

ProBoSA

Pilotstudie “Entwicklung eines Expertensystems zur Prognose hoch- und grundwasserbeeinflusster Böden in Sachsen-Anhalt”

Endbericht

Dr. Markus Möller, Dr. Michael Steininger, Florian Thürkow,
Wolfgang Kainz & Dr. Henrik Helbig

30. Mai 2018

Zuwendungsempfänger Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
· Professur Landwirtschaftliche Betriebslehre · Karl-Freiherr-von-Fritsch-Straße 4 · 06120 Halle (Saale)

Projektleitung Prof. Dr. Peter Wagner

Projektbearbeitung Dr. Markus Möller

Kontakt mail: markus.moeller@landw.uni-halle.de · Tel. (0345) 552 23 74

Laufzeit 1.8.2015 bis 28.2.2017

12	Inhaltsverzeichnis	
13	Abbildungsverzeichnis	4
14	Tabellenverzeichnis	5
15	1 Einleitung	7
16	1.1 Motivation	7
17	1.2 Bisherige Arbeiten zur digitalen Bodenkartierung in Sachsen-Anhalt	7
18	1.3 Projektziele	10
19	1.4 Projektorganisation	11
20	2 Prozesskette	12
21	2.1 Untersuchungsgebiet	12
22	2.2 Transformation und Ableitung der Zielmerkmale und -klassen	14
23	2.2.1 Merkmalstransformation und Ableitung von Zielmerkmalen und -klas-	
24	sen aus den Unterlagen der Mittelmaßstäbigen landwirtschaftlichen Stand-	
25	ortskartierung (MMK)	14
26	2.2.2 Merkmalstransformation und Ableitung von Zielmerkmalen und -klas-	
27	sen aus den Unterlagen der Vorläufigen Bodenkarte Sachsen-Anhalt	
28	1:50 000 (VBK 50)	18
29	2.2.3 Merkmalstransformation und Ableitung von Zielmerkmalen und -klas-	
30	sen aus den Unterlagen der Forstlichen Standortskartierung 1:10 000 . .	20
31	2.2.4 Merkmalstransformation und Ableitung von Zielmerkmalen und -klas-	
32	sen aus den Unterlagen der Bodenschätzung (BS)	20
33	2.2.4.1 Transformationsansätze	21
34	2.2.4.2 Bisherige Ansätze zur Auswertung der Bodenschätzung in Sachsen-	
35	Anhalt	22
36	2.2.4.3 Datengrundlagen	24
37	2.2.5 Die Geologische Karte 1:25 000 und ihre Aufbereitung für die digitale	
38	Anwendung	26
39	2.2.6 Bodentyp	28
40	2.3 Bezugseinheiten und Attributzuweisung	30
41	2.4 Klassifikation der Bodenartengruppen und Bodengenese	34
42	2.5 Typisierung	38
43	2.6 Reliefbezogene Plausibilitätsanalyse der Klassifikationsergebnisse	38
44	2.6.1 Parametrisierung der Bezugseinheiten mit Reliefattributen	38
45	2.6.2 Auendetektion	42
46	2.6.3 Reliefgliederung terrestrischer Bezugseinheiten	42
47	2.6.4 Plausibilitätsanalyse	42
48	3 ProBoSA-System	42
49	3.1 Technische Rahmenbedingen für den Betrieb des ProBoSA-Systems	42
50	3.2 Anleitung zur Nutzung des ProBoSA-Servers	46
51	3.2.1 Server-Login	46

52	3.2.2	Dateien hoch- und herunterladen	48
53	3.2.3	Neue Bezugseinheiten hochladen	48
54	3.2.4	Polygone in Datenbank speichern	49
55	3.2.5	Datenbank-Applikation im Browser	51
56	3.2.6	Klassifikation starten	51
57	3.2.6.1	Zuordnung der größten Anteile	51
58	3.2.6.2	Erzeugung der schichtweisen Informationen	51
59	3.2.6.3	Zuordnung Schichtinformationen und Speicherung der schicht-	
60		weisen Bezugseinheiten	51
61	3.2.6.4	Export der Schichten	53
62	3.2.6.5	Klassifikation der Schichten	53
63	3.2.6.6	Zerlegung	55
64	4	Zusammenfassung	55
65	5	Ausblick	56
66		Literatur	57

Abbildungsverzeichnis

68	1	Überlagerung bodenkundlich relevanter Kartenwerke am Beispiel des Testgebietes <i>Bode</i>	8
69			
70	2	ProBoSA-Prozesskette zur Ableitung bodenkundlicher Zielklassen.	11
71	3	Lage des Untersuchungsgebietes <i>Bode</i> in Sachsen-Anhalt (a), Verbreitung der Boden(sub)typen entsprechend der VBK 50 (b) und deren Flächenanteile (c) im Untersuchungsgebiet sowie die Lage der Kontrollpunkte (b).	13
72			
73	4	Fließschema zur schichtspezifischen Zerlegung von thematischen Bodendaten unterschiedlicher Nomenklatur.	16
74			
75	5	Inhalt der MMK (schematisiert).	17
76			
77	6	Schematische Darstellung der wesentlichen Datengrundlagen der Bodenschätzung.	21
78			
79	7	Beispiele für Bezugseinheiten visualisiert anhand des Bildausschnittes im Testgebietes.	31
80			
81	8	Klassifikationsergebnisse der Bodenartengruppen und Genese für die Schicht 1 (a, c) und die korrespondierenden Flächenanteile (b, d) im Testgebiet <i>Bode</i> (b). .	36
82			
83	9	Qualitätsmaße für die Bodenartengruppenklassifikation der Schicht 1 im Testgebiet.	37
84			
85	10	Qualitätsmaße für die Geneseklassifikation der Schicht 1 im Testgebiet.	37
86	11	Ergebnisse der Clusteranalyse des Reliefattributes <i>RKI2</i> zur Auendetektion. . .	43
87	12	Ergebnisse der Clusteranalyse des Reliefattributs <i>MBI</i> und <i>RKI1</i> zur Gliederung der terrestrischen Prozessbereiche.	44
88			
89	13	Anteile von Bodenklassen (a), Bodenartengruppen (b) und Geneseklassen (c) an der Reliefklasse <i>Aue</i>	45
90			
91	14	Ordner-Struktur auf dem ProBoSA-Server.	48
92	15	SSH-Zugriff.	49
93	16	Datenbank-Anwendung.	50
94	17	Anzeige der Attributtabelle in der Datenbank-Anwendung.	50
95	18	Ergebnis der Zuordnung (Tabelle <i>_bt_kombi_mit_maxzuordnung</i>).	52
96	19	Eingabemaske der Datenbank-Anwendung.	52
97	20	Export der ersten Schicht als Shape.	53
98	21	Steuerungsskripte für Klassifikation.	54
99	22	MMK-Eingangsdatensatz.	54

Tabellenverzeichnis

100			
101	1	Bodenkundliche Eingangsdaten im Testgebiet <i>Bode</i>	9
102	2	Zusammenstellung der Substratzielmerkmale sowie der korrespondierenden	
103		Quellen zur Transformation und Interpretation der bodenkundlichen Ausgangs-	
104		informationen.	15
105	3	Ausschnitt einer Matrix zur Transformation von Bodenschätzungsbodenarten	
106		für AL-, Lö-, V- und D-Standorte zu KA5-Bodenartengruppen (BAG).	16
107	4	Beispiel für die Transformation des MMK-Substrattyps <i>SFT NR 46: ol/d-ol</i>	18
108	5	Datengrundlagen der VBK 50.	19
109	6	Beispiel für die Transformation des VBK 50-Substrattyps <i>p-(v)eu/pfl-(v)et</i> . Schicht-	
110		wechsel: / (zwischen 3 und 7 dm) Substrattyp obere Schicht (Schicht 1): p-	
111		(v)eu Substrattyp untere Schicht (Schicht 2): pfl-(v)et.	19
112	7	Beispiel für die Transformation des FSK-Substrattyps <i>p-(k)ls(Sp)/pfl-(k)l(Lg)//g-</i>	
113		<i>(k)el(Mg)</i> . Schichtwechsel: / (zwischen 3 und 7 dm) / / (zwischen 7 und 12	
114		dm) Substrattyp obere Schicht (Schicht 1): p-(k)ls(Sp) Substrattyp middle-	
115		re Schicht (Schicht 2): pfl-(k)l(Lg) Substrattyp untere Schicht (Schicht 3): g-	
116		(k)el(Mg).	20
117	8	Aufbau und Inhalt der Schichtbeschriebtabelle.	25
118	9	Beispiel für die Transformation der BS-Merkmale <i>Entstehung = Lö, Schichtnr =</i>	
119		<i>1, SchichtBA_Ne = L, s3, st2, HU = h2, KA = ka3, DMV = 0 und DMB = 3</i>	26
120	10	Die wichtigsten holozänen Fazies- bzw. Boden-Bildungsbereiche. Die Ordnungs-	
121		nummer bildet die erste Ziffer der entsprechenden geologischen Schlüsselnum-	
122		mer in Tabelle 11.	27
123	11	Geologische Schlüsselnummer mit den dazugehörigen thematischen Ebenen	
124		und ihre Lage im Schichtmodell der Bodenbildungsbereiche.	27
125	12	Beispielhafter Auszug aus der Auswertungstabelle der GK 25.	29
126	13	Gewichtete Geneseklassen (*_gen_*), Klassifikationen mit den höchsten Wich-	
127		tungen (CL_*), Anzahl von widersprüchlichen Klassifikationen (N_*), die kor-	
128		respondierenden Qualitätsmaße (MS1, MS2, N, STB), die Klassifikationsquelle	
129		(SRC) sowie die finale Klassifikation (CLASS) für alle Schichten des Kontroll-	
130		punktes 207042.	32
131	14	Zielmerkmale <i>Ton</i> (*_koe_t*) und <i>Schluff</i> (*_koe_u*), Klassifikationen der Boden-	
132		artengruppe mit den höchsten Wichtungen (CL_*), Anzahl von widersprüchli-	
133		chen Klassifikationen (N_*), die korrespondierenden Qualitätsmaße (MS1, MS2,	
134		N, STB), die Klassifikationsquelle (SRC) sowie die finale Klassifikation (CLASS)	
135		für alle Schichten des Kontrollpunktes 207042.	33
136	15	Ergebnis der Bodentypen-, Bodenartenhauptgruppen- (BAHG-) bzw. Bodenar-	
137		tengruppentypisierung (BAG-) für alle Schichten der Kontrollpunkte (vgl. Abb.	
138		8, 9 u. 10). MS1, STB – Qualitätsmaße SRC – Quelle v – Vorläufige Bodenkar-	
139		te 1:50 000 g – Geologische Karte 1:25 000 f – Forstliche Standortskartierung	
140		b – Bodenschätzung, m – Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standortsk-	
141		artierung).	39

142	16	Ergebnis der Bodentypen- und Genesetypisierung (GEN_) für alle Schichten	
143		der Kontrollpunkte (vgl. Abb. 8, 9 u. 10). MS1, STB – Qualitätsmaße SRC –	
144		Quelle v – Vorläufige Bodenkarte 1:50 000 g – Geologische Karte 1:25 000 f	
145		– Forstliche Standortskartierung b – Bodenschätzung, m – Mittelmaßstäbige	
146		Landwirtschaftliche Standortskartierung).	40
147	17	Zusammenstellung aller programmierten Skripte des ProBoSA-Systems.	47

1 Einleitung

1.1 Motivation

Entsprechend der *Programmstruktur der EU-Fonds EFRE, ESF, ELER und EMFF in Sachsen-Anhalt für die Förderperiode 2014 bis 2020*¹ besteht ein Schwerpunkt in der *Förderung der Anpassung an den Klimawandel sowie der Risikoprävention und Risikomanagements*. Danach soll "... die Möglichkeit eröffnet werden, dringende Maßnahmen der Kommunen mit investivem Charakter zur Verbesserung des kommunalen Hochwasserschutzniveaus zu fördern. Darüber hinaus sollen Vorhaben unterstützt werden, die die Beseitigung oder Minderung von sowie Vorbeugung gegen Vernässung oder Erosion zum Ziel haben."

Für die Umsetzung der Förderziele sind großmaßstäbige und flächendeckende Grundlegenden insbesondere zu grund- und hochwasserbeeinflussten Böden notwendig, die eine wichtige Regulierungsfunktion für den Flächenwasserhaushalt besitzen. So fungieren grund- und hochwasserbeeinflussten Böden beispielsweise als Retentionskörper von Niederschlagswasser oder als Orte des Rückhalts und der Freisetzung von Schadstoffen. Darüber hinaus haben Böden eine dämpfende oder verstärkende Wirkung bei Klimaänderungen (Vernässung oder Austrocknung, Überschwemmung).

Für die Fläche des Landes Sachsen-Anhalt stehen mittel- bis kleinmaßstäbige, bodenkundliche Übersichtskarten im Maßstab 1:400.000 und 1:200.000 zur Verfügung. Den Maßstabsbereich 1:50.000 deckt die (digitale) Vorläufige Bodenkarte 1:50 000 von Sachsen-Anhalt (VBK 50) ab (Hartmann, 2005, 2006, 2014).

Im großmaßstäbigen Maßstabsbereich existiert noch keine konsistente Bodenkarte. Neben der Bodenschätzung und Forstliche Standortkartierung, die die landwirtschaftlichen Nutzfläche bzw. Wälder abdecken und in Sachsen-Anhalt in digitaler Form vorliegen (Guttek, 1999; Hartmann, 2006), sind weitere Kartierungen aus DDR-Zeiten (Projekt- und Moorkartierungen u.a.) vorhanden. Die Kartenwerke sind durch unterschiedliche Nomenklaturen sowie geometrische Zielmaßstäbe gekennzeichnet (Möller et al., 2012; Hartmann, 2014), basieren aber alle auf der Bodenform. Abbildung 1 veranschaulicht Unterschiede bodenkundlich relevanter Kartenwerke hinsichtlich Maßstab, geometrischer Auflösung und räumlicher Differenzierung (vgl. Tab. 1, S. 9).

(Guttek, 1999)

1.2 Bisherige Arbeiten zur digitalen Bodenkartierung in Sachsen-Anhalt

In Sachsen-Anhalt sind eine Reihe von Arbeiten, die sich mit der Erstellung neuer Bodenkarten auf Grundlage vorhandener Bodendaten und Nutzung bodenrelevanter Datenbestände beschäftigen, durchgeführt worden. Sie können hinsichtlich der verwendeten Methoden in (1.) expertenbasierte Regelwerke und (2.) Verfahren des maschinellen Lernens unterschieden werden.

1. Behrens & Scholten (2003b) erstellten für das Schwarzerdegebiet in Sachsen-Anhalt eine bodentypologische Rasterkarte für den Maßstabsbereich 1:25 000 bis 1:50 000. Grundlage war eine Faktorenanalyse von Klimarasterdaten, Reliefattributen eines digitalen

¹http://www.europa.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/StK/Europa/Dokumente/Programmstruktur_EU-Fonds.pdf

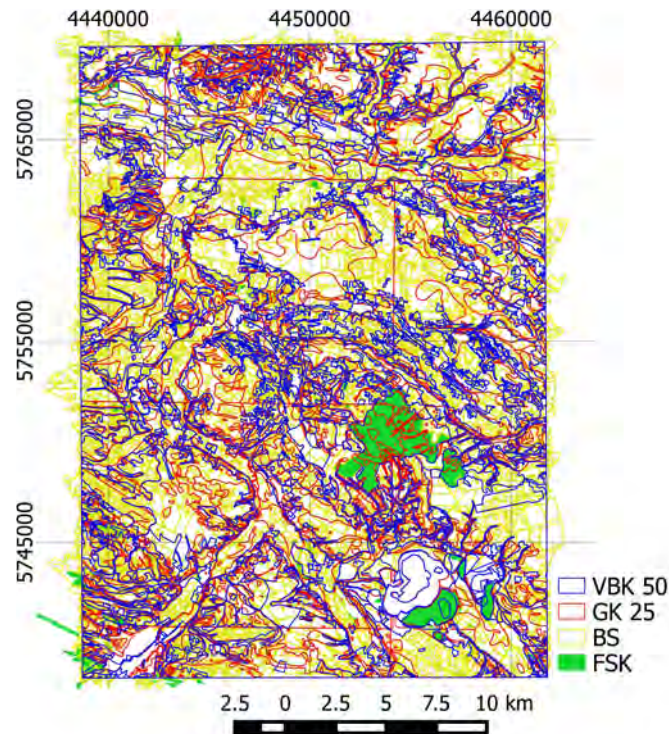


Abbildung 1: Überlagerung bodenkundlich relevanter Kartenwerke am Beispiel des Testgebietes *Bode* (vgl. Abb. 3). MMK – Mittelmaßstäbige Standortskartierung | VBK 50 – Vorläufige Bodenkarte 1:50 000 | MMK – Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standortskartierung | BS – Bodenschätzung | GK 25 – Geologische Karte 1:25 000 | FSK – Forstliche Standortskartierung.

Höhenmodells sowie des Karbonatgehaltes der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortskartierung. Die Ausweisung von Auesedimenten erfolgt anhand einer Überflutungssimulation. Es wurde ein teilweise statistisch begründetes, teilweise expertenbasiertes Regelwerk aus den Faktoren Klima und Relief sowie Löss- und Auenverbreitung aufgestellt, die das Auftreten von Schwarzerden, Kalk-Schwarzerden, Rendzinen, Parabraunerden, Gleyen, Kolluvien und Pseudogleyen bestimmen.

Die synthetische Konzeptbodenkarte Ostharz besteht aus den zwei Komponenten "Vorhersage periglaziärer Lagen" und "Reliefanalyse" (Scholten et al., 2001). Die Reliefanalyse zielt auf die Ausweisung von Gebieten mit Akkumulations- und Abtragungsnegung sowie Arealen mit nur geringer Tendenz zu solifluidalen Verlagerung. Auen und Niederungen wurden auf Grundlage einer hybriden Überflutungssimulation generiert. Die Vorhersage periglaziärer Lagen und ihrer Mächtigkeit basierte auf einer Reihe von Reliefparametern und Informationen zum Ausgangsgestein (Digitale Geologische Karte 1:25 000). Zur Ausgrenzung quasihomogener Bodenbereiche wurden die flächendeckend ermittelten Mächtigkeiten der periglaziären Lagen und die Ergebnisse der Reliefanalyse klassifiziert und verschnitten. Die Klassifikation erfolgte auf Grundlage von Expertenwissen und unter Einbeziehung der Bodenübersichtskarte 1:200 000

Tabelle 1: Bodenkundliche Eingangsdaten im Testgebiet *Bode*.

Quellen ¹	Maßstab	Wichtung	Tiefe ²	Zielmerkmale ³				
				FB	GEN	SKE	C	BST
MMK	1:100 000	0,2	12	(×)		(×)	((×))	(×)
VBK 50	1:50 000	0,5	12	(×)	×	×	×	(×)
GK 25	1:25 000	0,8	20	((×))	×	((×))	((×))	
BS	1:10 000	1	10	(×)	(×)	×	×	(×)
FSK 10	1:10 000	1	20	×	×	×	×	×

- ¹ • MMK – Mittelmaßstäbige Standortkarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche
 • VBK 50 – Vorläufige digitale Bodenkarte von Sachsen-Anhalt
 • GK 25 – Geologische Karte mit Übersetzung der lithologischen Angaben in Substrate entsprechend AG Boden (2005)
 • BS – Unterlagen der Bodenschätzung Karte der Klassenflächen (Folie 42)/Grablochbeschriebe
 • FSK 10 – Forstliche Standortkarte mit übersetzten Forstbodenformen entsprechend AG Boden (2005)

² Tiefe, bis zu der die Auswertung der entsprechenden Karten für ProBoSa erfolgt. Die GK 25 enthält zum Teil keine Angaben im oberen Bereich.

- ³ • FB – Feinboden • GEN – Genese/Geogenese • C – Carbonat • BST – Bodensubtyp • SKE – Grobboden

Die Aussagemöglichkeiten bedeuten:

- × – verwendbare Angaben vorhanden
- (×) – Angaben vorhanden, Einschränkungen durch den Maßstab, die Aggregation oder unscharfe Daten
- ((×)) – Angaben nicht, oder nicht durchgängig vorhanden, Ableitung durch Sekundärwissen möglich.

sowie der bodentypologischen Angaben von Bodenprofilaufnahmen im Ostharzgebiet. Wie schon bei der bodentypologischen Konzeptkarte des Schwarzerdegebietes resultieren die Grenzen der abgeleiteten Bodenbildungsbereiche im Ostharz nicht aus vorhandenen Bodenkarten, sondern aus den nicht bodenkundlichen Eingangsdaten, insbesondere den verwendeten digitalen Geländemodellen.

Möller & Koschitzki (2007) erarbeiteten ein Regelwerk zur reliefbezogenen Plausibilitätsüberprüfung der Vorläufigen Bodenkundlichen Karte 1:50 000 (VBK 50). Die Regeln wurden in Form von Fuzzylogik-Zugehörigkeitsfunktionen erstellt, die auf Reliefattribute angewendet worden sind (Hartmann, 2014). Eine Weiterentwicklung des Ansatzes stellt der in Möller et al. (2012) vorgestellte Algorithmus dar, der die expertenbasierte Auswahl von Schwellenwerten durch Clusteranalyse und den Vergleich von Summenkurven spezifischer Reliefmerkmale unterstützt.

2. Für das Auengebiet der Schwarzen Elster entwickelten Behrens & Scholten (2003a) ein "Künstliches Neuronales Netz"-Modell zur Prognose von Bodentypen, in das als erklärende Variablen Reliefattribute eines hochauflösendes digitales Laserscan-Höhenmodell eingingen. Die Informationen wurden mit einer Karte der Klassenzeichen der Bodenschätzung verknüpft, die in die Nomenklatur nach KA 4 übersetzt wurde (Ausgangsgestein) (NLfB, 2003). Als weitere Informationsquellen fungierten Daten zur Bodennutzung sowie eine Reihe von als Punktinformationen vorliegende Bohrstockaufnahmen mit Informationen zum kartierten Bodentyp. Einen ähnlichen Ansatz verfolgten Möller et al. (2009), die mit einem Entscheidungsbaumverfahren eine digitalen Bodenprognosekarte (Bodensubtypen und Bodenarten) im Maßstab 1:10 000 für das gesamte Überschwemmungsgebiet der Elbe in Sachsen-Anhalt ableiteten.

Der wichtigste Unterschied zwischen dem ProBoSA-Projekt und den obengenannten Projekten besteht darin, dass in ProBoSA die in Sachsen-Anhalt vorhandenen bodenkundlichen und geologischen Daten als Primärdatenquellen betrachtet sowie rechnergestützt ausgewertet und zusammengeführt werden. Neben der bodentypologischen Interpretation wird vor allem eine Substratabfolge bis maximal 2 Meter Tiefe generiert. Dieser Ansatz ist zur Erstellung einer Bodenformenkarte unumgänglich, da die Substratabfolge grundsätzlich nicht aus anderen Datenquellen heraus ermittelt werden kann.

1.3 Projektziele

Das Ziel des Pilotprojektes besteht im Aufbau des datenbankgestützten Expertensystems und Web-Portals **ProBoSA** zur großmaßstäbigen Prognose grund- und hochwasserbeeinflusster Böden in Sachsen-Anhalt als Entscheidungsunterstützung bei der bodenbezogenen Maßnahmenplanung im Rahmen der Klimafolgenanpassung und des Klimaschutzes. Auf der Grundlage von räumlich expliziten Konturen zielt **ProBoSA** auf die maßstabsspezifische Zusammenführung und inhaltliche Qualifizierung von vorhandenen Bodenflächendaten und sonstigen für die Bodenkartierung relevanten Zusatzdaten. Dazu gehören beispielsweise Flächen Datensätze zur Geologie und Landnutzung oder zum Relief und Grundwasser.

Das Datenintegrationsergebnis entspricht einer Bodenkonzeptkarte (vgl. AG Boden, 2005; Möller et al., 2012). Folgende Zielklassen werden dabei entsprechend den Klassifikationsrichtlinien der bodenkundlichen Kartieranleitung abgebildet (AG Boden, 2005):

- Bodensubstrat
 - Bodenart, Bodenartengruppe, Bodenartenhauptgruppe
 - Bodengenese
 - Kalkgehaltsstufe
 - Skelettgehaltsstufe
- Bodensubtyp.

Die Datenintegrationsergebnisse enthalten weiterhin Angaben zur Qualität der Zwischen- und Endprodukte. Weitere Anforderungen an das ProBoSA-System bestehen in der

- Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und Algorithmen,

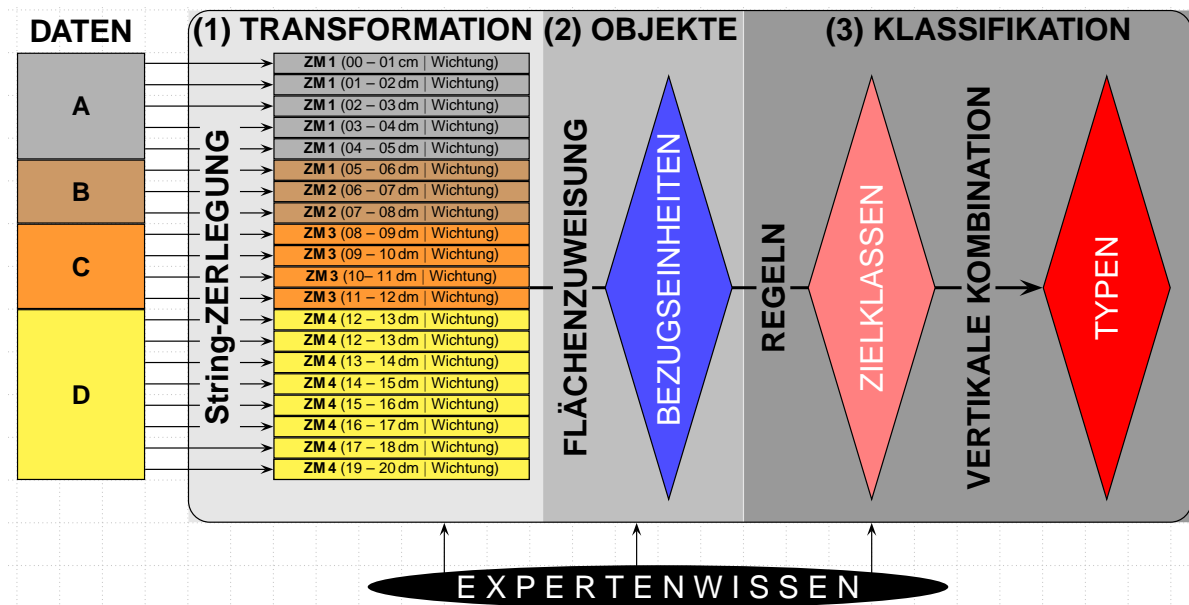


Abbildung 2: ProBoSA-Prozesskette zur Ableitung bodenkundlicher Zielklassen.

- Erweiterbarkeit der Algorithmen und Eingangsdaten sowie
- nachvollziehbaren Formalisierung von Expertenwissen.

1.4 Projektorganisation

Das Projekt ist durch den Antragsteller **MLU** und die Unterauftragnehmer **MISB** und **UMGEODAT** in Abstimmung und unter Beteiligung des **LAGB** bearbeitet worden:

MLU Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg · Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften · Karl-Freiherr-von-Fritsch-Str. 4 · 06120 Halle (Saale) · Dr. Markus Möller, Prof. Dr. Peter Wagner

MISB Mitteldeutsches Institut für angewandte Standortkunde und Bodenschutz · Ellen-Weber-Str. 98 · 06120 Halle (Saale) · Dr. Michael Steininger

UMGEODAT Umwelt- und GeodatenManagement GbR · Mansfelder Str. 56 · 06108 Halle (Saale) · Florian Thürkow

LAGB Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt · Köthener Str. 38 · 06118 Halle (Saale) · Dr. Henrik Helbig, Wolfgang Kainz

Die Projektpartner **MLU** und **LAGB** leiteten und koordinierten das Projekt. In Anlehnung an die Prozesskettenstruktur in Abbildung 2 ist das Projekt in die Arbeitspakete *Merkmals-transformation* (AP 1), *Objektbildung* (AP 2) und *Klassifikation* (AP 3) gegliedert. Der Antrag-

steller **MLU** war für die fachliche Bearbeitung der Arbeitspakete AP 2 und AP 3 verantwortlich. Der Unterauftragnehmer **MISB** koordinierte und bearbeitete das Arbeitspaket AP 1. Im Verantwortungsbereich des Unterauftragnehmers **UMGEODAT** lag die technische Implementierung der unter AP 1 bis AP 3 entwickelten Algorithmen und Regeln innerhalb des ProBoSA-Portals (AP 4).

2 Prozesskette

Abbildung 2 fasst die einzelnen Schritte der Prozesskette zur Ableitung bodenkundlicher Zielklassen und -merkmale zusammen, die im ProBoSA-Expertensystem implementiert sind:

1. Grundlage der Prozesskette sind Transformationstabellen, in denen die Regeln zur inhaltlichen Übersetzung der Ausgangsdatensätze in die Nomenklatur der aktuellen bodenkundlichen Kartieranleitung dokumentiert sind (AG Boden, 2005). Die *Transformation* zielt auf die Generierung von Zielmerkmalen in einer vertikalen Auflösung von 10 cm bis zu einer Profiltiefe von 2 m. Zielmerkmale repräsentieren beispielsweise Substratmerkmale (z.B. Sand- und Schluffgehalt des Feinbodens) eines spezifischen KA 5-Aggregationsniveaus (z.B. Bodenart oder Bodenartengruppe). Die Zielmerkmale sind mit den Polygonen der Ausgangsdatensätze verknüpft.
2. Die Zielmerkmale werden danach mit *Bezugseinheiten* in Beziehung gesetzt. Bezugseinheiten repräsentierten Polygone, die als maßstabsspezifische Kartiereinheiten angesehen werden können.
3. Die *Klassifikation* der Zielmerkmale zur Zielklassen (z.B. Bodenart, Bodenartengruppe) erfolgt entsprechend den Klassenbeschreibungen der bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 (AG Boden, 2005). Die Klassifikationsergebnisse werden durch Qualitätsmaße charakterisiert, die sich aus der expertenbasierten Wichtung der Eingangsdaten ableiten. Bei der abschließenden *Typsierung* werden die schichtbezogenen Klassifikationsergebnisse vertikal zusammengefasst.

In den Kapiteln 2.2 bis 2.5 werden die einzelnen Schritte der Prozesskette näher beschrieben. Dabei werden jeweils die angewendeten Methoden erläutert sowie anhand des Untersuchungsgebietes *Bode* bzw. ausgewählten Kontrollpunkten (Kap. 2.1) am Beispiel der Bodenartengruppen- und Geneseklassifikation angewendet. Das Kapitel 2.6 veranschaulicht die Erweiterbarkeit des ProBoSA-Systems am Beispiel einer reliefbezogenen Plausibilitätsanalyse der Klassifikationsergebnisse. In Kapitel 3.1 wird schließlich auf die technischen Voraussetzungen des ProBoSA-Systems eingegangen.

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Lage des Untersuchungsgebietes in Sachsen-Anhalt geht aus Abbildung 3a hervor. Die Verteilung der vorherrschenden Bodentypen ist in den Abbildungen 3b und c dargestellt. Danach dominieren *Schwarzerden* und *Pararendzinen aus Löss* sowie *Gley-Tschernitzen aus Auensedimenten*.

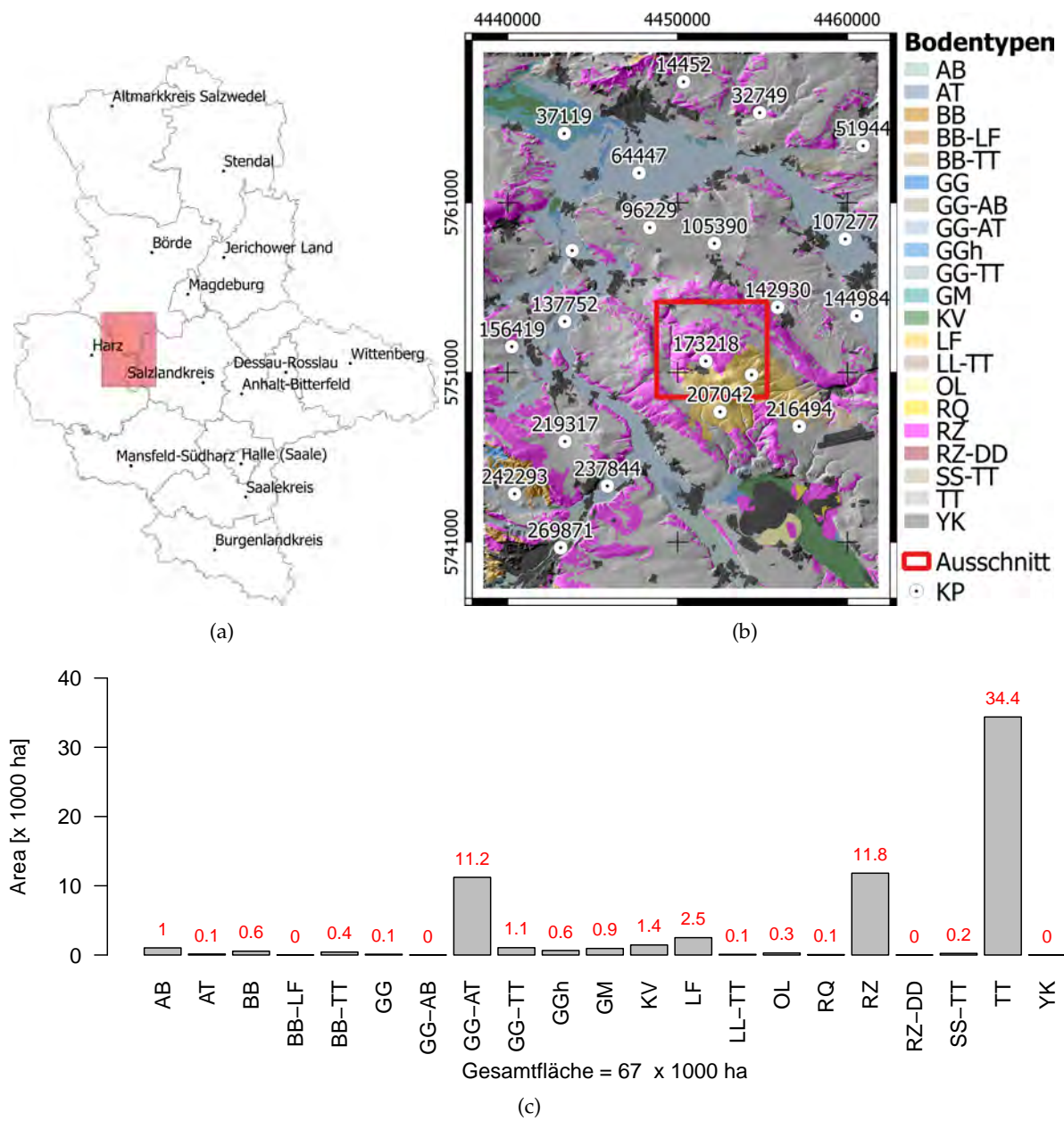


Abbildung 3: Lage des Untersuchungsgebietes *Bode* in Sachsen-Anhalt (a), Verbreitung der Boden(sub)typen entsprechend der VBK 50 (b; Hartmann, 2014) und deren Flächenanteile (c) im Untersuchungsgebiet sowie die Lage der Kontrollpunkte (b).

2.2 Transformation und Ableitung der Zielmerkmale und -klassen

In Tabelle 1 (S. 9) sind die vorliegenden bodenkundliche Grundlagendaten des Testgebietes *Bode* aufgelistet (vgl. Abb. 1) und hinsichtlich der Eigenschaften *Maßstab* und *Vertikale Mächtigkeit* sowie der ableitbaren *Zielmerkmale* und *Zielklassen* charakterisiert. Weiterhin ist ein Beispiel für eine expertenbasierte Wichtung der Daten angegeben, die für die Klassifikation oder Merkmalsfindung und ihre Aussagesicherheit von Bedeutung ist (Kap. 2.4) und auf den Faktoren *Maßstab/Aggregationsgrad*, *Interpretationsanteil*, *Kenntnistand* und *Aussagesicherheit der Eingangsdaten* basiert.

Während sich der Boden(sub)typ direkt aus der expertenbasierten Interpretation von Merkmalen der Bodenschätzung, der Geologie, des Reliefs und der Nutzung ergibt (Kap. 2.2.6), werden die in den bodenkundlichen Ausgangsdaten der Bodenschätzung, VBK 50, FSK 10 und MMK ausgewiesenen Substratinformationen in Einzelkennwerte zerlegt und entsprechend den Vorgaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 durch den Schwerpunkt bzw. Mittelwert der Klassen beschrieben (Tab. 2). Bei der Bodenschätzung erfolgt eine direkte Transformation der bodenkundlich relevanten Kennwerte aus der Nomenklatur der Bodenschätzung in die Nomenklatur der KA 5.

Die Transformation der bodenkundlichen Ausgangsinformationen zielt auf die Erstellung von diskreten Merkmalsebenen (Tab. 1, S. 9) mit einer anvisierten Gesamtmächtigkeit von 20 dm und einer vertikalen Auflösung von 1 dm für vier bodenkundliche Informationsquellen (FSK, MMK, BS, VBK 50) sowie die bodenkundliche Interpretation der GK 25. Dabei muss jede Teilschicht mit Werten belegt sein. Da jede dieser bodenkundlichen Ausgangsinformationen unterschiedlich aufgebaut ist, voneinander abweichende bodenkundliche Systematiken aufweist sowie auf einem unterschiedlichen Niveau der Substratkennzeichnung vorliegt, sind individuelle Lösungen zur Merkmalstransformation erarbeitet worden. Darüber hinaus lassen die bodenkundlichen Informationsquellen mit Ausnahme der FSK 10 und GK 25 nur Aussagen bis maximal 15 dm zu. Deshalb werden die darunterliegenden Informationen vertikal mit der bodenkundlichen Interpretation der GK 25 kombiniert.

Die Transformationstabellen sind auf dem ProBoSA-Server in Form von Excel-Tabellen abgelegt². Tabelle 3 zeigt den Ausschnitt einer Tabelle zur Transformation von Bodenarten der Bodenschätzung. Abbildung 4 veranschaulicht die technische Umsetzung der schichtspezifischen Zerlegung der Bodendaten innerhalb des ProBoSA-Programmumgebung. Danach werden Bodendaten in eine PostgreSQL-Datenbank überführt. Anschließend wird jeder Bodeneingangsdatensatz mithilfe der Transformationstabellen vertikal und thematisch im sogenannten Schichtparser-Modul in die Zielmerkmale überführt. In den folgenden Unterkapiteln 2.2.1 bis 2.2.4 werden die Transformationsschlüssel für alle Ausgangsdatensätze näher beschrieben.

2.2.1 Merkmalstransformation und Ableitung von Zielmerkmalen und –klassen aus den Unterlagen der Mittelmaßstäbigen landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK)

Die MMK liegt in zwei Maßstabsebenen vor. Die gedruckte und in der 1980er Jahren digitalisierte Version im Maßstab 1:100 000 weist die Kartierungseinheiten (Standortregionaltypen)

²<http://probosa.de/?q=node/15>

Tabelle 2: Zusammenstellung der Substratzielmerkmale sowie der korrespondierenden Quellen zur Transformation und Interpretation der bodenkundlichen Ausgangsinformationen.

Ausgangsquelle/Eingangsdaten/Quelle	Zielmerkmale ¹	Interpretationsquellen
VBK 50	GEN, FB, SKE, C	AG Boden (2005)
FSK 10 ²	GEN, FB, SKE, C	AG Boden (2005)
BS	FB, SKE, C	eigene Interpretation, Schätzausschuss, NLFb (2003)
MMK	FB	Lieberoth et al. (1993); Thiere & Altermann (1997a,b); Thiere et al. (1991, 1997, 2000),
Bodenkundliche Interpretation der GK 25 ³	GEN, FB, SKE, C	AG Boden (2005)

¹ Abkürzungen der Zielmerkmale entsprechen den Angaben in Tabelle 1.

² Zunächst erfolgte eine manuelle Übersetzung der Forstbodenformen nach AG Boden (2005) im LAGB. Dieser Arbeitsschritt kann nur bedingt formalisiert werden, da bei der Übersetzung zugleich eine inhaltliche Prüfung der originalen Forstbodeninformation erfolgen muss. Die auf diesem Weg übersetzte Information bildet das Eingangsdatum für die Transformation gemäß Kapitel 2.2.

³ Analog zur FSK 10 erfolgte durch das LAGB eine manuelle Interpretation der GK 25 in Bodenformen gemäß KA 5 (AG Boden, 2005). Die übersetzten Bodenformen bilden das Eingangsdatum für die Transformation gemäß Kapitel 2.2. In Zukunft wird eine Codegestützte Übersetzung angestrebt, sobald die GK 25 auch inhaltlich durchgeprüft worden ist.

auf verzerrter Topographie aus. Die Standortregionaltypen haben dabei folgenden Inhalt, der den Erläuterungen zur MMK (Schmidt & Diemann, 1981) oder den Dokumentationsblättern A der MMK zu entnehmen sind:

- Bodenformengesellschaft (Leitbodenformen und deren Flächenanteile in Fünfteln),
- Substrattypen,
- Substratflächentypen,
- Hydromorphieflächentypen und
- Neigungsflächentypen.

Tabelle 3: Ausschnitt einer Matrix zur Transformation von Bodenschätzungsbodenarten für AL-, Lö-, V- und D-Standorte zu KA5-Bodenartengruppen (BAG).

BA (BS)	Bodenartengruppe (BAG)				
	Al	Lö	D	V	sonstige
fS	ss		ss		ss
fS,fs3	ss		ss		ss
fS,fs4	ss		ss		ss
fS,gs1	ss		ss		ss
fS,gs2	ss		ss		ss
fS,gs3	ss		ss		ss
fS,kr	ss		ss		ss
fS,l1	ls	us	ls		ls
fS,l2	ls	ls	ls		ls
fS,l3	ls	ls	ls		ls
fS,sch4	ls	us	ls	ls	ls
fS,schl1					ss
fS,schl2		us	sl		ls
fS,schl3	sl	us			us
...

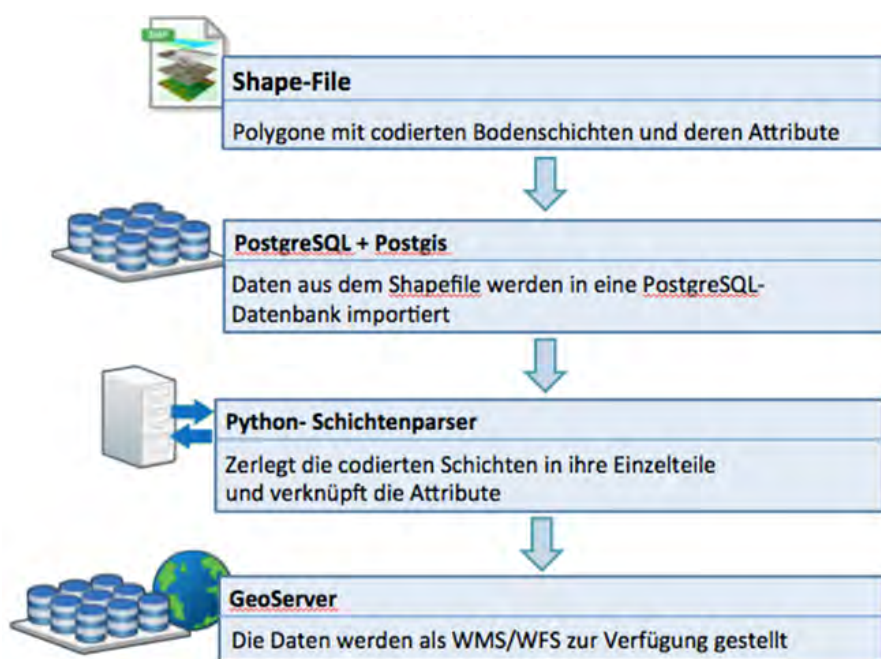


Abbildung 4: Fließschema zur schichtspezifischen Zerlegung von thematischen Bodendaten unterschiedlicher Nomenklatur.

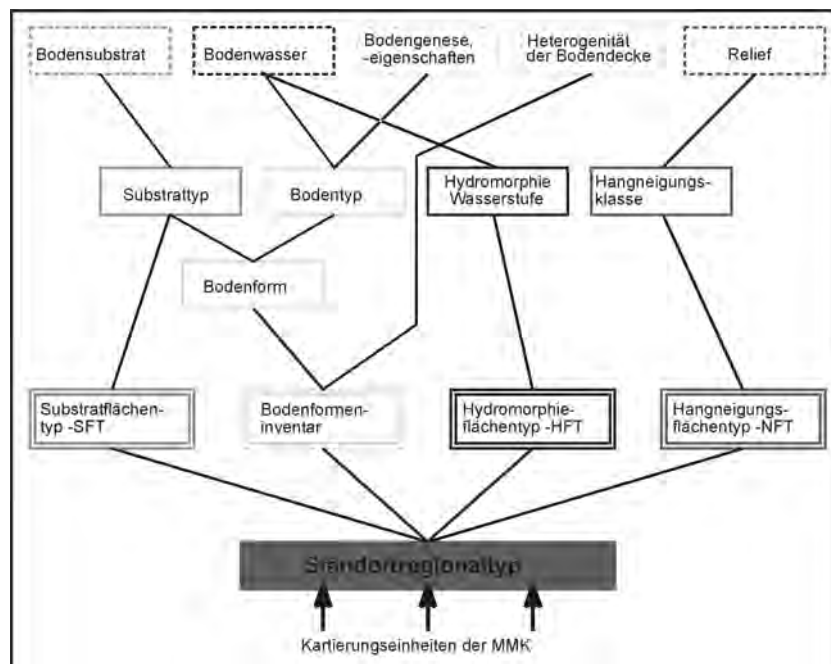


Abbildung 5: Inhalt der MMK (schematisiert).

Der Karteninhalt ist schematisch in Abbildung 5 dargestellt. Im Maßstab 1:25 000 liegen die sogenannten Arbeitskarten vor. Diese Karten weisen ebenfalls die Standortregionaltypen der MMK aus, jedoch entsprechen die Symbole nicht der Fassung in den gedruckten MMK-Karten. Die digitalisierten Arbeitskarten sowie die dazu gehörigen Bodenformen bzw. die Leitbodenformen nach TGL 24300 (1986) fließen für die landwirtschaftlich genutzten Flächen in die VBK 50 ein. Diese Karten basieren auf der TK 25 und sind unverzerrt.

Im Rahmen von PROBOSA wurde die MMK 1:100 000 als bodenkundliche Informationsgrundlage genutzt. Für die Fragestellung der Substratableitung innerhalb PROBOSA kann nur der Kennwert Substratflächentyp (SFT) verwendet werden. Die MMK umfasst 99 Substratflächentypen. Für diese wurde innerhalb der Vergleichsmethode Standort (VERMOST) (Thiere et al., 1991) die vertikale Substratschichtung der Tiefenstufen 0 bis 3 dm, 3 bis 6 dm, 6 bis 10 dm und 10 bis 15 dm anhand der Bodenarten nach TGL 24300 ausgewiesen (TGL 24300, 1986). Tabelle 4 veranschaulicht die Vorgehensweise am Beispiel des Substrattyps *ol/d-ol*.

Da nur das Substrat einfließt und die Struktur eindeutig definiert ist, stellt die Transformation der MMK-Daten die einfachste Umsetzung dar. Den Substratflächentypen wurden ausgehend von der vertikalen Schichtung der Bodenarten schichtweise (0 bis 3 dm, 3 bis 6 dm, 6 bis 10 dm und 10 bis 15 dm) die numerischen Werte der Körnungsschwerpunkte gemäß VERMOST und TGL 24300 zugeordnet³. Das Qualitätsniveau der Ableitung ist im Vergleich zu den anderen bodenkundlichen Informationsgrundlagen sehr niedrig (vgl. Tab. 1, S. 9), was insbesondere im hohen Grad der Vergesellschaftung (bzw. der Aggregation und vereinfachten Auswertung) begründet liegt.

³<http://probosa.de/?q=node/15> (Anlage BA – MMK zu KA5)

Tabelle 4: Beispiel für die Transformation des MMK-Substrattyps *SFT NR 46: ol/d-ol*.

Tiefenstufe [dm]	Bodenart (TGL)	Sand [M %]	Schluff [M %]	Ton [M %]
0 bis 3	L	51	25	24
3 bis 6	L	51	25	24
6 bis 10	lIS	81	16	3
10 bis 15	S	93	5	2

2.2.2 Merkmalstransformation und Ableitung von Zielmerkmalen und –klassen aus den Unterlagen der Vorläufigen Bodenkarte Sachsen-Anhalt 1:50 000 (VBK 50)

Die VBK 50 stellt ein einheitliches flächendeckendes Kartenwerk im mittelmaßstäbigen Bereich dar und wurde in digitaler Aufarbeitung und inhaltlicher Vereinheitlichung von Altunterlagen erarbeitet. Das Ausgangsmaterial umfasst die in Tabelle 5 aufgeführten Quellen (Hartmann, 2014). Die Altunterlagen liegen flächendeckend in Maßstäben > 1:50 000 vor. Die Legende der VBK 50 beschreibt die Kartierungseinheiten anhand von Leitbodenformen. Die Legendenbildung folgt den Vorgaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung der Staatlichen geologischen Dienste der BRD (AG Boden, 2005). In Anlehnung an die hierarchische bzw. systematische Gliederung der Kartieranleitung entspricht die bodensystematische Einordnung dem Boden(sub)typ und die substratsystematische Einordnung der Substratklasse, wobei kein einheitliches Substratartenniveau vorliegt. Dieses wechselt zwischen dem Niveau der Gruppe und Hauptgruppe. Der Substrattyp enthält die Ausweisung der Genese, des Kalkgehaltes, des Skelettgehaltes sowie des Substrates. Eine Ausweisung des Ausgangsgesteins erfolgt nicht. Angaben zur Vergesellschaftung von Böden liegen nicht vor.

Der Substrattyp ist einheitlich mit bis zu maximal zwei Schichten für einen Ansprachebereich bis 15 dm aus den o.g. Substratmerkmalen aufgebaut, die Angaben sind KA 5-konform. Die Zerlegung des Substrattypes in die substratbestimmenden Merkmale erfolgt getrennt für die ausgewiesenen Schichten. Grundlage ist die Identifikation des Symbols für den Substratwechsel. Der prinzipielle Ablauf der Substratzerlegung erfolgt in den Arbeitsschritten:

1. Ableitung der Tiefe des Substratwechsels,
2. Aufgliederung in Einzelschichten,
3. Zerlegung der Substratart in die Merkmale Genese, Skelettgehalt, Kalkgehalt und Bodenartengruppe/-hauptgruppe sowie
4. Zuordnung der numerischen Werte.

Für die Zerlegung in die Substratmerkmale sowie die Zuordnung der numerischen Werte zu den Substratmerkmalen wurden Schlüssel erstellt. Tabelle 6 verdeutlicht den prinzipiellen Aufbau des Übersetzungsschlüssels⁴.

⁴<http://probosa.de/?q=node/15> (Anlage BA – KA5-Körnung)

Tabelle 5: Datengrundlagen der VBK 50 (Hartmann, 2014)

Quelle	Maßstab	Fläche [ha]	Polygone	Abschluss
Bodenkarten	1:50 000	209 300	6416	1996 - 1998
Objektkartierungen	1:25 000	557 308	8.324	1972 - 1996
MMK-Arbeitskarten	1:25 000	883 388	10 221	1980
Kippenkarten (KBK)	1:25 000	23 821	405	2001
Objektkartierungen	1:10 000	179 899	9172	1970 - 1975
Forstliche Standortskartierung	1:10 000	238 419	26 437	fortlaufend

Tabelle 6: Beispiel für die Transformation des VBK 50-Substrattyps *p-(v)eu/pfl-(v)et*. Schichtwechsel: / (zwischen 3 und 7 dm) | Substrattyp obere Schicht (Schicht 1): *p-(v)eu* | Substrattyp untere Schicht (Schicht 2): *pfl-(v)et*.

Merkmal	Schicht 1		Schicht 2	
	Wert	Wert numerisch	Wert	Wert numerisch
Genese	p	18	pfl	19
Kalk	e	37 M%	e	37 M%
Skelett	(v)	12 Vol%	(v)	12 Vol%
Substrat	u	Schluff [M %]: 75 Ton [M %]: 15	t	Schluff [M %]: 37 Ton [M %]: 37

Tabelle 7: Beispiel für die Transformation des FSK-Substrattyps $p\text{-(k)ls(Sp)}/p\text{fl-(k)l(Lg)}/g\text{-(k)el(Mg)}$. Schichtwechsel: / (zwischen 3 und 7 dm) | // (zwischen 7 und 12 dm)
 | Substrattyp obere Schicht (Schicht 1): $p\text{-(k)ls(Sp)}$ | Substrattyp mittlere Schicht (Schicht 2): $p\text{fl-(k)l(Lg)}$ | Substrattyp untere Schicht (Schicht 3): $g\text{-(k)el(Mg)}$.

Merkmal	Schicht 1		Schicht 2		Schicht 3	
	Wert	Wert numerisch	Wert	Wert numerisch	Wert	Wert numerisch
Genese	p	18	pfl	19	g	10
Kalk					e	37 M%
Skelett	(k)	12 Vol%	(k)	12 Vol%	(k)	12 Vol%
Substrat	ls	Schluff [M%]: 20 Ton [M%]: 8	l	Schluff [M%]: 32 Ton [M%]: 26	l	Schluff [M%]: 32 Ton [M%]: 26
Gestein	Sp		Lg		Mg	

2.2.3 Merkmalstransformation und Ableitung von Zielmerkmalen und –klassen aus den Unterlagen der Forstlichen Standortskartierung 1:10 000

Die Forstliche Standortskartierung 1:10 000 ist ein Kartenwerk, welches durch die Forstverwaltung bearbeitet wird. Grundlage der Kartierung ist ein forstspezifisches Regelwerk, in dem die Forstbodenformen aus einer Kombination von Bodentyp, Substrattyp und Nährstoffausstattung definiert sind (Schwanecke, 1993). Die Konturen der Kartierungseinheiten wurden digitalisiert und die Forstbodenformen in die Nomenklatur der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 transformiert (AG Boden, 2005). Somit liegen für die forstlich genutzten Flächen bodenkundliche Informationen als KA 5-Bodenform vor, die im Vergleich zur VBK 50 sich durch eine höhere Tiefenreichweite, feinere Gliederung sowie zusätzlichen Angaben zum Ausgangsgestein auszeichnen. Der Substrattyp der FSK 10 ist bis zu drei Schichten für einen Ansprachebereich bis 20 dm aufgebaut.

Die Zerlegung folgt der oben beschriebenen Vorgehensweise der VBK 50 (Kap. 2.2.2) und ist in Tabelle 7 beispielhaft dargestellt. Da jedoch häufig Merkmalskombinationen vorkommen, die mit der "Standardzerlegung" nicht eindeutig zuordenbar sind, ist für die Zerlegung der Substrattypen der FSK eine manuelle Kontrolle und gegebenenfalls Zuordnung dringend notwendig. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung sowie des hohen Detailgrades liegt ein sehr hohes Qualitätsniveau der bodenkundlichen Informationen vor (vgl. Tab. 1, S. 9).

2.2.4 Merkmalstransformation und Ableitung von Zielmerkmalen und –klassen aus den Unterlagen der Bodenschätzung (BS)

Zur Ableitung großmaßstäbiger Bodeninformationen ist der Rückgriff auf Unterlagen der Bodenschätzung, die als einzige Datenbasis für Deutschland flächendeckend nach einer einheitlichen Methodik und Nomenklatur vorliegt, zwingend notwendig. Die Bodenschätzung beruht auf einer naturwissenschaftlichen Klassifizierung nach bodenkundlichen Merkmalen und einer Bewertung anhand der Ertragsfähigkeit der Böden bei damaligen Bewirtschaftungsbedingungen.

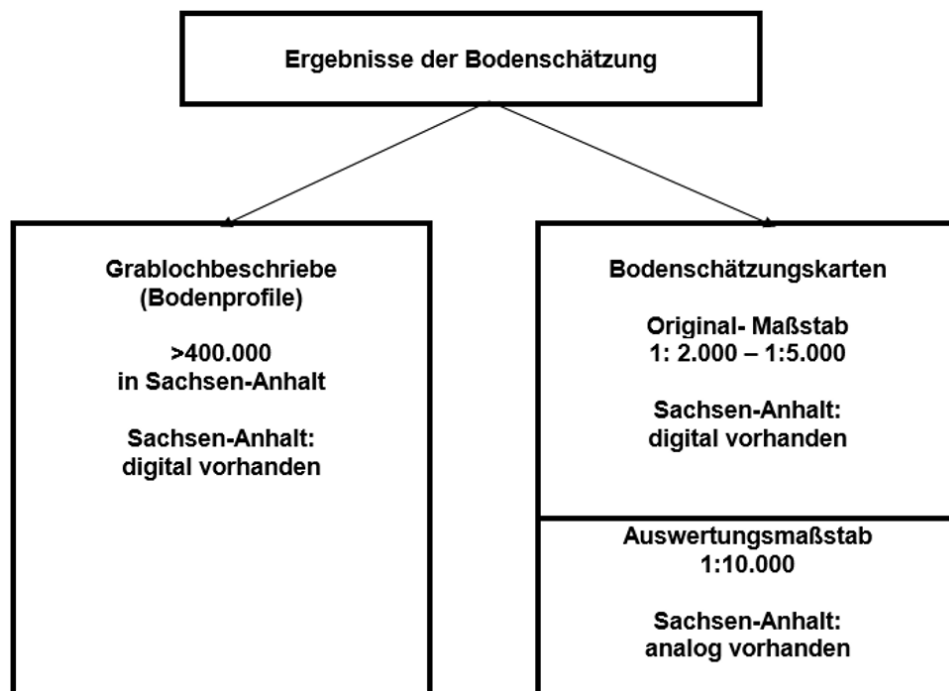


Abbildung 6: Schematische Darstellung der wesentlichen Datengrundlagen der Bodenschätzung.

tungsverhältnissen. Es handelt sich um ein vergleichendes Verfahren, bei dem die Ertragsunterschiede, die auf natürliche, bodenkundliche Bedingungen zurückzuführen sind, anhand der Reinertragsverhältnisse zu dem ertragsfähigsten Boden (Reichsmusterstück 100er Boden) ausgewiesen werden. Die gesetzliche Grundlage bildet das Bodenschätzungsgesetz (BodSchätzG) vom 16. Oktober 1934. Die Unterlagen der Bodenschätzung bestehen aus folgenden Elementen (Abb. 6):

Karten der (Reichs)Bodenschätzung (Flurkarten im Maßstab 1:2000 bis 1:5000) Die Bodenschätzungskarten sind Bestandteil der digitalen Liegenschaftskarte, die vom Landesamt für Landesvermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt vorgehalten wird.

Grablochbeschriebe der Reichsbodenschätzung Die Grablochbeschriebe liegen in digitaler Form vor. Die Daten wurden am Landesamt für Umweltschutz digitalisiert, anschließend in das digitale Feldschätzungsbuch FESCH übernommen und durch die amtlichen Bodenschätzer überprüft und korrigiert.

2.2.4.1 Transformationsansätze Die Bodenschätzungsunterlagen sind überwiegend mehr als 70 Jahre alt, und sie bilden, wie eine Reihe von Untersuchungen zeigen, die gegenwärtigen Bodenverhältnisse nur zum Teil zutreffend bzw. – auf Grund von überwiegend anthropogen bedingten Bodenveränderungen – sogar falsch ab (vgl. Schmidt et al., 2009; Möller & Volk, 2015). Außerdem stimmen die der Bodenschätzung zugrundeliegenden Nomenklaturen und Kriterien (z.B. Bodenartenansprache) mit den gegenwärtig gültigen nicht überein. Aufgrund

der damaligen und heute noch gültigen Anspracheregeln ist eine eindeutige Übersetzung der Angaben der Bodenschätzung in die Nomenklatur der KA 5 nicht möglich.

Die individuelle Auswertung und Transformation der Grablochbeschriebe (GLB) zur Ableitung von Bodendaten ist sehr aufwendig. Aufgrund der digitalen Verfügbarkeit der Daten in vielen Bundesländern besteht jedoch die Möglichkeit einer rechnergestützten Transformation der Informationen in die aktuelle bodenkundliche Nomenklatur und die Zuweisung der Daten an die auskartierten Einheiten (Klassenflächen). Durch die Arbeiten von Wallbaum (1991) sowie aus Niedersachsen (NIBIS; NLFb, 2003), Schleswig-Holstein (BOSSA⁵), Brandenburg (Kühn & Müller, 2009) und Sachsen-Anhalt (Altermann et al., 2003) stehen Transformationsschlüssel zur Übertragung zur Verfügung, die jedoch noch regional zu untersetzen sind. Die Transformationsschlüssel basieren jeweils auf der statistischen und/oder expertengestützten Auswertung von Bodenschichten der Grablochbeschriebe und deren Transformation in die Nomenklaturen der ehemaligen DDR sowie Bundesrepublik (TGL 24300, 1986; Ad-hoc Boden, 1982, 1994). Durch Wallbaum (1991) wurde für die ostdeutschen Bundesländer der umfangreichste Datenbestand analysiert. Die Ergebnisse dieser Arbeit flossen auch in die Untersuchungen von Kühn & Müller (2009) und Altermann et al. (2001, 2003) ein und wurden durch diese regionalspezifisch untersetzt bzw. erweitert. Die prinzipielle Aussage aller dieser Arbeiten ist, dass die Qualität der Bodenschätzung für bodenkundliche Auswertungen in Abhängigkeit vom bearbeitenden Bodenschätzer schwankt sowie die Übersetzung der Bodenschätzungsdaten auf der Basis der Grablochbeschriebe erfolgen muss. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Charakterisierung einer Klassenfläche als (homogenes) Pedotop allein auf Grundlage des bestimmenden Grabloches der Heterogenität der Bodendecke nicht gerecht würde. Eine regional-spezifische Anpassung von Übersetzungsschlüsseln zur Nutzung der Bodenschätzungsdaten ist deshalb unumgänglich, um letztlich die Wiedergabe der heutigen Bodenverhältnisse durch Auswertung und (Gelände-)Überprüfung der umgedeuteten Bodenschätzungsdaten mit einer anzustrebenden Treffsicherheit von mehr als 80 % zu erreichen.

Besonders die Transformation der Bodenarten gestaltet sich schwierig, da aus dem System nach Atterberg in das Schönhal'sche Körnungsartendreieck transformiert werden muss. Hierbei treten eine Reihe von Überlagerungen und Zugehörigkeiten in mehrere Bodenarten laut AG Boden (2005) auf, die für eine Reihe von Bodenarten keine eindeutige Zuordnung zulassen. Dieses Problem ist für die Ebene der Bodenartengruppe nicht so gravierend, kann aber im Einzelfall noch auftreten.

2.2.4.2 Bisherige Ansätze zur Auswertung der Bodenschätzung in Sachsen-Anhalt Altermann et al. (2003) untersuchten in vier Testgebieten in Sachsen-Anhalt die Qualität der Bodenschätzungsdaten und ihre Verwendbarkeit für großmaßstäbige Bodenkarten. In dieser Studie wurden zwei Vergleichsansätze genutzt:

1. Vergleich von nach NIBIS übersetzten Grablochbeschrieben mit individuellen (expertengestützten) Übersetzung sowie
2. Vergleich individuell übersetzter Grablochbeschriebe mit Neukartierungen.

Bei dem ersten Vergleich konnte eine sehr gute Übereinstimmung auf Lössstandorten festgestellt werden. Gut war die Übereinstimmung auf den Sand- und Moränenstandorten im

⁵<http://www.dilamo.de/bossa/bossaman.html>

Tiefland. Probleme mit der Übersetzung nach NIBIS gab es insbesondere beim Skelettgehalt im Testgebiet Harz und mit verschiedenen Bodenmerkmalen im Lösshügelland, die sich derart aufsummierten, dass die Übereinstimmung zwischen NIBIS-Übersetzung und individueller Übersetzung insgesamt ebenfalls als nicht zufriedenstellend angesehen werden musste. Die fehlende Übereinstimmung hat folgende Ursachen:

- fehlerhafte Ableitung/Umdeutung der Skelettgehalte sowie falsche Differenzierung zwischen Bodenskelett und anstehendem Gestein bei der rechnergestützten Umdeutung,
- verwittertes anstehendes Gestein und Festgestein sind bei der Bodenschätzung nicht differenziert,
- Ausweisung der Substrattypen Löss, Sandlöss, Lösssand erfolgt bei der NIBIS-Umdeutung nicht sowie
- zum Teil abweichende Zuordnung von Bodenartengruppen.

Der zweite Vergleich basiert auf der Analyse der individuell übersetzten Grablöcher mit den Eintragungen in den Umrissen neukartierter Bodenkarten ohne Basis Bodenschätzung hinsichtlich der Bodenform. Die Übereinstimmungen zwischen Grablöchern und Neukartierungen hinsichtlich der Bodenform (d.h. sowohl Substrattyp als auch Bodentyp mussten mit gewissen Toleranzen übereinstimmen) lagen im Zentralbereich der Kartiereinheiten bei 45 % (Sand- und Moränenstandorte), 48 % (Lösshügelland), 63 % (Harz) und 89 % (Lössstandorte). Deutlich besser waren die Übereinstimmungen, wenn allein die Substratzusammensetzung verglichen wurde. Die Übereinstimmungsrate beim Substrat lag bei über 80 %, meist sogar bei über 90 %.

Wallbaum (1991) wertete Analyseergebnisse zu 4000 Bodenschichten von Grablochbeschrieben auf dem Gebiet der neuen Bundesländer statistisch aus und konnte darauf basierend für einige wichtige Bodenparameter Übersetzungsschlüssel für den Transfer in TGL 24300- und KA 3-Nomenklatur erstellen (TGL 24300, 1986; Ad-hoc Boden, 1982). Zu den Thesen dieser Arbeit gehörte, dass die Qualität der Bodenschätzungsunterlagen unterschiedlich ist und die Interpretation der Bodenschätzung gemarkungs- bzw. bodenschätzerspezifisch erfolgen sollte. Wallbaum stellt heraus, dass bei der pedologischen Charakterisierung der Klassenflächen der regionale Kontext einbezogen werden muss. Eine Charakterisierung einer Klassenfläche als (homogenes) Pedotop allein auf Grundlage des bestimmenden Grabloches würde der Heterogenität der Bodendecke nicht gerecht. Aussagen zu Bodenarten bzw. Substrattypen waren besser ableitbar als Aussagen zu Horizontbezeichnungen, Bodentypen und Bodentypenspektren von Flächeneinheiten.

Dehner (2005) wertete 380 000 Grablochbeschriebe aus Sachsen-Anhalt aus, deren Bodenmerkmale im Vorfeld mittels des NIBIS-Übersetzungsschlüssels (NLfB, 2003) in den Sprachgebrauch der KA 4 übersetzt wurden (Ad-hoc Boden, 1994). Auf Grund des großen Datenumfangs wurden die häufigsten Merkmalskombinationen ausgewählter bodenkundlicher Parameter für jedes Klassenzeichen ermittelt. Die auf diese Weise generierten Standardprofile wurden manuell geprüft und ggf. korrigiert. Ergebnis waren Standardprofile in der Nomenklatur der KA 4. Die Stärke des Datensatzes liegt nach Einschätzung Dehners nicht in einer bodensystematisch exakten Ableitung der Horizontfolgen, sondern in den hoch auflösenden Texturdaten.

Abiy (2008) prüfte verschiedene Möglichkeiten der reliefbezogenen Validierung von Grablochbeschrieben in Sachsen-Anhalt. Eine Erkenntnis des Projektes war, dass eine Überprüfung des aktuellen Zustandes der Grablöcher nur nach einer vorhergehenden sorgfältigen

Auswahl geeigneter Grablochbeschriebe und einer nachfolgenden Neuaufnahme am Grabloch durchgeführt werden kann. Bei Vergleichen von Grablöchern mit später aufgenommenen Vergleichsprofilen aus der Bodenprofildatenbank des LAGB war aus unterschiedlichen Gründen die Vergleichbarkeit oftmals nicht gegeben. Selbst bei maximal 20 m entfernten Bodenprofilen ($n = 134$) waren oft entweder die Bodenart und/oder die Reliefparameter für einen Vergleich zu unterschiedlich.

Schmidt et al. (2009) haben in Testgebieten im Süden Sachsen-Anhalts mit Hilfe linear angeordneter Bohrstockkartierungen die aktuelle Bodensituation mit Grablöchern der Bodenschätzung verglichen und stellten deutliche Veränderungen der Profile durch Bodenerosion fest. Sie vermuten, dass dabei nicht nur Wasser, sondern auch Pflugerosion eine Rolle spielt (s.a. Möller & Volk, 2015). Die Autoren stellen fest, "dass zwischen gemessenen und modellierten Bodenabträgen nur geringe Beziehungen bestehen." (Schmidt et al., 2009, S. 31). "Aus den Ergebnissen der Geländeaufnahmen lässt sich ableiten, dass größere Abweichungen zwischen den Angaben der Bodenschätzung (Grablochbeschriebe) und den gegenwärtigen Bodenverhältnissen insbesondere in Geländeabschnitten auftreten, die ein mittleres bis hohes Abtragpotential besitzen. Für die Einschätzung von Erosions- und Akkumulationsvorgängen sind entsprechende Korrekturen dieser Angaben notwendig, während für Geländeabschnitte mit geringem Abtragpotential die Angaben in den Grablochbeschrieben übernommen werden können."

2.2.4.3 Datengrundlagen Für die Testgebiete wurde durch die Oberfinanzdirektion folgende Daten übergeben:

- die korrigierten Datensätze der Original-Grablochbeschriebe,
- die korrigierten Datensätze der Original-Grablochbeschriebe einschließlich Nachschätzungen sowie
- Karten der Klassenflächenzeichen einschließlich Nachschätzungen (hier waren jedoch noch nicht alle Ergebnisse übernommen, so dass es zu Differenzen zwischen den Grablochbeschrieben und der Karte kam).

Zusätzlich lag am LAGB die Karte der Klassenflächen aus dem ALK-Bestand vor (Folie 42), die wie oben erwähnt, den Originalbestand repräsentiert. Nach Prüfung der Datenbestände hinsichtlich Daten- und Lagekonsistenz (Übereinstimmung der Lage des Grablochs mit der entsprechenden Klassenfläche) wurden für die Auswertungen 1. die korrigierten Datensätze der Original-Grablochbeschriebe, 2. Karte der Klassenflächen, vorliegend am LAGB, aus dem ALK-Bestand (Folie 42) verwendet.

Die Datenbank der Grablochbeschriebe beinhaltet die Titeldaten mit der Angabe der Lagekoordinaten sowie die Schichtbeschriebe. Der Inhalt der Tabelle *Schichtbeschreibung* ist in Tabelle 8 dokumentiert.

Für die Merkmale *Kalk* und *Skelett* stimmen die Gehaltsangaben aus den Grablochbeschrieben mit den Gehaltsstufen der KA 5 überein. Die Bodenarten müssen, wie vorab beschrieben, transformiert und standortspezifisch angepasst werden. Hierzu wurde während der ProBoSA-Projektlaufzeit durch Auswertung von Muster- und Vergleichsstücken aus dem Testgebiet auf der Grundlage des Expertenwissens und aktueller Vergleichsdaten ein regional

Tabelle 8: Aufbau und Inhalt der Schichtbeschriebtabelle.

Feldbezeichnung	Erläuterung
LKZ	Länderkennzahl
GMKNR	Gemarkungsnummer
ORDNUNGSMERKMAL	
FLURNR	
FLUR	
GLNR	
SCHICHTNR	Schichtnr
HU	Humusstufe
KA	Kalkstufe
FAR	Farbe
EIS	Eisen
FEU	Feuchte
SON	Sonstiges
SCHICHTBA	Bodenart (alt) nicht verwenden
DMV	Mächtigkeit Schicht [dm] von
DMB	Mächtigkeit Schicht [dm] bis
HO	Horizont
nbz	Nummerierungsbezirk
neuglnr	Grablochnummer neu (verwenden)
Hash	
GEMARKUNG	
SCHICHTBA_Neu	Bodenart (neu) verwenden
Bemerkungen	
GMKNR_Fesch	Gemarkungsnummer im Fesch
IDENT_NR	ID-Nummer zur Verknüpfung
Geltig	wenn 0 nicht mehr vorhanden ⇒ gelöscht
ID	

angepasster Transformationsschlüssel erarbeitet, der für jede geologische Entstehung differenziert eine Transformation ermöglicht⁶. Die Transformation folgte dem Prinzip

1 Hauptbodenart (BS) + 1 Nebenbodenart (BS) + (1 Ergänzung) ⇒ Bodenart (Pro-BoSA)

Da in den Grablochbeschrieben der Bodenschätzung häufig mehrere Nebenbodenarten und Ergänzungen angegeben wurden, sind diese manuell auf die dominierende Nebenbodenart eingekürzt worden.

Während für die Ausweisung der Zielmerkmale aus VBK 50, MMK und FSK der Substratyp zerlegt werden musste, d.h. eine rückwärts gerichtete Auflösung stattfand, erfolgte für die Bodenschätzung eine schichtbezogene Einzeltransformation der jeweiligen Merkmale nach folgenden Arbeitsschritten:

1. Auslesen der Schichtnummer aus dem Feld *Schichtnr*,

⁶<http://probosa.de/?q=node/15> (Anlage BA – BS zu KA5)

2. Auflösung des Feldes *SchichtBA_Neu* in die Angaben Bodenart Bodenschätzung und Grobbodenart bzw. -gehalt. Hierzu wurde durch den Projektpartner UMGEODAT ein Algorithmus zur schichtbezogenen Zerlegung thematischer Bodendaten programmiert (Kap. 2.3).
3. Kürzung der Beschriebe für die Bodenart auf die wesentlichen Angaben.
4. Ausweisung des Humusgehaltes aus Feld *HU* (Gehaltsangaben entsprechen denen der KA 5).
5. Ausweisung des Kalkgehaltes aus dem Feld *KA* (Gehaltsangaben entsprechen der KA 5).
6. Ausweisung Skelettgehalt aus Auflösung I (Gehaltsangaben entsprechen der KA 5).
7. Berechnung der Schichtmächtigkeit aus den Feldern *DMV* und *DMB*.
8. Transformation der Bodenart aus der Bodenschätzung in Bodenarten/Bodenartengruppen der KA 5 unter Nutzung der Transformationschlüssel (Tab. 9).

Tabelle 9: Beispiel für die Transformation der BS-Merkmale *Entstehung = Lö*, *Schichtnr = 1*, *SchichtBA_Ne = L*, *s3*, *st2*, *HU = h2*, *KA = ka3*, *DMV = 0* und *DMB = 3*.

Merkmal	Wert	Wert numerisch
Schicht	1	1
Kalk	ka3e	6 M%
Skelett	st2	6 Vol%
Substrat	tu	Schluff [M%]: 67 Ton [M%]: 23

2.2.5 Die Geologische Karte 1:25 000 und ihre Aufbereitung für die digitale Anwendung

Die Geologische Karte 1:25 000 ist eine wesentliche Grundlage für die Erarbeitung jeder Bodenkarte. Aus ihr sind die Gesteine, die Lithologie, und die Bildungsbereiche der Böden (Kainz & Fleischer, 2006) direkt ableitbar. Die Bodenbildungsbereiche (Tab. 10), die sich in den Bodenkarten wiederfinden, sind mit Schichtmodellen (Tab. 11) und gesetzmäßigen Variationen derselben innerhalb der Bildungsbereiche verknüpft (Kainz & Fleischer, 2006). Hiervon abhängig sind sowohl Bodentypen- und Substratzuweisungen als auch die Interpretation und Ableitung der Bodenwasserverhältnisse.

Während der Arbeiten stellte es sich heraus, dass es unumgänglich war, die digitalisierten Daten zu überprüfen und zu korrigieren. Das betraf sowohl die Grenzen, als auch die Einschreibungen. Hierzu mussten Sammelpolygone aufgelöst, Löcher im Shape beseitigt, Grenzen ergänzt und Einschreibungen korrigiert werden. Für das Testgebiet Bode, das 12

Tabelle 10: Die wichtigsten holozänen Fazies- bzw. Boden-Bildungsbereiche. Die Ordnungsnummer bildet die erste Ziffer der entsprechenden geologischen Schlüsselnummer in Tabelle 11.

Ordnungsnr.	Holozäne Fazies/Bodenbildungsbereich
1	diskordante holozäne Überlagerungen aller Bildungsbereiche, anthropogene Ablagerungen
2	Auen
3	Niederungen und vergesellschaftete Moore
4	Hochflächen, einschließlich morphologischer Niederterrassen

Tabelle 11: Geologische Schlüsselnummer mit den dazugehörigen thematischen Ebenen und ihre Lage im Schichtmodell der Bodenbildungsbereiche.

Geologischer Wert	Thematische Ebenen/Lagen im Schichtmodell
110	Anthropogene Substrate
120	Holozäne Dünen und Flugsande, Äolien
130	Holozäne Kolluvien und Abschlamm Massen
140	Holozäne Hangsedimente der Steilhanglagen
150	Holozäne Talfüllungen
210	Auen: Altwasser- und Rinnenbereiche
220	Auen: Decken
230	Auen: Untergrund
310	Niederungen: organische Decken
320	Niederungen: mineralische Decken
330	Niederungen: Untergrund
410	Hochflächen: Oberlage
420	Hochflächen: Haupt- und Mittellagen
430	Hochflächen: Basislage
450	Hochflächen: anstehendes quartäres Lockergestein
460	Hochflächen: anstehendes präquartäres Lockergestein
470	Hochflächen: anstehendes Festgestein
480	Hochflächen: Hoch- und Hangmoore
999	ohne

GK 25-Blätter mittleren Schwierigkeitsgrades entspricht, betrug der Aufwand hierfür einen Mann-Monat. Nach der Zuweisung der geologischen Schlüsselnummern wurden die größten Randverwerfungen nach den Erläuterungen und unter Berücksichtigung des Bearbeitungsjahres und Bearbeiters beseitigt.

Die **Lithologie** wurde aus der Beschreibung der Kartiereinheiten unter Verwendung der Blattlegenden und der Erläuterungen abgeleitet. Räumliche Zusammenfassungen unterschiedlicher lithofazieller Bereiche in den geologischen Einheiten konnten dadurch aufgelöst werden. Die Lithologie wurde in Substrate der KA 5-Nomenklatur umgesetzt, entweder direkt aus der Karte und den Erläuterungen ableitbar, oder nach Geländeerfahrungen (Schurfergebnissen) aus der Bodenregion und mittleren Ausbildungen (z.B. $dm = g-(k)el(Mg)$). In einigen Fällen größerer Variabilität bzw. Komplexität der Kartiereinheiten wurde die mögliche Schwankungsbreite durch mehrere Substratangaben beschrieben, wobei die dominierende Angabe zu erst steht. Ebenso wurden geologische Schichtprofile in Substratschreibweise überführt.

Die **Bildungsbereiche** wurden aus den Blattlegenden und den Beschreibungen der GK 25-Blätter abgeleitet. Dabei wurden die Substrate den Schichtmodellen der Hauptbildungsbereiche entsprechend Tabelle 11 zugeordnet und ihr geologischer Schlüssel in einer eigenen Spalte des digitalen Datenmodells der GK 25 abgelegt. In der geologischen Karte gegebene und aus der Übersetzung abgeleitete Substrate mehrerer übereinander liegender Schichten wurden mit Schichtnummern sowohl in einer Spalte als auch in den thematischen Ebenen entsprechenden Spalten abgelegt. Soweit ableitbar wurde die Lage der Untergrenze entsprechend AG Boden (2005) dem Substrat angefügt.

Für die Erstellung der Auswertungstabelle wurden folgende Arbeitsschritte vollzogen (als Beispiel siehe Tab. 12):

1. Grundaufbau der Auswertungstabelle, (Splittung auf einzelne Polygone, Trennung der Legendeneinheiten mit mehreren Schichten, Markierung der untersten Schicht, Anlegen von Datenfeldern für Inhalt und Art der untersten Schicht und den Inhalt der Lagen bei mehrschichtigem Aufbau),
2. Analyse der Legende und der Erläuterungen, (Analyse der Legende, Erläuterung und Polygonlage, bedarfsweise Korrektur der Daten),
3. Transformation der Inhalte in Substratsymbole sowie
4. Gegenprüfung mit vorhandenen Profildaten.

Aufgrund des Alters und des Maßstabs der Geologischen Karten werden nicht alle Bodenbildungsbereiche aufgelöst. Dieser Mangel ist aber durch Überlagerung mit großmaßstäbigeren Karten zu vermindern.

2.2.6 Bodentyp

Entgegen der Vorgehensweise bei der Ableitung der Zielmerkmale für die Substrateigenschaften wird der Bodentyp als Merkmal direkt aus bodenkundlichen Informationsgrundlagen abgeleitet. Während für Forstflächen FSK-Unterlagenherangezogen wurden, sind land-

Tabelle 12: Beispielhafter Auszug aus der Auswertungstabelle der GK25.

Legen- denr.	Schicht- nr.	Letzte Schicht	Strati- graphie	Gestein GK25	nach	Anstehendes Gestein	Geol. Schlüs- sel- num- mer	Lage	Basislage	Decklage
546	1	99	teo	untergeordnet Quarz-, unter- geordnet Sand, Schluff [Silt], Ton		s-s(Sq-t); s-(t,u)(T-t)	460	Hochflächen: anstehendes präquartäres Lockergestein	p-s(Sq-t); pfl- t(T-t)	
1787	1		LD	Grobschluff		p-eu(Lo)//	420	Hochflächen: Haupt- und Mittellagen		p-eu(Lo)//
1787	2	99	tolu	Konkretion Kalk- stein, Schluff [Silt], Ton		s-et(Mt-t)	460	Hochflächen: anstehendes präquartäres Lockergestein	pfl-et(Mt-t)	
2950	1		LD	Grobschluff		p-eu(Lo)//	420	Hochflächen: Haupt- und Mittellagen		p-eu(Lo)//
2950	2	99	teom	Sand		s-es(S,glau-t)	460	Hochflächen: anstehendes präquartäres Lockergestein	pfl-els(S,glau- t)	
3237	1	99	kro 3g	Tuff		n~s-kro	470	Hochflächen: an- stehendes Festge- stein	p-(v)s(~s-kro); p-sv(~s-kro)	
3482	1	99	kro 3g1	untergeordnet Kies [gerundet], Sand		s-es(S,glau- kro)	460	Hochflächen: anstehendes präquartäres Lockergestein	p-els(S,glau- kro)	

wirtschaftliche genutzte Flächen auf der Grundlage der BS-Grablochbeschriebe und der bodenkundlichen Auswertung der GK 25 transformiert worden. Der Bodentyp wurde für die jeweilige Kartierungseinheit bestimmt und als ein Flächenlayer zur Weiterverarbeitung als Eingangsdatum für die Ausweisung der Bodenform basierend auf folgender Vorgehensweise bereitgestellt:

- Für die Forstflächen wurde der Bodentyp aus der Angabe der Bodenform in der Kartierungseinheit der Forstlichen Standortskartierung ausgelesen und ein zu eins weitergeführt.
- Für die landwirtschaftlichen Nutzflächen wurde vom Projektbeteiligten Wolfgang Kainz ein Bestimmungsschlüssel zur Ableitung des Bodentyps aus Merkmalen der Bodenschätzung und der bodenkundlichen Auswertung der GK 25 erarbeitet. Den Angaben zu Bodenartwechsel, Farbe, Humusmächtigkeit, Kalkgehalt, Reliefposition¹, Titeldaten der Schätzung und Geologie wurden entsprechend der jeweiligen Ausprägung des Merkmals spezifische Schlüsselnummern zugeordnet⁷. Aus der Kombination der Schlüssel ergibt sich der Bodentyp. Die Notwendigkeit einer manuellen Zuweisung besteht im Testgebiet Bode nur bei < 10 % der Grablöcher. Für diese Fälle wurde der Schlüssel nochmals spezifiziert bzw. manuell angepasst.

Abschließend wurde aus den Bodentypen für die forstlichen Flächen und den abgeleiteten Bodentypen für die landwirtschaftlichen Nutzflächen ein zusammenhängender Flächenlayer erstellt und übergeben. Das LAGB plant, 2018 einen gesonderten Bericht über die Methodik der Ableitung der Zielmerkmale "Substrateigenschaften" und "Bodentyp" aus den Bodenschätzungsdaten vorzulegen.

2.3 Bezugseinheiten und Attributzuweisung

Innerhalb des ProBoSA-Systems werden den Bezugseinheiten numerische Zielmerkmale zugeordnet. Bezugseinheiten repräsentieren Polygone, die sich beispielsweise aus der Verschneidung von verschiedenen Bodeneingangsdaten (Abb. 7a) oder aus der Segmentierung von Reliefattributen ergeben (Abb. 7b). Bei der (regionenbasierten) Segmentierung werden Rasterzellen zusammengefasst, wenn sie sowohl räumliche Nachbarn im Rasterdatensatz als auch Nachbarn innerhalb des n-dimensionalen Merkmalsraum der Reliefattribute sind. Die räumliche Ausprägung der resultierenden Reliefobjekte ist abhängig von deren Homogenitätsgrad, der nutzerspezifisch angepasst werden kann (Möller et al., 2008, 2012; Möller & Volk, 2015). Die Größe der Reliefobjekte wird durch den Heterogenitätsgrad der Reliefs bzw. der korrespondierenden Reliefparameter bestimmt.

Die Zuordnung der Zielmerkmale auf die Bezugseinheiten geschieht unter Zuhilfenahme räumlicher Abfragen auf Datenbankebene (PostgreSQL mit PostGIS). Bei der eigentlichen Attributzuweisung werden zwei Fälle unterschieden:

1. Das Verschneidungsergebnis aus Bezugseinheit und Polygon des Eingangsdatensatzes ergibt eine Ein-zu-eins-Relation. Dann kann das Zielmerkmal eindeutig zugewiesen werden.

⁷<http://probosa.de/?q=node/15> (Anlage BT)

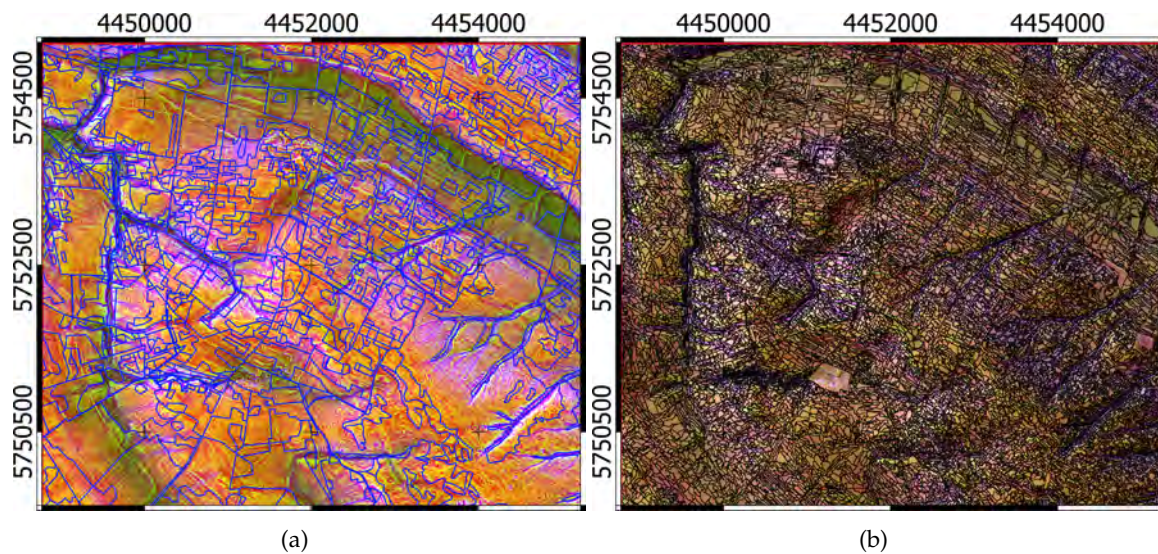


Abbildung 7: Beispiele für Bezugseinheiten visualisiert anhand des Bildausschnittes im Testgebietes (vgl. Abb. 3b): Ergebnis der Verschneidung von Geologischer Karte 1:25 000 (GK 25) und Bodenschätzung (BS) und Forstlicher Standortkartierung (a) sowie Segmentierungsergebnis der Reliefattribute *Höhe über Tiefenlinie*, *Massenbilanzindex* und *Neigung* unter Berücksichtigung des Verschneidungsergebnisses von GK 25 und BS (b)

2. Wenn das Verschneidungsergebnis keine eindeutige Zuweisung erlaubt, wird eine Wichtungsfunktion angewendet, die den Flächenanteil der zerlegten Schichtinformationen innerhalb der Segmente berücksichtigt und die Zielmerkmale des dominierenden Polygons zuordnet.

Als Ergebnis können zwei Merkmalsausprägungen auftreten:

1. Die Zielmerkmale können qualitative Information darüber enthalten, ob ein spezifisches Zielmerkmal in einer Bezugseinheit auftritt oder nicht. Die beiden Optionen werden durch 1 und 0 kodiert. Tabelle 13 zeigt für den Kontrollpunkt 207042 (vgl. Abb. 3b) die bereits gewichteten Transformationsergebnisse der Genesemerkmale (*_gen_*-Spalten) *g*, *p* und *pfl*. In den Beispieldatensätzen enthalten die Datensätze der VBK 50 (v), FSK (f) und der GK 25 (g) Informationen der Zielmerkmale. Da das Polygon keinen landwirtschaftlich genutzten Standort repräsentiert, fehlen Angaben der Bodenschätzung (bs). Weiterhin geht aus der Tabelle hervor, dass die FSK und VBK 50 für die Beispielobjekte nur Geneseangaben bis in eine Tiefe von 12 dm vorhalten. Ab 13 dm basiert die Geneseklassifikation ausschließlich auf Merkmalen der GK 25.
2. Quantitative Zielmerkmale repräsentieren konkrete Werte, die erst durch eine Klassifikation kategorisiert werden (Kap. 2.4). Das betrifft im Rahmen des Projektes die Körnungszielmerkmale *Ton* (t) und *Schluff* (u). Die Struktur der Datei des quantitativen

Tabelle 13: Gewichtete Geneseklassen (*_gen_*), Klassifikationen mit den höchsten Wichtungen (CL_*), Anzahl von widersprüchlichen Klassifikationen (N_*), die korrespondierenden Qualitätsmaße (MS1, MS2, N, STB), die Klassifikationsquelle (SRC) sowie die finale Klassifikation (CLASS) für alle Schichten des Kontrollpunktes 207042 (Abb. 8c u. 10; v – Vorläufige Bodenkarte 1:50 000 | g – Geologische Karte 1:25 000 | f – Forstliche Standortskartierung | b – Bodenschätzung, | m – Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standortskartierung).

Schicht	v-gen-g	v-gen-p	v-gen-phl	f-gen-g	f-gen-p	f-gen-phl	gk-gen-g	gk-gen-os	gk-gen-p	gk-gen-phl	CL-g	N-g	CL-p	N-p	CL-phl	N-phl	CLASS	CLASS_MSI	CLASS_SUM	CLASS_N	CLASS_STB	SOURCE
1	1	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	3	0	0	p	1	1	1	1	bs,f
2	2	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	3	0	0	p	1	1	1	1	bs,f
3	3	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	3	0	0	p	1	1	1	1	bs,f
4	4	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	3	0	0	p	1	1	1	1	bs,f
5	5	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	3	0	0	p	1	1	1	1	bs,f
6	6	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	3	0	0	p	1	1	1	1	bs,f
7	7	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	3	0	0	p	1	1	1	1	bs,f
8	8	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	3	0	0	p	1	1	1	1	bs,f
9	9	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	3	0	0	p	1	1	1	1	bs,f
10	10	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	3	0	0	p	1	1	1	1	bs,f
11	11	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	2	0,8	1	p	1	1,8	2	0,2	bs,f
12	12	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0,8	0	0	1	2	0,8	1	p	1	1,8	2	0,2	bs,f
13	13	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	0,8	0	0	0	0	0,8	1	pfl	0,8	0,8	1	0,8	gk
14	14	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	0,8	0	0	0	0	0,8	1	pfl	0,8	0,8	1	0,8	gk
15	15	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	0,8	0	0	0	0	0,8	1	pfl	0,8	0,8	1	0,8	gk
16	16	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	0,8	0	0	0	0	0,8	1	pfl	0,8	0,8	1	0,8	gk
17	17	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	0,8	0	0	0	0	0,8	1	pfl	0,8	0,8	1	0,8	gk
18	18	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	0,8	0	0	0	0	0,8	1	pfl	0,8	0,8	1	0,8	gk
19	19	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	0,8	0	0	0	0	0,8	1	pfl	0,8	0,8	1	0,8	gk
20	20	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,8	0	0	0,8	1	0	0	0	0	g	0,8	0,8	1	0,8	gk

Tabelle 14: Zielmerkmale *Ton* und *Schluff*, Klassifikationen der Bodenartengruppe mit den höchsten Wichtungen (CL_*), Anzahl von widersprüchlichen Klassifikationen (N_*), die korrespondierenden Qualitätsmaße (MS1, MS2, N, STB), die Klassifikationsquelle sowie die finale Klassifikation (CLASS) für alle Schichten des Kontrollpunktes 207042 (Abb. 8 u. 9; koe – Körnung | t – Ton | u – Schluff | v – VBK 50 | g – GK 25 | f – FSK | b – BS | m – MMK).

Schicht	bs_koe_u	bs_koe_t	m_koe_u	m_koe_t	v_koe_u	v_koe_t	f_koe_u	f_koe_t	gk_koe_u	gk_koe_t	CL_sl	N_sl	CL_ll	N_ll	CL_lu	N_lu	CL_fl	N_fl	CLASS	CLASS_MS1	CLASS_MS2	CLASS_SUM	CLASS_N	CLASS_STB	SOURCE
1	NA	NA	25	14	75	15	75	15	75	15	0,2	1	0	0	1	2	0	0	lu	1	0,2	1,2	2	0,8	bs,f
2	NA	NA	25	14	75	15	75	15	75	15	0,2	1	0	0	1	2	0	0	lu	1	0,2	1,2	2	0,8	bs,f
3	NA	NA	25	14	75	15	75	15	75	15	0,2	1	0	0	1	2	0	0	lu	1	0,2	1,2	2	0,8	bs,f
4	NA	NA	25	14	75	15	75	15	75	15	0,2	1	0	0	1	2	0	0	lu	1	0,2	1,2	2	0,8	bs,f
5	NA	NA	25	14	75	15	75	15	75	15	0,2	1	0	0	1	2	0	0	lu	1	0,2	1,2	2	0,8	bs,f
6	NA	NA	25	24	75	15	NA	NA	75	15	0	0	0,2	1	0,5	1	0	0	lu	0,5	0,2	0,7	2	0,3	v
7	NA	NA	25	24	75	15	NA	NA	75	15	0	0	0,2	1	0,5	1	0	0	lu	0,5	0,2	0,7	2	0,3	v
8	NA	NA	25	24	75	15	NA	NA	75	15	0	0	0,2	1	0,5	1	0	0	lu	0,5	0,2	0,7	2	0,3	v
9	NA	NA	25	24	75	15	NA	NA	75	15	0	0	0,2	1	0,5	1	0	0	lu	0,5	0,2	0,7	2	0,3	v
10	NA	NA	25	24	75	15	NA	NA	75	15	0	0	0,2	1	0,5	1	0	0	lu	0,5	0,2	0,7	2	0,3	v
11	NA	NA	25	14	75	15	NA	NA	25	27	0,2	1	0	0	0,5	1	0,8	1	tl	0,8	0,5	1,5	3	0,3	gk
12	NA	NA	25	14	75	15	NA	NA	25	27	0,2	1	0	0	0,5	1	0,8	1	tl	0,8	0,5	1,5	3	0,3	gk
13	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	25	27	0	0	0	0	0	0	0,8	1	tl	0,8	0	0,8	1	0,8	gk
14	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	25	27	0	0	0	0	0	0	0,8	1	tl	0,8	0	0,8	1	0,8	gk
15	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	25	27	0	0	0	0	0	0	0,8	1	tl	0,8	0	0,8	1	0,8	gk
16	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	25	27	0	0	0	0	0	0	0,8	1	tl	0,8	0	0,8	1	0,8	gk
17	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	25	27	0	0	0	0	0	0	0,8	1	tl	0,8	0	0,8	1	0,8	gk
18	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	25	27	0	0	0	0	0	0	0,8	1	tl	0,8	0	0,8	1	0,8	gk
19	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	25	27	0	0	0	0	0	0	0,8	1	tl	0,8	0	0,8	1	0,8	gk
20	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	25	27	0	0	0	0	0	0	0,8	1	tl	0,8	0	0,8	1	0,8	gk

Transformationsergebnisses wird in Tabelle 14 veranschaulicht. Dort sind für den Kontrollpunkt 207042 (Abb. 3b) die schichtspezifische Körnungswerte (*_koe.*-Spalten) in Abhängigkeit von den Datenquellen aufgelistet. Danach können aus der FSK (f), VBK 50 (v), MMK (m) und GK 25 (gk) Informationen zur Körnung abgeleitet werden. Die Tabelle macht auch deutlich, dass sich Werte widersprechen können oder sich der vertikale Informationsgehalt in Abhängigkeit von den Datenquellen unterscheidet. Das betrifft beispielsweise die abgeleiteten Schluff- und Tongehalte der Informationsquelle *m*, die deutlich von denen der Informationsquellen *v*, *f* und *gk* abweichen. Weiterhin ist festzustellen, dass Informationen der FSK, MMK bzw. VBK 50 bis 12 dm und der GK 25 bis 20 dm reichen.

2.4 Klassifikation der Bodenartengruppen und Bodengenese

Die schichtspezifische *Klassifikation der quantitativen Zielmerkmale* (hier: Bodenartengruppe) gliedert sich in drei Schritte. Bei der *Klassifikation der qualitativen Zielmerkmale* (hier: Bodengenese) kommen nur die Schritte zwei und drei zur Anwendung. Die aus der Klassifikation der Bodengenese und Bodenartengruppen resultierenden schichtspezifischen Datensätze sind für den Kontrollpunkt 207042 (Abb. 3b) in den Tabellen 13 und 14 dokumentiert:

1. Bei der Gruppierung werden die Körnungsarten *Ton* und *Schluff* entsprechend der Klassifikationsvorschrift in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Boden, 2005, S. 144 ff) zusammengefasst, wobei zwischen den semantischen Aggregationsniveaus *Bodenart*, *Bodenartengruppe* und *Bodenartenhauptgruppe* gewählt werden kann. Der innerhalb des ProBoSA-Portals editierbare Programmcode ist mit der statistischen Skriptsprache *R* umgesetzt worden (R Core Team, 2015). Der Programmcode 2.1 veranschaulicht die Klassifikationsvorschrift für die Bodenartengruppe *lu*, die für die Klassifikation der Bodenschätzungsinformationen (b) anwendbar ist. Danach wird der Spalte *BAG_lu.b* in der Attributtabelle des Schichtdatensatzes *s@data* der Wichtungsfaktor *w.b* zugeordnet, wenn die Klassifikationsbedingungen erfüllt sind. Treffen die Bedingungen nicht zu, wird der Wert 0 zugewiesen. Der Wichtungsfaktor ist eine Variable mit dem Wertebereich $w \in [0, 1]$, die vom Nutzer definiert wird und die expertenbasierte Datenqualität repräsentiert. Die höchste Datenqualität wird durch den Wert 1, die niedrigste durch den Wert 0 ausgedrückt. Entsprechend Tabelle 1 werden der Bodenschätzung ($w.b = 1$) und der Forstlichen Standortkartierung ($w.f = 1$) die höchsten Datenqualitäten zugewiesen. Es folgen die Informationen der Geologischen Karte 1:25 000 ($w.g = 0,8$), der Vorläufigen Bodenkarte 1:50 000 ($w.v = 0,5$) und der Mittelmaßstäbigen Standortkartierung ($w.m = 0,2$).

Bei der Klassifikation kann definiert werden, welche Informationsquellen pro Schicht verwendet werden. So wird der Bodenartengruppen- bzw. Bodenartenhauptgruppen-Klassifikation der Schichten 1 bis 10 nur die Informationen der Bodenschätzung, MMK, FSK und VBK 50 berücksichtigt. Ab Schicht 11 fanden auch die Informationen der GK 25 Eingang in die Klassifikation (vgl. Tab. 14).

2. Als Zwischenergebnis der Klassifikation werden Datensätze generiert, die pro Zielklasse, Bezugseinheit und Schicht alle Zuweisungen der Wichtungsfaktoren zusammenfas-

Programmcode 2.1 R-Programmcode zur Klassifikation der Bodenartengruppe *lu* basierend auf Informationen der Bodenschätzung (b).

```
s@data$BAG_lu_b <- ifelse((s@data$b_koe_t>=8 & s@data$b_koe_t<12 &
  s@data$b_koe_u>=65 & s@data$b_koe_u<92) |
  (s@data$b_koe_t>=12 & s@data$b_koe_t<17 &
  s@data$b_koe_u>=65 & s@data$b_koe_u<88) |
  (s@data$b_koe_t>=8 & s@data$b_koe_t<17 &
  s@data$b_koe_u>=50 & s@data$b_koe_u<65),
  w.b,
  0)
```

sen. Danach werden in den *CL**-Spalten die Klassifikationen mit den höchsten Wichtungen aggregiert. Wenn also die Klassifikation mehrerer Datengrundlagen zu einem gleichen Ergebnis führt, wird der höchste Wichtungsfaktor übernommen. Das ist beispielsweise in Tabelle 13 der Fall, wo das Klassifikationsergebnis der ersten Schicht *p* den Datengrundlagen *v*, *gk* und *f* zugeordnet werden kann. In den *N**-Spalten wird die Anzahl der übereinstimmenden Klassifikationen dokumentiert (hier: 3). Ergibt die Klassifikation verschiedene Ergebnisse, werden in den *CL**-Spalten die korrespondierenden Wichtungsfaktoren abgelegt. So führt beispielsweise die Bodenartengruppen-Klassifikation der ersten Schicht zu den beiden Ergebnissen *sl* und *lu* (Tab. 14).

3. Die finale Klassifikation (Spalte *CLASS*) für jede Bezugseinheit ergibt sich aus dem höchsten Wichtungsfaktor der Spalten *CL**. In Tabelle 14 wird zum Beispiel die erste Schicht des Kontrollpunktes 207042 als *lu* klassifiziert. Die alternative Klassifikation *sl* ist durch einen geringere Wichtungsfaktor gekennzeichnet.

Neben der finalen Klassifikation wird jede Bezugseinheit und Schicht durch einfache Qualitätsmaße charakterisiert. Das Maß *MS1* beschreibt den höchsten Wichtungsfaktor des finalen Klassifikationsergebnisses. Der Wichtungsfaktor der zweitbesten Klassifikation wird durch das Maß *MS2* und die Anzahl alternativer Klassifikationen wird durch das Maß *N* ausgedrückt, die Differenz von *MS1* und *MS2* wird als Klassifikationsstabilität *STB* bezeichnet. Für die Klassifikation der ersten Zeile in Tabelle 14 ergibt sich ein *MS1*-Wert von 1, da die FSK die Grundlage der Klassifikation bildet. Der *MS2*-Wert von 0,2 weist darauf hin, dass die Klassifikation der MMK zu einem alternativen Ergebnis führte. Aus beiden Werten leitet sich ein *STB*-Wert von 0,8 ab. Der *N*-Wert von 2 besagt, dass zwei alternative Klassifikationen existieren.

In Abbildung 8 sind die Ergebnisse der Bodenartengruppen- und Geneseklassifikation für die erste Schicht und das gesamte Untersuchungsgebiet dargestellt. Danach dominieren die Bodenartengruppen *lu*, *tu* und *tl* sowie die Geneseklassen *p* und *fo*. Die Abbildungen 9 und 10 zeigen die korrespondierenden Qualitätsmaße. Für die überwiegenden Fläche des Testgebietes *Bode* stehen demzufolge für die Schicht 1 Bodeneingangsdaten hoher Qualität zur Verfügung, was durch hohe *MS1*-Werte ausgedrückt wird. Mithilfe der Qualitätsmaße *MS2* und *STB* lassen sich Flächen identifizieren, die durch widersprüchliche Klassifikationen gekennzeichnet sind. Das betrifft im Untersuchungsgebiet beispielsweise weite Teile der Auenbereiche, wo

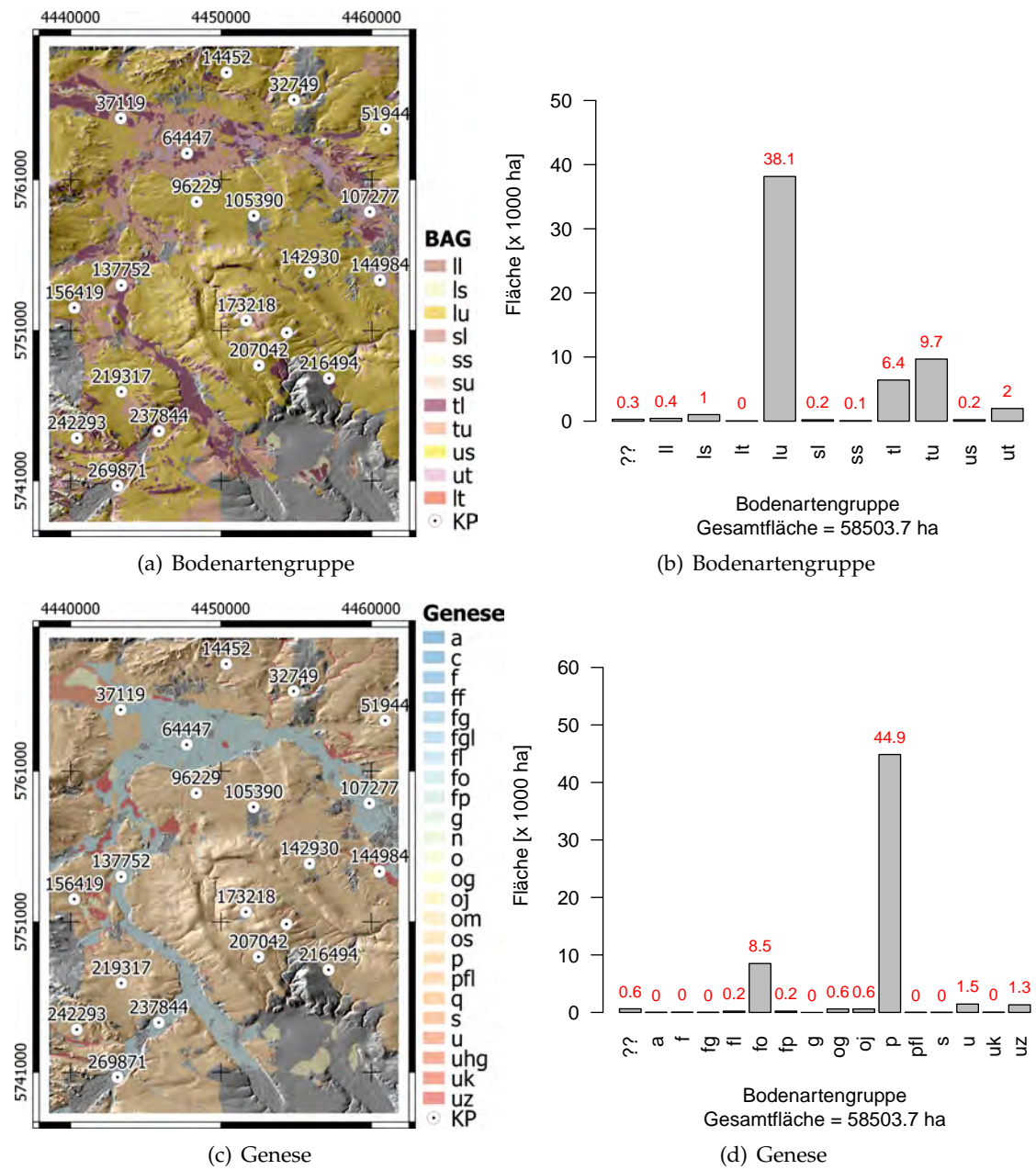


Abbildung 8: Klassifikationsergebnisse der Bodenartengruppen und Genese für die Schicht 1 (a, c) und die korrespondierenden Flächenanteile (b, d) im Testgebiet Bode (b).

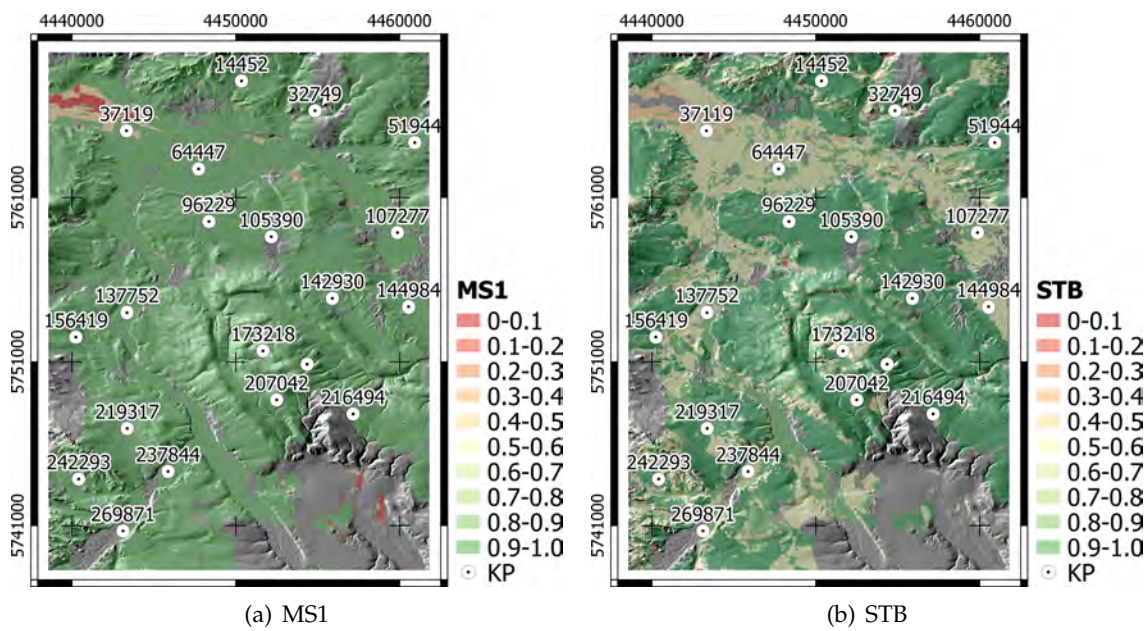


Abbildung 9: Qualitätsmaße für die Bodenartengruppenklassifikation der Schicht 1 im Testgebiet.

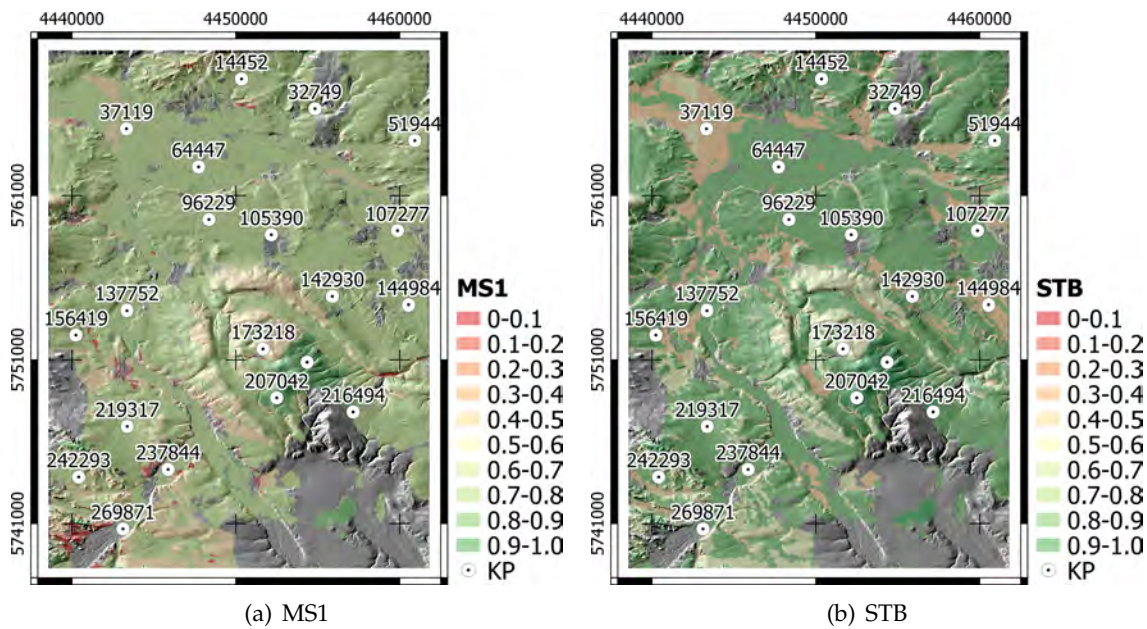


Abbildung 10: Qualitätsmaße für die Geneseklassifikation der Schicht 1 im Testgebiet.

oft die Angaben der Bodenschätzung und VBK 50 zu widersprüchliche Bodenartengruppen-Klassifikationen führen (vgl. Tab. 15; Kontrollpunkte 32749, 37119, 107277 u. 269871). Geringe Stabilitäten bei der Genese-Klassifikation sind in der Regel auf Widersprüche zwischen der VBK 50 und der GK 25 zurückzuführen (vgl. Tab. 16; Kontrollpunkte 32749 u. 37119).

2.5 Typisierung

Die Typisierung zielt auf die vertikale Zusammenfassung der schichtspezifischen Klassifikationsergebnisse und Qualitätsmaße der Bodenparameter. In den Tabellen 15 und 16 sind die Bodensubtypen sowie die aggregierten Schichtinformationen der klassifizierten Bodenartengruppen bzw. -hauptgruppen sowie der Geneseklassen für die Kontrollpunkte aufgelistet. So repräsentiert der Kontrollpunkt 207042 den Bodentyp *Fahlerde*. Als Bodenartengruppen bzw. -hauptgruppen wurden *lu* bzw. *u* bis zu einer Tiefe von 10 dm sowie Ab 11 dm *tl* bzw. *l* ausgewiesen. Die *MSI*-Werte zeigen, dass das Profil auf der Grundlage der Informationsquellen FSK, VBK 50 und GK 25 zusammengesetzt worden ist. Die Stabilitätswerte (*STB*) machen deutlich, dass die Klassifikationsergebnisse durch Widersprüche gekennzeichnet sind. Das betrifft die ersten 12 dm, wo die Klassifikation von FSK und MMK (< 6 dm), VBK 50 und MMK (6 bis 10 dm) sowie GK 25 und MMK (11 bis 12 dm) zu unterschiedlichen Ergebnissen führten (vgl. Tab. 14). Ab 13 dm fungiert der Datensatz der GK 25 als alleinige Informationsquelle.

FSK und GK 25 bilden die Informationsquelle zur Ableitung bodengenetischer Informationen. Die Klassifikation ergibt bis 12 dm *p* und ab 13 dm *pfl*. Schicht 20 ist durch die Geneseklasse *g* gekennzeichnet. Bei 11 und 12 dm widersprechen sich beide Informationsquellen, was sich in einem *STB*-Wert von 0,2 niederschlägt (vgl. Tab. 13).

Die Beispiele zeigen, dass die Klassifikations- und Typisierungsergebnisse jeder Bezugseinheit hinsichtlich ihrer Qualität dokumentiert sind. Darüber hinaus können für jede Bezugseinheit und Schicht die Bodeneingangsdaten identifiziert werden.

2.6 Reliefbezogene Plausibilitätsanalyse der Klassifikationsergebnisse

Die in den Kapiteln 2.2 bis 2.5 beschriebenen Glieder der ProBoSA-Prozesskette können als Basisfunktionen angesehen werden. Das ProBoSA-System erlaubt es, zusätzliche Analysefunktionen zu integrieren, was am Beispiel eines Reliefklassifikationsmoduls veranschaulicht wird. Die Funktion ist innerhalb der Programmumgebung **R** umgesetzt worden und gliedert sich in die Schritte

1. Parametrisierung der Bezugseinheiten mit Reliefattributen (Kap. 2.6.1)
2. Auendetektion (Kap. 2.6.2) und
3. Reliefgliederung terrestrischer Bezugseinheiten (Kap. 2.6.3).

In Kapitel 2.6.4 wird schließlich gezeigt, wie die Ergebnisse der Reliefgliederung für einfache Plausibilitätsanalysen genutzt werden können.

2.6.1 Parametrisierung der Bezugseinheiten mit Reliefattributen

Die Zuweisung der Reliefattribute zu den Bezugseinheiten (Kap. 2.3) ist mit dem RSAGA-Modul realisiert worden (Brenning, 2008), das die Nutzung von Reliefanalyse-Funktionalitäten

Tabelle 15: Ergebnis der Bodentypen-, Bodenartenhauptgruppen- (BAHG.) bzw. Bodenartengruppentypisierung (BAG.) für alle Schichten der Kontrollpunkte (vgl. Abb. 8, 9 u. 10). MS1, STB – Qualitätsmaße | SRC – Quelle | v – Vorläufige Bodenkarte 1:50 000 | g – Geologische Karte 1:25 000 | f – Forstliche Standortskartierung | b – Bodenschätzung, | m – Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standortskartierung).

ID	Bodentyp	BAHG	BAG	BAG_STB	BAG_MS1	BAG_SRC
14452	TT-LL	u(13)l	lu(13)tl	1(4)0.8(11)0.2(13)0.8	1(13)0.8	bs,f(13)gk
32749	TC	t(4)u(6)t(11)u	ut(4)tu(6)ut(11)lu	0.5(11)0.8	1(11)0.8	bs,f(11)gk
37119	GGh	l(11)s	ll(4)tl(11)ls	0.5(4)0.8(7)0.3(11)0.3(13)0.8	1(7)0.5(11)0.8	bs,f(7)v(11)gk
51944	DD-TT	u(6)l(8)u(11)l	lu(6)ll(8)lu(11)tl	1(4)0.8(6)0.5(8)0.8(11)0.3(13)0.8	1(11)0.8	bs,f(11)gk
64447	AT	l(4)u(11)ste	tl(4)tu(11)ste	0.8(4)0.5(11)0.3(13)0.8	1(11)0.8	bs,f(11)gk
96229	DD-TT	u(11)s	lu(11)ls	1(4)0.8(11)0.3(13)0.8	1(11)0.8	bs,f(11)gk
105390	DD-TT	u(11)s	lu(11)ls	1(4)0.8(11)0.3(13)0.8	1(11)0.8	bs,f(11)gk
107277	AB	l(3)t(13)??(20)s	tl(3)ut(13)??(20)ls	0.5(3)0.8(11)0.6	1(11)0.8(13)0(20)0.8	bs,f(11)gk
137752	gAT	l(4)t(7)l(11)ste	tl(4)ut(7)tl(11)ste	0.8(4)0.5(7)0.8(9)0.3(11)0.3(13)0.8	1(9)0.5(11)0.8	bs,f(9)v(11)gk
142930	BB-TT	u(11)s	lu(11)ls	1(4)0.8(11)0.3(13)0.8	1(11)0.8	bs,f(11)gk
144984	DD-TC	u(13)??(20)l	tu(6)lu(13)??(20)tl	0.5	1(13)0(20)0.8	bs,f
156419	rGGc-GGh	l(3)u(9)l(11)hne	tl(3)tu(9)tl(11)hne	0.8(3)0.5(9)0.3(11)0.3(13)0.8	1(9)0.5(11)0.8	bs,f(9)v(11)gk
173218	RZ-DD	u(6)l(11)ste	lu(6)tl(11)ste	0.8(6)0.3(11)0.3(13)0.8	1(6)0.5(11)0.8	bs,f(6)v(11)gk
184868	BB-RZ	u(11)ste	lu(11)ste	1(3)0.5(11)0.3(13)0.8	1(3)0.5(11)0.8	bs,f(3)v(11)gk
207042	LF	u(11)l	lu(11)tl	0.8(6)0.3(11)0.3(13)0.8	1(6)0.5(11)0.8	bs,f(6)v(11)gk
216494	LF	u	lu	1(6)0.5(13)0.8	1(13)0.8	bs,f(13)gk
219317	RZ	u(11)l	lu(11)tl	1(4)0.8(11)0.3(13)0.8	1(11)0.8	bs,f(11)gk
237844	AB	l(3)u(5)tl(11)ste	tl(3)lu(5)ut(11)ste	0.8(3)0.5(11)0.3(13)0.8	1(11)0.8	bs,f(11)gk
242293	DD	u(3)l(4)u(6)s	tu(3)tl(4)lu(6)ls	0.5(4)0.3(7)0.5(11)0.8	1(4)0.5(11)0.8	bs,f(4)v(11)gk
269871	AT	u(6)tl(13)??(20)s	tu(6)ut(13)??(20)ls	0.5(11)0.3	1(11)0.8(13)0(20)0.8	bs,f(11)gk

Tabelle 16: Ergebnis der Bodentypen- und Genesetypisierung (GEN_) für alle Schichten der Kontrollpunkte (vgl. Abb. 8, 9 u. 10). MS1, STB – Qualitätsmaße | SRC – Quelle | v – Vorläufige Bodenkarte 1:50 000 | g – Geologische Karte 1:25 000 | f – Forstliche Standortskartierung | b – Bodenschätzung, | m – Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standortskartierung).

ID	BOD_TYP	GEN	GEN_STB	GEN_MS1	GEN_SRC
14452	TT-LL	p(11)pf(20)g	0.8(11)0.3(13)0.8	0.8	gk
32749	TC	uz(13)??(20)uz	0.3	0.8(13)0(20)0.8	gk
37119	GGh	fl(6)f	0.3(13)0.8	0.8	gk
51944	DD-TT	p(11)pf(20)g	0.8(11)0.3(13)0.8	0.8	gk
64447	AT	fo(11)ff(20)fp	0.8(11)0.3(13)0.8	0.8	gk
96229	DD-TT	p(20)fg	0.8	0.8	gk
105390	DD-TT	p(20)fg	0.8	0.8	gk
107277	AB	fo(13)??(20)ff	0.8	0.8(13)0(20)0.8	gk
137752	gAT	fo(11)ff(20)fp	0.8(11)0.3(13)0.8	0.8	gk
142930	BB-TT	p(20)fg	0.3(13)0.8	0.8	gk
144984	DD-TC	fp(13)??(20)g	0.3	0.8(13)0(20)0.8	gk
156419	rGGc-GGh	og(13)??(20)og	0.3	0.8(13)0(20)0.8	gk
173218	RZ-DD	p(20)n	0.5(11)0.8	0.5(11)0.8	v(11)gk
184868	BB-RZ	p(20)n	1(13)0.8	1(13)0.8	bs,f(13)gk
207042	LF	p(13)pf(20)g	1(11)0.2(13)0.8	1(13)0.8	bs,f(13)gk
216494	LF	p(13)??(20)p	1	1(13)0(20)0.8	bs,f
219317	RZ	p(11)pf(20)g	0.8(11)0.3(13)0.8	0.8	gk
237844	AB	fo(11)ff	0.8(11)0.3(13)0.8	0.8	gk
242293	DD	p(20)s	0.8	0.8	gk
269871	AT	fo(13)??(20)ff	0.8	0.8(13)0(20)0.8	gk

Programmcode 2.2 R-Programmcode zum Import und zur Parametrisierung von Bezugseinheiten mit Reliefattributen.

```

l.r <- list.files(pattern="*.*\\.asc$")
for (i in 1:length(l.r)){
  #Import
  rsaga.esri.to.sgrd(
    in.grids=l.r[i],
    out.sgrds=paste(substr(l.r[i],0,nchar(l.r[i])-4),c(".sgrd"),sep=""),
    in.path=getwd(),env=myenv)
  ##zonal statistics
  rsaga.geoprocessor(
    lib="shapes_grid",
    module=2,
    param=list(GRIDS=paste(substr(l.r[i],0,nchar(l.r[i])-4),c(".sgrd"),sep=""),
              POLYGONS=file.path(w.dir,result.dir,result.shp),
              COUNT=0,
              MIN=0,
              MAX=0,
              RANGE=0,
              SUM=0,
              VAR=0,
              STDDEV=0,
              QUANTILE=0,
              NAMING=1),
    env=myenv)
  setTxtProgressBar(pb, i)
}

```

von SAGA GIS innerhalb von **R** ermöglicht (Conrad et al., 2015). Der Programmcode 2.2 dokumentiert die programmtechnische Umsetzung. Danach werden zunächst alle Reliefattribute, die hier im *.asc-Format vorliegen, in die Liste `l.r` überführt. Anschließend werden alle Listenelemente innerhalb einer Schleifen-Umgebung in das SAGA-Format *.sgrd mittels der Funktion `rsaga.esri.to.sgrd()` importiert. Die `rsaga.geoprocessor()`-Umgebung ermöglicht den formalisierten Zugriff auf SAGA GIS-Module. Hier wird das Modul 2 der `shapes_grid`-Bibliothek verwendet. Dahinter verbirgt sich eine *zonal statistics*-Funktion, mit der für jedes Polygon des Vektordatensatzes der Mittelwert basierend auf den Werten des Rasterdatensatzes berechnet wird.

Für die Reliefgliederung sind die kombinierten Reliefattribute *Massenbilanzindex* (MBI) sowie zwei Varianten des *Reliefklassifikationsindex* (RKI1 und RKI2) mit den Bezugseinheiten in Beziehung gesetzt worden:

- Das Attribut *MBI* kombiniert die Basisattribute *Wölbung*, *Neigung* und *Höhe über Tiefenlinie* und erlaubt die Detektion von konkaven und konvexen Reliefformen (Möller et al., 2008, 2012; Möller & Volk, 2015).

- Die Kombination der Reliefattribute *Bodenfeuchteindex* und *Höhe über Tiefenlinie* bzw. *Höhe über Fließgewässer* ergibt die Reliefklassifikationsindizes *RKI2* bzw. *RKI1* (Bock et al., 2007), die für die vertikale Reliefgliederung von Landschaften entwickelt worden sind.

2.6.2 Auendetektion

Im Programmcode 2.3 zur Auendetektion wird eine vom Nutzer festzulegende Variable *ta.fp* einer Clusteranalyse mit dem Algorithmus *mclust* unterzogen (Fraley & Raftery, 2002). Auen können als Prozessbereiche angesehen werden, die die Kriterien *minimale Höhe über Fließgewässer*, *minimale Neigung* und *maximale Fließakkumulation* erfüllen und durch das Reliefattribut *RKI2* charakterisiert werden. Mit der Cluster-Analyse werden statistisch signifikante Grenzen in der *RKI2*-Werte Verteilung bestimmt (Abb. 11b), die in Abbildung 11a räumlich abgebildet werden. Im Testgebiet werden die Cluster 1 und 2 als Auenbereiche betrachtet.

2.6.3 Reliefgliederung terrestrischer Bezugseinheiten

Bei der Reliefgliederung der terrestrischen Bezugseinheiten werden die Reliefattribute *MBI* (*ta1.sf*) und *RKI1* (*ta2.sf*) getrennt geclustert, wobei die Clusteranzahl *CN* vom Nutzer zu bestimmen ist (Programmcode 2.3). Die Ergebnis-Cluster werden mit Hilfe der Funktion *interaction* zusammengeführt.

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse der Clusteranalyse. Danach repräsentiert die Cluster-Nummer 0 die detektierten Auenbereiche. Über die kombinierte Auswertung der *MBI*- und *RKI1*-Cluster können Reliefformen beschrieben werden. So lassen sich die Kombination der Cluster $C_{MBI} = 5$ und $C_{RKI1} = 5$ als stark konvexe Scheitelbereiche oder die Kombination der Cluster $C_{MBI} = 1$ und $C_{RKI1} = 1$ als Senkenbereiche am Rande von Auenbereichen interpretieren.

2.6.4 Plausibilitätsanalyse

Ähnlich der Herangehensweise in Möller et al. (2012) ermöglichen Reliefklassen, Klassifikationsergebnisse einer reliefspezifischen Plausibilitätsanalyse zu unterziehen. Das heißt, dass durch den Nutzer die Kombination von spezifischen Relief- und Bodenklassen abgefragt werden kann. Abbildung 13 zeigt ein Abfragebeispiel für die Anteile von Bodenklassen (a), Bodenartengruppen (b) und Geneseklassen (c) in der Reliefklasse *Aue*. Als plausibel können beispielweise die Kombinationen mit der Bodenklasse *Auenboden*, den Geneseklassen *fo* und *fp* oder den Bodenartengruppen *tl* und *tu* angesehen werden. Nicht plausibel ist dagegen die Kombination mit der Bodenklasse *Schwarzerden*, der Geneseklasse *p* oder der Bodenartengruppe *lu*.

3 ProBoSA-System

3.1 Technische Rahmenbedingen für den Betrieb des ProBoSA-Systems

Das ProBoSA-System ist unter dem Betriebssystem Linux Ubuntu 14.04 LTS entwickelt worden. Die im System verwendeten Skripte sind in Tabelle 17 aufgelistet. Der Betrieb des ProBoSA-Systems setzt die Installation folgender OpenSource-Softwareprodukte voraus:

Programmcode 2.3 R-Programmcode zur Clusteranalyse, Auendetecktion und Reliefgliederung terrestrischer Bezugseinheiten.

```
#Floodplain detection
MC <- Mclust(model.matrix(~-1 + s@data[[c(ta.fp)]],s@data))
s@data$MC.FP <- MC$classification
#Selection of floodplain cluster
s@data$FP <- ifelse(s@data$MC.FP<3,1,0)
#Clustering of terrestrial process domains
s@data$MC1 <- ifelse(s@data$FP==0,
  Mclust(model.matrix(~-1 + s@data[[c(ta1.sf)]],
s@data),G=CN)$classification,
  0)
s@data$MC2 <- ifelse(s@data$FP==0,
  Mclust(model.matrix(~-1 + s@data[[c(ta2.sf)]],
s@data),G=CN)$classification,
  0)
#combining MC1 and MC2
s@data$TC <- interaction(as.factor(s@data$MC1), as.factor(s@data$MC2), sep="")
```

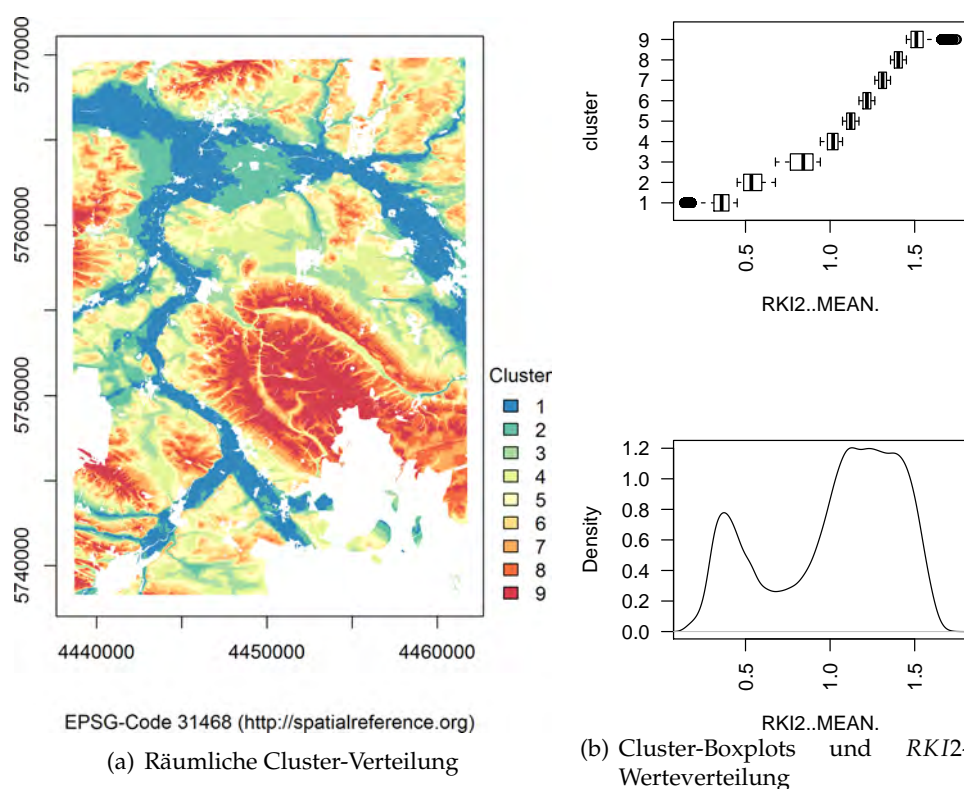
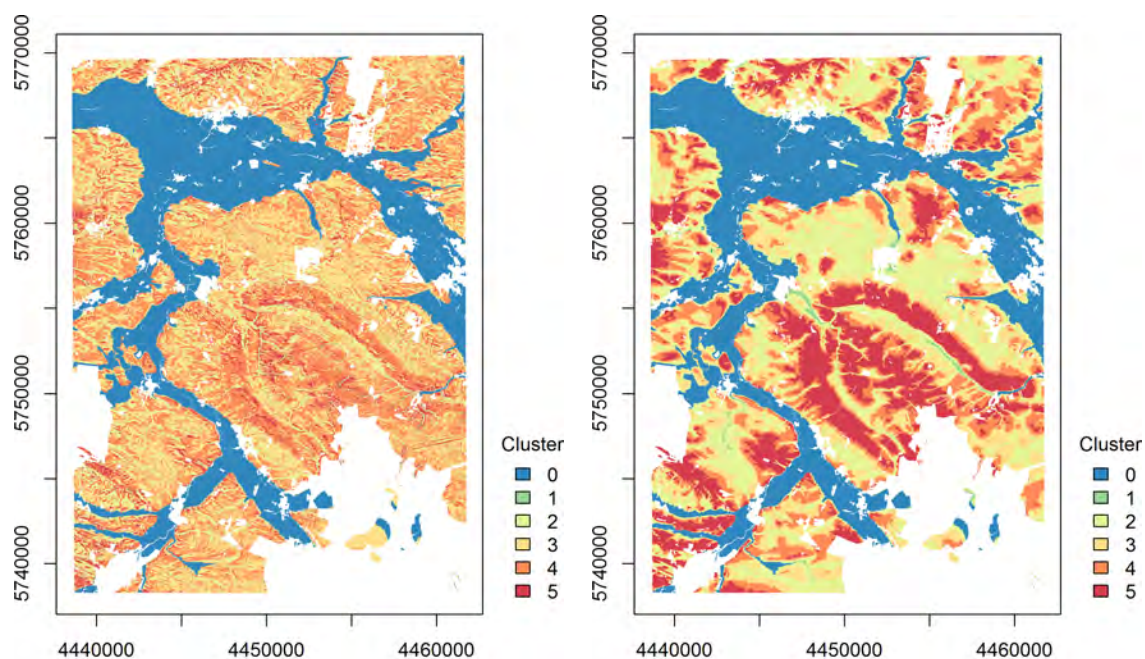


Abbildung 11: Ergebnisse der Clusteranalyse des Reliefattributes *RKI2* zur Auendetecktion.

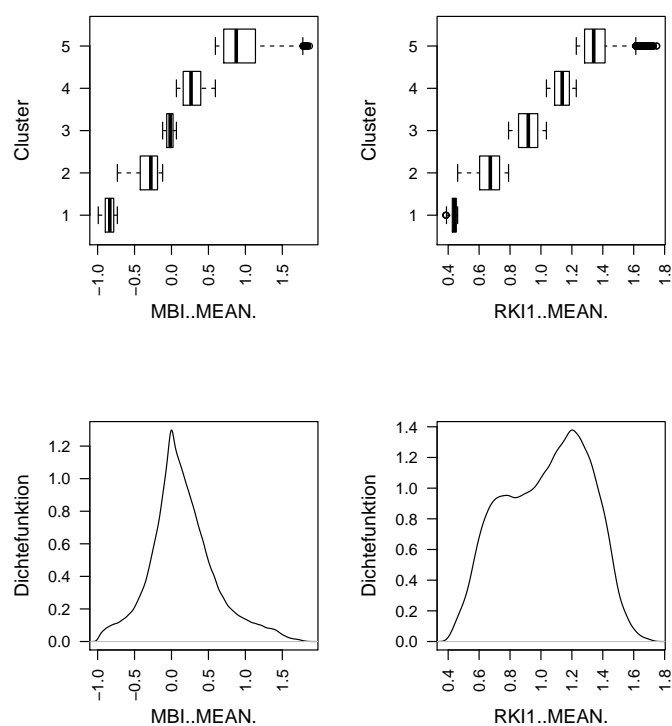


EPSG-Code 31468 (<http://spatialreference.org>)

(a) Räumliche Cluster-Verteilung des Reliefattributs *MBI*

EPSG-Code 31468 (<http://spatialreference.org>)

(b) Räumliche Cluster-Verteilung des Reliefattributs *RKI1*



(c) Cluster-Boxplots und *RKI1*-Wertevertelung

Abbildung 12: Ergebnisse der Clusteranalyse des Reliefattributs *MBI* und *RKI1* zur Gliederung der terrestrischen Prozessbereiche.

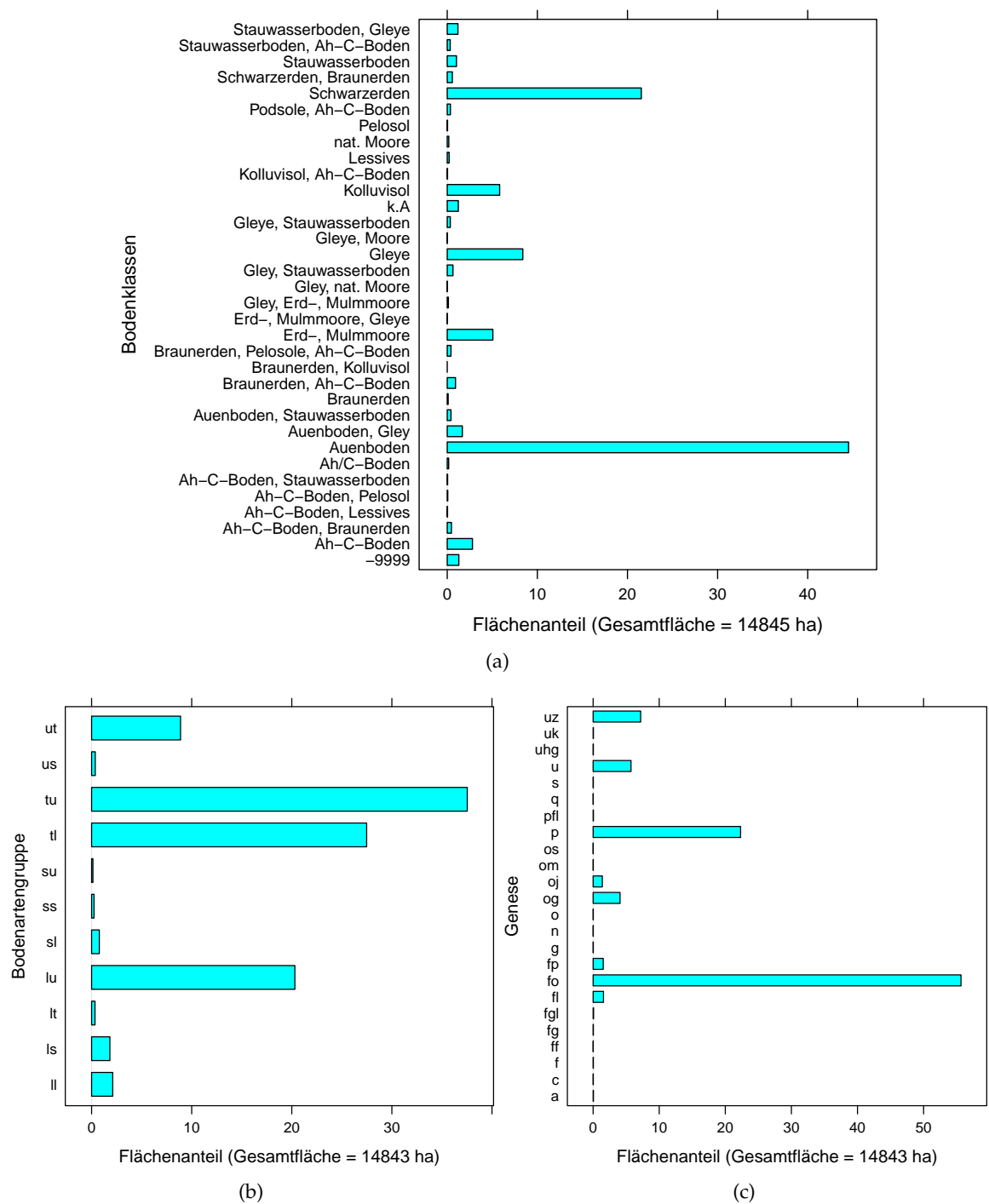


Abbildung 13: Anteile von Bodenklassen (a), Bodenartengruppen (b) und Geneseklassen (c) an der Reliefklasse Aue.

- PostgreSQL-Datenbankmanagementsystem (Version 9.1),
- PostGIS: Zusatzsoftware für PostgreSQL-Datenbank für Geodatenverarbeitung (Version 1.5),
- PHP (Version 5.6),
- Apache WebServer (Version 2.4),
- Phppgadmin zur Verwaltung der Datenbank-Tabellen (Version 5.1),
- Python (Version 2.7.6),
- psycopg2: Python-Modul für Datenbankanbindung,
- GeoServer für Visualisierung von Geodaten (Version 2.5.5) sowie
- R (Version 3.2.5).

ProBoSA läuft derzeit auf einem Dell PowerEdge R320-Server mit folgender Konfiguration:

- Intel Xeon E5-2430 2.20GHz, 15M Cache, 7.2GT/s QPI, Turbo, 6C, 95W,
- 16 GB UDIMM, 1333 MHz, Low Volt, Dual Rank, x8 sowie
- 1TB SATA 7.2k 3.5 HD Cabled

Prinzipiell lässt sich die Software auch auf einem Laptop mit ähnlicher Ausstattung installieren und betreiben. Empfohlen wird die Nutzung innerhalb einer virtuellen Umgebung (z.B. auf einem Windows-System mit Virtualbox und Ubuntu 14.04). Diese virtuelle Instanz lässt sich im Anschluss auf beliebig viele Systeme (weitere Laptops oder Server) duplizieren und entsprechend nachnutzen.

3.2 Anleitung zur Nutzung des ProBoSA-Servers

3.2.1 Server-Login

- Verbindung via SSH, für Windows zum Beispiel über "putty"⁸
- Beispiel: `ssh -p 5608 probosa@217.16.166.82`
- Benutzer: probosa
- Passwort: PB12Cmvra

⁸<https://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/latest.html>

Tabelle 17: Zusammenstellung aller programmierten Skripte des ProBoSA-Systems.

Nr.	Dateiname	Typ	Funktionsbeschreibung
Allgemein			
1	<i>erstellung_themenlayer.py</i>	Python	erstellt alle Themenlayer
2	<i>postgre_zusammenfassung_tabellen_mitgk25.py</i>	Python	schichtweise Zusammenführung der Einzel-Informationen
3	<i>fuellen_themenlayer_schneller_version_gk25.py</i>	Python	füllt die erzeugten Themenlayer mit tatsächlichen Inhalten
4	<i>postgre2csv.py</i>	Python	Export von beliebigen Tabellen
5	<i>_zuordnung_anteile_bt_basic.py</i>	Python	sucht für jede Bezugseinheit (Polygon) die jeweils größte schneidende Fläche mit den Eingangsdaten (VBK, MMK, FORST, GK, BS)
6	<i>_erzeugung_views_bt_kombi_20.sql</i>	SQL	erstellt schichtweise VIEWS auf Basis von Skript 3
7	<i>_erzeugung_tabelle_bt_kombi_schichten_20.sql</i>	SQL	erstellt Tabellen basierend auf den Skripten 3 und 4
MMK			
8	<i>zerlegungsbefehle_mmk_bode.py</i>	Python	Zerlegung der MMK-Dateien in Einzelinformationen
VBK			
11	<i>zerlegungsbefehle_vbk_bode.py</i>	Python	Zerlegung der VBK-Dateien in Einzelinformationen
13	<i>vbk_koernung_bode_prodm.py</i>	Python	erzeugt die Schichten in 10 cm Schritten bis Schicht 15
Forst			
15	<i>forst_koernung.py</i>	Python	Zuweisung der Körnung
Bodenschätzung			
16	<i>schbch_schicht_komposer_alternativ.py</i>	Python	neue Komposition aus den Tabellen <i>schbch</i> und <i>schicht</i>
17	<i>bodenschaetzung_berechnung_maechtigkeit.py</i>	Python	Bestimmung der Mächtigkeit
GK 25			
18	<i>zerlegungsbefehle_gk25.py</i>	Python	Zerlegung der GK-Dateien in Einzelinformationen
19	<i>gk25_koernung_bode.py</i>	Python	Erzeugt die Schichten in 10cm Schritten bis Schicht 20
20	<i>gk25_koernung_prodm.py</i>	Python	Zuweisung Körnung
Klassifikation und Typisierung			
21	<i>weights.R</i>	R	Expertenbasierte Wichtung der Eingangsparameter
22	<i>class_*.R</i>	R	Schichtweise Klassifikation und Plausibilitätsder Bodenartengruppen [texture.BAG], Bodenartenhauptgruppen [texture.BAHG], Kalkgehaltsklassen [lime], Skelettgehaltsklassen [gravel] und Gense [formation]
23	<i>texturetype_*.R</i>	R	Zusammenfassung der schichtweisen Klassifikationsergebnisse [texture, formation, lime, gravel] zu einer Zeichenkette
24	<i>BAG_*.R</i>	R	Regeln zur Klassifikation der Bodenartengruppen
25	<i>BAHG_*.R</i>	R	Regeln zur Klassifikation der Bodenartenhauptgruppen
25	<i>GEN_*.R</i>	R	Regeln zur Klassifikation der Genese
26	<i>SKE_*.R</i>	R	Regeln zur Klassifikation der Skelettgehaltsstufen
27	<i>LIME_*.R</i>	R	Regeln zur Klassifikation der Kalkgehaltsstufen
Relieffliederung			
28	<i>function_sotep.R</i>	R	Funktion zur automatischen Parametrisierung von Reliefattributen und Relieffgliederung

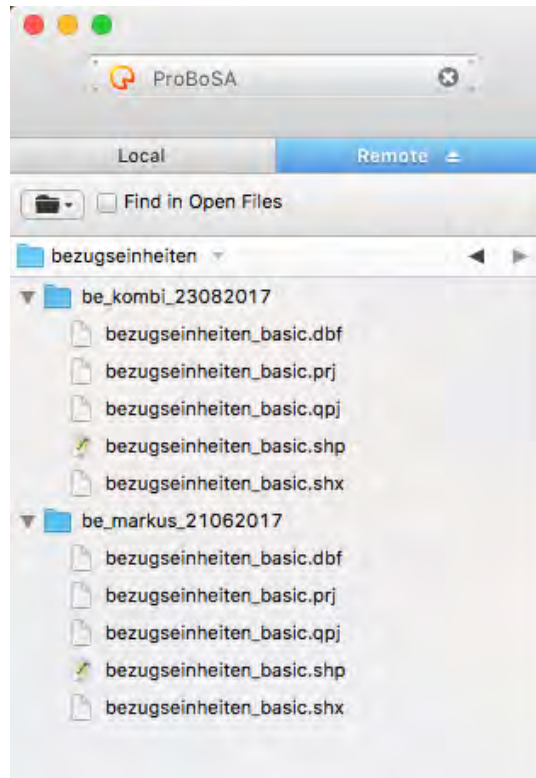


Abbildung 14: Ordner-Struktur auf dem ProBoSA-Server.

3.2.2 Dateien hoch- und herunterladen

Dateien (z.B. neue Bezugseinheiten-Shapes) können per Drag&Drop auf den Server hoch- und auch heruntergeladen werden. Dazu ist ein sogenanntes SFTP-Programm notwendig. Für Microsoft Windows empfiehlt sich zum Beispiel “WinSCP”⁹.

Alle ProBoSA-relevanten Dateien und Scripte befinden sich im Ordner `home/probosa/`. Es handelt sich dabei um das Standard-Home-Verzeichnis des Benutzers “probosa”.

3.2.3 Neue Bezugseinheiten hochladen

Die Bezugseinheiten (Polygone beliebiger Größe) müssen als Shape-Datei vorliegen und in DHDN/3-degree Gauss-Kruger Zone 4 (EPSG-Code 31468; Spatialreference, 2016) vorliegen. Die Projektionsdatei (*.prj) muss ebenfalls vorhanden sein. Das Shape darf keine Multipolygone beinhalten, d.h. jedes Polygon muss über eine eindeutige ID (DBF-Feld: “id”) verfügen. Alle Bezugseinheiten befinden sich im Ordner `/home/probosa/bezugseinheiten/`. Per WinSCP lassen sich diese Dateien einfach bearbeiten, neue Ordner erstellen sowie Dateien hoch- und runterladen (vgl. Abb. 14).

Die neuen Bezugseinheiten müssen immer auf `_basic.*` enden, am sichersten ist es jedoch immer den Dateinamen `bezugseinheiten_basic.*` zu verwenden.

⁹<https://winscp.net/eng/download.php>



```

thuerkow — probosa@precisionN: ~/bezugseinheiten/be_poly_01092017 — ssh -p 5608 probosa@217.16.166.82 — 137x34
thuerkow@precisionN: ~/probosa/classification/soilgroup — ssh -p 5608 thuerk...  probosa@precisionN: ~/bezugseinheiten/be_poly_01092017 — ssh -p 5608 prob...
probosa@precisionN:~/bezugseinheiten$ ls
be_kombi_23082017  be_markus_21062017  be_poly_01092017
probosa@precisionN:~/bezugseinheiten$ cd be_poly_01092017/
probosa@precisionN:~/bezugseinheiten/be_poly_01092017$ ls
bezugseinheiten_basic.dbf  bezugseinheiten_basic.prj  bezugseinheiten_basic.qpj  bezugseinheiten_basic.shp  bezugseinheiten_basic.shx
probosa@precisionN:~/bezugseinheiten/be_poly_01092017$

```

Abbildung 15: SSH-Zugriff.

3.2.4 Polygone in Datenbank speichern

Nachdem die neuen Bezugseinheiten hochgeladen sind (Kap. 3.2.2), müssen die Polygone in das Datenbank-System überführt werden. Die neuen Polygone liegen beispielsweise im Ordner `/home/probosa/bezugseinheiten/be_poly_01092017/bezugseinheiten_basic.*`.

Die nachfolgenden Schritte müssen per SSH-Zugriff direkt auf der Konsole erfolgen (vgl. Abb. 15). Dort kann in das Verzeichnis mit dem Kommando `cd /home/probosa/bezugseinheiten/be_poly_01092017` gewechselt werden. Der Inhalt des Verzeichnisses wird mit dem Kommando `ls` angezeigt.

Die Überführung der Shape-Datei in die Datenbank erfolgt über die Kommandozeile mit dem Befehl `shp2pgsql -I -s 31468 -W 'latin1' bezugseinheiten_basic.shp _bt_kombi_basic | psql -d probosa_lagb`. Dabei ist

- `shp2pgsql` ist das Programm,
- der Parameter `-s 31468` gibt die Projektion an,
- `-W 'latin1'` sorgt für den korrekten Import von Umlauten,
- `bezugseinheiten_basic.shp` ist die Shape-Datei,
- `_bt_kombi_basic` ist der Tabellen-Name in den Datenbank, in der die in der Shape-Datei hinterlegten Polygone gespeichert werden,
- `psql -d probosa_lagb` ist die Datenbank, in der die Attributtabelle der Polygone gespeichert werden soll.

Abgeschlossen wird der Befehl mit Enter und der Abfrage nach dem Datenbank-Passwort.

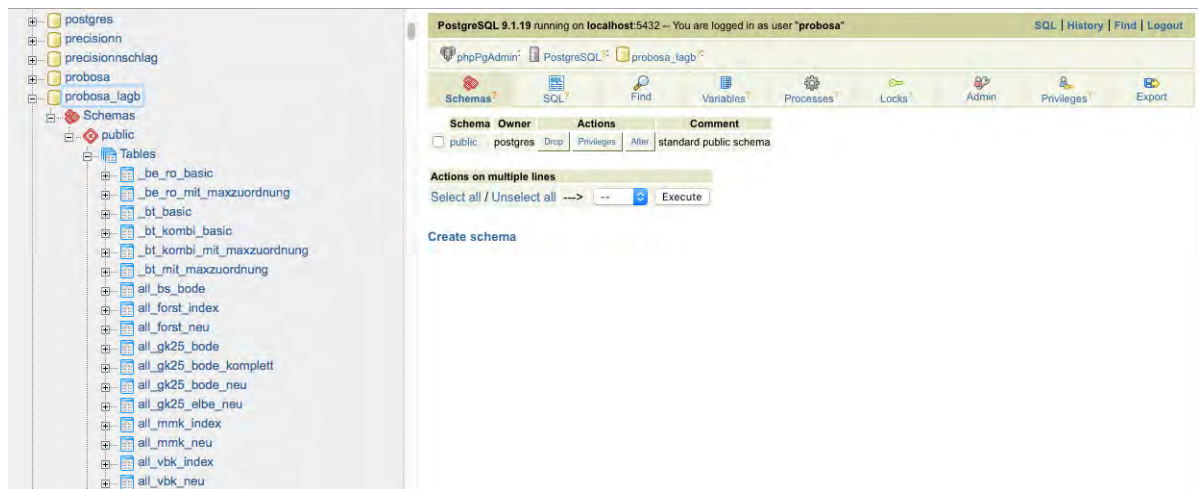


Abbildung 16: Datenbank-Anwendung.

Actions	gld	bod_typ	btoba	fl_pronum	klasse	kiz	mbi	rkl
1 RZ	Pararendzina		72530.000000000000000000	Ah-C-Boden	L2Lo	-0.2744999987383683	1.069333354632059	
2 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		72552.000000000000000000	Ah-C-Boden	L2Lo	-0.2566000011563301	0.984080004682077	
3 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		72552.000000000000000000	Ah-C-Boden	L2Lo	0.2125294116490027	0.960176466352799	
4 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		72552.000000000000000000	Ah-C-Boden	L2Lo	0.6875999987125396	0.990100014209747	
5 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		72552.000000000000000000	Ah-C-Boden	L2Lo	0.2165882356236963	0.975941177676705	
6 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		72552.000000000000000000	Ah-C-Boden	L2Lo	-0.4060000002384188	0.920599985122580	
7 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		72552.000000000000000000	Ah-C-Boden	L2Lo	0.4126923084259033	0.903846149261181	
8 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		72552.000000000000000000	Ah-C-Boden	L2Lo	0.1250769225402902	0.937179485956827	
9 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		72552.000000000000000000	Ah-C-Boden	L2Lo	0.2557586174586723	0.83482752029623	
10 DD-TC	Pelosol-Kalktschmosem		72539.000000000000000000	Schwarzerden	L2Lo	-0.2201914874480128	0.871744682180120	
11 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		72552.000000000000000000	Ah-C-Boden	L2Lo	-0.7587500065565109	0.751249983906745	
12 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77594.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L1Lo	0.6608571424370721	0.924476192111060	
13 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77594.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L1Lo	0.1667272652584043	0.790090918540954	
14 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77594.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L1Lo	0.4821666696419318	0.796291661759217	
15 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77594.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L1Lo	0.5834444444555650	0.930148146770618	
16 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77594.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L1Lo	-0.426999987803973	0.938846155386704	
17 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77594.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L1Lo	-0.4939999878406525	0.928999990248384	
18 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77594.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L1Lo	0.9606000065803528	0.942000007629394	
19 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77594.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L1Lo	-0.6987500041723251	0.935000002384185	
85 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		72591.000000000000000000	Ah-C-Boden	L2Lo	0.5828000009059906	0.960599994659423	
20 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77572.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L3Lo	0.4003684199170062	0.85052634289390	
21 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77572.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L3Lo	-0.0495499990808489	0.748925000429153	
22 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77572.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L3Lo	0.0546000038146971	0.871599984169006	
23 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77572.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L3Lo	0.5463095257679621	0.982999997479575	
24 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77572.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L3Lo	0.8005714288779667	0.949285707303455	
25 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77594.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L1Lo	0.1050526300739301	0.967578944407011	
26 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77594.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L1Lo	0.1847000040113926	0.948600000143051	
27 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77572.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L3Lo	-0.5852900018477440	0.945500001311302	
28 GG-RZ	Pararendzina-Gley		77577.000000000000000000	Ah-C-Boden	SL3Lo	0.0832857223493712	0.7860000004836491	
29 RZ-DD	Pararendzina-Pelosol		77572.000000000000000000	Braunerden, Ah-C-Boden	L3Lo	-0.4459565210601558	0.618043477120806	

Abbildung 17: Anzeige der Attributtabelle in der Datenbank-Anwendung.

3.2.5 Datenbank-Applikation im Browser

Die online-Datenbank ist über die URL `http://217.16.166.82/pgsqladm/` erreichbar. Die Login-Daten sind identisch zum Server-Login.

Die Datenbank-Anwendung teilt sich in zwei Bereiche auf. Auf der linken Seite befinden sich alle konfigurierten Datenbanken, wobei alle notwendigen Tabellen in der Datenbank `probosa_lagb` gespeichert sind. Nach erfolgreichem Login öffnet sich das in Abbildung 16 dargestellte Fenster.

Im Verzeichnisbaum `probosa_lagb/Schemas/public/Tables` befinden sich alle Dateien. Hier sollte nun auch die neue Tabelle aus Kapitel 3.2.4 angezeigt werden. Zur Kontrolle kann die entsprechende Tabelle, z.B. `_bt_kombi_basic` mit den zugehörigen Attribute aus dem Shape-DBF-Datei angeklickt und angezeigt werden (vgl. Abb. 17) Innerhalb dieser Anwendung lassen sich alle einzelnen Datensätze (Zeilen in der Attribut-Tabelle) ändern. Änderungen gehen an dieser Stelle direkt in das Klassifikationsergebnis ein. Hier können auch vorhandene Tabellen gelöscht werden. Das heißt, wenn neue Bezugseinheiten hochgeladen werden sollen, muss die Tabelle `_bt_kombi_basic` vorher per Web-Browser innerhalb der Datenbank-Anwendung gelöscht werden.

3.2.6 Klassifikation starten

3.2.6.1 Zuordnung der größten Anteile Nachdem die neuen Bezugseinheiten in der Datenbank-Anwendung verfügbar sind, müssen die Bezugseinheiten den Eingangsdaten zugeordnet werden. Als Resultat erhält man eine neue Tabelle mit dem Namen `_bt_mit_maxzuordnung` (vgl. Abb. 18). Gestartet wird die Zuordnung auf der Konsole mit dem Befehl `python _zuordnung_anteile_bt_basic.py`. Die Laufzeit des Scriptes ist stark abhängig von der Anzahl der Polygone (Bezugseinheiten) und kann mehrere Stunden Zeit in Anspruch nehmen.

3.2.6.2 Erzeugung der schichtweisen Informationen Die einzelnen Schichten werden mithilfe von sogenannten "views" erstellt. Dazu werden die Informationen der Zerlegung, die Bezugseinheiten und Zuordnung der größten Anteile miteinander kombiniert und in Einzelschichten abgespeichert. Das dafür notwendige SQL-Script befindet sich im Ordner `/home/probosa/erzeugung_views/_erzeugung_views_bt_kombi_20.sql`. Um die darin enthaltenen Befehle auszuführen, muss lediglich der Inhalt der SQL-Datei in die Zwischenablage kopiert und dann in der Datenbank-Anwendung (vgl. Kap. 3.2.5) eingegeben werden. Dazu muss die Datenbank `probosa_lagb` ausgewählt werden. Nach dem Klicken auf "SQL" im rechten oberen Menü öffnet sich ein neues Fenster mit einer Eingabemaske (vgl. Abb. 19). Nach dem Einfügen des SQL-Statements in das große Eingabefeld muss auf "Ausführen" geklickt werden. Die Zerlegung in Einzelschichten dauert nur wenige Sekunden.

3.2.6.3 Zuordnung Schichtinformationen und Speicherung der schichtweisen Bezugseinheiten Nachdem die schichtweisen Informationen in separaten Einzel-Views hinterlegt sind, müssen nun alle Informationen an die schichtweisen Bezugseinheiten geknüpft werden. Das hierfür notwendige Script befindet sich im Ordner `/home/probosa/erzeugung_tabellen/_erzeugung_tabelle_bt_kombi_schichten_20.sql`.

ech	forst_minflaeche_proz	mmk_schnittanz	mmk_maxpid	mmk_maxflaeche	mmk_maxflaeche_proz	mmk_minflaeche	mmk_minflaeche_proz	vbk_schnl
NULL		1	2	1700.0	100.0	1700.0	100.0	
NULL		1	2	1000.0	100.0	1000.0	100.0	
NULL		1	2	1700.0	100.0	1700.0	100.0	
NULL		1	2	500.0	100.0	500.0	100.0	
NULL		1	2	3900.0	100.0	3900.0	100.0	
NULL		1	2	4700.0	100.0	4700.0	100.0	
NULL		1	2	400.0	100.0	400.0	100.0	
NULL		3	2	1091.56640625	51.9793526786	1008.43359375	48.0206473214	
NULL		3	2	873.990234375	79.4536576705	226.009765625	20.5463423295	
NULL		3	2	1895.13476562	70.1901765046	804.865234375	29.8098234954	
NULL		3	3	1202.66601562	92.5127704327	97.333984375	7.48722956731	
NULL		3	3	151.50390625	75.751953125	48.49609375	24.248046875	
NULL		2	3	400.0	100.0	400.0	100.0	
NULL		1	2	500.0	100.0	500.0	100.0	
500.0	100.0	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	
NULL		2	3	500.0	100.0	500.0	100.0	
NULL		2	3	4200.0	100.0	4200.0	100.0	
NULL		2	3	1400.0	100.0	1400.0	100.0	
NULL		2	3	1900.0	100.0	1900.0	100.0	
NULL		2	3	400.0	100.0	400.0	100.0	
NULL		2	3	700.0	100.0	700.0	100.0	
NULL		1	2	2400.0	100.0	2400.0	100.0	
NULL		2	3	600.0	100.0	600.0	100.0	
NULL		2	3	300.0	100.0	300.0	100.0	
NULL		2	3	2500.0	100.0	2500.0	100.0	
NULL		1	2	4700.0	100.0	4700.0	100.0	
NULL		2	3	1000.0	100.0	1000.0	100.0	
200.0	100.0	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	
NULL		2	3	1100.0	100.0	1100.0	100.0	
NULL		2	3	1500.0	100.0	1500.0	100.0	

Abbildung 18: Ergebnis der Zuordnung (Tabelle _bt_kombi_mit_maxzuordnung).

SQL

Suchen

Server: PostgreSQL (localhost:5432:allow)
Datenbank: probosa_lagb

Schemasuchpfad: public

```

LEFT JOIN "public"."_bt_kombi_mit_maxzuordnung" as bemax ON be19.gid = bemax.gid LEFT JOIN all_gk25_bode_komplett as gk19 ON bemax.gk_maxpid = gk19.pid;
CREATE VIEW gk_bt_kombi_schicht20 AS SELECT be20.gid, gk20.gen_a_20, gk20.gen_c_20, gk20.gen_f_20, gk20.gen_ff_20, gk20.gen_fg_20, gk20.gen_fgl_20,
gk20.gen_fl_20, gk20.gen_fo_20, gk20.gen_fp_20, gk20.gen_g_20, gk20.gen_n_20, gk20.gen_o_20, gk20.gen_og_20, gk20.gen_oj_20, gk20.gen_om_20, gk20.gen_os_20,
gk20.gen_p_20, gk20.gen_pfl_20, gk20.gen_q_20, gk20.gen_s_20, gk20.gen_u_20, gk20.gen_uhg_20, gk20.gen_uk_20, gk20.gen_uz_20, gk20.kal_stf_20, gk20.koe_t_20,
gk20.koe_u_20, gk20.ske_stf_20
FROM "public"."_bt_kombi_basic" as be20
LEFT JOIN "public"."_bt_kombi_mit_maxzuordnung" as bemax ON be20.gid = bemax.gid LEFT JOIN all_gk25_bode_komplett as gk20 ON bemax.gk_maxpid = gk20.pid;

```

☐ Ergebnisse seitenweise anzeigen

Ausführen Zurücksetzen

Abbildung 19: Eingabemaske der Datenbank-Anwendung.


```

|probosa@precisionN:~/klassifikation/_rules$ ls
BAG_ll_bs.R  BAG_ls_m.R  BAG_lu_f.R  BAG_sl_v.R  BAG_su_gk.R  BAG_tu_bs.R  BAG_us_m.R  formationtype.R  texturetype.R
BAG_ll_f.R  BAG_ls_v.R  BAG_lu_gk.R  BAG_ss_bs.R  BAG_su_m.R  BAG_tu_f.R  BAG_us_v.R  function_packages.R  weights.R
BAG_ll_gk.R  BAG_lt_bs.R  BAG_lu_m.R  BAG_ss_f.R  BAG_su_v.R  BAG_tu_gk.R  BAG_ut_bs.R  GEN_bs.R
BAG_ll_m.R  BAG_lt_f.R  BAG_lu_v.R  BAG_ss_gk.R  BAG_tl_bs.R  BAG_tu_m.R  BAG_ut_f.R  GEN_f.R
BAG_ll_v.R  BAG_lt_gk.R  BAG_sl_bs.R  BAG_ss_m.R  BAG_tl_f.R  BAG_tu_v.R  BAG_ut_gk.R  GEN_gk.R
BAG_ls_bs.R  BAG_lt_m.R  BAG_sl_f.R  BAG_ss_v.R  BAG_tl_gk.R  BAG_us_bs.R  BAG_ut_m.R  GEN_m.R
BAG_ls_f.R  BAG_lt_v.R  BAG_sl_gk.R  BAG_ss_bs.R  BAG_tl_m.R  BAG_us_f.R  BAG_ut_v.R  GEN_v.R
BAG_ls_gk.R  BAG_lu_bs.R  BAG_sl_m.R  BAG_su_f.R  BAG_tl_v.R  BAG_us_gk.R  formationgroup.R  texturegroup.R
|probosa@precisionN:~/klassifikation/_rules$

```

Abbildung 21: Steuerungsskripte für Klassifikation.

phpPgAdmin: PostgreSQL: probosa_lagb? public? mmk_testgebiet_bode_org?

Durchsuchen

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 Weiter > Ende >>

Aktionen	gid	area	perimeter	mmk	mmk_id	objektname	geoherk	srt	leitbofo	bg	nft_alt	sft_edv	sft	hft	nft_neu	hft_ni
Bearbeiten Löschen	1	135351120	240842.438	5822	5821	MMK07459	LÖ	Lö1a0101	NULL	IV.IV	2	+	ö	N1	1	11
Bearbeiten Löschen	2	43873504	110468.656	6533	6532	MMK08273	LÖ	Lö1a0101	6T	IV.IV	2	+	ö	N1	3	11
Bearbeiten Löschen	3	320668.5	4188.433	6537	99999	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
Bearbeiten Löschen	4	119770	1490.209	6538	99999	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
Bearbeiten Löschen	5	113300	1372.692	6539	99999	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
Bearbeiten Löschen	6	113368.5	1507.341	6541	99999	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
Bearbeiten Löschen	7	37430048	60301.949	6622	6621	MMK08363	LÖ	Lö1a0101	NULL	IV.IV	2	+	ö	N1	1	11
Bearbeiten Löschen	8	929734.5	11378.57	6623	99999	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
Bearbeiten Löschen	9	145770.5	1645.522	6624	99999	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
Bearbeiten Löschen	10	818104	6382.217	6671	6670	MMK08426	LÖ	Lö1c0705	öi-ö/II	IV.IV	5	+-+/d	ö-ö/d	N1	5	11
Bearbeiten Löschen	11	1736167	16565.371	6692	6691	MMK08452	LÖ	Lö1b0103	eöT	IV.IV	1	+	ö	N2	3	12
Bearbeiten Löschen	12	596065.75	6079.243	6742	6741	MMK08509	LÖ	Lö1b0401	NULL	IV.IV	2	+	ö	G1	3	51
Bearbeiten Löschen	13	1168896.75	7492.525	6759	6758	MMK08529	DC	D6c0409	NULL	III.I	9	s+/l	sö/l	N1	5	11
Bearbeiten Löschen	14	929734.5	11378.57	6766	6765	MMK08538	LÖ	Lö1b0103	NULL	IV.IV	2	+	ö	N2	2	12
Bearbeiten Löschen	15	498794	2696.93	6809	6808	MMK08583	V.K	V2c0507	vö/dB-vpC	IV.I	7	vp+vi(b)-v+	vp+vi(b)-vö	N1	5	11
Bearbeiten Löschen	16	3669110.5	17505.133	6811	6810	MMK08585	V.K	V2c0409	viC-vö/gC	IV.I	9	vi(c)-+	vi(c)-ö	N2	9	12
Bearbeiten Löschen	17	3090049	8540.325	6823	6822	MMK08601	LÖ	Lö1a0101	NULL	IV.IV	2	+	ö	N1	3	11
Bearbeiten Löschen	18	411188.375	2895.32	6842	6841	MMK08630	LÖ	Lö1c0509	NULL	IV.IV	9	+/l	ö/l	N1	3	11
Bearbeiten Löschen	35	320668.5	4188.433	6932	6931	MMK08738	LÖ	Lö1a0505	öC	IV.IV	3	+	ö	N1	3	11
Bearbeiten Löschen	19	1663695.25	12625.627	6846	6845	MMK08636	LÖ	Lö1c0705	öi-ö/II	IV.IV	5	+-+/d	ö-ö/d	N1	5	11
Bearbeiten Löschen	20	808210.5	4833.765	6849	6848	MMK08639	LÖ	Lö3a0103	öP-öi	IV.I	2	+	ö	N2	5	12
Bearbeiten Löschen	21	349757.5	2404.274	6854	6853	MMK08648	DC	D6c0803	NULL	III.I	3	s+/l	sö/l	N1	3	11
Bearbeiten Löschen	22	193361	2068.41	6856	6855	MMK08650	LÖ	Lö1c0505	NULL	IV.IV	5	+/l	ö/l	N1	7	11
Bearbeiten Löschen	23	253589.875	2405.169	6863	6862	MMK08661	LÖ	Lö1c0705	öi-ö/II	IV.IV	5	+-+/d	ö-ö/d	N1	3	11
Bearbeiten Löschen	24	42519.125	1564.103	6869	6868	MMK08668	LÖ	Lö1c0705	NULL	IV.IV	5	+-+/d	ö-ö/d	N1	3	11

Abbildung 22: MMK-Eingangsdatensatz.

sifikation/_result.bt_kombi¹⁰. Die Klassifikation lässt sich maßgeblich durch die im Ordner /home/probosa/klassifikation/_rules befindlichen Dateien steuern (vgl. Abb. 21 u. 2.1, S. 35). An diesen Stellen lassen sich die Schwellwerte für die Klassifikation manipulieren.

Die Ergebnisse befinden sich nach erfolgter Klassifikation im Ordner /home/probosa/klassifikation/_result.bt_kombi und können zur Anzeige zum Beispiel in QGIS oder Esri ArcMap heruntergeladen werden.

3.2.6.6 Zerlegung Alle Eingangsdaten (MMK, VBK, Forst, BS und GK) sind von Excel-Dateien in die Datenbank-Anwendung konvertiert worden. Abbildung 22 zeigt das Konvertierungsergebnis am Beispiel des MMK-Eingangsdatensatzes. Alle Datensätze lassen sich über den "Bearbeiten"-Button manipulieren.

4 Zusammenfassung

Ziel der Projektes ProBoSA war die (semi)automatischen Homogenisierung von bodenkundlichen Datengrundlagen entsprechend der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Boden, 2005). Dabei wurden Informationen zusammengeführt, die sich hinsichtlich ihrer Nomenklaturen, thematischen Komplexität und Aufnahmemethoden unterscheiden. Eine besondere Herausforderung bestand dabei in der Erarbeitung von reproduzierbaren Datenintegrationsregeln sowie in der Formalisierung von Expertenwissen. Die Datenintegrationsprozedur ist für die Substratmerkmale Feinboden, Genese sowie Carbonat- und Skelettgehalt angewendet worden. Die Transformation der bodentypologischen Informationen erfolgte durch eine direkte Interpretation der Bodenschätzung, der Forstlichen Standortskartierung der Geologischen Karte 1:25 000.

Der wichtigste Schritt der Datenintegration bestand in der Entwicklung von Transformationstabellen, in denen die Regeln zur inhaltlichen Übersetzung der Ausgangsdatsätze in die KA 5-Nomenklatur formalisiert worden sind. Voraussetzung war die schichtweise Zerlegung der Ausgangsdatsätze. Dazu wurden an die Nomenklatur der Ausgangsdatsätze angepasste automatische Prozeduren zur Trennung von Zeichenketten entwickelt.

Bei der Klassifikation wurden die Transformationsergebnisse schichtweise zusammengefasst, wobei in Abhängigkeit vom Ausgangsdatsatz Wichtungen berücksichtigt worden sind. Die anschließende Typisierung aggregierte die schichtspezifischen Klassifikationsergebnisse zu Zeichenketten. Als Ergebnis konnten für jedes Zielmerkmal, jede Schicht und jede Bezugseinheit Qualitätsmaße abgeleitet werden.

Die Datenintegrationsschritte wurden in ein ProBoSA-System als ausführbare Programme zusammengefasst. Innerhalb des ProBoSA-Systems existieren Schnittstellen, um Expertenwissen reproduzierbar vorzuhalten. Das betrifft vor allem die Erstellung von Transformationstabellen und die Datenwichtung bei der Klassifikation der Zielmerkmale. Weiterhin kann die ProBoSA-Prozedur auf beliebige Bezugseinheiten angewendet werden. Schließlich erlaubt die offene Struktur des ProBoSA-Systems die Integration weiterer Komponenten. So ist innerhalb des Projektes das Datenintegrationsergebnis um Relieffparameter und -klassen erweitert worden.

¹⁰Achtung! Bei einer erneuten Klassifikation muss dieser Ordner vorher geleert werden!

5 Ausblick

Die Anwendung von geostatistischen Methoden oder Verfahren des maschinellen Lernens erfordert die Identifikation von Trainingsdatensätzen hoher Primärdatenqualität. In diesem Zusammenhang kann das Datenintegrationsergebnis als entscheidende Vorstufe des Sampling-Prozesses betrachtet werden, das es eine schichtweise Bewertung der Datenqualität sowie die Identifikation von Zielklassen und -parametern für die Anwendung von Bodenprognosealgorithmen erlaubt.

Literatur

- Abiy, M. (2008). *Reliefbezogene Validierung von Grablochbeschrieben der Bodenschätzung in Sachsen-Anhalt*. Technical report, Dokumentationsbericht im Auftrag des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- Ad-hoc Boden (1982). *Bodenkundliche Kartieranleitung KA 3*. Hannover. 3. Auflage.
- Ad-hoc Boden (1994). *Bodenkundliche Kartieranleitung KA 4*. Hannover: Schweizerbart Science Publishers. 4. Auflage.
- AG Boden (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5*. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers. 5. Auflage.
- Altermann, M., Steininger, M., & Rosche, O. (2001). *Erarbeitung von betrieblichen Handlungsrichtlinien für die schlagbezogene standortgerechte Bodenbewirtschaftung im Rahmen umweltschonender Produktionsverfahren*. Technical report, Mitteldeutsches Institut für angewandte Standortkunde und Bodenschutz (MSIB) im Auftrag des Ministeriums für Raumordnung, Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalt.
- Altermann, M., Steininger, M., & Rosche, O. (2003). *Zur Ableitung der Bodenausbildung (Substrataufbau, Bodentyp) aus den Unterlagen der Bodenschätzung (digitalisierte Grablochbeschriebe einschließlich räumlicher Zuordnung) für das Land Sachsen-Anhalt*. Technical report, Mitteldeutsches Institut für angewandte Standortkunde und Bodenschutz (MSIB) im Auftrag des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt.
- Behrens, T. & Scholten, T. (2003a). *Entwicklung einer Bodenprognosekarte für das Gebiet S Schwarze Elsterunter Nutzung eines Künstlichen Neuronalen Netzes*. Technical report, Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.
- Behrens, T. & Scholten, T. (2003b). *Synthetische Konzeptbodenkarte für das Schwarzerdegebiet in Sachsen-Anhalt*. Technical report, Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.
- Bock, M., Boehner, J., Conrad, O., Koethe, R., & Ringeler, A. (2007). *Methods for creating Functional Soil Databases and applying Digital Soil Mapping with SAGA GIS*, (pp. 149–162). Scientific and Technical Research series. Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg.
- Brenning, A. (2008). Statistical geocomputing combining R and SAGA: The example of landslide susceptibility analysis with generalized additive models. In L. M. J. Boehner, T. Blaschke (Ed.), *SAGA – Seconds Out*, volume 19 of *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsoekologie* (pp. 23–32).
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhrner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991–2007.
- Dehner, U. (2005). *Entwicklung von Standardprofilen für Klassenzeichen der Bodenschätzung*. Technical report, Dokumentationsbericht im Auftrag des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- Fraley, C. & Raftery, A. (2002). Model-Based clustering, discriminant analysis, and density estimation. *Journal of the American Statistical Association*, 97(458), 611–631.
- Guttek, U. (1999). Digitalisierung von Altdaten der Bodenschätzung. *Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt*, 32, 3–17.
- Hartmann, K.-J. (2005). Bereitstellung von Informationen der bodenkundlichen Landesaufnahme zur Bewertung von Bodenfunktionen. In M. Möller & H. Helbig (Eds.), *GIS-gestützte*

- Bewertung von Bodenfunktionen – Datengrundlagen und Lösungsansätze (pp. 27–34). Heidelberg: Wichmann.
- Hartmann, K.-J. (2006). Bodenkundliche Basisinformationen. In D. Feldhaus & K.-J. Hartmann (Eds.), *Bodenbericht Sachsen-Anhalt*, Mitteilungen zu Geologie und Bergwesen in Sachsen-Anhalt, 11 (pp. 72–87). Halle (Saale): Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.
- Hartmann, K.-J. (2014). Die vorläufige Bodenkarte (VBK 50) des Landes Sachsen-Anhalt – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. In S. Wansa & K.-J. Hartmann (Eds.), *Bodenbericht Sachsen-Anhalt*, number 18 in Mitteilungen zu Geologie und Bergwesen in Sachsen-Anhalt (pp. 5–20). Halle (Saale): Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.
- Kainz, W. & Fleischer, C. (2006). Böden in Sachsen-Anhalt. In D. Feldhaus & K.-J. Hartmann (Eds.), *Bodenbericht Sachsen-Anhalt*, Mitteilungen zu Geologie und Bergwesen in Sachsen-Anhalt, 11 (pp. 33–52). Halle (Saale): Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.
- Kühn, D. & Müller, H. (2009). Probleme der Interpretation der Bodenschätzung bei der Kartierung in Brandenburg. In *Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft Böden Bonn*.
- Lieberoth, I., Dunkelgold, P., Gunia, W., Altermann, M., Kühn, D., & Thiere, J. (1993). *Zuordnung der Körnungsarten gemäß TGL 24300 in die Bodenartenansprache nach KA 4*. Technical report, unveröffentlicht.
- Möller, M. & Koschitzki, T. (2007). *Qualitätsverbesserung der Vorläufigen Bodenkarte 1:50.000 (VBK 50)*. Technical report, Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB); Ansprechpartner: Dr. Klaus-Jörg Hartmann, Halle (Saale).
- Möller, M., Koschitzki, T., Hartmann, K.-J., & Jahn, R. (2012). Plausibility test of conceptual soil maps using relief parameters. *CATENA*, 88(1), 57–67.
- Möller, M., Koschitzki, T., Kastler, M., Hartmann, K.-J., & Jahn, R. (2009). *Vervollständigung, Spezifizierung und Validierung der gebietsweise vorliegenden Bodenprognosekarte für die Elbe-Überschwemmungsgebiete*. Technical report, Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt; Ansprechpartner: Ursula Anacker, Halle (Saale).
- Möller, M. & Volk, M. (2015). Effective map scales for soil transport processes and related process domains – statistical and spatial characterization of their scale-specific inaccuracies. *Geoderma*, 247/248, 151–160.
- Möller, M., Volk, M., Friedrich, K., & Lymburner, L. (2008). Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(3), 419–430.
- NLFB (2003). *Bearbeitung, Übersetzung und Auswertung digitaler Bodenschätzungsdaten*. Number 1 in Arbeitshefte Boden. Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung.
- R Core Team (2015). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Schmidt, G., Möller, M., Wurbs, D., Rosche, O., & Steininger, M. (2009). *Qualifizierung von Daten der Bodenschätzung als Grundlage für großmaßstäbige Bodenfunktionsbewertungen*. Technical report, Dokumentation im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt, Halle (Saale), Germany.
- Schmidt, R. & Diemann, R. (1981). *Erläuterung zur Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftli-*

- chen Standortskartierung (MMK). Eberswalde: Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften – Bereich Bodenkunde/Fernerkundung.
- Scholten, T., Behrens, T., & Henningsen, P. (2001). *Synthetische Konzeptbodenkarte für das Gebiet des Ostharzes*. Technical report, Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.
- Schwanecke, W. (1993). *Merkmalstabellen für Haupt- und Lokalbodenformen der forstlichen Standortserkundung (Bodenformenkatalog)*. Technical report, Sächsische Landesanstalt für Forsten, Graupe.
- Spatialreference (2016). Catalogs of Spatial Reference Systems.
- TGL 24300 (1986). *Standortaufnahme von Böden/Aufnahme landwirtschaftlich genutzter Standorte*. Leipzig: Verlag für Standardisierung.
- Thiere, J. & Altermann, M. (1997a). *Bestimmende Körnungs- und Torfarten für ausgewählte Substrattypen als Kriterium zur inhaltlichen Kennzeichnung von Substrat-Flächentypen*. Technical report, unveröffentlicht.
- Thiere, J. & Altermann, M. (1997b). Vergleichende Standortbeurteilung als Voraussetzung für Bodenbewertungen. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 85, 1625–1628.
- Thiere, J., Altermann, M., Lieberoth, I., & Rau, D. (1991). Zur Beurteilung landwirtschaftlicher Nutzflächen nach technologisch wirksamen Standortbedingungen. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 35, 171–183.
- Thiere, J., Altermann, M., & Schindler, U. (2000). Nutzung von flächentypen zur arealbezogenen transformation von bodenwasserhaushaltsgrößen. In A. Bauriegel, J. Ilsemann, C. Michel, & R. van der Ploeg (Eds.), *Boden – Objekt menschlicher Nutzung und Forschung*, volume 3 of *Horizonte – Herrenhäuser Forschungsbeiträge zur Bodenkunde* (pp. 163–181).
- Thiere, J., Altermann, M., Schindler, U., & Steininger, M. (1997). Nutzung von Flächentypen zur Transformation von Bodenparametern. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 91, 1128–1131.
- Wallbaum, E. (1991). *Ableitung von Informationen zur Bodenkartierung aus Ergebnissen der Reichsbodenschätzung*. PhD thesis.