

Der Versorgungszustand österreichischer Böden mit Pflanzennährstoffen – Ergebnisse der österreichischen Bodenzustandsinventuren

F. Heinzlmaier, A. Freudenschuß und M. H. Gerzabek

Plant nutrient supply of Austrian soils – Results of the Austrian soil surveys

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Pflanzennährstoffe zählen mit dem Sonnenlicht, dem Wasser und der Luft zu den wichtigsten Grundlagen des Pflanzenwachstums. Sie sind die Basis der Fähigkeit von Böden, Erträge zu erzeugen und abzusichern. Dabei steht weniger der Gesamtgehalt an Nährstoffen im Vordergrund, sondern deren pflanzenverfügbarer Anteil. Dieser hängt von zahlreichen Standortfaktoren ab, wie z. B. Ton- und Humusgehalt, pH-Wert, Wasser- und Luftversorgung, mi-

krobielle Aktivität und anderes mehr und wird durch die Nährstoffzufuhr über Düngungsmaßnahmen maßgeblich beeinflusst. Der Einsatz vor allem der Hauptnährstoffe Kalium und Phosphor ist jedoch in den letzten 30 Jahren stark rückläufig und es stellt sich die Frage nach dem Versorgungszustand der Böden mit diesen Nährstoffen.

Ende der achtziger bis Ende der neunziger Jahre führten die einzelnen Bundesländer umfangreiche Bodenzustandsinventuren durch, wobei die systematisch über ganz Österreich angelegte Probenwerbung eine Fülle von Standorts-

Summary

The nutrient supply of Austrian soils with the primary nutrients phosphorus, potassium and magnesium, as well as dependencies of these nutrients on soil parameters are presented in this study. The investigated data are derived from the soil surveys of the Austrian Federal States accomplished in the nineties, which are available in the nation-wide soil information system BORIS of the Federal Environment Agency. After the assessment of a homogenous data set representative for Austria, the analysis and evaluation of the data sets give an overview of the supply with P, K and Mg in Austrian soils and its interdependencies with soil parameters. The Austrian soils are in general well supplied with plant available K, Mg and P at present, the latter being low in many grassland soils. It was shown that land use is a major factor governing average nutrient status.

Key words: Agricultural soil, nutrient supply, soil parameters, statistical analysis.

Zusammenfassung

Der Versorgungszustand österreichischer Böden mit den Hauptnährstoffen P, K und Mg, und die Zusammenhänge dieser pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte mit Bodenparametern werden im Folgenden vorgestellt. Als Datenbasis dienen die im österreichweiten Bodeninformationssystem BORIS des Umweltbundesamtes gesammelten Ergebnisse der in den neunziger Jahren von den Ländern durchgeführten Bodenzustandsinventuren. Nach einer Homogenisierung der verfügbaren Daten auf ein für Österreich repräsentatives und vergleichbares Datenkollektiv geben die Auswertungen einen Überblick über den Grundnährstoffstatus in den Böden Österreichs und dessen Wechselwirkungen mit Bodenparametern. Generell sind die österreichischen landwirtschaftlichen Böden gut mit pflanzenverfügbaren Nährstoffen (K, Mg, P) versorgt, wobei im Falle des Phosphors im Grünland an vielen Standorten sehr geringe Gehalte auftreten. Es konnte gezeigt werden, dass die Bodennutzung (Ackerland bzw. Grünland) besonders stark die pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte beeinflusst.

Schlagwörter: Landwirtschaftlicher Boden, Nährstoffversorgung, Bodenparameter, statistische Verfahren.

daten ergab. Für die Probenahme und Analytik wurden von den einzelnen Institutionen unterschiedliche Methoden herangezogen, die erst auf Vorschlag von BLUM et al. (1989, 1996) vereinheitlicht wurden.

Ziel des folgenden Beitrages ist es, mit geeigneten Methoden ein für Österreich repräsentatives Datenkollektiv aus den Ergebnissen der Bodenzustandsinventuren, welche im österreichweiten Bodeninformationssystem BORIS verfügbar sind, zu generieren. Auf Basis dessen soll versucht werden, die Nährstoffversorgung mit P, K und Mg der Böden Österreichs in Abhängigkeit der Landnutzungsform und des Ausgangsmaterials der Bodenbildung darzustellen. Um die die Eigenschaften eines Standortes bestimmende Rolle von Bodenparametern hervor zu heben und die Auswirkungen auf die verfügbaren Nährstoffgehalte aufzuzeigen werden drei statistische Verfahren zur Klassifizierung, Kategorisierung und zur Analyse von Zusammenhängen getestet.

2 Material und Methoden

2.1 Verfügbares Datenkollektiv aus BORIS

Die Grundlage für die vorliegende Arbeit bilden die Untersuchungsergebnisse der in den neunziger Jahren durchgeführten Bodenzustandsinventuren der Bundesländer, welche im Bodeninformationssystem BORIS des Umweltbundesamtes Wien verfügbar sind. Sie sind in der Datenbank als einzelne Literaturangaben angeführt, wobei sich einige dieser Literaturangaben wiederum aus mehreren Erhebungen zusammensetzen können. Standortparameter (S-Parameter) beschreiben die einzelnen Standorte aus den Erhebungen. Derzeit sind im Bodeninformationssystem über 200 S-Parameter verfügbar. Die Profile werden mit den sog. P-Parametern, von denen über 60 existieren, beschrieben, während die eigentlichen Messwerte durch mehr als 350 B-Parameter charakterisiert sind. Alle diese Einträge sind mit dem entsprechenden Literaturzitat und die Messwerte z. B. auch mit der verwendeten Analyseverfahren

knüpft. So ergeben sich die sechs Haupttabellen des Datenmodells (Tabelle 1). Von den 10.124 Standortdaten entfallen 5.624 Standorte auf Untersuchungen im Rahmen der Bodenzustandsinventuren, die restlichen Standorte wurden im Rahmen anderweitiger Untersuchungen beprobt.

Um vergleichbare Auswertungen der Datensätze durchführen zu können, bedarf es einer Vereinheitlichung der erhobenen Daten. Als Beprobungstiefe wurde für das Ackerland der Oberboden von 0–20 cm festgelegt. Von dieser Tiefenstufe abweichende Beprobungstiefen werden gemäß der Gleichung $G_x = G_1 + (G_2 - G_1) * (UG_x - UG_1) / UG_2$ umgerechnet, wobei

- UG1 Untergrenze der ersten Tiefenstufe
- UG2 Untergrenze der zweiten Tiefenstufe
- UGx Untergrenze der zu errechnenden Tiefenstufe
- G1 Gehalt der ersten Tiefenstufe
- G2 Gehalt der zweiten Tiefenstufe
- Gx Gehalt der zu errechnenden Tiefenstufe

Die Beprobung des Grünlandes erfolgte in den meisten Bundesländern von 0–5 und von 5–10 cm. Hierbei wurde der Durchschnitt aus den beiden Werten berechnet und als Tiefenstufe von 0–10 cm angegeben. In der Steiermark, Tirol und Vorarlberg erfolgte eine abweichende Beprobung der Tiefenstufen, wobei obige Gleichung für eine dementsprechende Umrechnung in die gewünschte Tiefenstufe von 0–10 cm Anwendung fand.

Fehlende Daten im vorhandenen Datensatz wurden wie folgt behandelt:

Phosphor

Grundsätzlich stehen für Salzburg und Vorarlberg keine Daten zum pflanzenverfügbaren Phosphor zur Verfügung. Von LINDENTHAL (2000) nachträglich untersuchte Rückstellproben der Bodenzustandsinventur für intensives Grünland können jedoch für die Auswertungen herangezogen werden, was das Datenkollektiv für Phosphor um 69 Standorte in Salzburg erweitert.

Tabelle 1: Umfang des Datenvolumens aus dem Bodeninformationssystem BORIS: Anzahl der Einträge gegliedert nach den 6 Haupttabellen des Datenmodells (Stand Jänner 2007)

Table 1: Amount of data available from the soil information system BORIS: number of entries composed of the 6 main tables of the data model (status January 2007)

Standorte	Standortdaten	Proben	Probedaten	Messwerte	Literatur
10.124	371.775	48.547	322.222	851.272	49

Kalium

Vollständige Daten zum pflanzenverfügbaren Kalium liegen in Oberösterreich, Niederösterreich und dem Burgenland vor. In allen übrigen Bundesländern sind die Daten unvollständig. Im Gegensatz dazu sind aber mit Ausnahme von Vorarlberg vollständige Daten über das austauschbare Kalium (in mmol IÄ/kg) verfügbar. Um die für die Düngempfehlung üblichen Werte für K_{CAL} zu erhalten wurde aus den ALVA-Bodenenqueten der Jahre 2000 bis 2005 (ARBEITSGEMEINSCHAFT LANDWIRTSCHAFTLICHER VERSUCHSANSTALTEN 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005), in denen jeweils drei verschiedene Böden in unterschiedlichen Labors analysiert werden, ein Mittelwert über alle Labors je untersuchter Bodenprobe für das austauschbare Kalium sowie die dazugehörigen K_{CAL} -Werte gebildet. Anschließend wurde ein Gesamtmittelwert über die Labor-Mittelwerte für die drei Bodenproben errechnet. Die Mittelwerte der austauschbaren Kaliumionen wurden jenen der K_{CAL} -Gehalte der einzelnen Jahre gegenübergestellt und daraus die Regressionsgleichung $y = 34,395x - 12,21$ errechnet, mit der es möglich war die K_{CAL} -Werte auf Basis der austauschbaren K-Gehalte mit einer Genauigkeit von 99,4 % abzuleiten.

Magnesium

Beim Magnesium wurden in allen Erhebungen bis auf jene in Vorarlberg die austauschbaren Mg-Kationen nach ÖNORM L 1086 bestimmt. Das pflanzenverfügbare Magnesium, das üblicherweise mit der Methode nach Schachtschabel (ÖNORM L 1093) ermittelt wird, wurde nur in der Bodenzustandsinventur Steiermark erhoben. Eine Umrechnung in das pflanzenverfügbare Magnesium wird durch Umformung der von GERZABEK (1987) ermittelten Regressionsgleichung zwischen Magnesium nach Schachtschabel und der $BaCl_2$ -Methode vorgenommen. Die Gleichung lautet demnach: $x = ((y + 0,670405)/1,326093) \times 10$ mit $R^2 = 0,986$, wobei $y = Mg_{BaCl_2}$ (mg/kg) und $x = Mg_{CaCl_2}$ (mg/kg).

2.2 Statistische Ansätze

Die Verfügbarkeit und die Höhe der Nährstoffgehalte im Boden hängen neben den Bodenparametern pH-Wert, Humusgehalt, Tongehalt u. a. noch von vielen weiteren Faktoren (klimatisch, anthropogen) ab. Um Bodeneigenschaften zu untersuchen und um zu überprüfen, ob und in welcher Form sich Bodenparameter hinsichtlich Landnutzungs-

form trennen lassen bzw. ob es einen Zusammenhang zwischen Bodenparametern und Pflanzennährstoffen gibt, wurden die statistischen Verfahren der Faktoranalyse, der Diskriminanzanalyse und der multiplen linearen Regression als Werkzeuge für drei unterschiedliche Herangehensweisen an diese Fragestellung eingesetzt.

Faktoranalyse

Beim Verfahren der Faktoranalyse wird eine größere Anzahl von Variablen anhand der gegebenen Fälle auf eine kleinere Anzahl unabhängiger Einflussgrößen, die als Faktoren bezeichnet werden, zurückgeführt (BÜHL und ZÖFEL, 2002). Variablen, welche stark untereinander korrelieren, werden dabei zu einem Faktor zusammengefasst, während Variablen aus verschiedenen Faktoren gering untereinander korrelieren. Ziel der Faktoranalyse ist die Ermittlung von Faktoren, welche die beobachteten Zusammenhänge zwischen den gegebenen Variablen möglichst vollständig erklären.

Diskriminanzanalyse

Mit Hilfe der Diskriminanzanalyse werden Objekte aufgrund von Merkmalen (d. h. unabhängigen Variablen) einer von zwei oder mehreren fest vorgegebenen Gruppen zugeordnet (BÜHL und ZÖFEL, 2002).

Das zentrale Element der Diskriminanzanalyse besteht in der Ermittlung der so genannten Diskriminanzfunktion gemäß folgendem Schema:

$$d = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n + a$$

Dabei sind x_1 bis x_n die Werte der einbezogenen Variablen für den jeweiligen Fall, während b_1 bis b_n sowie die Konstante a die von der Analyse abzuschätzenden Koeffizienten darstellen. Ziel der Analyse ist es, die Koeffizienten so zu ermitteln, dass die Werte der Diskriminanzfunktion die Gruppen möglichst gut trennen (JANSSEN und LAATZ, 2005).

Multiple lineare Regression

Die einfache Regressionsanalyse dient dazu, die Art des Zusammenhangs zwischen zwei Variablen aufzudecken bzw. eine Möglichkeit zu schaffen, mit welcher der Wert einer (abhängigen) Variablen aus den Werten anderer (unabhängiger) Variablen vorhergesagt werden kann (BÜHL und ZÖFEL, 2002).

Bei der multiplen linearen Regression werden mehrere unabhängige Variablen in die Berechnungen einbezogen. Kernstück der Analyse ist die Schätzung der Koeffizienten

für die Gleichung $y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \dots + b_n \cdot x_n + a$, wobei n die Anzahl der unabhängigen Variablen ist, die mit x_1 bis x_n bezeichnet sind; bei a handelt es sich um eine Konstante.

3 Ergebnisse

3.1 Räumliche Verteilung der Untersuchungsstandorte und Auswahl des Datenkollektivs

In NÖ, OÖ, K, B und Stmk wurde ausgehend von der Waldbodenzustandsinventur ein Raster von $8,7 \times 8,7$ km zur Ermittlung der Beprobungsstellen an deren Schnittpunkten in die landwirtschaftliche Nutzfläche verlegt und auf $3,9 \times 3,9$ km verkürzt, wobei in OÖ, NÖ und K eine weitere Verdichtung auf $2,75 \times 2,75$ km vorgenommen wurde. In Tirol und Salzburg wurden die Standorte für die Probenwerbung auf 4×4 km festgelegt, wobei gebietsweise eine Verdichtung der Standorte auf 2×2 km und 1×1 km erfolgte. In Vorarlberg wurden die Standorte manuell auf einem Kartenausdruck zugeordnet. In Summe ergibt dies für Österreich eine Anzahl von 5.460 beprobten Standorten. Um ein für alle Bundesländer repräsentatives Datenkollektiv zu erhalten wird der sogenannte Basisraster (BR) im Abstand von $3,9 \times 3,9$ bzw. 4×4 km für die Auswertungen herangezogen. Die Anzahl einbezogener Standorte reduziert sich dabei auf 2.918 (Tabelle 2).

Rund 84 % der endgültig ausgewählten Standorte werden von Acker- und Grünland eingenommen; daher beziehen sich die folgenden Auswertungen lediglich auf diese beiden Landnutzungsformen.

3.2 Nährstoffversorgung im Ackerland und Grünland Österreichs

Nach Umrechnung der Gehalte an austauschbaren Kaliumionen auf CAL-Gehalte gemäß der aus den ALVA-Bodenenqueten ermittelten Regressionsgleichung (siehe Material und Methoden) und anschließender Ausreißerbereinigung (Werte größer 75. Perzentil plus 1,5fachem Interquartilabstand) stehen 1.199 Grünland- sowie 1.054 Ackerstandorte zur Verfügung. Abbildung 1 zeigt, dass im Falle des Kaliums nahezu die Hälfte aller Ackerstandorte im ausreichend versorgten Bereich (Stufe C) liegt (BMLFUW, 2006). Im Grünland dominieren hingegen die schwächer versorgten Standorte: ca. 60 % der untersuchten Proben weisen Versorgungsstufe A bzw. B auf.

Für die Untersuchung des Hauptnährstoffs Phosphor ergeben sich unter Einbeziehung der Werte von LINDENTHAL (2000) und anschließender Ausreißerbereinigung 977 Grünland- und 1.022 Ackerstandorte. Während ähnlich wie beim Kalium das Ackerland ausreichend bis schwach versorgt ist, treten im Grünland kaum Standorte mit ausreichender bzw. hoher Phosphorversorgung zum Vorschein. A- und B-versorgte Standorte machen 90 % aller untersuchten Basisrasterpunkte aus (Abbildung 2).

Nach der Ermittlung der pflanzenverfügbaren Magnesiumgehalte aus den austauschbaren Gehalten gemäß der Formel nach GERZABEK (1987) können nach Eliminierung der Ausreißer 1.142 Grünland- und 1.114 Ackerstandorte ausgewertet werden. Die Ergebnisse zeigen eine ausreichende bis sehr hohe Mg-Versorgung für beide Landnutzungsformen (Abbildung 3).

Tabelle 2: Überblick über die Gesamtzahl der Basisraster (BR) – Standorte sowie über das ausgewählte Datenkollektiv
Table 2: Overview of the total number of sites of the basis grid (top) as well as of the selected data set (bottom)

	Nutzung	B	K	NÖ	OÖ	S	St	T	V	W	Gesamt
BZIs alle Standorte	Wald	–	–	–	–	177	17	263	150	–	607
	Grünland	14	321	298	433	270	389	348	240	–	2.313
	Acker	142	156	1.151	438	14	209	47	40	–	2.197
	Weingarten	16	–	–	–	–	7	–	–	–	23
	Obstanlage	2	–	–	–	–	12	–	–	–	14
	Sonstige	–	4	–	–	8	1	–	–	5	287
	Summe	174	481	1.449	880	462	636	658	435	287	5.460
Ausgewähltes Datenkollektiv BR–BZIs	Wald	–	–	–	–	134	–	259	41	–	434
	Grünland	14	171	149	215	188	243	267	59	–	1.306
	Acker	142	46	576	232	7	130	15	2	–	1.150
	Weingarten	16	–	–	–	–	–	–	–	–	16
	Obstanlage	–	–	–	–	–	12	–	–	–	12
		Summe	172	217	725	447	329	385	541	102	–

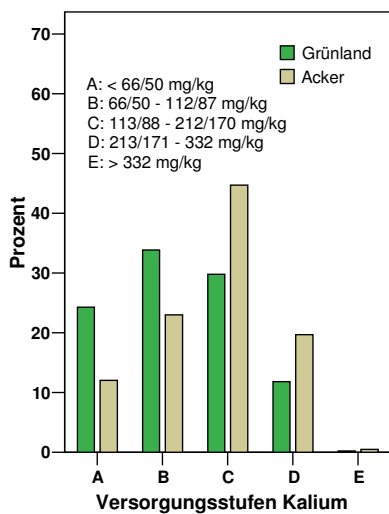


Abbildung 1: Anteil der Versorgungsstufen bei Kalium im Acker- und Grünland Österreichs

Figure 1: Proportion of the potassium content classes in Austria's arable land and grassland

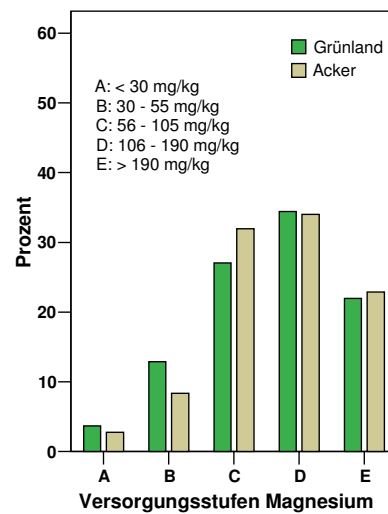


Abbildung 3: Anteil der Versorgungsstufen bei Magnesium im Acker- und Grünland Österreichs

Figure 3: Proportion of the magnesium content classes in Austria's arable land and grassland

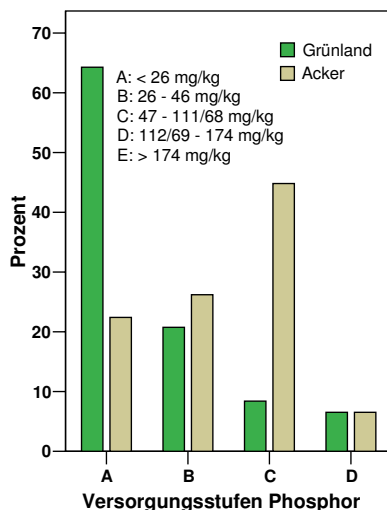


Abbildung 2: Anteil der Versorgungsstufen bei Phosphor im Acker- und Grünland Österreichs

Figure 2: Proportion of the phosphorus content classes in Austria's arable land and grassland

3.3 Nährstoffversorgung nach Ausgangsmaterial und Geologie

Neben der Stratifizierung nach Landnutzungsformen wurden die Nährstoffgehalte auch nach dem Ausgangsmaterial der Bodenbildung und den Geologischen Einheiten analysiert. Da es sich bei diesen Parametern im Datenkollektiv um nominalskalierte Variable handelt, können nur Vergleiche in-

nerhalb dieser Variablen angestellt werden. Die Parameter Ausgangsmaterial der Bodenbildung bzw. Geologie wurden von HEILIG und KOCH (1997) bzw. SCHWARZ (2004) als eigene Parameter in BORIS generiert, um eine vollständigere und bessere Zuordnung der Standorte zu diesen potentiellen Einflussfaktoren auf die Nährstoffgehalte sicherzustellen.

Im Falle des Kaliums zeigen sich Unterschiede im Nährstoffgehalt der verschiedenen Ausgangsmaterialien der Bodenbildung. Die höchsten Gehalte sind dabei in den kalkhaltigen Lockersedimenten zu finden, zu denen Löß- und Lehm Böden zählen, während die niedrigsten Gehalte in den marmor- und glimmerreichen Silikatgesteinen auftreten (siehe Abbildung 4).

3.4 Ergebnisse der statistischen Berechnungen

Klassifizierung von Bodeneigenschaften

Die Parameter Karbonatgehalt, Humusgehalt, pH-Wert, Tonanteil, Schluffanteil und Sandanteil wurden in die Faktoranalyse einbezogen. Drei Faktoren mit Eigenwerten größer 1 wurden extrahiert, welche knapp 74 % der Gesamtvarianz erklären (Tabelle 3).

Betrachtet man die Korrelationskoeffizienten zwischen den Bodenparametern und den Faktoren (Tabelle 4), so werden die Koeffizienten mit dem höchsten Absolutbetrag den jeweiligen Faktoren wie folgt zugeordnet:

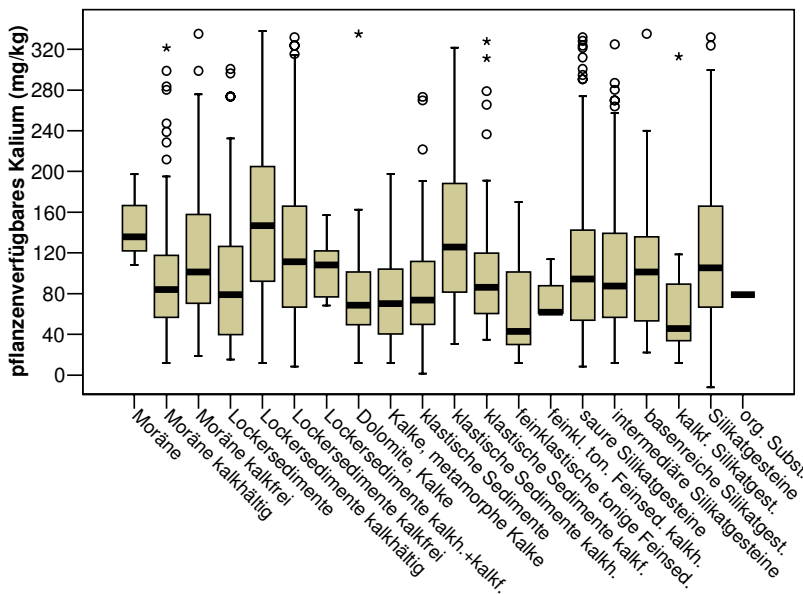


Abbildung 4: Kaliumgehalte (mg KCAL/kg), differenziert nach Ausgangsmaterial der Bodenbildung
 Figure 4: Potassium contents (mg KCAL/kg), differentiated in basic material of soil development

Tabelle 3: Durch die Faktorenanalyse erklärte Gesamtvarianz der Bodeneigenschaften
 Table 3: Proportion of the total variance of soil properties explained by the factor analysis

Komponente	Anfängliche Eigenwerte		
	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %
1	2,011	33,510	33,510
2	1,274	21,238	54,748
3	1,141	19,018	73,766
4	,918	15,297	89,063
5	,557	9,282	98,346
6	,099	1,654	100,000

Faktor 1: Schluffanteil und Sandanteil
 Faktor 2: Karbonatgehalt und pH-Wert
 Faktor 3: Humusgehalt und Tonanteil

Aufgrund der Eigenschaften der den einzelnen Faktoren zugeordneten Bodenparameter wird Faktor 1 als Korngrößenspektrum, Faktor 2 als Acidität und Faktor 3 als Nährstoffspeichervermögen bezeichnet. Für jeden Standort können nach Zuordnung zum jeweiligen Faktor Werte von -3 bis +3 berechnet werden, welche indizieren, ob es sich um einen niedrigen (-3) bzw. hohen (+3) Wert des Faktors handelt. Die Zerlegung dieser Faktorwerte in Quartile mit individueller Bezeichnung (z. B. sauer, schwach sauer, neutral und basisch für den Faktor Acidität) ermöglicht weiterführende Auswertungen mittels Kreuztabellenanalyse. In Tabelle 5 ist die nach diesem Schema berechnete Verteilung der Acidität in den 5 Landnutzungsformen angeführt. Während auf den Waldstandorten saure Verhältnisse domi-

Tabelle 4: Korrelationskoeffizienten zwischen Bodenparametern und Faktoren der Faktorenanalyse
 Table 4: Correlation coefficients between soil parameters and factors derived from the factors analysis

	Komponente		
	1	2	3
CaCO ₃ -Gehalt (%)	-,039	,830	,072
Humusgehalt (%)	-,201	-,226	,665
pH-Wert (CaCl ₂)	,217	,795	-,110
Tonanteil (%)	,199	,179	,754
Schluffanteil (%)	,902	,092	-,310
Sandanteil (%)	-,899	-,095	-,358

nieren, sind vor allem die im Osten Österreichs angesiedelten Weingärten von hohen pH-Werten gekennzeichnet.

Trennung der Landnutzungsgruppen mittels Bodenparametern

Mit der Diskriminanzanalyse wurde versucht, anhand derselben Bodenparameter wie bei der Faktorenanalyse, eine Unterscheidung zwischen den Landnutzungsformen vorzunehmen und festzustellen, welche Parameter hierfür maßgebend sind. Aufgrund der bei weitem umfangreichsten Probenanzahl wird lediglich auf die Unterscheidung zwischen Acker- und Grünland Bezug genommen.

Über Wilk's Lambda (Tabelle 6) wurde getestet, ob sich die mittleren Werte der Diskriminanzfunktion in den beiden Gruppen signifikant voneinander unterscheiden. Dies ist in hoch signifikanter Weise der Fall.

Der vom Modell ermittelte kanonische Korrelationskoeffizient (Tabelle 7) drückt die Stärke des Zusammenhangs

Tabelle 5: Landnutzungsformen und Acidität im Vergleich
 Tabelle 5: Soil acidity in soils under different land use

	Acidität				Gesamt
	sauer	schwach	sauer	neutral	Basisch
Wald	65,3 %	6,3 %	14,7 %	13,7 %	100,0 %
Grünland	39,1 %	29,3 %	20,9 %	10,8 %	100,0 %
Ackerland	10,7 %	23,3 %	29,2 %	36,8 %	100,0 %
Weingarten	0,0 %	6,3 %	6,3 %	87,5 %	100,0 %
Obstanlage	8,3 %	25,0 %	50,0 %	16,7 %	100,0 %
Gesamt	25,0 %	25,0 %	25,0 %	25,0 %	100,0 %

Tabelle 6: Test auf Unterscheidbarkeit der Werte der Diskriminanzfunktion in Acker- und Grünland
 Table 6: Test for discrimination between values of the discriminant function in arable land and grassland

Test der Funktionen	Wilk's Lambda	Chi-square	df	Signifikanz
1	,623	975,927	6	,000

Tabelle 7: Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten für die Unterscheidung von Acker- und Grünland
 Table 7: Canonical discriminant function coefficients for the differentiation into arable land and grassland

	Funktion
	1
CaCO ₃ -Gehalt (%)	-,022
Humusgehalt (%)	,240
pH-Wert (CaCl ₂)	-,180
Tonanteil (%)	,051
Schluffanteil (%)	,043
Sandanteil (%)	,055
(Konstante)	-4,975

zwischen den Diskriminanzwerten und den Gruppen aus. Im hier dargestellten Zwei-Gruppen-Fall entspricht er dem Pearson-Korrelationskoeffizienten zwischen der Diskriminanzvariablen und der Gruppenvariablen „Landnutzung“ mit den Werten 0 und 1.

Die Diskriminanzfunktion für die Trennung zwischen Ackerland und Grünland lautet demnach $D = -0,022 \cdot \text{CaCO}_3\text{-Gehalt (\%)} + 0,24 \cdot \text{Humusgehalt (\%)} - 0,18 \cdot \text{pH-Wert} + 0,051 \cdot \text{Tonanteil} + 0,043 \cdot \text{Schluffanteil} + 0,055 \cdot \text{Sandanteil} - 4,975$, wobei der Humusgehalt mit

dem Korrelationskoeffizienten von 0,24 die größte Einflussstärke auf die Trennung besitzt.

Gemäß dieser Funktion erfolgt die Zuteilung der untersuchten Standorte zu den Landnutzungsformen Acker- und Grünland. Die Diskriminanzfunktion ergibt unter Zuhilfenahme der 6 Bodenparameter 86,8 % korrekt zugeordnete Standorte.

Zusammenhang zwischen Nährstoffgehalten und Bodenparametern

Um etwaige Abhängigkeiten pflanzenverfügbarer Nährstoffgehalte von Bodenparametern aufzuzeigen, wurden die in Tabelle 8 angeführten Variablen für die 3 Nährstoffe P, K und Mg verwendet, wobei die Gesamtnährstoffgehalte dem jeweiligen pflanzenverfügbaren Nährstoff zugeordnet wurden. Bei der Variable Landnutzung handelt es sich um eine sog. „Dummy-Variable“, d. h. die Landnutzungsformen Grünland und Ackerland nehmen entweder den Wert 0 (trifft nicht zu) oder 1 (trifft zu) an.

Die Regressionsanalyse wurde als schrittweise Regression durchgeführt, sodass all jene Variablen, welche keinen signifikanten Erklärungsbeitrag zum Regressionsmodell leisten, nicht in das Modell einbezogen wurden.

Tabelle 8: Bodenparameter für die stufenweise Regressionsanalyse von Nährstoffgehalten
 Table 8: Soil parameters included in the stepwise regression analysis of nutrient contents

Nährstoffe	Bodenparameter							
	CaCO ₃	Humus	Ton	pH-Wert	Landnutzung	K gesamt	Mg gesamt	P gesamt
K pflvfgb.	x	x	x	x	x	x		
P pflvfgb.	x	x	x	x	x			x
Mg pflvfgb.	x	x	x	x	x		x	

Tabelle 9: Einfluss der Bodenparameter auf die pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte
 Table 9: Impact of soil parameters on the extent of plant available nutrient contents

		Unstandardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	t	Signifikanz
		B	Standardfehler	Beta		
K ^a	(Konstante)	-14,008	11,378		-1,231	,220
	Grünland	45,053	7,319	,370	6,156	,000
	Kalium-Gesamtgehalt (mg/kg)	,010	,003	,233	3,983	,000
	Humusgehalt (%)	3,594	,906	,235	3,965	,000
	Ackerland	58,468	21,311	,166	2,744	,007
p ^b	(Konstante)	-52,698	13,197		-3,993	,000
	Phosphor-Gesamtgehalt (mg/kg)	,018	,006	,349	3,221	,002
	pH-Wert (CaCl ₂)	8,340	2,312	,430	3,607	,001
	CaCO ₃ -Gehalt (%)	-1,047	,474	-,259	-2,210	,031
Mg ^c	(Konstante)	-364,658	35,440		-10,289	,000
	pH-Wert (CaCl ₂)	59,967	6,373	,427	9,409	,000
	Magnesium-Gesamtgehalt (mg/kg)	,007	,001	,362	8,055	,000
	Humusgehalt (%)	9,943	1,768	,235	5,624	,000
	Tonanteil (%)	2,124	,449	,198	4,733	,000

^aR² = 0,210 ... ^bR² = 0,324 ... ^cR² = 0,563

Die standardisierten Beta-Koeffizienten zeigen unter den aufgenommenen Variablen im Falle des Kaliums den größten Einfluss des Grünlands auf den K-Gehalt im Boden, gefolgt vom K-Gesamtgehalt und dem Humusgehalt. Mit R²=0,21 ist der Erklärungscharakter des Modells sehr bescheiden, wobei bedacht werden muss, dass hierbei keine Einflüsse von Düngung und Ausgangsmaterial berücksichtigt sind. Der pflanzenverfügbare Phosphorgehalt wird am stärksten vom pH-Wert beeinflusst, ebenso der Magnesiumgehalt. In allen Fällen spielt aber auch der Nährstoffgesamtgehalt eine bedeutende Rolle. Tabelle 9 gibt die wichtigsten Kennzahlen der Regressionsanalyse wieder.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass es hinsichtlich der Nährstoffgehalte im Boden deutliche Unterschiede in der Landnutzungsform gibt. Über Gesamtösterreich gesehen sind etwa 44 % der Ackerstandorte ausreichend mit Kalium versorgt, wobei sich die Anzahl besser und schwächer versorgter Standorte die Waage hält. Im Grünland hingegen beträgt der Anteil A- und B-versorgter Böden schon nahezu zwei Drittel der untersuchten Flächen, während die Anzahl hoch und sehr hoch mit Kalium versorgter Standorte nur mehr knapp über 10 % liegt. Untersuchungen mit

Tierbesatzdichten aus dem Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem zur Förderungsabwicklung in der Landwirtschaft (INVEKOS) für das Bundesland Steiermark zeigen jedoch, dass Standorte mit hoher Kaliumversorgung nicht unmittelbar auf die Intensität der Rinderhaltung zurückzuführen sind. Vielmehr spielen hier andere Faktoren eine Rolle, von denen das Ausgangsmaterial der Bodenbildung einer davon zu sein scheint. Die höchsten Kaliumgehalte treten in den untersuchten Standorten aus BORIS im Bereich der kalkhaltigen klastischen Sedimente und der kalkhaltigen Lockersedimente auf. Aus letzteren werden vor allem Löss- und Lehmböden gebildet (HEILIG und KOCH, 1997), die im Allgemeinen als nährstoffreich gelten. Regional betrachtet treten hohe Kaliumgehalte vor allem im Nordöstlichen Flach- und Hügelland auf – jene Standorte also, an denen Löss vermehrt am Entstehen der fruchtbaren Tschernosemböden beteiligt ist. In Bayern bzw. im gesamten deutschen Bundesgebiet liegen die Kaliumgehalte durchwegs höher (HEGE und OFFENBERGER, 2005; SUNTHEIM, 2005), jedoch findet hier eine andere Einteilung der Nährstoffgehaltsklassen statt. Aufgrund dieser Einteilung (LFL, 2003) werden im Vergleich zu Österreich die deutschen Böden überbewertet.

Bei den Phosphorgehalten österreichischer Böden ist die Diskrepanz zwischen Ackerland und Grünland am größten. Während das Ackerland schwach bis ausreichend ver-

sorgt ist, sind 90 % der Grünlandböden unterhalb des ausreichend versorgten Bereichs einzustufen. Betrachtet man das Grünland differenziert in dessen Nutzungsuntergruppen, so wird deutlich, dass gerade im intensiv genutzten Dauergrünland die Phosphorgehalte großteils in der Versorgungsstufe A liegen. Untersuchungen von LINDENTHAL et al. (2003) zeigen, dass bei niedriger P-Versorgung des Bodens die Entzüge durch die Kulturpflanzen dennoch hoch sind. Dies führt zu negativen P-Bilanzen, was eine weitere Absenkung der Gehalte im Boden zur Folge hat. Wenngleich SPIEGEL et al. (2001) feststellten, dass auch bei langjährig unterlassener P-Düngung und niedriger P-Versorgung die Gehalte im Boden nicht abnehmen, stellte GALLER (2006) bei 60 % umfassend untersuchter Futterproben einen P-Mangel in den Pflanzen fest. Dieselbe Situation bestätigt auch KÄDING (2006) bei unzureichender P-Düngung. Eine höhere P-Versorgung als in Österreich stellt SUNTHEIM (2005) für Deutschland fest. Darüber hinaus sind vor allem die Böden in Ländern mit hoher Tierbesatzdichte wie die Niederlande, Dänemark, Norwegen und England gut mit Phosphor versorgt (STEÉN, 1997; BROUWER et al., 1995; CSATHÓ und RADIMSKY, 2005a).

Die Magnesiumgehalte der meisten Böden sind in Österreich als ausreichend bis sehr hoch einzustufen. Da der Nährstoff in zahlreichen Mineralen wie Biotit, Vermiculit u. a. vorkommt (GERZABEK, 1988; AMBERGER, 1996), gibt es kaum Gebiete, in denen nicht ein ausreichender Mg-Pool im Boden verfügbar wäre. Der Gehalt an Magnesium im Boden nimmt mit steigendem Feinkornanteil zu; der pflanzenverfügbare Anteil beträgt in der Regel jedoch weniger als 5 % am Gesamtmagnesiumgehalt (AMBERGER, 1996). Im Gegensatz zu Phosphor und Kalium steigt mit zunehmender Bodenproftiefe der austauschbare Magnesiumgehalt im Unterboden an. SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2002) führen die gute Mg-Versorgung landwirtschaftlich genutzter Schluff-, Lehm- und Tonböden auf diesen Umstand zurück.

Die Verfügbarkeit bzw. Höhe der pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte der Böden hängt neben den Bodenparametern wie pH-Wert, Humusgehalt, Tongehalt u. a. noch von vielen weiteren Faktoren ab, die im Rahmen dieser Arbeit nicht erfasst werden können. An erster Stelle sei dabei die Düngung zu nennen, daneben spielen auch klimatische Ereignisse (z. B. Erosion) und anthropogene Einflüsse (z. B. mechanische Bodenverdichtungen) eine wichtige Rolle. Zur Untersuchung der Bodenparameter auf ihre Eigenschaften, zu deren Klassifizierung und Kategorisierung

sowie zum Aufdecken von Zusammenhängen mit Pflanzennährstoffen wurden 3 statistische Verfahren geprüft. Mit der Faktoranalyse wurden 6 Variablen (Bodenparameter) zu den 3 Faktoren Acidität, Korngrößenspektrum und Nährstoffspeichervermögen zusammengefasst, welche die Eigenschaften von Böden beschreiben. SHUKLA et al. (2006), BREJDA et al. (2000) sowie ANDREWS et al. (2002) ziehen für das Auffinden sogenannter SQI's (soil quality indices) ebenfalls die Faktoranalyse in Betracht. Obwohl in deren Arbeiten 20 Variablen untersucht und zu 5 bzw. 6 Faktoren reduziert wurden, konnten auch in diesem Fall u. a. die Acidität und die Bodentextur als Parameter für die Qualität von Böden identifiziert werden.

Das Verfahren der Diskriminanzanalyse schreibt eindeutig dem Humusgehalt die Eigenschaft zu, das größte Unterscheidungsmerkmal zwischen Landnutzungsformen zu bilden. Zu demselben Schluss gelangen auch BREJDA et al. (2000, 2000a) in der Untersuchung nordamerikanischer Böden im Bereich der High Plains und Mississippi.

Berechnungen mittels linearer Regression ergeben, dass die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe P, K und Mg durchwegs mit unterschiedlicher Einflusstärke vom Gehalt an Gesamtnährstoffen abhängt. Für die Höhe des Kaliumgehaltes spielt zusätzlich der Humusgehalt noch eine größere Rolle, während die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor sehr stark vom pH-Wert des Bodens dominiert wird. Neben pH-Wert und Humusgehalt trägt der Tongehalt entscheidend zur Höhe der Magnesiumgehalte bei. Anzumerken sei im Falle des pflanzenverfügbaren Magnesiumgehaltes noch der durch die genannten Bodenparameter erklärte relativ hohe Anteil von 56 % an der Gesamtvarianz, während dieser bei P und K deutlich geringer ist, wobei festgehalten werden muss, dass der Einfluss der Düngung sowie von Ausgangsmaterial der Bodenbildung und weiterer relevanter Einflussgrößen nicht erfasst werden konnte. Auch die Regressionsanalyse findet bei PULLEMANN et al. (2000), KETTLER et al. (2001), ANDREWS et al. (2002) und SHUKLA et al. (2006) Anwendung in der Etablierung eines Systems von Bodenqualitätsindikatoren.

Derzeit sind die österreichischen Böden ausreichend bis gut mit Nährstoffen versorgt. Dem Grünland sollte jedoch aufgrund der niedrigen Phosphorgehalte verstärkte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Für die Analyse von Bodenparametern und Nährstoffgehalten sowie deren Wechselwirkungen wurden mit der Faktoranalyse, der Diskriminanzanalyse und der multiplen linearen Regression geeignete statistische Methoden angewandt. Dabei wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

Die Unterschiedlichkeit von Böden wird sehr stark von ihrer Acidität, dem Nährstoffspeichervermögen und von der Bodentextur bestimmt.

Zwischen den Landnutzungsformen gibt es deutliche Unterschiede in den Nährstoffgehalten und der Ausprägung der Bodenparameter, wobei der Humusgehalt jener Parameter ist, welcher den größten Einfluss auf die Unterscheidbarkeit zwischen den Landnutzungen besitzt.

Gesamtnährstoffgehalte und pH-Wert spielten im betrachteten österreichischen Datenkollektiv die bedeutendste Rolle für die Höhe der pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte.

Danksagung

Die Daten der Bodenzustandsinventuren wurden von den Bundesländern für die vorliegende Studie freigegeben, wofür die Autoren herzlich danken.

Literatur

- AMBERGER, A. (1996): Pflanzenernährung. 4. Auflage, Ulmer Taschenbuch Verlag, Stuttgart.
- ANDREWS, S.S., D.L. KARLEN und J.P. MITCHELL (2002): A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90, 25–45.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT LANDWIRTSCHAFTLICHER VERSUCHSANSTALTEN (2000): Bodenenquete 2000. Bundesanstalt für alpenländische Grünlandwirtschaft (Hrsg.), Irdning.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT LANDWIRTSCHAFTLICHER VERSUCHSANSTALTEN (2001): Bodenenquete 2001. Bundesanstalt für alpenländische Grünlandwirtschaft (Hrsg.), Irdning.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT LANDWIRTSCHAFTLICHER VERSUCHSANSTALTEN (2002): Bodenenquete 2002. Bundesanstalt für alpenländische Grünlandwirtschaft (Hrsg.), Irdning.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT LANDWIRTSCHAFTLICHER VERSUCHSANSTALTEN (2003): Bodenenquete 2003. Bundesanstalt für alpenländische Grünlandwirtschaft (Hrsg.), Irdning.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT LANDWIRTSCHAFTLICHER VERSUCHSANSTALTEN (2004): Bodenenquete 2004. Bundesanstalt für alpenländische Grünlandwirtschaft (Hrsg.), Irdning.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT LANDWIRTSCHAFTLICHER VERSUCHSANSTALTEN (2005): Bodenenquete 2005. Bundesanstalt für alpenländische Grünlandwirtschaft (Hrsg.), Irdning.
- BLUM, W.E.H., H. SPIEGEL und W. WENZEL (1989): Bodenzustandsinventur – Konzeption, Durchführung und Bewertung; Empfehlungen zur Vereinheitlichung der Vorgangsweise in Österreich. BMLF und BMWVK, Wien.
- BLUM, W.E.H., H. SPIEGEL und W. WENZEL (1996): Bodenzustandsinventur. Konzeption, Durchführung und Bewertung. 2. überarbeitete Auflage, im Auftrag des Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft u. d. Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst. BMLFUW (2006): Richtlinien für die sachgerechte Düngung. 6. Auflage, Wien.
- BREIJDA, J.J., T.B. MOORMAN, D.L. KARLEN und T.H. DAO (2000): Identification of Regional Soil Quality Factors and Indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Science Society of America Journal* 64, 2115–2124.
- BREIJDA, J.J., D.L. KARLEN, J.L. SMITH und D.L. ALLAN (2000a): Identification of Regional Soil Quality Factors and Indicators: II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie. *Soil Science Society of America Journal* 64, 2125–2135.
- BROUWER, F.M., F.E. GODESCHALK, P.J. HELLEGERS und H.J. KELHOLT (1995): Mineral balances at farm level in the European Union. LEI-DLO. Onderzoeksvlerag 137. Den Haag, the Netherlands.
- BÜHL, A. und P. ZÖFEL (2002): SPSS 11. Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows. 8. Auflage, Pearson Education Deutschland GmbH, München.
- CSATHÓ, P. und L. RADIMSKY (2005): Environmental and agronomic NPK balances in Hungary, 1901 to 2000. A review. (In Hungarian). *Agrokémia és Talajtan* 54, 217–234.
- GALLER, J. (2006): Grunddüngung nicht vernachlässigen! *Der Pflanzenarzt* 1–2, 2007.
- GERZABEK, M. (1987): Die Pflanzenverfügbarkeit von Magnesium. Dissertation an der Universität für Bodenkultur, Wien.
- GERZABEK, M. (1988): Die Pflanzenverfügbarkeit von Magnesium. Teil I: Ein Vergleich verschiedener Mg-Extraktionsmethoden. *Die Bodenkultur* 39, 117–134.
- HEGE, U. und K. OFFENBERGER (2005): Nährstoffversorgung bayerischer Böden. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. www.lfl.bayern.de/iab/duengung.

- HEILIG, G. und G. KOCH, unter Mitarbeit von M. ENGLISCH, G. ESTERLUS, W. KILIAN und F. STARLINGER (1997): Gruppen des (bodenbildenden) Ausgangsmaterials. In: ENGLISCH, M. und W. KILIAN (Hrsg.) (1998): Anleitung zur Forstlichen Standortskartierung in Österreich. FBVA-Berichte. Forstliche Bundesversuchsanstalt, Wien.
- JANSSEN, J. und W. LAATZ (2005): Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- KÄDING, H. (2006): Effect of varied fertilization and cutting frequency on forage yields, phosphorus and potassium contents and nutrient balance of fen grassland. *Archives of Agronomy and Soil Science* 52, 261–267.
- KETTLER, T.A., J.W. DORAN und T.L. GILBERT (2001): Simplified Method for Soil Particle-Size Determination to Accompany Soil-Quality Analyses. *Soil Science Society of America Journal* 65, 849–852.
- LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT – LFL (2003): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. 7., überarbeitete Auflage. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Freising-Weihenstephan.
- LINDENTHAL, T. (2000): Phosphorvorräte in Böden, betriebliche Phosphorbilanzen und Phosphorversorgung im biologischen Landbau. Dissertation an der Universität für Bodenkultur, Wien.
- LINDENTHAL, T., H. SPIEGEL, M. MAZOREK, J. HESS, B. FREYER und A. KÖCHL (2003): Ergebnisse von drei 40jährigen P-Dauerversuchen in Österreich: 2. Mitteilung: Auswirkungen unterschiedlicher P-Düngerformen und -mengen auf den P-Entzug und die P-Bilanzen. *Die Bodenkultur* 54, 11–21.
- ÖNORM L 1086 (2001): Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der austauschbaren Kationen und der effektiven Kationen-Austauschkapazität (KAK_{eff}) durch Extraktion mit Bariumchlorid-Lösung. ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM L 1093 (1999): Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung von $CaCl_2$ -extrahierbarem Magnesium. ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- PULLEMANN, M.M., J. BOUMA, E.A. VAN ESSEN und E.W. MEIJLES (2000): Soil Organic Matter Content as a Function of Different Land Use History. *Soil Science Society of America Journal* 64, 689–693.
- SCHEFFER, F. und P. SCHACHTSCHABEL (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg.
- SCHWARZ, S. (2004): Ableitung von Bodenreferenzwerten auf Basis des österreichweiten Bodeninformationssystems BORIS. Dissertation an der Universität für Bodenkultur, Wien.
- SHUKLA, M. K., R. LAL und M. EBINGER (2006): Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research* 87, 194–204
- SPIEGEL, H., T. LINDENTHAL, M. MAZOREK, A. PLONER, B. FREYER und A. KÖCHL (2001): Ergebnisse von drei 40jährigen P-Dauerversuchen in Österreich: 1. Mitteilung: Auswirkungen ausgewählter P-Düngerformen und -mengen auf den Ertrag und die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte im Boden. *Die Bodenkultur* 52, 3–17.
- STEÉN, I. (1997): A European fertilizer industry view on phosphorus retention and loss from agricultural soils. In: TUNNEY et al. (Eds.): *Phosphorus loss from soil to water*. CABI Wallingford, 311–328.
- SUNTHEIM, L. (2005): Wie verfügbar sind P und K? Verlagsbeilage Dünger-Magazin zu DLG-Mitteilungen 6/2005. Max-Eyth-Verlagsgesellschaft mbH, Frankfurt/Main.

Address of authors

Franz Heinzlmaier, Düngeberatung, AMI Agrolinz Melamine International GmbH, St.-Peter-Straße 25, 4021 Linz
Alexandra Freudenschuß, Abteilung für Terrestrische Ökologie, Umweltbundesamt GmbH, Spittelauer Lände 5, 1090 Wien, Österreich

Martin H. Gerzabek, Institut für Bodenforschung, Department Wald- und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien, Peter-Jordan-Straße 82b, 1190 Wien, Österreich

Eingelangt am 1. Juni 2007

Angenommen am 23. Juli 2008