

Regressionsgleichungen zur Abschätzung der Summe der austauschbaren Kationen in den landwirtschaftlich genutzten Böden Ostösterreichs

O. H. Danneberg

Regression equations for the estimation of the sum of exchangeable cations for the soils of Eastern Austria under agricultural use

1. Einleitung

Der Kationenaustausch gehört zu den grundlegenden Eigenschaften der Böden; sie erhalten dadurch die Fähigkeit, Stoffe im Kreislauf Boden-Pflanze zu führen und den Stoffaustrag in benachbarte Ökosysteme stark einzuschränken. Die wichtigsten Träger des Kationenaustausches sind die Tonminerale und die Huminstoffe.

Die Bindung austauschbarer Kationen setzt voraus, daß die Oberfläche der Austauscher negativ geladen ist. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Arten dieser Ladung, nämlich die durch isomorphen Ersatz von höherwertigen Kationen in den Silikatschichten entstehende, permanente Ladung und die durch Dissoziation von Protonen aus sauren, funktionellen Gruppen entstehende variable Ladung;

während die erstere vom pH-Wert unabhängig ist, zeigt die letztere eine deutliche Abhängigkeit vom pH-Wert (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1992).

Zur Quantifizierung des Kationenaustausches dient die Kationenaustauschkapazität (KAK); sie wurde früher in mVal/100 g Boden (z. B. HELLING et al., 1964), später in mmol_c · kg⁻¹, (z. B. BLUM et al., 1989) angegeben; neuerdings wird sie in Zentimol Ionenäquivalent pro kg Boden (cmol_c · kg⁻¹) berechnet (z. B. TURPAULT et al., 1996), da man so gleiche Zahlen wie die früher verwendeten erhält. Auch die KAK zeigt eine Abhängigkeit vom pH-Wert; man unterscheidet die beim pH-Wert des Bodens wirksame, effektive KAK (KAK_{eff}) von der bei erhöhtem pH-Wert ermittelten, potentiellen KAK (KAK_{pot}) (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1992).

Summary

The data from the soil quality network programs of Lower Austria and of the Burgenland were used to obtain multiple regression equations for an estimation of cation exchange capacities from clay and humus contents.

The best regressions were obtained when the data were grouped as well according to soil typology as to the pH-values of the soils. A grouping according to soil typology or to the pH-values of soils alone resulted in somewhat weaker regressions.

Key words: Regression equations, sum of exchangeable cations, clay contents, humus contents.

Zusammenfassung

Aus dem Datenmaterial der zusammengeführten Bodenzustandsinventuren von Niederösterreich und dem Burgenland wurden durch Multiple Regression Schätzgleichungen zur Ermittlung der Kationenaustauschkapazität aus dem Gehalt an Humus und an Ton abgeleitet. Die straffsten Beziehungen ergaben sich für Datenmaterial, das sowohl in bodenkundliche Einheiten und Untereinheiten als auch nach dem pH-Wert gegliedert war. Eine Gliederung nur nach bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten oder nur nach dem pH-Wert ergab weniger straffe Beziehungen.

Schlüsselwörter: Regressionsgleichungen, Summe austauschbarer Kationen, Tongehalt, Humusgehalt.

2. Zielsetzung

Die Profilbeschreibungen der Österreichischen Bodenkartierung, die nahezu flächendeckend für die landwirtschaftlich genutzten Böden Österreichs zur Verfügung steht, enthalten keine Angaben zur KAK. Dagegen werden Angaben zum pH-Wert, zum Rohton Gehalt ($< 2\mu\text{m}$) und zum Humusgehalt gemacht (DANNEBERG, 1986). Bei Vorliegen geeigneter Schätzgleichungen sollten sich daraus annähernde Werte für die KAK ermitteln lassen. Die vorliegende Arbeit dient der Ableitung solcher Schätzgleichungen.

3. Datengrundlage

Die Bodenzustandsinventuren (BZI's) von Niederösterreich (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1994) und dem Burgenland (BUNDESAMT UND FORSCHUNGSZENTRUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, 1996) enthalten alle für die Ableitung von Schätzgleichungen nötigen Daten. Sie stützen sich auf ein flächendeckendes, regelmäßiges Netz von Probenahmepunkten und stellen damit unverzerrte Stichproben aus den Grundgesamtheiten „landwirtschaftliche Nutzfläche des Gebietes“ dar. DANNEBERG et al., 1998, haben die BZI's der beiden Bundesländer zusammengeführt und das Datenmaterial in Einheiten und Untereinheiten der Art „Bodentyp auf bodenbildendem Substrat“ gegliedert. Diese Einheiten und besonders die Untereinheiten sollten in sich weitgehend einheitlich sein, auch was die Zusammensetzung ihrer Rohtonfraktion und ihres Huminstoffsystems betrifft. Nur unter dieser Voraussetzung darf man straffe Beziehungen und befriedigende Bestimmtheitsmaße erwarten (WRIGHT und FOSS, 1972; WILDING und RUTLEDGE, 1966; HELLING et al., 1964). Der von DANNEBERG et al. (1998), zur Zusammenführung der beiden Länder-BZI's benutzte Arbeitsfile, der die Daten von 1.623 Oberböden (alle 0–20 cm) umfaßt, wurde auch der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegt.

Die Ermittlung der KAK erfolgte in den BZI's beider Länder nach den von BLUM et al. (1989) vorgeschlagenen Methoden. Für Böden mit pH-Werten $\geq 6,5$ wurden die austauschbaren Kationen Ca, Mg, K und Na in mit Triethanolamin gepufferter BaCl_2 -Lösung bestimmt, die KAK wurde als Summe dieser Ionen berechnet. Für Böden mit pH-Werten $< 6,5$ dagegen wurden die austauschbaren Kationen Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn und H in ungepufferter BaCl_2 -Lösung bestimmt; die KAK entsprach auch hier der Summe der genannten Ionen (ÖNORM L 1086–89).

4. Rechentchnik

Die Verwendung der Multiplen Regression zur Ableitung des Zusammenhanges von KAK mit dem Ton- und Humusgehalt geht wahrscheinlich auf WILLIAMS (1932) zurück. Ihre Anwendbarkeit ist theoretisch an das Vorliegen einer multiplen Normalverteilung gebunden (BAHRENBURG et al., 1990), eine Voraussetzung, die für Bodendaten in der Regel nicht zutrifft. Trotzdem wurde die multiple Regression in der Literatur für den vorliegenden Zweck ziemlich bedenkenlos angewandt (HELLING et al., 1964; WILDING und RUTLEDGE, 1966; YUAN et al., 1967; WRIGHT und FOSS, 1972; EVANS, 1982; TURPAULT et al., 1996; RAO et al., 1996). Nach BAHRENBURG et al. (1990) sind die meisten statistischen Tests ziemlich robust gegenüber einer Verletzung der Forderung nach Normalverteilung.

Die Regressionsgleichung hat die Form

$$Y = C + B_1X_1 + B_2X_2$$

wobei Y die abhängige Variable, hier die KAK darstellt; X_1 und X_2 bilden die unabhängigen Variablen, hier den Ton- und den Humusgehalt. Die Gleichung setzt einen linearen Beitrag von Ton und Humus zur KAK voraus und schließt Wechselwirkungen zwischen Ton und Humus aus (YUAN et al., 1967).

Zur Berechnung der Regressionsgleichungen wurde in der vorliegenden Arbeit das Programmpaket SPSS für WINDOWS und seine Prozedur REGRESSION eingesetzt (BÜHL und ZÖFEL, 1994).

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1 Eigenschaften des Datensatzes

Die Abbildungen 1, 2 und 3 zeigen die Verteilungen der Variablen „Summe austauschbare Kationen“, „Rohton“ und „Humus“; die statistischen Kennzahlen dieser Werteverteilungen sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Die Werteverteilungen weichen durchwegs von der Normalverteilung ab. Eine Möglichkeit zur – etwa logarithmischen – Transformation der Daten zur Erzielung einer besseren Annäherung an die Normalverteilung besteht nicht, da das Modell die Verwendung der untransformierten Daten verlangt.

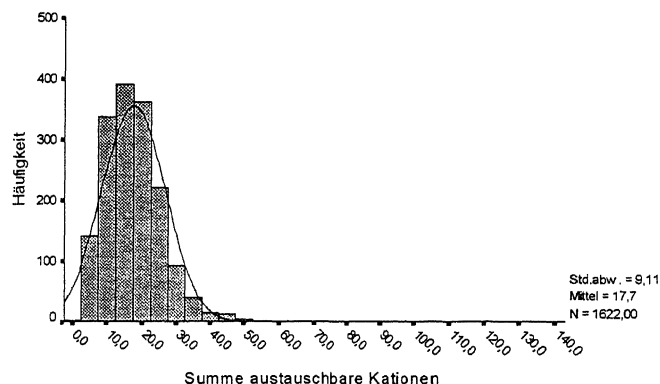


Abbildung 1: Werteverteilung für die Summe der austauschbaren Kationen (in $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$)

Figure 1: Histogram for sum of exchangeable cations (in $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$)

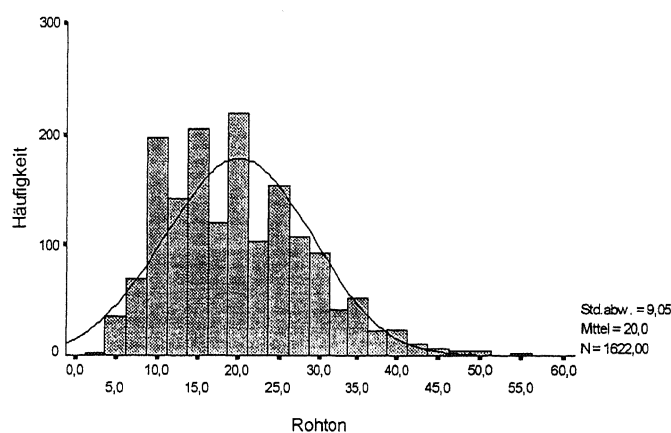


Abbildung 2: Werteverteilung für Rohton (in %)

Figure 2: Histogram for clay (in %)

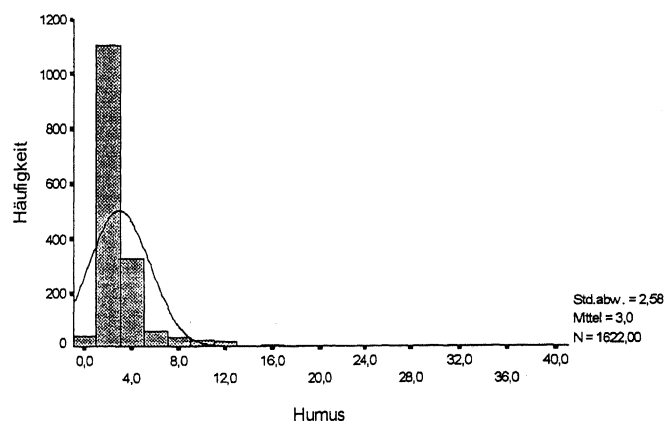


Abbildung 3: Werteverteilung für Humus (in %)

Figure 3: Histogram for soil organic matter (in %)

Tabelle 1: Statistische Kennzahlen für Summe austauschbare Kationen, Rohton und Humus

Table 1: Summary statistics for sum of exchangeable cations, clay and soil organic matter

Summe austauschbare Kationen (in $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$)					
n	1622	MW	17,69	Med	16,74
Min	2,47	Max	141,95	Schiefe	2,85
Kurtosis	26,51	25 %	11,74	75 %	22,31
Rohton (in %)					
n	1622	MW	20,03	Med	19
Min	1	Max	61	Schiefe	0,76
Kurtosis	0,66	25 %	13	75 %	26
Humus (in %)					
n	1622	MW	2,95	Med	2,2
Min	0,4	Max	40,2	Schiefe	4,88
Kurtosis	41,65	25 %	1,7	75 %	3,2

5.2 Schätzgleichung für alle Böden

Die Schätzgleichung für alle Böden ($n = 1623$) lautet

$$Y = 1,5617 + 0,5689 \cdot X_1 + 1,6021 \cdot X_2$$

Die Regression ist gesichert, der Korrelationskoeffizient R beträgt 0,76, das Bestimmtheitsmaß R^2 demnach 0,58. Die Konstante C ist gesichert von Null verschieden.

Tabelle 2 faßt die Kenndaten dieser sowie der folgenden, nach dem pH-Wert der Böden gruppierten Schätzgleichungen zusammen.

5.3 Gruppierung nach dem pH-Wert der Böden

Gruppiert man die Böden nach dem pH-Wert in Gruppen der Breite einer halben pH-Einheit, so erhält man die 7 Schätzgleichungen, deren Kenndaten in Tabelle 2 wiedergegeben sind.

Die Aufteilung nach pH-Wert-Gruppen ergibt in allen Fällen noch ausreichende Besetzungen, die niedrigste liegt bei $n = 52$; alle 7 Regressionen sind gesichert. Bei 5 der 7 Schätzgleichungen ergibt sich durch die Aufteilung ein deutlich höherer Korrelationskoeffizient, der höchste Wert für R erreicht 0,93, R^2 demnach 0,87; bei 2 der Gleichungen, im sauren pH-Bereich, fallen dagegen die Werte für R bis auf minimal 0,66 ab, was einer Bestimmtheit von nur mehr 0,44 entspricht.

Die partiellen Regressionskoeffizienten B für Humus nehmen erwartungsgemäß mit fallendem pH-Wert ab, da die

Tabelle 2: Kenndaten der Schätzgleichungen bei Gruppierung nach dem pH-Wert
 Table 2: Grouping according to pH-value. Characteristics for regression equations

pH-Stufen	n	Sig (Reg)	R	C	Sig (C)	B (Ton)	B (Humus)
alle Böden	1623	***	0,7626	1,5617	***	0,5689	1,6021
pH $\geq 7,0$	760	***	0,9042	6,4231	***	0,4042	2,5208
pH $< 7,0 \geq 6,5$	124	***	0,9348	5,0423	***	0,4062	2,1001
pH $< 6,5 \geq 6,0$	163	***	0,8821	3,8966	***	0,423	1,5056
pH $< 6,0 \geq 5,5$	201	***	0,8206	3,5014	***	0,3908	1,1236
pH $< 5,5 \geq 5,0$	197	***	0,7458	3,2998	***	0,3753	0,563
pH $< 5,0 \geq 4,5$	125	***	0,8109	2,2137	***	0,3879	0,19
pH $< 4,5$	52	***	0,6636	2,7952	**	0,2474	0,335

sauren Gruppen der Huminstoffe weniger stark dissoziieren. Bei pH-Werten über 7 entsprechen einem Zuwachs von 1 Prozent Humus $2,5 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ an KAK, bei pH-Werten unter 4,5 nur mehr $0,33 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$. Auch bei den partiellen Regressionskoeffizienten für Ton ist eine, allerdings viel geringere Abhängigkeit vom pH-Wert festzustellen, hier geben aber doch die permanenten Ladungen den Ausschlag.

Die Regressionskonstanten C sind durchwegs signifikant von Null verschieden; ihr Wert steigt mit der Aufteilung recht deutlich an.

5.4 Gruppierung nach bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten

Tabelle 3 stellt die Schätzgleichungen zusammen, die sich nach einer Gruppierung in bodenkundliche Einheiten und Untereinheiten nach DANNEBERG et al. (1998) ergeben. Die Besetzungen der Einheiten/Untereinheiten mit Rasterpunkten sind sehr unterschiedlich, für einige Untereinheiten sinkt n auf 1 ab. Bei Besetzungen unter 10 ergeben sich in der Regel – es gibt Ausnahmen – keine signifikanten Regressionen mehr. Die überwiegende Zahl der Schätzgleichungen jedoch ist signifikant, die meisten davon sind gesichert.

Die Korrelationskoeffizienten R sind bei den meisten Einheiten/Untereinheiten höher als bei der Gleichung für alle Böden. Einige Einheiten, so besonders die kalkfreien Felsbraunerden, zeigen jedoch ein gegenüber allen Böden deutlich vermindertes R.

Die Regressionskonstante C ist nicht mehr in allen Gleichungen signifikant von Null verschieden. So, wie es das Regressionsmodell eigentlich verlangt, nähert sie sich häufig dem Wert Null.

Die partiellen Regressionskoeffizienten B für Ton und für Humus zeigen deutliche Schwankungen, die wohl vorwie-

gend den unterschiedlichen Eigenschaften der Tonminerale und der Huminstoffe der Einheiten/Untereinheiten zuzuordnen sind. B (Ton), das bei Verrechnung aller Böden etwa 0,57 ausmacht, kann bei kalkfreien Gleyen auf etwa 0,66, bei den untypischen Böden (DANNEBERG et al., 1998) sogar auf 0,80 ansteigen; andererseits kann es bei vergleyten, kalkfreien Felsbraunerden auf 0,29, bei der Untereinheit 69 der kalkhaltigen Kolluvien sogar auf 0,22 absinken. B (Humus) beträgt bei gemeinsamer Verrechnung 1,60; dieser Wert kann bei Untereinheit 33 der Paratschernoseme auf fast 5,5 ansteigen, aber auch – bei kalkfreien Gleyen – auf 0,76 absinken. Zusätzlich kommt es vor, daß B (Ton) oder B (Humus) nicht mehr signifikant von Null verschieden ist, d.h. daß der Beitrag der jeweiligen Komponente entweder überhaupt oder in der Konstanten C verschwindet.

5.5 Die Aufteilung nach bodenkundlichen Einheiten und nach pH-Werten

Die hohe Zahl von Rasterpunkten, die zur Verrechnung zur Verfügung steht, ermutigt zu dem Versuch einer Aufteilung nach pH-Werten innerhalb der Einheiten/Untereinheiten. Die dabei erhaltenen Schätzgleichungen sind, soweit sich überhaupt signifikante Gleichungen ergeben, in den 7 Teilen der Tabelle 4 zusammengefaßt.

Selbstverständlich sind nun bei weitem nicht mehr alle der möglichen Schätzgleichungen so mit Daten besetzt, daß die Regressionen signifikant werden. Tabelle 4.7 etwa, die die Böden mit pH-Werten $< 4,5$ zusammenfaßt, zeigt nur mehr für alle Böden dieses pH-Bereiches die – bereits in Tabelle 2 erwähnte – gesicherte Regression, jede weitere Aufteilung führt zu nicht signifikanten Beziehungen.

Wo sich jedoch von der Besetzung her gesicherte Beziehungen ergeben, sind diese die straffsten und zeigen Werte

Tabelle 3: Kenndaten der Schätzgleichungen bei Gruppierung nach bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten
 Table 3: Grouping according to pedological units and subunits – Characteristics for regression equations

Einheit/Untereinheit	n	Sig (Reg)	R	C	Sig (C)	B (Ton)	B (Humus)
alle Böden	1623	***	0,7626	1,5617	***	0,5689	1,6021
kh Auböden	50	***	0,8340	6,9160	***	0,4268	2,1084
Untereinheit 1	49	***	0,8400	7,0670	***	0,4101	2,0900
Untereinheit 2	1	n.s.					
kf Auböden	9	n.s.					
kh Gleye	20	***	0,9272	7,6032	*	0,4413	2,3269
Untereinheit 4	14	***	0,9306	6,1388	n.s.	0,5183	2,2654
Untereinheit 5	6	*	0,9642	7,0575	n.s.	n.s.	4,5303
kf Gleye	61	***	0,7575	-1,2157	n.s.	0,6567	0,7555
Untereinheit 6	29	***	0,8127	-1,1053	n.s.	0,6572	0,8550
Untereinheit 7	10	n.s.					
Untereinheit 8	22	**	0,6914	1,0264	n.s.	n.s.	1,4705
Pseudogleye	116	***	0,7899	2,3518	*	0,4304	1,2704
Untereinheit 9	33	***	0,8143	3,0543	*	0,3390	1,6977
Untereinheit 10	32	***	0,8706	0,6791	n.s.	0,4800	1,8978
Untereinheit 11	14	***	0,8909	0,0055	n.s.	0,4208	n.s.
Untereinheit 12	11	*	0,7760	0,4278	n.s.	0,3916	n.s.
Untereinheit 13	26	***	0,7569	2,5436	n.s.	0,4887	n.s.
Reliktpseudogleye	40	***	0,6327	-3,3062	n.s.	0,4391	3,7381
Solonetze, Solontschake	2	n.s.					
kh Anmoore, versalzt	3	n.s.					
kh Feuchtschw., versalzt	13	*	0,7579	19,5953	***	n.s.	0,7946
Anmoore	9	n.s.					
kh Kulturrohböden, Rigolböden	70	***	0,9357	3,9583	***	0,4846	2,5315
Untereinheit 21	48	***	0,8671	3,6200	**	0,4922	2,7922
Untereinheit 22	22	***	0,9760	3,8259	***	0,5017	2,1290
kf Kulturrohböden, Rigolböden	11	*	0,7667	4,4326	n.s.	0,5147	n.s.
Untereinheit 23	9	n.s.					
Untereinheit 24	2	n.s.					
Tschernoseme, Br. Tschernoseme	339	***	0,8309	5,6984	***	0,4403	2,4805
Untereinheit 25	169	***	0,7655	4,6239	***	0,4376	3,2981
Untereinheit 26	78	***	0,8971	4,8884	***	0,4479	2,4799
Untereinheit 27	24	***	0,8874	3,1888	n.s.	0,3646	3,8642
Untereinheit 28	13	**	0,8443	7,2347	n.s.	n.s.	3,9953
Untereinheit 29	24	***	0,8784	7,2137	**	0,4003	2,7066
Untereinheit 30	12	**	0,8490	9,6005	*	n.s.	2,1998
Untereinheit 31	12	**	0,8245	-0,8592	n.s.	n.s.	n.s.
Untereinheit 32	7	n.s.					
Paratschernoseme	31	***	0,8145	1,952	n.s.	n.s.	4,1509
Untereinheit 33	9	**	0,8905	10,5549	n.s.	n.s.	5,4805
Untereinheit 34	22	***	0,7852	-1,9912	n.s.	0,5308	3,7483
kh Feuchtschwarzerden	76	***	0,7858	8,6817	***	0,3393	3,0305
Untereinheit 35	47	***	0,7369	9,5709	**	0,3076	3,0603
Untereinheit 36	11	***	0,9651	5,3777	n.s.	0,5162	2,7893
Untereinheit 37	18	***	0,8022	10,4214	**	0,3495	n.s.
kf Feuchtschwarzerde	8	*	0,8837	0,9327	n.s.	n.s.	n.s.

Tabelle 3 (Fortsetzung): Kenndaten der Schätzgleichungen bei Gruppierung nach bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten
 Table 3 (continuation): Grouping according to pedological units and subunits – Characteristics for regression equations

Einheit/Untereinheit	n	Sig (Reg)	R	C	Sig (C)	B (Ton)	B (Humus)
Rendsinen, Pararendsinen	33	***	0,8100	20,0455	***	n.s.	1,5124
Untereinheit 39	12	***	0,9402	11,5801	**	0,4384	1,7852
Untereinheit 40	9	n.s.					
Untereinheit 41	12	***	0,9767	6,6599	n.s.	0,4389	1,9697
Ranker	11	n.s.					
kh Felsbraunerden	41	***	0,6379	11,5167	**	n.s.	1,3863
Untereinheit 43	26	**	0,6172	12,0160	n.s.	n.s.	1,8425
Untereinheit 44	15	***	0,9494	7,0261	**	0,5430	0,9046
kf Felsbraunerden	294	***	0,4484	4,2312	***	0,4038	n.s.
Untereinheit 45	100	***	0,4693	6,2820	***	n.s.	0,8947
Untereinheit 46	82	*	0,3309	4,8943	**	0,4697	n.s.
Untereinheit 47	47	*	0,3779	4,9749	*	n.s.	0,8476
Untereinheit 48	20	***	0,7983	5,9900	**	0,4466	n.s.
Untereinheit 49	12	*	0,7888	-5,4660	n.s.	0,6892	n.s.
Untereinheit 50	33	**	0,5761	3,9508	n.s.	n.s.	1,4420
kh Felsbraunerden, vergleyt	6	n.s.					
kf Felsbraunerden, vergleyt	32	*	0,5124	6,4866	**	0,2893	n.s.
Untereinheit 52	15	n.s.					
Untereinheit 53	17	*	0,5977	6,2827	n.s.	0,3842	n.s.
kh Lockersedimentbraunerden	101	***	0,8867	3,7650	***	0,4931	2,1601
Untereinheit 54	46	***	0,8056	7,4525	***	0,4026	n.s.
Untereinheit 55	16	***	0,8719	6,2792	n.s.	0,4745	1,9366
Untereinheit 56	15	**	0,7361	5,0566	n.s.	0,6163	n.s.
Untereinheit 57	24	***	0,9440	0,9283	n.s.	0,5668	2,2883
kf Lockersedimentbraunerden	47	***	0,6980	3,2256	n.s.	0,4196	1,3125
Untereinheit 58	9	n.s.					
Untereinheit 59	38	***	0,6655	5,1562	*	0,3383	1,3945
kh Lockersedimentbraunerden, vergleyt	16	n.s.					
kf Lockersedimentbraunerden, vergleyt	59	***	0,6774	4,9742	***	0,3253	1,1692
Untereinheit 61	17	***	0,7979	1,6966	n.s.	0,3703	2,2389
Untereinheit 62	13	n.s.					
Untereinheit 63	10	**	0,8590	-0,9874	n.s.	0,3497	3,5044
Untereinheit 64	19	*	0,5896	5,1975	n.s.	0,3466	n.s.
Parabraunerden	13	**	0,8593	-1,7298	n.s.	0,4945	n.s.
Braunlehme, Reliktböden	35	***	0,8463	3,2210	n.s.	0,3770	1,8518
Untereinheit 66	14	***	0,8741	1,2221	n.s.	0,5156	1,6511
Untereinheit 67	21	**	0,7029	5,4956	n.s.	0,3125	1,3918
kh Kolluvien	53	***	0,8216	6,9204	***	0,3424	2,1535
Untereinheit 68	33	***	0,8643	6,2564	***	0,4136	1,6909
Untereinheit 69	20	***	0,8063	7,3360	***	0,2166	3,4162
kh Kolluvien, vergleyt	11	**	0,9035	3,7923	n.s.	0,5610	n.s.
Planieböden	5	*	0,9949	10,2136	*	n.s.	n.s.
Untypische Böden	8	**	0,9412	-0,3050	n.s.	0,7969	n.s.

für R, die die bisherigen deutlich übersteigen. So haben z.B. die Tschernoseme zusammen nach Tabelle 3 ein R von 0,83; nach pH-Werten geteilt ergeben sich Werte für R von 0,84, 0,88 und 0,94. Die offenbar problematische Gruppe der kalkfreien Felsbraunerden zeigt gemeinsam ein R von 0,45,

auf pH-Werte aufgeteilt ergeben sich Werte von 0,97, 0,88, 0,65, 0,58 und 0,61. Die kombinierte Aufteilung nach bodenkundlichen Einheiten/Untereinheiten und nach pH-Wertegruppen ergibt also ohne Zweifel die besten Beziehungen.

Tabelle 4/1: Kenndaten der Schätzgleichungen bei Gruppierung nach Bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten. Böden mit pH-Werten $\geq 7,0$
Table 4/1: Grouping according to pedological units and subunits and pH-values – Soils with pH-values $\geq 7,0$. Characteristics for regression equations

Einheit/Untereinheit	n	Sig (Reg)	R	C	Sig (C)	B (Ton)	B (Humus)
pH ≥ 7 , alle Böden	760	***	0,9042	6,4231	***	0,4042	2,5208
kh Auböden	48	***	0,8371	7,0824	***	0,4267	2,0806
Untereinheit 1	47	***	0,8434	7,2269	***	0,4102	2,0632
Untereinheit 2	1						
kh Gleye	15	***	0,9491	8,3201	*	0,4451	2,4302
Untereinheit 4	10	***	0,9745	7,3274	n.s.	0,5546	2,3018
Untereinheit 5	5						
Salzböden	18	***	0,9554	18,4006	**	n.s.	2,8157
kh Feuchtschw., versalzt	13	*	0,7579	19,5953	***	n.s.	0,7946
Anmoore	5	*	0,9864	0,6634	n.s.	n.s.	2,6063
kh Kuturrohböden, Rigolböden	68	***	0,9285	3,7712	***	0,4866	2,6616
Untereinheit 21	48	***	0,8671	3,6200	**	0,4922	2,7922
Untereinheit 22	20	***	0,9722	3,6974	**	0,5081	2,1090
Tschernoseme, Braune Tschernoseme	308	***	0,8413	5,7944	***	0,4619	2,3336
Untereinheit 25	156	***	0,7848	3,6133	**	0,4890	3,3109
Untereinheit 26	70	***	0,9023	5,8381	***	0,4816	1,8673
Untereinheit 27	23	***	0,8925	4,3673	*	0,3579	3,4938
Untereinheit 28	12	**	0,8691	6,1764	n.s.	n.s.	3,4006
Untereinheit 29	21	***	0,8849	6,8393	**	0,4331	2,6283
Untereinheit 30	12	**	0,8490	9,6006	*	0,2679	2,1998
Untereinheit 31	8	**	0,9398	1,0600	n.s.	0,5303	n.s.
kh Feuchtschwarzerden	73	***	0,8212	7,3243	***	0,3258	3,6498
Untereinheit 35	45	***	0,8021	7,0133	*	0,2791	4,1830
Untereinheit 36	11	***	0,9651	5,3777	n.s.	0,5162	2,7893
Untereinheit 37	17	***	0,8006	10,4229	**	0,3481	n.s.
Rendsinen, Pararendsinen	26	***	0,9128	12,7319	***	0,2761	1,7516
Untereinheit 39	11	***	0,9487	11,5023	**	0,4311	1,8585
Untereinheit 41	9	***	0,9539	6,8535	n.s.	0,4355	2,0134
kh Felsbraunerden	20	***	0,9462	10,5901	***	0,3191	1,7244
Untereinheit 43	9	***	0,9499	12,436	**	0,2410	1,8033
Untereinheit 44	11	***	0,9500	8,0060	*	0,5116	n.s.
kh Lockersedimentbraunerden	78	***	0,9163	4,1425	***	0,5166	1,9955
Untereinheit 54	36	***	0,8809	5,3001	**	0,4871	n.s.
Untereinheit 55	13	**	0,8666	11,7657	*	n.s.	1,6440
Untereinheit 56	9	**	0,8941	-7,5748	n.s.	0,6752	n.s.
Untereinheit 57	20	***	0,9695	3,0864	*	0,5783	1,3612
kh Lockersedimentbraunerden, vergleyst	11	*	0,8258	0,2905	n.s.	0,5758	n.s.
kh Kolluvien	53	***	0,8216	6,9204	***	0,3424	2,1535
Untereinheit 68	33	***	0,8643	6,2564	***	0,4136	1,6909
Untereinheit 69	20	***	0,8063	7,3360	***	0,2166	3,4162
kh Kolluvien, vergleyst	11	**	0,9035	3,7923	n.s.	0,5610	n.s.

Tabelle 4/2: Kenndaten der Schätzgleichungen bei Gruppierung nach Bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten. Böden mit pH-Werten $< 7,0 \geq 6,5$

Table 4/2: Grouping according to pedological units and subunits and pH-values. Soils with pH-values $< 7,0 \geq 6,5$. Characteristics for regression equations

Einheit/Untereinheit	n	Sig (Reg)	R	C	Sig (C)	B (Ton)	B (Humus)
pH $< 7 \geq 6,5$, alle Böden	124	***	0,9348	5,0423	***	0,4062	2,1001
alle Gleye (kh u. kf)	5	*	0,9845	19,0977	*	n.s.	2,2376
Pseudogleye	9	***	0,9854	5,1029	*	0,3968	1,7146
Tschernoseme, Braune Tschernoseme	21	***	0,8849	2,3934	n.s.	0,4290	3,3305
Untereinheit 25	8	*	0,8764	1,6458	n.s.	0,5287	n.s.
Untereinheit 26	6	**	0,9880	5,5197	n.s.	n.s.	3,1489
Paratschernoseme	9	**	0,9435	2,2649	n.s.	0,3075	3,7252
Feuchtschwarzerden (kh u. kf)	4	**	0,9999	3,6596	*	0,5605	1,5491
Rendsinen, Pararendsinen	4	**	0,9999	2,0674	n.s.	0,5395	2,1148
kh Felsbraunerden	8	**	0,9668	9,9758	*	n.s.	1,9221
Untereinheit 43	6	*	0,9662	9,7554	n.s.	n.s.	1,9738
kh Lockersedimentbraunerden	15	***	0,9634	-4,1534	n.s.	0,7150	2,5454

Tabelle 4/3: Kenndaten der Schätzgleichungen bei Gruppierung nach Bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten. Böden mit pH-Werten $< 6,5 \geq 6,0$

Table 4/3: Grouping according to pedological units and subunits and pH-values. Soils with pH-values $< 6,5 \geq 6,0$. Characteristics for regression equations

Einheit/Untereinheit	n	Sig (Reg)	R	C	Sig (C)	B (Ton)	B (Humus)
pH $< 6,5 \geq 6,0$, alle Böden	163	***	0,8821	3,8966	***	0,4230	1,5056
Pseudogleye	29	***	0,7214	7,0159	**	0,4202	n.s.
Untereinheit 9	9	**	0,8969	2,3566	n.s.	0,3758	2,3167
Untereinheit 10	7	*	0,8939	0,9579	n.s.	0,6656	n.s.
Untereinheit 13	8	*	0,8577	9,8646	*	0,3380	n.s.
Tschernoseme, Braune Tschernoseme	7	**	0,9494	-1,3930	n.s.	0,6014	n.s.
Paratschernoseme	10	*	0,8386	2,4551	n.s.	0,4347	n.s.
kf Felsbraunerden	34	***	0,8824	3,7456	**	0,4311	1,6099
Untereinheit 45	5	*	0,9935	13,862	n.s.	n.s.	1,9865
Untereinheit 46	15	**	0,7949	-0,2720	n.s.	0,4805	3,1079
Untereinheit 49	4	*	0,9999	8,1918	**	0,2864	1,5277
kf Lockersedimentbraunerden, vergleyt	11	**	0,8410	7,5489	n.s.	n.s.	3,3854
Braunlehme, Reliktböden	13	***	0,9376	3,8946	n.s.	0,3528	1,9898
Untereinheit 66	6	*	0,9597	4,4752	n.s.	n.s.	1,7978

Tabelle 4/4: Kenndaten der Schätzgleichungen bei Gruppierung nach Bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten. Böden mit pH-Werten $< 6,0 \geq 5,5$ Table 4/4: Grouping according to pedological units and subunits and pH-values. Soils with pH-values $< 6,0 \geq 5,5$. Characteristics for regression equations

Einheit/Untereinheit	n	Sig (Reg)	R	C	Sig (C)	B (Ton)	B (Humus)
pH $< 6,0 \geq 5,5$, alle Böden	201	***	0,8206	3,5014	***	0,3908	1,1236
kf Gleye	18	***	0,8598	1,9362	n.s.	0,5657	0,9507
Untereinheit 6	10	**	0,8721	3,7356	n.s.	0,4214	1,8543
Pseudogleye	35	***	0,9104	1,7728	n.s.	0,3771	1,8554
Untereinheit 9	12	***	0,9715	4,1327	*	n.s.	2,1311
Untereinheit 10	10	*	0,8080	4,0488	n.s.	0,3075	n.s.
Untereinheit 13	5	*	0,9760	-0,9340	n.s.	0,5739	n.s.
Reliktpseudogleye	11	*	0,7543	0,2709	n.s.	0,4287	n.s.
Untereinheit 14	11	*	0,7543	0,2709	n.s.	0,4287	n.s.
kf Felsbraunerden	61	***	0,6506	2,9268	*	0,4177	1,2398
Untereinheit 45	12	**	0,8008	5,4273	*	n.s.	1,2206
Untereinheit 47	17	*	0,6351	3,4903	n.s.	n.s.	1,3450
kf Felsbraunerden, verglejt	9	**	0,7936	3,8895	*	0,2301	1,1273
kf Lockersedimentbraunerden	8	***	0,9820	-1,4680	n.s.	0,2710	6,0230
Untereinheit 59	8	***	0,9820	-1,4680	n.s.	0,2710	6,0230
kf Lockersedimentbraunerden, verglejt	13	***	0,9241	3,2383	n.s.	0,3824	n.s.
Braunlehme, Reliktböden	8	**	0,9568	3,6219	n.s.	n.s.	2,6111
Untereinheit 67	5	*	0,9914	5,5769	n.s.	n.s.	1,6703

Tabelle 4/5: Kenndaten der Schätzgleichungen bei Gruppierung nach Bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten. Böden mit pH-Werten $< 5,5 \geq 5,0$ Table 4/5: Grouping according to pedological units and subunits and pH-values. Soils with pH-values $< 5,5 \geq 5,0$. Characteristics for regression equations

Einheit/Untereinheit	n	Sig (Reg)	R	C	Sig (C)	B (Ton)	B (Humus)
pH $< 5,5 \geq 5,0$, alle Böden	197	***	0,7458	3,2998	***	0,3753	0,5630
kf Gleye	13	**	0,7837	1,7662	n.s.	0,4367	n.s.
Pseudogleye	31	***	0,8611	1,1795	n.s.	0,3341	1,9183
Untereinheit 10	11	**	0,8603	2,1779	n.s.	0,4074	1,6053
Untereinheit 11	7	*	0,9402	-1,2107	n.s.	0,3422	n.s.
Untereinheit 13	7	**	0,9844	0,0216	n.s.	0,3699	1,4783
Reliktpseudogleye	12	*	0,7480	-7,5083	n.s.	0,4793	n.s.
Untereinheit 14	11	*	0,7465	-7,5892	n.s.	0,4849	n.s.
kf Felsbraunerden	82	***	0,5785	3,7052	***	0,3259	0,4585
Untereinheit 45	31	***	0,6568	5,1198	**	n.s.	0,7482
Untereinheit 46	21	*	0,6115	2,5992	n.s.	0,3739	n.s.
kf Lockersedimentbraunerden, verglejt	21	***	0,7501	2,9004	n.s.	0,3838	1,0569
Untereinheit 61	6	**	0,9793	-1,1476	n.s.	0,4420	n.s.

Tabelle 4/6: Kenndaten der Schätzgleichungen bei Gruppierung nach Bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten. Böden mit pH-Werten $< 5,0 \geq 4,5$ Table 4/6: Grouping according to pedological units and subunits and pH-values. Soils with pH-values $< 5,0 \geq 4,5$. Characteristics for regression equations

Einheit/Untereinheit	n	Sig (Reg)	R	C	Sig (C)	B (Ton)	B (Humus)
pH $< 5,0 \geq 4,5$, alle Böden	125	***	0,8109	2,2137	***	0,3879	0,1900
kf Gleye	16	***	0,8685	2,8211	n.s.	0,4891	n.s.
Pseudogleye	8	**	0,9204	0,3084	n.s.	0,3484	1,1275
kf Felsbraunerden	72	***	0,6142	2,8113	***	0,3472	n.s.
Untereinheit 46	13	*	0,7010	4,5262	**	n.s.	0,9099

Tabelle 4/7: Kenndaten der Schätzgleichungen bei Gruppierung nach Bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten. Böden mit pH-Werten < 4,5

Table 4/7: Grouping according to pedological units and subunits and pH-values. Soils with pH-values < 4,5. Characteristics for regression equations

Einheit/Untereinheit	n	Sig (Reg)	R	C	Sig (C)	B (Ton)	B (Humus)
pH < 4,5 - alle Böden	52	***	0,6636	2,7952	**	0,2474	0,335

6. Zusammenfassende Diskussion

Da der pH-Wert des Bodens über die Dissoziation der sauren funktionellen Gruppen und damit vor allem über den Anteil der Huminstoffe am Kationentausch entscheidet, war ein genereller Einfluß des pH-Wertes erwartet worden. Dieser zeigt sich denn auch sehr deutlich. Der partielle Regressionskoeffizient für Humus nimmt mit fallendem pH-Wert deutlich ab.

HELLING et al. (1964) fanden bei der Untersuchung von 60 Böden aus Wisconsin für B_1 (Humus) Werte von 0,62 bis 3,66, abhängig vom pH-Wert; die Werte für B_2 (Ton) lagen zwischen 0,38 und 0,64. Die Regressionsgleichungen erreichten Bestimmtheitsmaße (R^2) zwischen 0,86 und 0,92.

WILDING und RUTLEDGE (1966) erzielten Korrelationskoeffizienten (R) von 0,76 bis 0,92. Die partiellen Regressionskoeffizienten B_1 (Humus) lagen zwischen 1,54 und 3,83, die für Ton (B_2) zwischen 0,17 und 0,83.

YUAN et al. (1967) erreichten Bestimmtheitsmaße (R^2) zwischen 0,80 und 0,96, indem sie die untersuchten Böden bodenkundlich gruppieren. Die partiellen Regressionskoeffizienten für Ton lagen zwischen 0,19 und 1,28, die für Humus zwischen 1,50 und 3,97.

WRIGHT und FOSS (1972) schließlich erzielten Bestimmtheitsmaße (R^2) von 0,20 bis 0,88. Die partiellen Regressionskoeffizienten für Ton lagen zwischen 0,07 und 0,49, jene für Humus zwischen 2,00 und 3,16.

Die in dieser Arbeit erhaltenen, partiellen Regressionskoeffizienten für Humus und für Ton sind durchaus mit jenen vergleichbar, die der Literatur entnommen werden können. Sie zeigen jedoch eine beachtliche Schwankungsbreite, die offenbar den sehr unterschiedlichen Eigenschaften sowohl der Tonminerale als auch der Huminstoffsysteme der verschiedenen Böden zuzuordnen sind. Eine Unterscheidung nach bodenkundlichen Einheiten und Untereinheiten führt zu Gruppen, die weitgehend homogen sind hinsichtlich ihrer Tonminerale und ihrer Huminstoffsysteme, was sich an strafferen Beziehungen und höheren Bestimmtheiten zeigt.

Da die meisten der genannten Einheiten oder Untereinheiten aber immer noch Böden mit verschiedenen pH-Werten umfassen, führt eine zusätzliche Gruppierung nach dem pH-Wert zu einer weiteren Verbesserung und zu den straffsten Beziehungen, die überhaupt im Rahmen dieser Arbeit erreichbar waren.

Bei der praktischen Umsetzung der vorliegenden Schätzgleichungen für den angegebenen Zweck wird man daher zuerst eine der Gleichungen aus Tabelle 4 anzuwenden suchen. Ist jedoch für die Kombination von Untereinheit und pH-Bereich keine eigene signifikante Schätzgleichung verfügbar, so könnte man die Schätzgleichung der der Untereinheit übergeordneten Einheit innerhalb desselben pH-Bereiches benützen. Man kann ferner unter Verzicht auf eine Differenzierung nach dem pH-Wert eine entsprechende Schätzgleichung in Tabelle 3 wählen.

Steht auch hier keine signifikante Gleichung zur Verfügung, bleibt nur mehr die Anwendung einer der Schätzgleichungen der Tabelle 2; dies bedeutet den völligen Verzicht auf eine bodenkundliche Differenzierung.

Literatur

- BAHRENBURG, G., E. GIESE und J. NIPPER (1990): Statistische Methoden in der Geographie. Bd. 1: Univariate und bivariate Statistik. B. G. Teubner, Stuttgart.
- BLUM, W. E. H., H. SPIEGEL, W. W. WENZEL et al. (1989): Bodenzustandsinventur – Konzeption, Durchführung und Bewertung. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien.
- BUNDESAMT UND FORSCHUNGSZENTRUM FÜR LANDWIRTSCHAFT (1996): Burgenländische Bodenzustandsinventur. Amt der Burgenländischen Landesregierung, Eisenstadt.
- BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT (1994): Niederösterreichische Bodenzustandsinventur. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Wien.
- BÜHL, A. und P. ZÖFEL (1994): SPSS für Windows, Version 6. Addison-Wesley Publishing Company, Bonn.

- DANNEBERG, O. H. (1986): Kartierung landwirtschaftlich genutzter Böden in Österreich. Mitt. d. Österr. Bodenkundlichen Ges. H. 32, 7–35.
- DANNEBERG, O. H., H. BRÜGGEMANN, P. NELHIEBEL, H. POCK und M. WANDL (1998): Zusammenführung der bodenkundlichen und lithologischen Zuordnungen der BZI-Daten von Niederösterreich und dem Burgenland. Mitt. d. Österr. Bodenkundlichen Ges. H. 56, 5–54.
- EVANS, L. J. (1982): Cation exchange capacities and surface area of humic gleysolic Ap horizons from South-Western Ontario. Canadian J. Soil Sci. 62, 291–296.
- HELLING, C. S., G. CHESTER and R. B. COREY (1964): Contribution of Organic Matter and Clay to Soil Cation – Exchange Capacity as Affected by the pH of the Saturating Solution. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 28, 517–520.
- ÖNORM L 1086–89: Chemische Bodenuntersuchungen. Bestimmung von austauschbaren Kationen und Austauschkapazität (Kationenaustauschkapazität). Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- RAO, A. S., C. S. RAO and S. K. PAL (1996): Prediction of cation exchange capacity from clay and organic carbon of some smectite and kaolinite-rich soils. J. Indian Soc. Soil Sci. 44, 214–219.
- SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. 13. Auflage. Verlag Ferdinand Enke, Stuttgart.
- TURPAULT, M. P., P. BONNAUD, J. FICHTNER, J. RANGER and E. DAMBRINE (1996): Distribution of cation exchange capacity between organic matter and mineral fractions in acid forest soils (Vosges mountains, France). European J. Soil Sci. 47, 545–556.
- WILDING, L. P. and E. M. RUTLEDGE (1966): Cation – Exchange Capacity as a Function of Organic Matter, Total Clay, and Various Clay Fractions in a Soil Toposequence. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30, 782–785.
- WILLIAMS, R. (1932): The contribution of clay and organic matter to the base-exchange capacity of soils. J. Agric. Sci. 22, 845–851.
- WRIGHT, W. R. and J. E. FOSS (1972): Contribution of Clay and Organic Matter to the Cation Exchange Capacity of Maryland Soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36, 115–118.
- YUAN, T. L., N. GAMMON and R. G. LEIGHTY (1967): Relative contribution of organic and clay fractions to cation exchange capacity of sandy soils from several soil groups. Soil Sci. 104, 123–128.

Anschrift des Verfassers

Univ. Doz. Dipl.-Ing. Dr. Otto H. Danneberg, Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Institut für Bodenwirtschaft, Spargelfeldstraße 191, A-1226 Wien.
e-mail: odanneberg@bfl.at

Eingelangt am 9. Dezember 1998
Angenommen am 12. Februar 1999