung des Stichprobenumfangs .....	47

3.4	Erhebung der labilen Bodenkennwerte .....	48
3.4.1	Ermittlung des Beprobungsschemas .....	48
3.4.2	Plausibilitätskontrolle im Gelände .....	53
3.4.3	Beprobung.....	53
3.4.4	Probenvorbereitung und Analytik.....	54
3.5	Regionalisierung der bodenkundlichen Kennwerte.....	55
3.5.1	Validierung des Regionalisierungsmodells.....	55
3.5.2	Schätzung der labilen Bodenkennwerte nicht beprobter Raumeinheiten.....	55
3.5.3	Klassifizierung der Raumeinheitenwerte .....	56
3.5.3.1	Messgenauigkeit .....	57
3.5.3.2	GVF-Index .....	57
3.5.3.3	Qualitative und quantitative Abweichung der Messwertintervalle von den Bodenkennwertklassen .....	59
3.5.3.4	Bodenkundliche Plausibilität der Klassifizierung .....	60
3.5.4	Validierung der Regionalisierungsergebnisse.....	62
3.6	Regionalisierung der Ausschöpfung von Cadmium-Vorsorgewerten .....	63
3.6.1	Modellierung der königswasser-extrahierbaren Cadmiumgehalte.....	63
3.6.2	Relative Ausschöpfung der Cadmium-Vorsorgewerte.....	64
4	Regionalisierung labiler Bodenkennwerte.....	66
4.1	Erzeugung der Extrapolationsgrundlage .....	66
4.1.1	Statistische Analyse der Datengrundlage zur Ermittlung der Indikatoren .....	66
4.1.2	Vorbereitung der flächenhaften Datengrundlagen .....	76
4.1.2.1	Exposition .....	77
4.1.2.2	Bodenart.....	79
4.1.2.3	Realnutzung .....	80
4.1.2.4	Rasterweite.....	81
4.1.3	Ausweisung von Pufferzonen und nicht beprobaren Bereichen.....	83
4.1.4	Erstellung der Raumeinheitenkarten .....	84
4.2	Erhebung der labilen Bodenkennwerte .....	88
4.2.1	Ermittlung repräsentativer Probenahmestellen .....	88
4.2.2	Berechnung des Stichprobenumfangs .....	90
4.2.3	Geländeverification der Standortfaktoren und Beprobung .....	91
4.3	Ergebnisse der Laboranalysen.....	93
4.3.1	C <sub>org</sub> -Gehalt .....	93
4.3.2	pH-Wert .....	93
4.3.3	EDTA-extrahierbarer Cadmium-Gehalt.....	94
4.4	Extrapolation der labilen Bodenkennwerte .....	95
4.4.1	Validierung des Regionalisierungsmodells.....	95

4.4.2	Ermittlung von Raumeinheitenwerten und Interpolation nicht beprobter Raumeinheiten .....	97
4.4.3	Klassifizierung.....	98
4.4.3.1	Messgenauigkeit.....	98
4.4.3.2	GVF-Index .....	99
4.4.3.3	Qualitative und quantitative Abweichung der Messwertintervalle von den Bodenkennwertklassen .....	99
4.4.3.4	Bodenkundliche Plausibilität der Klassifizierung.....	104
4.4.3.5	Gesamtbewertung der Klassifizierungskriterien.....	104
4.4.4	Validierung der Regionalisierungsergebnisse .....	105
4.5	Ergebnisse der flächenhaften Darstellung.....	109
4.5.1	Anteil der Bodenkennwertklassen an der landwirtschaftlichen Nutzfläche .....	109
4.5.2	Anteil der Merkmalskombinationen an den Bodenkennwertklassen.....	110
4.6	Anwendungsbeispiel: Ausschöpfung von Cadmium-Vorsorgewerten in der Gemarkung Erda.....	113
4.6.1	Modellierung und Regionalisierung der Cadmium-Gesamtgehalte.....	113
4.6.2	Relative Ausschöpfung der Cadmium-Vorsorgewerte .....	114
5	Bewertung des Regionalisierungsverfahrens und der Regionalisierungsergebnisse .....	116
5.1	Regionalisierungsverfahren .....	116
5.1.1	Probenanzahl und Messnetzeigenschaften .....	116
5.1.2	Flächenhafte Darstellung labiler Bodenkennwerte .....	123
5.2	Regionalisierungsergebnisse.....	124
5.2.1	Einfluss der Eingangsdatenqualität auf die Güte der Regionalisierungsergebnisse .....	124
5.2.2	Bedeutung der räumlichen Kontinuität oder Diskontinuität von Standortmerkmalen für die flächenhafte Darstellung labiler Bodenkennwerte .....	125
5.2.3	Variabilität und Klassifizierung der Bodenkennwerte.....	128
5.2.4	Ergebnis- und Modellvalidierung .....	133
6	Anwendung und Ausblick .....	137
6.1	Anwendungsmöglichkeiten großmaßstäbig regionalisierter Bodenkennwerte .....	137
6.2	Einsatz des Verfahrens zwischen wissenschaftlichem Anspruch und Planungspraxis .....	139
7	Literatur.....	142
8	Anhang (s. Datei "Anhang.pdf") .....	149
8.1	Tabellen .....	149
8.2	Abbildungen .....	169

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Absoluter und relativer Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche, der Forsten und der sonstigen nicht landwirtschaftlich genutzten Bereiche an der Gesamtfläche der Untersuchungsgebiete Steinbrücken, Eibelshausen und Erda. ....	26
Tab. 2	Anteile der einzelnen Nutzungsformen an der landwirtschaftliche Nutzfläche der Untersuchungsgebiete Steinbrücken, Eibelshausen und Erda. ....	26
Tab. 3	Realnachbarschaftsvektor und normierter Realnachbarschaftsvektor. ....	45
Tab. 4	Relative Abweichungen der Mittelwerte des pH-Wertes und der H-Ionenkonzentration der vier simulierten Beprobungstechniken (Kreis 1, Kreis 2, Transekt 1 und Transekt 2) zum Mittelwert des Hexagonalrasters. ....	52
Tab. 5	Schwellenwert der GVF-Indices bei vorgegebenen Klassenanzahlen. ....	59
Tab. 6	Klassifizierung des $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werts und $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalts nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung. ....	61
Tab. 7	Klassifizierte Gesamtbodenarten im Untersuchungsgebiet Erda für Acker- und Grünlandnutzung, entsprechende Hauptbodenarten der Kartieranleitung 'KA4' übersetzt nach Will (1987), Hauptbodenarten für die Klassifizierung der Vorsorgewerte für Cadmium und entsprechende Vorsorgewerte für Cadmium im Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze in Abhängigkeit vom pH-Wert. ....	64
Tab. 8	Struktur der Datenbasis für die Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen. ....	70
Tab. 9	Häufigkeiten der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ - bzw. $\text{pH}_{\text{KCl}}$ -Werte, $\text{C}_{\text{org}}$ - und $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte der Expositionsclassen und der Ebenen sowie die entsprechenden Häufigkeiten der aggregierten Expositionsclassen (südexponiert, nordexponiert und Ebene) für die Datensätze 'Nord' und 'Süd'. ....	72
Tab. 10	Häufigkeiten der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ - bzw. $\text{pH}_{\text{KCl}}$ -Werte, $\text{C}_{\text{org}}$ - und $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte der aggregierten Gesamtbodenarten (Will 1987) für die Datensätze 'Nord' und 'Süd'. ....	73
Tab. 11	Häufigkeiten der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ - bzw. $\text{pH}_{\text{KCl}}$ -Werte, $\text{C}_{\text{org}}$ - und $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte der Nutzungsformen für die Datensätze 'Nord' und 'Süd'. ....	73
Tab. 12	Ergebnisse der statistischen Tests auf Varianzenhomogenität der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ - bzw. $\text{pH}_{\text{KCl}}$ -Werte, $\text{C}_{\text{org}}$ - und $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte im ein-, zwei- und dreifaktoriellen Design sowie auf Normalverteilung bzw. Symmetrie der labilen bodenkundlichen Kennwerte. ....	75
Tab. 13	Signifikanzniveaus der empirischen F-Werte ( $\alpha = 5\%$ ) im ein- und zweifaktoriellen Design für die Faktoren und Faktorenkombinationen der Exposition, Bodenart und Nutzung als potentielle Einflussgrößen der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ - bzw. $\text{pH}_{\text{KCl}}$ -Werte, $\text{C}_{\text{org}}$ - und $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte der Datensätze 'Nord' und 'Süd'. ....	76
Tab. 14	Ursprünglich kartierte Nutzungsformen und Nutzungsformen der digitalen Realnutzungskarte. ....	80
Tab. 15	Merkmalskodierung der Informationsschichten 'Exposition', 'Bodenart' und 'Nutzung'. ....	84
Tab. 16	Raumeinheitencode und relativer Flächenanteil [%] der einzelnen Raumeinheiten an der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Steinbrücken. ....	85
Tab. 17	Raumeinheitencode und relativer Flächenanteil [%] der einzelnen Raumeinheiten an der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Eibelshausen. ....	86
Tab. 18	Raumeinheitencode und relativer Flächenanteil [%] der einzelnen Raumeinheiten an der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Erda. ....	87
Tab. 19	Prozentuale Anteile der Erwarteten Nachbarschaften 'EN' für jede Merkmalsausprägung der Informationsschichten 'Exposition', 'Gesamtbodenart' und 'Nutzung' der Raumeinheit 523. ....	88
Tab. 20	Auszug aus der RI-Tabelle der Gemarkung Erda für die Raumeinheit mit der Merkmalskombination 523. ....	90

Tab. 21	Anzahl der Probenahmestellen für die landwirtschaftliche Nutzfläche der Untersuchungsgebiete Steinbrücken, Eibelshausen und Erda.....	91
Tab. 22	Ergebnisse der statistischen Tests auf Varianzenhomogenität der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte, $\text{C}_{\text{org}}$ - und $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte im ein-, zwei- und dreifaktoriellen Design sowie der Normalverteilung bzw. Symmetrie der labilen bodenkundlichen Kennwerte. ....	96
Tab. 23	Signifikanzniveaus der empirischen F-Werte ( $\alpha = 5 \%$ ) im ein- und zweifaktoriellen Design für die Faktoren und Faktorenkombinationen der Exposition, Bodenart und Nutzung als potentielle Einflussgrößen der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte, $\text{C}_{\text{org}}$ - und $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte der Untersuchungsgebiete Steinbrücken, Eibelshausen und Erda.....	97
Tab. 24	Maximierte GVF-Indices für vier unterschiedliche Klassenanzahlen der bodenkundlichen Kennwerte (Raumeinheitenwerte) in den Untersuchungsgebieten Steinbrücken, Eibelshausen und Erda.....	99
Tab. 25	Mittlere qualitative Über- oder Unterschreitung der Messwertintervalle[%] innerhalb der Bodenkennwertklassen für vier unterschiedliche Klassenanzahlen der bodenkundlichen Kennwerte in den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen.....	100
Tab. 26	Mittlere qualitative Über- oder Unterschreitung der Messwertintervalle [%] innerhalb der Bodenkennwertklassen für vier unterschiedliche Klassenanzahlen der bodenkundlichen Kennwerte in der Gemarkung Erda. ....	101
Tab. 27	Absoluter und relativer Anteil der Werte der Messwertintervalle, die die Grenzen der korrespondierenden Bodenkennwertklassen über- oder unterschreiten. ....	102
Tab. 28	Relativer Anteil der Werte der Messwertintervalle, die die Grenzen der korrespondierenden Bodenkennwertklassen über- oder unterschreiten.....	103
Tab. 29	Abweichungsindices für die Bodenkennwerte der Oberböden in den Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda.....	104
Tab. 30	Schema für die Klassifizierung der bodenkundlichen Kennwerte der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen. ....	105
Tab. 31	Zuordnung der Validierungswerte (VP) zu räumlich korrespondierenden Bodenkennwertklassen ( $\text{BK}_p$ ) und inhaltlicher Vergleich der zugeordneten Validierungswerte mit den Bodenkennwertklassen ( $\text{BK}_i$ ) für die Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen.....	107
Tab. 32	Zuordnung der Validierungswerte (VP) der $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte zu räumlich korrespondierenden Bodenkennwertklassen ( $\text{BK}_p$ ) und inhaltlicher Vergleich der zugeordneten Validierungswerte mit den Bodenkennwertklassen ( $\text{BK}_i$ ) für die Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen.....	108
Tab. 33	Zuordnung der Validierungswerte (VP) zu räumlich korrespondierenden Bodenkennwertklassen ( $\text{RK}_p$ ) und inhaltlicher Vergleich der zugeordneten Validierungswerte mit den Bodenkennwertklassen ( $\text{RK}_i$ ) für die Gemarkung Erda.....	108
Tab. 34	Relativer Anteil der Bodenkennwertklassen an der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda. ....	110
Tab. 35	Relativer Anteil der aggregierten Merkmalskombinationen an der jeweiligen Bodenkennwertklassen bezogen auf ca. 90 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen.....	111
Tab. 36	Relativer Anteil der aggregierten Merkmalskombinationen an den jeweiligen Bodenkennwertklassen bezogen auf ca. 90 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Erda. ....	113
Tab. 37	Ober- und Untergrenzen der relativen Cd-Vorsorgewert-Ausschöpfung den Oberböden (0-20 cm) in der Gemarkung Erda und relativer Flächenanteil der Ausschöpfungsklassen an der landwirtschaftlichen Nutzfläche. ....	115
Tab. 38	Nach unterschiedlichen Verfahren ermittelte Probenumfänge (Durchschnittswerte) für die landwirtschaftliche Nutzfläche der Gemarkung Erda. ....	117

Tab. 39	Prozentualer Anteil der Raumeinheiten an der Gesamtanzahl der Raumeinheiten, die mit einem Raster-, Zufalls- oder systematisch geschichteten Messnetz mit jeweils 96 Probenahmestellen erfasst werden. ....	120
Tab. 40	Lage- und Streuungsmaße sowie geostatistische Parameter der räumlichen Variabilität von pH-Werten und $C_{org}$ -Gehalten landwirtschaftlich genutzter Oberböden. ....	122
Tab. 41	Anzahl der Klassenflächen der Bodenart, Exposition und Nutzung in den Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda als Kennzeichen für die Häufigkeit des Auftretens von Übergängen dieser Merkmale.....	126
Tab. 42	Mittelwert, Spannweite und Variationskoeffizient der $pH_{CaCl_2}$ -Werte und $C_{org}$ -Gehalte des Ackers, der Grünlandfläche und der Brache. Datengrundlage sind die Ergebnisse der Voruntersuchungen zur Ermittlung des optimalen Beprobungsschemas. ....	129
Tab. 43	Mittlere Spannweite der $pH_{CaCl_2}$ -Werte und $C_{org}$ -Gehalte des Ackers, der Grünlandfläche und der Brache (Datengrundlage sind die Ergebnisse der Voruntersuchungen zur Ermittlung des optimalen Beprobungsschemas) sowie mittlere Klassenbreiten der regionalisierten $pH_{CaCl_2}$ -Werte und $C_{org}$ -Gehalte der Untersuchungsgebiete. ....	129
Tab. 44	Beprobungsdichte, Anzahl der Regionalisierungs- und Validierungswerte sowie Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) zwischen regionalisierten und zusätzlich gemessenen pH-Werten und $C_{org}$ -Gehalten landwirtschaftlich genutzter Oberböden. ....	135
Tab. 45	Datenbasis für die Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen (Teil 1). ....	149
Tab. 46	Datenbasis für die Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen (Teil 2). ....	150
Tab. 47	Datenbasis für die Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen (Teil 3). ....	151
Tab. 48	Datenbasis für die Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen (Teil 4). ....	152
Tab. 49	$pH_{CaCl_2}$ - und $pH_{KCl}$ -Werte überwiegend landwirtschaftlich genutzter Oberböden der Gemarkung Erda. ....	153
Tab. 50	Variablenwerte für die Berechnung der Probenahmestellenanzahl der Gemarkung Steinbrücken.....	154
Tab. 51	Variablenwerte für die Berechnung der Probenahmestellenanzahl der Gemarkung Eibelshausen.....	155
Tab. 52	Variablenwerte für die Berechnung der Probenahmestellenanzahl der Gemarkung Erda.....	156
Tab. 53	Geografische Koordinaten der Probenahmestellen, Raumeinheitenwerte und Messwerte der repräsentativ erhobenen Bodenproben der Gemarkung Steinbrücken (Teil 1).....	157
Tab. 54	Geografische Koordinaten der Probenahmestellen, Raumeinheitenwerte und Messwerte der repräsentativ erhobenen Bodenproben der Gemarkung Steinbrücken (Teil 2).....	158
Tab. 55	Geografische Koordinaten der Probenahmestellen, Raumeinheitenwerte und Messwerte der repräsentativ erhobenen Bodenproben der Gemarkung Eibelshausen (Teil 1).....	158
Tab. 56	Geografische Koordinaten der Probenahmestellen, Raumeinheitenwerte und Messwerte der repräsentativ erhobenen Bodenproben der Gemarkung Eibelshausen (Teil 2).....	159
Tab. 57	Geografische Koordinaten der Probenahmestellen, Raumeinheitenwerte und Messwerte der repräsentativ erhobenen Bodenproben der Gemarkung Erda (Teil 1).....	160
Tab. 58	Geografische Koordinaten der Probenahmestellen, Raumeinheitenwerte und Messwerte der repräsentativ erhobenen Bodenproben der Gemarkung Erda (Teil 2).....	161
Tab. 59	Interpolierte Raumeinheitenwerte nicht beprobter Raumeinheiten der Gemarkung Steinbrücken.....	162
Tab. 60	Interpolierte Raumeinheitenwerte nicht beprobter Raumeinheiten der Gemarkung Eibelshausen.....	162
Tab. 61	Interpolierte Raumeinheitenwerte nicht beprobter Raumeinheiten der Gemarkung Erda.....	163
Tab. 62	Geografische Koordinaten und Analyseergebnisse der Validierungsproben der Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda. ....	164



Tab. 63	Relativer Anteil der aggregierten Merkmalskombinationen an den jeweiligen Bodenkennwertklassen der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen (Teil 1). .....	164
Tab. 64	Relativer Anteil der aggregierten Merkmalskombinationen an den jeweiligen Bodenkennwertklassen der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen (Teil 2). .....	165
Tab. 65	Relativer Anteil der aggregierten Merkmalskombinationen an den jeweiligen Bodenkennwertklassen der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Erda (Teil 1). .....	166
Tab. 66	Relativer Anteil der aggregierten Merkmalskombinationen an den jeweiligen Bodenkennwertklassen der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Erda (Teil 1). .....	167
Tab. 67	Modellierte königswasser-extrahierbare Cadmium-Gehalte ( $Cd_{KW}$ ) in den Oberböden der Gemarkung Erda. ....	168

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Die Naturräume Lahn-Dill-Bergland und Dilltal (Untersuchungsregion des SFB 299 der DFG) mit den Untersuchungsgebieten Steinbrücken, Eibelshausen und Erda. ....	21
Abb. 2	Bodengesellschaften der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen (Ausschnitt aus der Digitalen Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:50.000 des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie). ....	24
Abb. 3	Bodengesellschaften der Gemarkung Erda (Ausschnitt aus der Digitalen Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:50.000 des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie). ....	25
Abb. 4	Legende zu den Boxplot-Darstellungen. ....	30
Abb. 5	Veränderung kontinuierlicher Standortmerkmale im Übergangsbereich diskretisierter Raumelemente. ....	36
Abb. 6	Die Beziehung des kumulativen Flächenanteils der Raumeinheiten (nach abnehmender Größe sortiert) zur Anzahl der Raumeinheiten. ....	38
Abb. 7	Räumliche Autokorrelation als Funktion der Anordnung und Form von Raumeinheitenflächen. ....	39
Abb. 8	Prinzip der <i>moving-window</i> -Technik zur Berechnung der Nachbarschaftsstrukturen von Rasterkarten. ....	41
Abb. 9	Ermittlung der Größe des Nachbarschaftsraumes aus der Lagekorrelation von Repräsentanzindices. ....	42
Abb. 10	Relative Koordinatenpaare einer 5*5 Pixel-Matrix mit dem Ursprung ( $C_i$ ) im Zentrum des Nachbarschaftsraums. ....	43
Abb. 11	Reziproke quadrierte Euklidische Distanzen für die Koordinatenpaare einer 5*5 Pixel-Matrix mit dem Ursprung ( $C_i$ ) im Zentrum des Nachbarschaftsraumes. ....	44
Abb. 12	Lage der Untersuchungsflächen und Realnutzung. ....	49
Abb. 13	Bodentypen im Bereich der Untersuchungsflächen. ....	50
Abb. 14	Simulierte Beprobungsstrategien auf der Grundlage eines Hexagonalrasters. ....	51
Abb. 15	Der Beprobungssatellit zur Erhebung der bodenkundlichen Kennwerte des Oberbodens. ....	53
Abb. 16	Beispielhafte Darstellung der Über- oder Unterschreitung der Messwertintervalle innerhalb von pH-Klassen, die entsprechenden Raumeinheitenwerten zugrunde liegen (Bodenkennwertklassen). ....	60
Abb. 17	Die Untersuchungsgebiete ① - ⑨ der Datenbasis für die Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen. ....	67
Abb. 18	Lage- und Streuungsmaße des $C_{org}$ -Gehalts der Oberböden in den Teilräumen 'Nord' und 'Süd'. ....	68
Abb. 19	Lage- und Streuungsmaße des um 0,2 pH-Einheiten angehobenen $pH_{KCl}$ -Werts und des $pH_{CaCl_2}$ -Werts der Oberböden in den Teilräumen 'Nord' und 'Süd'. ....	69
Abb. 20	Lage- und Streuungsmaße des $Cd_{EDTA}$ -Gehalts der Oberböden im Teilraum 'Süd'. ....	69
Abb. 21	10 m-Höhenlinien des a) ungefilterten und b) gefilterten Digitalen Höhenmodells der Gemarkung Erda (Ausschnitt). ....	78
Abb. 22	Ausschnitt aus der Nutzungskarte der Gemarkung Erda einschließlich des Wege- und Gewässernetzes (Stand 1998). Bild a) zeigt die Nutzung in Vektordarstellung. In Bild b) ist die Realnutzung im 10 m-Raster dargestellt. ....	82
Abb. 23	Beprobare und nicht beprobare Bereiche der Gemarkung Erda (Ausschnitt). ....	84
Abb. 24	Raumeinheitenkarte der Gemarkung Erda (Ausschnitt). ....	87
Abb. 25	Median, Spannweite, Interquartilabstand, Ausreißer und Extremwerte der $C_{org}$ -Gehalte von Oberbodenproben (0-20 cm) in den Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda. ....	93

Abb. 26	Median, Spannweite, Interquartilbereich, Ausreißer und Extremwerte der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte von Oberbodenproben (0-20 cm) in den Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda. ....	94
Abb. 27	Median, Spannweite, Interquartilabstand, Ausreißer und Extremwerte der $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte von Oberbodenproben (0-20 cm) in den Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda. ....	95
Abb. 28	Probenahmestandorte für die Validierung der Regionalisierungsergebnisse der Gemarkungen Erda (a) sowie Steinbrücken und Eibelshausen (b).....	106
Abb. 29	Flächenteile der Ausschöpfung des Cadmium-Vorsorgewerts innerhalb unterschiedlicher Nutzungsformen der Gemarkung Erda. ....	115
Abb. 30	Probenahmestellenverteilung (96 Standorte) in der Gemarkung Erda bei der Anwendung a) eines systematisch geschichteten Messnetzes, b) eines Zufallsmessnetzes und c) eines Rastermessnetzes. ....	120
Abb. 31	Die Auswirkungen einer unterschiedlichen Klassifizierung auf die flächenhafte Darstellung der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte von landwirtschaftlich genutzten Oberböden (0-20 cm) der Gemarkung Erda (Ausschnitt). ....	132
Abb. 32	Die Auswirkungen einer unterschiedlichen Klassifizierung auf die flächenhafte Darstellung der Humusgehalte von landwirtschaftlich genutzten Oberböden (0-20 cm) der Gemarkung Erda (Ausschnitt). ....	133
Abb. 33	Expositionsrichtungen und ebene Bereiche der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen auf der Basis des tiefpass-gefilterten und bilinear interpolierten 40 m-DHM. ....	169
Abb. 34	Expositionsrichtungen und ebene Bereiche der Gemarkung Erda auf der Basis des tiefpass-gefilterten und bilinear interpolierten 40 m-DHM.....	170
Abb. 35	Die klassifizierten Gesamtbodenarten der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen nach der Bodenschätzung. ....	171
Abb. 36	Die klassifizierten Gesamtbodenarten der Gemarkung Erda nach der Bodenschätzung.....	172
Abb. 37	Die Realnutzung der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen. ....	173
Abb. 38	Die Realnutzung der Gemarkung Erda. ....	174
Abb. 39	Beprobungsstandorte in den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen. ....	175
Abb. 40	Beprobungsstandorte in der Gemarkung Erda. ....	176
Abb. 41	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert der Oberböden (0-20 cm) in den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen. ....	177
Abb. 42	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert der Oberböden (0-20 cm) in der Gemarkung Erda. ....	178
Abb. 43	$\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalt der Oberböden (0-20 cm) in den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen.....	179
Abb. 44	$\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalt der Oberböden (0-20 cm) in der Gemarkung Erda. ....	180
Abb. 45	$\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalt der Oberböden (0-20 cm) in den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen ....	181
Abb. 46	$\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalt der Oberböden (0-20 cm) in der Gemarkung Erda.....	182
Abb. 47	Relative Ausschöpfung der Vorsorgewerte für Cadmium nach der Verordnung zum Bundes-Bodenschutzgesetz der landwirtschaftlich genutzten Oberböden (0-20 cm) der Gemarkung Erda.....	183

## Formelverzeichnis

(1) Nachbarschaftsindex ( $N$ ) .....	43
(2) Realnachbarschaftsvektor ( $R$ ) .....	44
(3) Normierter Realnachbarschaftsvektor ( $RN$ ) .....	45
(4) Erwartete Nachbarschaft ( $EN$ ) .....	45
(5) Repräsentanzindex ( $RI$ ) .....	46
(6) Multidimensionaler Nachbarschafts-Repräsentanzindex ( $MNR$ ) .....	46
(7) Probenahmestellenzahl ( $N$ ) .....	47
(8) Summierte Abweichungsquadrate der Raumeinheitenwerte vom Mittelwert ( $SDAM$ ) .....	58
(9) Summierte Abweichungsquadrate der Raumeinheitenwerte von Klassenmittelwert ( $SDCM$ ) .....	58
(10)GVF-Index ( $GVF$ ) .....	58
(11)Modell zur Schätzung der $Cd_{KW}$ -Gehalte .....	63
(12)Obergrenze des 95%-Konfidenzintervalls der geschätzten $Cd_{KW}$ -Gehalte .....	64
(13)Untergrenze des 95%-Konfidenzintervalls der geschätzten $Cd_{KW}$ -Gehalte .....	64
(14) Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung der Regionalisierungsergebnisse von den Validierungswerten ( $RMSE$ ) .....	134

## Zusammenfassung

Öffentliche und private Institutionen sowie politische Entscheidungsträger benötigen für die flächenhafte Bewertung von Boden- oder Landschaftsfunktionen bodenkundliche Basisdaten. Die Verfügbarkeit entsprechender Daten ist jedoch vor allem in strukturschwachen Mittelgebirgsregionen, die außerhalb des politischen oder wirtschaftlichen Hauptinteresses stehen, stark begrenzt. Soll für diese standörtlich meist sehr heterogenen Regionen eine großmaßstäbige Regionalisierung von Bodeneigenschaften erfolgen, ist mit dem Einsatz herkömmlicher Methoden ein erheblicher personeller, finanzieller und zeitlicher Aufwand verbunden. Dieses betrifft insbesondere zeitlich und räumlich hochvariable Bodenkennwerte.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines Verfahrens zur aufwandsminimierten, großmaßstäbigen Regionalisierung labiler Bodenkennwerte in standörtlich hochdiversen Landschaften. Als Testgebiete für das Verfahren dienen drei Gemarkungen mit kleinräumig wechselnden natürlichen Standorteigenschaften und Bewirtschaftungsformen im Lahn-Dill-Bergland, Hessen. Es werden der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert sowie der  $\text{C}_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalt von Oberböden der landwirtschaftlichen Nutzfläche regionalisiert, da diese Bodenkennwerte wichtige Indikatoren für die Bewertung der Puffer-, Filter- und Transformatorfunktion des Bodens darstellen. In einem planungsrelevanten Anwendungsbeispiel erfolgt die Regionalisierung und Bewertung der Cadmium-Vorsorgewerte (BBodSchG 1998) auf Grundlage der regionalisierten Bodeneigenschaften.

Das Regionalisierungskonzept beinhaltet Methoden zur räumlich repräsentativen Erhebung, Klassifizierung und Extrapolation der labilen Bodenkennwerte sowie zur Validierung des Regionalisierungsmodells und der Regionalisierungsergebnisse. Der räumlichen Darstellung liegt ein diskretes Modell der Bodenvariabilität zugrunde, da sich die labilen Bodeneigenschaften vorwiegend an den kleinräumig wechselnden Nutzungsgrenzen auf Distanzen ändern, die unterhalb der Auflösung des Regionalisierungsmodells von 10 Metern liegen. Auf der Grundlage einer logischen Übertragungsregel erfolgt die Extrapolation der punktuell erhobenen Messwerte auf Einzelflächen einer Raumeinheitenkarte, die durch die Verschneidung der Informationsschichten 'Exposition', 'Bodenart' und 'Nutzung' erzeugt wird. Diese Übertragungsregel wird durch die varianzanalytische Auswertung eines Datensatzes abgeleitet, der aus bereits vorliegenden bodenkundlichen Ergebnissen der Untersuchungsregion zusammengestellt ist.

Die Raumeinheitenkarte dient auch zur Ausweisung repräsentativer Probenahmestellen, indem die Nachbarschaftsstrukturen der Karte analysiert werden und in einem räumlichen Gewichtungsverfahren Probenahmestellen innerhalb der Einzelflächen der Karte platziert werden. Auf diese Weise werden mit hoher Wahrscheinlichkeit Ausprägungen der Bodenkennwerte erfasst, die durchschnittliche Ausprägungen der Standorteigenschaften innerhalb der Raumeinheiten repräsentieren. Die Ermittlung der Probenanzahl erfolgt unter Berücksichtigung der Autokorrelation, Flächenanzahl und Flächengröße der Raumeinheiten. Vor der Extrapolation werden die Messwerte der Raumeinheiten in Abhängigkeit von der Messgenauigkeit, bodenkundlich plausiblen Unterschieden und den Messwertvarianzen klassifiziert. Dieses führt zu einer Gruppierung von Raumeinheiten, die zwar unterschiedliche Merkmalskombinationen, aber nur geringfügig voneinander abweichende Messwertausprägungen besitzen. Die Validierung der Übertragungsregel erfolgt durch die varianzanalytische Auswertung der Regionalisierungsergebnisse. Die Gültigkeit der Regionalisierungsergebnisse selbst wird auf der Grundlage eines unabhängigen Datensatzes überprüft.

Die Regionalisierungsergebnisse zeigen, dass der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -, der  $\text{C}_{\text{org}}$ - und der  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Status der Oberböden bei einer Aufteilung in drei bis vier Klassen durchschnittlich mit einer 75-prozentigen Sicherheit durch das Regionalisierungsmodell beschrieben werden kann. Die Plausibilität des Regionalisierungsmodells bezüglich der Eingangsfaktoren 'Exposition', 'Bodenart' und 'Nutzung' wird anhand der regionalisierten Bodenkennwerte varianzanalytisch bestätigt. Allerdings ist die Variation der Bodenkennwerte in den Oberböden der Gemarkung Erda, die etwa im gleichen Verhältnis als Acker und Grünland genutzt werden, hauptsächlich auf Nutzungsänderungen zurückzuführen. In den extensiv bewirtschafteten, überwiegend grünlandgenutzten Untersuchungsgebieten Steinbrücken und Eibelshausen tritt der Nutzungseinfluss gegenüber der Exposition und Bodenart zurück. Die Ergebnisse des Anwendungsbeispiels zeigen, dass mit den vorliegenden Flächendaten der labilen Bodenkennwerte und unter Einbeziehung einer numerischen Pedotransferfunktion eine hochauflösende räumliche Beschreibung der Ausschöpfung von Cadmium-Vorsorgewerten landwirtschaftlich genutzter Oberböden möglich ist.

Die Modellierungs- und Validierungsergebnisse bestätigen, dass in standörtlich hochdiversen Landschaften eine räumlich und inhaltlich präzise Regionalisierung labiler Bodenkennwerte bei einer deutlichen Verringerung des Erhebungsaufwands bodenkundlicher Basisdaten gegenüber herkömmlichen Methoden realisierbar ist.

# 1 Einleitung

## 1.1 Veranlassung und Ziele des Vorhabens

Die Verfügbarkeit bodenkundlicher Flächendaten gewinnt in jüngster Zeit zunehmend an Bedeutung (vgl. Sabel 1998, Vorderbrügge & Friedrich 1998, Herrchen & Voll 1998). Als Gründe sind einerseits die veränderten gesetzlichen Rahmenbedingungen zu nennen, die sich mit dem Inkrafttreten des Bundes-Bodenschutzgesetzes im Jahre 1999 (BBodSchG 1998) ergeben haben und zu einer Neubewertung des Schutzgutes 'Boden' in der Landschaftsplanung führten. Andererseits werden für politische Entscheidungsprozesse optionale Landnutzungskonzepte benötigt, die unter Einbeziehung bodenkundlicher Flächendaten eine Bewertungsgrundlage für wichtige, zum Teil konkurrierende Landschaftsfunktionen wie beispielsweise die Agrarproduktion, die Erhaltung geeigneter Lebensräume für Flora und Fauna, den Grundwasserschutz sowie das Aufnahmevermögen der Landschaft für organische Siedlungsabfälle darstellen können (Bach & Frede 1999).

Die Verfügbarkeit bodenkundlicher Flächendaten ist besonders in strukturschwachen Mittelgebirgsregionen stark begrenzt, da Bodenuntersuchungen bisher überwiegend in Vorranggebieten betrieben wurden und die Notwendigkeit der Erhebung dieser Daten bundesländerspezifisch unterschiedlich bewertet wurde. Daher sind Informationen über Bodeneigenschaften für planerische oder wissenschaftliche Fragestellungen in diesen Regionen nur aus mittel- bis kleinmaßstäbigen (1: 25.000 bis 1:1.000.000) Bodenkarten ableitbar (vgl. Fohrer et al. 1999, Möller et al. 1999). Großmaßstäbige (1:5.000 bis 1:10.000) raumbezogene Angaben über labile bodenkundliche Kennwerte, wie etwa den pH-Wert oder den Humusgehalt des Oberbodens, die wichtige Indikatoren kurzfristiger Bodenveränderungen durch den Landnutzungswandel darstellen können (vgl. Jahn et al. 1994, Matschullat et al. 1994, Stahr et al. 1993, Marschner & Stahr 1992, Gisi 1990), sind aus diesen Kartenwerken inhaltlich und räumlich aufgrund des hohen Generalisierungsgrades nicht sicher ableitbar und daher nur für mittel- bis kleinmaßstäbige Landschaftsbetrachtungen geeignet (vgl. Peter & Siebert 1998, Sabel 1998). Sollen jedoch Bodenfunktionen oder beispielsweise die Folgen einer veränderten Landnutzung auf die Gefahr der Freisetzung mobilisierbarer Schwermetalle großmaßstäbig bewertet bzw. untersucht werden, ist es erforderlich, mit geeigneten Methoden entsprechende Bodenkennwerte flächendeckend zu erheben und darzustellen.

Im Lahn-Dill-Bergland in Hessen, der Untersuchungsregion des Sonderforschungsbereichs 299 der Deutschen Forschungsgemeinschaft, in dessen Rahmen diese Arbeit angefertigt wur-

de, wird die großflächige Erfassung von labilen, nutzungsabhängigen Bodenkennwerten durch die kleinräumig stark wechselnde Landnutzung (Nöhles 1999, Nowak 1988), eine relativ hohe Reliefenergie sowie ausgeprägte Unterschiede in der Struktur und dem Aufbau des Bodenkörpers erschwert (Schotte & Felix-Henningsen 1999). Unter diesen Bedingungen sind an Verfahren für eine großmaßstäbige Regionalisierung<sup>1</sup> labiler Bodenkennwerte hohe Anforderungen zu stellen. In erster Linie darf der Erhebungsaufwand ein vertretbares Maß nicht überschreiten, da für die flächenhafte Erfassung von labilen Bodeneigenschaften in standörtlich hochdiversen Kulturlandschaften hohe Probenzahlen notwendig sind, die aus ökonomischen und zeitlichen Gründen häufig nicht realisiert werden können. Gleichzeitig muss die Qualität der räumlichen Aussage soweit optimiert werden, dass präzise Eingangsdaten für eine valide flächenhafte Bewertung von Bodeneigenschaften und möglichen Bodenbelastungen im Rahmen der Landschaftsplanung oder für die Erstellung von Landnutzungskonzepten zur Verfügung stehen.

Integrative Konzepte für die großmaßstäbige Erhebung und flächenbezogene Darstellung labiler Bodenkennwerte in standörtlich heterogenen Mittelgebirgslandschaften liegen bisher nicht vor. Daher wird in diesem Vorhaben auf der Grundlage vorhandener und zu entwickelnder Verfahren ein geschlossenes Konzept erstellt und angewendet, das eine ökonomisch und zielbezogen optimierte Regionalisierung labiler bodenkundlicher Kennwerte in diesen Landschaftsräumen ermöglicht. Zu diesem Zweck werden für drei Beispielgemarkungen in der Mittelgebirgsregion 'Lahn-Dill-Bergland' die labilen bodenkundlichen Kennwerte  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert, Gehalt an organischem Kohlenstoff und potentiell pflanzenverfügbare EDTA-extrahierbare Cadmiumgehalte von Oberböden der landwirtschaftlichen Nutzflächen regionalisiert. Als planungsrelevantes Anwendungsbeispiel auf der Gemeindeebene wird eine Beurteilung der Pufferfunktion der Böden gegenüber Schwermetallen am Beispiel der Cadmium-Vorsorgewerte vorgenommen. Zur Vermeidung einer inhaltlichen und räumlichen Fehlinterpretation der Regionalisierungsergebnisse werden mögliche Fehlerquellen und Einflussfaktoren, die im Zusammenhang mit der Datenerhebung und -verarbeitung sowie der Validität und flächenhaften Darstellung der Ergebnisse stehen, im Zuge der Verfahrensanwendung besonders berücksichtigt.

---

<sup>1</sup> Nach einer Definition von Sauer & Behr (1997) bezeichnet der Begriff Regionalisierung den Prozess der Übertragung punktuell oder innerhalb kleiner Messparzellen gewonnener Messwerte auf eine größere zusammenhängende Fläche. In dieser Arbeit wird der Terminus 'Regionalisierung' in Anlehnung an die Begriffsbestimmung von Wenkel & Schultz (1998), jedoch in seiner erweiterten Bedeutung als ein funktionelles Modell einschließlich des zugehörigen Datenmodells, das zur Beantwortung raumbezogener wissenschaftlicher oder praktischer Fragen bezüglich der räumlichen Variabilität, Intensität und Bewertung bodenkundlicher Kennwerte dient, verwendet.



## 1.2 Großmaßstäbige Regionalisierung labiler Bodenkennwerte

Für die Regionalisierung bodenkundlicher Kennwerte liegen unterschiedliche Methoden vor, deren Anwendbarkeit von dem jeweiligen Betrachtungsmaßstab, der gewünschten räumlichen Aussagegüte und der Variabilität der zu erhebenden Bodenkennwerte abhängt. Zu unterscheiden sind dabei Verfahren, die entweder für die Erhebung, die flächenhafte Darstellung oder die raumbezogene Bewertung bodenkundlicher Kennwerte eingesetzt werden können. Methodische Konzepte, die den gesamten Regionalisierungsprozess von der Erhebung bis zur validen Darstellung der Ergebnisse beschreiben und insbesondere auch für die großmaßstäbige Regionalisierung labiler bodenkundlicher Kennwerte in größeren Arealen geeignet sind, wurden bisher kaum entwickelt oder sind für heterogene Landschaften mit kleinräumig stark variierenden Standortbedingungen ungeeignet.

In den folgenden Ausführungen werden zunächst methodische Teilaspekte des Regionalisierungsprozesses beschrieben, die sich auch in der praktischen Anwendung etabliert haben. Anschließend werden Konzepte für integrative Regionalisierungsansätze vorgestellt. Zum Ende dieses Kapitels werden Aspekte erörtert, die im Zusammenhang mit der Güte regionalisierter bodenkundlicher Kennwerte und ihrer Bedeutung für die Bewertung von Bodenfunktionen im Rahmen gesetzlicher Vorschriften stehen.

### 1.2.1 Erhebung von Bodenkennwerten

Grundsätzlich werden für die Entwicklung und Anwendung von Strategien zur flächenbezogenen Erhebung bodenkundlicher Kennwerte zwei Ansätze unterschieden, deren Vor- und Nachteile schon seit Längerem diskutiert werden (vgl. Brus & Gruiter 1997, Burrough 1993, Gruiter & Braak 1990). Der design-basierte Ansatz (*design-based approach*) beruht auf der Überlegung, dass die räumliche Variation einer Bodeneigenschaft zwar unbekannt, aber die Messwerthöhe an der jeweiligen Probenahmestelle, abgesehen von Messfehlern, eine feststehende Größe ist. Unter der Annahme, dass keine räumlichen Interaktionen zwischen den Beprobungsstandorten vorliegen, kann die Erhebung der Bodeneigenschaft beispielsweise auf der Basis zufällig angeordneter Beprobungsstellen erfolgen, um eine im statistischen Sinne unverzerrte Stichprobe zu erhalten.

Der modell-basierte Ansatz (*model-based approach*) unterstellt, dass Ausprägungen einer Bodeneigenschaft ortsabhängig sind und somit einem raumbezogenen, stochastischen Prozess unterliegen. An den jeweiligen Probenahmestellen sind die Messwerte eines Bodenkennwerts

nicht fest, sondern können mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit bestimmte Ausprägungen annehmen (z.B. Oliver et al. 1989, Webster 1985, Burgess & Webster 1980). Der Messwert ist also nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine Realisation natürlicher Verhältnisse, da aufgrund der Komplexität des Bodenkörpers und der in ihm ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse die räumliche und zeitliche Variabilität von Bodenkennwerten nicht vollständig erfasst werden kann (Burrough 1993).

Die Entscheidung, welcher der beiden Ansätze für die jeweiligen bodenkundlichen Untersuchungen mit dem Ziel der flächenhaften Darstellung von Bodenkennwerten vorzuziehen ist, hängt von zahlreichen Randbedingungen ab. Zu nennen sind beispielsweise die zu erwartende räumliche Variabilität, Kontinuität oder Diskontinuität sowie die mögliche Ortsabhängigkeit der betrachteten Bodeneigenschaft.

Unabhängig von der jeweiligen Beprobungsstrategie sind für die Qualität der Regionalisierungsergebnisse, in Abhängigkeit von der jeweiligen Fragestellung, die Anzahl und die räumliche Anordnung der Probenahmestellen sowie die Probenahmetechnik zur Erhebung labiler bodenkundlicher Kennwerte entscheidend (z.B. Burrough & McDonnell 1998, Wagner 1995, Webster & Oliver 1990, Laslett & McBratney 1990, Laslett et al. 1987). Daher sind für die Bestimmung von Probenahmeumfängen und die Auswahl geeigneter Beprobungsschemata zur flächenbezogenen Erhebung von Bodeneigenschaften zahlreiche Verfahren und Empfehlungen entwickelt worden, die in den nachstehenden Ausführungen vorgestellt werden.

#### **1.2.1.1 Probenanzahl**

In gesetzlichen Verordnungen auf Bundes- und Länderebene sind einfache Richtlinien für die notwendige Mindestprobenanzahl zur flächenbezogenen Erhebung von Bodeneigenschaften formuliert. So wird in der Verordnung zum Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchV 1999) empfohlen, bei großmaßstäbigen (ca. 1:5.000 bis 1:10.000) Untersuchungen im Wirkungspfad 'Boden-Nutzpflanze' landwirtschaftlich genutzter Böden pro Hektar Untersuchungsfläche im Durchschnitt eine Mischprobe aus 15 bis 25 Einzeleinstichen in homogenen Arealen (Teilflächen) zu entnehmen. Im Einzelfall soll ein bodenkundlicher Experte auf der Grundlage seines Fachwissens und seiner lokalen Geländekenntnisse die tatsächlich erforderliche Probenanzahl zur Untersuchung der jeweiligen Fragestellung festlegen. Im Hinblick auf die Anforderungen des Bundes-Bodenschutzgesetzes wird vom Bundesverband Boden (2000)

darauf hingewiesen, dass für die Ermittlung einer ausreichenden Probenanzahl die Kenntnis über die räumliche Variabilität der Standorteigenschaften von großer Bedeutung ist, um Rückschlüsse auf die räumliche Heterogenität der zu erhebenden bodenkundlichen Kennwerte oder Schadstoffgehalte treffen zu können. Daher sind alle verfügbaren standörtlichen Vorinformationen für die Festlegung des notwendigen Probenumfangs zu berücksichtigen.

Neben diesem expertenwissen-gestützten Verfahren liegen auch statistische und geostatistische Methoden vor, die bodenkundlich relevante Vorinformationen für die Ermittlung von minimal notwendigen Probenumfängen berücksichtigen. Beispielsweise schlagen Webster und Oliver (1990) vor, die Probenanzahl auf der Basis eines Proportionalitätsindex ' $P$ ' zu ermitteln, der das Verhältnis der Anzahl standörtlich einheitlicher Areale zu einer zunächst unbekannten Probenanzahl beschreibt. Ist die Anzahl homogener Gebiete auf der Grundlage vorliegender Flächeninformationen ermittelt, kann die Probenanzahl bei einem vorgegebenen Wert für den Proportionalitätsindex (0 bis 1) und unter Berücksichtigung einer angenommenen Binominalverteilung für ' $P$ ' sowie einer gewünschten zulässigen Irrtumswahrscheinlichkeit für das jeweilige Konfidenzintervall von ' $P$ ' geschätzt werden. Welcher Standortfaktor bezüglich der räumlichen Variabilität des zu erhebenden Bodenkennwerts letztendlich eine hinreichende Relevanz besitzt, wird bei diesem Verfahren von bodenkundlichen Fachexperten entschieden.

Sind bodenkundlich relevante Flächeninformationen nicht verfügbar oder für die angestrebten Untersuchungen ungeeignet, kann die tatsächliche räumliche Variabilität der zu erhebenden Bodeneigenschaften mit einer prospektiven, geschachtelten Beprobung ermittelt werden (*nested sampling*) (z.B. Webster & Oliver 1990, Oliver & Webster 1986, Webster 1977), um im Vorfeld großflächiger Bodenuntersuchungen die notwendige Probenanzahl zu ermitteln. Dazu wird im Untersuchungsgebiet ein Probenkollektiv gewonnen, das für die näherungsweise Schätzung eines Variogramms geeignet ist, mit welchem minimal notwendige Probenahmestellenabstände ermittelt werden können. Die Probenahmestellen für dieses Probenkollektiv werden paarweise in bekannten Intervallen mit zunehmendem Abstand über das Untersuchungsgebiet verteilt. Anschließend wird die Variation der kumulativen Messwertvarianzen einer Bodeneigenschaft in Abhängigkeit vom mittleren Probenahmestellenabstand geschätzt, um so eine Vorstellung über die räumliche Variabilität des flächendeckend zu erhebenden Bodenkennwerts zu erhalten. Der minimal notwendige Probenumfang wird auf der Grundlage dieser Variabilitätsuntersuchungen bestimmt.

Neben der natürlichen Variabilität der Bodenkennwerte, die durch die Ermittlung der räumlichen Diversität und Heterogenität bodenkundlich relevanter Vorinformationen geschätzt oder durch geschachtelte Beprobungen gemessen werden kann, ist die erforderliche Probenanzahl auch von der Flächengröße und dem Betrachtungsmaßstab der Untersuchungen abhängig (vgl. Schmidt 1994, Blume 1992). Für die Berücksichtigung der Flächengröße im Rahmen von großmaßstäbigen Schadstoffuntersuchungen zur Bewertung von Bodenfunktionen wird beispielsweise in einem Gutachten zur Umsetzung gesetzlich festgelegter Bodenschutzmaßnahmen empfohlen, zunächst Teilflächen auszuweisen, die durch die inhaltliche und geometrische Verschneidung vorliegender, bodenkundlich relevanter Flächendaten entstehen (Gröngröft et al. 1999). Anschließend wird die erforderliche Bohrpunktdichte innerhalb dieser standörtlich homogenen Areale (Teilflächen) nach einer empirisch ermittelten Potenzfunktion (Exponent 0,5) mit der Flächengröße in Hektar als Basis festgelegt. Der Einsatz dieser Funktion gewährleistet, dass mit zunehmender Flächengröße die Probenanzahl nur allmählich zunimmt. Als Mindestanzahl werden drei Proben für Teilflächen, die weniger als einen Hektar Fläche besitzen, vorgegeben.

Eine Methode, die sowohl den Betrachtungsmaßstab als auch die standörtliche Heterogenität des Untersuchungsgebietes berücksichtigt, verwendet ebenfalls bodenkundlich relevante Flächeninformationen (vgl. Schmotz 1996, Hertling et al. 1995, Kuhnt 1994). In diesem Verfahren wird der notwendige Probenumfang aus der Anzahl standörtlich einheitlicher Areale (Teilflächen, Raumeinheiten), die durch die Verschneidung digitaler Flächendaten entstehen, sowie der Gesamtgröße des Untersuchungsgebietes und dem Planungsmaßstab der Untersuchungen ermittelt. Auf diese Weise wird eine häufigere Beprobung großer oder mehrfach vorkommender, standörtlich homogener Flächen im Vergleich zu flächenmäßig unbedeutsameren Standorten gewährleistet.

#### **1.2.1.2 Anordnung der Probenahmestellen**

Für die räumliche Anordnung von Probenahmestellen zur flächenbezogenen Erfassung bodenkundlicher Kennwerte sind Messnetze zu unterscheiden, die einen regulären, zufälligen oder auf vorliegende Flächeninformationen begründeten Aufbau besitzen (Burrough & McDonnell 1998, Webster & Oliver 1990).

Reguläre Messnetze werden in der bodenkundlichen Praxis sehr häufig eingesetzt, da der Aufbau dieser Beprobungsschemata einfach und leicht reproduzierbar ist (vgl. Schmotz

1996). Die Probenahmestellen sind dabei im Allgemeinen in der Form eines Quadrat- oder Hexagonalrasters aufgebaut und können innerhalb oder an den Schnittpunkten der Rasterzellen regelmäßig oder unregelmäßig angeordnet sein. Neben der Rasterbeprobung existieren Verfahren zur vollkommen zufälligen Auswahl von Probenahmestellen. Solche Zufallsmessnetze sollen eine stochastisch unabhängige (vgl. Miehlich 1976) und vom Anwender unbeeinflusste Verteilung der Probenahmestellen gewährleisten und sind daher besonders für designbasierte Beprobungsstrategien geeignet (Burrough 1993). Geschichtete Zufallsmessnetze kombinieren die Eigenschaften der regulären Raster- und der Zufallsmessnetze. Zu ihrer Erzeugung wird das Untersuchungsgebiet zunächst mit einem Raster überzogen. Anschließend werden innerhalb der Rasterzellen ein oder mehrere zufällig angeordnete Punkte für die Beprobung ausgewählt. Reguläre Messnetze und Zufallsmessnetze eignen sich als Grundlage design- und modell-basierter Beprobungsstrategien.

Im Vergleich zu Raster- oder Zufallsmessnetzen werden Verfahren zur Erzeugung geschichteter Messnetze (z.B. Schmotz 1996, Hertling 1995, Kuhnt 1994, Webster & Oliver 1990) eher selten angewendet, da der Aufwand zur Erstellung der Messnetze relativ groß ist. Diese Verfahren nutzen für den Messnetzaufbau bodenkundlich relevante Vorinformationen über das Untersuchungsgebiet. Die Auswahl der vorliegenden Flächeninformationen richtet sich nach ihrer Indikatorfunktion für die zu erhebende Bodeneigenschaft. In Form digitaler Karten werden die Vorinformationen zu Raumeinheiten (*spatial units*) mit gleicher Kombination bestimmter Flächeninformationen verschnitten. Die Lokalisation der Probenahmestellen innerhalb der Raumeinheiten kann auf der Grundlage von Raster- bzw. Zufallsmessnetzen (Webster & Oliver 1990) oder unter Berücksichtigung der räumlichen Vergesellschaftungsmuster von Raumeinheiten (Kuhnt 1994) erfolgen. Beprobungsverfahren auf der Grundlage geschichteter Messnetze liegt ein modell-basierter Ansatz zugrunde, sofern die Verfahren eine räumliche Abhängigkeit der Variation bodenkundlicher Kennwerte postulieren.

### 1.2.1.3 Probenahme

Die räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften kann durch die mögliche Fraktalität der Bodenkennwerte in unterschiedlichen Betrachtungsmaßstäben eine vergleichbare Dimension erreichen und hat damit eine unmittelbare Auswirkung auf die räumliche Anordnung und die Anzahl der Probenahmestellen (z.B. Young & Crawford 1991, Burrough 1989, Burrough 1983, Goodchild 1980). Die Fraktalität von bodenkundlichen Kennwerten ist variogramma-

nalytisch nachweisbar und äußert sich in Nahbereichsdiskontinuitäten (*nugget variances*) oder geschachtelten Strukturen (*nested structures*) im experimentellen Variogramm der betrachteten Bodeneigenschaft (Kuhnt 1994). Um in Abhängigkeit vom jeweiligen Betrachtungsmaßstab der Untersuchungen dennoch geeignete flächenrepräsentative Kennwerte zu erhalten, werden Bodenproben daher im Allgemeinen nicht singulär entnommen, sondern es werden Flächenmischproben aus mehreren, in definierten Abständen angeordneten Beprobungsstellen erzeugt, um die kleinräumige Variabilität von Bodenkennwerten innerhalb eines räumlichen Ausschnittes durch die Zusammenführung und Homogenisierung der Einzelproben zu eliminieren (z.B. BBodSchV 1999, Schmotz 1996, Hertling et al. 1995, Fränzle et al. 1995, Kuhnt 1994). Die Größe des räumlichen Ausschnittes für die Flächenmischprobe wird so gewählt, dass die großräumig darzustellende Variabilität der Bodeneigenschaft mit dem Messwert der Mischprobe beschrieben werden kann. Die Bezugseinheit (*support*) des Messwertes der Mischprobe entspricht nicht der Fläche und dem Volumen einer einzelnen Bodenprobe, sondern der gesamten Beprobungsfläche, die mit der Mischprobe erfasst wird, und stellt für die flächenbezogene Darstellung eines Bodenkennwerts gleichzeitig die unterste Grenze der räumlichen Auflösbarkeit dar (Burrough & McDonnell 1998).

### 1.2.2 Übertragung punktuell erhobener Bodenkennwerte in die Fläche

Für die Erzeugung von Flächeninformationen aus punktuell erhobenen Messwerten werden Modelle unterschieden, die eine räumlich diskontinuierliche, kontinuierliche oder skalenabhängige Variabilität von Bodeneigenschaften annehmen und entsprechend als diskrete, kontinuierliche oder multiskalige Modelle bezeichnet werden (Burrough 1993). Multiskalige Modelle, die eine räumliche Beschreibung von Bodeneigenschaften auf unterschiedlichen Betrachtungsmaßstäben ermöglichen (vgl. Bouma et al. 1998, Wagenet 1998, de Vries et al. 1998), werden in den folgenden Ausführungen nicht behandelt, da das Ziel dieser Arbeit die Generierung von Flächendaten ausschließlich für große Maßstäbe (1:5.000 bis 1:10.000) ist. Dieser Maßstabsbereich gewährleistet eine Auflösung der Karteninformationen in der Größenordnung von mehreren Metern, die für Planungsvorhaben auf der Gemeindeebene ausreichend ist.

Diskrete Modelle der Bodenvariabilität unterstellen, dass sich Bodenkennwerte oder -eigenschaften in der Fläche mehr oder weniger sprunghaft an festen Grenzen ändern. Die Grundlage dieser Modelle bilden Raumeinheiten, die in ihren Eigenschaften bezüglich der zu

regionalisierenden Bodeneigenschaft deutlich unterscheidbar sind und als in sich homogen betrachtet werden (Blume 1992, Hole and Campbell 1985). Sofern die Variabilität der Bodenkennwerte innerhalb der Einheiten kleiner ist als die Unterschiede zwischen den Raumeinheiten (vgl. Young et al. 1998), ist eine Extrapolation der Messwerte auf die gesamte Fläche der Raumeinheit im Rahmen der Annahmen, die einem diskreten Modell der Bodenvariabilität zugrunde liegen, möglich (vgl. Burrough & McDonnell 1998, Schröder et al. 1994, Blume 1992). Die Abgrenzung der Karten- oder Raumeinheiten kann auf der Basis vorliegender (digitaler) Flächeninformationen oder durch eine expertenwissen-gestützte prozessorientierte Raumgliederung, wie sie etwa bei der Erstellung von Bodenkarten vorgenommen wird, durchgeführt werden (vgl. AG Bodenkunde 1994, Soil Survey Staff 1993, Blume 1992, Hudson 1992).

Kontinuierliche Modelle der Bodenvariabilität setzen voraus, dass Messwerte von Bodeneigenschaften nicht an festen Grenzen alternieren, sondern eine graduelle raumbezogene Änderung aufweisen können (Burrough & Frank 1995, Burrough 1993). In kontinuierlichen Modellen wird die Schätzung unbekannter Messwerte von Bodeneigenschaften aus bekannten umliegenden Werten als Interpolation bezeichnet (Ricardo et al. 1991). Im Unterschied zu diskreten Modellen erfolgt dabei keine direkte Übertragung der Interpolationsergebnisse auf Raumeinheiten, sondern auf räumliche Bezugseinheiten (*support*) (vgl. Heuvelink & Pebesma 1999, Ricardo et al. 1991), die hinsichtlich ihrer Größe identisch mit der Erfassungsfläche der Originalwerte sind und beispielsweise dem Areal entsprechen, das eine Flächenmischprobe in Anspruch nimmt (vgl. Kap. 1.2.1.3). Werden Rasterkarten als Interpolationsgrundlage verwendet, deren Pixelabstand die Fläche der Mischprobe übersteigt, sind die Rasterflächen als Bezugseinheit der Interpolationsergebnisse zu verstehen (Burrough & McDonnell 1998). Durch die Klassifizierung oder Aggregierung der Interpolationsergebnisse können die Messwerte als diskrete Einheiten dargestellt werden und sind dann mit flächenhaften Darstellungen von Bodenkennwerten vergleichbar, die auf Basis eines diskreten Modells regionalisiert werden (vgl. Sauer & Behr 1997).

Für die Extrapolation oder Interpolation von punktuell erhobenen Bodendaten stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, deren Einsatz unter Anderem von dem gewählten Regionalisierungsmodell (diskret oder kontinuierlich), der Datendichte, dem gewünschten Detaillierungsgrad, dem Zielmaßstab und dem Budget der Untersuchungen, den standörtlichen Eigenschaften des Untersuchungsgebiets und der Verfügbarkeit externer bodenkundlich relevanter Vorinformationen abhängt. Insbesondere für die Interpolation fehlender Werte in kon-

tinuierlichen Datenmodellen ist eine große Zahl von Methoden entwickelt worden. Je nachdem, ob die tatsächlich gemessenen Werte im Zuge der Interpolation an ihrer räumlichen Position reproduziert oder an die Umgebung angeglichen werden, wird eine grundsätzliche Unterteilung der Methoden in exakte und unexakte Interpolationsverfahren vorgenommen. Darüber hinaus werden globale, lokale und geostatistische Interpolationsmethoden unterschieden (Burrough & McDonnell 1998).

#### **1.2.2.1 Extrapolation**

Extrapolationsverfahren für die Regionalisierung von bodenkundlichen Punktinformationen werden seit Langem für die Erstellung von Bodenkarten auf der Basis von Expertenwissen eingesetzt (vgl. AG Bodenkunde 1965-1994, Soil Survey Staff 1993, Hudson 1992, Will 1987). In der Bundesrepublik Deutschland erfolgt die Aufnahme und flächenbezogene Darstellung von Bodeneinheiten und -eigenschaften seit etwa 35 Jahren nach einem einheitlichen Schlüssel (Bodenkundliche Kartieranleitung). Die Erstellung einer Bodenkarte beginnt mit der vorläufigen Abgrenzung von diskreten Flächen in einer sogenannten Konzeptkarte auf der Grundlage bodenkundlich relevanter Informationen, die für das Kartiergebiet verfügbar sind. Mittlerweile wird empfohlen, diese Konzeptkarte unter Einbeziehung digitaler Flächeninformation, beispielsweise über Relief- und Substrateigenschaften sowie Nutzungstypen, herzustellen (AG Bodenkunde 1994). Im Anschluss an eine Übersichtsbegehung wird die punktuelle Erhebung von Bodeninformationen unter Berücksichtigung der Vorinformationen, im Gelände wahrnehmbarer Unterschiede der Vegetation und des Reliefs sowie weiterer, visuell erfassbarer Standorteigenschaften durchgeführt. Diese Befunde werden zur Präzisierung der Grenzverläufe von Flächeneinheiten verwendet und den Flächen nach entsprechenden Aggregierungs- und Verifizierungsschritten zugewiesen, so dass eine diskrete, flächenbezogene Darstellung von Bodenformen vorliegt.

Die flächenhafte Bewertung der Ertragsfähigkeit von Böden, hauptsächlich für steuerliche Zwecke, wird mit Bodenschätzungskarten vorgenommen (Will 1987). Die Abgrenzung und inhaltliche Beschreibung von diskreten Flächeneinheiten innerhalb der Karten erfolgt unter Berücksichtigung von Nutzungsunterschieden und Reliefeigenschaften sowie auf der Grundlage engständig angelegter Bohrungen. Die Bohrpunktdichte beträgt etwa 4.000 bis 5.000 Bohrungen innerhalb einer topographischen Karte im Maßstab 1:25.000 (AG Bodenkunde 1994).



Ist es nicht möglich, eine ausreichende Probenanzahl für die Beschreibung des gesamten Untersuchungsgebiets zu realisieren, können Bodeneigenschaften aus vorliegenden oder leicht zu ermittelnden Standort- und Bodeninformationen und tatsächlich erhobenen Bodenkennwerten geschätzt werden. Diese Ableitung erfolgt mittels empirischer Regressionsmodelle, um eine Extrapolation der Bodenkennwerte auf nicht beprobte Areale zu ermöglichen (z.B. McKenzie & Ryan 1999, Bell & Keulen 1995, Tietje & Tapkenhinrichs 1993). Das hypothetische Regressionsmodell beschreibt einen logisch plausiblen und/oder statistisch nachweisbaren Zusammenhang zwischen den tatsächlich gemessenen Werten und den vorliegenden Bodeninformationen. In Abhängigkeit vom Datentyp der Eingangsinformationen sind logische oder numerische Transferfunktionen zu unterscheiden. Die Verwendung logischer Transferfunktionen (Übertragungsregeln), oft in Kombination mit einer Reklassifizierung der Basisdaten, beruht auf der Annahme, dass mittels existierender globaler Regeln oder physikalischer Modelle neue Informationen aus bestehenden Primärinformationen, die beispielsweise aus Punktbeobachtungen im Gelände stammen, abgeleitet werden können (*top-down logic*) (Burrough & McDonnell 1998). Numerische Transferfunktionen dienen zur Berechnung unbekannter metrisch skalierten Werte einer Bodeneigenschaft aus vorliegenden, ebenfalls metrisch skalierten Faktoren, für die ein Zusammenhang zu bekannten Messwerten der Bodeneigenschaft statistisch nachgewiesen wurde. Die Extrapolation der abgeleiteten Bodeneigenschaften, die mit diesen Transferfunktionen ermittelt werden, erfolgt zumeist auf Raumeinheiten, die durch die flächenhafte Darstellung der Eingangsinformationen der Regressionsmodelle erzeugt werden.

#### 1.2.2.2 Lokale Interpolation

Lokale Interpolationsverfahren nutzen für die Schätzung unbekannter Messwerte ausschließlich direkt angrenzende bekannte Werte. Zu diesen Verfahren gehört z.B. die Erzeugung sogenannter Thiessen-Polygone (Thiessen 1911). Dabei werden um die erhobenen Messpunkte diskrete Flächen (Polygone) konstruiert, innerhalb derer alle möglichen Punkte näher zu dem tatsächlich erhobenen Messpunkt liegen als zum nächsten Nachbarmesspunkt. Eine weitere lokale Interpolationsmethode ist die Delaunay-Triangulation (Delauny 1934). Bei diesem Verfahren werden die Mittelpunkte benachbarter Thiessen-Polygone verbunden, so dass ein Netzwerk aus Dreiecken (*Triangulated Irregular Network*) entsteht. Die lokale Schätzung unbekannter Messwerte für die Erzeugung einer kontinuierlichen Oberfläche kann durch die Einbeziehung linearer oder inverser Distanzen als Schätzwichte erfolgen (z.B. Voltz et al.

1997, Gotway et al. 1996). Der Nachteil lokaler Interpolationsverfahren liegt darin, dass keine Schätzfehler angegeben werden können und möglicherweise relevante Informationen von weiter entfernt liegenden Messwerten nicht berücksichtigt werden (Webster & Oliver 1990).

### **1.2.2.3 Globale Interpolation**

Globale Interpolationsmethoden werden für die Schätzung unbekannter Messwerte zur Erzeugung diskreter oder kontinuierlicher Flächen unter Berücksichtigung aller vorliegenden bekannten Werte eingesetzt. Ein globales Interpolationsverfahren stellt die varianzanalytische Klassifizierung von punktuell erhobenen Messwerten dar (z.B. Voltz et al. 1997, Voltz & Webster 1990). Essentielle Voraussetzungen für die Anwendung dieses statistischen Verfahrens sind unter Anderem die Normalverteilung der Messwerte, die Varianzenhomogenität der erzeugten Klassen sowie die hypothetische Grundannahme, dass die Variation der Messwerte innerhalb der Klassen zufällig ist.

Die globale Interpolation unbekannter Messwerte kann auch auf der Grundlage von Regressionsmodellen erfolgen. Ist eine kontinuierliche Verteilung der Werte über das Untersuchungsgebiet zu erwarten, besteht die Möglichkeit, eine Trendoberflächenanalyse unter Einbeziehung der geographischen Lage der Messwerte vorzunehmen (Davis 1986). Ist anzunehmen, dass die Verteilung der Messwerte von bodenkundlich relevanten Standortfaktoren abhängt, bietet es sich an, unbekannte Messwerte mit einer numerischen Transferfunktion auf der Basis vorliegender oder leicht zu erhebender metrisch skalierten Faktoren zu schätzen. Diese Vorgehensweise ist insbesondere bei begrenzten Probenumfängen üblich (Burrough & McDonnell 1998). Die statistischen Voraussetzungen und Anwendungsmöglichkeiten der Regressionsanalyse sind mit dem Einsatz von Transferfunktionen in diskreten Modellen der Bodenvariabilität vergleichbar (vgl. Kap. 1.2.2.1).

### **1.2.2.4 Geostatistische Interpolation**

Die Anwendung geostatistischer Interpolationsmethoden für bodenkundliche Fragestellungen beruht auf der Annahme, dass die Variabilität von Messwerten einer Bodeneigenschaft eine deterministische, durch bekannte Faktoren hervorgerufene Komponente, einen zufälligen, nicht erklärbaren Variationsanteil und eine autokorrelative Komponente aufweist. Der autokorrelative Variationsanteil wird durch die räumliche Lage der Messpunkte hervorgerufen

und basiert auf der Annahme, dass direkt benachbarte Messpunkte mit einer größeren Wahrscheinlichkeit ähnliche Ausprägungen einer Bodeneigenschaft besitzen als Punkte, die weiter voneinander entfernt sind (Burrough 1993). Entsprechende Verfahren, die als Kriging-Interpolation bezeichnet werden (Krige 1966), sind in den Geowissenschaften seit über drei Jahrzehnten im Einsatz. Diese Methoden basieren auf der Theorie der 'Regionalisierten Variable', in der die räumliche Verteilung der Ausprägungen einer Bodeneigenschaft als ortsabhängig angesehen wird (Matheron 1963). Kern der Verfahren ist die Ermittlung von Schätzwerten zur Interpolation von Bereichen zwischen bekannten Messwerten unter Berücksichtigung der räumlichen Lage und Ausprägung der Werte. Dazu werden sogenannte experimentelle Variogramme erzeugt, die Aufschluss über die Variabilität von Bodenkennwerten in Abhängigkeit von der Entfernung der Messpunkte geben. An die Punktwolke dieser Variogramme werden lineare oder nichtlineare Modelle angepasst, die die Grundlage der Kriging-Interpolation bilden.

In Abhängigkeit vom Typ und von der räumlichen Anordnung der Messwerte, ihrer Verteilungscharakteristik sowie bestimmter statistischer Grundvoraussetzungen (z.B. ausreichender Stichprobenumfang und Normalverteilung der Messwerte) werden unterschiedliche Kriging-Verfahren, wie z.B. das gewöhnliche, einfache und nichtlineare Kriging oder das Block-Kriging ( *ordinary*-, *simple*-, *non-linear*-, *block-kriging*) usw. eingesetzt (z.B. Webster & Oliver 1990, Akin & Siemes 1988, Burgess & Webster 1980, Journel & Huijbregts 1978). Liegen für das Untersuchungsgebiet metrisch skalierte Informationen vor, die mit den bekannten Messwerten räumlich korrelieren, kann mit dem Kokriging-Verfahren (*Co-kriging*) unter Umständen ein Variogramm mit einer geringeren Nuggetvarianz (Verringerung der Unsicherheiten im Nahbereich) geschätzt werden, um so eine realitätsnähere Interpolation der Messwerte bei einer Verringerung des Beprobungs- und Analyseaufwands zu erreichen (Goovaerts 1999).

Die Kriging-Interpolation von punktuell erhobenen Messwerten wird im Allgemeinen in standörtlich homogenen Untersuchungsgebieten eingesetzt, die eine weitestgehend gleichmäßige Verteilung der Messwerte einer Bodeneigenschaft erwarten lassen (Burrough & McDonnell 1998). In Gebieten, die kleinräumig und diskontinuierlich stark wechselnde Nutzungsformen aufweisen, ist jedoch eine solche Kontinuität bei der raumbezogenen Betrachtung nutzungsabhängiger Bodeneigenschaften nicht zu erwarten. Daher ist es sinnvoll, diese Räume auf der Basis bodenkundlich relevanter, leicht zu erhebender Flächeninformationen

zu untergliedern und innerhalb der Teilräume eine Kriging-Interpolation (*stratified kriging*) durchzuführen (z.B. Goovaerts 1999, Sinowski & Auerswald 1999).

### 1.2.3 Integrative Regionalisierungskonzepte

Integrative Regionalisierungskonzepte für den Aufbau der Messnetze, die Ermittlung der notwendigen Probenanzahl und die flächenhafte Darstellung der Bodenkennwerte wurden bisher kaum entwickelt. Ein entsprechendes Verfahren, das für Bodenuntersuchungen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen geeignet ist, wurde von Kuhnt (1994) ausgearbeitet und beruht auf der von Renk (1977) und Fränzle (1978) entwickelten 'Speziellen Nachbarschaftsanalyse'. Die Anwendung dieser Methode basiert auf der nachbarschaftsanalytischen Auswertung einer gerasterten Raumeinheitenkarte. Diese Karte enthält Informationen über Kombinationsmuster vorliegender oder leicht zu erhebender Standorteigenschaften, die in einem bodenkundlich plausiblen Zusammenhang zu den Bodeneigenschaften stehen, die regionalisiert werden sollen. Über eine Häufigkeitsverteilung der auftretenden Merkmalsausprägungen der Raumeinheiten, die in viele Einzelflächen aufgesplittet sein können, wird die minimal notwendige Probenanzahl ermittelt, die erforderlich ist, um jede Raumeinheit zu beproben. Anschließend wird auf Basis der Raumeinheitenkarte das Messnetz für die Beprobung erzeugt, indem die räumlichen Vergesellschaftungsstrukturen der Raumeinheiten innerhalb eines begrenzten Ausschnitts der Karte (Nachbarschaftsraum) analysiert werden. Durch ein Gewichtungsverfahren (reziproke quadrierte Euklidische Distanz) und unter Berücksichtigung der Anteils der negativen und positiven Autokorrelation von Rasterpunkten (Nachbarschaft zu Rasterpunkten mit gleichen oder unterschiedlichen Werten) wird jedem Punkt einer Raumeinheitenkarte ein Index zugewiesen, der die räumliche Repräsentanz der Rasterpunkte innerhalb einer Raumeinheit beschreibt. Punkte mit hohen Indices vereinigen die räumliche und inhaltliche Struktur der betreffenden Raumeinheit, in der sie liegen, am deutlichsten und sind daher als repräsentative Probenahmestellen zu betrachten, an denen die Bodeneigenschaften erhoben werden können. Die flächenbezogene Darstellung der Bodenkennwerte erfolgt durch die Extrapolation der Messwerte auf die Raumeinheiten, in denen die Bodeneigenschaft erhoben wurde. Für groß- bis mittelmaßstäbige Betrachtungen liegen auf diese Weise regionalisierte Bodendaten für schwach reliefierte Gebiete vor. Im Rahmen von Schadstoffuntersuchungen wurden beispielsweise Schwermetallgesamtgehalte und organische Schadstoffe mit dieser Methode regionalisiert (Schmotz 1996, Hertling et al. 1995). In anderen Untersuchungen (Kuhnt 1994) wurde die räumliche Verteilung organischer und an-

organischer Schadstoffe sowie des pH-Werts und der organischen Substanz des Oberbodens ermittelt.

Voltz et al. (1997) haben ein integratives Verfahren zur flächenhaften Darstellung von Bodeneigenschaften für den mittleren Maßstabsbereich (1:25.000 bis 1:100.000) entwickelt. Im Vordergrund stand die Minimierung der Kosten und des Untersuchungsaufwands bei einer noch akzeptablen Präzision der Regionalisierungsergebnisse. Das zweistufige Verfahren kombiniert herkömmliche Klassifizierungstechniken mit Interpolationsmethoden. In der ersten Stufe ist es zunächst erforderlich, einen Referenzbereich (*reference area*) innerhalb des Untersuchungsgebietes zu identifizieren, der möglichst alle zu erwartenden Bodentypen der gesamten Untersuchungsregion aufweist (vgl. Lagacherie et al. 1995). Dieser Bereich wird in Bodeneinheiten gegliedert, und an repräsentativen Profilen innerhalb der Einheiten werden feldbodenkundliche Merkmale und die zu regionalisierende Bodeneigenschaft erhoben. Auf der Grundlage eines regelmäßigen Rasters innerhalb der gesamten Untersuchungsregion erfolgt anschließend lediglich die Aufnahme feldbodenkundlicher Merkmale ohne die Einteilung des Gebietes in Bodeneinheiten oder die Messung der Bodeneigenschaft. Sofern diese Merkmale mit den Kartiierungsergebnissen des Referenzgebietes übereinstimmen, wird der im Referenzgebiet erhobene Messwert des Bodenkennwerts auf die Rasterpunkte übertragen. In der zweiten Stufe werden die Übertragungsergebnisse mit geostatistischen Interpolationsverfahren flächenhaft dargestellt.

### 1.3 Regionalisierungsgüte

Die Qualität der Regionalisierungsergebnisse bodenkundlicher Kennwerte wird nicht allein durch die Wahl geeigneter Erhebungs- und Regionalisierungsverfahren bestimmt. Sie wird auch durch mögliche Fehlerquellen, Unsicherheiten oder Unschärfen beeinflusst, die im Zusammenhang mit der Qualität der Eingangsdaten, dem Prozess der Datenverarbeitung und der flächenhaften Darstellung der Ergebnisse stehen (vgl. Sauer & Behr 1997, Sbresny 1995). Das Ausmaß dieser Einflussfaktoren muss daher soweit wie möglich bekannt sein, um die Güte der flächenhaften Darstellung bodenkundlicher Kennwerte im Hinblick auf die realen Verhältnisse beurteilen zu können und eine übermäßige Kumulierung möglicher Fehler und Unsicherheiten zu vermeiden (Burrough & McDonnell 1998).

Insbesondere wenn unterschiedliche digitale Datengrundlagen zur Raumgliederung verwendet werden, ist zu überprüfen, inwieweit die oftmals stark diskretisierten und aggregierten

Rauminformationen den Ansprüchen des Regionalisierungsverfahrens genügen (Sauer & Behr 1997). Ungenauigkeiten entstehen auch durch die Verwendung unterschiedlicher Datenformate oder digitaler Vorinformationen mit einem zu kleinen Maßstab in Relation zur gewünschten Auflösung, so dass eine übermäßige räumliche Verzerrung der regionalisierten Flächendaten möglich ist (Burrough & McDonnell 1998, Sbresny 1995).

Bei der Anwendung diskreter oder diskretisierter kontinuierlicher Modelle der Bodenvariabilität ist zu klären, mit welcher Genauigkeit die Grenzverläufe die tatsächliche Änderung der Bodeneigenschaften widerspiegeln, da beispielsweise durch die Kombination unterschiedlich skalierte Informationsschichten räumliche Lagefehler entstehen können. Ist das Ausmaß dieser Lageungenauigkeit abschätzbar, so ist es sinnvoll, Fehlerbänder ( $\epsilon$ -Umgebung) in Form einer Pufferzone mit einer definierten Ausdehnung entlang der Grenzlinien festzulegen (Blakemore 1984). Auf diese Weise werden Bereiche gekennzeichnet, die keine eindeutige räumliche Zuordnung der Ausprägung einer Bodeneigenschaft im Bereich angrenzender Flächeneinheiten erlauben. Besteht jedoch eine inhaltliche und räumliche Unsicherheit der Zuordnung und Klassenzugehörigkeit einer Merkmalsausprägung, ist die Ausweisung von Fehlerbändern nicht ausreichend. In diesem Fall ist es angebracht, Unschärfebereiche (*fuzzy-regions*) statt fester Grenzlinien im Bereich angrenzender Flächen zu definieren (z.B. Bratney & Odeh 1997, Lark & Bolam 1997, Sauer & Behr 1997).

Liegen Bodeneigenschaften als regionalisierte Flächeninformation vor, muss geklärt werden, ob eine hinreichende Validität des Regionalisierungsergebnisses und der Schätzgenauigkeit des Regionalisierungsmodells besteht (vgl. Wenkel & Schultz 1999, Rykiel 1996), da insbesondere für Entscheidungsprozesse im rechtlichen Rahmen die Validität der Regionalisierungsergebnisse von entscheidender Bedeutung ist (Brus & Gruijter 1997). Die Validität der Regionalisierungsergebnisse kann durch den Vergleich mit Messwerten aus dem Untersuchungsgebiet erfolgen, die nicht in den Extra- oder Interpolationsprozess eingegangen sind (z.B. Sinowski & Auerswald 1999, Odeh et al. 1994). Eine andere Möglichkeit, die insbesondere für die Gültigkeitsüberprüfung der Ergebnisse geostatistischer Regionalisierungsverfahren eingesetzt wird, ist die Kreuz-Validierung (*cross-validation*) (Deutsch & Journal 1992). Bei diesem Verfahren werden einzelne tatsächlich gemessene Werte aus dem Datensatz entfernt und diese anschließend aus den Nachbarwerten geschätzt. Als Gütemaß der Schätzgenauigkeit durch die Interpolation wird die Abweichung der geschätzten von den gemessenen Werten herangezogen (z.B. Hoosbeck et al. 1998, Voltz & Webster 1990). Allerdings wird

mit diesem Verfahren nur die Qualität der Interpolationsmethode, jedoch nicht die Güte der Messwertschätzung an unbeprobten Orten geprüft.

Die an den realen Verhältnissen orientierte, bodenkundlich plausible Darstellung regionalisierter Bodeneigenschaften wird auch vom Klassifizierungsniveau der Flächeninformation beeinflusst. Unterschreiten beispielsweise die angegebenen Klassenintervalle die Bereiche der möglichen Variation, die durch die Genauigkeit der analytischen Methoden, die natürliche Variabilität der Bodeneigenschaften und die Präzision des Regionalisierungsmodells gegeben ist, besteht die Gefahr einer Fehlinterpretation der räumlichen und inhaltlichen Auflösung des Regionalisierungsergebnisses (vgl. Young et al 1998, Oliver & Webster 1990). Jeder weitere Verarbeitungsschritt, in den diese Ergebnisse dann eingehen, kann zu einer nicht kalkulierbaren Fehlerfortpflanzung führen (Burrough & McDonnell 1998, Sbresny 1995).

#### **1.4 Flächenbezogene Bewertung von Vorsorgewerten des Bundes-Bodenschutzgesetzes**

Das Bundes-Bodenschutzgesetz ist am 1. März 1999 mit dem Ziel in Kraft getreten, die Funktionen (natürliche und kulturgeschichtliche sowie Archiv- und Nutzungsfunktionen) des Bodens im Naturhaushalt zu sichern oder wiederherzustellen (BBodSchG 1998). Aus der Sicht des vorsorgenden und nachhaltigen Bodenschutzes ist die Einhaltung sogenannter Vorsorgewerte erforderlich, um das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen zu vermeiden (§ 9 BBodSchV). Bei einer Überschreitung dieser Werte wird davon ausgegangen, dass schädliche Bodenveränderungen eintreten können (§ 8 BBodSchG). Vorsorgewerte sind für mehrere Schwermetalle und organische Schadstoffe in der Verordnung zum Bundes-Bodenschutzgesetz, die am 17. Juli 1999 Rechtsgültigkeit erlangt hat, definiert (BBodSchV 1999).

Für die großmaßstäbige flächenbezogene Erhebung von Bodeneigenschaften, unter Anderem zur Bewertung einer möglichen Überschreitung der Vorsorgewerte, wird in der Verordnung empfohlen, das Untersuchungsgebiet - soweit notwendig - in Teilflächen zu gliedern. Die Teilung soll expertenwissen-gestützt aufgrund eines unterschiedlichen Gefahrenverdachts, einer unterschiedlichen Bodennutzung, der Geländeform oder der Bodenbeschaffenheit sowie von Auffälligkeiten, wie z.B. einer unterschiedlichen Vegetationsentwicklung, oder anhand von feldbodenkundlichen Erkenntnissen erfolgen. Laut der Verordnung ist für die Ermittlung

der räumlichen Schadstoffverteilung die zu untersuchende Fläche oder Teilfläche grundsätzlich unter Zuhilfenahme eines Rasters repräsentativ zu beproben.

Nach der Verordnung sollen diese Anweisungen zur flächenhaften Bewertung möglicher Bodenbeeinträchtigungen dem derzeitigen praktischen, technischen und wissenschaftlichen Kenntnisstand entsprechen. Allerdings ist die dynamische Fortentwicklung der Methoden und Verfahren durch die Verabschiedung des Bodenschutzgesetzes als Zukunftsaufgabe zu verstehen (Bachmann 1999, Gabany 1998). Daher sind im Hinblick auf die Bewertung von Funktionen und Gefährdungen der Böden bereits entsprechende Weiterentwicklungen der Verfahren sowohl für großmaßstäbige (Gröngroft 1999) als auch für mittelmaßstäbige Planungen (Carle & Außendorf 1999) vorgenommen worden.



## 2 Die Untersuchungsregion und die Untersuchungsgebiete

### 2.1 Lage

Die Untersuchungsgebiete dieser Arbeit - die Gemarkungen Erda, Steinbrücken und Eibelshausen - befinden sich in den angrenzenden Naturräumen Lahn-Dill-Bergland und Dilltal (Klausing 1988) im Bundesland Hessen, Region Mittelhessen (Abb. 1)

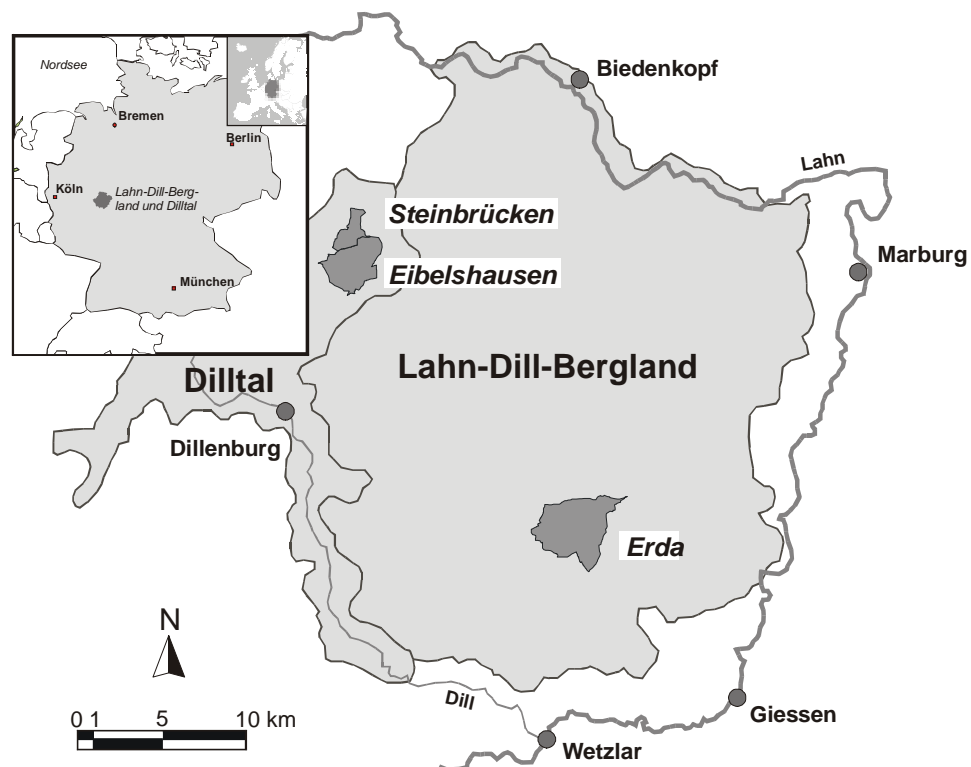


Abb. 1 Die Naturräume Lahn-Dill-Bergland und Dilltal (Untersuchungsregion des SFB 299 der DFG) mit den Untersuchungsgebieten Steinbrücken, Eibelshausen und Erda.

Diese Naturräume stellen die Untersuchungsregion des Sonderforschungsbereiches 299 der Deutschen Forschungsgemeinschaft 'Landnutzungskonzepte für periphere Regionen' dar, der 1997 eingerichtet wurde. Die drei Gemarkungen werden im Rahmen dieses Großforschungsprojektes als Testgebiete bezeichnet. Sie werden im Sonderforschungsbereich bezüglich ihrer naturräumlichen und standörtlichen Ausstattung für die gesamte Untersuchungsregion als repräsentativ angesehen.

Die Gemarkung Erda liegt im Süden des Naturraumes Lahn-Dill-Bergland. Die Höhenzüge in diesem Gebiet erreichen etwa 350 bis 380 m. Die Täler liegen zwischen 260 und 320 m. Die

unmittelbar aneinandergrenzenden Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen im Nordwesten der Untersuchungsregion, die im Folgenden als eine Einheit betrachtet werden, da sie bezüglich ihrer naturräumlichen Ausstattung, der Standorteigenschaften und der Art der Landnutzung vergleichbar sind, werden naturräumlich dem Dilltal zugeordnet. Es werden Höhen von 370 bis 585 m über NN erreicht. Die Talböden befinden sich auf einem Höhenniveau von 275 bis 340 m über NN.

## 2.2 Klima

In Abhängigkeit von der Höhenlage und der Exposition variieren die mittleren jährlichen Niederschläge in der Untersuchungsregion mit Werten von 650 bis 1100 mm bei einer mittleren Jahrestemperatur von 8° C. Ab etwa 300 bis 350 m über NN ist diese Region durch ein stärker humides Klima mit etwas geringeren Jahresdurchschnittstemperaturen gekennzeichnet. Die tieferen Lagen weisen geringfügig höhere Jahresdurchschnittstemperaturen und geringere Niederschläge auf (Hessisches Landesamt für Ernährung, Landwirtschaft und Landesentwicklung 1981).

In der Gemarkung Erda ist das Klima mit durchschnittlich 710 mm Niederschlag in der Jahressumme humid. Bei 7,5° C Jahresdurchschnittstemperatur wird der Mittelwert der Untersuchungsregion knapp unterschritten (Prothmann & Harrach 1971). Steinbrücken und Eibelshausen sind durch ein stärker humides Klima geprägt. In der Jahressumme betragen die Niederschläge 1100 bis 1200 mm. Die mittlere Jahrestemperatur erreicht 7,5° C (Hessisches Landesamt für Ernährung, Landwirtschaft und Landesentwicklung 1981).

## 2.3 Geologie und Böden

Die Naturräume Lahn-Dill-Bergland und Dilltal sind Bestandteil der östlichen Peripherie des Rheinischen Schiefergebirges. Anstehende Gesteine dieser Region sind überwiegend Tonschiefer, Grauwacken und Schalstein sowie Diabase, Quarzite, Kieselschiefer und in geringem Umfang devonische Massenkalk (Weyl 1980).

In Steinbrücken und Eibelshausen überwiegen Tonschiefer und Grauwacken aus dem Karbon mit eingeschalteten unterkarbonischen Deckdiabasen. Vereinzelt treten Quarzite auf (Schmieder et al. 1935, Weyl 1980). Die Gemarkung Erda kann geologisch in zwei Bereiche untergliedert werden. Im Norden und Nordwesten überwiegen devonische Tonschiefer, die teil-

weise kalkhaltig sind. Im Süden und Südosten sind diese Tonschiefer mit karbonischen Grauwackebänken durchzogen (Ahlburg & Kegel 1971).

Das Ausgangsmaterial der Bodenbildung in der Untersuchungsregion Lahn-Dill-Bergland und Dilltal sowie den Untersuchungsgebieten Steinbrücken, Eibelshausen und Erda sind in erster Linie pleistozäne und holozäne Sedimente. In den Hang- und zum Teil auch in den Kuppenbereichen treten meist lößbeeinflusste periglaziäre Lagen auf, die das Resultat unterschiedlicher Vorgänge sind, die im Periglazialbereich wirksam waren. Zu diesen gehören fluviale, solifluidale und äolische Formungsprozesse (Dalchow 1989). In Abhängigkeit vom Relief, von der Exposition und vom Ausgangsgestein besitzen die Lagen in ihrer Abfolge und ihren Eigenschaften eine hohe räumliche Variabilität, so dass die physikalischen Eigenschaften der Böden, die aus den periglaziären Lagen entstanden sind, ebenfalls stark variieren (Schönhals 1974, Schotte & Felix-Henningsen 1999). In den Tälern der Untersuchungsregion sind holozäne Sedimente das Ausgangsmaterial der Bodenbildung. Diese haben sich durch fluviale Ablagerungsprozesse im Überschwemmungsbereich der Gewässer und durch die seit dem Mittelalter verstärkt einsetzende Bodenerosion als Folge der zunehmend intensiveren landwirtschaftlichen Nutzung gebildet (Bork 1988).

In den Kuppenlagen befinden sich häufig Braunerde-Ranker, Ranker und Ranker-Braunerden. Im Ober- bis Mittelhangbereich sind großflächig flach- bis mittelgründige Braunerden unterschiedlicher Trophie in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Ausgangsgesteins verbreitet. Die Unterhänge sind partiell durch Pseudogleye und Pseudogley-Braunerden als Folge der geringen Wasserdurchlässigkeit der periglaziären Lagen geprägt. In einigen Unterhangbereichen treten lößlehmbeeinflusste Böden als Braunerden und Parabraunerden hoher bis mittlerer Basensättigung auf. Im Hangfußbereich sind vorwiegend mächtige Kolluvien ausgebildet. Die Auenbereiche werden von Gleyen und Naßgleyen dominiert. Gelegentlich treten auf besonders vernässten Standorten auch Moore auf.

Die vorherrschenden Bodentypen in Steinbrücken und Eibelshausen sind in den Hangbereichen unter landwirtschaftlicher Nutzung flachgründige Braunerden mit geringer bis mittlerer Basenversorgung. Pseudogleye und zum Teil auch Podsolbraunerden befinden sich hauptsächlich unter Waldnutzung. Die Unterhang- und Auenbereiche werden - wie auch in der Gemarkung Erda - durch Kolluvien bzw. Auengleye dominiert. In Kuppen- und Oberhangbereichen treten häufig Ranker und Ranker-Braunerden auf (Reichmann 1973, Büring 1970, Semmel 1968). Abbildung 2 zeigt die Bodengesellschaften der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen nach der Bodenübersichtskarte 1:50.000 (Digitale Bodenübersichtskarte

(BÜK50) des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie), die erst nach Abschluss der Geländeerhebungen zur Verfügung stand. Die stark aggregierten Bodengesellschaften dieser Karte, die deduktiv aus Sekundärdaten ermittelt wurden (Sabel 1998), weisen für viele Bereiche eine große Spanne möglicher Bodentypen und eine geringe räumliche Differenzierung der bodenkundlichen Information auf. Dennoch spiegelt die räumliche Anordnung der Klassen die Verteilung einiger bodengenetisch wirksamer Faktoren (z.B. Gestein und Relief) wider.

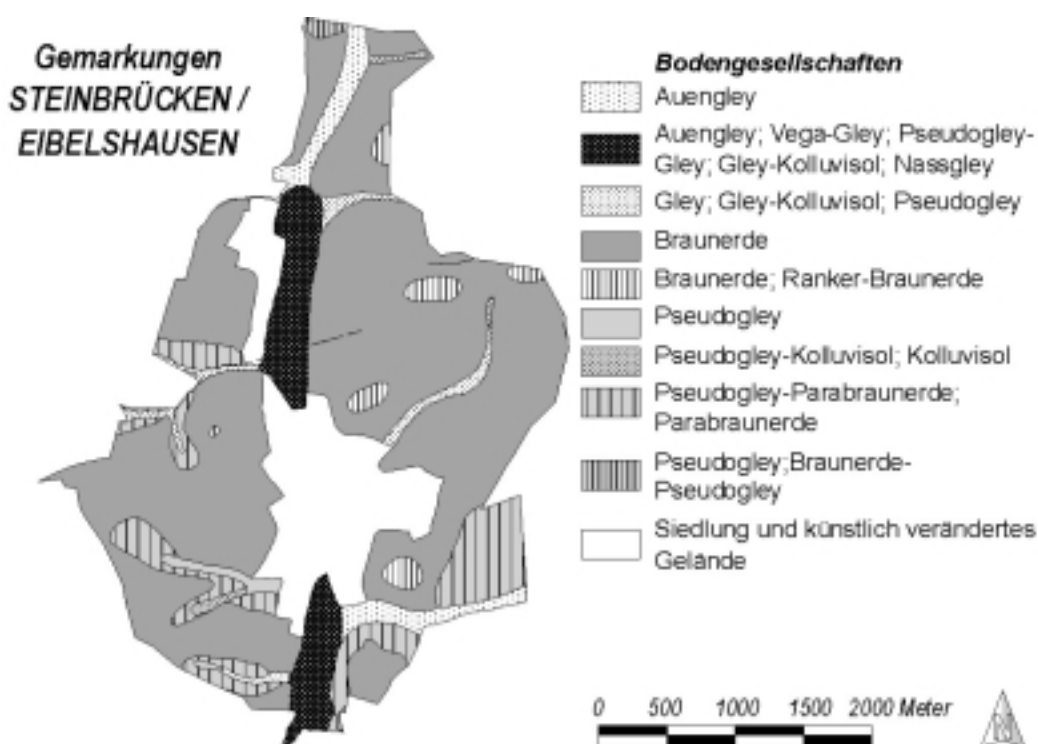


Abb. 2 Bodengesellschaften der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen (Ausschnitt aus der Digitalen Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:50.000 des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie).

In der Gemarkung Erda sind die Böden der Hangbereiche landwirtschaftlich genutzter Flächen meist flach- bis mittelgründige Braunerden. Die Waldgebiete sind durch Pseudogleye und Hang-Gleye geprägt. Die Talbereiche weisen Auengleye und im Hangfußbereich Kolluvien auf (Prothman & Harrach 1971). Diese Bodenverbreitung wird auch in der BÜK 50 annähernd wiedergegeben (Abb. 3). Allerdings bestehen bezüglich der räumlichen und inhaltlichen Differenzierung erhebliche Einschränkungen, so dass nur ein grober Überblick der bodenkundlichen Situation aus dieser Karte extrahiert werden kann.

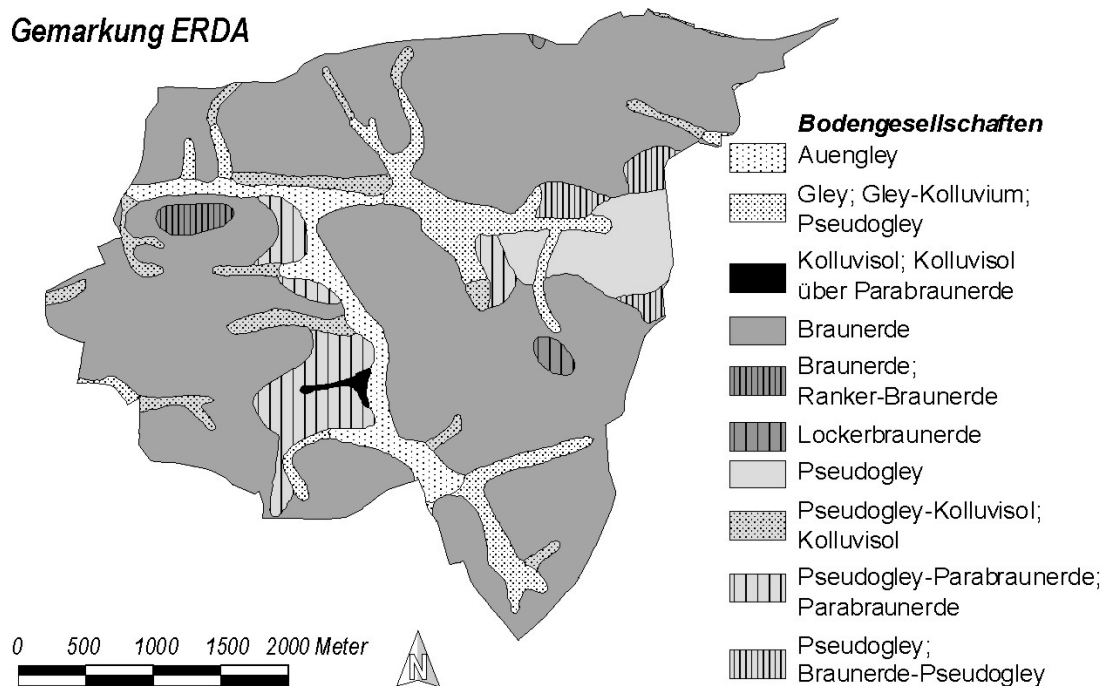
**Gemarkung ERDA**

Abb. 3 Bodengesellschaften der Gemarkung Erda (Ausschnitt aus der Digitalen Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:50.000 des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie).

## 2.4 Landnutzung

Als Folge der Realerbteilung und der vorherrschenden Nebenerwerbslandwirtschaft ist die landwirtschaftliche Nutzfläche der Untersuchungsregion zum Teil äußerst kleinparzelliert. Ackerflächen, Grünland und Brachflächen wechseln räumlich in starkem Maße (Nowak 1988). Mit zunehmender Höhenlage, sinkender Durchschnittstemperatur und zunehmender Humidität vom Süden zum Norden der Untersuchungsregion nimmt die Bedeutung des Ackerbaus zugunsten der Grünlandbewirtschaftung ab. Aufgrund der klimatischen und standörtlichen Ungunst, insbesondere in den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen im nordwestlichen Teil der Untersuchungsregion, sowie besserer Verdienstmöglichkeiten der Bevölkerung außerhalb der Landwirtschaft, werden viele Flächen seit Ende des zweiten Weltkriegs nicht mehr bewirtschaftet. (Pletsch 1991, Nowak 1988).

Etwa die Hälfte der Gemarkungsfläche von Erda wird landwirtschaftlich genutzt (Tab. 1). Das restliche Gemarkungsgebiet umfasst Waldstandorte, Gewässer, Siedlungsbereiche sowie Verkehrs- und sonstige Flächen. In Steinbrücken und Eibelshausen wird lediglich ein Drittel der Gemarkungsfläche landwirtschaftlich genutzt.

Tab. 1 Absoluter und relativer Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche, der Forsten und der sonstigen nicht landwirtschaftlich genutzten Bereiche an der Gesamtfläche der Untersuchungsgebiete Steinbrücken, Eibelshausen und Erda (Quelle: Nutzungskartierung des Teilprojekts B 3.1 im SFB 299, Stand 1997, abgeglichen mit den Flächennutzungsplänen der Gemeinden Hohenahr und Dietzhölztal, Stand 1998).

Nutzungstyp	Eibelshausen / Steinbrücken		Erda	
	absolut [ha]	relativ [%]	absolut [ha]	relativ [%]
landwirtschaftliche Nutzfläche	325,7	35,1	587,3	50,8
Forst	376,0	40,5	451,6	39,1
Siedlung, Verkehr, Gewässer, Sonstiges	226,0	24,4	117,2	10,1
Summen	927,8	100,0	1156,0	100,0

In den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen dominiert die Grünlandnutzung (Tab. 2). Der Ackerbau ist nahezu bedeutungslos. Knapp ein Viertel der landwirtschaftlichen Nutzflächen wird von Brachflächen, Feldgehölzen, Gärten und Streuobstwiesen eingenommen. In Erda überwiegt mit mehr als der Hälfte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Ackerbau, gefolgt von Grünland mit einem etwas geringeren Anteil. Die übrigen Nutzungsformen nehmen nur marginale Flächenanteile in Anspruch.

Tab. 2 Anteile der einzelnen Nutzungsformen an der landwirtschaftliche Nutzfläche der Untersuchungsgebiete Steinbrücken, Eibelshausen und Erda (Quelle: Kartierung des Teilprojekts B 3.1 im SFB 299 (Stand 1997) abgeglichen mit den Flächennutzungsplänen der Gemeinden Hohenahr und Dietzhölztal, Stand 1998).

Nutzungsform	Eibelshausen / Steinbrücken		Erda	
	absolut [ha]	relativ [%]	absolut [ha]	relativ [%]
Acker	9,5	2,9	318,0	54,1
Ackerbrache	3,2	1,0	4,6	0,8
Grünland	243,9	74,9	235,0	40,0
Grünlandbrache	41,3	12,7	7,4	1,3
Gärten	7,2	2,2	10,0	1,7
Streuobstwiese	10,6	3,2	7,8	1,3
Feldgehölz	10,0	3,1	4,5	0,8
Summen	325,7	100,0	587,3	100,0

### 3 Methoden und Methodenentwicklung

#### 3.1 Methodisches Konzept zur Regionalisierung der labilen Bodenkennwerte

Die Regionalisierung der bodenkundlichen Kennwerte  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert,  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalt und mobiler Cadmiumgehalt des Oberbodens wird in diesem Vorhaben mit einem Verfahren durchgeführt, das auf einer systematisch geschichteten Stichprobe basiert (vgl. Bortz 1999, Webster & Oliver 1990, Bahrenberg et al. 1985). Das Verfahren dient zum Aufbau des Beprobungsmessnetzes und zur Erzeugung der Extrapolationsgrundlage (vgl. Schmotz 1996, Kuhnt 1994).

Für die Erstellung einer systematisch geschichteten Stichprobe zur räumlich repräsentativen Erhebung bodenkundlicher Kennwerte ist es erforderlich Standortfaktoren<sup>2</sup> zu ermitteln, welche die räumliche Variabilität und Intensität der untersuchungsrelevanten Bodenkennwerte<sup>3</sup> beeinflussen. Sind diese Indikatoren bekannt, können Karten der Standortfaktoren die Grundlage für die geschichtete Stichprobe bilden. Werden mehrere Standortfaktorkarten<sup>4</sup> mit einem statistisch und bodenkundlich nachweisbaren Erklärungsanteil bezüglich der räumlichen Verteilung der Bodenkennwerte in den Aufbau der geschichteten Stichprobe einbezogen, kann die Qualität der Stichprobe verbessert werden. Zum Beispiel wäre aus bodenkundlicher Sicht die Berücksichtigung einer Karte der Realnutzung und der Exposition zur flächenbezogenen Erhebung der  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte des Oberbodens plausibel, da insbesondere das Ausmaß und die Dauer der Einstrahlung sowie die Art und Intensität der landwirtschaftlichen Nutzung den  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalt von Oberböden beeinflussen kann (z.B. Gisi 1990, Briemle 1988, Estler et al. 1984). Bei der Erstellung einer geschichteten Stichprobe ist jedoch zu beachten, dass die spezifische Repräsentativität der Stichprobe nicht durch die Berücksichtigung möglichst vieler Informationsschichten erhöht wird, sondern durch die Relevanz der einzelnen Informationsebenen (vgl. Bortz 1999).

Werden die Informationsschichten zur Ermittlung der Stichprobe geometrisch und inhaltlich verschnitten, entsteht eine Raumeinheitenkarte, die aus Flächen mit bestimmten Merkmalskombinationen der Informationsebenen besteht.

---

<sup>2</sup> Der Begriff 'Standortfaktor' wird im Folgenden synonym zu den Begriffen 'Faktor', 'Indikator' und 'unabhängige Variable' verwendet.

<sup>3</sup> Der Begriff 'Bodenkennwert' wird in den nachstehenden Ausführungen gleichbedeutend mit den Begriffen 'bodenkundlicher Kennwert', 'labile Bodeneigenschaft', 'Indikandum' und 'abhängige Variable' benutzt.

<sup>4</sup> Der Begriff 'Standortfaktorkarte' wird im Folgenden synonym zu den Begriffen 'Informationsebene', 'Informationsschicht' und 'Kartenschicht' verwendet.

Die Gesamtheit aller Flächen gleicher Merkmalskombination, die in Abhängigkeit von der räumlichen Verteilung der Standortfaktoren sehr uneinheitlich angeordnet sein können, wird als Raumeinheit (*spatial unit*) bezeichnet (vgl. Burrough & McDonnell 1998, Bahrenberg et al. 1985). Innerhalb einer Raumeinheit, die aufgrund der Gleichförmigkeit der Standortfaktoren als quasi-homogenes Bodenareal mit einer eingeschränkten Lateralvariabilität bezeichnet werden kann (Blume 1992), ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die Variabilität der abhängigen Bodeneigenschaften eingeschränkt (Schröder et al. 1994). Aus diesem Grund kann ein räumlich repräsentativ erhobener Wert innerhalb einer Raumeinheit allen Teilflächen dieser Raumeinheit zugeordnet werden, so dass eine flächenhafte Darstellung des Bodenkennwertes möglich ist.

Der Regionalisierungsprozess besteht aus einer größeren Anzahl von Bearbeitungsschritten, die in den nachstehenden Kapiteln 3.2 bis 3.5 detailliert erläutert werden:

- 1 Erzeugung der Extrapolationsgrundlage
  - 1.1 Indikatorenbestimmung
  - 1.2 Ausweisung von Pufferzonen und nicht beprobaren Bereichen
  - 1.3 Erzeugung und Auswahl der Raumeinheiten
- 2 Ermittlung repräsentativer Probenahmestellen
  - 2.1 Bestimmung des Stichprobenumfangs
  - 2.2 Ermittlung des Nachbarschaftsradius
  - 2.3 Berechnung der Repräsentanzindices
- 3 Erhebung der labilen Bodenkennwerte
  - 3.1 Ermittlung des Beprobungsschemas
  - 3.2 Plausibilitätskontrolle im Gelände und Beprobung
  - 3.3 Laboranalyse
- 4 Flächenbezogene Darstellung der bodenkundlichen Kennwerte
  - 4.1 Regionalisierung nicht beprobter Raumeinheiten
  - 4.2 Klassifizierung der Mess- und Interpolationsergebnisse
  - 4.3 Modell- und Ergebnisvalidierung

Die Verschneidung von Indikatoren zu einer Extrapolationsgrundlage (Schritt 1.1 und 1.3) und die Ermittlung repräsentativer Probenahmestellen (Schritt 2.3) basieren auf der 'Regionalen Assoziationsanalyse' (Kuhnt 1994). Für die Regionalisierung nicht beprobter Raumein-



heiten werden geostatistische Verfahren zur Interpolation der fehlenden Werte eingesetzt (Schritt 4.1).

Die methodische Weiterentwicklung der bestehenden Teilverfahren für die Regionalisierung bodenkundlicher Kennwerte betrifft die Ausweisung von Pufferzonen im Übergangsbereich von Standortfaktoren, die sich kontinuierlich ändern (Schritt 1.2), und die Ermittlung des bestmöglichen Nachbarschaftsraumes zur Berechnung der Repräsentanzindices (Schritt 2.1). Des Weiteren werden Verfahren entwickelt und angewandt, um die minimal erforderliche Probenanzahl für die Extrapolation der bodenkundlichen Kennwerte zu berechnen (Schritt 2.2) und flächenrepräsentative Mischproben in den Untersuchungsgebieten zu gewinnen (Schritt 3.1). Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Erarbeitung methodischer Konzepte für die inhaltlich und räumlich valide Darstellung der Regionalisierungsergebnisse. Insbesondere betrifft dieses die optimale Klassifizierung der regionalisierten bodenkundlichen Kennwerte (Schritt 4.2).

### **3.2 Erzeugung der Erhebungs- und Extrapolationsgrundlage**

#### **3.2.1 Indikatorenbestimmung**

Die Ermittlung von Standortfaktoren zur Erklärung der Intensität und räumlichen Verteilung von labilen bodenkundlichen Kennwerten in den Untersuchungsgebieten ist die Grundlage für die räumlich repräsentative Erhebung der Bodeneigenschaften und die Erzeugung der Extrapolationsgrundlage. Aus wissenschaftstheoretischer Sicht ist es zunächst erforderlich, Hypothesen über den Wirkungszusammenhang zwischen Indikator und Indikandum zu formulieren. Die Bestätigung dieser Hypothesen kann auf der Grundlage von Literaturangaben erfolgen, die einen solchen Zusammenhang beschreiben, der auch für das jeweilige Untersuchungsgebiet plausibel ist. Die Übertragung dieser Erkenntnisse auf die Untersuchungsgebiete ist jedoch fehlerhaft, wenn die Relevanz bestimmter Standortfaktoren falsch eingeschätzt wird. Besser ist es - soweit vorhanden - wissenschaftliche Arbeiten mit entsprechendem Datenmaterial für die Erzeugung eines statistisch-analytischen Modells der Wirkungszusammenhänge zu verwenden. Aber auch in diesem Fall muss der Datenanalyse die Formulierung von Hypothesen über die möglichen Indikator-Indikandum-Beziehungen vorausgehen. Die theoretische Annahme, die durch die statistische Datenanalyse beantwortet werden soll, darf sich nicht erst aus dem Datenmaterial ergeben, da ein statistisch signifikanter Zusam-

menhang keine hinreichende Bedingung für das Vorliegen eines kausal bedingten Zusammenhangs bildet (Backhaus et al. 1996).

Da die Untersuchungsgebiete dieser Arbeit mit einem Abstand von etwa 30 km in einer standörtlich heterogenen Landschaft räumlich isoliert voneinander liegen, ist zu erwarten, dass die Intensität der labilen Bodenkennwerte zwischen den Untersuchungsgebieten Erda sowie Steinbrücken und Eibelshausen Unterschiede aufweist, die auf reliefbedingte, klimatische oder anthropogene Einflüsse zurückzuführen sind. Daher werden die vorhandenen Datensätze der Untersuchungsgebiete zunächst mit Methoden der deskriptiven Statistik untersucht. Werden Unterschiede zwischen den Gemarkungen festgestellt, muss das Datenmaterial bezüglich der Indikator-Indikandum-Beziehungen für die einzelnen Untersuchungsgebiete getrennt ausgewertet werden. Zur Ermittlung möglicher Unterschiede und zur Kennzeichnung der Datensätze werden folgende Lage- und Streuungsmaße für die Datensätze ermittelt:

- Spannweite (Wertespanne zwischen dem Minimum und Maximum),
- Interquartilabstand (Werte zwischen dem 75. und 25. Perzentil) und
- Median (50. Perzentil).

Ausreißer, also Fälle mit Werten, die um das eineinhalb- bis dreifache außerhalb des Interquartilabstands liegen, und Extremwerte, das heißt Fälle mit Werten, die um mehr als das dreifache den Interquartilbereich übersteigen, werden für die weiteren statistischen Berechnungen zur Überprüfung der Indikator-Indikandum-Beziehung nicht berücksichtigt. Die Darstellung der Lage- und Streuungsparameter erfolgt in Boxplot-Diagrammen, die in dieser Form auch für die Beschreibung der statistischen Parameter aller anderen metrisch skalierten Werte verwendet werden (Abb. 4).

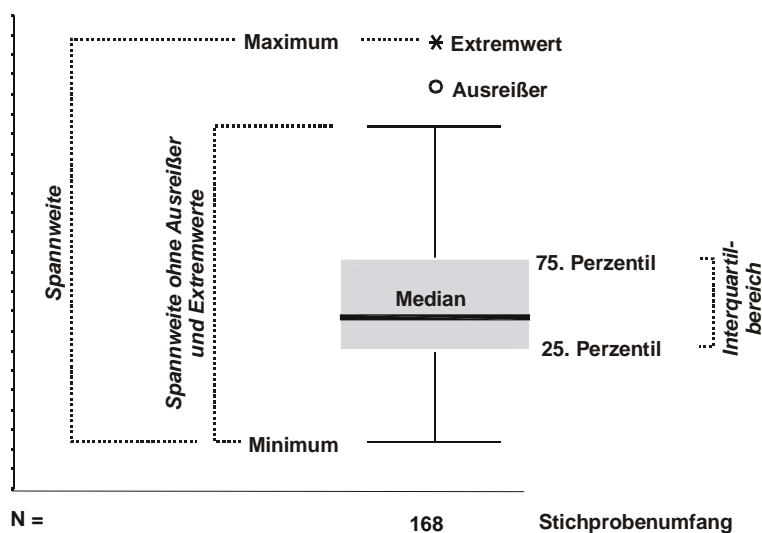


Abb. 4 Legende zu den Boxplot-Darstellungen der Kapitel 4.1.1 und 4.3.1 bis 4.3.3.

Vor der eigentlichen multivariaten Analyse müssen die flächenhaft vorliegenden Indikatoren gegebenenfalls auf Basis der Ergebnisse der deskriptiven statistischen Auswertung klassifiziert, aggregiert oder in ein anderes Skalenniveau übertragen werden. Für die Ermittlung möglicher Zusammenhänge sind multivariate Analysemethoden geeignet, die in dem sogenannten 'Allgemeinen linearen Modell' zusammengefasst werden (z.B. Overall & Spiegel 1969, Cohen 1968). In diesem Modell sind elementarstatistische Verfahren sowie die Regressions-, Korrelations- und Varianzanalyse vereinigt. Für bodenkundliche Fragestellungen über den Zusammenhang von Standortfaktoren und labilen Bodeneigenschaften ist die Varianzanalyse als Teil des Allgemeinen linearen Modells von großer Bedeutung. Dieses Verfahren dient zur Beschreibung des Einflusses einer oder mehrerer metrisch, ordinal oder nominal skalierten unabhängiger Variablen auf eine oder mehrere metrisch skalierte abhängige Variablen. So ist zum Beispiel aus bodenkundlicher Sicht als eine unabhängige Nominal-Variable der jeweilige Nutzungstyp einer Landschaft zu bezeichnen, da er den metrisch skalierten  $C_{\text{org}}$ -Gehalt des Oberbodens als abhängige Variable in seiner Intensität und räumlichen Verteilung maßgeblich beeinflussen kann (Schleuß et al. 1994, Gisi et al. 1990, Zölitz 1983, Gisi & Oertli 1981).

Die erfolgreiche Anwendung der Varianzanalyse stellt an die Struktur der Daten und ihre Auswertung eine Reihe von Anforderungen (z.B. Bortz 1999, Backhaus et al. 1996). Beispielsweise müssen die statistisch zu analysierenden Stichproben normalverteilt sein. Des Weiteren ist es erforderlich, dass die Größe der Stichprobe eine statistisch sinnvolle Auswertung des Datenmaterials zulässt, um die Gefahr der Erzeugung wissenschaftlicher Artefakte zu verringern. Werden diese Bedingungen nicht erfüllt, sind Modifikationen des Analyseverfahrens notwendig oder es muss auf nichtparametrische und verteilungsfreie Verfahren ausgewichen werden, um eine Fehlinterpretation des Ergebnisses zu verhindern. In diesem Vorhaben wird die multifaktorielle Varianzanalyse eingesetzt, da die Wirkung mehrerer ordinal oder nominal skalierten Standortfaktoren auf den  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert, ausgedrückt als metrisch skalierte H-Ionenkonzentration, den  $C_{\text{org}}$ -Gehalt und den EDTA-extrahierbaren Cadmium-Gehalt untersucht werden soll. Für den Test auf Mittelwertunterschiede der Faktorstufen werden empirische F-Werte mit den Werten einer theoretischen F-Verteilung verglichen. Die Signifikanz der empirischen F-Werte wird für eine Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95 % überprüft. Unterschreiten diese Werte die Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %, kann die Nullhypothese, dass keine Mittelwertunterschiede bestehen, verworfen werden. Testverfahren für die Ermittlung möglicher Unterschiede zwischen einzelnen Faktorstufen oder Faktorstufen-

gruppen<sup>5</sup> bezüglich der bodenkundlichen Kennwerte kommen nicht zur Anwendung. Selbst wenn mögliche Kontraste zwischen den Standortfaktorstufen für die Datenbasis zur Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen nachgewiesen werden können, sind diese für die regionalisierten Bodenkennwerte in den Untersuchungsgebieten aufgrund kaum kalkulierbarer Intersubjekteffekte<sup>6</sup> durch nicht erfassbare Einflussgrößen unter Umständen ungültig. Darüber hinaus können einzelne statistisch nachgewiesene Kontraste aus bodenkundlicher, messtechnischer oder verteilungsspezifischer Sicht durchaus als irrelevant gelten (vgl. Kap. 3.5.3) und wären dann für die Regionalisierung der Bodenkennwerte ebenfalls unerheblich.

Zunächst wird der vorhandene Datensatz (vgl. Kap. 4.1.1) auf die Randbedingungen für die Anwendbarkeit des statistischen Analyseverfahrens überprüft:

### *1. Varianzen der Faktorstufen*

Die Varianzen der Faktorstufen sollten homogen sein. Dabei wird unterstellt, dass sich Schwankungen durch den Einfluss nicht erfasster Faktoren in allen Stichproben der Faktorstufen ausgleichen. Mit dem gegenüber der Verletzung der Normalverteilungsvoraussetzung relativ unempfindlichen Levene-Test wird die Varianzenhomogenität bei einem Signifikanzniveau von 95 % für alle Kombinationen der Faktorstufen überprüft.

### *2. Verteilung der abhängigen Variablen*

Die Normalverteilung der abhängigen Variablenwerte in der Gesamtstichprobe ist für die Varianzanalyse von wesentlicher Bedeutung, da die meisten Berechnungen auf der Basis ungewichteter Mittelwertbildungen vorgenommen werden. Zumindest sollten die Daten annähernd symmetrisch verteilt sein. Die Annahme auf Normalverteilung der abhängigen Variable wird mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test (K-S-Test), der für Stichprobenumfänge ab 50 Fällen geeignet ist, bei einem Signifikanzniveau von 95 % überprüft (vgl. Young et al. 1998). Zusätzlich wird die Schiefe der Verteilung als Prüfgröße herangezogen, da der K-S-Test auf Abweichungen von der Normalverteilung vergleichsweise konservativ reagiert. Als Schiefemaß wird die durch die Standardabweichung normierte Differenz zwischen arithmetischem Mittelwert und Median verwendet (Bahrenberg et al. 1985). Übersteigt die Schiefe den Wert von 1, gelten die abhängigen Variablenwerte als nicht normal oder symmetrisch verteilt.

---

<sup>5</sup> Der Begriff 'Faktorstufengruppen' (synonym zu Standortfaktorgruppen) bezeichnet die Kombinationen der Merkmalsausprägung unterschiedlicher Standortfaktoren.

<sup>6</sup> Intersubjekteffekte bezeichnen die gemeinsame Wirkung mehrerer Faktoren auf einen bodenkundlichen Kennwert.

### 3. Stichprobengröße und Anzahl der Faktorstufen

Jede Faktorstufe sollte die gleiche Anzahl Fälle besitzen. Trifft diese Bedingung nicht zu, müssen die einzelnen Mittelwerte der Faktorstufen mit der Häufigkeit gewichtet werden (Diehl 1983). Sind die Teilstichproben der Faktorstufen insgesamt zu klein, werden Standortfaktorstufen zusammengefasst, bei denen mit einem gleichartigen oder nur wenig differierenden Einfluss auf die Untersuchungsvariable aus bodenkundlicher Sicht zu rechnen ist und deren Mittelwerte sich nicht signifikant unterscheiden.

### 4. Einfluss der Faktoren auf die abhängige Variable

Die Faktoren müssen sich untereinander bezüglich ihres Einflusses auf den Bodenkennwert eindeutig unterscheiden. Wenn zwei oder mehrere Faktoren den gleichen Einfluss auf das Indikandum ausüben, ist die Variation der abhängigen Variable nicht mehr eindeutig auf einen Faktor zurückzuführen. Dies gilt nicht für die additive Wirkung unterschiedlicher Faktoren auf die Untersuchungsvariable.

Sind die abhängigen Variablenwerte nicht annähernd normal oder symmetrisch verteilt oder liegt keine Varianzenhomogenität vor, wird anstelle der Varianzanalyse ein nichtparametrisches Testverfahren eingesetzt. Die Ermittlung von Mittelwertunterschieden zwischen Indikanden, die einzelnen Faktorengruppen zugeordnet werden, erfolgt in diesem Fall auf dem Rangskalaniveau mit dem Kruskal-Wallis-Testverfahren (K-W-Test) (vgl. Bortz & Lienert 1998).

Wurden im Verlauf der varianzanalytischen Untersuchungen Faktorstufen zusammengefasst, um die Stichprobengröße der Stufen zu vergrößern, kann für die Erstellung der Extrapolationsgrundlage diese Zusammenfassung aufgehoben werden. Die Konsequenz wären lediglich erhöhte Stichprobenumfänge im Rahmen der Beprobung, da sich die Anzahl der Raumeinheiten durch eine feinere Klassifizierung der Faktoren erhöhen würde (vgl. Kap. 3.2.4). Auf die Validität des Regionalisierungsergebnisses hätte diese Vorgehensweise keinen Einfluss, da die endgültige flächenhafte Darstellung der Bodenkennwerte das Ergebnis der optimierten Klassifizierung der Daten ist (vgl. Kap. 3.5.3 u. 4.4.2). Möglicherweise wird die Legitimität der Differenzierung des zuvor für die statistischen Voruntersuchungen aggregierten Faktors durch die Regionalisierungs- und Validierungsergebnisse für die Untersuchungsgebiete sogar bestätigt.

Sind geeignete Indikatoren ermittelt worden, wird im nächsten Schritt überprüft, ob diese Standortfaktoren als flächenhafte digitale Kartengrundlage in hinreichender Auflösung für

das Untersuchungsgebiet vorliegen oder ob sie mit einem vertretbaren Aufwand digitalisiert werden können. Kann eine optimale Güte und Indikatorenkonstellation nicht erreicht werden, weil einzelne relevante Standortfaktoren als flächenhafte Datengrundlage nicht zur Verfügung stehen oder erzeugt werden können, ist mit einer Verminderung der Regionalisierungsqualität bezüglich der Lagegenauigkeit und Auflösung der Flächeninformation zu rechnen. Wird eine ungeeignete Extrapolationsgrundlage auf der Basis weniger relevanter oder ungenügend trennscharfer Indikatoren verwendet, ist eine mögliche Fehlinterpretation oder Überbewertung der Regionalisierungsergebnisse dennoch ausgeschlossen, da die Validität der Flächenaussage bei der Anwendung des Regionalisierungsverfahrens dieser Arbeit unabhängig von dem Aggregierungsniveau überprüfbar ist. Allerdings wäre in diesem Fall keine räumlich deutlich differenzierbare Aussage über die Bodenkennwerte möglich.

### 3.2.2 Rasterweite

Bevor die Standortfaktorenkarten geometrisch und inhaltlich zu einer Raumeinheitenkarte verschnitten werden, ist die optimale Rasterweite dieser Grundlagenkarten zu ermitteln. Die Rasterweite orientiert sich im Wesentlichen an der Auflösung und inhaltlichen Dichte der einzelnen zu kombinierenden Informationsebenen sowie dem gewünschten Zielmaßstab und Detaillierungsgrad der regionalisierten Darstellung. Wird die Rasterweite zu groß gewählt, bewirkt dies eine Aggregation der Flächeninformation. Eine zu feine Rasterung der Datengrundlage im Vergleich zur tatsächlichen Aussageschärfe führt zu einer Scheingenauigkeit bezüglich der Lagetreue von Merkmalsausprägungen einzelner Indikatoren (vgl. Sbresny 1995).

Anhand derjenigen Datengrundlage, die den höchsten Detaillierungsgrad und die genaueste räumliche Aussageschärfe aufweist, müssen die räumlichen Abweichungen, die durch die Aufrasterung der Datensätze entstehen, überprüft werden. Übersteigen diese Abweichungen ein inhaltlich begründbares Maß, das z.B. durch den Zielmaßstab der Untersuchungen oder die erforderliche Lagegenauigkeit der Flächen vorgegeben wird, ist die Verwendbarkeit dieser Datensätze in Frage zu stellen. Sollen Datensätze mit hohen räumlichen Abweichungen dennoch verwendet werden, muss eine stärkere Aggregation der regionalisierten Flächeninformation auf Basis der Validierungsergebnisse (vgl. Kap. 3.5.4) vorgenommen werden, so dass die Trennschärfe sowie die inhaltliche und räumliche Auflösung der regionalisierten Informationen abnimmt, die Validität der Regionalisierungsergebnisse jedoch zunimmt.

### 3.2.3 Ausweisung von Pufferzonen und nicht beprobaren Bereichen

Mit der Ausweisung von Pufferzonen und nicht beprobaren Bereichen sollen Gebiete innerhalb der Raumeinheitenkarte gekennzeichnet werden, in denen inhaltliche und topologisch-geometrische Ungenauigkeiten zu erwarten sind, die eine räumlich repräsentative Beprobung verhindern oder in denen eine Beprobung aufgrund der Geländesituation nicht möglich ist. Im Folgenden werden Bereiche beschrieben, die von der Beprobung ausgeschlossen werden sollen, und Situationen dargestellt, welche die Ausweisung von Pufferzonen erfordern, um Fehlbeprobungen zu vermeiden:

#### 1. *Nicht landwirtschaftlich genutzte Bereiche*

Areale, die nicht landwirtschaftlich genutzt werden, wie zum Beispiel Verkehrswege, Gewässer und Siedlungsflächen, sind von der Beprobung ausgeschlossen. Im Randbereich dieser linien- oder flächenhaften Raumelemente ist darüber hinaus mit Störungen der Bodenverhältnisse zu rechnen. Entlang der Verkehrswege werden in der Regel Gräben ausgehoben, deren Aushub auf die unmittelbar angrenzenden Bereiche verteilt wird. Gewässer sind häufig künstlich verändert, so dass eine Veränderung der Bodenbedecke in den Randbereichen zu erwarten ist. Meistens grenzen Siedlungsflächen nicht unmittelbar an landwirtschaftliche Nutzflächen. Daher ist im Übergangsbereich eine nicht kalkulierbare Beeinflussung der Bodeneigenschaften zu erwarten, so dass eine Beprobung nicht im direkten Kontaktbereich dieser Raumelemente zur landwirtschaftlichen Nutzfläche erfolgen darf.

#### 2. *Kontinuierliche und quasi-diskrete Standortfaktorverteilung*

Boden- und Reliefeigenschaften sind in der Landschaft im Allgemeinen nicht scharf voneinander abgegrenzt. Vielmehr sind Übergangsbereiche vorhanden, in denen mit einer allmählichen Veränderung der Standortfaktoren zu rechnen ist. Da die zu regionalisierenden bodenkundlichen Kennwerte das Resultat der Intensität und Faktorenkonstellation der Standortfaktoren darstellen, ist eine graduelle Veränderung der Kennwerte in diesen Übergangsbereichen wahrscheinlich. Diese Bereiche sind für die Erhebung repräsentativer Bodenkennwerte ungeeignet und müssen von der Beprobung ausgeschlossen werden, da eine eindeutige räumliche Zuordnung der Merkmalsausprägung von Standortfaktoren in diesem Bereich nicht möglich ist. Die Übergangszonen von diskret dargestellten Raumelementen, die in der Realität einen kontinuierlichen Charakter besitzen, können durch Fehlerbänder ( $\epsilon$ -Bänder) dargestellt und mathematisch

beschrieben werden (vgl. Blakemore 1984 und Abb. 5). Eine inhaltliche und räumliche Beschreibung der Übergänge labiler Bodenkennwerte innerhalb des  $\varepsilon$ -Bandes ist nur möglich, wenn die Veränderung der Standortfaktoren und der bodenkundlichen Kennwerte in allen möglichen Übergangsbereichen kontinuierlicher Indikatoren untersucht wird. Da im Vordergrund der durchgeführten Untersuchungen die Flächenaussage über bodenkundliche Kennwerte und nicht deren kleinräumige Variabilität im Übergangsbereich der Raumelemente steht, wird diese Fehlerkomponente nicht erfasst. Der Übergang von einer Raumeinheit zu einer anderen ist also ein Bereich, der mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit sowohl Merkmale der einen als auch der anderen Raumeinheit enthält. In Abbildung 5 ist ein stetiger Übergangsbereich dargestellt. Vorstellbar sind aber auch völlig andere Übergangssituationen.

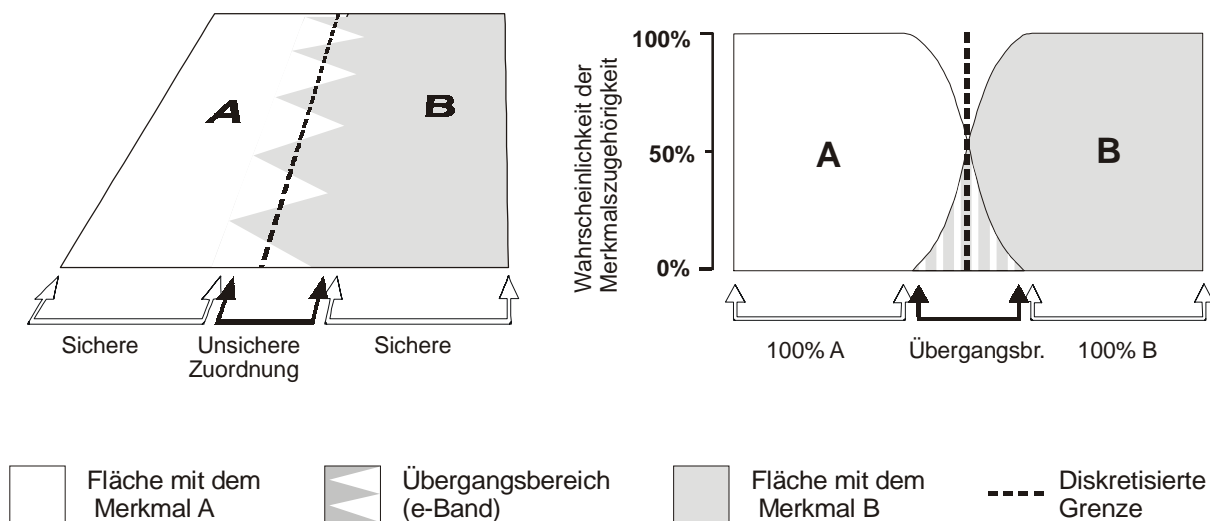


Abb. 5 Veränderung kontinuierlicher Standortmerkmale im Übergangsbereich diskretisierter Raumelemente (Quelle: Maffini et al. 1989, modifiziert).

### 3. Topologisch-geometrische Ungenauigkeiten

Die Konvertierung von Vektor- in Rasterdaten führt in den Grenzbereichen der Raumeinheiten zu einer Reihe von Fehlern. Beispielsweise sind je nach gewählter Rasterweite für langgestreckte, schmale Flächen keine Probenahmestellen ausweisbar, da sich ihre Struktur nach der Aufrasterung in einer Aneinanderreihung einzelner Rasterzellen auflöst. Ein weiteres Problem besteht in der Umwandlung gleichmäßiger Grenzverläufe von Polygonzügen in Rasterelemente. Es bilden sich rechtwinklig gezackte Grenzen, in deren Bereich eine eindeutige Zuweisung der Rasterpunktinformation zu der realen



Faktorenkonstellation unsicher ist. Diese Areale müssen daher von der Beprobung ausgeschlossen werden.

### 3.2.4 Erzeugung und Auswahl der Raumeinheiten

Die Raumeinheitenkarte enthält Flächen mit bestimmten Merkmalskombinationen, wobei die Merkmale einzelne Ausprägungen der Standortfaktoren darstellen. Flächen gleicher Merkmalskombination können, in Abhängigkeit von der räumlichen Verteilung der Standortfaktoren, in unterschiedlicher Größe, Lage und Anzahl auf dem Kartenblatt angeordnet sein. Bestimmte Raumeinheiten beanspruchen einen großen Teil der Fläche, andere sind auf einen kleinen Flächenanteil der Raumeinheitenkarte beschränkt. Die Beprobung aller vorkommenden Raumeinheiten ist ineffizient, wenn die Hinzunahme kleinflächiger und daher für die Flächenaussage weniger relevanter Raumeinheiten zu einem extremen Anstieg der Probenahmestandorte führt, so dass das Verhältnis zwischen dem Gewinn an flächenbezogenen Rauminformationen und dem Aufwand für die Erhebung der Bodenkennwerte ungünstig wird (vgl. Kuhnt 1994, Schmotz 1996, Fränzle et al. 1986). Zudem können solche kleinflächigen Raumeinheiten durchaus Artefakte darstellen, die durch die Rasterung von Vektorkarten und die anschließende geometrische Verschneidung unterschiedlicher Informationsebenen entstehen können.

Um zu verdeutlichen, welchen Einfluss die Berücksichtigung kleinflächiger Raumeinheiten auf den Untersuchungsaufwand haben kann, werden in dem folgenden Beispiel (Abb. 6) die Flächenanteile von Raumeinheiten an der zu untersuchenden Gesamtfläche nach abnehmender Größe sortiert und in Beziehung zur Raumeinheitenanzahl gesetzt. Dem Summenpolygon liegt die flächenbezogene Auswertung der Raumeinheitenkarte der Gemarkung Erda für die landwirtschaftlich genutzte Fläche zugrunde. Insgesamt werden durch die Verschneidung der Standortfaktorenkarten der Gemarkung Erda 120 Raumeinheiten erzeugt. Um 96 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche des Untersuchungsgebietes zu erfassen, reicht es aus, die 43 größten Raumeinheiten als Extrapolationsgrundlage zu berücksichtigen (gestrichelte Linie in der Grafik). 77 Raumeinheiten repräsentieren demnach lediglich 4 % der Gesamtfläche. Entsprechend gering ist der zusätzliche Informationsgewinn für die Flächenaussage über das Untersuchungsgebiet durch die Einbeziehung dieser Raumeinheiten. Zugunsten geringer Probenanzahlen (vgl. Kap. 3.3.3) und unter Berücksichtigung der Prämisse, dass eine Flächenaussage über Bodenkennwerte und nicht die Erfassung ihrer kleinräumigen Variabilität das

Ziel dieses Vorhabens ist, ist es also sinnvoll, auf die Beprobung derjenigen Raumeinheiten, die nur einen sehr geringen Flächenanteil an der Untersuchungsfläche besitzen, zu verzichten.

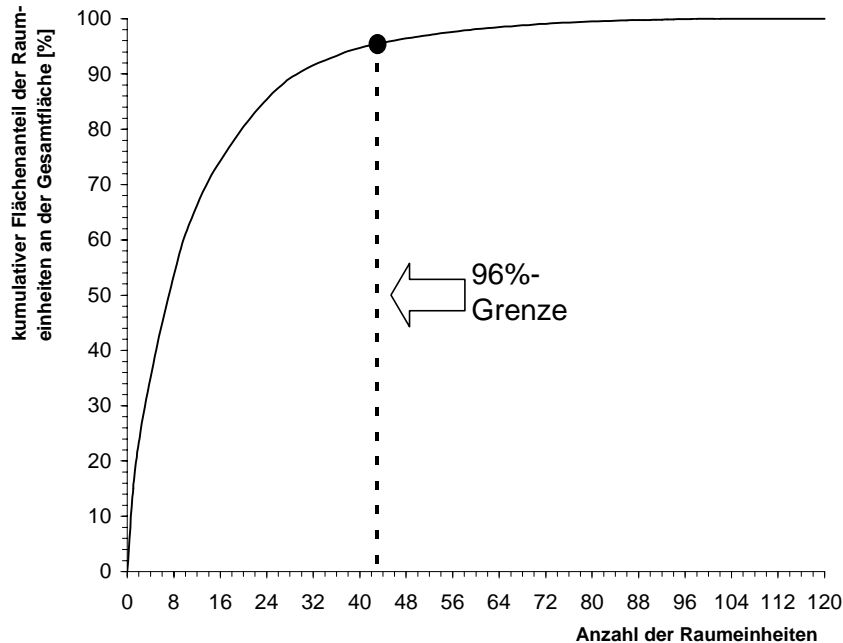


Abb. 6 Die Beziehung des kumulativen Flächenanteils der Raumeinheiten (nach abnehmender Größe sortiert) zur Anzahl der Raumeinheiten (Datengrundlage: Raumeinheitenkarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Erda, Stand 1998).

### 3.3 Ermittlung repräsentativer Probenahmestellen

Die Ermittlung von Probenahmestellen, die bezüglich ihrer Lage im Untersuchungsgebiet für die Erhebung der labilen bodenkundlichen Kennwerte als repräsentativ anzusehen sind, wird auf der Grundlage der 'Regionalen Assoziationsanalyse' (vgl. Schmotz 1996, Kuhnt 1994) vorgenommen. Mit diesem Verfahren werden die Vergesellschaftungsmuster von Raumeinheiten auf der Basis nachbarschaftsanalytischer Berechnungen bestimmt (vgl. Fränzle 1978, Renk 1977), um auf diese Weise räumlich repräsentative Probenahmestellen zu ermitteln (vgl. Kuhnt 1994). Die Berechnungen zur Ermittlung der Vergesellschaftungsstrukturen der Raumeinheiten und der Lage repräsentativer Probenahmestellen erfolgten mit einer speziellen Software, dem Programmpaket STABO, das von Recher & Schmotz (1993) am Geographischen Institut der Universität Kiel entwickelt wurde.

Zur Bestimmung der räumlichen Assoziationsmuster wird für die Rasterpunkte jeder Raumeinheit, die in viele Einzelflächen aufgesplittert sein kann, der Grad der positiven und negativen räumlichen Autokorrelationen bestimmt. Wie in Abbildung 7 für einen Ausschnitt einer fiktiven Raumeinheitenkarte schematisch dargestellt ist, wird die Art und Intensität der räumlichen Korrelationen von der Form und Anordnung der Raumeinheiten-Einzelflächen beeinflusst.

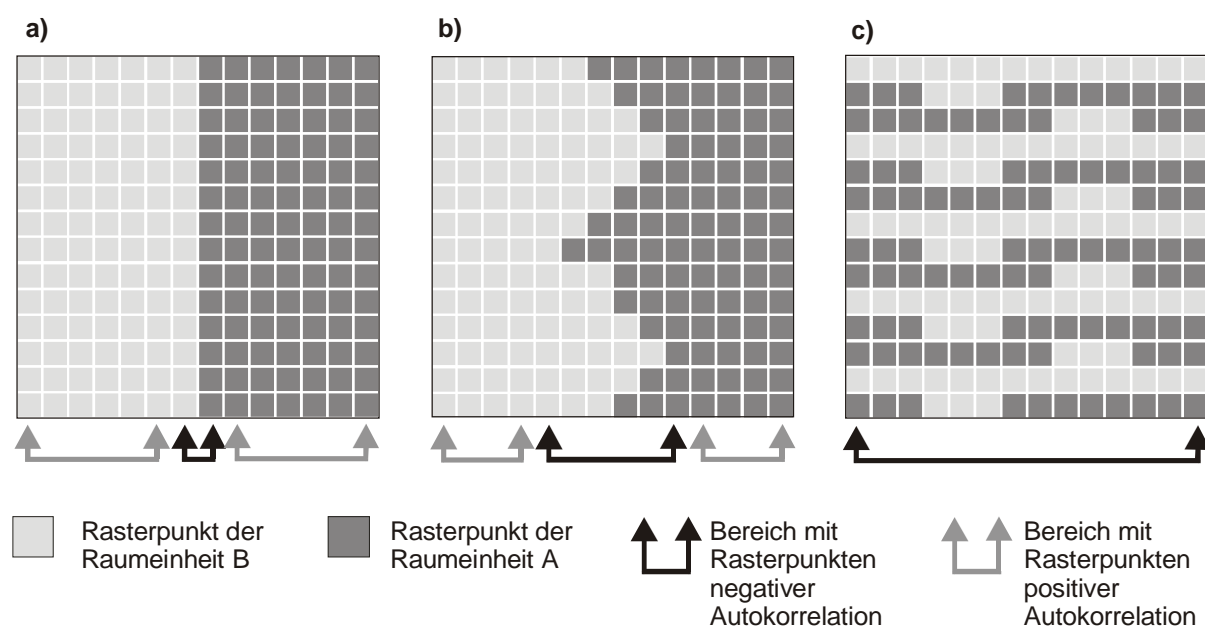


Abb. 7 Räumliche Autokorrelation als Funktion der Anordnung und Form von Raumeinheitenflächen (Quelle: Kuhnt 1994, modifiziert).

Fall a) beschreibt die Situation, dass innerhalb des dargestellten Ausschnitts die Einzelflächen von zwei Raumeinheiten parallel aneinandergrenzen und keine weiteren Einzelflächen dieser oder anderer Raumeinheiten in dem definierten Kartenbereich auftreten. In diesem Fall ist die Zone negativer Autokorrelation auf den direkten Kontaktbereich der Flächen begrenzt (schwarzer Pfeil), da in diesem Bereich Pixel unterschiedlicher Merkmalskombination aneinandergrenzen. Die Rasterpunkte der übrigen Bereiche (grauer Pfeil) sind positiv autokorreliert, da Pixel gleicher Merkmalskombination direkt benachbart sind. In Beispiel b) durchdringen sich zwei Flächen mit einer unterschiedlichen Merkmalskombination, da der Kontaktbereich unregelmäßig geformt ist. Daher nimmt die Anzahl von Pixeln zu, die einen Fremdnachbarn aufweisen, so dass sich der Bereich positiver Autokorrelation im Vergleich zu Fall a) - trotz gleicher Flächenanteile der Merkmalskombinationen - verringert. Fall c) zeigt die Situation einer hohen räumlichen Zersplitterung der Einzelflächen von Raumein-

heiten. Der Anteil positiver Autokorrelation wird in diesem Beispiel fast vollständig zurückgedrängt.

Aus diesen Erläuterungen lässt sich für die Vergesellschaftung von Raummustern die Schlussfolgerung ziehen, dass Raumeinheiten mit einem hohen Anteil positiver Autokorrelationen wenige zusammenhängende und vergleichsweise große Einzelflächen repräsentieren. Ist der Anteil positiver Autokorrelation jedoch gering, da die Flächen der Raumeinheit häufig von Flächen mit anderen Merkmalskombinationen begrenzt werden, weist dies auf eine starke räumliche Zersplitterung der betreffenden Raumeinheit in kleine Einzelflächen hin.

Ist das Beziehungsmuster der Raumeinheiten entschlüsselt, wird für jeden Rasterpunkt einer Raumeinheit der Karte ein Index (Repräsentanzindex) berechnet, der den Grad der räumlichen Repräsentanz dieses Punktes im Verhältnis zu den übrigen Punkten der Raumeinheit beschreibt. Rasterpunkte mit einem hohen Indexwert bezeichnen potentiell repräsentative Probenahmestellen, da ihre Lage die räumliche Anordnung und Veränderung der Standortfaktoren einbezieht, welche die zu erhebenden Bodenkennwerte in ihrer Intensität und räumlichen Verteilung beeinflussen (vgl. Kuhnt 1989). Durch die Berücksichtigung der bodenkundlich relevanten Raumcharakteristika des Untersuchungsgebiets und ihrer räumlichen Assoziationsmuster werden auf diese Weise Bodenkennwerte mit hoher Wahrscheinlichkeit an solchen Standorten erhoben, die eine Extrapolation der gemessenen Werte auf größere, bezüglich der relevanten Standorteigenschaften einheitliche Areale (Raumeinheiten) ermöglichen.

### **3.3.1 Prinzip der nachbarschaftsanalytischen Berechnungen und Ermittlung des Nachbarschaftsradius**

Die nachbarschaftsanalytischen Berechnungen ermöglichen die Entschlüsselung der Vergesellschaftungsstrukturen von Raumeinheiten. Sie sind die Grundlage für die Ermittlung räumlich repräsentativer Probenahmestellen innerhalb einer Raumeinheitenkarte. Die Berechnungen erfolgen in einem sogenannten Nachbarschaftsraum, der in seiner Ausdehnung durch den Nachbarschaftsradius (*range*) festgelegt wird (Kuhnt 1994). Dieser Nachbarschaftsraum kann als Quadrat oder Kreis definiert werden. Ein Kreis ist einem Quadrat vorzuziehen, da innerhalb des kreisförmigen Nachbarschaftsraums in allen Richtungen die gleiche Anzahl möglicher Nachbarpixel berücksichtigt werden, so dass Verzerrungen der Berechnungsergebnisse vermieden werden. Für die nachbarschaftsanalytischen Berechnungen

innerhalb der Raumeinheitenkarte wird der Nachbarschaftsraum pixelweise über die digitale Rasterkarte bewegt (Abb. 8). Dieses Verfahren wird als *moving-window*-Technik bezeichnet. Es wird insbesondere für die Filterung, Neuberechnung und Bearbeitung digitaler Bilder eingesetzt.

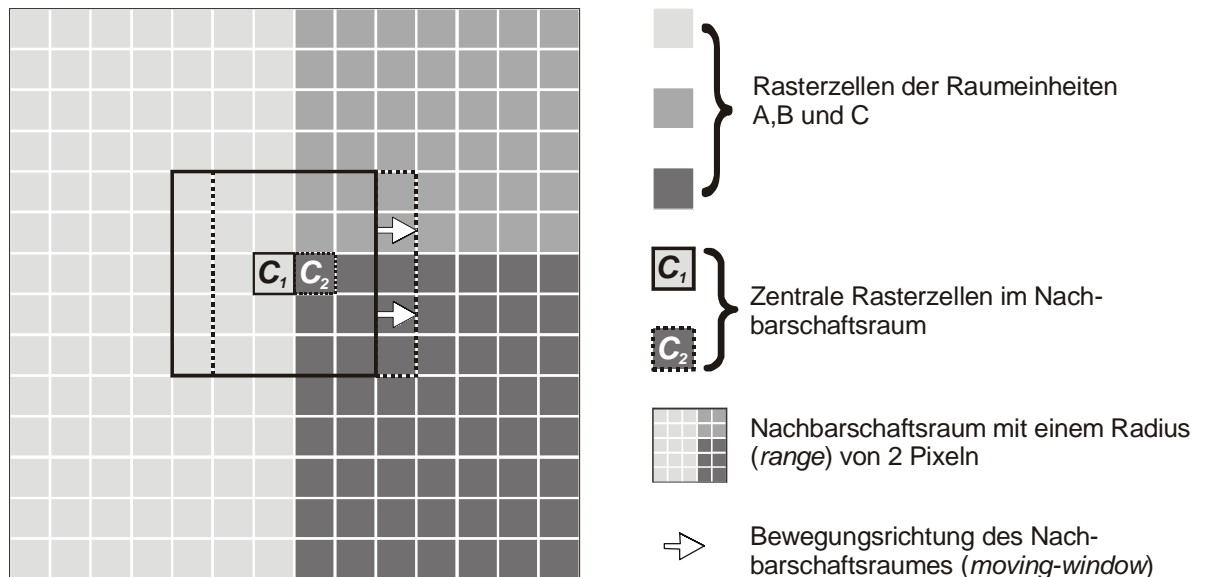


Abb. 8 Prinzip der *moving-window*-Technik zur Berechnung der Nachbarschaftsstrukturen von Rasterkarten.

Für den zentralen Rasterpunkt innerhalb dieses Nachbarschaftsraumes wird die Vergesellschaftung mit den Nachbarpixeln berechnet, die den Zentralpixel umgeben. Dabei wird zwischen der Nachbarschaft von Pixeln gleicher (positive Autokorrelation) und ungleicher (negative Autokorrelation) Merkmalskombination unterschieden.

Die Größe des Nachbarschaftsraumes wird durch die Struktur der Raumeinheiten bestimmt. Der Radius sollte so gewählt werden, dass für Berechnungen von Pixeln, die sich in den inneren Bereichen größerer Einzelflächen von Raumeinheiten befinden, Nachbarpixel angrenzender Raumeinheiten berücksichtigt werden. So ist gewährleistet, dass Probenahmestellen ausgewiesen werden, die sowohl bezüglich der Raumeinheit, in der sie sich befinden, als auch im Hinblick auf alle möglichen Fremdnachbarn dieser Raumeinheit repräsentativ sind (Schmotz 1996).

Es ist nachweisbar, dass bis zu einem gewissen Schwellenwert eine Vergrößerung des *range* nur zu einer geringfügigen Lageveränderung der repräsentativsten Pixel führt. Der Schwellenwert wird dann erreicht, wenn der Nachbarschaftsradius den halben Durchmesser größerer Einzelflächen von Raumeinheiten erreicht. Dieser Radius ist für die nachbarschaftsanalyti-

schen Berechnungen als optimal anzusehen, da Fremdnachbarn in allen Raumeinheiten ausreichend berücksichtigt werden. Der Schwellenwert kann über die Berechnung der Lagekorrelation der räumlich repräsentativen Pixel für verschiedene Nachbarschaftsradien ermittelt werden. Dazu werden die Korrelationskoeffizienten von jeweils zwei aufeinanderfolgenden Nachbarschaftsradien für einen größeren *range*-Bereich berechnet und in einem Koordinatensystem dargestellt (Abb. 9). Werden die Punkte miteinander verbunden, erscheint der Schwellenwert als Abflachung des Linienzugs nach einer raschen Zunahme der Korrelationskoeffizienten. Eine weitere Zunahme der Lagekorrelation wird erst bei einer deutlichen Vergrößerung des Nachbarschaftsradius erreicht. Damit ist eine stärkere Berücksichtigung von Fremdnachbarn verbunden, die zu einer Verlagerung räumlich repräsentativer Punkte an die Peripherie der Raumeinheiten führt. In diesen Bereichen ist jedoch damit zu rechnen, dass schwer definierbare Randeffekte zu einer Beeinträchtigung der Erhebungsergebnisse labiler Bodenkennwerte führen können.

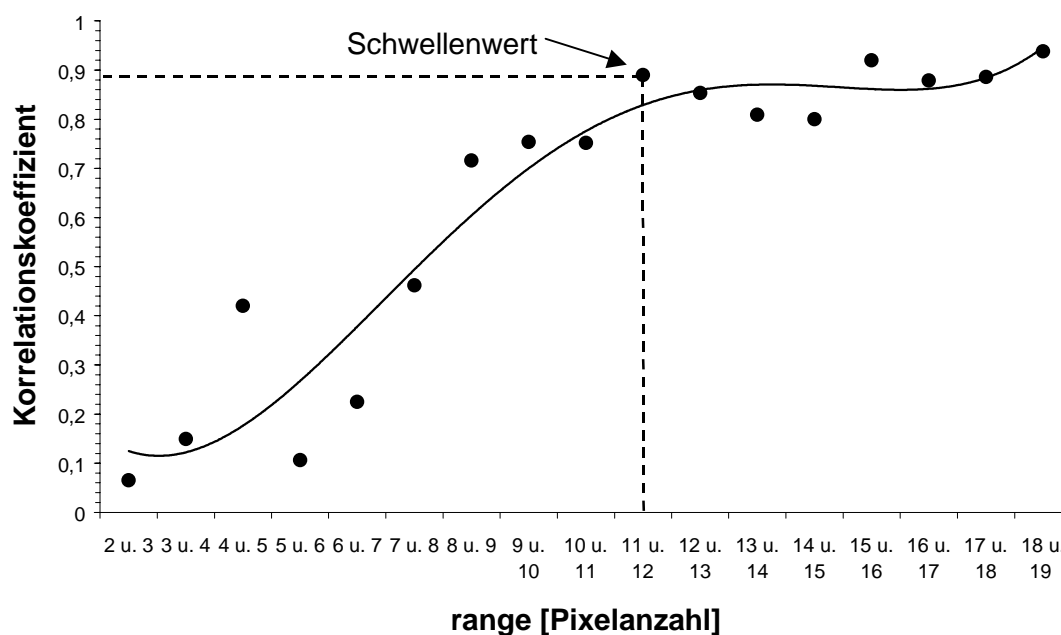


Abb. 9 Ermittlung der Größe des Nachbarschaftsraumes aus der Lagekorrelation von Repräsentanzindizes.

### 3.3.2 Berechnung der Repräsentanzindizes

Die Berechnung des Grades der negativen und positiven Autokorrelation für jedes Raster-element innerhalb der Raumeinheiten bildet die Basis zur Ermittlung der Repräsentanzindizes (*RI*). Unter Berücksichtigung der Vergesellschaftungsstruktur aller Rasterelemente innerhalb

einer Informationsschicht der Raumeinheitenkarte beschreiben diese Indices die Repräsentativität eines Rasterpunktes. Hohe Indices kennzeichnen räumlich repräsentative Probenahmestellen, da bodenkundlich relevante Raumstrukturen an diesen Stellen bestmöglich repräsentiert werden. Durch die Kombination der Repräsentanzindices mehrerer Informationsschichten an der gleichen Position der Raumeinheitenkarte erhält man als Maßzahl den Multidimensionalen Repräsentanzindex (*MNR*).

Kern des Verfahrens ist die Gewichtung der Pixel innerhalb des Nachbarschaftsraumes mit der reziproken quadrierten Euklidischen Distanz der relativen x- und y-Koordinaten. Das Ergebnis ist ein Nachbarschaftsindex (*N*) für jeden benachbarten Rasterpunkt:

$$N_{\Delta x \Delta y} = \frac{1}{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (1)$$

mit:  $N_{\Delta x \Delta y}$  = Nachbarschaftsindex  
 $\Delta x^2$  und  $\Delta y^2$  = quadrierte Differenzen der relativen x- und y-Koordinaten zweier Rasterelemente ausgehend vom Zentralpixel innerhalb des Nachbarschaftsraums

Das folgende Beispiel verdeutlicht die Anwendung dieser Gleichung für einen Nachbarschaftsraum mit 5\*5 Rasterelementen. Ausgehend von einem Zentralpixel ( $C_1$ ) sind die relativen Koordinaten der Nachbarpixel in der Matrix angegeben (Abb. 10).

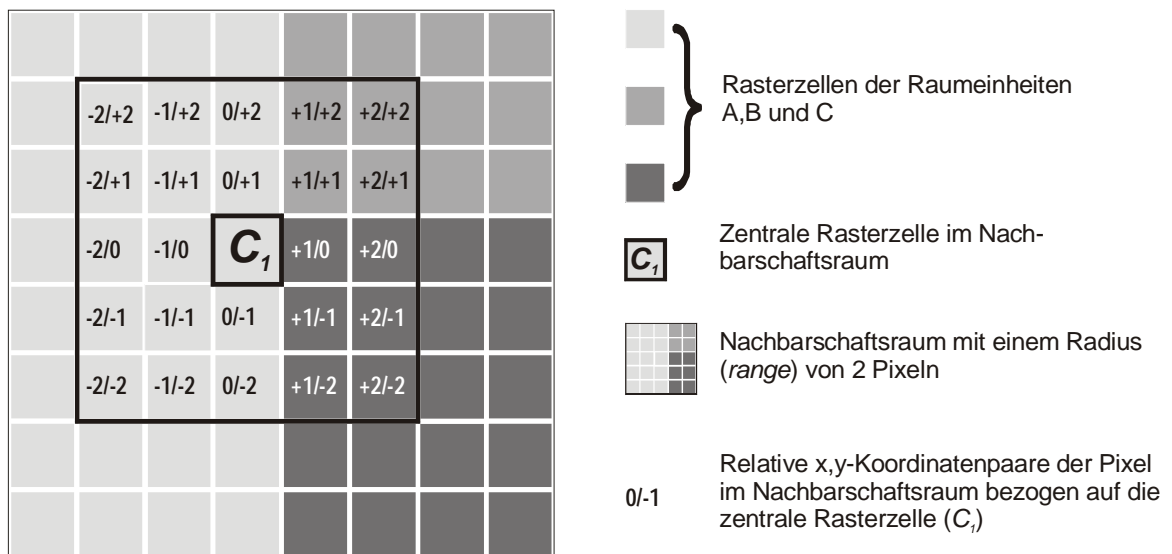


Abb. 10 Relative Koordinatenpaare einer 5\*5 Pixel-Matrix mit dem Ursprung ( $C_1$ ) im Zentrum des Nachbarschaftsraums.

Die Berechnung der reziproken quadrierten Euklidischen Distanz für die relativen Koordinatenpaare aller Rasterzellen innerhalb des Nachbarschaftsraums führt zu dem in Abbildung 11 dargestellten Ergebnis. Mit zunehmender Entfernung von der zentralen Rasterzelle verringert sich das Gewicht der Nachbarpixel exponentiell.

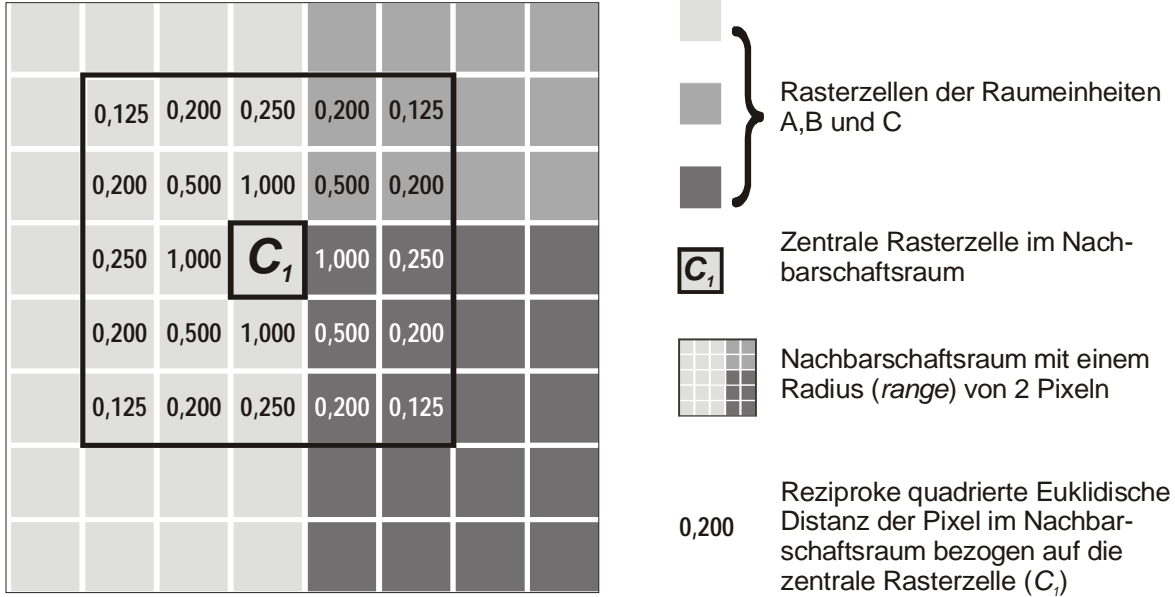


Abb. 11 Reziproke quadrierte Euklidische Distanzen für die Koordinatenpaare einer 5\*5 Pixel-Matrix mit dem Ursprung ( $C_1$ ) im Zentrum des Nachbarschaftsraumes.

Im nächsten Schritt werden für die in Abbildung 11 dargestellten Raumeinheiten A, B und C alle Nachbarschaftsindizes derjenigen Rasterzellen aufsummiert, die mit dem Zentralpixel  $C_1$  der Raumeinheit A innerhalb des Nachbarschaftsraumes vergesellschaftet sind. Diese Summen werden als Realnachbarschaftsvektor ( $R$ ) einer Raumeinheit ( $RE$ ) innerhalb des Nachbarschaftsraumes ( $NR$ ) bezeichnet:

$$R_{(x,y) \in RE_i} = \sum_{i=1}^n N_{\Delta x \Delta y} \quad (2)$$

mit:  $R_{(x,y) \in RE_i}$  = Realnachbarschaftsvektor  
 $N_{\Delta x \Delta y}$  = Nachbarschaftsindex  
 $i$  = Index der Raumeinheit

Anschließend werden die Realnachbarschaftsvektoren der Rasterpunkte mit der Summe aller Realnachbarschaftsvektoren der Raumeinheit normiert, so dass die Vektoren der einzelnen Pixel einer Raumeinheit miteinander vergleichbar sind:



$$RN_{(x,y) \in RE_i} = \frac{R_{(x,y) \in RE_i}}{\sum_{i=1}^n R_{(x,y) \in RE_i}} \quad (3)$$

mit:  $RN_{(x,y) \in RE_i}$  = Normierter Realnachbarschaftsvektor  
 $R_{(x,y) \in RE_i}$  = Realnachbarschaftsvektor  
 $i$  = Index der Raumeinheit

Für die zentrale Rasterzelle  $C_1$  (Abb. 11) führt die Berechnung der normierten Realnachbarschaftsvektoren ( $RN$ ) im Nachbarschaftsraum zu folgendem Ergebnis (Tab. 3):

Tab. 3 Realnachbarschaftsvektor und normierter Realnachbarschaftsvektor für den Zentralpixel innerhalb der in Abbildung 11 dargestellten 5\*5 Pixel-Matrix.

Raumeinheit	Nachbarschaftsindices							Realnachbarschaftsvektor (R)	Normierter Realnachbarschaftsvektor (RN)
A	0,125	0,200	0,250	0,200	0,125	0,200	0,250	5,800	0,640
B	0,500	1,000	0,500	0,200	1,000	1,000	0,250	1,025	0,110
C	0,200	0,500	0,125	0,200				2,275	0,250

Der zentrale Rasterpunkt innerhalb der Raumeinheit A ist mit weiteren Pixeln dieser Raumeinheit innerhalb der 5\*5 Pixel-Matrix zu 64% vergesellschaftet. Die fremdnachbarschaftliche Beziehung mit den Pixeln der Raumeinheit B beträgt 11% und mit jenen der Raumeinheit C 25 %. Die positiv autokorrelative Komponente des Zentralpixels beträgt also 64% und der negative Anteil 36%.

Nun werden die normierten Realnachbarschaftsvektoren einer Raumeinheit getrennt nach positiver und negativer Autokorrelation addiert und mit der Summe aller normierten Nachbarschaftsvektoren einer Raumeinheit erneut normiert. Auf diese Weise erhält man die Erwartete Nachbarschaft ( $EN$ ) für eine Raumeinheit:

$$EN_{RE_i} = \frac{\sum_{(x,y) \in RE_i} RN_{(x,y) \in RE_i}}{\sum_{(x,y)} RN_{(x,y)}} \quad (4)$$

mit:  $EN_{RE_i}$  = Erwartete Nachbarschaft  
 $RN_{(x,y)}$  = Normierter Realnachbarschaftsvektor  
 $i$  = Index der Raumeinheit

Die Zusammenstellung aller positiv und negativ autokorrelativen Erwarteten Nachbarschaften einer Raumeinheit erfolgt in einer Nachbarschaftsmatrix ( $NNE$ ). Mit den Nachbarschaftsmatrizen aller Raumeinheiten ist es möglich, die Vergesellschaftungsstrukturen innerhalb der gesamten Raumeinheitenkarte für jede vorkommende Merkmalskombination zu beschreiben.

Werden die Realnachbarschaftsvektoren der Vergesellschaftungsstrukturen jedes einzelnen Pixels einer Raumeinheit zu den Erwarteten Nachbarschaften der gesamten Raumeinheit in Beziehung gesetzt, erhält man ein Maß für die regionale Repräsentanz der einzelnen Pixel innerhalb einer Raumeinheit. Dieses Maß wird als Repräsentanzindex ( $RI$ ) bezeichnet:

$$RI_{(x,y) \in RE_i} = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^n RN_{(x,y) \in RE_i} - EN_{RE_i} \right|}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

mit:  $RI_{(x,y)}$  = Repräsentanzindex  
 $RN_{(x,y)}$  = Normierter Realnachbarschaftsvektor  
 $EN_{RE_i}$  = Erwartete Nachbarschaft  
 $i$  = Index der Raumeinheit

Die aufsummierten (relativen) Differenzen der Realnachbarschaftsvektoren und der Erwarteten Nachbarschaften erreichen Werte zwischen Null und  $\sqrt{2}$ . Sie werden mit  $\sqrt{2}$  normiert, so dass der Repräsentanzindex einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen kann. Wird für einen Rasterpunkt ein  $RI$  von 1 errechnet, ist dieser Punkt für die Raumeinheit, die er vertritt, höchst repräsentativ und daher als potentielle Probenahmestelle geeignet.

Die bisherigen Ausführungen beziehen sich auf die Berechnung des Repräsentanzindex für eine Raumeinheitenkarte, die lediglich aus einer Kartenschicht (Informationsschicht) besteht. Werden mehrere Informationsschichten berücksichtigt, wird der Multidimensionale Nachbarschafts-Repräsentanzindex ( $MNR$ ) berechnet, indem der Mittelwert der Repräsentanzindices jeder Kartenschicht gebildet wird:

$$MNR_{(x,y)} = \frac{\sum_{KS=1}^n RI_{(x,y)}}{\sum KS} \quad (6)$$

mit:  $MNR_{(x,y)}$  = Multidimensionaler Nachbarschafts-Repräsentanzindex  
 $RI_{(x,y)}$  = Repräsentanzindex einer Kartenschicht  
 $KS$  = Kartenschicht

### 3.3.3 Bestimmung des Stichprobenumfangs

Für die Ermittlung des ökonomisch und fragestellungsbezogen optimierten Stichprobenumfangs und die Verteilung der Probenahmestellen auf die Raumeinheiten werden Gebietscharakteristika des Untersuchungsgebiets berücksichtigt, die aus der Raumeinheitenkarte ableitbar sind. Zum Einen können Informationen über die Größe und Einzelflächenanzahl jeder Raumeinheit extrahiert werden, zum Anderen liefern die Ergebnisse der Regionalen Assoziationsanalyse für jede untersuchungsrelevante Raumeinheit Nachbarschaftsmatrizen, die Auskünfte über das Vergesellschaftungsmuster der Raumeinheiten enthalten. An den Algorithmus zur Berechnung des Stichprobenumfangs werden mehrere Anforderungen gestellt:

- Jede untersuchungsrelevante Raumeinheit ist mindestens einmal zu beproben, um eine lückenlose Erfassung aller Kombinationsmuster der Standortfaktoren zu gewährleisten.
- Raumeinheiten mit einem hohen Flächenanteil sind häufiger zu beproben als kleinflächig vorkommende Raumeinheiten.
- Räumlich stark zersplitterte Raumeinheiten sind häufiger zu beproben als geschlossene Areale, die mit großer Wahrscheinlichkeit eine hohe räumliche Konstanz der Standortfaktoren innerhalb der Areale aufweisen.
- Gestreckte Raumeinheiten, in deren Verlauf mit einer Änderung der labilen Bodeneigenschaften eher zu rechnen ist als bei annähernd kreisförmigen Arealen, sind ebenfalls häufiger zu beproben.

Aus diesen Prämissen ergibt sich für die Berechnung der minimal notwendigen Probenahmestellenzahl zur repräsentativen und flächendeckenden Erfassung aller Raumeinheiten folgende Gleichung:

$$N = \sum_{i=1}^n \left( 1 + \frac{1}{AKpos_{RE_j}} \frac{F_{RE_i}}{\sum_{i=1}^n F_{RE_i}} 100 EF_{RE_i} \right) \quad (7)$$

mit:	$N$	= Gesamtprobenanzahl für das Untersuchungsgebiet
	$F_{RE_i}$	= Gesamtfläche einer Raumeinheit in Karteneinheiten
	$EF_{RE_i}$	= Einzelflächenanzahl einer Raumeinheit
	$AKpos_{RE_j}$	= positiv autokorrelativer Anteil einer Raumeinheit
	$i$	= Index der Raumeinheit
	$j$	= Index der Einzelfläche einer Raumeinheit

Mit dem ersten Summanden (1) wird sichergestellt, dass jede Raumeinheit mindestens einmal beprobt wird (s. Punkt 1). Die Gesamtfläche einer Raumeinheit ( $F_{REi}$ ) wird als relativer Anteil an der Gesamtfläche aller Raumeinheiten berücksichtigt (s. Punkt 2). Die Einbeziehung der relativen Flächenanteile ist erforderlich, um die Unabhängigkeit des Berechnungsverfahrens von der gewählten Rasterweite und dem Betrachtungsmaßstab zu gewährleisten. Weiterhin geht in die Gleichung die Einzelflächenanzahl der Raumeinheiten ein (s. Punkt 3). Indem das Produkt aus Flächenanteil und Einzelflächenanzahl jeder Raumeinheit in Beziehung zum positiven autokorrelativen Anteil dieser Raumeinheit gesetzt wird, ist sichergestellt, dass annähernd isoperimetrischen Arealen (hohe positive bzw. geringe negative Autokorrelation) weniger Probenahmestellen zugewiesen werden als gestreckten Flächen (s. Punkt 4).

### **3.4 Erhebung der labilen Bodenkennwerte**

#### **3.4.1 Ermittlung des Beprobungsschemas**

Für die Regionalisierung der bodenkundlichen Kennwerte in den Untersuchungsgebieten Steinbrücken und Eibelshausen sowie Erda wird in eine aufwandsminimierte und reproduzierbare Beprobungsstrategie zur Ermittlung flächenrepräsentativer Durchschnittswerte unter Berücksichtigung der kleinräumigen Variabilität der zu erhebenden Bodeneigenschaften entwickelt.

In der Praxis angewandte Beprobungsschemata wie z.B. Zufalls-, Raster-, Transekt- oder Kreisbeprobungen besitzen spezifische Vor- und Nachteile, die von der Variabilität der Standort- und Bodeneigenschaften der jeweiligen Untersuchungsfläche abhängen (z.B. Schmotz 1996, Webster 1993, Webster & Oliver 1990, Burgess et al. 1981, Miehlich 1976). Daher stellt sich die Frage, welche Beprobungsstrategie für unterschiedliche Nutzungsformen der Untersuchungsgebiete den günstigsten Kompromiss zwischen Untersuchungsaufwand und hinreichender Berücksichtigung der lateralen Variabilität der labilen Bodenkennwerte für eine großmaßstäbige Untersuchung darstellt. Um diese Frage zu beantworten, werden exemplarisch für die Nutzungsformen der Untersuchungsgebiete in der Gemarkung Erda auf einer Brache, einem Grünlandstandort und einem Acker in einem engmaschigen Hexagonalraster (2 m Rasterpunktabstand) jeweils 51 Oberbodenproben gewonnen (Abb. 14), um die kleinräumige Variabilität und Verteilung der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte und der prozentualen Gehalte an organisch gebundenem Kohlenstoff zu ermitteln. Die geringe Distanz der Probenahmestellen zueinander und ihre äquidistante Anordnung gewährleisten eine möglichst exakte Erfassung der

räumlichen Variabilität der labilen Bodeneigenschaften (vgl. Heinrich 1992, Webster & Oliver 1990, Journel & Huijbregts 1978).

Die Untersuchungsflächen befinden sich annähernd im Zentrum der drei Nutzungsformen (Fläche 1 bis Fläche 3) um sicherzustellen, dass mögliche lateral wirksame Einflüsse der angrenzenden landwirtschaftlichen Nutzung auf die bodenkundlichen Kennwerte die Beprobung möglichst wenig beeinflussen. Alle Flächen sind in Form eines Rechteckes mit einer Ausdehnung von 16 m senkrecht zum Hanggefälle und 8,65 m in Gefällerrichtung angelegt. Im südostexponierten, drei bis fünf Grad geneigten Oberhangbereich grenzten zum Zeitpunkt der Untersuchungen (1996) eine 35-jährige Ginsterbrache, hangabwärts gefolgt von einem mit Erbsen bestandenem Acker, und eine Grünlandfläche aneinander (Abb. 12).

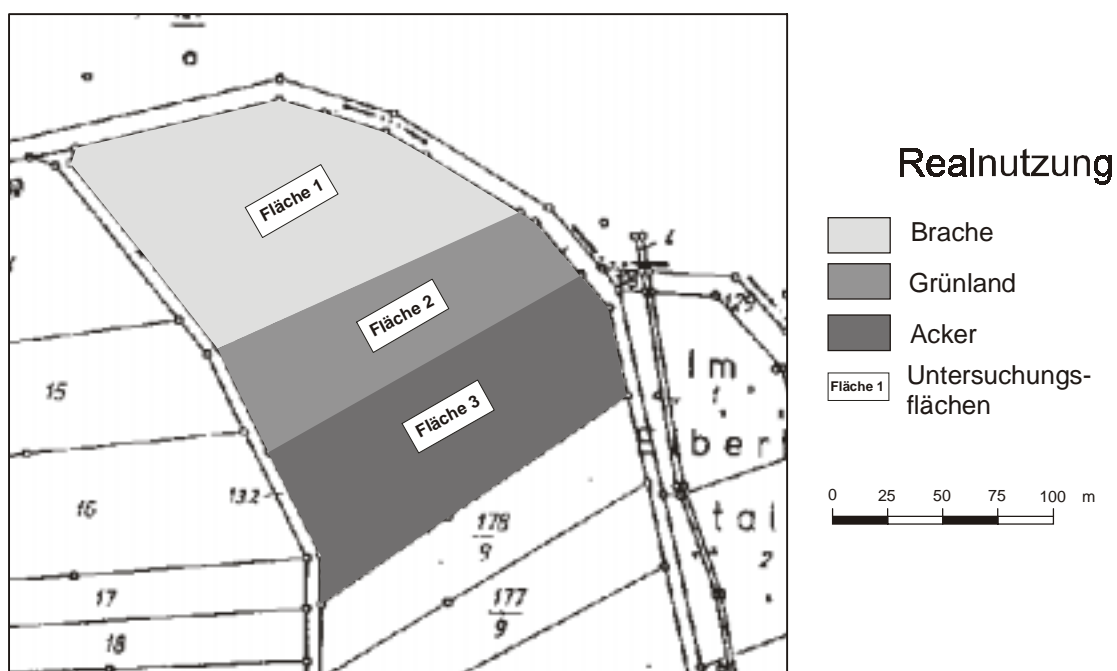


Abb. 12 Lage der Untersuchungsflächen und Realnutzung.

Die feldbodenkundlichen Merkmale, die Bodentypen (vgl. Abb. 13) und die Reliefeigenschaften der Untersuchungsflächen stimmen weitestgehend überein. Es ist daher anzunehmen, dass Unterschiede und räumliche Variabilitäten der labilen Bodeneigenschaften innerhalb der Flächen in erster Linie durch die Nutzung hervorgerufen werden (vgl. Gisi & Oertli 1981, Zölitz 1983, Gisi 1990 et al., Schleuß et al. 1994).

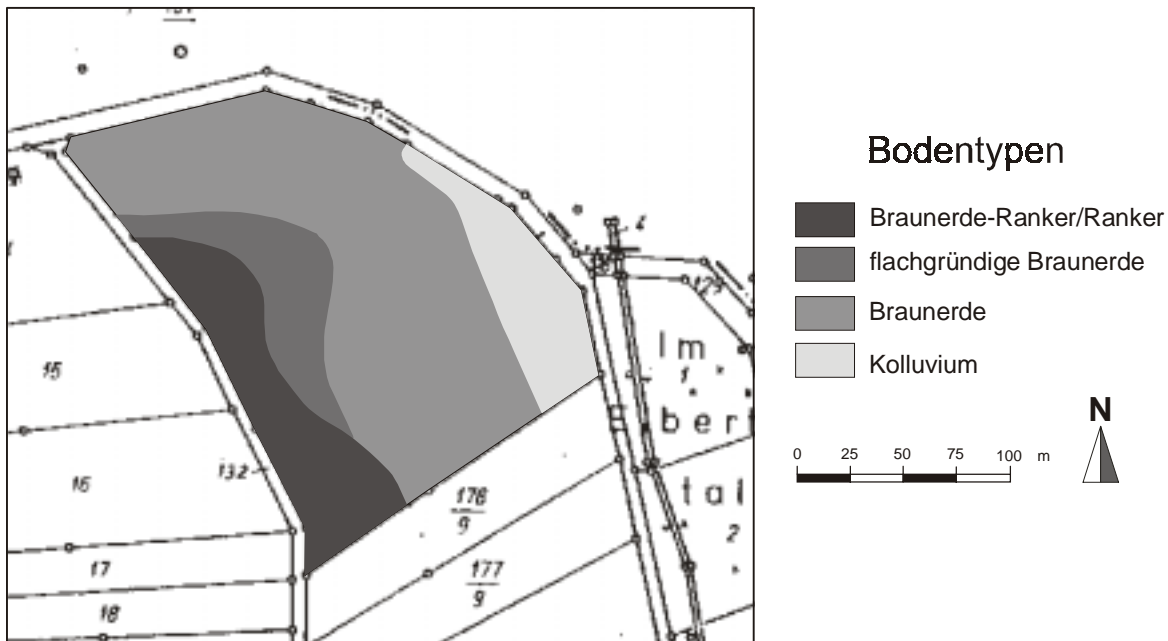


Abb. 13 Bodentypen im Bereich der Untersuchungsflächen.

Innerhalb der Untersuchungsflächen werden an allen Eckpunkten und im Zentrum der Sechsecke des regelmäßigen Hexagonalrasters (vgl. Abb. 14) jeweils drei Bodenproben in einem Abstand von 10 cm aus 0 bis 10 cm Tiefe mit einem  $N_{\min}$ -Bohrer entnommen und zu einer Mischprobe vereinigt. Die Verwendung eines  $N_{\min}$ -Bohrers stellt sicher, dass durch die Volumenäquivalenz der Einzelproben zueinander die Erfassung der Mikrovariabilität des Messwertes mit hoher statistischer Wahrscheinlichkeit bei allen Proben in gleicher Weise gewährleistet wird (vgl. Schmotz 1996, Kuhnt 1994, Miehlisch 1976).

Zur Simulation verschiedener Beprobungsstrategien werden auf der Grundlage des Beprobungsrasters ausgewählte Probenahmestellen zu Kreisen und Transekten zusammengefasst (Abb. 14) und statistisch ausgewertet. Sieben Probenahmestellen bilden je einen Kreis mit acht (Kreis 1) bzw. vier Metern (Kreis 2) Durchmesser. Zwei diagonal in einem Winkel von  $60^\circ$  (Transekt 1) bzw.  $120^\circ$  (Transekt 2) zur Längsseite der Beprobungsfläche angeordnete Transekte weisen jeweils sechs Probenahmestellen auf.

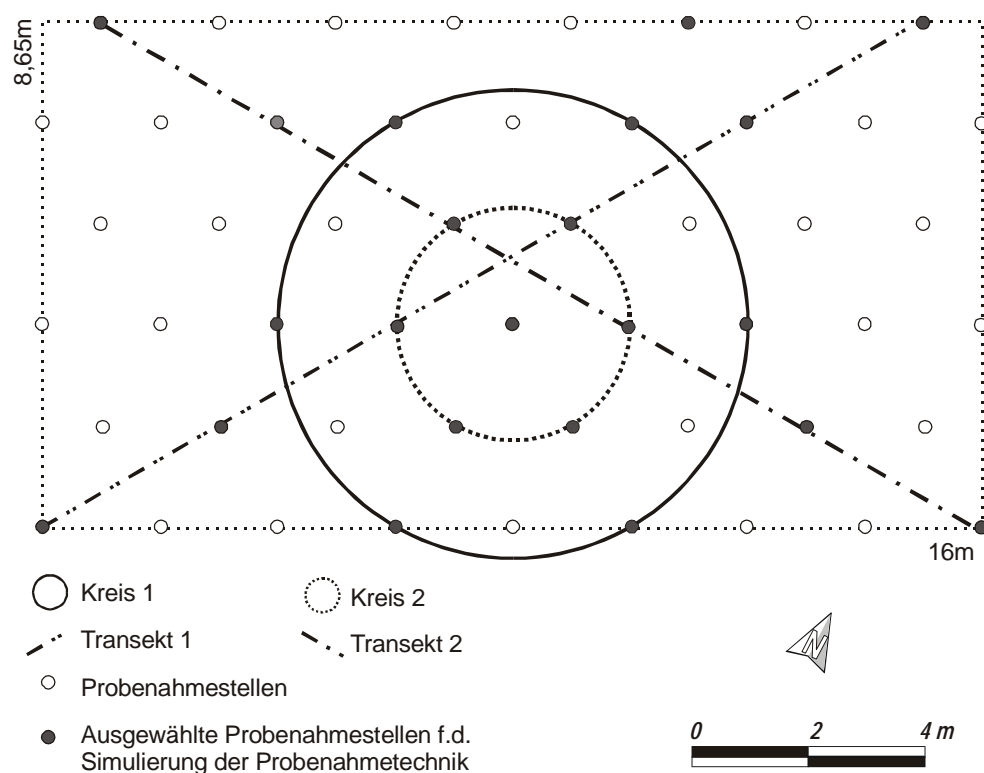


Abb. 14 Simulierte Beprobungsstrategien auf der Grundlage eines Hexagonalrasters (Rasterabstand 2 m).

Um zu ermitteln, welche Beprobungstechnik für alle untersuchten Nutzungsformen unter Berücksichtigung der eingangs erläuterten Prämissen für eine flächenrepräsentative Beprobung die besten Voraussetzungen besitzt, werden die relativen Abweichungsbeträge der bodenkundlichen Kennwerte jeder simulierten Beprobungstechnik zum Mittelwert der Einzelproben des hochaufgelösten Hexagonalrasters berechnet (Tab. 4). Der Mittelwert der simulierten Beprobungstechniken dieser Abweichungsbeträge für die drei Nutzungsformen dient dabei als Gütemaß, da die Beprobung im engmaschigen Hexagonalraster einen hohen Anteil der lateralen Variabilität erfasst. Hohe mittlere Abweichungen bedeuten, dass die Variabilität der Bodeneigenschaften mit dem gewählten Beprobungsschema nur unzureichend erfasst wird. Geringe Differenzen weisen auf eine Eignung dieser Beprobungstechnik für die flächenrepräsentative Ermittlung des  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werts oder  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalts hin. Als Durchschnittswert des Probenkollektivs wird der Mittelwert anderen Lagemaßen vorgezogen, da bodenkundliche Kennwerte selten normalverteilt sind und damit Extremwerte, die in natürlichen Systemen regelmäßig auftreten, mit gleichem anteiligen Gewicht in die Berechnung eingehen (vgl. Young et al. 1998). Die Ermittlung der Lageparameter für den  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert erfolgt auf Basis der metrisch skalierten H-Ionenkonzentration.

Tab. 4 Relative Abweichungen der Mittelwerte des pH-Wertes und der H-Ionenkonzentration der vier simulierten Beprobungstechniken (Kreis 1, Kreis 2, Transekt 1 und Transekt 2) zum Mittelwert des Hexagonalrasters.

Beprobungstechnik / Probenanzahl	Nutzungsform	pH-Wert			C <sub>org</sub> -Gehalt [%]		
		Mittelwert	relative Abweichungsbeträge [%] vom Mittelwert des Hex.-Rasters	Mittelwert der relativen Abweichungsbeträge [%] aller Nutzungsformen	Mittelwert	relative Abweichungsbeträge [%] vom Mittelwert des Hex.-Rasters	Mittelwert der relativen Abweichungsbeträge [%] aller Nutzungsformen
Hexagonalraster / 51	Brache	4,1	-		2,78	-	
	Grünland	4,5	-	-	2,42	-	-
	Acker	4,7	-		1,53	-	
Kreis 1 (groß) / 7	Brache	4,1	0,0		2,84	2,2	
	Grünland	4,4	2,2	0,7	2,17	10,3	4,4
	Acker	4,7	0,0		1,54	0,7	
Kreis 2 (klein) / 7	Brache	4,2	2,4		2,91	4,7	
	Grünland	4,3	4,4	3,0	2,30	5,0	4,5
	Acker	4,8	2,1		1,56	3,9	
Transekt 1 (60°) / 6	Brache	4,1	0,0		3,01	8,3	
	Grünland	4,5	0,0	0,7	2,52	4,1	4,8
	Acker	4,7	2,1		1,56	2,0	
Transekt 2 (120°) / 6	Brache	4,2	2,4		2,93	5,4	
	Grünland	4,4	2,2	2,2	2,42	0,0	2,0
	Acker	4,6	2,1		1,54	0,7	

Die relativen Abweichungsbeträge des pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub>-Werts oder C<sub>org</sub>-Gehalts sind je nach Beprobungstechnik und Nutzungsform uneinheitlich (Tab. 4). Im Mittel aller Nutzungsformen sind für die Ermittlung eines flächenrepräsentativen pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub>-Werts mit Abweichungen von lediglich 0,7 % zum Hexagonalraster Kreis 1 oder Transekt 1 geeignet. Für den C<sub>org</sub>-Gehalt weist Transekt 2 mit 2,0 % die geringsten Abweichungen auf. Insgesamt betrachtet sind die Mittelwerte der relativen Abweichungsbeträge jedoch sehr gering, so dass eine eindeutige Wahl der Beprobungstechnik nicht möglich ist, zumal die Untersuchungsflächen nicht für alle Untersuchungsgebiete repräsentativ sein können und die gemeinsame Erhebung des pH-Werts und C<sub>org</sub>-Gehalts vorgesehen ist. Allerdings zeigen die Ergebnisse, dass mit relativ wenigen Proben (6 bis 7) schon ein großer Teil der Variabilität der bodenkundlichen Kennwerte in einem kleinen Flächenausschnitt erfasst werden kann. Gegenüber einem Transekt ist eine Kreisbeprobung jedoch vorzuziehen, da der Kreis richtungsunabhängig ist und auf diese Weise im Zuge der Beprobung die Wahrscheinlichkeit minimiert wird, dass lediglich gradientenbezogene Veränderungen von Bodeneigenschaften erfasst werden, die beispielsweise durch



die Bewirtschaftung oder das Relief hervorgerufen werden. Die Erhebung der bodenkundlichen Kennwerte in diesem Vorhaben erfolgt daher mittels eines Beprobungssatelliten.

### 3.4.2 Plausibilitätskontrolle im Gelände

Der eigentlichen Beprobung geht die Überprüfung der Indikatorenkombination im Gelände voraus, die zuvor in der Raumeinheitenkarte für die jeweilige Probenahmestelle ausgewiesen wird. Sind an der potentiell repräsentativen Probenahmestelle Abweichungen bezüglich der Faktorenkonstellation und der Merkmalsausprägung der einzelnen Standortfaktoren festzustellen, wird ein anderer Standort für die Probenahme ausgewählt. Die Auswahl der nächst repräsentativen Probenahmestelle erfolgt auf Basis der hierarchisch angelegten Liste der Repräsentanzindices (vgl. Schmotz 1996, Kuhnt 1994).

### 3.4.3 Beprobung

Auf der Grundlage der in Kapitel 3.4.1 geschilderten Ergebnisse wird die Beprobung für die Regionalisierung der bodenkundlichen Kennwerte in den Untersuchungsgebieten in einem Beprobungssatelliten mit einem Durchmesser von sechs Metern durchgeführt. Dieser Durchmesser ist auf die Form und Größe vieler Flurstücke und die Rasterweite der Raumeinheitenkarte abgestimmt. Sechs Probenahmestellen sind satellitenartig in einem Winkel von  $60^\circ$  um eine zentrale Beprobungsstelle auf einer Kreisbahn mit einem Radius von drei Metern angeordnet. Der Beprobungssatellit ist stets nach Norden ausgerichtet, um die Beprobungsbedingungen zu konditionieren (Abb. 15).

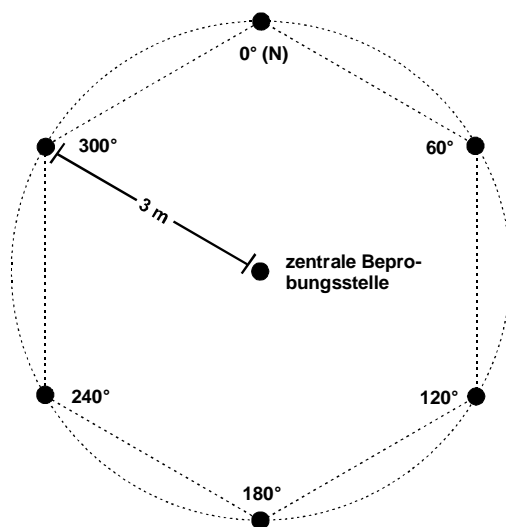


Abb. 15 Der Beprobungssatellit zur Erhebung der bodenkundlichen Kennwerte des Oberbodens.

Um im Gelände die genaue Lage der zuvor ausgewiesenen repräsentativen Probenahmestellen im Zentrum des Satelliten zu ermitteln, wird ein D-GPS eingesetzt. Der Einsatz dieses Geräts ermöglicht im Freiland eine Genauigkeit der Einmessung bis in den Meterbereich. Die Probenahme erfolgt mit dem  $N_{\min}$ -Bohrer. Es werden aus der Tiefenstufe 0-20 cm sieben volumenäquivalente Oberbodenproben entnommen und zu einer Mischprobe vereinigt. Das Volumen jedes Einstiches beträgt für die gewählte Tiefenstufe ca.  $151 \text{ cm}^3$ , so dass eine Mischprobe mit einem Rauminhalt von insgesamt etwa  $1056 \text{ cm}^3$  für die Analytik zur Verfügung steht. Zur Dokumentation der Standortsituation werden die Realnutzung, der Bodentyp, die Horizontierung und die Substratschichtung sowie die feldbodenkundlich ermittelbaren Bodenarten gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung ‚KA4‘ (AG Bodenkunde 1994) aufgenommen. Darüber hinaus werden die geomorphometrischen Reliefeigenschaften Exposition und Inklinaton mit einem Kompass bzw. einem Neigungsmesser ermittelt.

#### 3.4.4 Probenvorbereitung und Analytik

Die Proben für die Bestimmung des  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wertes sowie der königswasser- und EDTA-extrahierbaren Cadmium-Anteile werden bei  $40^\circ \text{ C}$  getrocknet und auf zwei Millimeter gesiebt. Das Bodenmaterial zur Ermittlung der Kohlenstoff- und Schwermetall-Gesamtgehalte (vgl. Kap. 3.6) wird in der Achat-Kugelmühle feinstgemahlen.

Der pH-Wert wird gemäß DIN 19 684 (Teil 1) (Deutsches Institut für Normung 1977) in einer  $0,01 \text{ mol/l CaCl}_2$ -Lösung potentiometrisch gemessen. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff wird konduktometrisch ermittelt (Wegener 1999a). Die Angabe des Messergebnisses wird auf die Feinboden-Einwaage bezogen und erfolgt in Gewichtsprozent. Da die zu untersuchenden Proben aufgrund der geologischen Verhältnisse in den Untersuchungsgebieten frei von Carbonaten sind, entsprechen die gemessenen Kohlenstoffgehalte in den Proben den Gesamtgehalten an organisch gebundenem Kohlenstoff. Die Anteile an potentiell mobilisierbarem Cadmium werden im Gleichgewichtsverfahren mit EDTA extrahiert, das in einer neutralen, gepufferten  $\text{NH}_4$ -Acetat-Lösung gelöst wird (Wegener 1999b). Die Gesamtgehalte von Cadmium (vgl. Kap. 3.6) werden im Königswasseraufschluss entsprechend DIN 38414-S7 (Teil 7) (Deutsches Institut für Normung 1983) ermittelt. Die Konzentrationsbestimmung beider Schwermetall-Fractionen erfolgt im Filtrat bzw. in der entsprechenden Verdünnung mit dem Flammen-Atomabsorptionsspektrometer (Firma Perkin-Elmer, Typ AAS 2380).

### **3.5 Regionalisierung der bodenkundlichen Kennwerte**

#### **3.5.1 Validierung des Regionalisierungsmodells**

Ist die Beziehung einzelner Standortfaktoren zu bodenkundlichen Kennwerten, die aus früheren Untersuchungen vorliegen, nachgewiesen worden, wird die Eignung der Extrapolationsgrundlage für die flächenhafte Darstellung der erhobenen bodenkundlichen Kennwerte in den Untersuchungsgebieten Steinbrücken, Eibelshausen und Erda varianzanalytisch überprüft. Diese Überprüfung ist insbesondere dann notwendig, wenn das Klassifizierungsniveau der Merkmalsausprägungen einzelner Standortfaktoren von demjenigen der Faktoren abweicht, die für die Analyse der Indikator-Indikandum-Beziehung verwendet wurden. Die methodische Vorgehensweise der varianzanalytischen Auswertung wurde bereits ausführlich in Kapitel 3.2.1 dargestellt. Mögliche Kontraste zwischen den Faktorstufen- oder Faktorstufengruppen werden nicht ermittelt, da durch die Klassifizierung und Validierung der Raumeinheitenwerte unterschiedliche Raumeinheiten zusammengefasst werden müssen (vgl. Kap. 3.2.1).

Wird die Eignung der Raumeinheitenkarte für die Regionalisierung durch die Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung bestätigt, müssen für die einzelnen Raumeinheiten repräsentative bodenkundliche Flächenkennwerte ermittelt werden, da in der Mehrzahl der Fälle Raumeinheiten mehrfach beprobt werden. Als Kennwert wird der Median der einzelnen bodenkundlichen Messwerte (MW) jeder Raumeinheit gewählt, um das Gewicht möglicher Ausreißer zu verringern (vgl. Young et al. 1998). Dieser Kennwert wird im Folgenden als Raumeinheitenwert (RW) bezeichnet und allen Rasterpunkten einer Raumeinheit zugewiesen. Damit die Information über die Streuung der einzelnen Messwerte innerhalb der Raumeinheiten für Interpretationszwecke durch diesen Aggregierungsschritt nicht verloren geht, wird die Messwertvarianz im Zuge der Datenklassifizierung berücksichtigt und als qualitative und quantitative Messwertabweichung (vgl. Kap. 3.5.3.3) in den regionalisierten Darstellungen der bodenkundlichen Kennwerte angegeben (Abb. 41 bis Abb. 46 in Kap. 8.2).

#### **3.5.2 Schätzung der labilen Bodenkennwerte nicht beprobter Raumeinheiten**

Die Beprobung aller vorkommenden Raumeinheiten mit unterschiedlichen Merkmalskombinationen ist ineffizient, da bereits circa 95 % der Fläche der Raumeinheitenkarten aller Untersuchungsgebiete erfasst werden, wenn lediglich etwa 30 bis 50 % der Raumeinheiten berücksichtigt werden (vgl. Kap. 3.2.4 u. 4.1.4). Um für den verbleibenden Anteil dennoch eine flä-

chenbezogene Aussage über die bodenkundlichen Kennwerte zu erhalten, werden die Werte für diese Raumeinheiten aus den vorhandenen Flächeninformationen ermittelt. Aufgrund der hohen Raumdiversität ist eine statistisch abgesicherte Ableitung der nicht gemessenen Werte von den Merkmalskombinationen auf der Basis einer Sensitivitätsstudie unmöglich, da für die hohe Anzahl vorkommender Faktorenkombinationen die Stichprobenumfänge der einzelnen Faktorstufen zu gering sind. Daher werden die nicht beprobten Raumeinheiten, die häufig in der Übergangszone zwischen Raumeinheiten mit einem zugewiesenen Wert liegen, geostatistisch interpoliert.

Die Regionalisierung der labilen Bodenkennwerte auf der Basis der Raumeinheitenkarten geschieht unter der Prämisse, dass innerhalb der Einzelflächen der Raumeinheiten die Intensität der bodenkundlichen Kennwerte nur eine begrenzte Streuung aufweist. Daher ist ein gewisser 'Abschirmeffekt' (*screen effect*) im Umfeld der Raumeinheiten mit bekannten Werten zu den interpolierten Bereichen erwünscht (Akin & Siemes 1988). Weisen die Daten zudem keine großräumige Drift auf, ist für die Interpolation der fehlenden Werte das Normale Kriging (*Ordinary Kriging*) mit unbekanntem Mittelwert geeignet. Zeigt der Datensatz eine räumliche Anisotropie der Raumeinheitenwerte, wird das Universalkriging (*Universal Kriging*) eingesetzt. Die Gewichte und Strukturparameter Nuggetvarianz (*nugget effect*), Schwellenwert (*sill*) und Reichweite (*range*) des Variogramms zur Schätzung der Interpolationswerte werden auf der Grundlage entsprechender Variogrammodelle ermittelt, die an die experimentellen Variogramme der Raumeinheitenwerte angepasst werden (u.a. Matheron 1963, Journel & Huijbregts 1978, Dutter 1985). Abschließend werden die geschätzten Werte innerhalb einer nicht beprobten Raumeinheit gemittelt und dieser Raumeinheitenwert der gesamten Raumeinheit zugewiesen.

### 3.5.3 Klassifizierung der Raumeinheitenwerte

Die Klassifizierung der regionalisierten Bodeneigenschaften  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert, prozentualer Gehalt an organischer Substanz und EDTA-extrahierbarem Cadmium erfolgt unter Berücksichtigung folgender Kriterien:

- Genauigkeit der Laboranalyse
- Minimierung der Messwertvariation innerhalb der Klassen und Maximierung der Unterschiede zwischen den Klassen

- Qualitative und quantitative Über- oder Unterschreitung der Klassengrenzen im Messwertintervall
- Bodenkundliche Plausibilität der Klassifizierungsergebnisse

### 3.5.3.1 Messgenauigkeit

Die Genauigkeit der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Messung mittels Glaselektrode liegt bei etwa 0,1 pH-Einheiten in Abhängigkeit von dem verwendeten Suspensionsmittel und der H-Ionen-Konzentration der Lösung. Unter Berücksichtigung des Gesamtfehlers, der sich aus Geräte- und Bedienungsfehlern sowie einer nicht quantifizierbaren stochastischen Fehlerkomponente zusammensetzt, ist eine Genauigkeit von etwa 0,3 pH-Einheiten bis in hohe pH-Bereiche mit entsprechend geringen H-Ionenkonzentrationen allerdings als realistischer anzusehen. Die Messung der prozentualen  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte erlaubt bei der angewandten Methode eine Auflösung bis zu drei Dezimalstellen. Aufgrund der schwer kalkulierbaren möglichen Fehlerkomponenten ist jedoch die Berücksichtigung von zwei Dezimalstellen als ausreichend anzusehen. Die  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte können mit der durchgeführten Analytik bis zu einer Genauigkeit von fünf Dezimalstellen im Milligrammbereich (entspricht 0,01 ng) aufgelöst werden. Auch in diesem Fall wird auf eine Dezimalstelle verzichtet (entspricht 0,1 ng), um einen entsprechenden Sicherheitsspielraum zu erhalten und Überinterpretationen zu vermeiden.

### 3.5.3.2 GVF-Index

Im Zuge der Klassifizierung wird die Verteilung der Raumeinheitenwerte innerhalb definierter Klassengrenzen mit einem varianzanalytischen Verfahren berücksichtigt. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist die statistisch optimierte Zusammenfassung der Raumeinheitenwerte zu Klassen, deren Anzahl vorgegeben wird. Als Gütemaß wird ein Index ermittelt, der als *Goodness of Variance Fit (GVF)* bezeichnet wird (Jenks 1977). Er beziffert das Verhältnis der Differenz aufsummierter Abweichungsquadrate vom Mittelwert aller Raumeinheitenwerte und den Klassenmittelwerten zur Summe der Abweichungsquadrate vom Mittelwert aller Raumeinheitenwerte. Werden alle Raumeinheitenwerte in einer Klasse zusammengefasst, beträgt der Index 0. Wird jeder Wert einer eigenen Klasse zugeordnet, erreicht der Index den Maximalwert 1. Im Folgenden sind die Grundlagen zur Berechnung der GVF-Indices dargestellt:

Zunächst wird die Summe der Abweichungsquadrate der Raumeinheitenwerte vom Mittelwert gebildet ( $SDAM = \text{squared devitations, array mean}$ ):

$$SDAM = \sum (RW_i - \bar{X})^2 \quad (8)$$

mit:  $RW_i$  = Raumeinheitenwert  
 $\bar{X}$  = Mittelwert der Raumeinheitenwerte  
 $i$  = Index des Raumeinheitenwerts

Anschließend erfolgt die Aufsummierung der Abweichungsquadrate der Raumeinheitenwerte von jedem Klassenmittelwert der gewählten Klassen ( $SDCM = \text{squared devitations, class means}$ ):

$$SDCM = \sum \sum (RW_i - \bar{Z}_0)^2 \quad (9)$$

mit:  $RW_i$  = Raumeinheitenwert  
 $\bar{Z}_0$  = Klassenmittelwert  
 $i$  = Index des Raumeinheitenwerts

Das Verhältnis der Differenz  $SDAM - SDCM$  zur Summe der Abweichungsquadrate vom Mittelwert der Raumeinheitenwerte ( $SDAM$ ) liefert den GVF-Index:

$$GVF = \frac{SDAM - SDCM}{SDAM} \leq 1 \quad (10)$$

Es wird angestrebt, bei gegebener Klassenanzahl die Klassengrenzen soweit zu optimieren, dass der GVF-Index einen möglichst hohen Wert bei der gewählten Klassenanzahl erreicht. Die Ermittlung der Klassengrenzen erfolgt auf Basis der oben angegebenen Funktion mit iterativen Rechenroutinen. Dabei werden die Klassengrenzen sukzessive verschoben, bis der GVF-Index einen Maximalwert erreicht. Für die Ermittlung des optimalen Klassifizierungsniveaus werden mehrere Indices für unterschiedliche Klassenanzahlen berechnet. Auf diese Weise ist es möglich, einen Schwellenwert zu erkennen, ab dem eine weitere Maximierung der Indices eine starke Zunahme der Klassenanzahl bedeuten würde, die unter Berücksichtigung der übrigen Klassifizierungskriterien nicht angezeigt ist. Das folgende Beispiel für fiktive Messwerte (Tab. 5) verdeutlicht diesen Sachverhalt. Bei einer Klassifizierung von zwei bis vier Klassen erhöht sich der GVF-Index mit jeder zusätzlichen Klasse um 0,2 Einheiten. Bei fünf und sechs Klassen ist nur noch eine allmähliche Zunahme mit jeweils 0,01 Einheiten

festzustellen. Bei einer Aufteilung der Werte in vier Klassen stellt der GVF-Index also in diesem Beispiel einen Schwellenwert dar, der anzeigt, dass eine weitere, merkliche Erhöhung des Indexes nur bei einer starken Anhebung der Klassenanzahl möglich wäre.

Tab. 5 Schwellenwert der GVF-Indices bei vorgegebenen Klassenanzahlen.

Klassenanzahl	2	3	4	5	6
GVF-Index	0,50	0,70	0,90	0,92	0,93

### 3.5.3.3 Qualitative und quantitative Abweichung der Messwertintervalle von den Bodenkennwertklassen

Da ein Raumeinheitenwert den Median der Messwerte einer Raumeinheit darstellt, ist die Gesamtstreuung der Messwerte innerhalb der Klassen, die sich aus mehreren Raumeinheitenwerten zusammensetzen (Bodenkennwertklassen), von großer Bedeutung für die Interpretation der Regionalisierungsergebnisse. Daher werden für unterschiedliche Klassenanzahlen die Über- oder Unterschreitungen der Klassengrenzen durch die entsprechenden Messwertintervalle qualitativ und quantitativ ermittelt. Zuvor werden die Klassengrenzen der Raumeinheitenwerte jedoch auf Basis der GVF-Indices für unterschiedliche Klassenanzahlen optimiert.

In Abbildung 16 ist die Problematik der Messwertüberschreitungen beispielhaft für drei fiktive  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werteklassen dargestellt. Es wird deutlich, dass innerhalb der Bodenkennwertklassen größere Messwertschwankungen vorliegen können, die sich in einer Überschneidung der tatsächlichen Messwertspanne im Grenzbereich der Klassen äußern. Für die Beurteilung der Klassentrennschärfe und die Validierung der Regionalisierungsergebnisse ist daher die Berücksichtigung dieses Überschneidungsbereichs sowohl bezüglich der qualitativen Überschreitung der Bodenkennwertklassengrenzen als auch im Hinblick auf die Anzahl der Messwerte, die außerhalb dieser Klassen liegen (quantitative Abweichung), unerlässlich.

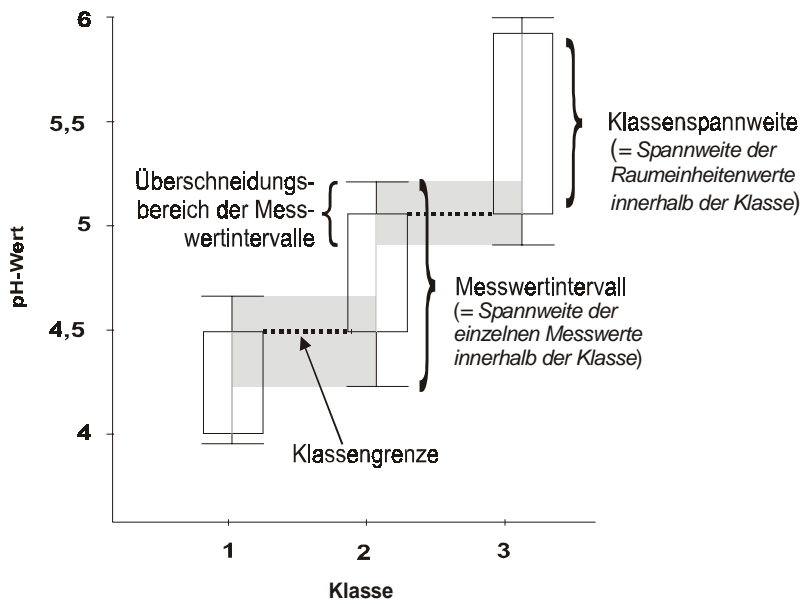


Abb. 16 Beispielhafte Darstellung der Über- oder Unterschreitung der Messwertintervalle innerhalb von pH-Klassen, die entsprechenden Raumeinheitenwerten zugrunde liegen (Bodenkennwertklassen).

Als Kennwert zur Beurteilung der Klassifizierungsgüte bezüglich der Messwertabweichungen werden die relativen qualitativen und quantitativen mittleren Abweichungen bei einer gegebenen Klassenanzahl multipliziert, so dass beide Abweichungswerte gleichgewichtig berücksichtigt werden. Aus Übersichtsgründen werden diese anschließend durch 100 dividiert. Dieser Kennwert wird im Folgenden als Abweichungsindex (AI) bezeichnet. Werden diese Indices für unterschiedliche Klassenanzahlen berechnet, erreicht der Abweichungsindex bei einem bestimmten Klassifizierungsniveau einen Minimalwert, der das Klassifizierungsoptimum bezüglich der qualitativen und quantitativen Messwertabweichungen kennzeichnet. Dieser Index ist daher für den Vergleich der Klassifizierungsgüte von unterschiedlichen bodenkundlichen Kennwerten geeignet.

#### 3.5.3.4 Bodenkundliche Plausibilität der Klassifizierung

Unter bodenkundlichen Aspekten betrachtet muss durch die sinnvolle Klassifizierung der Daten eine Überinterpretation der Regionalisierungsergebnisse bezüglich der Auflösbarkeit der bodenkundlichen Informationen vermieden werden. Selbst wenn aus statistischen Gründen eine sehr feine Klassifizierung plausibel erscheint, kann diese jedoch aus bodenkundlicher Sicht zu detailliert sein, da sie die Realität nicht abbildet. Anhaltswerte für das Klassifizierungsniveau von  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werten und  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalten können der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Bodenkunde 1994) entnommen werden (vgl. Tab. 6). Allerdings sind diese Klassifizierungen für Kartierzwecke entwickelt worden und dementsprechend grob.



Tab. 6 Klassifizierung des  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werts und  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalts nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Bodenkunde 1994, verändert).

pH-Wert (nur Säureseite)	Gehalt an organischer Substanz [Masse-%]	Gehalt an organischem Kohlenstoff [Masse-%] ( $\text{C}_{\text{org}}/1,72$ )
7 - 6,5	0	0
6,5 - 6	< 1	< 0,58
6 - 5	1-2	0,58 - 1,16
5 - 4	2-4	1,16 - 2,33
4 - 3	4-8	2,33 - 4,65
< 3	8-15	4,65 - 8,72
	15-30	8,72 - 17,44
	>30	> 17,44

Werte über pH 6 werden in 0,5er-Schritte und  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte unter pH 6 in ganze Schritte unterteilt. Die  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte sind in Form einer arithmetischen Summenfolge klassifiziert. Dieses bewirkt eine stärkere Untergliederung im Bereich sehr geringer Gehalte, wie sie häufig in Ackerböden anzutreffen sind. Werden die  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte der Oberböden in den Untersuchungsgebieten von circa 1,23 bis 5,65 % (vgl. Kap. 4.3.2) in die Klassifizierung der Kartieranleitung eingeordnet, sind Klassenspannweiten mit  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalten von etwa 2 bis 3 % zulässig. Für die Klassifizierung von  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalten liegen bisher keine Richtlinien vor, da die möglichen Wertspannen einen sehr großen Bereich umfassen können. Allerdings werden die Maßnahmen-, Prüf- und Vorsorgewerte der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) für Cadmium mit einer Genauigkeit von 0,1 mg/kg angegeben. Für die Klassifizierung der Cadmium-Gehalte in den Untersuchungsgebieten sollte diese Grenze daher nicht unterschritten werden.

Die Schwierigkeit der optimalen Klassifizierung besteht darin, unter Berücksichtigung eines jeden der zu Beginn des Kapitels 3.5.3 genannten Klassifizierungskriterien die endgültige Aufteilung der Bodenkennwerte vorzunehmen. Beispielsweise erlaubt die Genauigkeit der pH-Messung mit der Glaselektrode eine Auflösung von etwa 0,1 pH-Einheiten, sofern Messfehler ausgeschlossen werden können. Ist die Streuung der Messwerte innerhalb der Klassen, die durch die Raumeinheitenwerte begrenzt werden, größer als 0,1 pH-Einheiten, so ist die erreichbare Genauigkeit der pH-Messung jedoch von geringer Bedeutung. Auch aus bodenkundlicher Sicht sind Klassenunterschiede, die 0,5 pH-Einheiten unterschreiten, für flächenbezogene Betrachtungen im Landschaftsmaßstab aufgrund der kleinräumigen Variabilität ungeeignet. Andererseits wäre aus statistischer Sicht die Maximierung der GVF-Indices anzustreben, die erreicht wird, wenn jedem Raumeinheitenwert eine eigene Klasse zugewiesen wird. Wie diese Ausführungen verdeutlichen, muss der beste Kompromiss zwischen einer aus

statistischer Sicht betrachtet hinreichenden Aufteilung und der bodenkundlich und anwendungsbezogen plausiblen Klassifizierung der Bodendaten gefunden werden.

#### **3.5.4 Validierung der Regionalisierungsergebnisse**

Die Grundlage der Validierung bildet eine unabhängige Stichprobe auf der Basis eines Zufallsmessnetzes, das über die Untersuchungsgebiete gelegt wird. Auf diese Weise wird eine subjektive Auswahl der Beprobungsstandorte ausgeschlossen. Die Beprobung dieser Standorte erfolgt auf die gleiche Weise und zum selben Zeitpunkt wie die Erhebung der bodenkundlichen Kennwerte für die Regionalisierung. Dadurch ist gewährleistet, dass für die gesamte Stichprobe gleiche Bedingungen bezüglich der Einflüsse durch den Probenahmefehler, die Witterung und die landwirtschaftliche Nutzung bestehen. Die nicht kalkulierbare Fehlerkomponente betrifft damit Einwirkungen, die für die Validierungs- und Regionalisierungsstichprobe gleich sind.

Die Größe der Stichprobe umfasst 10 % der Regionalisierungsprobenanzahl. Diese Anzahl ist ausreichend, da etwa 10 % der Regionalisierungsproben bereits 70 % der Raumeinheitenfläche abdecken, die für die Gemarkungsfläche von Steinbrücken und Eibelshausen sowie Erda ausgewiesen wurde. Eine Vergrößerung der Validierungsstichprobe würde nur die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass große Raumeinheiten mehrfach beprobt werden oder dass in flächenmäßig untergeordneten Raumeinheiten, welche für die Flächenaussage von geringerer Bedeutung sind, Validierungsproben entnommen werden.

Die bodenkundlichen Kennwerte der Validierungsproben werden mit den Regionalisierungsergebnissen verglichen. Ausgangspunkt des Vergleichs sind die Klassen der regionalisierten bodenkundlichen Kennwerte (Bodenkennwertklassen). Zunächst werden die Validierungsproben aufgrund ihrer geographischen Lage den entsprechenden Bodenkennwertklassen zugeordnet. Anschließend wird überprüft, ob sich der Messwert der Validierungsprobe innerhalb des Intervalls der entsprechenden Bodenkennwertklasse befindet. Lassen sich sämtliche Messwerte der Validierungsproben korrespondierenden Bodenkennwertklassen zuordnen, sind die Regionalisierungsergebnisse im Rahmen der Modellannahmen zu 100 % als valide zu bezeichnen. Der prozentuale Anteil der Übereinstimmungen von Validierungsproben und Bodenkennwertklassen beschreibt also den Grad der Validität des Regionalisierungsergebnisses. Da innerhalb der Bodenkennwertklassen, die aus Medianen der Messwerte einzelner Raumeinheiten bestehen, die einzelnen Messwerte mehr oder weniger stark streuen können,

sind vollständige Übereinstimmungen jedoch unwahrscheinlich, da auch die Messwerte der Validierungsproben stärkeren Schwankungen unterliegen können.

### 3.6 Regionalisierung der Ausschöpfung von Cadmium-Vorsorgewerten

Die Ermittlung der Ausschöpfung von Cadmium-Vorsorgewerten basiert auf königswasser- ( $Cd_{KW}$ ) und EDTA-extrahierbaren ( $Cd_{EDTA}$ ) Cadmiumgehalten, die an Oberbodenproben erhoben wurden, welche aus früheren Bodenuntersuchungen (1997) in der Gemarkung Erda stammen. Da die Bestimmung des  $Cd_{KW}$ -Gehalts mit einem erheblichen zusätzlichen Analyseaufwand verbunden ist, wird für die Gemarkung Erda dieser Cadmiumanteil aus den EDTA-extrahierbaren Cadmium-Gehalten der Regionalisierungsbodenproben auf der Grundlage einer vorliegenden Pedotransferfunktion (Schug 2000) geschätzt (Kap. 3.6.1). Anschließend werden die modellierten  $Cd_{KW}$ -Gehalte zu den gesetzlich festgelegten Vorsorgewerten sowie den regionalisierten pH-Werten und den Bodenarten der Extrapolationsgrundlage in Beziehung gesetzt, um auf diese Weise die relative Ausschöpfung der Vorsorgewerte flächenhaft darstellen zu können (Kap. 3.6.2).

#### 3.6.1 Modellierung der königswasser-extrahierbaren Cadmiumgehalte

Die Plausibilität der vorliegenden Pedotransferfunktion ergibt sich aus der nachgewiesenen Abhängigkeit EDTA-extrahierbarer Cadmium-Anteile von den Gesamtgehalten (Hornburg 1991). Versuche, andere mögliche Einflussvariablen wie z.B. den pH-Wert oder den  $C_{org}$ -Gehalt für die Ableitung der  $Cd_{KW}$ -Gehalte zu berücksichtigen, führten zu keiner Verbesserung des statistisch nachweisbaren Zusammenhangs. Das Modell zur Schätzung der  $Cd_{KW}$ -Gehalte wird durch folgende Funktionsgleichung beschrieben:

$$Cd_{KW} = 0,213 + 0,937 \cdot Cd_{EDTA} \quad (11)$$

mit:  $Cd_{KW}$  = königswasser-extrahierbarer Cadmium-Gehalt  
 $Cd_{EDTA}$  = EDTA-extrahierbarer Cadmium-Gehalt

Dabei können bei einer fünfprozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit 82,3 % der Varianz der  $Cd_{KW}$ -Gehalte auf die Gesamtstreuung der  $Cd_{EDTA}$ -Gehalte zurückgeführt werden. Für die Ober- und Untergrenze des 95%-Konfidenzintervalls der Schätzwerte ergeben sich bei einem Standardfehler von 0,018 für die Konstante und 0,054 für den Regressionskoeffizienten folgende Funktionsgleichungen:

$$\text{Obergrenze: } Cd_{KW} = 0,248 + 1,044 \cdot Cd_{EDTA} \quad (12)$$

$$\text{Untergrenze: } Cd_{KW} = 0,178 + 0,830 \cdot Cd_{EDTA} \quad (13)$$

mit:  $Cd_{KW}$  = königswasser-extrahierbarer Cadmium-Gehalt  
 $Cd_{EDTA}$  = EDTA-extrahierbarer Cadmium-Gehalt

### 3.6.2 Relative Ausschöpfung der Cadmium-Vorsorgewerte

Die Vorsorgewerte für Cadmium werden in der gesetzlichen Vorlage nach den Bodenarten Ton, Schluff/Lehm und Sand sowie nach der Unterschreitung des Grenz-pH-Werts von 6 differenziert (Tab. 7). Für die Regionalisierung der Ausschöpfungsklassen werden daher zunächst diejenigen Raumeinheiten auf Basis der pH-Karte (vgl. Abb. 42 in Kap. 8.2) ermittelt, in denen der Grenz-pH-Wert über- oder unterschritten wird. Anschließend werden die Gesamtbodenarten der Gemarkung Erda (vgl. Abb. 36 in Kap. 8.2) nach einem näherungsweisen Schlüssel von Will (1987) in die Bodenarten der bodenkundlichen Kartieranleitung 'KA3' (AG Bodenkunde 1982) übersetzt, an die neue Kartieranleitung 'KA4' (AG Bodenkunde 1994) angepasst und den Hauptbodenarten Ton, Schluff/Lehm und Sand zugewiesen.

Tab. 7 Klassifizierte Gesamtbodenarten im Untersuchungsgebiet Erda für Acker- und Grünlandnutzung (Will 1987), entsprechende Hauptbodenarten der Kartieranleitung 'KA4' (Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage (1994)) übersetzt nach Will (1987), Hauptbodenarten für die Klassifizierung der Vorsorgewerte für Cadmium und entsprechende Vorsorgewerte für Cadmium im Wirkungspfad Bodennutzpflanze in Abhängigkeit vom pH-Wert (Quelle: Verordnung zum Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchV vom 12. Juli 1999). In Klammern gesetzte Hauptbodenarten kennzeichnen entsprechende Gesamtbodenarten, die in dieser Klasse nur ein- bis zweimal vorkommen und flächenmäßig untergeordnet vertreten sind.

Gesamtbodenarten der Bodenschätzung	Übersetzte und angepasste Hauptbodenarten der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA3 u. KA4)	Hauptbodenarten der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4) für die Klassifizierung der Vorsorgewerte	Cadmium-Gehalt (in mg/kg Trockenmasse, Feinboden, Königswasser-aufschluss)
schwerer Lehm bis Ton (Moor)	(Lehm) / Ton	Ton	1,5 (bei pH < 6 = 1 mg/kg)
sandiger Lehm bis Lehm	Schluff / Lehm / (Ton)	Schluff / Lehm	1,0 (bei pH < 6 = 0,4 mg/kg)
lehmiger Sand bis stark lehmiger Sand Sand bis anlehmiger Sand	Sand / (Lehm)	Sand	0,4 mg/kg

Für die Erzeugung von einheitlichen Arealen zur flächenbezogenen Kennzeichnung der relativen Ausschöpfung von Cadmium-Vorsorgewerten werden die Informationsschichten mit den übersetzten, angepassten und klassifizierten Bodenarten, der Unter- oder Überschreitung

des Grenz-pH-Werts sowie den regionalisierten  $Cd_{KW}$ -Gehalten inhaltlich und geometrisch verschnitten. Anschließend werden die relativen positiven oder negativen Abweichungen der Vorsorgewerte von den regionalisierten  $Cd_{KW}$ -Klassengrenzen als Ausschöpfung der Vorsorgewerte ermittelt und flächenbezogen dargestellt.

## 4 Regionalisierung labiler Bodenkennwerte

In den folgenden Kapiteln 4.1 bis 4.5 werden die methodischen und inhaltlichen Ergebnisse der Regionalisierung des  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werts, des Gehalts an organischem Kohlenstoff und des EDTA-extrahierbaren Cadmium-Gehalts der Oberböden in den Untersuchungsgebieten Erda, Steinbrücken und Eibelshausen beschrieben. Die Abfolge der Teilergebnisse entspricht der Reihenfolge der Arbeitsschritte im methodisch-konzeptionellen Überblick in Kapitel 3.1. In Kapitel 4.6 wird als Fallbeispiel für die Anwendung der Regionalisierungsergebnisse die Ausschöpfung der Vorsorgewerte für Cadmium von landwirtschaftlich genutzten Oberböden der Gemarkung Erda ermittelt.

### 4.1 Erzeugung der Extrapolationsgrundlage

#### 4.1.1 Statistische Analyse der Datengrundlage zur Ermittlung der Indikatoren

Die Datenbasis für die varianzanalytische Ermittlung der Beziehungen zwischen bodenkundlich relevanten Standortfaktoren und dem  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert sowie dem  $\text{C}_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalt landwirtschaftlich genutzter Oberböden basiert auf Ergebnissen früherer Forschungsarbeiten, deren Daten aus Untersuchungsräumen stammen, die sich innerhalb oder in unmittelbarer Nachbarschaft der Untersuchungsgebiete dieser Arbeit befinden (Abb. 17 u. Tab. 45 bis Tab. 48 in Kap. 8.1). Damit ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass Indikator-Indikandum-Beziehungen, die aus diesen Datengrundlagen abgeleitet werden, auch für die Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda gültig sind. Als potentielle Indikatoren stehen in der Datenbasis die Reliefeigenschaften 'Exposition' und 'Inklination', die Nutzung, die Daten der Bodenschätzung und Informationen über die Bodentypen im Bereich der Beprobungsstandorte zur Verfügung. Alle bodenkundlichen Kennwerte der Datenbasis wurden an Proben aus Oberböden landwirtschaftlich genutzter oder brachgefallener Standorte erhoben.

Die ausgewählten Untersuchungsräume können in einen nördlich gelegenen Teilraum (Datensatz 'Nord') im Bereich der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen und in ein südliches Teilgebiet (Datensatz 'Süd') im Umfeld der Gemarkung Erda aufgeteilt werden (Abb. 17). Diese Unterteilung ist nicht nur räumlich, sondern auch inhaltlich plausibel, da zwischen den Teilräumen wesentliche Unterschiede bezüglich der jährlichen durchschnittlichen Niederschlagsmenge und der Landnutzung bestehen (vgl. Kap. 2.2). Diese Unterschiede

lassen Differenzen im Niveau der bodenkundlichen Kennwerte vermuten, die eine getrennte statistische Auswertung der Teilbereiche rechtfertigen.

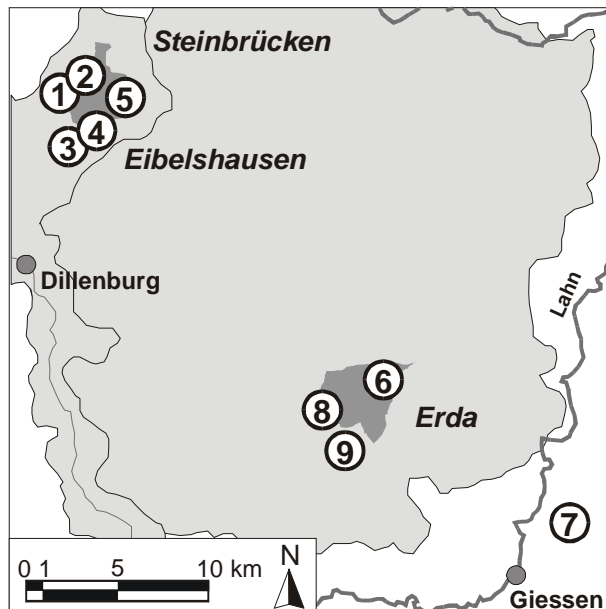


Abb. 17 Die Untersuchungsgebiete ① - ⑨ der Datenbasis für die Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen.

Der Vergleich einiger statistischer Lage- und Streuungsparameter der labilen bodenkundlichen Kennwerte der Datensätze 'Nord' und 'Süd' bestätigt für den  $C_{org}$ -Gehalt und  $pH_{CaCl_2}$ - bzw.  $pH_{KCl}$ -Wert einen großräumigen Trend, der sich in einem deutlichen Niveauunterschied und unterschiedlichen Spannweiten der Kennwerte niederschlägt.

Der Median der  $C_{org}$ -Gehalte für den Datensatz 'Nord' übertrifft denjenigen des Teilraums 'Süd' deutlich (Abb. 18). Die Messwerte des nördlichen Gebiets stammen überwiegend aus Oberböden extensiv genutzter Grünlandstandorte, die für diesen Bereich typisch sind und im Vergleich zu den Ackerstandorten, die im südlichen Teilraum größere Anteile der landwirtschaftlichen Nutzfläche beanspruchen, höhere  $C_{org}$ -Gehalte aufweisen. In Relation zum Datensatz 'Nord' ist im Teilraum 'Süd' die Spannweite der  $C_{org}$ -Gehalte geringer ausgeprägt. Allerdings stimmen die Interquartilabstände beider Datensätze auf unterschiedlichem Niveau nahezu überein.

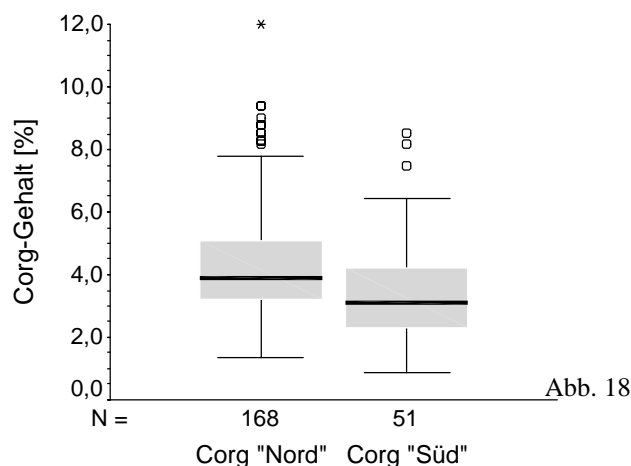


Abb. 18 Lage- und Streuungsmaße des  $C_{org}$ -Gehalts der Oberböden in den Teilräumen 'Nord' und 'Süd' (Legende: Abb. 4 in Kap. 3.2.1).

Im Rahmen der früheren Untersuchungen wurden die pH-Werte der Oberbodenproben im Teilgebiet 'Nord' in einer 1 mol/l KCl-Lösung und im Teilraum 'Süd' in einer 0,01 mol/l  $CaCl_2$ -Lösung als Suspensionsmittel gemessen. Im Vergleich zu der Messung in einer KCl-Lösung wird in einer  $CaCl_2$ -Lösung jedoch ein geringerer Teil der potentiellen Acidität erfasst. Daher sind die pH-Werte beider Teilräume nicht direkt vergleichbar. Auf der Grundlage vorliegender Ergebnisse von 66 Beprobungspunkten mit parallel für jede Probe ermittelten  $pH_{KCl}$ - und  $pH_{CaCl_2}$ -Werten landwirtschaftlich genutzter Oberböden der Gemarkung Erda ist es möglich, die methodisch bedingten pH-Unterschiede näherungsweise zu quantifizieren (vgl. Tab. 49 in Kap. 8.1). Demnach liegen die  $pH_{KCl}$ -Werte im Durchschnitt 0,2 pH-Einheiten unter den entsprechenden  $pH_{CaCl_2}$ -Werten. Um einen direkten Vergleich der pH-Werte der Teilräume 'Nord' und 'Süd' zu ermöglichen, werden die  $pH_{KCl}$ -Werte des Datensatzes 'Nord' auf der Grundlage dieser Ergebnisse daher um 0,2 pH-Einheiten angehoben.

Das 50. Perzentil der angepassten  $pH_{KCl}$ -Werte des nördlichen Teilraums wird vom Median der  $pH_{CaCl_2}$ -Werte des Teilraums 'Süd' um nahezu eine halbe pH-Einheit übertroffen (Abb. 19). Dieser Unterschied dürfte auf die intensivere landwirtschaftliche Nutzung in Verbindung mit Kalkungsmaßnahmen und/oder den Einsatz basisch wirkender Mineraldünger im südlichen Gebiet zurückzuführen sein. Die Spannweite und der Interquartilabstand sind im nördlichen Teilraum im Vergleich zum Gebiet 'Süd' geringer ausgeprägt. Als Ursache ist in erster Linie das niedrige pH-Niveau des Datensatzes 'Nord' anzusehen, da größere Schwankungen der pH-Werte in Relation zum Niveau der pH-Werte des Datensatzes 'Süd' erhebliche Änderungen der H-Ionenkonzentration erfordern.



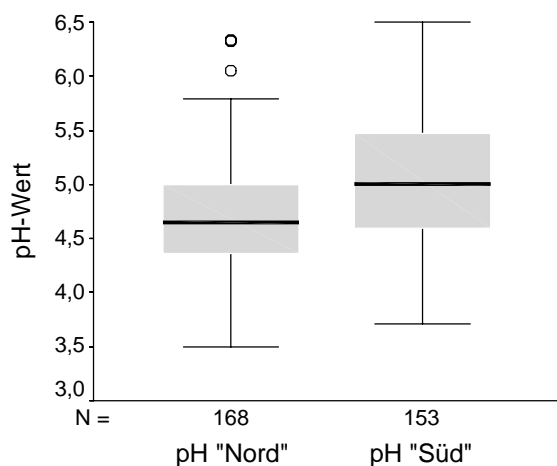


Abb. 19 Lage- und Streuungsmaße des um 0,2 pH-Einheiten angehobenen  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ -Werts und des  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werts der Oberböden in den Teilräumen 'Nord' und 'Süd' (Legende: Abb. 4 in Kap. 3.2.1).

Messwerte EDTA-extrahierbarer Cadmium-Gehalte liegen aus früheren Untersuchungen nur für Untersuchungsflächen der Gemarkung Erda und der Gemeinde Reiskirchen vor, die sich außerhalb der Untersuchungsregion befindet, so dass bezüglich dieses Schwermetalls auf Basis der vorliegenden Daten der beiden Gemarkungen über einen großräumigen Trend zwischen den Teilräumen 'Nord' und 'Süd' keine Aussagen gemacht werden können. Die Gehalte sind mit einem Median von 0,25 mg/kg bei einer Spannweite von 0,3 mg/kg jedoch als gering einzustufen (Abb. 20).

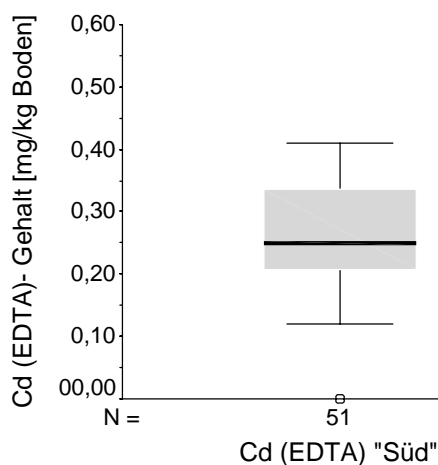


Abb. 20 Lage- und Streuungsmaße des  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalts der Oberböden im Teilraum 'Süd' (Legende: Abb. 4 in Kap. 3.2.1).

Für die Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen werden in einem ersten Auswahl-schritt aus der Datenbasis einige Standortfaktoren ausgewählt, die in beiden Datensätzen vorliegen, um mögliche varianzanalytisch zu ermittelnde Zusammenhänge zwischen den Standortfaktoren und den bodenkundlichen Kennwerten der Teilräume 'Nord' und 'Süd' vergleichen

zu können (Tab. 8). Angaben zum Bodentyp liegen im größeren Umfang nur für den Teilraum 'Nord' vor und werden daher für die statistische Analyse nicht berücksichtigt.

Tab. 8 Struktur der Datenbasis für die Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen.

Daten-satz	Nr. des Untersuchungsraums (vgl. Abb. 17)	Autor	Standortfaktoren (Indikatoren)	Bodenkundliche Kennwerte (In Klammern: Stichprobenumfang)
Nord	①	Borstel (1974)	Exposition, Inklination, Bodenschätzung, Nutzung	C <sub>org</sub> (67) pH <sub>KCl</sub> (67)
	② ③ ⑤	Räkers (1996)	Exposition, Inklination, Bodenschätzung, Nutzung	C <sub>org</sub> (90) pH <sub>KCl</sub> (90)
	④	Büring (1970)	Exposition, Inklination, Bodenschätzung, Nutzung	C <sub>org</sub> (11) pH <sub>KCl</sub> (11)
Süd	⑥	SFB 299 (a) (1997)	Exposition, Inklination, Bodenschätzung, Nutzung	C <sub>org</sub> (20) pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> (20) Cd <sub>EDTA</sub> (20)
	⑨	SFB 299 (b) (1997)	Nutzung	pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> (18)
	⑧	Sauer (1990)	Exposition, Bodenschätzung, Nutzung	pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> (83)
	⑦	Wappner (1995)	Nutzung	C <sub>org</sub> (31) pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> (31) Cd <sub>EDTA</sub> (31)

Die endgültige Auswahl geeigneter Indikatoren für die Erstellung der Raumeinheitenkarten erfordert zunächst die Aufstellung einer Reihe von Hypothesen über die Wirkung der in Tabelle 8 aufgelisteten Standortfaktoren auf die Intensität und räumliche Variabilität der bodenkundlichen Kennwerte, um mögliche Zusammenhänge varianzanalytisch nachweisen zu können (vgl. Kap. 3.2.1). Diese Hypothesen postulieren Beziehungen der Standortfaktoren zu den Bodenkennwerten in den Untersuchungsgebieten, die aus bodenkundlicher Sicht plausibel erscheinen:

- Die Realnutzung beeinflusst die Intensität und räumliche Verteilung des pH-Werts, des C<sub>org</sub>-Gehalts und des mobilisierbaren Cadmium-Gehalts durch die Art (Düngung, Kalkung, Ernteentzug) und Intensität (extensiv oder intensiv) der Bewirtschaftung.
- Morphometrische Reliefparameter, wie z.B. die Exposition oder Inklination, kennzeichnen unter Anderem Einstrahlungs- und Niederschlagsunterschiede, welche die räumliche Differenzierung von Standortfaktoren sowie die Art und Intensität bodenbildender Prozesse beeinflussen (u.a. Bodenwasser- und Wärmehaushalt, Mineralisation,

Humusakkumulation). Diese Unterschiede wirken sich auf den  $C_{\text{org}}$ -Gehalt und den pH-Wert sowie indirekt auf den potentiell mobilisierbaren Cadmium-Gehalt über pH- und  $C_{\text{org}}$ -Unterschiede aus.

- Die Bodenart (als Gesamtbodenart der Bodenschätzung) beeinflusst insbesondere über den Tongehalt die Schwermetallsorption und die Puffereigenschaften des Bodens.
- Die Zustands- oder Bodenstufe sowie die Wertezahlen der Bodenschätzung kennzeichnen den Entwicklungsstand eines Bodens (Solummächtigkeit, Durchwurzelbarkeit, Gründigkeit) bzw. mögliche Ertragsschwankungen, die z.B. durch Klima- oder Reliefunterschiede hervorgerufen werden. Sie sind daher integrative Kennwerte für die Beschreibung vieler Standortfaktoren, die labile Bodeneigenschaften beeinflussen.

Die Grünland- oder Grünlandgrundzahl und die Boden- oder Ackerzahl der Bodenschätzung, die als potentielle Indikatoren zur Verfügung stehen, werden nicht berücksichtigt, da es keinen Klassifizierungsvorschlag gibt, der eine gemeinsame Betrachtung der Wertezahlen für Acker- und Grünland ermöglicht. Das gleiche gilt für die Entstehungsart der Äcker und die Klima- oder Wasserstufe des Grünlands. Die Inklination und die Zustands- bzw. Bodenstufe liegt in der Datenbasis nur für wenige Fälle vor, so dass diese Faktoren für die weitere statistische Auswertung ebenfalls nicht berücksichtigt werden können.

Das Ergebnis dieses hypothetisch und inhaltlich begründeten zweiten Auswahlsschritts der Standortfaktoren beschränkt die weitere statistische Analyse auf die Indikatoren Expositionsrichtung, die Gesamtbodenart der Bodenschätzung sowie die Nutzungsformen Acker, Grünland und Brache.

Im Hinblick auf die Differenzierbarkeit der Faktorstufen und die Erfüllung der statistisch notwendigen Randbedingungen (vgl. Kap. 3.2.1) wird das Datenmaterial zunächst aufgearbeitet. Im ersten Schritt werden Ausreißer und Extremwerte der abhängigen Variablen aus den Datensätzen 'Nord' und 'Süd' entfernt. Anschließend erfolgt die Überprüfung der Häufigkeiten innerhalb der Faktorstufen der Indikatoren, um festzustellen, ob die Stichprobenumfänge für eine statistische Auswertung ausreichen.

Einige Expositionsclassen sind mit sehr wenigen oder keinen Fällen besetzt, so dass die Aggregation der in acht Classen vorliegenden Information zu einer süd- und einer nordexponierten Klasse notwendig ist (Tab. 9). Die unterschiedlichen Häufigkeiten innerhalb der Expositionsclassen resultieren aus der fragestellungsspezifischen Auswahl der Untersuchungsstandorte früherer Forschungstätigkeiten. Die Differenzen sind aber auch auf die Bevorzu-

gung expositionsbedingter Gunstlagen (Löbanwehung, Niederschlag, Einstrahlung) für die landwirtschaftliche Nutzung zurückzuführen.

Tab. 9 Häufigkeiten der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ - bzw.  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ -Werte,  $\text{C}_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte der Expositionsklassen und der Ebenen sowie die entsprechenden Häufigkeiten der aggregierten Expositionsklassen (südexponiert, nordexponiert und Ebene) für die Datensätze 'Nord' und 'Süd' (Klassifizierung gemäß AG Bodenkunde 1994).

Ursprüngliche Klassifizierung der Exposition	Anzahl der Fälle					Neue Klassifizierung der Exposition in Sonn- und Schatt-seite		Anzahl der Fälle				
Bezeichnung	'Nord'		'Süd'			Bezeichnung	Einteilung in Grad	'Nord'		'Süd'		
	pH	C <sub>org</sub>	pH	C <sub>org</sub>	Cd <sub>EDTA</sub>			pH	C <sub>org</sub>	pH	C <sub>org</sub>	Cd <sub>EDTA</sub>
Nord	12	12	8	5	5	nordexponiert	292,5-112,5	40	40	25	7	7
Nordost	6	6	7	2	2							
Ost	6	6	5	-	-							
Nordwest	16	16	6	-	-							
Südost	38	38	5	-	-	südexponiert	112,5-292,5	88	86	75	9	9
Süd	1	1	33	8	8							
Südwest	6	6	32	1	1							
West	43	41	4	-	-	Ebene	0	36	30	4	4	2
Ebene	38	30	4	4	2							
Summen	164	156	104	20	18			164	156	104	20	18

Die Bodenarten der Datenbasis entsprechen den mittleren Gesamtbodenarten der Bodenschätzung über eine Profiltiefe von einem Meter. Sie werden für Ackerstandorte in neun und für Grünlandbereiche in fünf Klassen unterteilt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden die Bodenarten für Acker und Grünland jedoch zu fünf Klassen gemäß eines Aggregierungsvorschlags von Will (1987) zusammengefasst (Tab. 10).

Tab. 10 Häufigkeiten der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  bzw.  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  -Werte,  $\text{C}_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte der aggregierten Gesamtbodenarten (Will 1987) für die Datensätze 'Nord' und 'Süd'.

Acker	Grünland	Aggregierte Bodenarten	Anzahl der Fälle				
			'Nord'		'Süd'		
			$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	$\text{C}_{\text{org}}$	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	$\text{C}_{\text{org}}$	$\text{Cd}_{\text{EDTA}}$
Sand (S) anlehmiger Sand (SI)	Sand (S)	Sand bis anlehmiger Sand	-	-	-	-	-
lehmiger Sand (IS) stark lehmiger Sand (SL)	lehmiger Sand (IS)	lehmiger Sand bis stark lehmiger Sand	93	91	83	10	10
sandige Lehm (sL) Lehm (L)	Lehm (L)	sandiger Lehm bis Lehm	57	49	17	6	6
schwerer Lehm (LT) Ton (T)	Ton (T)	schwerer Lehm bis Ton	-	-	1	1	1
Moor (Mo)	Moor (Mo)	Moor	-	-	-	-	-
<b>Summen</b>			<b>150</b>	<b>140</b>	<b>101</b>	<b>17</b>	<b>17</b>

Die Nutzungsformen Acker, Grünland und Brache werden in dieser Aufteilung für die Teilgebiete 'Nord' und 'Süd' beibehalten (Tab. 11).

Tab. 11 Häufigkeiten der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  bzw.  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  -Werte,  $\text{C}_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte der Nutzungsformen für die Datensätze 'Nord' und 'Süd'.

Nutzungsform	Anzahl der Fälle				
	'Nord'		'Süd'		
	$\text{pH}_{\text{KCl}}$	$\text{C}_{\text{org}}$	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	$\text{C}_{\text{org}}$	$\text{Cd}_{\text{EDTA}}$
Acker	62	65	99	15	14
Grünland	71	66	51	30	31
Brache	31	25	3	3	3
Summen	164	156	153	48	48

Im Anschluss an die Datenaggregation wird die Datenbasis auf die Erfüllung der Randbedingungen für die Anwendbarkeit der Varianzanalyse überprüft. Die Varianzhomogenität wird getrennt für alle Gruppen getestet, die sich aus der Kombination von zwei oder drei Standortfaktoren ergeben. Auf diese Weise ist feststellbar, welchen Einfluss die Berücksichtigung von zwei oder drei Standortfaktoren auf die Homogenität der Varianzen aller Gruppen hat. Diese Vorgehensweise ist darin begründet, dass bei der gemeinsamen Betrachtung aller

Faktoren in Relation zum Gesamtumfang der Datenbasis sehr viele Faktorstufengruppen auftreten können, so dass innerhalb dieser Gruppen mit geringen Häufigkeiten der bodenkundlichen Kennwerte zu rechnen ist. In diesem Fall muss das Untersuchungsdesign zugunsten einer zwei- oder einfaktoriellen Betrachtung der Abhängigkeiten geändert werden, um eine weitergehende varianzanalytische Auswertung der Wirkungszusammenhänge auf metrischem Skalierungsniveau zu ermöglichen.

Die Hypothese der Normalverteilung bzw. der Verteilungssymmetrie kann für alle Bodenkennwerte der Gebiete 'Nord' und 'Süd' bestätigt werden (Tab. 12). Die dreifaktorielle Varianzanalyse ist nicht angezeigt, da die Varianzen unter Berücksichtigung aller Faktoren innerhalb der Faktorengruppen zu unterschiedlich sind. Ein zweifaktorielles Design kann im Teilraum 'Nord' für die Untersuchung der Wirkungszusammenhänge vom  $C_{\text{org}}$ -Gehalt mit der Exposition in Kombination mit der Bodenart oder der Nutzung angewendet werden. Für das Gebiet 'Süd' kommt dieses Design für die gemeinsame Betrachtung der Exposition und Bodenart in Bezug auf den pH-Wert in Frage. Der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt kann mit der zweifaktoriellen Varianzanalyse für alle Faktorenkombinationen untersucht werden. Die Faktorengruppen des  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalts zeigen homogene Varianzen für die Kombinationen Exposition-Bodenart und Nutzung-Bodenart. Für das Teilgebiet 'Nord' kann der Einfluss der Bodenart auf den pH-Wert mit der einfaktoriellen Varianzanalyse untersucht werden. Im Gebiet 'Süd' besteht die Möglichkeit, mit diesem Verfahren Mittelwertunterschiede der Expositions-, Bodenarten- oder Nutzungsklassen bezüglich des pH-Werts und  $C_{\text{org}}$ -Gehalts festzustellen. Die Untersuchung von Gruppenunterschieden des  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalts ist mit der einfaktoriellen Varianzanalyse nur für die Exposition durchführbar. Für die übrigen Fälle, die im ein- bis dreifaktoriellen Design keine homogenen Varianzen zeigen, werden die Signifikanzniveaus auf dem Rangskalenniveau mit einer verteilungsfreien und nichtparametrischen Teststatistik (Kruskal-Wallis-Testverfahren), die nur für einfaktorielle Untersuchungsdesigns anwendbar ist, berechnet.

Tab. 12 Ergebnisse der statistischen Tests auf Varianzhomogenität der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  bzw.  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ -Werte,  $C_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte im ein-, zwei- und dreifaktoriellen Design sowie auf Normalverteilung bzw. Symmetrie der labilen bodenkundlichen Kennwerte [a) und b):  $\alpha = 5\%$ , c):  $g < 1$ ]. **Fett** dargestellte Signifikanzniveaus bedeuten, dass die Testkriterien in diesen Fällen erfüllt sind.

Untersuchungsdesign	Faktoren (-Kombinationen)	Varianzhomogenität <sup>a)</sup>					Normalverteilung <sup>b)</sup> / Symmetrie <sup>c)</sup>				
		'Nord'		'Süd'			'Nord'		'Süd'		
		pH	$C_{\text{org}}$	pH	$C_{\text{org}}$	$\text{Cd}_{\text{EDTA}}$	pH	$C_{\text{org}}$	pH	$C_{\text{org}}$	$\text{Cd}_{\text{EDTA}}$
dreifaktoriell	Exposition* Bodenart* Nutzung	0,029	0,010	0,045	0,020	0,010					
zweifaktoriell	Exposition* Bodenart	0,004	<b>0,260</b>	<b>0,298</b>	<b>0,053</b>	<b>0,383</b>					
	Exposition* Nutzung	0,001	<b>0,810</b>	0,025	<b>0,077</b>	0,006	<b>0,62</b> / <b>0,09</b>	<b>0,05</b> / <b>0,86</b>	<b>0,47</b> / <b>0,25</b>	<b>0,53</b> / <b>0,21</b>	<b>0,53</b> / <b>0,19</b>
	Nutzung* Bodenart	0,003	0,000	0,023	<b>0,292</b>	<b>0,205</b>					
einfaktoriell	Exposition	0,001	0,023	<b>0,620</b>	<b>0,278</b>	<b>0,105</b>					
	Bodenart	<b>0,397</b>	0,000	<b>0,128</b>	<b>0,417</b>	0,021					
	Nutzung	0,000	0,011	<b>0,183</b>	<b>0,455</b>	0,048					

Die varianzanalytischen Testergebnisse (Tab. 13) der beiden Datensätze können zu folgenden Aussagen über die Wirkung der Standortfaktoren Exposition, Bodenart und Nutzung auf den  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  bzw.  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ -Wert,  $C_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalt der Datensätze 'Nord' und 'Süd' zusammengefasst werden:

### 1. Datensatz 'Nord'

Der pH-Wert wird in seiner Intensität von der Exposition, Bodenart und Nutzung beeinflusst. Interaktionen der Standortfaktoren sind nicht nachweisbar. Der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt wird durch die gemeinsame Wirkung der Faktoren Exposition und Nutzung beeinflusst. Für die Exposition allein betrachtet kann ebenfalls eine Wechselwirkung mit dem organischen Kohlenstoffgehalt der Oberböden auf Basis der vorliegenden Daten nachgewiesen werden. Dieses gilt jedoch nicht für die Bodenart.

### 2. Datensatz 'Süd'

Der pH-Wert und der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt werden nur von der Nutzung beeinflusst. Auf den  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalt wirkt sich lediglich die Exposition aus.

Tab. 13 Signifikanzniveaus der empirischen F-Werte ( $\alpha = 5\%$ ) im ein- und zweifaktoriellen Design für die Faktoren und Faktorenkombinationen der Exposition, Bodenart und Nutzung als potentielle Einflussgrößen der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  bzw.  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ -Werte,  $C_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte der Datensätze 'Nord' und 'Süd'. Grau hinterlegte Felder im einfaktoriellen Untersuchungsdesign kennzeichnen Kombinationen von Faktoren und Bodenkennwerten mit heterogenen Varianzen der Faktorstufen. Für diese Fälle wird das asymptotische Signifikanzniveau ( $\alpha = 5\%$ ) mit dem nichtparametrischen Kruskal-Wallis-Test ermittelt (vgl. Tab. 12). **Fett** dargestellte Signifikanzniveaus bedeuten, dass die entsprechenden Testthesen erfüllt sind.

Untersuchungsdesign	Faktoren (-Kombinationen)	Signifikanzniveaus der empirischen F-Werte				
		'Nord'		'Süd'		
		$\text{pH}_{\text{KCl}}$	$C_{\text{org}}$	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	$C_{\text{org}}$	$\text{Cd}_{\text{EDTA}}$
zweifaktoriell	Exposition * Bodenart	-	0,847	0,539	0,997	0,237
	Exposition * Nutzung	-	<b>0,000</b>	-	0,597	-
	Nutzung * Bodenart	-	-	-	0,665	0,861
einfaktoriell	Exposition	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	0,183	0,455	<b>0,048</b>
	Bodenart	<b>0,000</b>	0,918	0,530	0,138	0,430
	Nutzung	<b>0,018</b>	0,096	<b>0,009</b>	<b>0,000</b>	0,059

Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass die Nutzung und Exposition auch in den Untersuchungsgebieten Steinbrücken, Eibelshausen und Erda den stärksten Einfluss auf die Intensität der bodenkundlichen Kennwerte haben. Ein möglicher Einfluss der Nutzung auf den mobilisierbaren Cadmium-Gehalt ist aus bodenkundlicher Sicht zwar anzunehmen, kann jedoch vermutlich aufgrund der geringen Stichprobenumfänge der vorliegenden Daten statistisch nicht nachgewiesen werden. Außerdem wären entsprechende Ergebnisse nur für den Datensatz 'Süd' gültig, so dass eine Übertragbarkeit der Resultate auf die nördlich gelegenen Untersuchungsgebiete Steinbrücken und Eibelshausen zusätzlich nachgewiesen werden müsste. Aufgrund dieser Unsicherheiten und zur Validierung des Regionalisierungsmodells wird daher die Gültigkeit der Extrapolationsgrundlagen (Raumeinheitenkarten) für die Gemarkungen in Kap. 4.4.1 varianzanalytisch überprüft.

#### 4.1.2 Vorbereitung der flächenhaften Datengrundlagen

Wie die in Kap. 4.1.1 dargestellten Ergebnisse zeigen, sind die Standortfaktoren Exposition, Bodenart und Nutzung geeignete Grundlagen für die Erstellung der Raumeinheitenkarten. Allerdings ist die Wirkung dieser Standortfaktoren auf die Variabilität der einzelnen Bodenkennwerte der Datenbasis uneinheitlich. Im nächsten Schritt werden die flächenhaft vorlie-



genden Indikatoren digitalisiert oder als digital vorliegender Datensatz beschafft und an die Erfordernisse für die nachbarschaftsanalytische Auswertung der Raumeinheitenkarten angepasst.

#### 4.1.2.1 Exposition

Das Digitale Höhenmodell ist die Grundlage der Expositionskarte und basiert auf photogrammetrischen Messungen von Höhendaten in Ortholuftbildern. Die Übertragung der Höheninformationen aus den Orthofotos in die digitale Punktinformation ist nicht immer fehlerfrei. Neben dem mittleren Höhenfehler treten häufig sogenannte Schleppfehler auf (Friedrichs 1996). Diese Schleppfehler entstehen an den Stoßstellen der streifenweise aufgenommenen Höhendaten der Stereo-Luftbildpaare. Sie äußern sich in einem vertikalen Versatz (Nord-Süd-Richtung) der Höheninformationen einzelner Partien innerhalb des DHM. Wird eine solche Datengrundlage für großmaßstäbige Untersuchungen ohne Korrektur übernommen, ist mit enormen Lagefehlern der Höheninformation zu rechnen, zumal durch das 40 m-Raster für großmaßstäbige Aussagen die Auflösung ohnehin stark eingeschränkt ist. Die Schleppfehler können mittels einer Tiefpass-Filterung abgeschwächt werden. Das Ziel dieser Filterung ist die Unterdrückung kurzweiliger Störeffekte innerhalb des DHM. Die Filterung erfolgt in einer 3\*3 Pixel-Matrix durch Mittelwertbildung der Werte innerhalb dieser Matrix. Die Wirkung dieser Filterung auf die Güte der Höheninformation ist anhand von Höhenlinien, die aus dem DHM abgeleitet werden, darstellbar.

In Abbildung 21 ist beispielhaft jeweils der gleiche Ausschnitt aus der Nutzungskarte (vgl. Abb. 38 in Kap. 8.2) der Gemarkung Erda abgebildet. Die Ausschnitte enthalten aus dem 40 m-DHM abgeleitete 10 m-Isohypsen. In Bild a) sind deutliche Verzerrungen der Höhenlinien zu erkennen. Bild b) zeigt die gleiche Situation, jedoch mit Isohypsen, die aus dem tiefpass-gefilterten Höhenmodell abgeleitet sind.

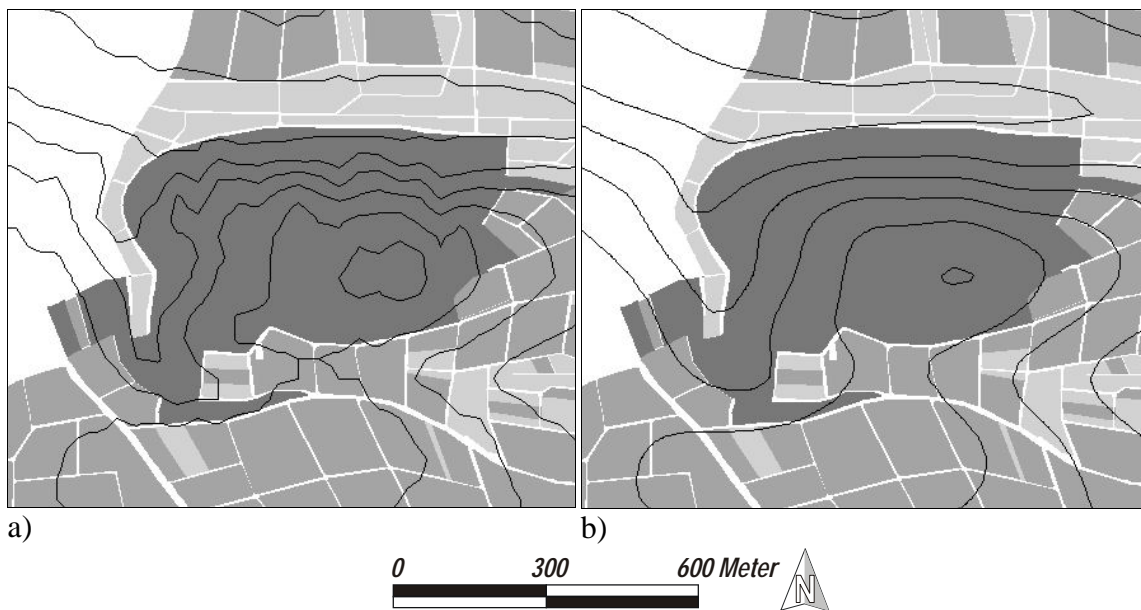


Abb. 21 10 m-Höhenlinien des a) ungefilterten und b) gefilterten Digitalen Höhenmodells der Gemarkung Erda (Ausschnitt). Im Hintergrund sind die Nutzung sowie das Wege- und Gewässernetz dargestellt.

Die Qualität der Filterung ist anhand der Höhenlinienverläufe der Topographischen Karte im Maßstab 1:25.000 (TK25, Blatt 5317 Rodheim-Bieber) überprüfbar. Werden die Höhenlinien des gefilterten Höhenmodells, nach entsprechender Maßstabsanpassung, mit der TK25 überdeckt, zeichnet sich eine hohe visuelle Übereinstimmung ab.

Für die Raumeinheitenkarten wird die Informationsschicht 'Exposition' in neun Klassen untergliedert, um eine feinere Differenzierung der räumlichen Aussage bezüglich der bodenkundlichen Kennwerte zu erhalten (vgl. Abb. 33 u. Abb. 34 in Kap. 8.2). Diese Vorgehensweise kann mit den Ergebnissen, die aus der Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehung hervorgehen und auf eine Einteilung der Exposition in drei Klassen beruhen, statistisch nicht begründet werden. Auf Basis der Ausgangshypothesen über die möglichen Indikator-Indikandum-Beziehungen (vgl. Kap. 4.1.1) ist allerdings für die Untersuchungsgebiete zu erwarten, dass bei einer genügend großen Stichprobe feinere Expositionsunterschiede durchaus einen statistisch nachweisbaren Effekt auf die Intensität der Bodenkennwerte haben können. Ein derartiger Klassifizierungsschritt führt nicht zu einer Scheingenauigkeit oder Verfälschung der regionalisierten Darstellung. Es ist lediglich damit zu rechnen, dass sich die notwendige Probenanzahl durch die Zunahme der Raumeinheitenanzahl vergrößert (vgl. Kap. 3.2.1).

Als 'Ebene' werden Gebiete bezeichnet, die eine Hangneigung von maximal zwei Grad aufweisen. Nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung 'KA4' (AG Bodenkunde 1994) handelt

es sich dabei um nicht oder sehr schwach geneigte Bereiche. Die Gültigkeit der räumlichen Zuordnung wird durch den stichprobenartigen Vergleich der Lage und Ausdehnung der abgeleiteten ebenen Bereiche mit den realen Verhältnissen im Gelände weitestgehend bestätigt. Die Spannweite und Klassengrenzen der Exposition entsprechen der Einteilung, die von der AG Bodenkunde (1994) vorgeschlagen wird (vgl. Tab. 9 in Kap. 4.1.1).

In Steinbrücken und Eibelshausen sind die Expositionsrichtungen zum Teil durch das in Nordsüd-Richtung angelegte Dietzhölzetal vorgegeben, so dass West- und Ostexpositionen mit zusammen etwa 61 % dominieren. 37 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche konzentrieren sich auf die westexponierten Gebiete, da große Teile der übrigen Gemarkungsfläche von Siedlungsbereichen eingenommen werden. Nicht unerheblich ist auch der Flächenanteil südexponierter Lagen, der etwa 21 % erreicht. Ebene Lagen betreffen circa 12 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche in den Gemarkungen und nordexponierte Bereiche 6 %.

Die Gemarkung Erda ist überwiegend durch Geländeformen gekennzeichnet, die in Westost-Richtung streichen und dementsprechend nach Süden oder Norden einfallen, so dass etwa 76 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche auf diese Bereiche entfallen, wobei Südlagen dominieren. 19 % der Fläche werden von ebenen Bereichen eingenommen, und lediglich 6 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche zeigen west- oder ostexponierte Lagen.

#### **4.1.2.2 Bodenart**

Die Gesamtbodenart der Bodenschätzung liegt in den Maßstäben 1:500 bis 1:2.500 in Form analoger Karten für die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche vor. Die Bodenschätzung der Gemarkung Erda stammt aus dem Jahr 1950. Für Eibelshausen erfolgte 1992 eine Nachschätzung und für Steinbrücken 1997. Die Gesamtbodenarten stellen Bezugswerte für Schätzungsflächen dar, die in Flurkarten eingetragen werden. Die Gesamtbodenarten ergeben sich aus der inhaltlichen Zusammenfassung der Befunde regelmäßig angeordneter Bohrungen von einem Meter Tiefe in einem 50 m-Raster. Die Grenzen der Schätzungsflächen orientieren sich häufig an Nutzungsgrenzen, Wegen und Gewässern. Allerdings werden diese landwirtschaftlich nicht nutzbaren Bereiche aus der geschätzten Fläche nicht ausgeschlossen. Für die Erstellung der Raumeinheitenkarten werden die Schätzungsgrenzen der Bodenschätzungskarten digitalisiert und zu fünf Klassen zusammengefasst (vgl. Tab. 10 in Kap. 4.1.1)

Für die Untersuchungsgebiete Steinbrücken und Eibelshausen sind auf Basis der aggregierten Bodenschätzung lediglich zwei Gesamtbodenarten zu unterscheiden. Knapp 48 % der land-

wirtschaftlich genutzten Fläche sind durch lehmige bis stark lehmige Sande gekennzeichnet. 52 % weisen Lehme bis sandige Lehme auf (Abb. 35 in Kap. 8.2). In der Gemarkung Erda herrschen ebenfalls lehmige bis stark lehmige Sande und Lehme bis sandige Lehme mit 41 % bzw. 52 % vor. In geringem Umfang wurden im Verlauf der Bodenschätzung auch Sande bis lehmige Sande (< 1 %), Moore (< 1 %) und schwere Lehme bis Tone (6 %) kartiert (Abb. 36 in Kap. 8.2).

#### 4.1.2.3 Realnutzung

Die Realnutzung der Landwirtschaftsfläche liegt - ebenso wie die Bodenschätzung - nur analog auf der Grundlage einer Flurkartenmontage im Maßstab 1:5.000 vor, so dass diese Informationsschicht ebenfalls digitalisiert wird. Die Informationen der Realnutzungskarten werden in die digitalen Bodenschätzungskarten der Untersuchungsgebiete übernommen, um auf diese Weise die ursprüngliche Lagegenauigkeit der Elemente der Flurkartenmontage zu erhöhen, so dass der Digitalisiermaßstab der Bodenschätzung von 1:500 bis 1:2.500 erreicht wird. Die Flurstücksgrenzen decken sich häufig mit den Außenlinien der Bodenschätzungseinheiten. Daher sind inhaltlich-räumliche Verzerrungen im Zuge der geometrischen Verschnittungsoperationen nahezu ausgeschlossen.

Die Realnutzung der landwirtschaftlichen Nutzfläche ist in sieben Klassen aufgeteilt (Tab. 14). Dazu kommen Waldbereiche, Siedlungsgebiete, Straßen, Wege und Gewässer, die zu einer Klasse zusammengefasst werden, da sie nicht zur Untersuchungsfläche gehören. Gartenland wird nicht berücksichtigt, da diese Bereiche in den meisten Fällen direkt an Siedlungsflächen grenzen und nicht als landwirtschaftliche Nutzungsflächen bezeichnet werden können.

Tab. 14 Ursprünglich kartierte Nutzungsformen und Nutzungsformen der digitalen Realnutzungskarte

Ursprünglich kartierte Nutzungsformen	Nutzungsformen der digitalen Realnutzungskarte
Acker Ackerbrache	Acker Ackerbrache
Grünland Grünlandbrache	Grünland Grünlandbrache
Streuobstwiese Feldgehölz	Streuobstwiese Feldgehölz
Gartenland	-
Wald, Siedlung, Straßen, Wege und Gewässer	nicht landwirtschaftlich genutzte Bereiche

Auf Grundlage der stark aggregierten Datenbasis ist ein Nachweis der Nutzungswirkung auf die Variation der labilen Bodenkennwerte nur für die Nutzungsformen Acker, Grünland und Brache möglich. Für die Informationsschicht 'Nutzung' der Raumeinheitenkarte wird jedoch eine Aufteilung in sieben Klassen vorgenommen (vgl. Tab. 14 sowie Abb. 37 und Abb. 38 in Kap. 8.2), da zu erwarten ist, dass sich auch eine feinere Nutzungsdifferenzierung nachweisbar auf die Variation der bodenkundlichen Kennwerte auswirkt und eine Verfälschung der Regionalisierungsergebnisse dadurch nicht eintritt (Kap. 3.2.1).

#### 4.1.2.4 Rasterweite

Die digitalen Informationsschichten 'Exposition', 'Bodenart' und 'Nutzung' besitzen bezüglich der Geometrien ein unterschiedliches Format (Raster oder Vektor). Außerdem ist die räumliche Auflösung und Lagegenauigkeit der Flächeninformationen uneinheitlich. Ziel ist es jedoch, alle Informationsschichten in ein einheitliches Rasterformat zu überführen, da die Berechnungsalgorithmen und die zur Verfügung stehende Software zur Ausweisung repräsentativer Probenahmestellen auf dieses Format abgestimmt sind und eine übereinstimmende Pixelgröße aller digitalen Datengrundlagen die Voraussetzung für die exakte geometrische und inhaltliche Verschneidung der Informationsschichten zu einer Raumeinheitenkarte ist. Des Weiteren wird eine möglichst hohe Auflösung der Extrapolationsgrundlage angestrebt, da die räumliche und inhaltliche Qualität der Aussagen über die bodenkundlichen Kennwerte für einen Planungsmaßstab von etwa 1:5.000 bis 1:10.000 gültig sein sollen.

Das Digitale Höhenmodell (DHM) der Landesvermessungsämter liegt im 40 m-Raster vor. Es ist damit bezüglich der räumlichen Auflösung die ungenaueste Datengrundlage für die Erstellung der Raumeinheitenkarten, da die Informationsebenen 'Nutzung' und 'Bodenart' für alle Untersuchungsgebiete als großmaßstäbige Vektordatensätze vorliegen. Geländestrukturen, die durch die Zuweisung einzelner Reliefeigenschaften aus den Höheninformationen abgeleitet werden, sind daher im Meterbereich nicht differenzierbar. Es besteht allerdings die Möglichkeit, mit geeigneten Interpolationsverfahren die Rasterweite zu verringern und auf Basis dieser Ergebnisse die Expositionsrichtungen abzuleiten (vgl. Kap. 4.2.1). Ob die auf dieser Grundlage erzeugte Expositionskarte jedoch geeignet ist, die reale Situation widerzuspiegeln, ist durch eine Geländeverifikation zu überprüfen. Als Kompromiss zwischen möglicher Scheingenauigkeit und Plausibilität bezüglich der realen Verhältnisse im Gelände und unter Berücksichtigung der Auflösung der übrigen Informationsschichten erweist sich für die

Untersuchungsgebiete eine Verringerung der Rasterweite auf 10 m als unterste zulässige Grenze. Die besten Ergebnisse werden dabei mit einer bilinearen Interpolation der Höheninformation erzielt.

Die digitalisierte Gesamtbodenart der Bodenschätzung und die Realnutzung in den Untersuchungsgebieten liegen im Vektorformat vor. Bezüglich der geometrischen Auflösung besteht eine Begrenzung demnach nur in der Digitalisierengenauigkeit und der Auflösung der verwendeten Datengrundlage. Da die Schätzungs- und Nutzungsgrenzen in Flurkarten mit Maßstäben zwischen 1:500 und 1:2.500 eingetragen sind, sind Abweichungen, die von Verzerrungen der Vorlage herrühren, für die erforderliche Auflösung unbedeutend. Unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Auflösung der Expositionskarte (vgl. Kap. 4.1.2.1) und des Betrachtungsmaßstabs von 1:5.000 bis 1:10.000 ist die Rasterung der beiden Informationsschichten auf 10 m als günstigster Kompromiss anzusehen.

Wie Abbildung 22 am Beispiel der Nutzungskarte der Gemarkung Erda zeigt, führt die Aufrasterung der Vektorkarten allerdings zu Lageungenauigkeiten. In der ursprünglichen Vektordarstellung (a) orientierensich die Grenzen der Nutzungstypen exakt an dem Verlauf der Wege und Gewässer. Nach der Aufrasterung der Vektorkarte (b) ist eine genaue räumliche Zuordnung der Bereiche entlang der linearen Elemente und angrenzenden Nutzungsformen nicht mehr möglich.

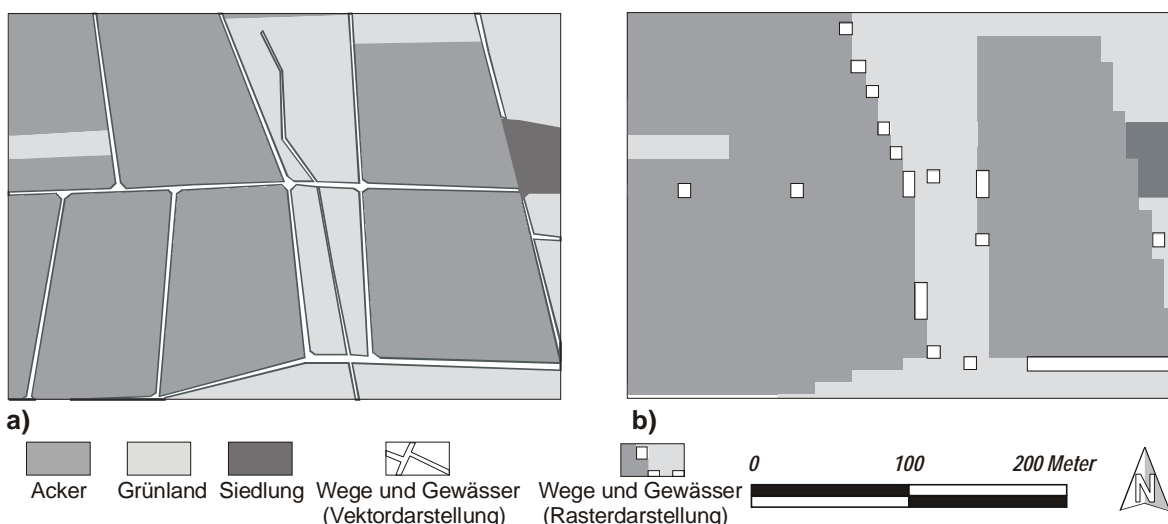


Abb. 22 Ausschnitt aus der Nutzungskarte der Gemarkung Erda einschließlich des Wege- und Gewässernetzes (Stand 1998). Bild a) zeigt die Nutzung in Vektordarstellung. In Bild b) ist die Realnutzung im 10 m-Raster dargestellt.

### 4.1.3 Ausweisung von Pufferzonen und nicht beprobaren Bereichen

Die Exposition und Gesamtbodenart wird in den Informationsschichten, die der Raumeinheitenkarte zugrunde liegen, in Klassen unterteilt. Beide Standorteigenschaften sind jedoch als kontinuierliche Faktoren zu betrachten, so dass im Übergangsbereich der Merkmale mit einer erhöhten Zuordnungsunsicherheit der Hangneigungsrichtung oder der Bodenart im Betrachtungsmaßstab von 1:5.000 bis 1:10.000 zu rechnen ist. Eine Beprobung in diesen Bereichen muss daher vermieden werden. Daher wird eine Pufferzone entlang der Flächengrenzen festgelegt. Die Breite des Übergangsbereichs wird auf zwei Rasterzellen begrenzt. Dieses entspricht in der Realität einem Abstand von 20 m. Eine weitere Verminderung dieser Distanz ist nicht angezeigt, da ansonsten die auf 10 m limitierte Auflösung der Expositionskarte unterschritten wird (vgl. Kap. 4.1.2.4). Eine Verbreiterung des Übergangsbereichs ist ebenfalls nicht sinnvoll, weil sonst der Bereich für die Lokalisierung potentieller Beprobungsstellen auf eine zu kleine Fläche eingeschränkt wird.

Die landwirtschaftliche Nutzfläche der Untersuchungsgebiete wird von zahlreichen Straßen, Feldwegen und Gewässerverläufen durchzogen, die für die Ausweisung repräsentativer Probenahmestellen nicht berücksichtigt werden dürfen. Daher werden diese nicht beprobaren Areale in die Pufferbereiche einbezogen (vgl. Abb. 23). Des Weiteren weichen entlang der Wege und Gewässer sowie im unmittelbaren Grenzbereich zu Siedlungsflächen die Bodenverhältnisse in einer Übergangszone mit hoher Wahrscheinlichkeit von den angrenzenden Flächen ab (vgl. Kap. 3.2.3), so dass eine Beprobung auch in diesen Bereichen vermieden werden muss. Da die Wege und Gräben in den Untersuchungsgebieten die landwirtschaftliche Nutzfläche in Areale unterteilen, die teilweise weniger als 50 m Durchmesser, haben würde eine Pufferzone von 20 m den beprobaren Raum zu stark einschränken. Daher wird die Entscheidung, ob eine Beprobung im Randbereich der Wege und Gewässerbereiche zulässig ist, im Einzelfall unter Berücksichtigung der Geländesituation getroffen.

Die geometrische Verschneidung der Pufferzonen der Informationsschichten 'Exposition' und 'Gesamtbodenart' mit dem Wege- und Gewässernetz führt zu einer Karte der nicht beprobaren Bereiche in den Untersuchungsgebieten (Abb. 23).

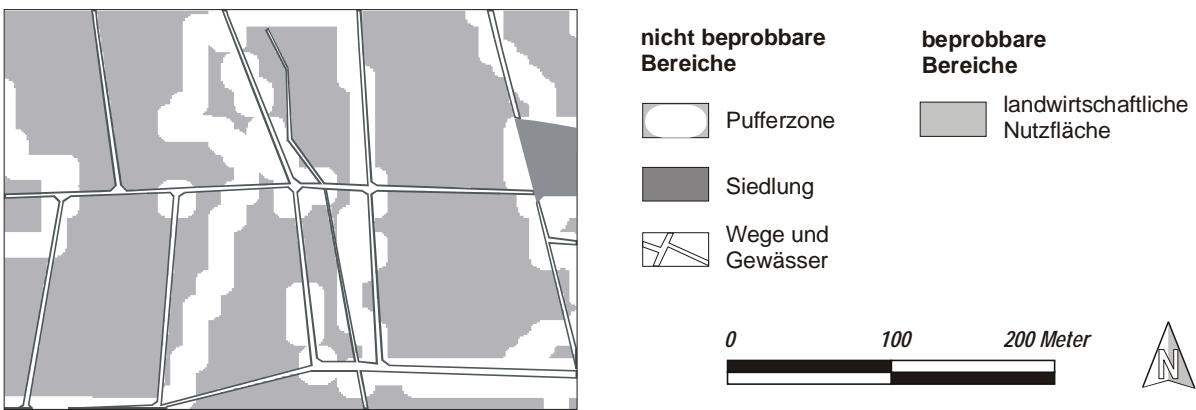


Abb. 23 Beprobbare und nicht beprobbare Bereiche der Gemarkung Erda (Ausschnitt). Dargestellt sind die Pufferzonen der Expositionsrichtungen und Gesamtbodenarten sowie die Wege, Gewässer und Siedlungsbereiche.

4.1.4 Erstellung der Raumeinheitenkarten

Durch die inhaltliche und geometrische Verschneidung der Informationsschichten 'Exposition', 'Bodenart' und 'Nutzung' werden die Raumeinheitenkarten als Grundlage für die Ausweisung der repräsentativen Probenahmestellen und die Extrapolation der bodenkundlichen Kennwerte erzeugt. Den Merkmalen jeder Informationsschicht wird ein Code zugewiesen, der jedes Element der Informationsschichten eindeutig kennzeichnet (Tab. 15). Durch die Kombination der Merkmalskodierungen ergibt sich für jede Raumeinheit eine dreistellige Ziffer, die die Merkmalskombination der Standortfaktoren beschreibt. Die Bezeichnung 137 bedeutet beispielsweise: nordexponierte Bereiche (1 = Nord), sandiger Lehm bis Lehm (sL-L = 3), Feldgehölz (7).

Tab. 15 Merkmalskodierung der Informationsschichten 'Exposition', 'Bodenart' und 'Nutzung'.

Exposition	Kode	Bodenart	Kode	Nutzung	Kode
Nord	1	S - SI	1	Acker	1
Nord - Ost	2	IS - SL	2	Ackerbrache	2
Ost	3	sL - L	3	Grünland	3
Süd - Ost	4	LT - T	4	Grünlandbrache	4
Süd	5	Mo	5	Gartenland	-
Süd - West	6			Streuobst	6
West	7			Feldgehölz	7
Nord - West	8				
Ebene (1 - 2°)	9				



Für die Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen ergeben sich durch die Verschneidung der Exposition, der Bodenart und der Nutzung insgesamt 59 bzw. 73 unterschiedliche Raumeinheiten ausschließlich der Kombinationen mit der Nutzungsform 'Gartenland'. Unter Berücksichtigung des kumulativen Flächenanteils von etwa 96 % an der Gesamtfläche reduziert sich die Anzahl zu beprobender Raumeinheiten für das Untersuchungsgebiet Steinbrücken auf 30 und für die Gemarkung Eibelshausen auf 37 Raumeinheiten.

In Steinbrücken beanspruchen einige wenige Merkmalskombinationen einen großen Teil der Gesamtfläche (Tab. 16). Nahezu 4/5 der Raumeinheitenfläche werden von Grünland mit wechselnden Bodenarten in unterschiedlichen Expositionslagen eingenommen. Als einheitliche Merkmalskombination sind ebene, grünlandgenutzte Bereiche auf sandigem Lehm bis Lehm dominierend. Die restlichen 10 % der Fläche bestehen aus zahlreichen Kombinationen unterschiedlicher Expositionsrichtungen, Bodenarten und Nutzungsformen.

Tab. 16 Raumeinheitenkode und relativer Flächenanteil [%] der einzelnen Raumeinheiten (96 %) an der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Steinbrücken.

Raumeinheiten- kode	relativer Flächen- anteil [%]	Raumeinheiten- kode	relativer Flächen- anteil [%]	Raumeinheiten- kode	relativer Flächen- anteil [%]
933	15,7	423	3,1	527	0,7
433	11,7	823	2,2	326	0,7
523	10,6	123	2,1	424	0,6
733	8,0	522	1,8	734	0,6
723	7,5	633	1,7	521	0,5
333	7,4	724	1,5	727	0,5
533	3,8	324	1,4	336	0,5
133	3,8	833	1,3	824	0,4
623	3,6	323	1,3	624	0,4
524	3,4	726	1,3	836	0,3

In Eibelshausen dominieren südexponierte Lagen mit Grünlandnutzung auf sandigem Lehm bis Lehm, gefolgt von ebenen Lagen der gleichen Bodenart und Nutzung (Tab. 17). Da in Eibelshausen wie auch in Steinbrücken die Grünlandnutzung überwiegt, stellen über die Hälfte der nachfolgenden Raumeinheiten Kombinationen dieser Nutzungsform mit unterschiedlichen Bodenarten und Hangneigungsrichtungen dar.

Tab. 17 Raumeinheitencode und relativer Flächenanteil [%] der einzelnen Raumeinheiten (96 %) an der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Eibelshausen.

Raumeinheiten- kode	relativer Flächen- anteil [%]	Raumeinheiten- kode	relativer Flächen- anteil [%]	Raumeinheiten- kode	relativer Flächen- anteil [%]
533	13,7	423	2,3	223	0,9
933	9,9	424	2,2	527	0,7
433	8,5	624	2,2	621	0,6
823	7,3	824	2,1	827	0,6
733	5,7	724	2,1	522	0,5
623	4,6	633	1,9	434	0,5
723	4,5	124	1,4	821	0,5
523	3,3	726	1,3	324	0,5
833	3,0	721	1,2	233	0,5
123	2,6	133	1,2	521	0,4
333	2,6	534	1,2	734	0,3
524	2,5	627	1,2		
323	2,4	731	1,2		

Die landwirtschaftliche Nutzfläche der Gemarkung Erda umfasst insgesamt 120 unterschiedliche Raumeinheiten. Werden für die Regionalisierung der bodenkundlichen Kennwerte diejenigen Raumeinheiten berücksichtigt, deren kumulativer Flächenanteil etwa 96 % an der gesamten Raumeinheitenfläche beträgt, reduziert sich die Raumeinheitenanzahl um circa 64 % auf 43 zu beprobende Raumeinheiten.

Die Verteilung der Merkmalskombinationen unterscheidet sich in Erda stark von derjenigen der anderen beiden Untersuchungsgebiete, da Acker- und Grünlandstandorte etwa zu gleichen Teilen vorkommen, so dass die Variation der Merkmalskombinationen in erster Linie durch unterschiedliche Expositionsrichtungen und Bodenarten hervorgerufen wird (Tab. 18). Südexponierte Äcker auf lehmigen bis stark lehmigen Sanden überwiegen flächenmäßig. 1/5 der landwirtschaftlichen Nutzfläche stellen grünlandgenutzte Bereiche unterschiedlicher Exposition oder ebener Lage auf sandigen Lehm bis Lehm dar.

Tab. 18 Raumeinheitenkode und relativer Flächenanteil [%] der einzelnen Raumeinheiten (96 %) an der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Erda.

Raumeinheiten- kode	relativer Flächen- anteil [%]	Raumeinheiten- kode	relativer Flächen- anteil [%]	Raumeinheiten- kode	relativer Flächen- anteil [%]
521	15,7	523	1,7	541	0,6
933	8,7	431	1,7	733	0,6
533	6,7	623	1,6	333	0,5
133	5,5	721	1,6	823	0,4
621	5,3	331	1,6	723	0,4
531	4,9	123	1,4	643	0,4
231	4,6	821	1,3	941	0,4
131	4,5	831	1,3	526	0,4
233	4,1	631	1,1	243	0,4
931	3,7	421	1,1	143	0,3
943	2,7	223	1,0	433	0,3
221	2,6	923	1,0	236	0,2
921	2,5	321	0,8	423	0,2
633	2,2	543	0,7		
121	1,9	833	0,6		

Das folgende Beispiel (Abb. 24) zeigt zur Verdeutlichung der kleinräumig wechselnden Standortverhältnisse in den Untersuchungsgebieten einen Ausschnitt aus der Raumeinheitenkarte der Gemarkung Erda. Es sind fünf Raumeinheiten in südexponierter Lage abgebildet. Die Nutzungsformen sind Äcker und Grünlandbereiche auf lehmigen Sanden bis Tonen. Innerhalb des Ausschnittes wird die Raumeinheit mit der Merkmalskombination 523 bereits durch acht Einzelflächen repräsentiert. Raumeinheit 531 besteht aus vier Einzelflächen, 533 ebenfalls aus vier, 521 aus zwei und Raumeinheit 543 aus einer Einzelfläche.

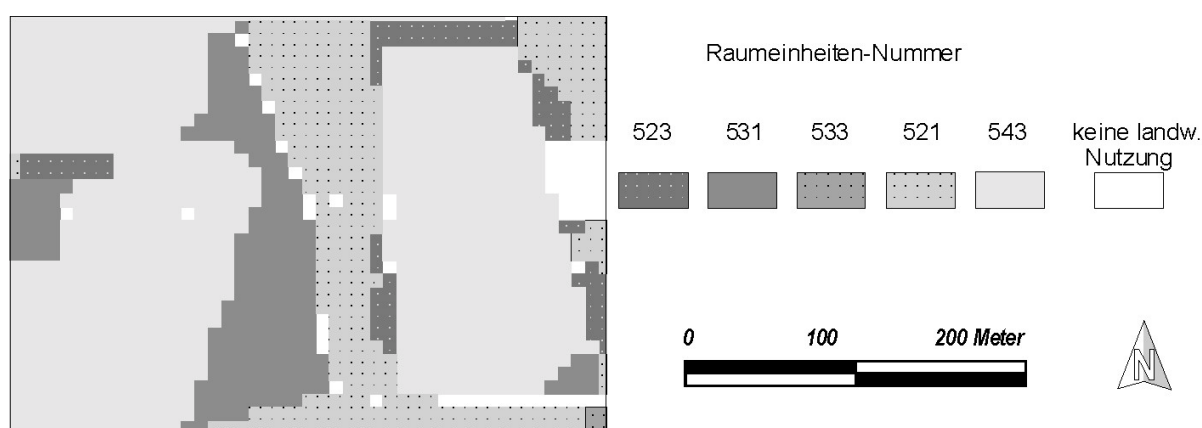


Abb. 24 Raumeinheitenkarte der Gemarkung Erda (Ausschnitt).

## 4.2 Erhebung der labilen Bodenkennwerte

### 4.2.1 Ermittlung repräsentativer Probenahmestellen

Zunächst wird die Größe des Nachbarschaftsraum (*range*) festgelegt, innerhalb dessen die Vergesellschaftungsstrukturen der Raumeinheiten für jede Rasterzelle berechnet werden. Die Größe des *range* wird aus der Lagekorrelation von Repräsentanzindices für verschieden große Nachbarschaftsräume ermittelt (vgl. Kap. 3.3.1). Die Schwellenwerte der Lagekorrelation (vgl. Abb. 9) werden für alle Untersuchungsgebiete bei einem *range* von fünf Rasterzellen erreicht.

Anschließend werden die Erwarteten Nachbarschaften (vgl. Kap. 3.3.2) für die Merkmale innerhalb jeder Informationsschicht der Raumeinheitkarten ermittelt und zu einer Nachbarschaftsmatrix zusammengestellt. Die Nachbarschaften werden für die Expositions-, Bodenart- und Nutzungsschicht getrennt berechnet, damit die einzelnen Faktoren mit dem gleichen Gewicht in die Berechnung der Multidimensionalen Repräsentanzindices eingehen. In Tabelle 19 ist exemplarisch eine Nachbarschaftsmatrix für die Raumeinheit mit der Merkmalskombination 523 der Gemarkung Erda aufgeführt (vgl. Abb. 24). Die einzelnen Erwarteten Nachbarschaften der Merkmale jeder Informationsschicht sind als relative Anteile an der Summe aller Nachbarschaften in Prozent angegeben und beziehen sich auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche der Gemarkung.

Tab. 19 Prozentuale Anteile der Erwarteten Nachbarschaften 'EN' für jede Merkmalsausprägung der Informationsschichten 'Exposition', 'Gesamtbodenart' und 'Nutzung' der Raumeinheit 523 (Exposition 5: Süd, Gesamtbodenart 2: lehmiger Sand bis stark lehmiger Sand, Nutzung 3: Grünland). Grau hinterlegt ist der positiv autokorrelative Anteil (Eigenvergesellschaftung) des jeweiligen Merkmals der Raumeinheit. Merkmal '0' entspricht Rasterzellen ohne Information (Wege, Gewässer, Siedlung und Wald).

Merkmalsausprägung 5 der Expositionsrichtungsklasse										
Nachbar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
EN [%]	0,002	-	-	1,426	78,263	8,394	0,002	-	0,694	11,219
Merkmalsausprägung 2 der Gesamtbodenartenklasse										
Nachbar	1	2	3	4	5	0				
EN [%]	0,047	72,024	15,479	1,228	0,047	11,219				
Merkmalsausprägung 3 der Nutzungsformenklasse										
Nachbar	1	2	3	4	6	7	0			
EN [%]	29,350	0,348	57,253	0,451	1,379	-	11,219			

Die Raumeinheit mit der Merkmalskombination 523 zeigt bezüglich der Exposition einer Eigenvergesellschaftung von etwa 78,3 %. Bei der Bodenart sind es circa 72 % und bei der

Nutzung 57,3 %. Eine nennenswerte Nachbarschaft der Expositionsrichtung 'Süd' besteht für diese Raumeinheit mit rund 8,4 % nur zu südwest-exponierten Lagen, da ein 'Überspringen' von Expositionsclassen in Reliefsituationen, wie sie für die Untersuchungsgebiete vorliegen, nicht möglich ist. Bei der Bodenart liegt die höchste Fremdnachbar-Vergesellschaftung mit der Klasse 2 vor (15,5 %). Aus bodenkundlicher Sicht ist dieser Umstand plausibel, da 'Fraktionssprünge' in Mittelgebirgslandschaften mit vergleichsweise einheitlichen Ausgangsgesteinen der Bodenbildung unwahrscheinlich sind. Aber auch aufgrund der geringen Flächenanteile anderer Bodenarten in der Gemarkung ist eine nennenswerte Vergesellschaftung mit der Gesamtbodenart der Raumeinheit 523 nicht wahrscheinlich. Die Nutzungsform 'Grünland' zeigt in der Beispielraumeinheit mit etwa 29,4 % den größten Vergesellschaftungsanteil zu Ackerflächen, die im Untersuchungsgebiet Erda ungefähr 54 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche einnehmen. Fremdnachbar-Beziehungen mit anderen Nutzungsformen sind aufgrund der geringen Flächenanteile nur mit einem Anteil von etwa 2,2 % vorhanden. Die Vergesellschaftung mit Rasterpunkten ohne Information beträgt für alle Merkmale der Raumeinheit rund 11,2 %, da es für Bereiche ohne Daten keine Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Merkmalen geben kann.

Für die Berechnung der Repräsentanzindices werden die Erwarteten Nachbarschaften mit der Summe der Realnachbarschaftsvektoren jedes Merkmals in Beziehung gesetzt. Das Ergebnis dieser Berechnungen sind Listen der Repräsentanzindices mit den entsprechenden geographischen Koordinaten für jede Informationsschicht der Raumeinheitenkarte. Das arithmetische Mittel der Indices mit übereinstimmenden Koordinaten ergibt den Multidimensionalen Repräsentanzindex (MNR). Für die Ausweisung repräsentativer Probenahmestellen werden für jede Raumeinheit zunächst 100 MNR's berechnet, so dass eine genügend große Anzahl repräsentativer Probenahmestellen zur Verfügung steht. Tabelle 20 zeigt für die Raumeinheit 523 einen Auszug aus einer solchen Liste, die von dem Programm STABO (Recher & Schmotz 1993) generiert wird. Die Tabellenzeilen sind absteigend nach den MNR's sortiert. Das Koordinatenpaar mit dem höchsten Multidimensionalen Repräsentanzindex kennzeichnet in diesem Beispiel die repräsentativste Probenahmestelle für die Raumeinheit 523 unter Berücksichtigung der RI's aller Informationsschichten.

Tab. 20 Auszug aus der RI-Tabelle der Gemarkung Erda für die Raumeinheit mit der Merkmalskombination 523 (Exposition (5): Süd, Gesamtbodenart (2): lehmiger Sand bis stark lehmiger Sand, Nutzung (3): Grünland).

Rechtswert [m]	Hochwert [m]	RI für die Merkmalsausprägung '5' der Informationsschicht 'Exposition'	RI für die Merkmalsausprägung '2' der Informationsschicht 'Bodenart' '	RI für die Merkmalsausprägung '3' der Informationsschicht 'Nutzung'	MNR der Raumeinheit 523
34654,85	56165,45	0,980597	0,831574	0,908232	0,888697
34672,35	56163,25	0,981800	0,835601	0,873857	0,879902
34671,95	56166,25	0,982064	0,839962	0,781345	0,843216
...	...	...	...	...	...

Die Indices werden georeferenziert und mit der Karte der nicht beprobaren Bereiche verschnitten (vgl. Kap. 3.2.3). Auf diese Weise bleibt eine Anzahl MNR's übrig, die potentiell beprobare Standorte darstellen.

#### 4.2.2 Berechnung des Stichprobenumfangs

Für die Berechnung der optimalen Stichprobenumfänge müssen die Vergesellschaftungsstrukturen der Raumeinheiten bekannt sein (vgl. Kap. 3.3.3). Die Beziehungsmuster der einzelnen Informationsschichten sind bereits im Zuge der RI-Berechnung ermittelt und in Form von Nachbarschaftsmatrizen operationalisiert worden. Allerdings sind die Erwarteten Nachbarschaften dieser Matrizen nicht geeignet, die Vergesellschaftungsstrukturen der Raumeinheiten insgesamt zu beschreiben, da sie lediglich die Basis für die Berechnung der RI's bilden, die ihrerseits nur für einzelne Rasterpunkte innerhalb der Raumeinheiten raumstrukturelle Aussagen zulassen. Daher wird für jede Raumeinheit als Ganzes der Anteil der positiven Autokorrelation berechnet. Die Anzahl der Einzelflächen und der relative Flächenanteil der Raumeinheiten an der gesamten landwirtschaftlich nutzbaren Fläche wird aus den Raumeinheitenkarten abgeleitet und zusammen mit den positiv autokorrelativen Anteilen wird die minimal notwendige Probenanzahl ermittelt (Tab. 21).

Tab. 21 Anzahl der Probenahmestellen für die landwirtschaftliche Nutzfläche der Untersuchungsgebiete Steinbrücken, Eibelshausen und Erda.

Steinbrücken				Eibelshausen				Erda			
Raum- einheit	Proben- anzahl	Raum- einheit	Proben- anzahl	Raum- einheit	Proben- anzahl	Raum- einheit	Proben- anzahl	Raum- einheit	Proben- anzahl	Raum- einheit	Proben- anzahl
933	6	424	1	533	4	133	1	521	9	831	1
433	3	734	1	933	4	534	1	933	9	631	1
523	2	521	1	433	5	627	1	533	6	421	1
733	3	727	1	823	2	731	1	133	5	223	1
723	3	336	1	733	4	223	1	621	3	923	2
333	2	824	1	623	2	527	1	531	5	321	1
533	2	624	1	723	2	621	1	231	4	543	1
133	2	836	1	523	2	827	1	131	4	833	1
623	2			833	1	522	1	233	4	541	1
524	1			123	2	434	1	931	3	733	1
423	1			333	2	821	1	943	3	333	1
823	2			524	2	324	1	221	2	823	1
123	1			323	1	233	1	921	2	723	1
522	1			423	2	521	1	633	2	643	1
633	1			424	1	734	1	121	2	941	1
724	2			624	1			523	3	526	1
324	1			824	1			431	1	243	1
833	2			724	1			623	2	143	1
323	1			633	2			721	1	433	1
726	2			124	1			331	1	236	1
527	1			726	1			123	2	423	1
326	1			721	1			821	1		
<b>Summen</b>		<b>30</b>	<b>50</b>			<b>37</b>	<b>59</b>			<b>43</b>	<b>96</b>

#### 4.2.3 Geländeverification der Standortfaktoren und Beprobung

Der Beprobung in den Untersuchungsgebieten geht die Überprüfung der Standortfaktorenkonstellation und -merkmale voraus, die für die jeweiligen Raumeinheiten gültig sind (vgl. Kap. 3.4.2). In wenigen Fällen weichen die tatsächlichen Verhältnisse im Gelände von den in den Raumeinheitenkarten dargestellten Merkmalskombinationen und Merkmalsausprägungen im Bereich der Probenahmestellen ab. In diesen Fällen wird aus der Liste der Repräsentanzindices die nächst repräsentative Probenahmestelle der jeweiligen Raumeinheit ausgewählt und die Geländesituation erneut überprüft. Erst wenn die tatsächliche Faktorenkombination mit der in der Raumeinheitenkarte dargestellten Konstellation übereinstimmt, wird eine Oberbodenprobe entnommen (vgl. Tab. 53 bis Tab. 58 in Kap. 8.1 sowie Abb. 39 u. Abb. 40 in Kap. 8.2).

In den Untersuchungsgebieten entspricht die ausgewiesene Exposition im Bereich der repräsentativen Probenahmestellen in einzelnen Fällen nicht den realen Verhältnissen, da Gebiete,

die in der Realität keine Hangneigung aufweisen, in den Raumeinheitenkarten als geneigte Bereiche dargestellt sind. Hier werden die Grenzen der Auflösung des Höhenmodells deutlich. Eine Verbesserung der Situation wäre bei diesem Betrachtungsmaßstab nur durch die Verfügbarkeit eines DHM besserer Qualität erreichbar.

Erwartungsgemäß sind bezüglich der Nutzung kaum Abweichungen festzustellen, da dieser Indikator im Jahr vor der Beprobung detailliert kartiert wurde. Allerdings verhinderten teilweise gestörte Oberbodenverhältnisse und Überbauungen, wie zum Beispiel Stallgebäude, die aus den vorliegenden Nutzungskarten nicht ersichtlich sind, eine repräsentative Beprobung. Da in den Untersuchungsgebieten auf die Grünlandbereiche häufig Schafherden getrieben werden, ist die Bodenoberfläche zum Zeitpunkt der Beprobung teilweise mit Fäkalien bedeckt. In diesen Fällen ist eine Beprobung zur Erhebung der labilen bodenkundlichen Kennwerte ebenfalls nicht möglich, so dass auf andere Beprobungsstandorte ausgewichen werden muss. In den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen sind die Oberböden an manchen Stellen mit metallhaltigen Schlacken aus der Erzverhüttung verunreinigt. In Eibelshausen ist das Teilstück einer ehemaligen Landstraße mit Oberbodenmaterial überschoben worden, so dass Asphaltstücke den Oberboden durchsetzen und eine Beprobung daher nicht sinnvoll ist.

Die im Gelände per Fingerprobe geschätzten und gemittelten Bodenarten im 1 m-Profil im Bereich der repräsentativen Probenahmestellen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den zuvor in die bodenkundliche Nomenklatur übersetzten Gesamtbodenarten der Raumeinheitenkarte (vgl. Tab. 7 in Kap. 3.6.2). Für die Böden der Auenbereiche werden jedoch stellenweise tonige Substrate in der Bodenschätzung angeben, obwohl diese in der Realität nur geringe Tongehalte aufweisen. Vermutlich hat der hohe Wassergehalt der Standorte während der Ermittlung der Ertragsfähigkeit im Rahmen der Bodenschätzung zu einer Überbewertung der Tonfraktion geführt (Sauer 2000). Da in den Raumeinheitenkarten flächenmäßig zwei Gesamtbodenartenklassen mit einer sehr großen Spannweite überwiegen und nur eine sehr geringe Beziehung der Bodenarten zu den labilen bodenkundlichen Kennwerten statistisch nachweisbar ist (vgl. Kap. 4.1.1), wirkt sich diesbezüglich eine Fehlinterpretation der Geländebefunde auf die Regionalisierungsergebnisse kaum negativ aus.



### 4.3 Ergebnisse der Laboranalysen

#### 4.3.1 $C_{org}$ -Gehalt

Der Median der  $C_{org}$ -Gehalte in den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen übertrifft denjenigen der Gemarkung Erda deutlich (Abb. 25). Die geringen Nutzungsintensitäten in Steinbrücken und Eibelshausen, mit fast ausschließlich extensiver Grünlandnutzung im Vergleich zur großflächig intensiven Ackernutzung in Erda, sind für diese Unterschiede ausschlaggebend (vgl. Abb. 37 u. Abb. 38 in Kap. 8.2). Die Ergebnisse stimmen mit den Resultaten der statistischen Analyse des Gebietsvergleichs in Kapitel 4.1.1 überein, so dass die Plausibilität der Aufteilung in die Teilräume 'Nord' und 'Süd' zur Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen bezüglich dieses labilen Bodenkennwertes bestätigt wird. Entgegen dem Trend der sich in den Datensätzen 'Nord' und 'Süd' abzeichnet, sind die Spannweiten der  $C_{org}$ -Gehalte in den nördlichen Untersuchungsgebieten Steinbrücken und Eibelshausen im Vergleich zu Erda im Süden der Untersuchungsregion geringer. Diese Unterschiede sind ebenfalls auf die dominierende Grünlandnutzung in Steinbrücken und Eibelshausen mit wenigen extensiv genutzten Äckern, die relativ hohe  $C_{org}$ -Gehalte aufweisen, zurückzuführen. Niedrige  $C_{org}$ -Gehalte treten nur in Oberböden der intensiv genutzten Äcker in Erda auf.

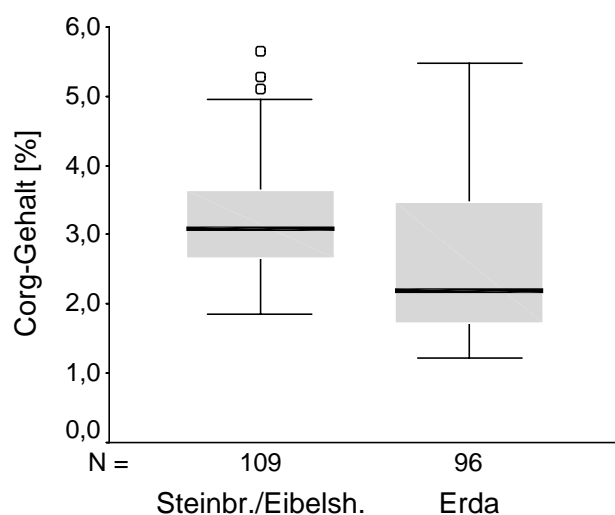


Abb. 25 Median, Spannweite, Interquartilabstand, Ausreißer und Extremwerte der  $C_{org}$ -Gehalte von Oberbodenproben (0-20 cm) in den Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda (*Legende:* Abb. 4 in Kap. 3.2.1).

#### 4.3.2 pH-Wert

Der pH-Median der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen liegt wesentlich unter dem 50. Perzentil der Gemarkung Erda (Abb. 26). Die Spannweite und der Interquartilbereich sind im Vergleich zum Untersuchungsgebiet deutlich geringer ausgeprägt. Diese Differenzen sind

aus den gleichen Gründen, die für die  $C_{\text{org}}$ -Unterschiede verantwortlich sind, erklärbar und decken sich weitestgehend mit den Ergebnissen der deskriptiv statistischen Analyse der Datenbasis zur Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen (Kap. 4.1.1).

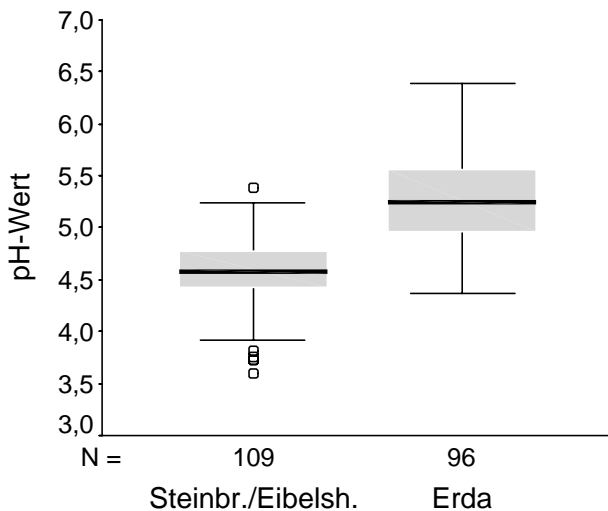


Abb. 26 Median, Spannweite, Interquartilbereich, Ausreißer und Extremwerte der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte von Oberbodenproben (0-20 cm) in den Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda (*Legende*: Abb. 4 in Kap. 3.2.1).

### 4.3.3 EDTA-extrahierbarer Cadmium-Gehalt

Das 50. Perzentil der EDTA-extrahierbaren Cadmium-Gehalte in Steinbrücken und Eibelshausen übertrifft den Median der Gemarkung Erda um 0,13 mg/kg (Abb. 27). Die Spannweite und der Interquartilabstand ist gegenüber den entsprechenden Streuungsmaßen der Gemarkung Erda deutlich größer. Bezüglich des Niveaus der  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte zeigen diese Ergebnisse Parallelen zu den Niveau-Unterschieden der  $C_{\text{org}}$ -Gehalte und den H-Ionenkonzentrationen. Untersuchungen zur Entwicklung von Pedotransferfunktionen für die Oberböden der Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda zeigen, dass zumindest die Variation sorbierter Cd-Gehalte mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die Variation der  $C_{\text{org}}$ -Gehalte und H-Ionenkonzentrationen erklärt werden kann (Schug 2000).

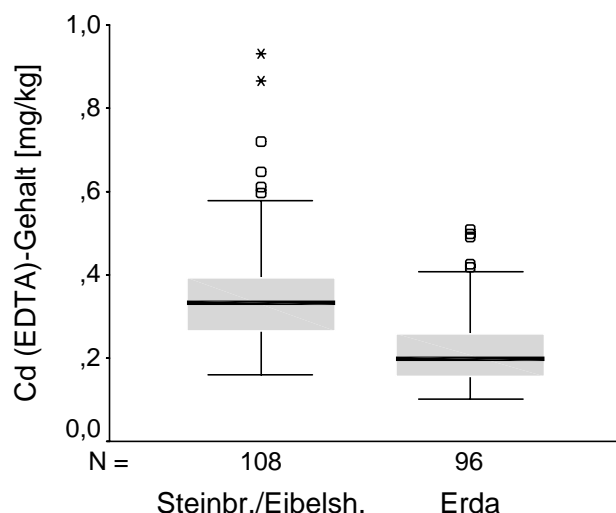


Abb. 27 Median, Spannweite, Interquartilabstand, Ausreißer und Extremwerte der  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte von Oberbodenproben (0–20 cm) in den Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda (Legende: Abb. 4 in Kap. 3.2.1).

#### 4.4 Extrapolation der labilen Bodenkennwerte

##### 4.4.1 Validierung des Regionalisierungsmodells

Die Analyse der Beziehung der Standortfaktoren Exposition, Gesamtbodenart der Bodenschätzung und Realnutzung zu den bodenkundlichen Kennwerten  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ - bzw.  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ -Wert, dem  $\text{C}_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalt basiert auf vorliegenden Daten früherer bodenkundlicher Untersuchungen (Kap. 4.1.1). Diese stammen nur zu einem Teil aus den Untersuchungsgebieten und besitzen ein stärkeres Aggregierungsniveau der Standortfaktoren im Vergleich zu denen, die für die Raumeinheitenkarten der Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda verwendet werden (vgl. Kap. 4.1.2). Des Weiteren ist unklar, ob die statistisch nachgewiesene Beziehung der EDTA-extrahierbaren Cadmiumgehalte zu den Indikatoren Exposition, Bodenart und Nutzung auch für die nördlich gelegenen Untersuchungsgebiete Steinbrücken und Eibelshausen gültig ist, da für die Ermittlung dieser Indikator-Indikandum-Beziehung entsprechendes Datenmaterial nur für einen lokal begrenzten Landschaftsausschnitt im Süden der Untersuchungsregion vorliegt. Aus den genannten Gründen ist es erforderlich, das Regionalisierungsmodell zu überprüfen. Zu diesem Zweck wird die Beziehung der vorliegenden Standortfaktoren der Raumeinheitenkarten zu den Bodenkennwerten analog zu der in Kapitel 3.2.1 dargestellten Vorgehensweise varianzanalytisch untersucht.

Zunächst werden die repräsentativ erhobenen Bodenkennwerte auf die Erfüllung der Randbedingungen überprüft, die für die Durchführung der Varianzanalyse obligatorisch sind. Die Verteilung der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte und  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte der Gemarkung Erda weisen keine Ausreißer und Extremwerte auf. In Steinbrücken und Eibelshausen sind die Ausreißer der pH-Werte

und  $C_{org}$ -Gehalte über die Raumeinheiten weitestgehend zufällig verteilt und verbleiben daher im Datensatz. Ausreißer oder Extremwerte der Cadmium-Gehalte werden vor der statistischen Analyse ebenfalls nicht entfernt, da es sich durchweg um hohe Gehalte von Oberböden der Grünlandbereiche der Untersuchungsgebiete auf sandigem Lehm (sL) bis Lehm (L) in ebenen Lagen (Raumeinheitenkode 933) handelt. Eine Ausnahme stellt lediglich die Raumeinheit nordexponierter Grünlandbereiche auf sandigem Lehm bis Lehm (Raumeinheitenkode 133) in der Gemarkung Erda dar.

Die dreifaktorielle Varianzanalyse ist nicht anwendbar, da die Varianzen der Faktorstufen für alle bodenkundlichen Kennwerte entweder nicht homogen sind oder die Bedingung der annähernden Normalverteilung der abhängigen Variablen nicht erfüllt wird (Tab. 22). Die weitere statistische Analyse möglicher Mittelwertunterschiede der Faktorengruppen beschränkt sich daher auf das zwei- oder einfaktorielle Untersuchungsdesign.

Tab. 22 Ergebnisse der statistischen Tests auf Varianzenhomogenität der  $pH_{CaCl_2}$ -Werte,  $C_{org}$ - und  $Cd_{EDTA}$ -Gehalte im ein-, zwei- und dreifaktoriellen Design sowie der Normalverteilung bzw. Symmetrie der labilen bodenkundlichen Kennwerte [a) und b)  $\alpha = 5\%$ , c)  $g < 1$ ]. **Fett** dargestellte Signifikanzniveaus bedeuten, dass die Testkriterien in diesen Fällen erfüllt sind.

Untersuchungsdesign	Faktoren (-Kombinationen)	Varianzenhomogenität <sup>a)</sup>						Normalverteilung <sup>b)</sup> / Symmetrie <sup>c)</sup>					
		Steinbr./Eibelsh.			Erda			Steinbr./Eibelsh.			Erda		
		pH	$C_{org}$	Cd	pH	$C_{org}$	Cd	pH	$C_{org}$	Cd	pH	$C_{org}$	Cd
dreifaktoriell	Exposition* Bodenart* Nutzung	0,000	0,000	<b>0,099</b>	0,000	0,000	0,000						
	Exposition* Bodenart	0,031	<b>0,426</b>	0,035	0,035	0,000	0,015						
zweifaktoriell	Exposition* Nutzung	<b>0,106</b>	0,000	<b>0,135</b>	0,011	0,000	0,008	<b>0,695</b>	<b>0,110</b>	0,013	<b>0,679</b>	0,015	0,009
	Nutzung* Bodenart	0,010	<b>0,075</b>	0,012	<b>0,346</b>	0,025	0,000	<b>0,194</b>	<b>0,629</b>	1,688	<b>0,291</b>	<b>0,757</b>	1,343
einfaktoriell	Exposition	<b>0,634</b>	<b>0,447</b>	<b>0,132</b>	<b>0,076</b>	0,003	0,000						
	Bodenart	<b>0,266</b>	<b>0,515</b>	0,000	<b>0,142</b>	0,000	0,001						
	Nutzung	<b>0,386</b>	<b>0,323</b>	<b>0,311</b>	<b>0,524</b>	0,000	0,000						

In den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen ist für den  $pH_{CaCl_2}$ -Wert eine Beziehung zur Bodenart und Nutzung nachweisbar (Tab. 23). Der  $C_{org}$ - und  $Cd_{EDTA}$ -Gehalt wird durch die Exposition und Bodenart beeinflusst. In Erda bestehen Interaktionen zwischen dem Faktor 'Nutzung' und dem  $pH_{CaCl_2}$ -Wert sowie dem  $C_{org}$ - und dem  $Cd_{EDTA}$ -Gehalt. Die Bodenart beeinflusst in dieser Gemarkung lediglich den  $C_{org}$ -Gehalt. Auf die Verteilung der Cadmium-Gehalte wirkt sich nur die Exposition statistisch nachweisbar aus.

Tab. 23 Signifikanzniveaus der empirischen F-Werte ( $\alpha = 5\%$ ) im ein- und zweifaktoriellen Design für die Faktoren und Faktorenkombinationen der Exposition, Bodenart und Nutzung als potentielle Einflussgrößen der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte,  $C_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte der Untersuchungsgebiete Steinbrücken, Eibelshausen und Erda. Grau hinterlegte Felder im einfaktoriellen Untersuchungsdesign kennzeichnen Kombinationen von Faktoren und Bodenkennwerten mit nicht normalverteilten und/oder heterogenen Varianzen der Faktorstufen. Für diese Fälle wird das asymptotische Signifikanzniveau ( $\alpha = 5\%$ ) mit dem nichtparametrischen Kruskal-Wallis-Test ermittelt (vgl. Tab. 22). **Fett** dargestellte Signifikanzniveaus bedeuten, dass die entsprechenden Testhypothesen erfüllt sind.

Untersuchungsdesign	Faktoren (-Kombinationen)	Signifikanzniveaus der empirischen F-Werte bzw. asymptotisches Signifikanzniveau					
		Steinbr. / Eibelsh.			Erda		
		pH	$C_{\text{org}}$	$\text{Cd}_{\text{EDTA}}$	pH	$C_{\text{org}}$	$\text{Cd}_{\text{EDTA}}$
zweifaktoriell	Exposition * Bodenart	-	0,796	-	-	-	-
	Exposition * Nutzung	0,056	-	-	-	-	-
	Nutzung * Bodenart	-	0,359	-	0,376	-	-
einfaktoriell	Exposition	0,073	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>	0,110	0,134	<b>0,019</b>
	Bodenart	<b>0,000</b>	<b>0,011</b>	<b>0,002</b>	0,156	<b>0,002</b>	0,089
	Nutzung	<b>0,026</b>	0,203	0,198	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>

Die Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung zeigen, dass nur im einfaktoriellen Untersuchungsdesign die Wirkung einzelner Faktoren auf die Bodenkennwerte der Untersuchungsgebiete nachgewiesen werden kann. Eine statistisch gesicherte Bestätigung der gemeinsamen Wirkung von zwei oder drei Standortfaktoren auf die bodenkundlichen Kennwerte, wie sie für die Datenbasis zur Ermittlung der Indikator-Indikandum-Beziehungen nachgewiesen wurde, scheitert mit großer Wahrscheinlichkeit an den geringen Stichprobenumfängen der einzelnen Faktorstufengruppen, da im Gegensatz zur den Indikatoren der Voruntersuchungen die Standortfaktoren der Raumeinheitenkarten nicht aggregiert sind. Auf die Ermittlung von Kontrasten zwischen den Faktorstufen- oder Faktorstufengruppen wird verzichtet, da durch die Klassifizierung und Validierung der Raumeinheitenwerte ohnehin unterschiedliche Raumeinheiten zusammengefasst werden (vgl. Kap. 3.2.1).

#### 4.4.2 Ermittlung von Raumeinheitenwerten und Interpolation nicht beprobter Raumeinheiten

Für die Übertragung der Analyseergebnisse auf die Raumeinheiten wird der Median der Messwerte (MW) jeder mehrfach beprobten Raumeinheit bestimmt. Die auf diese Weise ermittelten Raumeinheitenwerte (RW) und die Messwerte der einfach beprobten Raumeinhei-

ten werden auf alle Einzelflächen der jeweiligen Raumeinheiten extrapoliert (vgl. Kap. 3.1). Da etwa 96 % der Raumeinheiten beprobt wurden, ist eine solche Zuweisung nicht für die gesamte Raumeinheitenkarte möglich. Die Werte der übrigen Raumeinheiten werden daher mit geostatistischen Methoden aus den vorhandenen Daten geschätzt.

Da die Raumeinheitenwerte der bodenkundlichen Kennwerte keine räumliche Drift innerhalb der Raumeinheitenkarten aufweisen, wird aus den experimentellen Variogrammen für jeden Bodenkennwert ein omnidirektionales Variogrammodell geschätzt, um mittels *Ordinary Kriging* die restlichen Raumeinheiten der Untersuchungsgebiete zu interpolieren. Die beste Anpassung an das experimentelle Variogramm der Raumeinheitenwerte aller Bodenkennwerte gelingt mit einem sphärischen Modell. Die interpolierten Messwerte innerhalb der nicht beprobten Raumeinheiten werden gemittelt und anschließend diesen Raumeinheiten zugewiesen (vgl. Tab. 59 bis Tab. 61 in Kap. 8.1).

#### 4.4.3 Klassifizierung

In den folgenden Ausführungen wird anhand der in Kapitel 3.5.3 erläuterten Kriterien die optimale Klassifizierung der bodenkundlichen Kennwerte in den Untersuchungsgebieten vorgenommen. Anschließend erfolgt eine Gesamtbewertung der Einzelergebnisse, um unter Einbeziehung aller vier Kriterien die bestmögliche Klassifizierung der Bodenkennwerte zu erreichen.

##### 4.4.3.1 Messgenauigkeit

Unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit und der stochastischen Fehlerkomponente sind für die Raumeinheitenwerte der bodenkundlichen Kennwerte minimale Klassenspannweiten zulässig, die nicht unterschritten werden dürfen (vgl. Kap. 3.5.3.1). Für die  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte der Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda ist demzufolge eine Aufteilung in sechs Klassen möglich. Aufgrund der hohen analytischen Messgenauigkeit besteht für die Klasseneinteilung der  $\text{C}_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte - auch unter Berücksichtigung eines Sicherheitsspielraums - nahezu keine Begrenzung.

#### 4.4.3.2 GVF-Index

Die Berechnung der GVF-Indices (vgl. Kap. 3.5.3.2) ermöglicht die verteilungsspezifisch optimierte Festlegung der Klassengrenzen bei gegebener Klassenanzahl. Entsprechend der Schwellenwerte der maximierten GVF-Indices sind demnach für die Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen Klassenzahlen der Raumeinheitenwerte von fünf bis sechs geeignet, um bei einer vertretbaren Klassenanzahl die Varianzen innerhalb der Klassen zu minimieren und zwischen den Klassen zu maximieren (Tab. 24). Im Vergleich dazu sind in der Gemarkung Erda, aufgrund der höheren Messwertvarianzen, die Klassenzahlen der zu regionalisierenden Bodenkennwerte auf vier bis fünf Stufen zu begrenzen.

Tab. 24 Maximierte GVF-Indices für vier unterschiedliche Klassenanzahlen der bodenkundlichen Kennwerte (Raumeinheitenwerte) in den Untersuchungsgebieten Steinbrücken, Eibelshausen und Erda. Grau hinterlegt sind die Schwellenwerte der GVF-Indices bei der jeweiligen Klassenanzahl.

Gemarkung	Bodeneigenschaft	Klassenanzahl					
		2	3	4	5	6	7
Steinbr. / Eibelsh.	pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> -Wert	0,68	0,86	0,93	0,95	0,96	0,96
	C <sub>org</sub> -Gehalt	0,62	0,79	0,85	0,88	0,92	0,93
	Cd <sub>EDTA</sub> -Gehalt	0,54	0,76	0,84	0,91	0,94	0,95
Erda	pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> -Wert	0,58	0,84	0,85	0,86	0,86	0,87
	C <sub>org</sub> -Gehalt	0,65	0,83	0,90	0,92	0,93	0,94
	Cd <sub>EDTA</sub> -Gehalt	0,58	0,73	0,84	0,91	0,93	0,95

#### 4.4.3.3 Qualitative und quantitative Abweichung der Messwertintervalle von den Bodenkennwertklassen

Teilweise Unter- oder Überschreiten die Messwertintervalle erheblich die Minima und Maxima der Bodenkennwertklassen. Diese Abweichungen spiegeln jedoch die tatsächliche räumliche Variabilität der jeweiligen Bodenkennwerte innerhalb der Raumeinheiten wider. Geringe Durchschnittswerte dieser Abweichungen kennzeichnen Klassenanzahlen, die unter Berücksichtigung der tatsächlichen Messwertstreuung für die Klassifizierung der bodenkundlichen Kennwerte geeignet sind, da sich in diesen Fällen die Klassengrenzen, bezogen auf das jeweilige Messwertintervall, im Durchschnitt am wenigsten überschneiden.

Für die bodenkundlichen Kennwerte der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen sind aus der Sicht dieses Klassifizierungskriteriums für den pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub>-Wert, C<sub>org</sub>- und Cd<sub>EDTA</sub>-Gehalt fünf Klassen als optimal anzusehen (Tab. 25).

Tab. 25 Mittlere qualitative Über- oder Unterschreitung der Messwertintervalle[%] innerhalb der Bodenkennwertklassen für vier unterschiedliche Klassenanzahlen der bodenkundlichen Kennwerte in den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen. Die Minima der relativen Abweichungsmittel sind grau hinterlegt.

Klassenanzahl	3			4				5					6					
Klasse	1.	2.	3.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5.	6.
pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> -Wert																		
Klassenmin.	3,6	4,0	4,4	3,6	3,9	4,2	4,6	3,6	3,9	4,2	4,4	4,7	3,6	3,9	4,2	4,4	4,7	4,9
Klassenmax.	4,0	4,4	5,3	3,9	4,2	4,6	5,3	3,9	4,2	4,4	4,7	5,3	3,9	4,2	4,4	4,7	4,9	5,3
Messwertmin.	3,6	4,0	4,2	3,6	3,9	4,0	4,5	3,6	3,9	4,0	4,2	4,7	3,6	3,9	4,0	4,2	4,7	4,9
Messwertmax.	4,0	4,8	5,4	3,8	4,2	4,8	5,4	3,8	4,2	4,8	4,8	5,4	3,8	4,2	4,8	4,8	5,2	5,4
rel. Abweichungsmittel [%]	4,6			3,3				3,2					3,3					
C <sub>org</sub> -Gehalt [%]																		
Klassenmin.	1,86	2,88	3,71	1,86	2,63	3,16	3,82	1,86	2,37	2,78	3,17	3,82	1,86	2,37	2,77	3,08	3,35	3,85
Klassenmax.	2,88	3,71	5,65	2,63	3,16	3,82	5,65	2,37	2,78	3,17	3,82	5,65	2,37	2,77	3,08	3,35	3,85	5,65
Messwertmin.	1,86	2,58	3,67	1,86	2,40	2,58	3,67	1,86	2,31	2,49	2,58	3,67	1,86	2,31	2,49	2,58	2,67	3,67
Messwertmax.	3,32	5,10	5,65	3,14	3,43	5,10	5,65	2,37	3,14	3,43	5,10	5,65	2,37	3,14	3,43	4,00	5,10	5,65
rel. Abweichungsmittel [%]	12,8			13,2				11,3					13,0					
Cd <sub>EDTA</sub> -Gehalt [mg/kg]																		
Klassenmin.	0,16	0,31	0,45	0,16	0,25	0,32	0,45	0,16	0,25	0,31	0,41	0,56	0,16	0,25	0,31	0,37	0,44	0,56
Klassenmax.	0,31	0,45	0,68	0,25	0,32	0,45	0,68	0,25	0,31	0,41	0,56	0,68	0,25	0,31	0,37	0,44	0,56	0,68
Messwertmin.	0,16	0,26	0,35	0,16	0,18	0,43	0,35	0,16	0,18	0,26	0,35	0,58	0,16	0,18	0,26	0,37	0,35	0,58
Messwertmax.	0,55	0,45	0,93	0,29	0,55	0,45	0,93	0,29	0,55	0,43	0,60	0,93	0,29	0,55	0,43	0,43	0,60	0,93
rel. Abweichungsmittel [%]	31,2			30,0				22,6					23,1					

Für die Gemarkung Erda ist unter Berücksichtigung der Messwertvarianz innerhalb der Bodenkennwertklassen eine Aufteilung der pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub>-Werte in sechs Klassen angezeigt. Die C<sub>org</sub>-Gehalte können zu fünf und die Cd<sub>EDTA</sub>-Gehalte zu drei Klassen aggregiert werden (Tab. 26).



Tab. 26 Mittlere qualitative Über- oder Unterschreitung der Messwertintervalle [%] innerhalb der Bodenkennwertklassen für vier unterschiedliche Klassenanzahlen der bodenkundlichen Kennwerte in der Gemarkung Erda. Die Minima der relativen Abweichungsmittel sind grau hinterlegt.

Klassenanzahl	3			4				5					6					
Klasse	1.	2.	3.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5.	6.
pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> -Wert																		
Klassenmin.	4,4	4,9	5,3	4,4	4,8	5,1	5,4	4,4	4,8	5,1	5,3	5,6	4,4	4,8	5,1	5,2	5,4	5,6
Klassenmax.	4,9	5,3	6,3	4,8	5,1	5,4	6,3	4,8	5,1	5,3	5,6	6,3	4,8	5,1	5,2	5,4	5,6	6,3
Messwertmin.	4,4	4,5	4,8	4,4	4,5	4,8	4,8	4,4	4,5	4,8	4,8	5,2	4,4	4,5	4,8	4,8	4,8	5,2
Messwertmax.	6,1	6,4	6,4	6,1	5,1	6,4	6,4	6,1	5,1	6,4	6,1	6,4	6,1	5,1	5,2	6,4	6,1	6,4
rel. Abwei- chungsmittel [%]	13,1			10,3				9,9					8,8					
C <sub>org</sub> -Gehalt [%]																		
Klassenmin.	1,25	2,06	3,13	1,25	2,06	2,90	3,66	1,25	1,64	2,15	2,90	3,66	1,25	1,64	2,00	2,42	2,90	3,66
Klassenmax.	2,06	3,13	5,40	2,06	2,90	3,66	5,40	1,64	2,15	2,90	3,66	5,40	1,64	2,00	2,42	2,90	3,66	5,40
Messwertmin.	1,23	1,93	1,99	1,23	1,93	2,96	1,99	1,23	2,06	1,93	2,59	1,99	1,23	1,29	2,06	1,93	2,59	1,99
Messwertmax.	3,64	3,60	5,48	3,64	3,60	4,08	5,48	3,64	2,47	3,60	4,08	5,48	3,64	2,81	2,47	3,60	4,08	5,48
rel. Abwei- chungsmittel [%]	22,8			23,7				22,0					27,3					
Cd <sub>EDTA</sub> -Gehalt [mg/kg]																		
Klassenmin.	0,10	0,21	0,31	0,10	0,18	0,24	0,34	0,10	0,17	0,20	0,26	0,34	0,10	0,14	0,17	0,21	0,26	0,34
Klassenmax.	0,21	0,31	0,41	0,18	0,24	0,34	0,41	0,17	0,20	0,26	0,34	0,41	0,14	0,17	0,21	0,26	0,34	0,41
Messwertmin.	0,10	0,13	0,32	0,10	0,13	0,13	0,35	0,10	0,12	0,14	0,13	0,35	0,10	0,12	0,13	0,14	0,13	0,35
Messwertmax.	0,27	0,42	0,51	0,27	0,29	0,42	0,51	0,27	0,26	0,29	0,42	0,51	0,27	0,24	0,26	0,29	0,42	0,51
rel. Abwei- chungsmittel [%]	32,4			33,3				32,9					34,4					

Bezüglich der qualitativen Überschreitungen (relativer Anteil der Messwerte) sind in den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen vier pH-Klassen das Optimum (Tab. 27). Die Klassengrenzen der C<sub>org</sub>-Gehalte werden bei einer Aufteilung in drei oder vier Klassen von der geringsten Anzahl der Messwerte innerhalb der Bodenkennwertklassen überschritten. Für die Cadmium-Gehalte ergibt sich das Optimum bei einer Aufteilung in drei Klassen.

Tab. 27 Absoluter und relativer Anteil der Werte der Messwertintervalle, die die Grenzen der korrespondierenden Bodenkennwertklassen über- oder unterschreiten. Dargestellt sind vier unterschiedliche Klassenanzahlen bodenkundlicher Kennwerte der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen ( $K_N$  = absolute Anzahl der Klassenelemente;  $K_{NI}$  = absolute Anzahl der Unterschreitungen der korrespondierenden Bodenkennwertklassengrenzen;  $K_{Nh}$  = absolute Anzahl der Überschreitungen der korrespondierenden Bodenkennwertklassengrenzen;  $K_{NI+Nh} / K_N$  = mittlerer relativer Anteil der Über- und Unterschreitungen [%]). Die Optima der mittleren relativen Anteile sind grau hinterlegt.

Klassenanzahl	3			4				5					6					
Klasse	1.	2.	3.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5.	6.
pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> -Wert																		
K <sub>N</sub>	7	22	81	5	11	48	46	5	10	14	39	42	5	10	14	38	35	8
K <sub>NI</sub>	0	6	2	0	2	6	4	0	2	6	1	4	0	2	2	4	3	4
K <sub>Nh</sub>	2	4	1	2	0	3	1	2	0	3	4	1	2	0	0	3	4	1
K <sub>NI+Nh</sub> / K <sub>N</sub> [%]	26			22				30					29					
C <sub>org</sub> -Gehalt																		
K <sub>N</sub>	52	37	21	26	39	25	20	12	23	31	24	20	12	23	26	12	17	20
K <sub>NI</sub>	0	8	1	0	2	3	1	0	1	5	3	1	0	1	6	2	4	1
K <sub>Nh</sub>	7	5	0	3	7	5	0	0	3	7	5	0	0	3	8	2	4	0
K <sub>NI+Nh</sub> / K <sub>N</sub> [%]	18			18				19					26					
Cd <sub>EDTA</sub> -Gehalt																		
K <sub>N</sub>	48	43	18	15	35	6	18	15	35	37	16	6	15	35	31	9	13	6
K <sub>NI</sub>	0	2	2	0	5	2	2	0	2	3	2	0	0	4	2	0	2	0
K <sub>Nh</sub>	5	0	3	2	5	0	3	2	5	1	2	2	2	5	3	0	3	3
K <sub>NI+Nh</sub> / K <sub>N</sub> [%]	14			26				20					24					

In der Gemarkung Erda wird eine Minimierung der qualitativen Überschreitung der Bodenkennwertklassen bei einer Aufteilung der pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub>-Werte, C<sub>org</sub>- und Cd<sub>EDTA</sub>-Gehalte in drei Klassen erreicht (Tab. 28).

Tab. 28 Relativer Anteil der Werte der Messwertintervalle, die die Grenzen der korrespondierenden Bodenkennwertklassen über- oder unterschreiten. Dargestellt sind vier unterschiedliche Klassenanzahlen bodenkundlicher Kennwerte der Gemarkung Erda ( $K_N$  = absolute Anzahl der Klassenelemente,  $K_{NI}$  = absolute Anzahl der Unterschreitungen der korrespondierenden Bodenkennwertklassengrenzen;  $K_{Nh}$  = absolute Anzahl der Überschreitungen der korrespondierenden Bodenkennwertklassengrenzen,  $K_{NI+Nh} / K_N$  = mittlerer relativer Anteil der Über- und Unterschreitungen [%]). Die Optima der relativen Anteile sind grau hinterlegt.

Klassenanzahl	3			4				5					6					
Klasse	1.	2.	3.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5.	6.
pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> -Wert																		
K <sub>N</sub>	12	40	44	12	19	26	39	12	19	21	25	19	12	19	9	17	20	19
K <sub>NI</sub>	0	0	2	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
K <sub>Nh</sub>	0	2	0	0	0	4	0	0	0	3	3	0	0	0	2	3	6	0
K <sub>NI+Nh</sub> / K <sub>N</sub> [%]	3			5				7					14					
C <sub>org</sub> -Gehalt																		
K <sub>N</sub>	42	20	34	41	19	14	21	40	10	10	15	21	18	22	10	10	15	21
K <sub>NI</sub>	2	2	5	2	1	1	5	2	0	3	1	5	2	3	0	3	1	5
K <sub>Nh</sub>	2	1	2	2	2	1	2	3	1	3	1	2	5	1	1	2	1	2
K <sub>NI+Nh</sub> / K <sub>N</sub> [%]	15			18				26					27					
Cd <sub>EDTA</sub> -Gehalt																		
K <sub>N</sub>	53	30	13	33	38	15	10	28	24	19	15	10	9	23	20	19	15	10
K <sub>NI</sub>	0	6	0	0	7	3	0	0	6	3	4	0	0	3	4	2	4	0
K <sub>Nh</sub>	5	3	4	1	3	2	4	5	2	1	2	4	2	6	2	1	2	4
K <sub>NI+Nh</sub> / K <sub>N</sub> [%]	23			26				30					31					

In den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen erreicht der Abweichungsindex (vgl. Kap. 3.5.3.3) der pH<sub>CaCl2</sub>-Werte das Minimum bei einer Aufteilung in vier Klassen (Tab. 29). Für den C<sub>org</sub>-Gehalt sind fünf und für den Cd<sub>EDTA</sub>-Gehalt drei Bodenkennwertklassen optimal. Die Bodenkennwerte der Gemarkung Erda können unter Berücksichtigung der Messwertabweichungen in drei Klassen unterteilt werden. Die Indices der Untersuchungsgebiete Steinbrücken und Eibelshausen sind im Vergleich zu Erda durchweg geringer. Außerdem kennzeichnen die minimalen Abweichungsindices für alle Untersuchungsgebiete einen abnehmenden Trend der Klassenabweichungen und damit eine geringere quantitative und/oder qualitative Überschneidung der Klassengrenzen vom Cd<sub>EDTA</sub>- über den C<sub>org</sub>-Gehalt zum pH<sub>CaCl2</sub>-Wert.

Tab. 29 Abweichungsindices für die Bodenkennwerte der Oberböden in den Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda. Die Optima der Indices sind grau hinterlegt.

Gemarkung	Bodenkennwert	Klassenanzahl			
		3	4	5	6
Steinbrücken und Eibelshausen	pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub>	1,2	0,7	1,0	1,0
	C <sub>org</sub>	2,3	2,4	2,1	3,4
	Cd <sub>EDTA</sub>	4,5	7,7	4,6	5,5
Erda	pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub>	0,4	0,6	0,7	1,3
	C <sub>org</sub>	3,4	4,3	5,7	7,5
	Cd <sub>EDTA</sub>	7,6	8,5	10,0	10,7

#### 4.4.3.4 Bodenkundliche Plausibilität der Klassifizierung

Aus bodenkundlicher Sicht ist eine Klassifizierung der pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub>-Werte der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen sowie Erda in drei Klassen noch vertretbar (vgl. Kap. 3.5.3.4). Die Klassenspannweiten betragen dann etwa 0,4 bis 0,9 pH-Einheiten in den nördlichen Untersuchungsgebieten und in Erda 0,5 bis 1,0 pH-Einheiten. Für die Unterteilung der C<sub>org</sub>-Gehalte der landwirtschaftlich genutzten Oberböden sind in allen Gemarkungen vier Klassen bei Klassenunterschieden von 0,53 % bis 1,83 % in Steinbrücken und Eibelshausen sowie 0,76 % bis 1,74 % in Erda sinnvoll. In Steinbrücken und Eibelshausen sowie Erda können die Cadmium-Gehalte lediglich in drei Stufen aufgeteilt werden. Die Klassenspannweiten für die Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen liegen dann bei 0,14 bis 0,23 mg/kg. In Erda sind durch die Aufteilung in drei Klassen als unterste Grenze Unterschiede von lediglich 0,1 mg/kg darstellbar.

#### 4.4.3.5 Gesamtbewertung der Klassifizierungskriterien

Für die endgültige Klassifizierung der Raumeinheitenwerte ist ausschlaggebend, welches Kriterium die mögliche Klassenanzahl am stärksten begrenzt (Tab. 30). Als Resultat ergibt sich für die pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub>-Werte der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen sowie Erda eine optimale Aufteilung in drei Bodenkennwertklassen. Die C<sub>org</sub>-Gehalte werden zur Kennzeichnung der Oberböden in Steinbrücken und Eibelshausen unter Berücksichtigung aller Klassifizierungskriterien zu vier Klassen aggregiert. Für die Gemarkung Erda sind drei Klassen geeignet. Die Cd<sub>EDTA</sub>-Gehalte in Steinbrücken und Eibelshausen sowie Erda werden für die regionalisierte Darstellung ebenfalls in drei Gehaltsklassen untergliedert.

Tab. 30 Schema für die Klassifizierung der bodenkundlichen Kennwerte der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen. Die optimalen Klassenanzahlen unter Berücksichtigung der jeweiligen Kriterium sind mit einem 'X' markiert. Die Ergebnisse der Gesamtbewertung sind **fett** hervorgehoben.

Klassifizierungs-Kriterium	Gemarkung	pH-Wert-Klassen				C <sub>org</sub> -Gehaltsklassen [%]				Cd <sub>EDTA</sub> -Gehaltsklassen [mg/kg]			
		3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6
Messgenauigkeit	Steinbr. / Eibelsh.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Erda	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
GVF-Index	Steinbr. / Eibelsh.			X					X				X
	Erda		X					X			X		
Abweichungsindex	Steinbr. / Eibelsh.		X					X		X			
	Erda	X				X				X			
Bodenkdl. Bewertung	Steinbr. / Eibelsh.	X					X			X			
	Erda	X					X			X			
Gesamtbewertung	Steinbr. / Eibelsh.	<b>X</b>					<b>X</b>			<b>X</b>			
	Erda	<b>X</b>				<b>X</b>				<b>X</b>			

Unter verteilungsspezifischen Gesichtspunkten wäre eine stärkere Klassifizierung der bodenkundlichen Kennwerte in einzelnen Fällen durchaus möglich. Aus bodenkundlicher Sicht und unter Berücksichtigung der tatsächlichen Messwertstreuung, die in den klassifizierten Raumeinheitenwerten nicht dargestellt werden kann, würde dies jedoch zu einer Überbewertung der darstellbaren Informationsdichte führen. Ist eine hinreichende Validität der Regionalisierungsergebnisse auf Grundlage der Klassifizierung nicht gewährleistet, wird eine Neubewertung der Klasseneinteilung erforderlich sein, um eventuell auf einem stärkeren Aggregierungsniveau gültige, flächenbezogene Aussagen über die bodenkundlichen Kennwerte zu ermöglichen (vgl. Kap. 3.2.1).

#### 4.4.4 Validierung der Regionalisierungsergebnisse

Für die Validierung der Regionalisierungsergebnisse wurden auf der Basis eines Zufallsmessnetzes in Steinbrücken und Eibelshausen elf und in Erda zehn Validierungsproben entnommen (Abb. 28 u. Tab. 62 in Kap. 8.1).

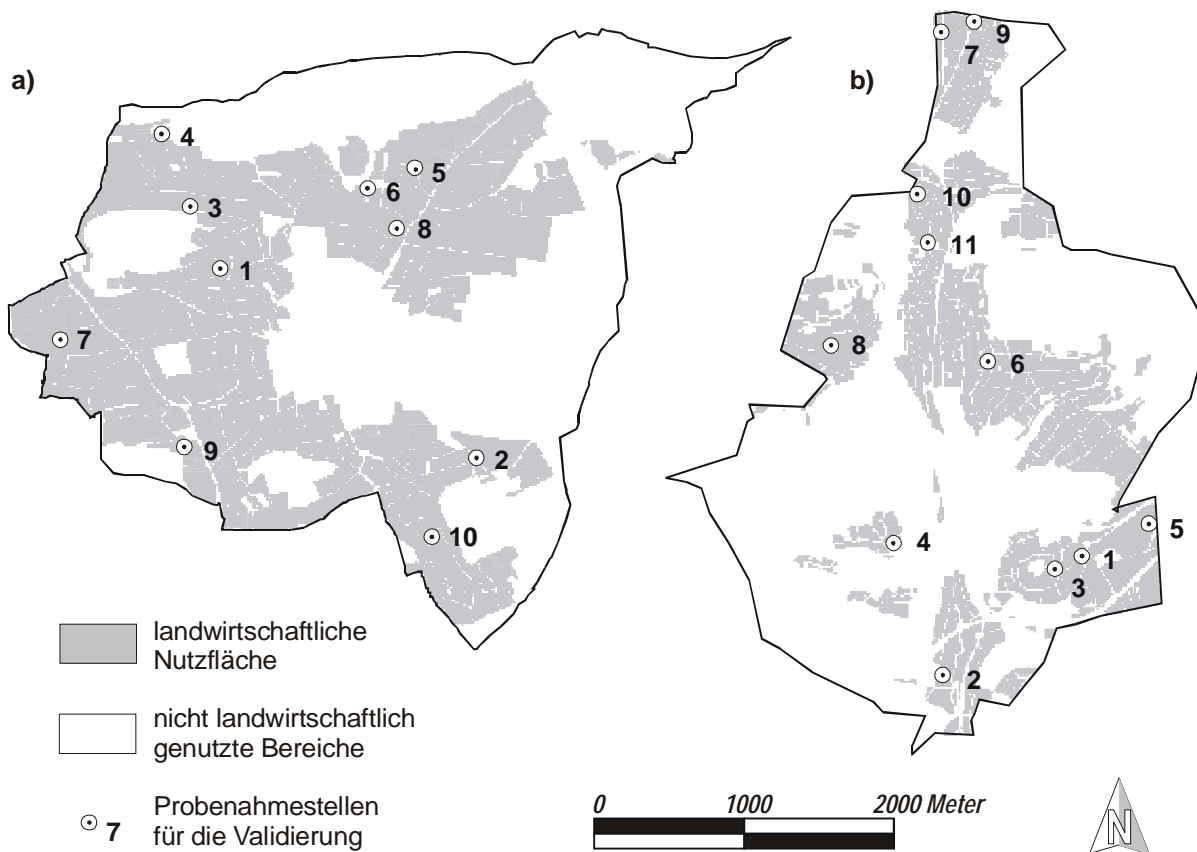


Abb. 28 Probenahmestandorte für die Validierung der Regionalisierungsergebnisse der Gemarkungen Erda (a) sowie Steinbrücken und Eibelshausen (b).

In den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen können in acht von elf Fällen die  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte der Validierungsproben räumlich korrespondierenden Bodenkennwertklassen zugeordnet werden (Tab. 31). Der 10. Validierungswert der Cadmium-Gehalte liegt außerhalb der Bodenkennwertklassen und ist daher mit einer Null gekennzeichnet. Für den  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalt ergeben sich nur drei Übereinstimmungen.

Tab. 31 Zuordnung der Validierungswerte (VP) zu räumlich korrespondierenden Bodenkennwertklassen (BK<sub>P</sub>) und inhaltlicher Vergleich der zugeordneten Validierungswerte mit den Bodenkennwertklassen (BK<sub>I</sub>) für die Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen. Übereinstimmungen sind grau hinterlegt. (Kodierung der Klassennummern: pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub>-Wert: 1 = 3,6-4,0, 2 = 4,0-4,4, 3 = 4,4-5,3; C<sub>org</sub>-Gehalt [%]: 1 = 1,86-2,63, 2 = 2,63-3,16, 3 = 3,16-3,82, 4 = 3,82-5,65; Cd<sub>EDTA</sub>-Gehalt [mg/kg]: 1 = 0,16-0,31, 2 = 0,31-0,45, 3 = 0,45-0,68).

pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> -Wert (3 Klassen)			C <sub>org</sub> -Gehalt (4 Klassen)			Cd <sub>EDTA</sub> -Gehalt (3 Klassen)		
VP	BK <sub>P</sub>	BK <sub>I</sub>	VP	BK <sub>P</sub>	BK <sub>I</sub>	VP	BK <sub>P</sub>	BK <sub>I</sub>
5,2	3	3	2,74	2	2	0,34	2	2
5,0	3	3	3,82	4	3	0,48	3	3
4,5	3	3	2,14	2	1	0,25	1	1
4,3	3	2	2,87	2	2	0,29	1	1
3,9	3	1	3,13	3	2	0,16	1	1
5,3	3	3	3,60	2	3	0,31	2	2
4,6	3	3	2,87	4	2	0,34	2	2
4,4	3	2	2,91	3	2	0,26	2	1
4,6	3	3	3,09	4	2	0,37	2	2
4,8	3	3	5,08	4	4	0,71	3	0
4,9	3	3	3,78	4	3	0,68	3	3
Übereinstimmungen		8 von 11			3 von 11			9 von 11

Offensichtlich wird die Aufteilung in vier Klassen der tatsächlichen Variabilität der C<sub>org</sub>-Gehalte in den Oberböden der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen nicht gerecht, zumal die Spannweite der Messwertintervalle bei der gewählten Klassenanzahl eine hohe räumliche Variabilität schon vermuten ließ (vgl. Kap. 4.4.2.1). Daher wird die Anzahl der Klassen verringert und die Validität erneut überprüft. Bei einer Aufteilung der C<sub>org</sub>-Gehalte in drei Klassen wird die Anzahl der Übereinstimmungen auf acht von elf Validierungsproben erhöht (Tab. 32). Dieser Aggregierungsschritt geht natürlich auf Kosten des Detaillierungsgrads der Flächeninformation, erhöht jedoch die Gültigkeit der räumlichen Aussage über die C<sub>org</sub>-Gehalte.

Tab. 32 Zuordnung der Validierungswerte (VP) der  $C_{org}$ -Gehalte zu räumlich korrespondierenden Bodenkennwertklassen ( $BK_P$ ) und inhaltlicher Vergleich der zugeordneten Validierungswerte mit den Bodenkennwertklassen ( $BK_i$ ) für die Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen. Übereinstimmungen sind grau hinterlegt (Kodierung der Klassennummern:  $C_{org}$ -Gehalt [%]: 1 = 1,86-2,88, 2 = 2,88-3,71, 3 = 3,71-5,65).

$C_{org}$ -Gehalt (3 Klassen)		
VP	$BK_P$	$BK_i$
2,74	1	1
3,82	3	3
2,14	1	1
2,87	1	1
3,13	2	2
3,60	1	2
2,87	3	1
2,91	2	2
3,09	3	2
5,08	3	3
3,78	3	3
Übereinstimmung		8 von 11

Für die Bodenkennwertklassen der pH-Werte in Erda ist in sieben von zehn Fällen eine Zuordnung der Validierungswerte möglich. In zwei Fällen liegen die Validierungswerte außerhalb der Bodenkennwertklassen. Die  $C_{org}$ - und  $Cd_{EDTA}$ -Gehalte können in jeweils acht von zehn Fällen den Bodenkennwertklassen zugewiesen werden (Tab. 33).

Tab. 33 Zuordnung der Validierungswerte (VP) zu räumlich korrespondierenden Bodenkennwertklassen ( $BK_P$ ) und inhaltlicher Vergleich der zugeordneten Validierungswerte mit den Bodenkennwertklassen ( $BK_i$ ) für die Gemarkung Erda. Übereinstimmungen sind grau hinterlegt. (Kodierung der Klassennummern:  $pH_{CaCl_2}$ -Wert: 1 = 4,4-4,9, 2 = 4,9-5,3, 3 = 5,3-6,3;  $C_{org}$ -Gehalt [%]: 1 = 1,25-2,06, 2 = 2,06-3,13, 3 = 3,13-5,40;  $Cd_{EDTA}$ -Gehalt [mg/kg]: 1 = 0,10-0,21, 2 = 0,21-0,31, 3 = 0,31-0,41).

$pH_{CaCl_2}$ -Wert (3 Klassen)			$C_{org}$ -Gehalt (3 Klassen)			$Cd_{EDTA}$ -Gehalt (3 Klassen)		
VP	$BK_P$	$BK_i$	VP	$BK_P$	$BK_i$	VP	$BK_P$	$BK_i$
6,6	1	0	1,38	1	1	0,15	2	1
5,9	3	3	1,93	1	1	0,19	1	1
5,3	2	2	3,00	3	2	0,24	2	2
4,3	1	1	1,48	1	1	0,13	1	1
4,8	1	1	2,80	2	2	0,31	2	2
4,5	3	1	2,73	3	2	0,28	2	2
6,6	3	0	1,44	1	1	0,13	1	1
5,1	2	2	3,16	3	3	0,29	3	2
5,5	3	3	1,96	1	1	0,17	1	1
6,0	3	3	1,34	1	1	0,15	1	1
Übereinstimmungen		7 von 10			8 von 10			8 von 10

Die Ergebnisse der Validierung zeigen, dass in den Untersuchungsgebieten durchschnittlich in rund 75 % der Fälle die Validierungsdaten der bodenkundlichen Kennwerte korrespondie-



renden Bodenkennwertklassen bei den gewählten Klassenanzahlen und Klassenbreiten ohne Berücksichtigung der möglichen Klassenüberschneidungen zugeordnet werden können. Mit anderen Worten ausgedrückt beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass ein  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert,  $\text{C}_{\text{org}}$ - oder  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalt, der an einer beliebigen Stelle der landwirtschaftlichen Nutzfläche in den Oberböden der Untersuchungsgebiete erhoben wird, innerhalb der Bodenkennwertklasse liegt, im Durchschnitt 75 %.

#### **4.5 Ergebnisse der flächenhaften Darstellung**

Die  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte und  $\text{C}_{\text{org}}$ - bzw. Humusgehalte werden in den folgenden Tabellen 34 bis 36 gemäß der Angaben, die in der Bodenkundlichen Kartieranleitung 'KA 4' für die Beurteilung der Acidität und des Humusstatus<sup>1</sup> vorgeschlagen werden, bewertet. Der Humusgehalt wird durch die Multiplikation des  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalts mit dem Faktor 1,72 näherungsweise ermittelt (vgl. AG Bodenkunde 1994).

##### **4.5.1 Anteil der Bodenkennwertklassen an der landwirtschaftlichen Nutzfläche**

Die Oberböden der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen sind zum größten Teil mittel bis stark sauer. Etwa ein Fünftel der Fläche wird von stark bis sehr stark sauren Oberböden eingenommen (Tab. 34). Bezüglich der Humusgehalte sind die Oberböden großflächig als mittel bis stark humos zu bezeichnen. Die  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte zeigen auf dem überwiegenden Teil der landwirtschaftlichen Nutzfläche geringe Gehalte unter 0,5 mg/kg. Weniger als ein Viertel der Nutzfläche weist Werte bis zu 0,68 mg/kg auf.

In Erda ist ein Zehntel der landwirtschaftlich genutzten Oberböden als stark sauer zu bezeichnen. Die Oberböden der restlichen Nutzfläche sind schwach bis mittel sauer. Zwei Drittel der Fläche besitzen mittel humose Oberböden. Die übrige Nutzfläche wird von stark humosen Oberböden eingenommen. Die potentiell pflanzenverfügbaren Cadmium-Gehalte sind mit Werten bis maximal 0,41 mg/kg als gering zu bezeichnen.

Tab. 34 Relativer Anteil der Bodenkennwertklassen an der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda.

Gemarkung	pH <sub>CaCl2</sub> - Klasse	Anteil [%] an der landw. Nutzfl.	C <sub>org</sub> -Klasse [Masse-%]	Humus- klasse [Masse-%]	Anteil [%] an der landw. Nutzfl.	Cd <sub>EDTA</sub> -Klasse [mg/kg]	Anteil [%] an der landw. Nutzfl.
Steinbr. / Eibelsh.	3,6-4,0	6,1	1,86-2,88	3,20-4,95	38,2	0,16-0,31	44,6
	4,0-4,4	13,3	2,88-3,71	4,95-6,38	41,9	0,31-0,45	37,8
	4,4-5,3	80,7	3,71-5,65	6,38-9,72	19,9	0,45-0,68	17,6
Erda	4,4-4,9	10,6	1,25-2,06	2,15-3,54	52,3	0,10-0,21	65,9
	4,9-5,3	38,5	2,06-3,13	3,54-5,38	17,6	0,21-0,31	22,8
	5,3-6,3	50,9	3,13-5,40	5,38-9,29	30,1	0,31-0,41	11,3

#### 4.5.2 Anteil der Merkmalskombinationen an den Bodenkennwertklassen

Aus Übersichtsgründen und zur Kennzeichnung wesentlicher Unterschiede der Klassenzugehörigkeit und der Flächenanteile der Klassen sind die Angaben in den Tabellen 35 und 36 aggregiert dargestellt. Die Informationen beziehen sich auf rund 90 % der kumulierten relativen Flächenanteile der Merkmalskombinationen. Eine vollständige Auflistung der Anteile befindet sich in den Tabellen 63 bis 66 in Kapitel 8.1. Die Expositionsrichtungen Nord, Nordost, Ost und Nordwest sowie Südost, Süd, Südwest und West werden zur Klasse 'Schattseite' (N) bzw. 'Sonnseite' (S) zusammengefasst (vgl. AG Bodenkunde 1994). Die Nutzungsformen Acker- und Grünlandbrache werden zur Klasse 'Brache' (B) und Obstwiesen sowie Feldgehölze zur Klasse 'Sonstige' (S) aggregiert. Die Aufteilung der Gesamtbodenarten wird beibehalten, da dieser Indikator die geringste Faktorstufenanzahl im Vergleich zur Exposition oder Nutzungsform besitzt. Allerdings werden für die Gemarkung Erda Faktorstufenkombinationen der Standortfaktoren 'Exposition' und 'Nutzung' mit den Merkmalsausprägungen 'Sand bis anlehmiger Sand' und 'Moor' aufgrund des geringen Flächenanteils von insgesamt weniger als 1 % an der landwirtschaftlichen Nutzfläche in den Tabellen nicht berücksichtigt.

In den Untersuchungsgebieten Steinbrücken und Eibelshausen überwiegen im stark bis sehr stark sauren Bereich südexponierte Brachflächen auf lehmigen bis stark lehmigen Sanden (S2B) (Tab. 35). Die mittlere pH-Klasse wird von Grünlandbereichen der gleichen Gesamtbodenart und Expositionsrichtung (S2G) dominiert. Mittel bis stark saure Oberböden sind für unterschiedlichste Merkmalskombinationen typisch, wobei südexponierte Grünlandbereiche auf etwas schwereren Böden (S3G) vorherrschen.

Mittlere bis stark humose Oberböden befinden sich vornehmlich in süd- und nordexponierten Grünlandbereichen auf sandigem Lehm bis Lehm (S3G). Stark bis sehr stark humose Oberböden sind überwiegend in ebenen, grünlandgenutzten Lagen (E3G) anzutreffen.

Diese Areale weisen auch die höchsten potentiell mobilisierbaren Cadmium-Gehalte auf, während niedrigere Gehalte eher in südexponierten Lagen (S3G und S2G) vorkommen, deren Oberböden, bezogen auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche der Gemarkungen, relativ niedrige Humusgehalte und hohe pH-Werte aufweisen.

Tab. 35 Relativer Anteil der aggregierten Merkmalskombinationen an den jeweiligen Bodenkennwertklassen bezogen auf ca. 90 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen (Kodierung der Merkmalskombinationen: N = Schattseite, S = Sonnseite, E = Ebene; 2 = lehmiger Sand bis stark lehmiger Sand (IS - SL) und 3 = sandiger Lehm bis Lehm (sL - L); A = Acker, G = Grünland, B = Brache und S = Obstwiese und Feldgehölz).

pH <sub>CaCl2</sub> -Klasse	Merkmalskombination	Anteil [%] an der Bodenkennwertklasse	C <sub>org</sub> /Humus-Klasse	Merkmalskombination	Anteil [%] an der Bodenkennwertklasse	Cd <sub>EDTA</sub> -Klasse	Merkmalskombination	Anteil [%] an der Bodenkennwertklasse
3,6-4,3	S2B N2B S2S	52,7 30,7 16,6	1,86-2,88/ 3,20-4,95	S3G	27,1	0,16-0,31	S3G	33,8
				N2G	19,1		S2G	17,3
				S2B	15,8		S2B	15,6
				S2G	14,9		N2G	13,8
				N3G	9,0		N3G	8,1
				N2B	7,1		S2S	5,8
				S2S	7,1		N2B	5,6
4,3-4,8	S2G S2B N3G S3G S2S	47,7 17,5 12,6 11,4 10,7	2,88-3,71/ 4,95-6,38	S3G	43,2	0,31-0,45	S3G	36,1
				S2G	33,6		S2G	24,0
				N2G	8,6		N3G	16,9
				N3G	8,5		N2G	8,2
				S2S	3,5		S2B	6,5
				N2S	2,6		S2S	5,3
							S3B	2,9
4,8-5,3	S3G S2G E3G N2G N3G S2B S2S	34,9 17,0 16,3 13,7 10,7 4,7 2,6	3,71-5,65/ 6,38-9,72	E3G	65,9	0,45-0,68	E3G	72,8
				N3G	16,2		S2G	17,8
				S2B	13,7		N2G	9,4
				S3B	4,1			

In der Gemarkung Erda werden die Flächen mit einer stark sauren Bodenreaktion von südexponierten Grünlandbereichen auf lehmigem bis stark lehmigem Sand dominiert (S2G) (Tab. 36). Mittel saure Oberböden sind für Grünlandbereiche in nordexponierten oder ebenen Lagen auf sandigen Lehm bis Lehm typisch (N3G und E3G), während sich schwach bis mittel saure Oberböden unter Ackernutzung an süd- oder nordexponierten Hangbereichen auf

lehmigem Sand bis Lehm befinden (S2A und N3A). Im Vergleich zu den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen sind die jeweiligen dominierenden Flächenanteile der pH-Klassen in der Gemarkung Erda auf eine größere Zahl von Flächen unterschiedlicher Merkmalskombinationen verteilt.

Mittel humose Oberböden herrschen auf ackerbaulich genutzten Flächen in südexponierten Lagen mit lehmigem bis stark lehmigem Sand vor (S2A). Mit zunehmendem Humusgehalt überwiegt der Grünlandanteil (N3G). Stark bis sehr stark humose Oberböden finden sich ausschließlich unter Grünlandnutzung, wobei südexponierte und ebene Lagen mit sandigem Lehm bis Lehm überwiegen (S3G und E3G). Im Vergleich zu den Untersuchungsgebieten Steinbrücken und Eibelshausen sind auch die Flächenanteile der Humusklassen auf eine größere Zahl unterschiedlicher Merkmalskombinationen verteilt.

Niedrige  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte sind überwiegend ackerbaulich genutzten Oberböden unterschiedlicher Exposition und Bodenart mit vergleichsweise hohen pH-Werten und niedrigen Humusgehalten zuzuordnen. Flächen mit hohen Gehalten sind ausschließlich auf ebene, grünlandgenutzte Bereiche mit Oberböden aus sandigem Lehm bis Ton beschränkt (E3G und E4G). In diesen Bereichen sind die Oberböden mittel sauer und stark bis sehr stark humos.

Tab. 36 Relativer Anteil der aggregierten Merkmalskombinationen an den jeweiligen Bodenkennwertklassen bezogen auf ca. 90 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Erda (Kodierung der Merkmalskombinationen: N = Schattseite, S = Sonnseite, E = Ebene; 2 = lehmiger Sand bis stark lehmiger Sand (IS - SL), 3 = sandiger Lehm bis Lehm (sL - L) und 4 = schwerer Lehm Ton (LT - T); A = Acker, G = Grünland, B = Brache und S = Obstwiese und Feldgehölz).

pH <sub>CaCl2</sub> -Klasse	Merkmalskombination	Anteil [%] an der Bodenkennwertklasse	C <sub>org</sub> -/Humus-Klasse	Merkmalskombination	Anteil [%] an der Bodenkennwertklasse	Cd <sub>EDTA</sub> -Klasse	Merkmalskombination	Anteil [%] an der Bodenkennwertklasse
4,4-4,9	S2G	36,2	1,25-2,06/ 2,15-3,54			0,10-0,21	S2A	30,3
	N2A	19,1		S2A	43,6		N3A	17,6
	S3A	17,0		N3A	16,2		S3G	11,8
	N2G	10,1		S3A	14,2		N2A	11,0
	E2G	9,6		N2A	7,2		S3A	9,9
	E4A	4,0		E3A	6,7		N3G	6,6
	S2S	4,0					E3A	6,0
							E2A	4,1
4,9-5,3			2,06-3,13/ 3,54-5,38	N3G	24,6	0,21-0,31		
	N3G	29,7		S2G	18,5		N3G	31,0
	E3G	24,0		N2A	14,9		S2A	25,0
	S2A	18,1		N2G	8,8		S2G	11,5
	S3A	13,8		N3A	8,4		S3G	11,5
	E4G	7,6		S2B	3,3		S3A	8,2
	S4A	2,4		N2B	3,1		N2G	6,7
	N2A	2,3		N4G	2,8		N3A	6,1
	S2B	2,1		N3S	2,7			
				E4A	2,2			
5,3-6,3	S2A	35,5	3,13-5,40/ 5,38-9,29	S3G	29,8	0,31-0,41	E3G	75,9
	N3A	24,6		E3G	27,3		E4G	24,1
	S3G	19,2		N3G	19,4			
	N2A	8,1		E4G	8,7			
	E3A	7,5		N2G	4,5			
	E2A	5,1						

## 4.6 Anwendungsbeispiel: Ausschöpfung von Cadmium-Vorsorgewerten in der Gemarkung Erda

### 4.6.1 Modellierung und Regionalisierung der Cadmium-Gesamtgehalte

Die modellierten Cd<sub>KW</sub>-Gehalte der Gemarkung Erda liegen etwa um 0,2 mg/kg über den EDTA-extrahierbaren Anteilen mit geringen absoluten Zuwächsen von den hohen zu den niedrigen Gehalten (vgl. Tab. 67 in Kap. 8.1). Die Spannweite der Werte reicht von 0,31 bis 0,60 mg/kg. Mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95 % liegen die modellierten königswasser-extrahierbaren Cadmium-Gehalte in einem möglichen Schwankungsbereich

von etwa  $\pm 0,05$  bis  $0,08$  mg/kg. Mit ansteigenden  $Cd_{KW}$ -Gehalten nimmt die Breite des Konfidenzintervalls zu.

Die Regionalisierung der  $Cd_{KW}$ -Gehalte erfolgt auf Grundlage der vorliegenden Raumeinheitenkarte. Allerdings wurde diese Regionalisierungsgrundlage ursprünglich auf die flächenhafte Darstellung der bodenkundlichen Kennwerte pH-Wert sowie  $C_{org}$ - und  $Cd_{EDTA}$ -Gehalt abgestimmt. Da die Variation der räumlich repräsentativ erhobenen  $Cd_{KW}$ -Gehalte des Oberbodens jedoch durch die EDTA-extrahierbaren Cadmium-Gehalte erklärt werden kann, ist zu erwarten, dass auch eine räumliche Abhängigkeit der unterschiedlichen Cadmium-Anteile besteht. Wäre dieser räumliche Bezug dagegen nur schwach ausgeprägt, würde durch die Klassifikation der modellierten königswasser-extrahierbaren Cadmium-Gehalte die räumlich erklärbare Verteilung der  $Cd_{KW}$ -Gehalte lediglich auf die bodenkundlich plausible Differenzierbarkeit reduziert werden, falls die Indikatoren, die der Regionalisierung der  $Cd_{EDTA}$ -Gehalte zugrunde liegen, für die flächenhafte Darstellung der königswasser-extrahierbaren Cadmium-Anteile ungeeignet wären. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.5.3 genannten Klassifizierungskriterien werden die  $Cd_{KW}$ -Gehalte in drei Klassen mit den Klassengrenzen  $0,31-0,41$ ,  $0,41-0,51$  und  $0,51-0,6$  mg/kg aufgeteilt.

#### 4.6.2 Relative Ausschöpfung der Cadmium-Vorsorgewerte

Durch die Verschneidung der Informationsschichten Hauptbodenart, Grenz-pH-Wert (vgl. Kap. 3.6.2) und klassifizierter  $Cd_{KW}$ -Gehalt ergeben sich sechs Ausschöpfungsklassen entsprechend der vorkommenden Merkmalskombinationen der einzelnen Informationsschichten (Abb. 47 in Kap. 8.2).

Über 90 % der landwirtschaftlich genutzten Oberböden der Gemarkung Erda haben einen Zustand erreicht, in dem der Vorsorgewert etwa zwischen 30 % und 100 % ausgeschöpft ist (Tab. 37). Die Oberböden der restlichen landwirtschaftlichen Nutzfläche übertreffen den Vorsorgewert im Durchschnitt um etwa ein Drittel.

Tab. 37 Ober- und Untergrenzen der relativen Cd-Vorsorgewert-Ausschöpfung der Oberböden (0-20 cm) in der Gemarkung Erda und relativer Flächenanteil der Ausschöpfungsklassen an der landwirtschaftlichen Nutzfläche. **Fett** dargestellt sind prozentuale Überschreitungen der Vorsorgewerte und entsprechende landwirtschaftliche Nutzflächenanteile.

Klassen-Nr.	Ober- und Untergrenze der Ausschöpfungsklasse der Vorsorgewerte für Cadmium [%] <sup>7</sup>	Relativer Flächenanteil der Ausschöpfungsklasse [%]
1	31 - 41	27,8
2	41 - 51	1,6
3	51 - 60	35,7
4	78 - 103	27,1
<b>5</b>	<b>103 - 128</b>	<b>2,2</b>
<b>6</b>	<b>128 - 150</b>	<b>5,7</b>

Innerhalb der Nutzungsformen ist die Ausschöpfung der Cadmium-Vorsorgewerte höchst unterschiedlich (Abb. 29). Mehr als die Hälfte der als Grünland genutzten landwirtschaftlichen Fläche weist eine Überschreitung der Vorsorgewerte auf. Diese Areale befinden sich meist in Auenbereichen und sind durch die höchsten  $C_{org}$ -Gehalte und niedrigsten pH-Werte der Oberböden in der Gemarkung Erda gekennzeichnet. Mit abnehmenden Anteilen folgen Grünlandbrachen, Streuobstwiesen Ackerbrachen, Äcker und Feldgehölze in dieser Reihenfolge.

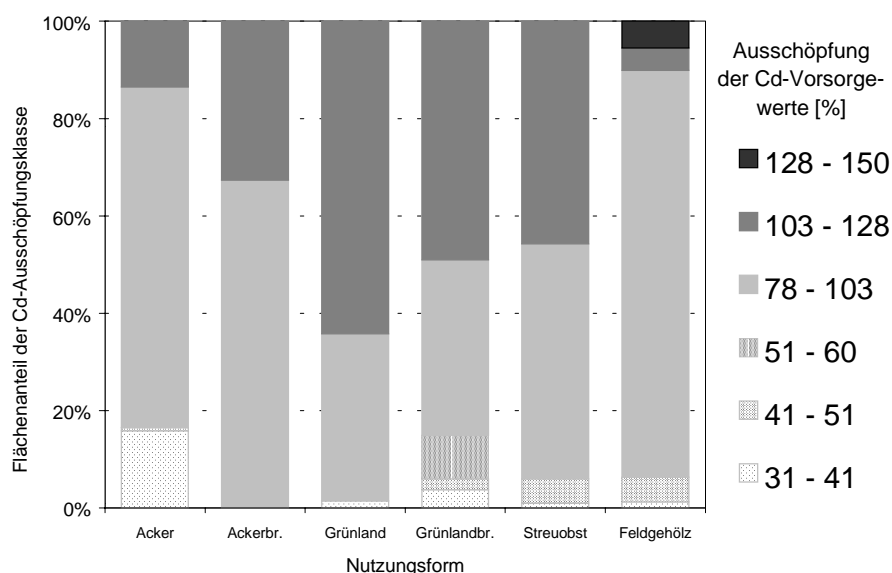


Abb. 29 Flächenteile der Ausschöpfung des Cadmium-Vorsorgewerts innerhalb unterschiedlicher Nutzungsformen der Gemarkung Erda.

<sup>7</sup> Die Klassen 3 und 4 grenzen nicht direkt aneinander, da aufgrund der gewählten Klassifizierung der  $Cd_{KW}$ -Gehalte (Kap. 4.5.1) und der möglichen Vorsorgewerte von 0,4 und 1,0 mg/kg (vgl. Kap. 3.6.2) eine 60- bis 78-prozentige Ausschöpfung der Vorsorgewerte nicht darstellbar ist.

## **5 Bewertung des Regionalisierungsverfahrens und der Regionalisierungsergebnisse**

Gegenstand der folgenden Diskussion ist zum Einen die Bewertung der wesentlichen methodischen Teilaspekte des Regionalisierungsprozesses, zu denen die Ermittlung des Probenumfangs, der Aufbau des Messnetzes und die flächenbezogene Darstellung der bodenkundlichen Kennwerte gehören. Zum Anderen werden die Regionalisierungsergebnisse bezüglich möglicher Unsicherheiten und Unschärfen der räumlichen Aussage beurteilt, die aus den hypothetischen Modellannahmen und der methodischen Vorgehensweise zur Regionalisierung der Bodeneigenschaften sowie den verwendeten Vorinformationen und den erhobenen Daten selbst resultieren. Darüber hinaus werden die Verwendungsmöglichkeiten der regionalisierten Bodenkennwerte unter Berücksichtigung ihrer räumlichen und inhaltlichen Präzision für die Bewertung von Bodenfunktionen erörtert.

### **5.1 Regionalisierungsverfahren**

#### **5.1.1 Probenanzahl und Messnetzeigenschaften**

Wie die Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen zeigen (z.B. Hsiao et al. 2000, Domburg et al. 1997, Schmotz 1996, Hertling et al. 1995, Webster & Oliver 1990), hängt die notwendige Probenanzahl für die präzise flächenhafte Erhebung von Bodenkennwerten oder Schadstoffbelastungen unmittelbar von der Variabilität der jeweiligen Bodeneigenschaft in einem bestimmten Landschaftsausschnitt, der gewünschten Auflösung der flächendeckend darzustellenden bodenkundlichen Informationen und den angewandten Interpolations- oder Extrapolationsmethoden ab. Darüber hinaus wird die Probenanzahl auch durch das Skalenniveau der Untersuchungen bestimmt (Bouma et al 1998, Wagenet 1998, Oliver & Webster 1986, Burrough 1983). Aus diesen Gründen ist ein Vergleich von Probenumfängen verschiedener Untersuchungen kaum möglich. Andererseits existieren bezüglich der notwendigen Probenanzahl zur Ermittlung von bodenkundlichen Flächenaussagen vereinzelt Empfehlungen, die beispielsweise für planerische Zwecke im gesetzlichen Rahmen entwickelt wurden (z.B. BBodSchV 1999, Gröngröft et al. 1999) und eine Anwendung für unterschiedlich strukturierte Räume zulassen. Diese Empfehlungen sind ausschließlich für diskrete Modelle der Bodenvariabilität entwickelt worden, die auf design-basierten Beprobungsstrategien beruhen. Für die Ermittlung von Probenumfängen zur Interpolation von Messwerten einer Bodenei-



genschaft mit modell-basierten Methoden der Geostatistik sind diese Empfehlungen daher ungeeignet (vgl. Burrough 1993, Otte 1988).

Die folgende, beispielhafte Aufstellung zeigt nach unterschiedlichen Vorgaben ermittelte Probenumfänge (Flächenmischproben), die unter Anderem zur flächenbezogenen Erhebung bodenkundlicher Kennwerte dienen. Aus Vergleichsgründen beziehen sich alle Angaben auf die landwirtschaftliche Nutzfläche der Gemarkung Erda (Tab. 38). Soweit es für die Anwendung des jeweiligen Verfahrens erforderlich ist, werden zur Ermittlung der Probenanzahl Gebietscharakteristika bezüglich der Flächengröße oder der standörtlichen Heterogenität berücksichtigt, die aus der Raumeinheitenkarte der Gemarkung Erda abgeleitet sind (vgl. Kap. 4.1.4). Die Zahlen sind Durchschnittswerte für die Extrapolation bodenchemischer Kennwerte oder die bodentypologische Charakterisierung des Untersuchungsgebiets Erda.

Tab. 38 Nach unterschiedlichen Verfahren ermittelte Probenumfänge (Durchschnittswerte) für die landwirtschaftliche Nutzfläche der Gemarkung Erda (Teilflächen = Raumeinheiten).

Quelle	Teilprobenanzahl für eine Mischprobe	berücksichtigte Kriterien	Probenanzahl: 10 / 100 ha
Blume (1992)	-	Maßstabsniveau u. Gesamtfläche	100 / 1000
Bodenschätzung	-	bestimmende Grablöcher u. Gesamtfläche	23 / 226
BbodSchV (1999)	15-25	Teilflächen, Mindestanzahl/Fläche u. Einzelflächengröße	4-8 / 45-82
Gröngröft (1999)	15-25	Teilflächen, Mindestanzahl/Fläche u. Einzelflächengröße	5 / 50
Diese Arbeit	7	Teilflächen, Mindestanzahl/Fläche, Gesamtfläche u. Raumdiversität	2 / 18

Blume (1992) stellt in seiner allgemein gehaltenen Empfehlung die minimal notwendige Probenzahl für bodenkundliche Untersuchungen als eine primär maßstabsabhängige Größe dar. Demnach verringert sich der Probenumfang mit abnehmendem Maßstab exponentiell. Da Gebietscharakteristika nicht berücksichtigt werden, kann eine sichere Erfassung bodenkundlicher Kennwerte im großmaßstäbigen Bereich nur mit Probenanzahlen gewährleistet werden, die die Probenumfänge dieser Arbeit um das 50-fache übersteigen.

Im Rahmen der Bodenschätzung werden umfangreiche feldbodenkundliche Daten, wie z.B. der Humusgehalt des Bodens, für die flächenhafte Bewertung der Ertragsfähigkeit von landwirtschaftlich genutzten Flächen erhoben (vgl. Will 1987). Die hohe Bohrpunktdichte, die diejenige dieser Arbeit um den Faktor Zehn übertrifft, soll die sichere Erhebung der für steuerliche Zwecke relevanten Bodeneigenschaften gewährleisten. Ebenso wie in den vorliegen-

den Untersuchungen werden in der Bodenschätzung als wichtige Faktoren der Bodenvariabilität unter Anderem Nutzungsunterschiede, Boden- und Reliefeigenschaften angesehen.

Die Probenumfänge, die nach den Angaben der Verordnung zum Bodenschutzgesetz (BBodSchV 1999) oder darauf basierender weiterentwickelter Verfahren (Gröngröft et al. 1999) für die landwirtschaftliche Nutzfläche der Gemarkung Erda ermittelt wurden und explizit bodenkundlich relevante Vorinformationen in die Ermittlung der Probenanzahl einbeziehen, zeigen deutlich geringere Probenumfänge, die diejenigen dieser Arbeit dennoch durchschnittlich um das zwei- bis vierfache übertreffen.

Wie die beispielhafte Gegenüberstellung der Probenumfänge für die Gemarkung Erda zeigt, kann die Anzahl der Proben und damit der Beprobungsaufwand durch die Einbeziehung bodenkundlich relevanter Vorinformationen deutlich verringert werden (vgl. Tab. 38). Auf diese Weise ist eine gezielte Beprobung von Raumstrukturen möglich, die mit einer gewissen internen Variabilität voneinander abgrenzbare Ausprägungen einer Bodeneigenschaft repräsentieren. Daraus ergibt sich für den Messnetzaufbau zur Erzeugung diskreter Modelle der Bodenvariabilität die Konsequenz, dass für die Lokalisierung der Beprobungsstandorte die räumliche Anordnung bodenkundlich relevanter und die Messwerthöhe und -verteilung beeinflussender Standortfaktoren eines Untersuchungsgebietes zu berücksichtigen sind. Wenn jedoch keine entsprechenden Vorinformationen zur Verfügung stehen oder die Regionalisierung von Bodeneigenschaften mit geostatistischen Interpolationsverfahren vorgenommen werden soll, gewinnt die Anwendung von Raster- oder Zufallsmessnetzen sowie Kombinationen dieser Messnetztypen (vgl. Kap. 1.2.1.2) an Bedeutung.

Im Vergleich zu systematisch geschichteten Messnetzen sind Rastermessnetze wesentlich einfacher zu erzeugen, da Karten bodenkundlich relevanter Standortmerkmale für den Messnetzaufbau nicht benötigt werden. Das Ziel einer Rasterbeprobung ist die gleichmäßige, an den ausgewiesenen Beprobungsstellen zwingend vorzunehmende Beprobung des Untersuchungsgebietes. Dadurch soll eine inhaltliche Verzerrung der Extra- oder Interpolationsergebnisse vermieden werden (vgl. Böttcher 1998, Webster & Oliver 1990). Tritt jedoch eine ungleichmäßige Musterbildung bodenkundlich relevanter Standortfaktoren auf, wie sie in den Untersuchungsgebieten dieser Arbeit vorkommt, ist davon auszugehen, dass nicht alle flächenmäßig bedeutsamen Raumstrukturen innerhalb des Rastermessnetzes erfasst werden. Da die Probenahmestellen innerhalb eines Rasters systematisch und nicht zufällig angeordnet sind, ist eine Schätzung des Erhebungsfehlers mit Methoden der klassischen Statistik nicht möglich (Webster & Oliver 1990, Burrough & McDonnel 1998).

Zufallsmessnetze gewährleisten im Rahmen design-basierter Beprobungsstrategien die Einhaltung statistischer Voraussetzungen, die für die Schätzung räumlich unabhängiger Messwerte erforderlich sind (Young et al. 1998, Brus & de Gruijter 1997). Allerdings wäre für die standörtlich sehr heterogenen Untersuchungsgebiete dieser Arbeit eine hohe Probenanzahl erforderlich, um zu gewährleisten, dass möglichst viele Ausprägungen der zu untersuchenden Bodeneigenschaft in ihrer tatsächlichen räumlichen Verbreitung erfasst werden (vgl. Burrough & McDonnell 1998). Des Weiteren besteht die Gefahr, dass größere Teilbereiche der Gemarkungen mit unbestimmter Variabilität innerhalb des Zufallsmessnetzes nicht berücksichtigt werden, sofern eine zufällige Clusterbildung oder Gleichverteilung der Beprobungspunkte auftritt (Webster & Oliver 1990, Webster 1993).

Das systematisch geschichtete Messnetz der vorliegenden Arbeit begründet sich auf der Annahme, dass ein Ortsbezug standörtlich homogener Raumeinheiten vorliegt, die bestimmte Ausprägungen bodenkundlicher Kennwerte repräsentieren können (Schmotz 1996, Kuhnt 1994). Allerdings werden im Unterschied zum modell-basierten Ansatz punktuell erhobene Messwerte innerhalb dieser Einheiten als Fixum und nicht als mögliche Relation in einem räumlich stochastischen Prozess betrachtet. Die Analyse des Ortsbezugs der standörtlich homogenen Einheiten wird lediglich für die räumlich gewichtete Platzierung von Beprobungsstandorten innerhalb von Raumeinheiten genutzt, um im Rahmen der Beprobung die räumliche Kontinuität einzelner Standortfaktoren (z.B. Exposition und Bodenart) zu berücksichtigen. Im Gegensatz zu einem regulären Raster oder Zufallsraster werden mit dieser Vorgehensweise bodenkundlich relevante Standortfaktoren bezüglich ihrer räumlichen Anordnung und Kombinationsmuster im Zuge der Auswahl von Beprobungsstandorten explizit berücksichtigt.

Ob mit einem systematisch geschichteten Messnetz bodenkundlich bedeutsame Raumstrukturen bei einem identischen Probenumfang tatsächlich wesentlich vollständiger berücksichtigt werden als mit einem Raster- oder Zufallsmessnetz wird im Folgenden am Beispiel der Raumeinheitenkarte des Untersuchungsgebiets Erda überprüft (vgl. Abb. 30).

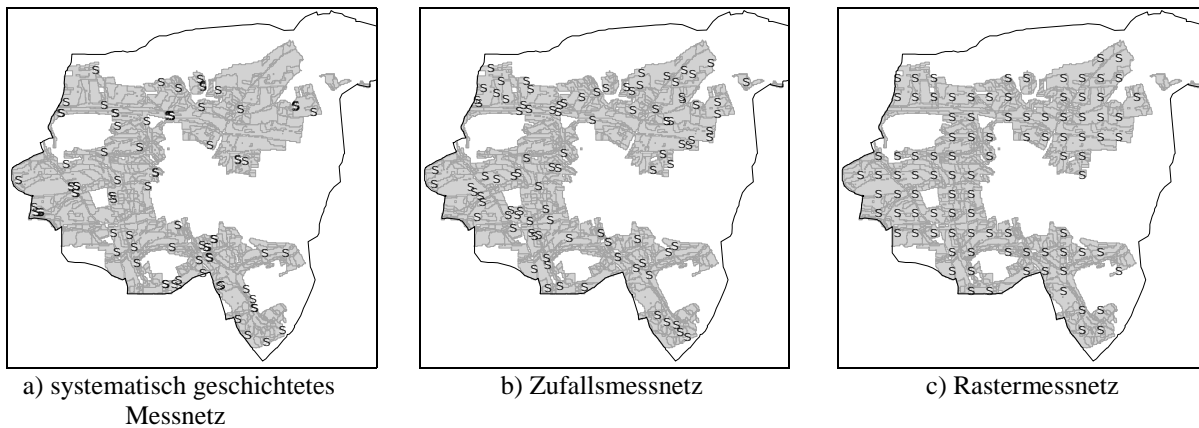


Abb. 30 Probenahmestellenverteilung (96 Standorte) in der Gemarkung Erda bei der Anwendung a) eines systematisch geschichteten Messnetzes, b) eines Zufallsmessnetzes und c) eines Rastermessnetzes. (Im Hintergrund ist die Raumeinheitenkarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche dargestellt. Die Anzahl der Probenahmestellen der drei Messnetze ist identisch.).

Zur Kennzeichnung der unterschiedlichen Messnetze bezüglich ihrer Eignung für die punktuelle Erfassung der räumlichen Strukturen in den Untersuchungsgebieten Steinbrücken und Eibelshausen sowie Erda wird der prozentuale Anteil der erfassten Raumeinheiten am gesamten Untersuchungsgebiet herangezogen (Tab. 39)

Tab. 39 Prozentualer Anteil der Raumeinheiten an der Gesamtanzahl der Raumeinheiten, die mit einem Raster-, Zufalls- oder systematisch geschichtetem Messnetz mit jeweils 96 Probenahmestellen erfasst werden. Die Angaben beziehen sich auf 96% aller vorkommenden Raumeinheiten der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Erda.

Untersuchungsgebiet	Rastermessnetz (quadratisch)	Zufallsmessnetz	systematisch geschichtetes Messnetz
Steinbrücken/ Eibelshausen	58	55	100
Erda	67	58	100

Der Vergleich zeigt, dass im Falle der Gemarkung Erda mit einem Raster- oder Zufallsmessnetz etwa zwei Drittel der Merkmalskombinationen erfasst werden, die in der Raumeinheitenkarte dargestellt sind. In den Untersuchungsgebieten Steinbrücken und Eibelshausen sind mit dem Raster- und Zufallsmessnetz insgesamt deutlich ungünstigere Ergebnisse zu erzielen. Offensichtlich sind herkömmliche Messnetzdesigns im Vergleich zu einem systematisch geschichtetem Messnetz bei gleichen Probenumfängen nur mit Einschränkungen geeignet, bodenkundlich bedeutsame Raumstrukturen ausreichend zu berücksichtigen. Erst wenn die Probenzahl erhöht wird, nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass auch kleinere Raumeinheiten mit einem Zufalls- oder Rastermessnetz erfasst werden.

Da auch bei der Anwendung von Raster- und Zufallsmessnetzen der notwendige Probenumfang nur mit vorliegenden bodenkundlich relevanten Flächeninformationen oder detaillierten Variabilitätsuntersuchungen (vgl. Webster & Oliver 1990, Oliver & Webster 1986, Webster 1977) abgeschätzt werden kann, relativiert sich der geringere Aufwand zur Erzeugung dieser Messnetze im Vergleich zum systematisch geschichteten Messnetz. Sollen die bodenkundlichen Vorinformationen darüber hinaus als Extrapolationsgrundlage der punktuell erhobenen Bodenkennwerte verwendet werden, sind die Vorteile, die sich durch den einfacheren Aufbau von Raster- oder Zufallsmessnetzen ergeben, als marginal zu betrachten.

Darüber hinaus werden mit der rein formalen oder zufälligen Verteilung der Probenahmestellen in Raster- oder Zufallsmessnetzen mögliche Diskontinuitäten oder Kontinuitäten der Raummuster nicht ausdrücklich berücksichtigt. Aus diesem Grund ist für die Erhebung räumlich repräsentativer Messwerte einer Bodeneigenschaft die Berücksichtigung der Lage von Beprobungsstellen von großer Bedeutung (vgl. Schmotz 1996, Kuhnt 1994). Dieses gilt insbesondere für diskrete Extrapolationsgrundlagen als Resultat der Verschneidung von Standortfaktoren, deren Merkmalsausprägungen in der Realität räumlich kontinuierlich verteilt sind (z.B. Exposition und Bodenart).

Im Gegensatz dazu spielt für kontinuierliche Modelle der Bodenvariabilität, die auf modellbasierten Ansätzen beruhen, die Anordnung der Beprobungsstandorte nur im Rahmen der Interpolation zur Ermittlung der Interpolationsgewichte eine Rolle. Daher werden häufig einfach aufgebaute, reguläre Rastermessnetze als Beprobungsbasis eingesetzt. Die notwendige Dichte des Rasters zur Schätzung eines validen Variogramms muss allerdings durch prospektive Variabilitätsuntersuchungen oder die Auswertung bodenkundlich relevanter Vorinformationen ermittelt werden.

Die Interpolierbarkeit der Punktinformation ist in design-basierten Modellen der Bodenvariabilität letztendlich von der räumlichen Distanz der Messpunkte abhängig, innerhalb derer ein großer Teil der Gesamtvariabilität einer Bodeneigenschaft erfasst wird (Otte 1988, Zölitz 1983). Verschiedene großmaßstäbige Untersuchungen auf landwirtschaftlich einheitlich genutzten Standorten zeigen jedoch, dass pH-Werte und  $C_{org}$ -Gehalte in Oberböden nur über kurze Distanzen eine räumliche Abhängigkeit aufweisen (Tab. 40). Diese Angaben besitzen allerdings nur einen beispielhaften Charakter, da die Ergebnisse einer Variogrammanalyse labiler Bodeneigenschaften stark von der Variabilität der Standorteigenschaften eines Untersuchungsgebietes und den gewählten Abständen der Beprobungsstellen abhängen. Die Rasterweite für das in Abbildung 30 c) dargestellte reguläre Rastermessnetz der Gemarkung

Erda beträgt bei 96 Beprobungsstandorten 230 m und übertrifft damit die in Tabelle 40 aufgelisteten Reichweiten (*ranges*) der Variogramme für den pH-Wert von ca. 8 bis 115 m und den C<sub>org</sub>-Gehalt von 15 bis 33 m erheblich. Angenommen, die Rasterweite des Messnetzes für die Erhebung der pH-Werte und C<sub>org</sub>-Gehalte der Gemarkung Erda wäre auf die mittleren Reichweiten der Tabellendaten reduziert, dann wäre für eine geostatistisch einwandfreie Interpolation der Messwerte etwa die drei - bis zwölffache Probenanzahl im Vergleich zu dem systematisch geschichteten Messnetz erforderlich. Anzumerken ist, dass für die Ermittlung einiger der in Tabelle 40 angegebenen geostatistischen Parameter Standorte ausgewählt wurden, die homogene Standorteigenschaften (z.B. Bodenart, Relief) aufweisen, um so die Randbedingungen der Untersuchungen weitestgehend zu konditionieren. Daher ist zu erwarten, dass in den Untersuchungsgebieten Steinbrücken, Eibelshausen und Erda ein großer Teil der gesamten Messwertvarianz schon über eine wesentlich kürzere Distanz erreicht wird, so dass die notwendige Probenanzahl in den Gemarkungen für eine geostatistische Interpolation noch größer sein dürfte.

Tab. 40 Lage- und Streuungsmaße sowie geostatistische Parameter der räumlichen Variabilität von pH-Werten und C<sub>org</sub>-Gehalten landwirtschaftlich genutzter Oberböden (Zusammenstellung aus ausgewählten Untersuchungsergebnissen verschiedener Autoren).

Quelle	Nutzung	Bodenkennwert	nugget	sill	range [m]	N	$\bar{X}$	CV [%]
Onofiok (1993)	Mais	C <sub>org</sub> [Masse-%]	0	0,0748	15	120	1,31	16,4
Gotway et al. (1996)	Getreide allg.	C <sub>org</sub> [g/kg]	-	-	17,0-33,4	195	26,8	10,46
Otte (1988)	Grünland	C <sub>org</sub> [Masse-%]	-	-	30	104	1,0	26,4
Tsegaye & Hill (1998)	Roggen	C <sub>org</sub> [Masse-%]	0,024	0,061	32,0	164	2,48	4,22
		pH <sub>CaCl2</sub>	0,0180	0,043	7,8	164	6,23	8,47
Webster & Oliver (1989)	Acker allg.	pH <sub>CaCl2</sub>	0,087	0,913	115	436	-	-
Laslett et al. (1987)	Weide	pH <sub>CaCl2</sub>	0,0191	0,0512	52,89-85,47	121	4,49	-

Zunehmend wird auch die geostatistische Interpolation in Untersuchungsgebieten mit einer zu erwartenden Diskontinuität der Übergänge von Messwerten einer Bodeneigenschaft unter Berücksichtigung vorliegender Flächeninformationen realisiert, da erkannt wurde, dass die Einbeziehung externer Informationen für eine Gliederung des Untersuchungsgebietes zu einer Verbesserung der Interpolationsergebnisse führen kann (z.B. Sinowski & Auerswald

1999, Knotters et al. 1995, McBratney et al. 1991). Problematisch sind in diesem Zusammenhang allerdings die notwendigen hohen Probenzahlen, die für die valide Schätzung eines Variogramms zur Ermittlung der Interpolationsgewichte erforderlich sind und für jede Teilfläche innerhalb eines Untersuchungsgebiets realisiert werden müssten. Verschiedene Untersuchungen zeigen (z.B. Burrough & McDonnell 1998, Voltz & Webster 1990, Dutter 1985), dass aussagefähige experimentelle Variogramme bei einer isotropen räumlichen Variation der Messwerte einer Bodeneigenschaft mindestens 100 Proben erfordern. Liegen anisotrope Bedingungen vor, steigt der notwendige Umfang auf 300 bis 400 Proben an.

Beispielsweise wären für die landwirtschaftlichen Fläche der Gemarkung Erda bei einer Aufteilung des Untersuchungsgebiets in Acker und Grünland mehrere hundert Proben zur Schätzung der Variogramme erforderlich, da beide Nutzungstypen nicht räumlich aggregiert und isoliert auftreten, sondern im Untersuchungsgebiet sehr ungleichmäßig verteilt sind (vgl. Abb. 38 in Kap. 8.2). Nutzungsabhängige Bodeneigenschaften können daher auf diese Weise in standörtlich hochdiversen Räumen, wie den Untersuchungsgebieten dieser Arbeit, nicht effizient erhoben werden. Für eine Gebietsgliederung als Grundlage einer geostatistischen Modellierung kommen eher großräumig wechselnde Strukturen wie zum Beispiel geologische, geomorphometrische oder geomorphographische Einheiten in Betracht (vgl. Sinowski & Auerswald 1999, Knotters et al. 1995, McBratney et al. 1991), sofern eine räumliche Differenzierung der zu erhebenden Bodenkennwerte unter Berücksichtigung dieser Faktoren plausibel erscheint.

### **5.1.2 Flächenhafte Darstellung labiler Bodenkennwerte**

Die flächenhafte Darstellung der punktuell erhobenen Bodeneigenschaften erfolgt in dieser Arbeit durch die Extrapolation der Messwerte auf diskrete Raumeinheiten, die zugleich die Grundlage des Messnetzes bilden. Diese Vorgehensweise ist insbesondere dann für die flächenbezogene Darstellung labiler Bodeneigenschaften geeignet, wenn die mögliche Probenanzahl der Untersuchungen begrenzt ist und im Übergangsbereich von Nutzungsformen abrupte Wechsel der Ausprägungen einer Bodeneigenschaft zu erwarten sind (z.B. Burrough & McDonnell 1998, Moore et al. 1993, Voltz & Webster 1990). Solche plötzlichen Änderungen eines Bodenkennwerts werden durch die Art und Intensität der Bewirtschaftung hervorgerufen und können in kontinuierlichen Modellen der Bodenvariabilität nur mit einem enormen Erhebungsaufwand berücksichtigt werden. Da beide genannten Bedingungen für die

Untersuchungsgebiete zutreffen, wird mit einem diskreten Modell der Bodenvariabilität im Vergleich zu einer lokalen, globalen oder geostatistischen Interpolation der Messwerte eine wesentlich höhere Aussagegüte erreicht (vgl. Brus & de Gruijter 1997, Burrough 1993, Burgess et al. 1981).

Sozioökonomische und naturräumliche Faktoren haben in den Untersuchungsgebieten Steinbrücken, Eibelshausen und Erda zu einer extremen räumlichen Heterogenität der Art und Intensität der Nutzung geführt (Nowak 1988). Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, wirkt sich diese Heterogenität jedoch deutlich auf die räumliche Variabilität der Bodenkennwerte in den Untersuchungsgebieten aus (vgl. Kap. 4.4.4 und 4.5). Zur Erfassung dieser Variabilität wäre für eine valide geostatistische Interpolation der Bodenkennwerte demzufolge eine unverhältnismäßig hohe Probenanzahl erforderlich (vgl. Kap. 5.1.1). Diese besonderen Verhältnisse sind ein weiterer Grund, der den Einsatz eines diskreten Modells der Bodenvariabilität für die flächenhafte Darstellung der labilen Bodenkennwerte in den Untersuchungsgebieten rechtfertigt.

## **5.2 Regionalisierungsergebnisse**

Räumliche Darstellungen von punktuell erhobenen Bodeneigenschaften können die reale Standortsituation nur bis zu einem gewissen Grad reproduzieren. Zahlreiche Faktoren beeinflussen die räumliche und inhaltliche Präzision der Regionalisierungsergebnisse. Schon mit der Erhebung sowie der inhaltlichen und geometrischen Manipulation der Grundlagendaten kann ein Fehlerpotenzial aufgebaut werden, das in seinem Ausmaß ermittelt oder abgeschätzt werden muss, um eine Fehlinterpretation der Regionalisierungsergebnisse zu vermeiden. Weitere mögliche Fehlerquellen betreffen die Klassifizierung der Regionalisierungsergebnisse im Hinblick auf die Güte der raumbezogenen Darstellung sowie die Qualität und Gültigkeit des Regionalisierungsmodells.

### **5.2.1 Einfluss der Eingangsdatenqualität auf die Güte der Regionalisierungsergebnisse**

Das Format und die Auflösung der Eingangsdaten, die für die Erzeugung des Messnetzes und als Regionalisierungsgrundlage eingesetzt werden, sind zum Teil sehr unterschiedlich, so dass mit Fehlern durch die Angleichung der Geometrien zu rechnen ist (vgl. Burrough & McDonnell 1998, Sauer & Behr 1997, Sbresny 1995). Tatsächlich beträgt die prozentuale



Flächenabweichung der Vektorkarten (Nutzung und Bodenart) im Vergleich zum 10 m-Rasterformat weniger als 0,05 %, so dass die Vektor-Raster-Konvertierung keine nennenswerte Fehlerquelle für die großmaßstäbige Flächenaussage darstellt. Für die Konvertierung des 40 m-DHM in eine klassifizierte Expositionskarte im 10 m-Raster sind jedoch erhebliche Datenmanipulationen notwendig, so dass Lage- und Zuordnungsfehler durch die Verwendung dieser Datengrundlage wahrscheinlich sind. Wie sich im Verlauf der Probenahme zeigte (vgl. Kap. 4.2.3), weisen die einzelnen Elemente der Expositionskarte im Vergleich zur Lagegenauigkeit der kartografisch dargestellten Nutzungsformen und Bodenarten tatsächlich die größten Abweichungen von den realen Verhältnissen auf. Trotz dieser Unzulänglichkeiten ist die Verwendung von Reliefinformation für die groß- bis mittelmaßstäbige Regionalisierung labiler Bodeneigenschaften in Gebieten mit einer mittleren bis hohen Reliefenergie angezeigt, wie die Ergebnisse dieser und anderer Arbeiten (z.B. McKenzie & Ryan 1999, Pennock et al. 1994, Moore 1993, Brubaker et al. 1993) bestätigen.

### **5.2.2 Bedeutung der räumlichen Kontinuität oder Diskontinuität von Standortmerkmalen für die flächenhafte Darstellung labiler Bodenkennwerte**

Flächen, die durch eine bestimmte Spanne der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte,  $\text{C}_{\text{org}}$ - oder  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte gekennzeichnet sind, sind in den flächenbezogenen Darstellungen der Bodeneigenschaften (Kap. 8.2) modellbedingt als diskrete, übergangslos voneinander getrennte Einheiten dargestellt. Diese Darstellungsweise impliziert einen mehr oder weniger abrupten Wechsel der Bodeneigenschaften, der aufgrund der parzellenscharfen Bewirtschaftung und des statistisch nachgewiesenen vorherrschenden Nutzungseinflusses (vgl. Kap. 4.4.1) auf die labilen Bodenkennwerte zu vermuten ist. Allerdings ist auch zu erwarten, dass an Ackerstandorte angrenzende, extensiv bewirtschaftete Grünlandbereiche, Obstwiesen, Feldgehölze oder mehrjährige Brachen in ihren Randbereichen Gradienten der labilen Bodeneigenschaften aufweisen, die beispielsweise durch eingewehte Dünger- oder Kalkstäube von den angrenzenden, intensiv bewirtschafteten Standorten hervorgerufen werden (vgl. Szibalski & Felix-Henningsen 1999, Laser 1992, Walter 1987).

Eine weitere Ursache für graduelle Übergänge der labilen Bodeneigenschaften kann aus der räumlichen Kontinuität der Standortmerkmale Bodenart und Exposition resultieren. Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, ist der Einfluss dieser Faktoren auf die Variabilität der Bodeneigenschaften im Relation zur Nutzung in der Gemarkung Erda geringer und in Stein-

brücken und Eibelshausen etwa gleichwertig mit dem Nutzungseinfluss (vgl. Tab. 23 in Kap. 4.4.1). Außerdem treten Nutzungsänderungen im Vergleich zu einem Wechsel der Expositionsrichtung oder der Bodenart in den Untersuchungsgebieten wesentlich häufiger auf (vgl. Tab. 41 und Abb. 33 bis Abb. 38 in Kap. 8.2). Bezogen auf die landwirtschaftliche Nutzfläche ist daher die Wahrscheinlichkeit groß, dass ein Wechsel der Ausprägung eines Bodenkennwerts in erster Linie durch Nutzungsänderungen hervorgerufen wird.

Tab. 41 Anzahl der Klassenflächen der Bodenart, Exposition und Nutzung in den Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda als Kennzeichen für die Häufigkeit des Auftretens von Übergängen dieser Merkmale.

Bodenart	Flächenanzahl		Nutzung	Flächenanzahl		Exposition	Flächenanzahl	
	Steinbr./ Eibelsh.	Erda		Steinbr./ Eibelsh.	Erda		Steinbr./ Eibelsh.	Erda
S - SI	-	1	Acker	40	507	Nord	70	25
IS - SL	43	72	Acker- brache	10	30	Nord-Ost	24	41
sL - L	51	49	Grünland	500	510	Ost	28	14
LT - T	-	63	Grünland- brache	162	61	Süd-Ost	46	29
Mo	-	9	Streuobst	74	49	Süd	41	35
			Feldgehölz	75	25	Süd-West	41	23
						West	91	14
						Nord-West	50	28
						Ebene (1-2°)	32	18
Summen	94	194		861	1182		423	227

Alle klassifizierten Ausprägungen der Exposition und Bodenart, die in den Untersuchungsgebieten auftreten, werden mit einer Pufferzone von 10 m versehen, um eine Beprobung der Übergangsbereiche zu vermeiden. Auf diese Weise wird verhindert, dass potentielle Beprobungsstandorte im Verlauf der Nachbarschaftsberechnungen in Bereichen ausgewiesen werden, die vermutlich keine eindeutige Zuordnung einer Merkmalsausprägung erlauben.

Die Ausweisung der Pufferzonen betrifft etwa 50 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche. Die von den Pufferbereichen eingenommenen Flächen innerhalb der Untersuchungsgebiete sind sehr uneinheitlich, da sie stark von der Größe und Form der gepufferten Flächen abhängen. Je mehr die Einzelfläche einer Raumeinheit in ihrer Form einem Kreis ähnelt und je größer sie ist, desto geringer ist der Pufferflächenanteil an dieser Einzelfläche (vgl. Dunn et al. 1990). Beispielsweise wird innerhalb der Raumeinheitenkarte der Gemarkung Erda eine Einzelfläche mittlerer Größe von einem Pufferstreifen umgeben, der bereits 60 % dieser Fläche

einnehmen kann. Dieser Anteil reduziert sich bei den größten Einzelfläche einer Raumeinheit auf durchschnittlich 30 %. Sehr kleine Flächen, die nur wenige Pixel umfassen, werden durch die Pufferung beseitigt.

Da in den Pufferzonen keine Proben entnommen werden können und die Übergangssituation der labilen Bodenkennwerte in diesen Arealen unklar ist, sind für diese Bereiche im Prinzip keine eindeutigen Aussagen über die Intensität und räumliche Variabilität der Bodeneigenschaften möglich, die über hypothetische Annahmen hinausgehen. Allerdings ist in der Gemarkung Erda der Einfluss der Bewirtschaftung auf angrenzende, extensiv genutzte Standorte aufgrund der gegenwärtigen Bearbeitungsweise der intensiv bewirtschafteten Ackerstandorte und der im Gelände beobachteten Vegetationszusammensetzung vermutlich auf wenige Meter begrenzt (vgl. Laser 1992). Daher ist zu erwarten, dass auch die labilen Bodenkennwerte sich nur innerhalb dieser kurzen Distanz ändern. In Steinbrücken und Eibelshausen herrscht eine extensive Grünlandnutzung vor, so dass durch die Bewirtschaftung hervorgerufene, nennenswerte Übergangsbereiche der labilen Bodenkennwerte ebenfalls nicht zu erwarten sind. Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen ist eine flächenhafte Darstellung der Bodeneigenschaften für die Pufferbereiche durchaus zulässig, obwohl für diese Areale keine bodenkundlichen Messwerte vorliegen.

Natürlich wäre eine Reduzierung der Pufferbereichsbreite wünschenswert. Durch die Vergrößerung der potentiell beprobaren Fläche können dann Änderungen der Bodenkennwerte in den Übergangsbereichen der Nutzungsformen räumlich präziser erfasst werden. Allerdings ist ein solcher Schritt nur möglich, wenn genauere Eingangsdaten für die Erzeugung der Regionalisierungsgrundlage zur Verfügung stehen, so dass die Rasterweite der Raumeinheitenkarte verringert werden kann. Dieses betrifft insbesondere das Digitale Höhenmodell.

Eine Möglichkeit, die Übergangsbereiche der Exposition und Bodenart in die raumbezogene Darstellung einzubeziehen, wäre die Definition von Wahrscheinlichkeits- oder Fuzzy-Bereichen (vgl. Sauer & Behr 1997, McBratney & Odeh 1997, Lark & Bolam 1997). Um geeignete Wahrscheinlichkeits- bzw. Zugehörigkeitsfunktionen für die Übergangsbereiche zu ermitteln, sind zumindest detaillierte Expertenkenntnisse, besser jedoch Messergebnisse über alle möglichen Übergangssituationen der labilen Bodenkennwerte zwischen den Raumeinheiten erforderlich (vgl. Burrough & McDonnell 1998). Für die vielfältigen Übergänge zwischen Expositions- und Bodenartenklassen sowie unterschiedlich genutzten Bereichen stehen in den Untersuchungsgebieten keine entsprechenden Informationen zur Verfügung. Für die Erkundung der Übergangsbereiche wäre eine große Zahl zusätzlicher Beprobungen und im

Falle der Nutzung die genaue zeitliche und räumliche Dokumentation der Bewirtschaftungsweise notwendig (vgl. Laser 1992), um verallgemeinerbare Aussagen über mögliche Gradienten der labilen Bodenkennwerte zu erhalten. Zudem müsste die Auflösung der flächenhaften Darstellung stark erhöht werden, um in der Rasterdarstellung graduelle Änderungen der Bodeneigenschaften im Übergangsbereich der Raumeinheiten überhaupt darstellen zu können. Eine weitere Erhöhung der Auflösung über einen Rasterabstand von 10 m ist jedoch vor allem aufgrund der begrenzten räumlichen und inhaltlichen Präzision der Expositions-karte, die für die Erstellung der Raumeinheitenkarten verwendet wurde, nicht möglich.

Unter Berücksichtigung der erzielten Verringerung des Regionalisierungsaufwands und der besonderen Schwierigkeiten, die mit der Erzeugung von Flächendaten labiler Bodeneigenschaften in standörtlich hochdiversen Räumen verbunden sind, wird trotz der genannten Vorbehalte eine hohe Güte der Flächenaussage erreicht. Diese Feststellung wird durch die Validierungsergebnisse (Kap. 4.4.4) und die in Kapitel 5.1 geschilderten Ausführungen über die Nachteile der Anwendung herkömmlicher Verfahren für die großmaßstäbige Regionalisierung labiler Bodenkennwerte in sehr heterogenen Untersuchungsgebieten gestützt.

### 5.2.3 Variabilität und Klassifizierung der Bodenkennwerte

Die Ermittlung der repräsentativen Beprobungsstellen unter Berücksichtigung der räumlichen Anordnung, Verbreitung und Kombinationsmuster der Standortfaktoren Exposition, Bodenart und Nutzung soll gewährleisten, dass Ausprägungen der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte,  $\text{C}_{\text{org}}$ - oder  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte erhoben werden, die repräsentative Werte für alle Einzelflächen der Raumeinheit darstellen (vgl. Schmotz 1996, Kuhnt 1994). Die anschließende Klassifizierung der Raumeinheitenwerte (Mittelwerte der Messwerte einer Raumeinheit) erfolgt unter der Voraussetzung, dass innerhalb der dargestellten Klassen die Variation der Ausprägungen die Gesamtvariation aller Klassen unterschreitet (vgl. Voltz et al 1997, Voltz & Webster 1990, Borough 1993, Burgess et al 1981). Die vorliegende Informationsdichte, die durch die Anzahl der erhobenen Messwerte und die Rasterweite der nachbarschaftsanalytisch ausgewerteten Raumeinheitenkarten begrenzt ist, erlaubt keine Aussage über die Variabilität der labilen Bodeneigenschaften innerhalb der Einzelflächen einer Raumeinheit. Es besteht also die Möglichkeit, dass die kleinräumige Variabilität in den Einzelflächen die Gesamtvariabilität der Bodenkennwertklassen übersteigt.

Anhaltspunkte über die kleinräumige Variabilität der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte und  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte unterschiedlich genutzter Oberböden können aus den Voruntersuchungen zur Ermittlung des Beprobungsschemas (Kap. 3.4.1) abgeleitet werden. Die Variationskoeffizienten der  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte zeigen für den Grünland- und Brachestandort gegenüber dem Acker zwei- bis nahezu dreifach höhere Werte (Tab. 42). Die  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte der Grünland- und Brachfläche weisen im Vergleich zur Ackerfläche nur eine geringfügig größere Streuung auf.

Tab. 42 Mittelwert, Spannweite und Variationskoeffizient der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte und  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte des Ackers, der Grünlandfläche und der Brache. Datengrundlage sind die Ergebnisse der Voruntersuchungen zur Ermittlung des optimalen Beprobungsschemas (vgl. Kap. 3.4.1).

Lage- und Streuungsmaße	Acker		Grünland		30-jährige Brache	
	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	$\text{C}_{\text{org}}$	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	$\text{C}_{\text{org}}$	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	$\text{C}_{\text{org}}$
$\bar{x}$	4,69	1,53	4,48	2,42	4,13	2,78
d	0,63	0,36	0,81	1,82	1,05	1,55
V [%]	3,42	5,68	4,47	15,55	5,22	12,31

Die durchschnittlichen Klassenbreiten der regionalisierten  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte der Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda (vgl. Tab. 25 und Tab. 26 in Kap. 4.4.3.3) übertreffen die mittleren Messwertspannweiten (d) der Voruntersuchungen (Tab. 43). Die mittleren Spannweiten der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte (Tab. 43) liegen jedoch etwa 15 bis 25 % über den durchschnittlichen Klassenbreiten der regionalisierten  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte einschließlich der möglichen Klassenüberschneidungen (vgl. Tab. 25 und Tab. 26 in Kap. 4.4.3.3).

Tab. 43 Mittlere Spannweite der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte und  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte des Ackers, der Grünlandfläche und der Brache (Datengrundlage sind die Ergebnisse der Voruntersuchungen zur Ermittlung des optimalen Beprobungsschemas (Kap. 3.4.1)) sowie mittlere Klassenbreiten der regionalisierten  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte und  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte der Untersuchungsgebiete.

Bodenkundlicher Kennwert		$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	$\text{C}_{\text{org}}$
Mittelwert der Spannweiten aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen		0,83	1,24
Mittlere Klassenbreiten der regionalisierten Bodenkennwerte (Mittlere Klassenbreiten zzgl. der durchschnittlichen qualitativen Klassenüberschneidungen (vgl. Tab. 25 und Tab. 26 in Kap. 4.4.3.3))	Steinbr./ Eibelsh.	0,6 (0,6)	1,26 (1,32)
	Erda	0,6 (0,7)	1,38 (1,69)

Allerdings sind die Ergebnisse der drei intensiv untersuchten Standorte (vgl. Tab. 42) aus mehreren Gründen nicht repräsentativ für die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche der Gemarkungen Erda, Steinbrücken und Eibelshausen:

- Der größte Teil der pH-Variation wird durch die Messwerte der 30-jährigen Brachefläche hervorgerufen. Diese starke kleinräumige Variabilität ist typisch für Standorte, die sich einem naturbelassenen Stadium nähern (Gisi 1990). Alte Brachflächen, die bereits deutlich differenzierte, verbuschte Vegetationsdecken aufweisen, treten in den Untersuchungsgebieten jedoch nur mit geringen Flächenanteilen von wenigen Prozent auf.
- Die Ergebnisse der Variabilitätsuntersuchungen in der Gemarkung Erda sind nicht auf die Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen übertragbar, weil sich in diesen Untersuchungsgebieten die Niveaus und die Spannweiten der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte und  $\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte im Vergleich zur Gemarkung Erda deutlich unterscheiden (vgl. Kap. 4.1.1).
- In der Gemarkung Erda wurde nur ein kleiner räumlicher Ausschnitt mit einer bestimmten, nicht für alle Standorte repräsentativen Konstellation der Standortfaktoren Exposition, Bodenart und Nutzung untersucht.
- Der Oberboden wurde in der Tiefenstufe 0-10 cm und nicht in 0-20 cm beprobt. Durch die voneinander abweichenden Probenvolumina und Beprobungstiefen der Vor- und Regionalisierungsuntersuchungen (in beiden Fällen erfolgte die Beprobung mit einem Nmin-Bohrer,  $d = 3,1$  cm) wurden unterschiedliche Anteile der Bodenvariabilität erfasst (vgl. Schmotz 1996, Miehlisch 1976). Hinzu kommt die zu erwartende höhere Variabilität der labilen Bodenkennwerte in der Tiefenstufe 0-10 cm im Vergleich zum Bereich von 0-20 cm (vgl. Hennings 1991).

Insgesamt betrachtet liefern die Ergebnisse der Voruntersuchungen jedoch wichtige Anhaltspunkte über die kleinräumige Variabilität und die mögliche Spannweite der labilen Bodeneigenschaften in heterogenen Mittelgebirgslandschaften und bestätigen, unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen, die Plausibilität der gewählten Klassifizierung der labilen Bodenkennwerte in den Untersuchungsgebieten Erda, Steinbrücken und Eibelshausen.

Die Klassifizierung der labilen Bodenkennwerte erfolgte unter Berücksichtigung der laboranalytisch erreichbaren Messgenauigkeit, einer bodenkundlich plausiblen Unterteilung sowie der Varianzen der Mess- und Raumeinheitenwerte innerhalb und zwischen den Klassen. In der bodenkundlichen Praxis gebräuchliche Klassifizierungen labiler Bodeneigenschaften (vgl. AG Bodenkunde 1994) berücksichtigen diese Kriterien jedoch nur teilweise. Um die Folgen unterschiedlicher Klassifizierungen auf inhaltliche und räumliche Aussagen über die Intensität und Variabilität labiler Bodenkennwerte zu verdeutlichen, werden in den folgenden Beispielen (Abb. 31 und Abb. 32) die Einstufungen der Bodenreaktion und des aus dem  $\text{C}_{\text{org}}$ -

Gehalt berechneten Humus-Gehalts nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (1994) mit den Klassifizierungsergebnissen dieser Arbeit verglichen.

Die in der Bodenkundlichen Kartieranleitung vorgeschlagenen pH-Klassen dienen als Grundwerte für Bewirtschaftungsmaßnahmen wie die Kalkung und die Düngung der Böden oder die Wahl der Kulturart. Im Bereich der neutralen Bodenreaktion ist die Aufteilung stärker differenziert und daher für intensiv genutzte Ackerstandorte mit meist hohen pH-Werten durchaus zweckmäßig. Allerdings zeigen Bodenuntersuchungen landwirtschaftlich genutzter Flächen in Norddeutschland (Schleuß et al. 1994), dass die vorgeschlagenen Intervalle von 0,5 pH-Einheiten im höheren pH-Bereich mit Spannen von pH 4,3 bis 6,3 auch für Ackerflächen ausgeschöpft werden können. In den Untersuchungsgebieten werden jedoch große Flächenanteile als Grünland und Streuobstwiese genutzt oder liegen brach. Diese Standorte zeigen zumeist Werte unter pH 6, die innerhalb des Bereichs liegen, der in der Bodenkundlichen Kartieranleitung nur noch in Einerstufen unterteilt wird. Die ökologische und bodenchemische Bedeutung der exponentiell zur Basis 10 zunehmenden H-Ionenkonzentration bei abnehmenden pH-Werten (Gisi 1990, Ulrich 1981) wird mit dieser Klassifizierung nur unzureichend wiedergegeben. Beispielsweise würden drei Viertel der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Gemarkung Erda bei der Wahl dieser Klassifizierung in eine pH-Klasse fallen (Abb. 31). Daraus resultiert eine geringe räumliche Differenzierung der vorwiegend niedrigen pH-Werte der Untersuchungsgebiete. Die großmaßstäbige Bewertung wichtiger pH-abhängiger Bodenfunktionen, wie etwa das Filtervermögen des Bodens gegenüber Schwermetallen (vgl. Hennings 1994) wird dadurch stark generalisiert. Diese Generalisierung kann zu einer Fehleinschätzung der tatsächlichen Belastbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden bezüglich der Ausbringung schwermetallbelasteter Bioabfälle führen (vgl. Gäth et al. 1999).

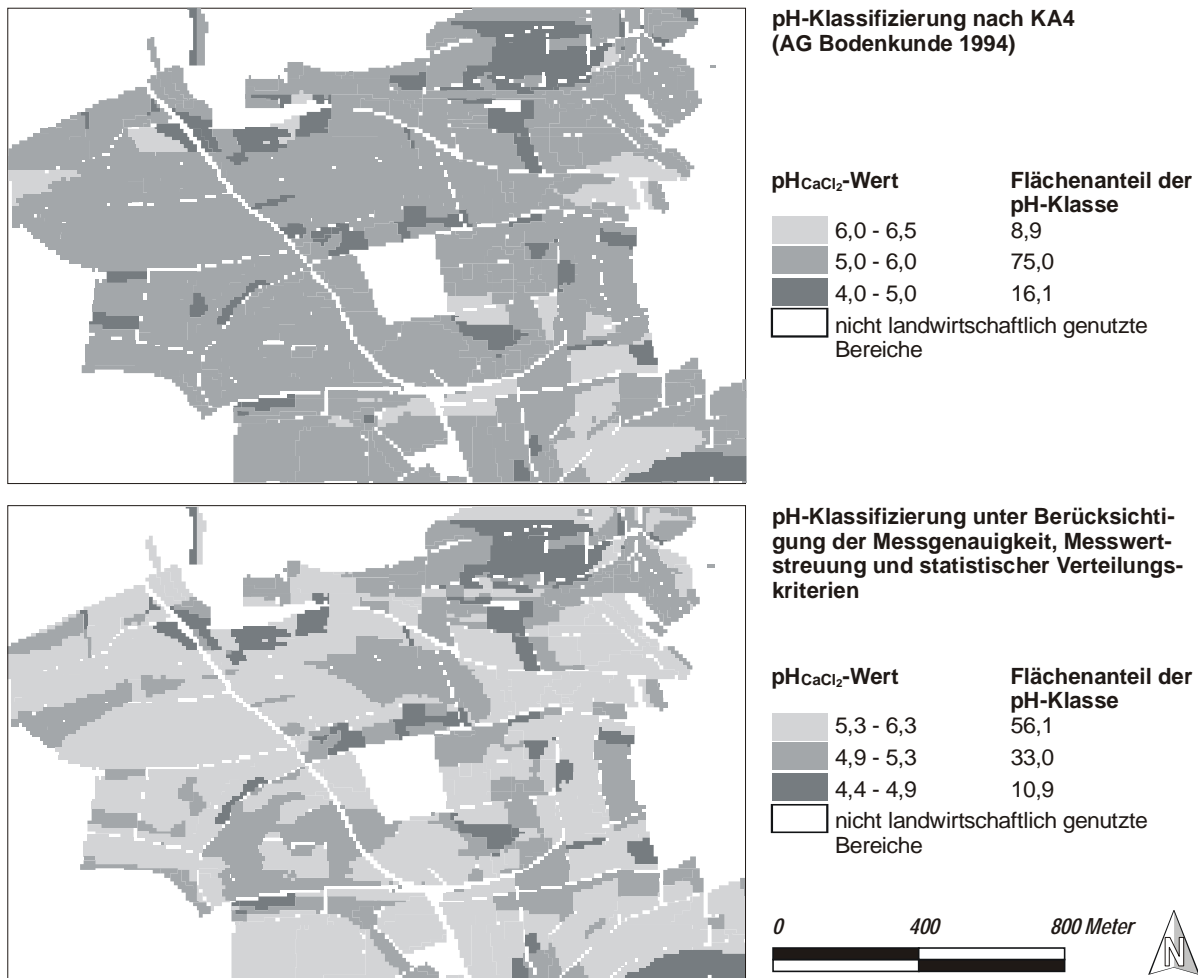


Abb. 31 Die Auswirkungen einer unterschiedlichen Klassifizierung auf die flächenhafte Darstellung der pH<sub>CaCl2</sub>-Werte von landwirtschaftlich genutzten Oberböden (0-20 cm) der Gemarkung Erda (Ausschnitt).

Auch die Klassifizierung der Humusgehalte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung kann den Humusstatus der Oberböden der Untersuchungsgebiete räumlich nur wenig differenziert wiedergeben (Abb. 32). Hohe Humusgehalte, die insbesondere für die Oberböden der Grünlandbereiche in den Gemarkungen Steinbrücken und Eibelshausen typisch sind (vgl. Kap. 4.1.1), werden nach dem Vorschlag der Kartieranleitung in eine Klasse zusammengefasst. Die für die pH-Werte genannten Einschränkungen treffen daher auch für Bodenfunktionen zu, deren großmaßstäbige räumlich differenzierte Bewertung die Kenntnis über die kleinräumige Variabilität der C<sub>org</sub>- bzw. Humusgehalte der Böden erfordert. Zu diesen Funktionen gehören beispielsweise die Filter-, Puffer- und Transformationseigenschaften des Bodens gegenüber Nährstoffen, Schwermetallen oder organischen Schadstoffen (vgl. Gröngroft et al. 1999, BBodSchG 1998).



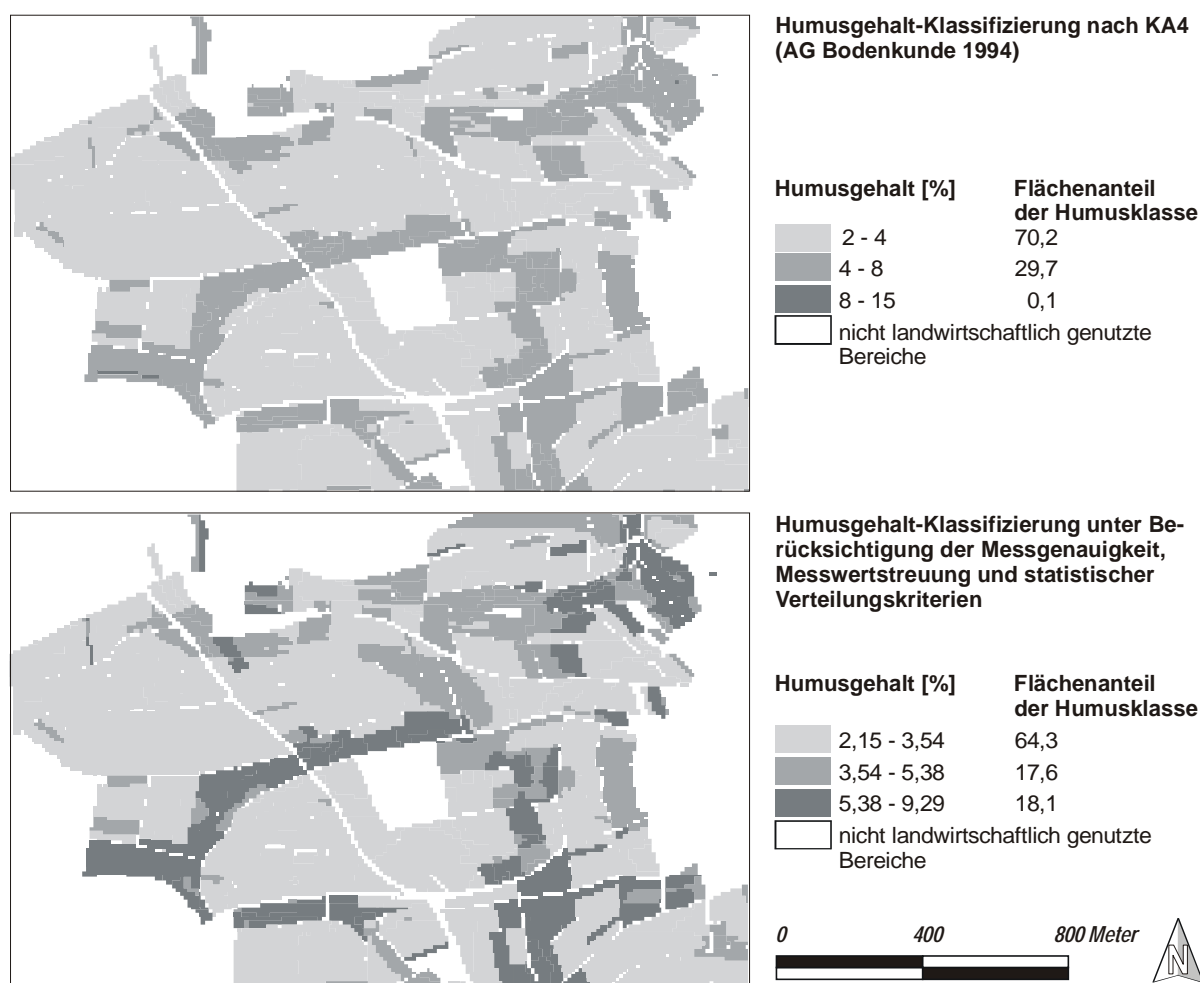


Abb. 32 Die Auswirkungen einer unterschiedlichen Klassifizierung auf die flächenhafte Darstellung der Humusgehalte von landwirtschaftlich genutzten Oberböden (0-20 cm) der Gemarkung Erda (Ausschnitt).

#### 5.2.4 Ergebnis- und Modellvalidierung

Die Güte der Regionalisierungsergebnisse wird mit einem unabhängigen Validierungsdatensatz überprüft (vgl. Kap. 4.4.3), indem ermittelt wird, mit welchem Prozentsatz die Validierungswerte räumlich korrespondierenden Bodenkennwertklassen zugeordnet werden können. Da im Gegensatz zu kontinuierlichen Modellen der Bodenvariabilität für die diskreten Flächeneinheiten der räumlich dargestellten labilen Bodenkennwerte aufgrund der erheblichen Messwertvarianzen keine Einzelwerte, sondern nur Intervalle der jeweiligen Bodeneigenschaft angegeben werden können, ist die Berechnung von Fehlermaßen auf der Basis dieses Datensatzes nur eingeschränkt möglich. Um die Güte der regionalisierten Darstellung mit Ergebnissen anderer Autoren vergleichen zu können, wird daher für diejenigen Validie-

rungswerte, die außerhalb einer räumlich korrespondierenden Bodenkennwertklasse liegen, die Abweichung zur nächstliegenden Grenze dieser Bodenkennwertklasse ermittelt. Als häufig verwendetes Gütemaß wird die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung der Regionalisierungsergebnisse von den Validierungswerten berechnet (vgl. Janssen & Heuberger 1995):

$$RMSE = \frac{1}{m} \left[ \sum_{i=1}^m \{(\hat{z}(x_i) - z(x_i))^2\} \right]^{0,5} \quad (14)$$

mit:  $RMSE$  = Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (*root mean square error*)  
 $m$  = Anzahl der Validierungswerte  
 $\hat{z}(x_i)$  = Validierungswert  
 $z(x_i)$  = Schätzwert (nächstliegender Grenzwert der räumlich korrespondierenden Bodenkennwertklasse)

Im Vergleich zur Güte kontinuierlicher Modelle der Bodenvariabilität zeigt der  $RMSE$  für die mittleren  $pH_{CaCl_2}$ -Werte und  $C_{org}$ -Gehalte der Bodenkennwertklassen der Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda ungewöhnlich niedrige Werte, die auf die Klassifizierung der Raumeinheitenwerte zurückzuführen sind (Tab. 44). Bei drei Bodenkennwertklassen sind beispielsweise nur fünf Möglichkeiten für die Platzierung der Validierungswerte gegeben. In diesem Fall befinden sich die Validierungswerte entweder innerhalb der Klassen, so dass keine Abweichung vom Klassenintervall vorliegt, oder die Werte liegen unter- bzw. oberhalb des gesamten Datenbereichs und erlauben eine Berechnung der Abweichung von der nächstliegenden Klassengrenze der räumlich korrespondierenden Bodenkennwertklasse. Durch die Mittelwertbildung der quadratischen Abweichungen unter Berücksichtigung derjenigen Validierungswerte, die keine Abweichung vom Klassenintervall aufweisen, wird der  $RMSE$  allerdings stark verzerrt. Im Gegensatz dazu steht im kontinuierlichen Datenbereich interpolierter Messwerte für die Berechnung des  $RMSE$  theoretisch der gesamte Wertebereich zwischen dem Maximum und dem Minimum der Messwerte zur Verfügung.

Die Klassifizierung der Messwerte führt zwar zu einer Abnahme der Präzision der räumlichen Darstellung, allerdings ist der Vertrauensbereich des Modells entsprechend größer. Im Gegensatz dazu erlauben kontinuierliche Modelle der Bodenvariabilität eine wesentlich höhere Genauigkeit der inhaltlichen und räumlichen Darstellung bodenkundlicher Kennwerte. Um diese Präzision zu erreichen, ist jedoch ein erheblicher Aufwand notwendig, wie die Beprobungsdichten und Probenanzahlen in den aufgelisteten Beispielen zeigen (Tab. 44).

Tab. 44 Beprobungsdichte, Anzahl der Regionalisierungs- und Validierungswerte sowie Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) zwischen regionalisierten und zusätzlich gemessenen pH-Werten und  $C_{org}$ -Gehalten landwirtschaftlich genutzter Oberböden (Zusammenstellung aus ausgewählten Untersuchungsergebnissen verschiedener Autoren).

Quelle	Bodenkennwert	Beprobungsdichte	Regionalisierungsproben	Validierungsproben	RMSE	Modell der Bodenvariabilität / Inter- bzw. Extrapolationsverfahren
Gotway et al. 1996	$C_{org}$	12,5 m	195	119	0,58	kontinuierlich / Kriging
					0,68	kontinuierlich / Inverse Distanz
Gotway et al. 1996	$C_{org}$	17 m	731	657	0,70	kontinuierlich / Kriging
					0,92	kont. / Inverse Distanz
Otte 1988	$pH_{CaCl_2}$	8 m	540	286	0,52	kontinuierlich / Kriging
Steinbr./Ei-belsh.	$pH_{CaCl_2}$	165 m	109	11	0,2	diskret / Klassifizierung
	$C_{org}$				0,38	
	$Cd_{EDTA}$				0,13	
Erda	$pH_{CaCl_2}$	230 m	96	10	0,3	diskret / Klassifizierung
	$C_{org}$				0,02	
	$Cd_{EDTA}$				0,01	

In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Auswahl bodenkundlich relevanter Faktoren als Regionalisierungsbasis im Hinblick auf bodenkundlich plausibel erscheinende Bezüge zu den labilen Bodenkennwerten. Die Überprüfung dieser hypothetischen Modellannahmen für die Anwendung logischer Übertragungsregeln (Transferfunktionen) (Burrough & McDonnell 1998) ist von großer Bedeutung, da valide Modellergebnisse und eine hinreichende Abschätzung der Modellformalismen (Berechnungsverfahren, Abschätzung geometrischer und inhaltlicher Fehler usw.) noch keine ausreichende Bestätigung für die Validität der Modells an sich sind (Rykiel 1996). Logische Übertragungsregeln basieren auf der Annahme, dass zwischen dem Boden und einzelnen Standortfaktoren (Ausgangsmaterial der Bodenbildung, Klima, Organismen, Relief und Zeit) eine eindeutige, aus Expertenwissen und lokalen Untersuchungen ableitbare Beziehung besteht (Jenny 1941). Diese Annahme impliziert, dass bei gleichartigen Standortfaktorkombinationen ähnliche Böden in der Landschaft auftreten, die vergleichbare Eigenschaften besitzen. Da diese Bezüge in jeder Landschaft ein anderes Gewicht besitzen, sind umfangreiche, schwer zu formulierende Erfahrungswerte notwendig, um die Bedeutung einzelner Standorteigenschaften auf die Bodenkennwerte richtig einschätzen zu können (vgl. Hudson 1992). Zwar konnten in dieser Arbeit auf der Grundlage varianzanalytischer Berechnungen anhand eines vorliegenden Datensatzes Faktoren ermittelt werden, deren Wirkung auf die räumliche Variabilität der labilen Bodenkennwerte aus statisti-

scher und bodenkundlicher Sicht plausibel erscheint. Allerdings stammen diese Daten teilweise aus Untersuchungsgebieten mit einer naturräumlichen Ausstattung, aber auch sozio-ökonomischen Randbedingungen, die von denjenigen der Gemarkungen Steinbrücken, Eibelshausen und Erda abweichen. Zudem muss durch eine Aggregation der Informationen die für die statistische Auswertung erforderliche Konsistenz der Datengrundlage hergestellt werden. Daher ist die varianzanalytische Analyse der Regionalisierungsergebnisse (vgl. Kap. 4.4.1) zur Überprüfung des Regionalisierungsmodells eine notwendige Voraussetzung, um die getroffenen hypothetischen Modellannahmen und damit die Gültigkeit des Modells für die Oberböden der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Untersuchungsgebiete bestätigen zu können.

## 6 Anwendung und Ausblick

Im folgenden Kapitel 6.1 werden einige Anwendungsbereiche der großmaßstäbig regionalisierten Bodenkennwerte erörtert. Darüber hinaus wird die Notwendigkeit von Angaben zur Präzision bodenkundlicher Karteninhalte aufgezeigt. In Kapitel 6.2 werden die Möglichkeiten und Grenzen des Regionalisierungskonzepts geschildert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Beurteilung der Modellqualität im Spannungsfeld zwischen dem wissenschaftlichen Präzisionsanspruch und der für die Planungspraxis notwendigen ökonomischen Effizienz des Regionalisierungskonzepts.

### 6.1 Anwendungsmöglichkeiten großmaßstäbig regionalisierter Bodenkennwerte

Ein Anwendungsbereich der großmaßstäbig regionalisierten labilen Bodenkennwerte für Bodenschutzaspekte wird in dieser Arbeit am Beispiel der Ausschöpfung von Cadmium-Vorsorgewerten verdeutlicht (Kap. 4.6.2). Durch die flächenhafte Darstellung dieser Werte ist es möglich, auf der Planungsebene einer Gemarkung räumlich differenziert geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um eine übermäßige Cadmiumbelastung der Böden zu vermeiden, die etwa durch die Ausbringung schwermetallbelasteter organischer Siedlungsabfälle hervorgerufen werden könnte (Gäth et al. 1999). Das Beispiel der Gemarkung Erda zeigt, dass insbesondere Oberböden von Flächen, die als Grünland genutzt werden, eine Überschreitung der Vorsorgewerte aufweisen. Eine übermäßige Kalkung in Verbindung mit einem Umbruch dieser Standorte sollte daher vermieden werden, damit plötzliche Mineralisierungsschübe der organischen Substanz ausbleiben, die zu einer Freisetzung komplexierter Cadmium-Anteile führen können, wie sie für gekalkte Waldböden nachgewiesen wurde (Matschulat et al. 1994, Schierl & Kreutzer 1989 in Bens 1999).

In Verbindung mit den regionalisierten pH-Werten und  $C_{\text{org}}$ -Gehalten kann auch für andere Schwermetalle oder organische Schadstoffe, die eine hohe Affinität zur H-Ionenkonzentration und der organischen Substanz des Bodens zeigen, eine flächenbezogene Bewertung möglicher Belastungen vorgenommen werden. Entsprechende Ableitungsregeln, die sich auf verschiedene, im Bundes-Bodenschutzgesetz formulierte Teilaspekte der Filter-, Puffer- und Transformationsfunktionen des Bodens beziehen, liegen vor und können auf die vorhandenen flächenhaften Datengrundlagen der labilen Bodenkennwerte und Standortfaktoren angewendet werden (z.B. Gröngröft 1999, Hennings 1994).

Kann eine Beziehung der Faktoren 'Exposition', 'Gesamtbodenart' und 'Nutzung' der Untersuchungsgebiete für weitere labile Bodenkennwerte, wie beispielsweise mobile oder kurzfristig mobilisierbare Nährstoffanteile, nachgewiesen werden, ist eine Regionalisierung auch dieser Bodenkennwerte auf der Grundlage des vorliegenden Probenmaterials und der Extrapolationsgrundlagen möglich.

Im Hinblick auf die genannten Anwendungsmöglichkeiten ist zu beachten, dass eine diskrete Darstellung der Messwerte eines Bodenkennwerts immer mit räumlich-inhaltlichen Unschärfen und Unsicherheiten verbunden ist (vgl. Kapitel 1.2.2, 4.1, 4.4 und 5). Das Ausmaß dieser Abweichungen muss jedoch abschätzbar sein (vgl. Kap. 4.4.3 und 4.4.4 sowie Abb. 41 bis Abb. 46 in Kap. 8.2). Nur so kann die Plausibilität der Abgrenzung von Raumeinheiten beurteilt werden (Young et al. 1998, Young et al. 1997), damit eine zusätzliche Belastung der Böden oder eine Verfehlung der Planungsziele durch eine mögliche Fehl- oder Überbewertung der Regionalisierungsergebnisse vermieden wird.

Angaben zur Präzision und Validität der flächenhaften Darstellung bodenkundlicher oder bodenkundlich relevanter Informationen sind allerdings eher die Ausnahme. Beispielsweise zeigen Geologische Karten und Bodenkarten der Landesämter oder daraus abgeleitete Themenkarten zwar deutlich voneinander abgegrenzte Flächeneinheiten, die interne Variabilität dieser Einheiten kann jedoch nur anhand der Merkmalsspannen geschätzt werden, sofern sie in der Kartenlegende angegeben sind. Lediglich für numerische Flächendaten, wie die Digitalen Höhenmodelle der Landesvermessungsämter, existieren Angaben zur Güte der Informationen. Das Ausmaß der möglichen internen Variabilität von Bodeneinheiten verdeutlichen Untersuchungsergebnisse aus den Niederlanden, die zeigen, dass in großmaßstäbigen Bodenkarten (1:10.000) nur 59-62 % der Fläche einer Bodeneinheit dem in der Kartenlegende angegebenen Bodentyp zugewiesen werden können (Marsmann & de Gruijter 1985 in Burrough & McDonnell 1998). Die übrige Fläche wird von anderen Bodentypen eingenommen. Für den Anwender solcher Karten ist es daher schwierig oder sogar unmöglich zu beurteilen, mit welcher Datengüte er bei der kartographischen Darstellung der Bodeneinheiten oder daraus abgeleiteten Bodeneigenschaften rechnen kann. Wird die Lagegenauigkeit und die Güte des Karteninhalts falsch eingeschätzt, können daraus Planungsfehlern resultieren, die insbesondere durch die Ableitung weiterer Sekundärinformationen zu einer nicht kalkulierbaren Fehlerfortpflanzung führen können. (vgl. Burrough & McDonnell 1998, Burrough 1993). Aus diesem Grund sind in den Flächendarstellungen der  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte,  $\text{C}_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalte (Abb. 41 bis Abb. 46 in Kap. 8.2) Kennwerte zur Beurteilung der räumlich-

inhaltlichen Präzision und Validität der Karten angegeben, um einer Überbewertung der Güte der Flächeninformationen vorzubeugen, die durch die diskrete Darstellung der Bodeneigenschaften hervorgerufen werden könnte.

## **6.2 Einsatz des Verfahrens zwischen wissenschaftlichem Anspruch und Planungspraxis**

Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept ermöglicht die großmaßstäbige Regionalisierung labiler Bodenkennwerte in standörtlich hochdiversen Landschaften bei einer deutlichen Verringerung des Feld- und Laboraufwands gegenüber herkömmlichen Methoden. Hierzu sind jedoch Kompromisse erforderlich, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der theoretisch erreichbaren Präzision der Ergebnisse und dem Regionalisierungsaufwand zu erzielen. Einerseits sollen die Regionalisierungsergebnisse eine Auflösung und Genauigkeit besitzen, die auch wissenschaftlichen Ansprüchen gerecht wird. Dieses betrifft insbesondere die Erfassung der räumlichen Variabilität der Bodenkennwerte sowie die Güte und die Auflösung des Regionalisierungsmodells. Andererseits soll gewährleistet sein, dass der finanzielle, personelle und zeitliche Aufwand nicht ein Ausmaß erreicht, das einer Anwendung des Regionalisierungskonzepts in der Planungspraxis für die großmaßstäbige Bewertung von Bodenfunktionen oder Bodenbelastungen entgegensteht.

Für die Regionalisierung ist grundsätzlich entscheidend, ob ein kontinuierliches oder diskretes Modell zu Beschreibung der Bodenvariabilität eingesetzt werden soll. Von dieser Auswahl hängen jedoch unmittelbar die erreichbare Präzision der Flächenaussage, aber auch der Regionalisierungsaufwand ab. Darüber hinaus ist für die Regionalisierung der Bodenkennwerte ausschlaggebend, ob ein räumlicher Bezug der Messwerte einer Bodeneigenschaft angenommen werden kann oder ob die Relation eines Messwerts an einem bestimmten Ort als deterministisch anzusehen ist. Mit einer Ortsabhängigkeit ist beispielsweise bei gerichteten Schadstoffkontaminationen oder Gradienten von Standortfaktoren zu rechnen, welche die Variation labiler Bodenkennwerte beeinflussen. Sind derartige Faktoren auszuschließen, kann angenommen werden, dass die Messwerte einer Bodeneigenschaft keinen ausgeprägten räumlichen Bezug aufweisen.

Für die großmaßstäbige Interpolation bodenkundlicher Kennwerte in kontinuierlichen Modellen werden zumeist geostatistische Verfahren eingesetzt. Durch eine ausreichende Beprobungsdichte muss sichergestellt werden, dass die Variation der Messwerte auf die Lage der Beprobungsstandorte zurückgeführt werden kann. Nur so ist es möglich, aus einem Vario-

gramm der Messwerte geeignete Kenngrößen für die Interpolation abzuleiten. Wird diese Bedingung erfüllt, kann mit geostatistischen Interpolationsverfahren eine hohe Genauigkeit der flächenhaften Darstellung erreicht werden. Insbesondere in standörtlich sehr heterogenen Untersuchungsgebieten überschreitet der dazu notwendige Aufwand für die Erhebung labiler bodenkundlicher Kennwerte allerdings schnell ein ökonomisch vertretbares Maß (vgl. Tab. 44).

Diskrete Modelle erlauben eine flächenhafte Darstellung labiler Bodenkennwerte mit vergleichsweise geringen Probenumfängen und werden daher in der Planungspraxis oft eingesetzt. Innerhalb der Karteneinheiten (Raumeinheiten) ist jedoch immer eine interne Variabilität der Bodenkennwerte vorhanden, die häufig nur mit zusätzlichen Beprobungen ermittelt werden kann. Für die Gültigkeit der flächenhaften Darstellung ist entscheidend, ob diese interne Variabilität nicht die Gesamtvariabilität der erhobenen Daten erreicht oder sogar übersteigt. Außerdem ist zu prüfen, ob bezüglich der theoretischen Annahmen, die einem diskreten Modell der Bodenvariabilität zugrunde liegen (vgl. Kap. 5.1.2), überhaupt eine bodenkundlich plausible flächenhafte Darstellung der punktuell erhobenen Bodenkennwerte möglich ist.

In den Untersuchungsgebieten wird die Variation der labilen Bodenkennwerte  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert,  $\text{C}_{\text{org}}$ - und  $\text{Cd}_{\text{EDTA}}$ -Gehalt in erster Linie durch Nutzungsunterschiede hervorgerufen. An Nutzungsgrenzen ändern sich labile Bodenkennwerte jedoch zumeist auf kurzen Distanzen (vgl. Kap. 5.2.3). In kontinuierliche Modellen kann eine Darstellung dieser abrupten Wechsel nur mit einem enormen Beprobungsaufwand realisiert werden (vgl. Kap. 5.1.1). Diese Situation prädestiniert den Einsatz diskreter Modelle für die flächenhafte Darstellung der Bodenkennwerte in den Untersuchungsgebieten. Auf diese Weise kann die Variation der Bodenkennwerte bei einer erheblichen Reduzierung des Beprobungsaufwands im Vergleich zu einem kontinuierlichen Modell dargestellt werden. Allerdings ist nur eine klassifizierte Darstellung der Bodenkennwerte möglich, um die Variabilität innerhalb der Karteneinheiten zu berücksichtigen. Außerdem müssen Überschneidungen der Klassengrenzen akzeptiert werden, die in kontinuierlichen Modellen der Bodenvariabilität ausgeschlossen werden können. Im Hinblick auf das erreichbare Klassifizierungsniveau der labilen Bodenkennwerte in den Untersuchungsgebieten und unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit und bodenkundlich plausibler Unterschiede der Klassen wird mit dem diskreten Modell eine Güte der Flächeninformation erreicht, die für die großmaßstäbige Bewertung von Zuständen und Potenzialen der Böden, die durch labile Bodenkennwerte beeinflusst werden können, ausreicht.



Die Extrapolation der labilen Bodenkennwerte in den Untersuchungsgebieten erfolgt nicht nur auf der Basis von diskreten Nutzungsunterschieden, sondern auch unter Einbeziehung der kontinuierlichen Standortfaktoren 'Exposition', 'Bodenart' und 'Nutzung'. Durch die räumlich repräsentative Lokalisierung der Beprobungsstandorte mit dem Verfahren der 'Regionalen Assoziationsanalyse' (Kuhnt 1994) ist es möglich, diese Kontinuität im Verlauf des Regionalisierungsprozesses zu berücksichtigen. Auf diese Weise ergänzen sich die Vorteile diskreter Modelle zur Beschreibung der Bodenvariabilität, für deren Erzeugung geringe Probenumfänge ausreichen, mit den Vorzügen geostatistischer Ansätze, die eine bodenkundlich plausible Ortsabhängigkeit der Messwertausprägung eines Bodenkennwerts aufgrund der Kontinuität einzelner Standortfaktoren voraussetzen.

## 7 Literatur

- AG Bodenkunde (1965-1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. 1. bis 4. Aufl., Hannover.
- Ahlburg, J. & Kegel, W. (1971): Geologische Karte von Hessen 1:25000 - Blatt 5317 Rodheim-Bieber. Hessisches Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.), 2. Aufl., Wiesbaden.
- Akin, H. & Siemes, H. (1988): Praktische Geostatistik – Eine Einführung für den Bergbau und in die Geowissenschaften, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio.
- Bach, M. & Frede, H.-G. (1999): Regionalisierung als methodische Aufgabe im Sonderforschungsbereich 299 'Landnutzungskonzepte für periphere Regionen'. In: Steinhardt, U. & Volk, M. (Hrsg.): Regionalisierung in der Landschaftsökologie. - Forschung-Planung-Praxis, Teubner, Leipzig.
- Bachmann, G. (1999): Zukunftsfelder im Bodenschutz. In: Stadt Marktredwitz (Hrsg.): Bodenschutz und Altlastensanierung. Tagungsband der Marktredwitzer Bodenschutztage 27.-29.10.1999, 199-204.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber R. (1996): Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung, 8. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bahrenberg, G., Giese, E. & Nipper, J. (1985): Statistische Methoden für Geographen, Band 1 Univariate und bivariate Statistik., 2. Aufl., Teubner, Stuttgart.
- Bell, M.A. & Keulen, H. (1995): Soil Pedotransfer Functions for Four Mexican Soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 59, 865-871.
- Bens, O. (1999): Grundwasser-Belastungspotenziale forstlich genutzter Sandböden in einem Wasserschutzgebiet bei Münster/Westfalen. Diss., Wilhelm-Universität Münster. In: Felix-Henningsen, P., Frede, H.-G., Gäth, S., Harrach, T. & Otte, A. (Hrsg.): Boden und Landschaft. Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Blakemore, M.J. (1984): Generalisation and error in spatial data bases. Cartographia, 4/2-3, 131-139.
- Blume, H.P. (1992): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und –belastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. Ecomed.
- Bork, H.-R. (1988): Bodenerosion und Umwelt. - Verlauf, Ursachen und Folgen der mittelalterlichen und neuzeitlichen Bodenerosion. In: Institut für Geographie und Geoökologie (Hrsg.): Landschaftsogenese u. Landschaftsökologie, 13, Braunschweig.
- Bortz, J. (1999): Statistik für Sozialwissenschaftler. 5. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bortz, J., Lienert, G.A. (1998): Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung.- Ein praktischer Leitfaden für die Analyse kleiner Stichproben. Springer, Heidelberg.
- Böttcher, J. (1998): Anforderungen an die Beprobung im Hinblick auf die statistische Analyse räumlich variabler Stoffgehalte in Böden. Mitteiln. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 88, 401-404.
- Bouma, J., Finke, P.A., Hoosbeek, M.R. & Breeuwsma, A. (1998): Soil and water quality at different scales: concepts, challenges, conclusions and recommendations. Nutrient Cycling in Agriecosystems, 50, 5-11.
- Bratney, A.B. & Odeh, I.O.A. (1997): Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. Geoderma, 77, 85-113.
- Briemle, G. (1988): Grünlandextensivierung. Staatl. Lehr- und Versuchsanstalt für Viehhaltung und Grünlandwirtschaft, Informationen Nr. 9, Aulendorf.
- Brubaker, S.C., Jones, A.J., Lewis, D.T. & Frank, K. (1993): Soil Properties Associated with Landscape Position. Soil Sci. Soc. Am. J., 57, 235-239.
- Brus, D.J. & Gruijter, J.J. (1997): Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with Discussion). Geoderma, 80, 1-44.
- Bundes - Bodenschutz- und Altlastenverordnung (1999): Verordnung zum Bundes-Bodenschutzgesetz - (BBodSchV) vom 12. Juli 1999. BGBl. S. 1554.
- Bundesverband Boden e.V. (2000): Böden und Schadstoffe. Bedeutung von Bodeneigenschaften bei stofflichen Bodenbelastungen. BVB-Materialien, 4, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

- Burgess, T.M. & Webster, R. (1980): Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III. Changing Drift and universal kriging. *Journal of Soil Science*, 31, 505-524.
- Burgess, T.M., Webster, R. & McBratney, A.B. (1981): Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties - IV. Sampling Strategy. *Journal of Soil Science*, 32, 642-659.
- Büring, H. (1970): Sozialbrache auf Äckern und Wiesen in pflanzensoziologischer und ökologischer Sicht. Diss., Justus-Liebig-Universität Giessen.
- Burrough, P.A. & Frank, A.U. (1995): Concepts and paradigms in spatial information: are current geographical information systems truly generic? *IJGIS*, 9.2, 101-116.
- Burrough, P.A. & McDonnell, R.A. (1998): *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, Oxford.
- Burrough, P.A. (1983): Multiscale Sources of Spatial Variation in Soil. - I. The Application of Fractal Concepts to Nested Levels of Soil Variation. *Journal of Soil Science*, 34, 577-597.
- Burrough, P.A. (1989): Fractals & Geochemistry. In: Avnir, D. (Ed.): *The Fractal Approach to Heterogeneous*. John Wiley, 383-406.
- Burrough, P.A. (1993): Soil variability: a late 20<sup>th</sup> century view. *Soils and Fertilizers*, 56/5, 529-560.
- Carle, C. & Außendorf, M. (1999): Funktionen und Gefährdungen der Böden: Bewertung natürlicher Bodenfunktionen. In: Stadt Markredwitz (Hrsg.): *Bodenschutz und Altlastensanierung*. Tagungsband der Markredwitzer Bodenschutztagung 27.-29.10.1999, 220-223.
- Cochran, W.G. (1977): *Sampling Techniques*. 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley, New York.
- Cohen, J. (1968): Multiple regression as a general data-analytic system. *Psychol. Bull.*, 70, 426-443.
- Dalchow, C. (1989): *Vorlesungsauswertungen Heinrich Rhodenburg. Geoökologie - Geomorphologie*. Catena-Verlag, Cremlingen-Destedt.
- Davis, J.C. (1986): *Statistics and Data Analysis in Geology*. 2<sup>nd</sup> edn., John Wiley, New York.
- De Vries, W., Kros, J., van der Salm, C., Groenenberg, J.E. & Reinds, G.J. (1998): The use of upscaling procedures in the application of soil acidification models at different spatial scales. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 50, 223-236.
- Delaunay, B. (1934): Sur la sphere vide. *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR*, 793-800.
- Deutsch, C. & Journé, A.G. (1992): *GSLIB Geostatistic Handbook*. Oxford University Press, New York.
- Deutsches Institut für Normung (1977): *Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau. Chemische Laboruntersuchungen. –Bestimmung des pH-Wertes des Bodens und Ermittlung des Kalkbedarfs*. DIN 19 684, Teil 1.
- Deutsches Institut für Normung (1983): *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Schlamm und Sedimente (Gruppe S). –Aufschluss mit Königswasser zur nachfolgenden Bestimmung des säurelöslichen Anteils von Metallen (S 7)*. DIN 38 414, Teil 7.
- Diehl, J. M. (1983): *Varianzanalyse*. 4. Aufl., Heidelberg.
- Domburg, P., de Gruijter, J.J. & van Beek, P. (1997): Designing efficient soil survey schemes with a knowledge-based system using dynamic programming. *Geoderma*, 75, 183-201.
- Dunn, R., Harrison, A.R. & White, J.C. (1990): Positional Accuracy and Measurement in Digital Databases. *Proceedings of Autocarta*, 5, 159-168.
- Dutter, R. (1985): *Geostatistik*. Stuttgart, Teubner.
- Estler, M., Knittel, H. & Zeltner, E. (1984): *Bodenbearbeitung aktuell*. Hamburg.
- Fohrer, N., Eckhardt, K., Haverkamp, S. & Frede, H.-G. (1999): Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt eines ländlichen Einzugsgebiets in einer peripheren Region. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landesentwicklung*, 40 (5/6), S. 202-206.
- Fränze, O. (1978): The Structure of Soil Associations and Cenozoic Morphogeny in Southeast Afrika. In: Nagel, H. (Hrsg.): *Beiträge zur Quartär- und Landschaftsforschung – Festschrift zum 60. Geburtstag von Julius Fink*. Wien, 159-176.

- Fränzle, O., Kuhnt, D., Kuhnt, G. & Zölitz, R. (1986): Auswahl der Hauptforschungsräume für das Ökosystemforschungsprogramm der Bundesrepublik Deutschland. Forschungsbericht 101 04 043/02 im Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Kiel.
- Fränzle, O., Schmotz, W., Krinitz, J., Hertling, T., Florinski, M., Permitin, W., Pochlebkina, L. & Müller, J. (1995): Handlungsanleitung für Schadstoffuntersuchungen in Böden. UBA-Texte, 26/95, Berlin.
- Friedrich, K. (1996): Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, 21, Serie D, Physische Geographie.
- Gabany, H. (1998): Bodenbewertung in Planungs- und Zulassungsverfahren - Auswirkungen des Bundes-Bodenschutzgesetzes. Mitteiln. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 88, 337-340.
- Gäth, S., Schug, B. & Düring, R.-A. (1999): Szenarien zur Bioabfallbewertung - Ansätze zur nachhaltigen Kreislaufwirtschaft im ländlichen Raum. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landesentwicklung, 40 (5/6), 240-246.
- Gesetz zum Schutz des Bodens (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG) vom 17. März 1998. BGBl. I. Nr. 16. 502.
- Gisi, U. & Oertli, J.J. (1981): Ökologische Entwicklung in Brachland verglichen mit Kulturwiesen. - I. Physikalisch-chemische Veränderungen im Boden. Oecol. Plant. Vol. 2, 16, 7-21.
- Gisi, U., Schenker, R., Schulin, R., Stadelmann, F. & Sticher, H. (1990): Bodenökologie. Thieme-Verlag, Stuttgart, New York.
- Goodchild, M.G. (1980): Fractals & the accuracy of geographical measures. Mathematical Geology, 12, 85-98.
- Goovaert, P. (1999): Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. Geoderma, 89, 1-45.
- Gotway, C.A., Ferguson, R.B., Hergert, G.W. & Peterson, T.A. (1996): Comparison of Kriging and Inverse-Distance Methods for Mapping Soil Parameters. Soil Sci. Soc. Am. J., 60, 1237-1247.
- Gröngröft, A., Hochfeld, B. & Miehlich, G. (1999): Funktionale Bewertung von Böden bei großmaßstäbigen Planungsprozessen. Gutachten des Instituts für Bodenkunde der Universität Hamburg im Auftrag der Umweltbehörde Hamburg, Abteilung Gewässer- und Bodenschutz.
- Gruiter, J.J. & Braak, C.J.F. (1990): Modell-free estimation from spatial samples: a reappraisal of Classical Sampling Theory. Mathematical Geology, 22, 407-415.
- Heinrich, U. (1992): Zur Methodik der räumlichen Interpolation mit geostatistischen Verfahren. Deutscher Universitäts Verlag, Wiesbaden.
- Hennings, V. (1991): Die Bedeutung der räumlichen Variabilität bodenkundlicher Basisdaten für aktuelle und zukünftige Kartiertechniken, dargestellt an einem Beispielgebiet im nördlichen Harzvorland. In: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.). Geologisches Jahrbuch, 28, Reihe F, Schweizerbart, Stuttgart.
- Hennings, V. (1994). Methodendokumentation Bodenkunde. - Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. In: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.). Geologisches Jahrbuch, 31, Reihe F, Schweizerbart, Stuttgart.
- Herrchen, D. & Voll, M. (1998): Bodenschutz in der Planungspraxis aus der Sicht eines Planungsbüros. In: Hessisches Ministerium des Innern und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz. Referat Bodenschutz (Hrsg.): Ökologie-Forum Hessen. Bodenschutz in der Landschaftsplanung. Wiesbaden.
- Hertling, Th., Kuhnt, G., & Schmotz, W. (1995): Verfahren zur regional repräsentativen Untersuchung von Bodenbelastungen. UVP-Report, 3/95, 117-123.
- Hessisches Landesamt für Ernährung, Landwirtschaft und Landesentwicklung (1981): Das Klima von Hessen: Standortkarte im Rahmen der AVP. Wiesbaden.
- Heuvelink, G.B.M. & Pebesma, E.J. (1999): Spatial aggregation and soil process modelling. Geoderma, 89, 47-65.
- Hole, F.D. & Campbell, J.B. (1985): Soil Landscape Analysis. Rowman and Allanheld, New Jersey.
- Hoosbeck, R., Stein, A., Reuler, H. & Janssen, B.H. (1998): Interpolation of agronomic data from plot to field scale: using a clustered versus a spatially randomised block design. Geoderma, 81, 265-280.

- Hornburg, V. (1991): Untersuchungen zur Mobilität und Verfügbarkeit von Cd, Zn, Mn, Pb und Cu in Böden. Bonner bodenkundl. Abh., 2, Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität, Bonn.
- Hsiao, C.K., Juang, K.-W. & Lee, D.-Y. (2000): Estimating the second-stage sample size and the most probable number of hot spots from a first-stage sample of heavy-metal contaminated soil. *Geoderma*, 95, 73-88.
- Hudson, B.D. (1992): The soil survey as paradigm-based science. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 836-841.
- Jahn, R., Billen, N., Lehmann, A. & Stahr, K. (1994): Bodenerhaltung durch Extensivierung und Flächenstilllegung. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 73, 55-58.
- Janssen, P.H.M. & Heuberger, P.S.C. (1995): Calibration of process-oriented models. *Ecological Modelling*, 83, 55-66.
- Jenks, G.F. (1977): Optimal Data Classification for Choropleth Maps. Occasional paper, 2, Department of Geography, University of Kansas.
- Jenny, H. (1941): Factors of soil formation. McGraw-Hill, New York.
- Journel, A.G. & Huijbregts, C.J. (1978): Mining geostatistics. Academy Press, London, New York & San Francisco.
- Klausing, O. (1988): Die Naturräume Hessens mit einer Karte der naturräumlichen Gliederung 1 : 200.000. Schriftenreihe d. Hess. Landesanst. f. Umwelt. Wiesbaden.
- Knotters, M., Brus, D.J. & Oude Voshaar, J.H. (1995): A comparison of kriging, co-kriging and kriging combined with regression of spatial interpolation of horizon depth with censored observations. *Geoderma*, 67, 227-246.
- Krige, D.G. (1966): Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for ore-evaluation. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 66, 13-38.
- Kuhnt, G. (1989): Die großräumige Vergesellschaftung von Böden - rechnergestützte Erfassung pedogenetischer Zusammenhänge, dargestellt am Beispiel der Bundesrepublik Deutschland. *Erdkunde*, 43, 170-179.
- Kuhnt, G. (1994): Regionale Repräsentanz – Beiträge zu einer raumorientierten Meßtheorie. Habil., Kiel.
- Laaser, B. (1992): Konzentrationsgradienten von Pflanzennährstoffen im Kontaktbereich von Äckern und Auen. Diss., Universität Essen.
- Lagacherie, P., Legros, J.P. & Burrough, P.A. (1995): A soil procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. *Geoderma*, 65, 283-301.
- Lark, R.M. & Bolam, H.C. (1997): Uncertainty in prediction and interpretation of spatially variable data on soil. *Geoderma*, 77, 263-282.
- Laslett, G.M. & McBratney, A.B. (1990): Estimation and implications of instrumental drift, random measurement error and nugget variance of soil attributes - a case study for soil pH. *Journal of Soil Science*, 41, 451-471.
- Laslett, G.M. & McBratney, A.B., Pahl, P.J. & Hutchison, M.F. (1987): Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *Journal of Soil Science*, 38, 325-341.
- Maffini, C., Arno, M. & Bitterlich, W. (1989): Observations and comments on the generation and treatment of error in digital GIS data. In: Goodchild, M.F. & Gopal, S. (Hrsg.): Accuracy of spatial databases. Taylor & Francis, London, New York, Philadelphia.
- Marschner, B. & Stahr, K. (1992): Auswirkungen von Flächenstillegungen auf Bodeneigenschaften. Informationen z. Raumentwicklung. -Flächenstillegung. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung (Hrsg.), Heft 7, 579-600.
- Marsman, B. & de Gruijter, J.J. (1985): Quality of soil maps; a comparison of survey methods in a sandy area. Soil survey paper, 15, Netherlands, Soil Survey Institute, Wageningen.
- Matheron, G. (1963): Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246-1266.
- Matschullat, J., Heinrichs, H., Schneider, J. & Ulrich, B. (1994): Gefahr für Ökosysteme und Wasserqualität. Ergebnisse interdisziplinärer Forschung im Harz. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- McBratney, A.B. & Odeh, I.O.A. (1997): Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*, 77, 85-113.
- McBratney, A.B., Hardt, G.A. & McGarry, D. (1991): The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. *Journal of Soil Science*, 42, 513-532.

- McKenzie, N.J. & Ryan, P.J. (1999): Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89, 67-94.
- Miehlich, G. (1976): Homogenität, Inhomogenität und Gleichheit von Bodenkörpern. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 5, 597-609.
- Möller, D., Weinmann, B., Kirschner, M. & Kuhlmann, F. (1999): Auswirkungen von Politik- und Strukturmaßnahmen auf die räumliche Verteilung und Erfolgskennzahlen der Landnutzung: GIS-basierte Simulation mit ProLand. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landesentwicklung*, 40 (5/6), 197-201.
- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A. & Peterson, G.A. (1993): Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 443-452.
- Nöhles, I. (1999): Landnutzungsklassifikation mit multitemporalen Landsat-TM-Szenen unter besonderer Berücksichtigung von Sukzessionsbrachen. Diss., Justus-Liebig Universität Giessen.
- Nowak, B. (1988): Die extensive Landwirtschaft im Lahn-Dill-Bergland - Historische und soziale Hintergründe, landschaftsökologische Auswirkungen, Bedeutung für den Naturschutz. - Oberhess. naturwissenschaftl. Zeitschr., Ber. Oberhess. Ges. Nat.- u. Heilk. Gießen, Naturwissenschaftl. Abt., Bd. 50, S. 49-74, Gießen.
- Odeh, I.O.A., McBratney, A.B. & Chittleborough, D.J. (1994): Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma*, 63, 197-214.
- Oliver, M., Webster, R. & Gerrard, J. (1989): Geostatistics in physical geography. Part I. Theory. *Trans. Inst. Br. Geogr. N.S.*, 14, 259-269.
- Oliver, M.A., & Webster, R. (1986): Combining nested and linear sampling for determining the scale and form of spatial variation of regionalized variables. *Geographical Analysis*, 18, 225-242.
- Onofiok, O.E. (1993): Determining spatial and temporal variations of organic matter in a tropical soil using different sampling schemes. *Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture*. IITA/K.U. Leuven.
- Otte, F. (1988): Über die quantitative Erfassung der Bodenvariabilität und Gütemaße für großmaßstäbige Karten. Diss., Universität Kiel.
- Overall, J.E. & Spiegel, D.K. (1969): Concerning least squares analysis of experimental data. *Psychol. Bull.*, 71, 311-322.
- Pennock, D.J., Anderson, D.W. & de Jong, E. (1994): Landscape-scale changes in indicators of soil quality due to cultivation in Saskatchewan, Canada. *Geoderma*, 64, 1-19.
- Peter, M. & Siebert, S. (1998): Nutzung der Bodenschätzung in der hessischen Praxis des Boden- und Gewässerschutzes - Möglichkeiten und Grenzen. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 88, 273-276.
- Pletsch, A. (1991): Das Lahn-Dill-Gebiet. -Ein industriegeschichtlicher Überblick. *Geographische Rundschau* 43, Heft 5, S. 284-288
- Prothmann, G. & T. Harrach (1971): Agrarstrukturelle Vorplanung - Landschaftsplan Nahbereich Erda - Teil 1: Bestandsaufnahmen, Analysen. Hessische Landgesellschaft, Frankfurt am Main.
- Recher, H. & Schmotz, W. (1993): STABO -Standortauswahl für Bodenuntersuchungen Version 1.0. regional-statistisches Kartenanalysesystem zur Durchführung der Nachbarschaftsanalyse und zur Ermittlung repräsentativer Probenahmestandorte – Benutzeranleitung. Kiel.
- Reichmann, H. (1973): Erläuterungen zur Bodenkarte von Hessen 1:25.000. -Blatt 5216 Oberscheld. Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden.
- Renk, W. (1977): Die räumliche Struktur und Genese der Bodendecke im Bereich der Großen Randstufe Transvaals und Swasilands. Diss., Universität Kiel.
- Ricardo, A.O. (1991): Geostatistical glossary and multilingual dictionary. Oxford University Press, New York, Oxford.
- Rykiel, E.J. (1996). Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling*, 90, 229-244.
- Sabel, K.-J. (1998): Stand der Bodenkartierung in Hessen. In: Hessisches Ministerium des Innern und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz. Referat Bodenschutz (Hrsg.): Ökologie-Forum Hessen. Bodenschutz in der Landschaftsplanung. Wiesbaden.
- Sauer, S. (1999): Internes Arbeitspapier (unveröff.). Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung der Justus-Liebig-Universität Gießen.

- Saurer, H. & Behr, F.-J. (1997): Geographische Informationssysteme. - Eine Einführung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Sbresny, J. (1995): Fehlerquellen in Raumbezogenen Informationssystemen. Diss., Technische Universität Berlin.
- Schierl, R. & Kreutzer, K. (1989): Dolomitische Kalkung eines Fichtenbestandes auf saurer Parabraunerde: Auswirkungen auf Bodenchemie und Vegetation. Kali-Briefe, 19 (6), 417-423.
- Schleuß, U., Reiche, E.-W. & Zölitz-Möller, R. (1994): Untersuchungen zur Heterogenität zweier Ackerflächen in Schleswig-Holstein. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 74, S. 217-220
- Schmidt, R., Schröder, W. & Tapkenhinrichs, M. (1994): Soil data for models and resource management at different scales. Transactions 15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Acapulco Mexico, Vol. 6a, 58-66.
- Schmierer, T., Bentz, A., Reich, H. & Ebert, A. (1935): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Blatt Eibelshausen. Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin.
- Schmotz, W. (1996): Entwicklung und Optimierung von Verfahren zur flächenhaften Erfassung der Schadstoffgehalte in Böden. In: ECOSYS – Beiträge zur Ökosystemforschung, 17, Kiel.
- Schönhals, E. (1974): Die Bedeutung geologischer, insbesondere quartärgeologischer Vorgänge für die Bodenbildung in Hessen. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 18, S. 11-17
- Schotte, M. & Felix-Henningsen, P. (1999): Anwendung des Georadars zur Erhebung der Verbreitung und Eigenschaften periglaziärer Lagen im Lahn-Dill-Bergland. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, 40 (5/6), 220-228.
- Schröder, W., Vetter, L. & Fränzle, O. (Hrsg.) (1994): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden.
- Schug, B. (1999): Internes Arbeitspapier (unveröff.). Institut für Landeskultur der Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Schug, B. (2000): Entwicklung von Pedotransferfunktionen zur Regionalisierung des Retentionspotenzials von Böden für Cadmium, Blei und Zink. Diss., Justus-Liebig-Universität Giessen.
- Semmel, A. (1968): Studien über den Verlauf jungpleistozäner Formung in Hessen. Frankfurter Geographische Hefte, 45.
- Sinowski, W. & Auerswald, K. (1999): Using relief parameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. Geoderma, 89, 113-128.
- Soil Survey Staff (1993): Soil Survey Manual. USDA Handbook No.18. US Department of Agriculture.
- Stahr, K., Jahn, R., Billen, N., Lehmann A. & Sommer, M. (1993): Veränderungen des Nährstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Böden durch Flächenstillegung. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 72, 1459-1462
- Szibalski, M. & Felix-Henningsen, (1999): Gradienten von Bodeneigenschaften im Randbereich kleinflächiger Waldstandorte des östlichen Münsterlandes. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 162, 49-55.
- Thiessen, A. H. (1911): Precipitation averages for large areas. Monthly Weather Review, 39, 1082-1084.
- Tietje, O. & Tapkenhinrichs, M. (1993): Evaluation of pedo-transfer funktions. Soil Sci. Soc. Am. J., 57, 1088-1095
- Tsegaye, T. & Hill, R.L. (1998): Intensive Tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurements. Soil Science, 163/2, 155-165.
- Ulrich, B. (1981): Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. Z. f. Pflanzenernähr. Bodenk., 144, 289-305.
- Voltz, M. & Webster, R. (1990): A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. Journal of Soil Science, 41, 473-490.
- Voltz, M., Lagacherie, P. & Louchart, X. (1997): Predicting soil properties over a region using sample informations from mapped reference area. European Journal of Soil Science, 48, 19-30.

- Vorderbrügge, Th. & Friedrich, K. (1998): Thematische Bodenkarten als Grundlage der Landes- und Regionalplanung in Hessen. In: Hessisches Ministerium des Innern und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz. Referat Bodenschutz (Hrsg.): Ökologie-Forum Hessen. Bodenschutz in der Landschaftsplanung. Wiesbaden.
- Wagenet, R.J. (1998): Scale issues in agroecological research chains. *Nutrient Cycling in Agriecosystems*, 50, 23-34.
- Wagner, G. (1995): Basis approaches and methods for quality assurance and quality control in sample collection and storage for environmental monitoring. *The science of the total environment*, 176, 63-71.
- Walter, U. (1988): Beeinflussung der Naturschutzgebiete durch die angrenzende Landwirtschaft im Hinblick auf vom Wind erodierte düngerbelastete Bodenteilchen, ihre Transportfähigkeit und Sedimentation. Unveröff. Diplomarbeit. Fakultät der Geowissenschaften der Ruhr-Universität Bochum.
- Webster, R. & Oliver, M. A. (1989): Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. VI. Disjunctive kriging and mapping the conditional probability. *Journal of Soil Science*, 40, 497-512.
- Webster, R. & Oliver, M.A. (1990): *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford University Press, New York.
- Webster, R. (1977): *Quantitative and numerical methods in soil classification and survey*. Monographs in Soil Survey. Clarendon Press, Oxford.
- Webster, R. (1985): Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. Soil. Sci.*, 41, 1-70.
- Webster, R. (1993). Dealing with Spatial Variation. In: Schulin, R., Desaulles, A., Webster, R., von Steiger, B. (Ed.): *Soil Monitoring: Early detection and Surveying of Soil Contamination and Degradation*. Basel, Boston, Berlin, 295-307.
- Wegener, H.-R. (1999a): *Bodenkundliche Laborübungen. -Anleitung für die physikalische und chemische Untersuchung von Böden (unveröff.)*. Inst. f. Bodenkunde u. Bodenerhaltung der Justus-Liebig Universität Gießen.
- Wegener, H.-R. (1999b): *Übungen zur Umweltanalytik Laborübungen. -Anleitungen zur Untersuchung von Boden, Luft, Wasser und Siedlungsabfällen (unveröff.)*. Inst. f. Bodenkunde u. Bodenerhaltung der Justus-Liebig Universität Gießen.
- Wenkel, K.-O. & Schultz, A. (1999): Vom Punkt zur Fläche - das Skalierungs- bzw. Regionalisierungsproblem aus der Sicht der Landschaftsmodellierung. In: Steinhardt, U. & Volk, M. (Hrsg.): *Regionalisierung in der Landschaftsökologie. Forschung - Planung - Praxis*. Teubner, Stuttgart.
- Weyl, R. (Hrsg.) (1980): *Geologischer Führer Gießen und Umgebung*. 2. Aufl. -Mittelhess. Druck- u. Verlags-ges., Gießen.
- Will, D. (1987): Die Bodenschätzung in Theorie und Praxis sowie als bodenkundliche Datenquelle. In: *Nachrichtenblatt der Vermessungs- und Katasterverwaltung Rheinland-Pfalz*, 4, 310-332.
- Young, F.-J; Hammer, R.-D. & Wiliams, F. (1997): Estimation of map unit composition from transect data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 854-861.
- Young, F.-J; Hammer, R.-D. & Wiliams, F. (1998): Evaluating central tendency and variance of soil properties within map units. *Soil Science of America*, 62, 1640-1646.
- Young, I.M. & Crawford, J.W. (1991): The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation. *Journal of Soil Science*, 42, 187-192.
- Zölitz, R. (1983): Beispiele zur Anwendung der Variogrammanalyse auf flächenhaft erhobene Bodendaten. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 36, 97-102.