

Phosphor-Speicherkapazität und Phosphor-Sättigungsgrad in österreichischen Böden des Dauergrünlandes

Andreas Bohner^{1*}, Christine Weißensteiner² und Jürgen Kurt Friedel³

Zusammenfassung

Um das Phosphor-Auswaschungspotenzial von österreichischen Böden des Dauergrünlandes beurteilen zu können, wurden in 239 Bodenproben von Tal- und Gebirgsstandorten die Phosphor-Speicherkapazität und der Phosphor-Sättigungsgrad ermittelt. Die untersuchten Grünlandböden wiesen in den obersten 10 cm meist sehr hohe Gehalte an amorphen Eisen-Oxiden und folglich auch eine große Phosphor-Speicherkapazität auf. Der Phosphor-Sättigungsgrad war mit wenigen Ausnahmen niedrig. Somit dürfte die Gefahr einer erhöhten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser im Falle einer standortangepassten Bewirtschaftung, sachgerechten Düngung und bei durchschnittlichen Witterungsverhältnissen gering sein. Allerdings wiesen regelmäßig gedüngte und intensiv genutzte Grünlandböden höhere Phosphor-Sättigungsgrade und somit auch ein größeres Phosphor-Auswaschungspotenzial als langjährig ungedüngte und extensiv genutzte Böden auf. Die Phosphor-Speicherkapazität war in den Braunerden, carbonathaltigen Niedermooren und generell in sauren Alm- und Gebirgsböden sehr hoch.

Schlagwörter: Bodentypen, Nutzungsintensität, Düngung, Phosphor-Fraktionen, Gewässereutrophierung

Summary

In order to assess the potential of phosphorus losses from Austrian soils of permanent grassland by leaching, the phosphorus sorption capacity and the degree of phosphorus saturation for 239 soil samples were determined. In the layer 0-10 cm, most of the studied grassland soils exhibited high amounts of amorphous iron oxides and consequently also high phosphorus sorption capacities. With few exceptions, the degree of phosphorus saturation was low. Thus, it can be assumed that the risk of increased phosphorus losses via leaching is rather low in case of a site adapted grassland management, an appropriate manuring and average weather conditions. However, regularly manured and intensively used grassland soils had higher degrees of phosphorus saturation than unfertilized soils and soils under extensive use, indicating a comparatively higher potential of phosphorus losses by leaching. The phosphorus sorption capacity was very high in Cambisols, calcareous Histosols and generally in acid mountain soils.

Keywords: soil types, management intensity, manuring, phosphorus fractions, water eutrophication

Einleitung

Phosphor ist einerseits ein lebensnotwendiges Nährelement für alle Lebewesen (MARSCHNER 1998) und andererseits für die Eutrophierung von Oberflächengewässern hauptverantwortlich (KUMMERT und STUMM 1989). Die Phosphor-Einträge in die Gewässer erfolgen aus punktuellen und diffusen Quellen. Die wichtigsten diffusen Quellen im landwirtschaftlichen Bereich sind Bodenerosion, Abschwemmung und Auswaschung (BRAUN et al. 1991, PRASUHN und BRAUN 1994, FROSSARD et al. 2004). Die Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser kann auch im Grünland unter bestimmten Boden-, Vegetations- und Witterungsverhältnissen für die Phosphor-Anreicherung im Grundwasser und in der Folge für die Eutrophierung von Oberflächengewässern von Bedeutung sein (BOHNER et al. 2007, BOHNER und ROHRER 2013). Eine Quantifizierung der jährlichen Phosphor-Austräge mit dem Sickerwasser ist unter weitgehend natürlichen Standortsbedingungen nur mit

Hilfe von Lysimetern möglich (MEISSNER et al. 2000). Allerdings wird das Untersuchungsergebnis sehr wesentlich von den Standortsbedingungen am Lysimeter beeinflusst. Daher können die Ergebnisse von Lysimeterversuchen nur sehr eingeschränkt auf andere Naturräume, Boden- und Vegetationstypen übertragen werden.

Die jährlichen Phosphor-Austräge mit dem Sickerwasser können räumlich stark variieren (KELLER und VAN DER ZEE 2004). Sie werden im Grünland in erster Linie vom Vorrat an leicht und schnell mobilisierbarem Phosphor im Boden, von der jährlichen Sickerwassermenge, vom Relief, von den Bodeneigenschaften (insbesondere Transformations-, Speicherungs- und Mobilisierungsvermögen), von der Art der Bewirtschaftung (Wiese, Mähweide, Weide) und Intensität der Nutzung (Anzahl der Schnitte und/oder Weidgänge pro Jahr) sowie von den Bewirtschaftungsmaßnahmen (insbesondere Art, Menge, Häufigkeit und Zeitpunkt der Düngung) determiniert. Bewirtschaftungsmaßnahmen

¹ Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (LFZ), Abteilung Umweltökologie, Raumberg 38, A-8952 IRDNING

² Weißenbach 87, A-8932 WEISSENBACH/ENNS

³ Universität für Bodenkultur Wien, Institut für ökologischen Landbau, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 WIEN

* Ansprechpartner: Dr. Andreas Bohner, andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at

machen sich im Dauergrünland vor allem im Oberboden bemerkbar. Eine langjährig überhöhte Düngung (nicht an den mengenmäßigen und zeitlichen Bedarf der Pflanzen angepasste Düngung) führt zu einer Phosphor-Anreicherung in der obersten Bodenschicht (FROSSARD et al. 2004, BOHNER 2005, 2008).

Die Beurteilung und Bewertung des Phosphor-Versorgungszustandes von Grünlandböden erfolgt in Österreich auf Grund des wasserlöslichen und CAL-löslichen Phosphor-Gehaltes im Oberboden (0-10 cm Bodentiefe). Der CAL-lösliche Phosphor-Gehalt ist ein Maß für die mobilisierbaren Phosphor-Reserven im Boden. Der CAL-lösliche Phosphor-Gehalt im Oberboden ist ein guter Indikator für das langjährige Düngungsniveau der Grünlandflächen (RUTHSATZ 2001, BOHNER 2005). Er dient auch als Grundlage für die Erstellung einer Phosphor-Düngeempfehlung (BMLFUW 2006). Der wasserlösliche Phosphor-Gehalt repräsentiert die leicht mobilisierbare und für die Pflanzen sofort verfügbare Phosphor-Fraktion im Boden. Er dient auch als Kriterium für die Beurteilung des Phosphor-Austragsrisikos von Grünlandflächen (PRASUHN und LAZZAROTTO 2005).

Aus landwirtschaftlich genutzten Flächen nehmen die Phosphor-Einträge in die Oberflächengewässer mit steigenden Phosphor-Gehalten im Boden zu (OTTO 1980, MEISSNER et al. 1992, PRASUHN und BRAUN 1994, RÖMER 1997, FROSSARD et al. 2004). Die tatsächlichen und möglichen Phosphor-Einträge können allein auf Grund der wasserlöslichen und CAL-löslichen Phosphor-Gehalte im Oberboden nicht abgeschätzt werden (PIHL und WERNER 1993). Um das Phosphor-Austragspotenzial einer landwirtschaftlich genutzten Fläche beurteilen zu können, sind auch Kenntnisse über die Phosphor-Speicherkapazität und den Phosphor-Sättigungsgrad im Boden erforderlich. Für die Phosphor-Speicherkapazität der Böden sind die amorphen Aluminium- und Eisen-Oxide (inklusive Hydroxide und Oxihydroxide) hauptverantwortlich (FREESE et al. 1992, KELLER und VAN DER ZEE 2004). Das Phosphor-Austragspotenzial einer landwirtschaftlich genutzten Fläche hängt aber nicht nur von der Phosphor-Speicherkapazität im Boden ab, auch der bereits erreichte Phosphor-Sättigungsgrad der Sorbenten hat eine große Bedeutung. Je höher der Phosphor-Sättigungsgrad im Boden ist, desto höher ist in der Regel die Phosphor-Konzentration in der Bodenlösung und somit die potenzielle Gefahr von Phosphor-Verlusten durch Auswaschung (PIHL und WERNER 1995, FROSSARD et al. 2004, KELLER und VAN DER ZEE 2004). Bei einer geringen Phosphor-Speicherkapazität führt eine ständig überhöhte Düngung rasch zu einem hohen Phosphor-Sättigungsgrad im Boden, und die Gefahr der Eutrophierung von Grundwasser und Oberflächengewässern nimmt zu (LOOKMAN et al. 1995).

Obwohl die Phosphor-Speicherkapazität und der Phosphor-Sättigungsgrad geeignete Indikatoren für die Abschätzung von Phosphor-Auswaschungsverlusten aus landwirtschaftlich genutzten Böden sind (LEINWEBER et al. 1999), liegen bisher nur wenige publizierte Untersuchungen von österreichischen Grünlandböden vor (BOHNER et al. 2013). Sowohl aus landwirtschaftlicher als auch aus wasserwirtschaftlicher Sicht stellen sich primär vier Fragen:

- Wie hoch sind die Werte für die Phosphor-Speicherkapazität und den Phosphor-Sättigungsgrad in verschiedenen Böden des Dauergrünlandes?
- In welchem Ausmaß wird der Phosphor-Sättigungsgrad durch die Grünlandbewirtschaftung beeinflusst?
- Gibt es Bodentypen, die eine besonders hohe oder niedrige Phosphor-Speicherkapazität aufweisen?
- Bestehen Zusammenhänge zwischen der Phosphor-Speicherkapazität bzw. dem Phosphor-Sättigungsgrad und den Phosphor-Fractionen, die in der offiziellen Düngerberatung für die Erstellung einer Phosphor-Düngeempfehlung verwendet werden?

Da im Rahmen der routinemäßigen Bodenuntersuchung bei Dauergrünland die Tiefenstufe 0-10 cm beprobt wird und Bewirtschaftungsmaßnahmen hauptsächlich im Oberboden wirksam werden, wurden die Phosphor-Speicherkapazität und der Phosphor-Sättigungsgrad in der Tiefenstufe 0-10 cm untersucht. Somit bestanden die Ziele dieser Studie darin, die Phosphor-Speicherkapazität und den Phosphor-Sättigungsgrad in repräsentativen Böden des Dauergrünlandes im Oberboden (0-10 cm Bodentiefe) zu ermitteln, die berechneten Werte in Beziehung zu unterschiedlichen Bodentypen, zur Düngung und Nutzungsintensität zu setzen sowie Zusammenhänge mit dem wasserlöslichen und CAL-löslichen Phosphor-Gehalt aufzuzeigen.

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden im Steirischen Ennstal und Steirischen Salzkammergut durchgeführt. Einige wenige Alm- und Gebirgsböden wurden auch in Oberkärnten (Villacher Alpe, Nockberge) beprobt. Geologisch können diese Gebiete den Nördlichen und Südlichen Kalkalpen, der Grauwackenzone und den östlichen Zentralalpen zugeordnet werden (SCHUSTER et al. 2013). Das Untersuchungsgebiet ist durch eine höhere Reliefenergie gekennzeichnet. Es weist in den Tal- und Beckenlagen im langjährigen Mittel (1971 - 2000) eine Juli-Temperatur von 15,7 bis 16,7 °C, eine Jänner-Temperatur von -4,2 bis -2,5 °C und eine Jahresmittel-Temperatur von 5,9 bis 7,3 °C auf. Der Jahres-Niederschlag variiert zwischen 970 und 1532 mm. Vor allem das Steirische Salzkammergut ist sehr niederschlags- und schneereich. In der Vegetationsperiode (April bis September) fallen etwa 59 bis 62 % des Jahres-Niederschlags. Die Schneedeckenperiode beträgt im langjährigen Mittel 82 bis 127 Tage im Jahr. Die Schwankungsbreite der frostfreien Tage reicht von 213 bis 238 Tage (ZAMG 2002). Im Untersuchungsgebiet herrscht somit ein relativ winterkaltes, sommerkühles, niederschlags- und schneereiches Klima. Die Vegetationsperiode ist verhältnismäßig kurz. Das Klima begünstigt die Grünlandwirtschaft und Viehzucht (Rinderhaltung). Im Untersuchungsgebiet ist daher der überwiegende Teil der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche Dauergrünland, während Ackerflächen nur vereinzelt vorkommen. Die Grünlandflächen werden hauptsächlich mit hofeigenem Wirtschaftsdünger (Rindergülle, Rindermist) gedüngt. Das Untersuchungsgebiet ist repräsentativ

für das Grünland im Berggebiet Österreichs und somit für diese Untersuchung besonders geeignet. Wegen der eher ungünstigen klimatischen und topografischen Verhältnisse sowie auf Grund der kleinbäuerlichen Betriebsstrukturen zählt das Untersuchungsgebiet – nach europäischen Maßstäben gemessen – zu den mäßig intensiv landwirtschaftlich genutzten Grünlandgebieten.

Untersuchungsflächen

Die Seehöhe der Untersuchungsflächen schwankte zwischen 600 und 1920 m. Alle Probenahmeflächen waren nach vegetations- und feldbodenkundlichen Kriterien weitgehend homogen. Untersucht wurden typische Grünlandböden, vor allem Rendzinen, Kalklehm-Rendzinen, Pararendzinen, Braunerden, Kalkbraunlehme, Auböden, Augleye, Gleye und carbonathaltige Niedermoore. Damit wurde beinahe das gesamte Spektrum an Bodentypen und Wasserhaushaltsstufen im Untersuchungsgebiet erfasst. Das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung war sehr vielfältig. Es wurden sowohl carbonatfreie als auch carbonathaltige Böden untersucht. Die Bodenreaktion reichte von sehr stark sauer bis schwach alkalisch. Die vorherrschenden Bodenarten waren lehmiger Sand, schluffiger Sand, sandiger Schluff, lehmiger Schluff, sandiger Lehm und schluffiger Lehm. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff schwankte zwischen 2,4 und 55,1 % (WEISSENSTEINER 2014). Ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl der Probenahmefläche war eine praxisübliche Bewirtschaftung der Grünlandfläche. Es wurden alle im Untersuchungsgebiet möglichen Bewirtschaftungsformen (Dauerwiese, Mähweide, Dauerweide) und Nutzungsintensitäten (langjährig keine Nutzung bis regelmäßig fünf Nutzungen pro Jahr) berücksichtigt. Sowohl jahrzehntelang ungedüngte als auch regelmäßig gedüngte Grünlandflächen wurden beprobt. Damit wurde beinahe das gesamte Spektrum an Pflanzengesellschaften des Grünlandes im Untersuchungsgebiet abgedeckt.

Methoden

Im Untersuchungsgebiet wurden insgesamt 239 Bodenproben aus der Tiefenstufe 0-10 cm für die chemischen Analysen gezogen. Die Probenahme erfolgte im Zeitraum 2007 bis 2013 jeweils während der Vegetationsperiode in Form einer flächenrepräsentativen Mischprobe. Auf regelmäßig gedüngten Flächen wurden die Proben immer vor der Düngung entnommen. Die Bodenproben wurden luftgetrocknet, homogenisiert und bei 2 mm Maschenweite gesiebt. Auf Grund der speziellen Problemstellung (Phosphor-Speicherkapazität und Phosphor-Sättigungsgrad) wurden die Bodenanalysen auf den Phosphor und die Sesquioxide fokussiert. Zur Charakterisierung des allgemeinen Bodenzustandes wurden auch der pH-Wert und der Gehalt an organischem Kohlenstoff bestimmt. Der pH-Wert, die Redoxbedingungen sowie die Gehalte und Umsetzungen der organischen Substanz beeinflussen sehr wesentlich die Phosphor-Löslichkeit im Boden (WELP et al. 1983). Die Analysemethoden richteten sich nach der jeweiligen ÖNORM (pH-Wert in einer 0,01 M CaCl₂-Lösung mittels pH-Meter; organischer Kohlenstoff durch trockene Verbrennung mittels Elementaranalyse; Phosphor nach

der Calcium-Acetat-Lactat [CAL]-Methode mittels SFAS Autoanalyser; Phosphor im Wasserextrakt 1:20 mittels ICP-OES). Die Phosphor-Speicherkapazität (PSC) und der Phosphor-Sättigungsgrad (DPS) wurden folgendermaßen berechnet (ECKHARDT und LEINWEBER 1997):

$$PSC \text{ (in mmol kg}^{-1}\text{)} = 0,5 \times (Al_{ox} + Fe_{ox} + Mn_{ox})$$

$$DPS \text{ (in \%)} = 100 \times P_{ox} \times PSC^{-1}.$$

Die Gehalte an oxalatlöslichem Phosphor, Aluminium, Eisen und Mangan (P_{ox} , Al_{ox} , Fe_{ox} , Mn_{ox}) wurden nach SCHWERTMANN (1964) analysiert. Die Gehalte an oxalatlöslichem Aluminium, Eisen und Mangan repräsentieren die in Böden amorph vorliegenden Aluminium-, Eisen- und Mangan-Oxide, an die bei neutraler bis saurer Bodenreaktion Phosphor stark gebunden werden kann (KELLER und VAN DER ZEE 2004). Der Gehalt an oxalatlöslichem Phosphor ist ein Maß für die Menge des hauptsächlich an pedogene Aluminium-, Eisen- und Mangan-Oxide adsorbierten Phosphats (LEINWEBER et al. 1997). Die Gesamtelementgehalte an Aluminium, Eisen und Mangan wurden nach Mikrowellenaufschluss mit Königswasser bestimmt.

Statistische Analysen

Die statistische Auswertung der Daten (Median, arithmetischer Mittelwert, Variationskoeffizient, KRUSKAL-WALLIS-Test, SPEARMAN-Rangkorrelation) erfolgte mit SPSS Statistics 21. Die Korrelationskoeffizienten sind signifikant auf dem Niveau 0,01 und hoch signifikant auf dem Niveau 0,001.

Ergebnisse

In den *Tabellen 1* und *2* sind einzelne Phosphor-Fractionen, die Phosphor-Speicherkapazität und der Phosphor-Sättigungsgrad getrennt für terrestrische Talböden (Rendzinen, Kalklehm-Rendzinen, Pararendzinen, Braunerden, Kalkbraunlehme), hydromorphe Talböden (Auböden, Augleye, Gleye, Anmoore, carbonathaltige Niedermoore), Alm- und Gebirgsböden für die Tiefenstufe 0-10 cm angeführt. Erwartungsgemäß schwankten die Werte in weiten Grenzen, weil das Spektrum der untersuchten Böden, Bewirtschaftungsformen und Nutzungsintensitäten sehr breit war. Die Streuung war vor allem bei den hydromorphen Talböden ausgesprochen hoch. Die untersuchten terrestrischen Talböden wiesen in den obersten 10 cm im Median einen deutlich höheren oxalatlöslichen Phosphor-Gehalt und Phosphor-Sättigungsgrad als die hydromorphen Talböden auf; der wasserlösliche Phosphor-Gehalt war hingegen vergleichsweise niedriger. Die Gehalte an CAL-löslichem Phosphor waren sowohl in den terrestrischen als auch in den hydromorphen Talböden – bewertet nach den „Richtlinien für die sachgerechte Düngung“ (BMLFUW 2006) – meist sehr niedrig. Allerdings wurden in den terrestrischen Talböden vereinzelt auch sehr hohe CAL-Werte festgestellt. Der Maximalwert lag bei 204 mg P pro kg Feinboden. In den hydromorphen Talböden war der Maximalwert mit 111 mg P pro kg Feinboden deutlich niedriger. Die Mediane der Phosphor-Speicherkapazität variierten in den untersuchten Bodengruppen von 101 bis 178 mmol pro kg Feinboden. Bemerkenswert ist, dass die hydromorphen Talböden in den obersten 10 cm keine

Tabelle 1: pH-Wert, C_{org}-Gehalt, ausgewählte Phosphor-Fractionen, Phosphor-Speicherkapazität und Phosphor-Sättigungsgrad in terrestrischen und hydromorphen Talböden in der Tiefenstufe 0-10 cm.

	terrestrische Talböden (n = 106)							hydromorphe Talböden (n = 106)						
	pH CaCl ₂	C _{org} %	H ₂ O-P mg kg ⁻¹	CAL-P mg kg ⁻¹	P _{ox} mg kg ⁻¹	PSC mmol kg ⁻¹	DPS %	pH CaCl ₂	C _{org} %	H ₂ O-P mg kg ⁻¹	CAL-P mg kg ⁻¹	P _{ox} mg kg ⁻¹	PSC mmol kg ⁻¹	DPS %
Median	5,6	4,2	7	21	540	102	20	5,9	36,6	9	21	279	101	10
MW	5,8	4,3	9	27	599	97	21	6,0	29,2	24	28	331	111	11
V (%)	15	21	71	90	54	34	50	11	58	128	84	66	63	53
Min	4,4	2,6	1	1	67	24	3	4,6	2,4	1	1	54	19	1
Max	7,4	7,5	36	204	1881	164	52	7,2	55,1	132	111	1051	347	28

n = Anzahl der Bodenanalysen; MW = arithmetischer Mittelwert; V (%) = Variationskoeffizient; Min = Minimum; Max = Maximum; H₂O-P = wasserlöslicher Phosphor-Gehalt; CAL-P = CAL-löslicher Phosphor-Gehalt; P_{ox} = Gehalt an oxalateextrahierbarem Phosphor; PSC = Phosphor-Speicherkapazität; DPS = Phosphor-Sättigungsgrad

Tabelle 2: pH-Wert, C_{org}-Gehalt, ausgewählte Phosphor-Fractionen, Phosphor-Speicherkapazität und Phosphor-Sättigungsgrad in Alm- und Gebirgsböden in der Tiefenstufe 0-10 cm.

	Alm- und Gebirgsböden (n = 27)						
	pH CaCl ₂	C _{org} %	H ₂ O-P mg kg ⁻¹	CAL-P mg kg ⁻¹	P _{ox} mg kg ⁻¹	PSC mmol kg ⁻¹	DPS %
Median	4,5	14,6	14	28	865	178	17
MW	4,5	14,9	18	34	942	175	18
V (%)	22	30	97	55	36	30	41
Min	3,2	4,1	3	6	399	76	9
Max	6,3	21,9	82	82	1583	248	42

n = Anzahl der Bodenanalysen; MW = arithmetischer Mittelwert; V (%) = Variationskoeffizient; Min = Minimum; Max = Maximum; H₂O-P = wasserlöslicher Phosphor-Gehalt; CAL-P = CAL-löslicher Phosphor-Gehalt; P_{ox} = Gehalt an oxalateextrahierbarem Phosphor; PSC = Phosphor-Speicherkapazität; DPS = Phosphor-Sättigungsgrad

niedrigere Phosphor-Speicherkapazität als die terrestrischen Talböden aufwiesen. Beim Phosphor-Sättigungsgrad schwankten die Mediane in den untersuchten Bodengruppen zwischen 10 und 20 %. Auffallend hohe Werte (über 30 %) wurden vereinzelt in den terrestrischen Talböden sowie in den Alm- und Gebirgsböden festgestellt. In den untersuchten Alm- und Gebirgsböden waren die Gehalte an wasserlöslichem, CAL-löslichem und oxalatlöslichem Phosphor sowie die Phosphor-Speicherkapazität im Median höher als in den Talböden. Die Alm- und Gebirgsböden wiesen in den obersten 10 cm meist sehr hohe Humus-Gehalte und niedrige pH-Werte auf.

In den Tabellen 3 und 4 sind die Gehalte an oxalateextrahierbarem Aluminium, Eisen und Mangan sowie das Verhältnis zwischen Gesamtelementgehalt und oxalateextrahierbarem

Anteil für die Tiefenstufe 0-10 cm angeführt. Die Summe der Gehalte an oxalateextrahierbarem Aluminium, Eisen und Mangan (oxalateextrahierbare Sesquioxide) war im Median in den untersuchten Alm- und Gebirgsböden am höchsten und in den hydromorphen Talböden am niedrigsten. Sowohl in den Tal- als auch in den Alm- und Gebirgsböden dominierte das oxalateextrahierbare Eisen. Das oxalateextrahierbare Mangan war mengenmäßig gegenüber dem Eisen und Aluminium von geringer Bedeutung. Das Verhältnis Al_{ox} : Fe_{ox} : Mn_{ox} (jeweils Mediane) betrug in den terrestrischen Talböden 1 : 2,80 : 0,28, in den hydromorphen Talböden 1 : 4,53 : 0,21 und in den Alm- und Gebirgsböden 1 : 2,61 : 0,05. Sowohl in den Tal- als auch in den Alm- und Gebirgsböden nahm das Verhältnis zwischen Gesamtelementgehalt und oxalateextrahierbarem Anteil in der Rangfolge Aluminium > Eisen > Mangan ab. Erwartungsgemäß war das Verhältnis Al_i : Al_{ox} säurebedingt in den Alm- und Gebirgsböden und das Fe_i : Fe_{ox}-Verhältnis reduktionsbedingt in den hydromorphen Talböden am niedrigsten.

In der Tabelle 5 sind ausgewählte Bodenkennwerte in Abhängigkeit von der Düngung und Nutzungsintensität für die Tiefenstufe 0-10 cm angeführt. Streuwiesen, ein- und zweischrittige Wiesen, Hutweiden und Almweiden wurden der extensiven Nutzungskategorie zugeordnet; drei- und mehrschrittige Wiesen, Mähweiden und Kulturweiden wurden in der intensiven Nutzungskategorie zusammengefasst. Langjährig nicht mehr genutzte Grünlandflächen blieben bei der Auswertung der Daten unberücksichtigt. Um eine Überrepräsentation der Streuwiesen im Datenmaterial zu vermeiden, wurde der Stichprobenumfang bei diesem Vegetationstyp durch Zufallsauswahl um die Hälfte reduziert. Erwartungsgemäß wiesen regelmäßig gedüngte bzw. intensiv genutzte Grünlandböden höhere Gehalte an

Tabelle 3: Oxalateextrahierbares Aluminium, Eisen und Mangan (0-10 cm Bodentiefe).

	terrestrische Talböden (n = 106)				hydromorphe Talböden (n = 106)				Alm- und Gebirgsböden (n = 27)			
	Al _{ox} mg kg ⁻¹	Fe _{ox} mg kg ⁻¹	Mn _{ox} mg kg ⁻¹	S _{ox} mg kg ⁻¹	Al _{ox} mg kg ⁻¹	Fe _{ox} mg kg ⁻¹	Mn _{ox} mg kg ⁻¹	S _{ox} mg kg ⁻¹	Al _{ox} mg kg ⁻¹	Fe _{ox} mg kg ⁻¹	Mn _{ox} mg kg ⁻¹	S _{ox} mg kg ⁻¹
Median	2103	5885	590	9072	1465	6641	304	8776	4002	10434	206	16074
MW	2113	5821	676	8618	1625	8656	370	10651	4206	10357	447	14897
V (%)	41	38	68	34	71	81	80	69	42	35	130	31
Min	530	1071	118	2143	189	1403	22	1812	1135	3501	9	6012
Max	4285	12085	2633	15387	6257	37075	1677	38053	8153	18030	2582	22783

n = Anzahl der Bodenanalysen; MW = arithmetischer Mittelwert; V (%) = Variationskoeffizient; Min = Minimum; Max = Maximum; Al_{ox}, Fe_{ox}, Mn_{ox} = Gehalt an oxalateextrahierbarem Aluminium, Eisen, Mangan; S_{ox} = Gehalt an oxalateextrahierbaren Sesquioxiden (Al_{ox}+Fe_{ox}+Mn_{ox})

Tabelle 4: Verhältnis Gesamtelementgehalt zu oxalatextrahierbarem Anteil (0-10 cm Bodentiefe).

	terrestrische Talböden (n = 106)			hydromorphe Talböden (n = 106)			Alm- und Gebirgsböden (n = 27)		
	Al _t : Al _{ox}	Fe _t : Fe _{ox}	Mn _t : Mn _{ox}	Al _t : Al _{ox}	Fe _t : Fe _{ox}	Mn _t : Mn _{ox}	Al _t : Al _{ox}	Fe _t : Fe _{ox}	Mn _t : Mn _{ox}
Median	8	5	1	6	2	1	4	3	2
MW	9	5	2	8	4	2	5	3	2
V (%)	34	33	64	67	95	52	67	35	54
Min	5	3	1	2	1	1	3	1	1
Max	22	11	8	22	16	5	20	5	6

n = Anzahl der Bodenanalysen; MW = arithmetischer Mittelwert; V (%) = Variationskoeffizient; Min = Minimum; Max = Maximum; Al_t, Fe_t, Mn_t = Gesamtelementgehalt an Aluminium, Eisen, Mangan; Al_{ox}, Fe_{ox}, Mn_{ox} = Gehalt an oxalatextrahierbarem Aluminium, Eisen, Mangan

Tabelle 5: Bodenkennwerte in Abhängigkeit von der Düngung und Nutzungsintensität (Mediane) in der Tiefenstufe 0-10 cm.

	H ₂ O-P mg kg ⁻¹	CAL-P mg kg ⁻¹	P _{ox} mg kg ⁻¹	PSC mmol kg ⁻¹	DPS %
ungedüngt (n = 66)	5	13	325	90	11
gedüngt (n = 110)	8	22	570	105	19
extensiv (n = 95)	5	14	407	100	15
intensiv (n = 74)	8	24	629	105	21

n = Anzahl der Bodenanalysen; H₂O-P = wasserlöslicher Phosphor-Gehalt; CAL-P = CAL-löslicher Phosphor-Gehalt; P_{ox} = Gehalt an oxalatextrahierbarem Phosphor; PSC = Phosphor-Speicherkapazität; DPS = Phosphor-Sättigungsgrad

wasserlöslichem, CAL-löslichem und oxalatextrahierbarem Phosphor als langjährig ungedüngte bzw. extensiv genutzte Böden auf; die Phosphor-Speicherkapazität und der Phosphor-Sättigungsgrad waren ebenfalls vergleichsweise höher. Bemerkenswert ist, dass auch in den regelmäßig gedüngten bzw. intensiv genutzten Grünlandböden die Gehalte an CAL-löslichem Phosphor – bewertet nach den „Richtlinien für die sachgerechte Düngung“ (BMLFUW 2006) – im Median sehr niedrig waren.

In der *Abbildung 1* ist die Phosphor-Speicherkapazität in Abhängigkeit vom Bodentyp dargestellt. Erwartungsgemäß war die Phosphor-Speicherkapazität in den carbonathaltigen A-C-Böden (Rendzinen, Kalklehm-Rendzinen, Pararendzinen) am niedrigsten. Unerwartet hoch war sie hingegen in den Anmooren und carbonathaltigen Niedermooren. Bemerkenswert ist ferner, dass die Braunerden im Median eine höhere Phosphor-Speicherkapazität als die Kalkbraunlehme aufwiesen.

In der *Tabelle 6* sind ausgewählte Korrelationskoeffizienten (SPEARMAN-Rangkorrelation) angeführt. Die Korrelationskoeffizienten waren mit wenigen Ausnahmen nicht sehr hoch. Die Phosphor-Speicherkapazität korrelierte hoch signifikant positiv mit dem CAL-löslichen Phosphor-Gehalt in den terrestrischen Talböden sowie mit dem oxalatlöslichen Phosphor-Gehalt in den terrestrischen und hydromorphen Talböden. Demgegenüber wurden hoch signifikante bzw. signifikante negative Korrelationen zwischen der Phosphor-Speicherkapazität und dem wasserlöslichen und CAL-löslichen Phosphor-Gehalt in den Alm- und Gebirgsböden sowie dem wasserlöslichen Phosphor-Gehalt in den hydromorphen Talböden festgestellt. Unter den Sesquioxiden wies das oxalatextrahierbare Eisen in den Talböden den höchsten positiven Korrelationskoeffizienten auf, in den Alm- und Gebirgsböden war es das oxalatextrahierbare Aluminium. Der Phosphor-Sättigungsgrad korrelierte hoch signifikant

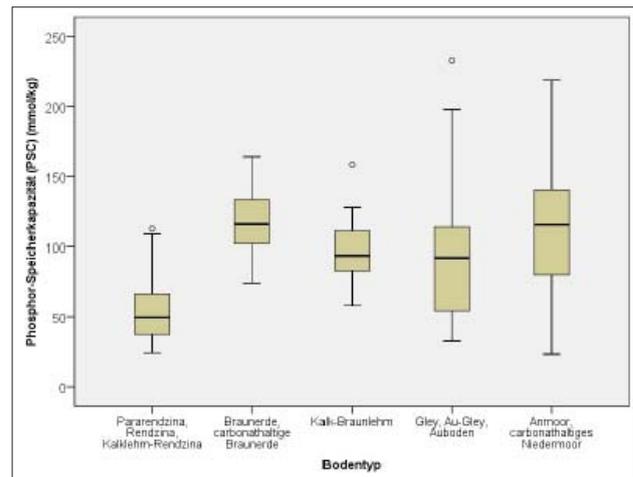


Abbildung 1: Phosphor-Speicherkapazität in Abhängigkeit vom Bodentyp.

bzw. signifikant positiv mit dem wasserlöslichen und CAL-löslichen Phosphor-Gehalt in den terrestrischen Talböden sowie mit dem wasserlöslichen und CAL-löslichen Phosphor-Gehalt in den Alm- und Gebirgsböden. Demgegenüber war die Korrelation zwischen dem Phosphor-Sättigungsgrad und dem wasserlöslichen Phosphor-Gehalt in den hydromorphen Talböden signifikant negativ. Erwartungsgemäß korrelierte der Phosphor-Sättigungsgrad hoch signifikant positiv mit dem Gehalt an oxalatextrahierbarem Phosphor in allen untersuchten Bodengruppen. Zu den Sesquioxiden bestanden hoch signifikante bzw. signifikante negative Korrelationen mit dem oxalatextrahierbaren Eisen in den hydromorphen Talböden sowie mit dem oxalatextrahierbaren Aluminium in den terrestrischen Talböden, Alm- und Gebirgsböden.

Diskussion

Datengrundlage für diese Untersuchung zu Phosphor-Speicherkapazität und Phosphor-Sättigungsgrad in österreichischen Böden des Dauergrünlandes waren 239 Bodenuntersuchungen, die vorwiegend im Steirischen Ennstal und Steirischen Salzkammergut auf landwirtschaftlichen Betrieben durchgeführt wurden. Das Untersuchungsgebiet eignet sich für diese Studie besonders gut, weil

- es repräsentativ für das Grünland im österreichischen Berggebiet ist,
- aus klimatischen, geologischen, geomorphologischen und lithologischen Gründen eine Vielzahl an Boden- und

Tabelle 6: Ausgewählte Korrelationskoeffizienten (SPEARMAN-Rangkorrelation).

	H ₂ O-P	CAL-P	P _{ox}	Al _{ox}	Fe _{ox}	Mn _{ox}
PSC - terrestrische Talböden (n=106)	-0,050	0,315	0,595	0,824	0,872	0,422
<i>Sig (2-seitig)</i>	<i>0,614</i>	<i>0,001</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>
PSC - hydromorphe Talböden (n=106)	-0,248	-0,178	0,535	0,591	0,952	0,352
<i>Sig (2-seitig)</i>	<i>0,010</i>	<i>0,068</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>
PSC - Alm- und Gebirgsböden (n=27)	-0,588	-0,493	0,355	0,800	0,548	0,579
<i>Sig (2-seitig)</i>	<i>0,001</i>	<i>0,009</i>	<i>0,069</i>	<i>0,000</i>	<i>0,003</i>	<i>0,002</i>
DPS - terrestrische Talböden (n=106)	0,351	0,290	0,622	-0,330	-0,074	-0,190
<i>Sig (2-seitig)</i>	<i>0,000</i>	<i>0,003</i>	<i>0,000</i>	<i>0,001</i>	<i>0,453</i>	<i>0,051</i>
DPS - hydromorphe Talböden (n=106)	-0,262	-0,200	0,544	0,197	-0,452	0,187
<i>Sig (2-seitig)</i>	<i>0,007</i>	<i>0,040</i>	<i>0,000</i>	<i>0,043</i>	<i>0,000</i>	<i>0,055</i>
DPS - Alm- und Gebirgsböden (n=27)	0,722	0,733	0,626	-0,500	-0,037	-0,471
<i>Sig (2-seitig)</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,008</i>	<i>0,854</i>	<i>0,013</i>

n = Anzahl der Bodenanalysen; H₂O-P = wasserlöslicher Phosphor-Gehalt; CAL-P = CAL-löslicher Phosphor-Gehalt; P_{ox}, Al_{ox}, Fe_{ox}, Mn_{ox} = Gehalt an oxalateextrahierbarem Phosphor, Aluminium, Eisen, Mangan; PSC = Phosphor-Speicherkapazität; DPS = Phosphor-Sättigungsgrad

Vegetationstypen auf relativ kleinem Raum vorhanden ist,

- auf Grund der topografischen Verhältnisse (hohe Vielfalt an Geländeformen) und kleinbäuerlichen Betriebsstrukturen eine große Amplitude der Bewirtschaftungsformen und Nutzungsintensitäten im Dauergrünland gegeben ist.

Da die Redoxbedingungen einen großen Einfluss auf die Phosphor-Löslichkeit im Boden haben (WELP et al. 1983) und es fundamentale Unterschiede in der Bewirtschaftung zwischen Tal- und Gebirgsstandorten gibt, wurden für die Auswertung der Daten die Böden nach ihrer Seehöhe und ihrem Wasserregime in drei Gruppen eingeteilt. Vor allem im Wirtschaftsgrünland werden einige Bodenparameter sehr wesentlich durch Bewirtschaftungsmaßnahmen (insbesondere Düngung) verändert. Das Ausmaß dieser Veränderung ist von der Art und Intensität der jeweiligen Maßnahme abhängig. Auf Grund der unterschiedlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den einzelnen Grünlandflächen und wegen des breiten Spektrums an untersuchten Bodentypen streuten die gemessenen und berechneten Bodenparameter trotz Gruppeneinteilung innerhalb weiter Grenzen. Auf Grund der asymmetrischen Verteilung der Daten war der Median meist niedriger als der arithmetische Mittelwert.

Die terrestrischen Talböden wiesen in den obersten 10 cm im Median einen deutlich höheren oxalatlöslichen Phosphor-Gehalt und Phosphor-Sättigungsgrad als die hydromorphen Talböden auf. Auch die Maximalwerte waren beträchtlich größer. Die höheren Düngergaben in den intensiver genutzten terrestrischen Talböden dürften für die Phosphor-Anreicherung im Oberboden hauptverantwortlich sein. In den carbonathaltigen Niedermooren hingegen war der Gehalt an wasserlöslichem Phosphor meist sehr hoch. Ursachen dafür sind vermutlich die häufigen und länger andauernden reduzierenden Bedingungen in den nicht entwässerten Moorböden sowie die geringen Phosphor-Entzüge der Moorpflanzen. Unter reduzierenden Bedingungen steigt der Phosphor-Gehalt in der Bodenlösung infolge reduktiver Auflösung Phosphor-haltiger Eisen(III)-Oxide an (HOLFORD und PATRICK 1979, WELP et al. 1983). Generell laufen bei niedrigen Boden-pH-Werten Reduktionsprozesse leichter (bei höherem Redoxpotenzial) als bei hohen pH-Werten ab (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002). Daher

ist vor allem in sauren Moorböden der Gehalt an wasserlöslichem Phosphor oft sehr hoch (SCHEFFER 1977). In den humusreichen, sauren Alm- und Gebirgsböden waren die Gehalte an wasserlöslichem, CAL-löslichem und oxalateextrahierbarem Phosphor im Median höher als in den Talböden. In stark sauren Böden werden Phosphate auch durch protolytische Auflösung Phosphor-haltiger Verbindungen in beträchtlichem Ausmaß mobilisiert (WELP et al. 1983). Daher und wegen der geringen Phosphor-Entzüge der Gebirgspflanzen weisen stark versauerte Alm- und Gebirgsböden häufig sehr hohe Gehalte an wasserlöslichem und CAL-löslichem Phosphor im Oberboden auf (BOHNER 2010). Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse deuten darauf hin, dass sowohl häufige und länger andauernde reduzierende Bedingungen im Boden als auch niedrige Boden-pH-Werte die Löslichkeit der Phosphate und somit auch deren Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit begünstigen. Daher darf angenommen werden, dass vor allem saure, nicht entwässerte Moorböden sowie stark saure Alm- und Gebirgsböden einen geringen Phosphor-Düngerbedarf besitzen.

In dieser Arbeit wurde die Phosphor-Speicherkapazität aus der Summe von oxalateextrahierbarem Aluminium, Eisen und Mangan berechnet. Durch die Nichtberücksichtigung des oxalateextrahierbaren Mangans und die unterschiedliche Probenahmetiefe sind die Werte von KELLER und VAN DER ZEE (2004) mit den hier präsentierten nicht streng vergleichbar. Die berechnete Phosphor-Speicherkapazität gilt außerdem nur für carbonatfreie, saure und sandige Böden (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002). In der vorliegenden Arbeit wurden auch carbonathaltige, schwach alkalische Böden mitberücksichtigt, um die Bedeutung der amorphen Sesquioxide für die Phosphor-Speicherkapazität in diesen Böden beurteilen zu können. Die untersuchten Grünlandböden wiesen in den obersten 10 cm auf Grund der hohen Gehalte an amorphen Sesquioxiden meist eine große Phosphor-Speicherkapazität auf. Der Median lag in den terrestrischen Talböden, hydromorphen Talböden, Alm- und Gebirgsböden bei 102, 101 und 178 mmol pro kg Feinboden. In einem anderen österreichischen Naturraum (Innviertel, Molassezone) wurde mit durchschnittlich 92 mmol pro kg Feinboden ebenfalls eine hohe Phosphor-Speicherkapazität im Oberboden von Grünlandböden festgestellt (BOHNER

et al. 2013). Ähnliche Werte wurden auch von KELLER und VAN DER ZEE (2004) in der Schweiz ermittelt; in intensiv genutzten Grünlandböden betrug die Phosphor-Speicherkapazität in den obersten 5 cm im Durchschnitt 91 mmol pro kg Feinboden. In den von uns untersuchten Grünlandböden war der Phosphor-Sättigungsgrad in den obersten 10 cm mit wenigen Ausnahmen niedrig. Der Median lag in den terrestrischen Talböden, hydromorphen Talböden, Alm- und Gebirgsböden bei 20 %, 10 % und 17 %. In den intensiv genutzten schweizerischen Grünlandböden betrug der Phosphor-Sättigungsgrad in der Tiefenstufe 0-5 cm im Durchschnitt 48 %; er variierte zwischen 22 % in einer extensiv genutzten Dauerwiese, die 14 Jahre nicht gedüngt wurde, und 88 % in einer stark gedüngten Mähwiese (KELLER und VAN DER ZEE 2004). In der internationalen Literatur wird angenommen, dass der Boden dann mit Phosphor gesättigt ist, wenn der Phosphor-Sättigungsgrad den Wert von 30 % erreicht (SCHOETERS et al. 1995, DE SMET et al. 1996, LEINWEBER et al. 1997). Dieser Grenzwert wurde in 9 % der 239 von uns untersuchten Bodenproben (22mal) überschritten. Der Maximalwert mit einem Phosphor-Sättigungsgrad von 52 % wurde in einem häufig betretenen und stark mit Harn und Kot der Weidetiere gedüngten Trittrasen festgestellt. In diesem übernutzten Weideboden wurde mit 204 mg pro kg Feinboden auch der Maximalwert an CAL-löslichem Phosphor ermittelt; der wasserlösliche Phosphor-Gehalt war mit 21 mg pro kg Feinboden ebenfalls sehr hoch. Generell wurden hohe Phosphor-Sättigungsgrade unabhängig von den unterschiedlichen Bodentypen und Ausgangsmaterialien der Bodenbildung vor allem in übernutzten Weideböden und stark gedüngten Wiesenböden festgestellt. Diese Flächen besitzen ein erhöhtes Phosphor-Austragspotenzial, weshalb die jährlich ausgebrachte Düngermenge reduziert werden sollte. Allerdings wurden auch in einigen wenigen extensiv und nicht mehr genutzten Flächen Grenzwertüberschreitungen beobachtet. Sowohl stark saure Braunerden im Gebirge als auch schwach alkalische Kalklehm-Rendzinen in den Tallagen waren davon betroffen. In den untersuchten Grünlandböden dürfte auf Grund der meist hohen Phosphor-Speicherkapazität und wegen dem überwiegend niedrigen Phosphor-Sättigungsgrad die Gefahr einer erhöhten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser im Falle einer standortangepassten Bewirtschaftung, sachgerechten Düngung und bei durchschnittlichen Witterungsverhältnissen gering sein. Dies bestätigen auch Messergebnisse von mehrjährigen Lysimeteruntersuchungen (BOHNER et al. 2007). Grünlandböden mit hoher Phosphor-Speicherkapazität und niedrigem Phosphor-Sättigungsgrad tolerieren kurz- bis mittelfristig auch höhere Phosphor-Düngergaben, ohne dass es gleichzeitig zu einem starken Anstieg der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser kommt (BOHNER und ROHRER 2013). Wenn allerdings durch ständig überhöhte Düngergaben das Phosphor-Speichervermögen allmählich überschritten wird, nehmen die Phosphor-Auswaschungsverluste stark zu (PIHL und WERNER 1995, LOOKMAN et al. 1995, DE SMET et al. 1996).

In den regelmäßig gedüngten und intensiv genutzten Grünlandböden waren die Gehalte an wasserlöslichem, CAL-löslichem und oxalatextrahierbarem Phosphor in

den obersten 10 cm im Median deutlich höher als in den langjährig ungedüngten und extensiv genutzten Flächen. Auf Grund zahlreicher Untersuchungen (z.B. PIHL und WERNER 1995, LEINWEBER et al. 1999, KELLER und VAN DER ZEE 2004, BOHNER 2005, 2008) darf angenommen werden, dass diese Differenzen im Phosphor-Gehalt primär aus der Phosphor-Anreicherung durch Düngung und nicht aus einer Phosphor-Verarmung infolge unterlassener Düngung resultieren. Alle drei Phosphor-Fraktionen differenzieren einwandfrei zwischen regelmäßig gedüngten bzw. intensiv genutzten und langjährig ungedüngten bzw. extensiv genutzten Grünlandflächen. Folglich können diese Fraktionen auch für die Beurteilung und Bewertung des Phosphor-Versorgungszustandes von Grünlandböden verwendet werden. Allerdings müssen die Standortfaktoren und Bodeneigenschaften, die die Phosphor-Verfügbarkeit beeinflussen, mitberücksichtigt werden. Der Phosphor-Sättigungsgrad wurde in der Tiefenstufe 0-10 cm durch Düngung und intensive Nutzung ebenfalls erhöht. Der Median lag in den ungedüngten bzw. extensiv genutzten Grünlandböden bei 11 bzw. 15 % und in den gedüngten bzw. intensiv genutzten Böden bei 19 bzw. 21 %. Auf Grund dieser Untersuchungsergebnisse darf angenommen werden, dass langjährig ungedüngte bzw. extensiv genutzte Grünlandflächen im Allgemeinen ein geringeres Phosphor-Austragspotenzial aufweisen als regelmäßig gedüngte bzw. intensiv genutzte Flächen und dass der Oberboden von stark gedüngten Grünlandflächen eine potenzielle Quelle für den Phosphor-Austrag darstellt. Die untersuchten Grünlandböden wiesen in den obersten 10 cm meist sehr niedrige Gehalte an CAL-löslichem Phosphor auf. In den gedüngten Böden lag der Median bei 22 mg pro kg Feinboden (arithmetischer Mittelwert: 29 mg), in den ungedüngten Böden hingegen bei 13 mg pro kg Feinboden (arithmetischer Mittelwert: 19 mg). Daraus kann gefolgert werden, dass in der Tiefenstufe 0-10 cm der Gehalt an CAL-löslichem Phosphor bei den ungedüngten und extensiv genutzten Böden des Dauergrünlandes im Bereich von 10 bis 20 mg pro kg Feinboden liegen dürfte. Niedrige Gehalte an CAL-löslichem Phosphor wurden in österreichischen Grünlandböden bereits mehrfach festgestellt (GERZABEK et al. 2004, HEINZLMAIER et al. 2005, BOHNER und EDER 2006, BOHNER und SCHINK 2007). Die regelmäßig gedüngten bzw. intensiv genutzten Grünlandböden wiesen in den obersten 10 cm im Median einen oxalatextrahierbaren Phosphor-Gehalt von 570 bzw. 629 mg pro kg Feinboden auf. Diese Gehalte entsprechen größenordnungsmäßig etwa jenen intensiv genutzter Grünlandböden der Schweiz, in denen der Median in den obersten 5 cm bei 658 mg pro kg Feinboden lag (KELLER und VAN DER ZEE 2004).

In den untersuchten Alm- und Gebirgsböden waren die Gehalte an oxalatextrahierbarem Eisen und Aluminium in den obersten 10 cm meist sehr hoch und jene an Mangan sehr niedrig. Die Bodenversauerung ist dafür hauptverantwortlich. Eine pH-Erniedrigung erhöht den Gehalt an oxalatextrahierbarem Eisen und Aluminium im Boden durch Steigerung der Verwitterungsintensität (WIECHMANN 1968). Deshalb verengt sich mit zunehmender Bodenversauerung das $Al_t : Al_{ox}$ - und $Fe_t : Fe_{ox}$ -Verhältnis im Boden; gleichzeitig findet eine Mangan-Verarmung statt. Das durch

intensive Mineralverwitterung freigesetzte Aluminium und Eisen wird in humusreichen, sauren Gebirgsböden – im Gegensatz zum Mangan – bevorzugt von der organischen Bodenfestphase komplexiert und austauschbar gebunden (BOHNER 2010). Außerdem reichern sich in Bodenhorizonten mit höherem Humusgehalt und niedrigem pH-Wert amorphe Eisen- und Aluminium-Oxide an (LOOKMAN et al. 1995). Der hohe Gehalt an oxalateextrahierbarem Eisen und Aluminium in den untersuchten humusreichen, sauren Alm- und Gebirgsböden dürfte daher sowohl mit einer starken Komplexbildung von Aluminium und Eisen mit der organischen Bodensubstanz als auch mit einem Reichtum an amorphen Eisen- und Aluminium-Oxiden zusammenhängen. Deshalb waren in den untersuchten Alm- und Gebirgsböden die Phosphor-Speicherkapazität und der oxalateextrahierbare Phosphor-Gehalt meist sehr hoch. Bei starker Bodenversauerung können auf nicht mehr genutzten Flächen auch hohe Phosphor-Sättigungsgrade auftreten. Die Ursache dafür ist noch nicht bekannt. Denkbar ist folgendes: bei starker Bodenversauerung ist die Komplexbildung von Aluminium mit der organischen Bodensubstanz und somit auch die Bindung der Phosphate gering (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002). Daraus resultieren einerseits ein hoher Gehalt an wasserlöslichem Phosphor und andererseits eine hohe Phosphor-Sättigung der bei sehr niedrigen Boden-pH-Werten noch sorptionsaktiven Oberflächen. Auch der fehlende Phosphor-Entzug durch Beweidung trägt dazu bei. Die signifikant negative Korrelation zwischen dem oxalateextrahierbaren Aluminium und dem Phosphor-Sättigungsgrad unterstützt diese Vermutung.

Die untersuchten Bodentypen unterschieden sich deutlich in ihrer Phosphor-Speicherkapazität. Erwartungsgemäß war die Phosphor-Speicherkapazität in den carbonathaltigen A-C-Böden (Rendzinen, Kalklehm-Rendzinen, Pararendzinen) am niedrigsten. Allerdings wird in carbonathaltigen, neutralen bis alkalischen Böden der Phosphor auch durch Bindung von Calcium-Phosphaten und Bindung an Carbonate gut gespeichert (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002). Diese wichtigen Formen der Phosphor-Retention werden jedoch bei der berechneten Phosphor-Speicherkapazität und folglich auch beim Phosphor-Sättigungsgrad nicht berücksichtigt. Gleichzeitig extrahiert aber die Oxalatlösung auch einen größeren Anteil der Calcium-Phosphate (SCHWEITZER und PAGEL 2001). Deshalb können sogar ungedüngte Kalklehm-Rendzinen mitunter hohe Phosphor-Sättigungsgrade aufweisen. Da in carbonathaltigen A-C-Böden neben den amorphen Sesquioxiden auch Carbonate an der Phosphor-Speicherung beteiligt sind und Fällungsreaktionen von Calcium-Ionen mit Phosphat-Ionen stattfinden, darf angenommen werden, dass in diesen Böden das Phosphor-Auswaschungspotenzial keinesfalls erhöht ist. Unerwartet hoch war die Phosphor-Speicherkapazität in den Anmooren und carbonathaltigen Niedermooren. Diese Böden wiesen in den obersten 10 cm meist sehr hohe Gehalte an oxalateextrahierbarem Eisen und ein enges $Fe_t : Fe_{ox}$ -Verhältnis auf. Offensichtlich werden in carbonathaltigen Niedermooren durch Reoxidationsprozesse reichlich amorphe Eisen-Oxide gebildet, die Phosphate sehr gut speichern können. Auch eine starke Komplexbildung von Eisen und Aluminium mit der organischen Bodensubstanz

dürfte zur Phosphor-Bindung beitragen. Diese Form der Phosphor-Speicherung findet auch in Moorböden statt (SCHLICHTING et al. 2002). Aus der Literatur ist bekannt, dass carbonathaltige Niedermoore eine deutlich höhere Phosphor-Speicherkapazität als carbonatfreie Nieder- und Hochmoore besitzen (SCHEFFER und BLANKENBURG 1983). Vor allem stark saure Hochmoore weisen infolge geringer metallorganischer Komplexbildung und wegen dem weitgehenden Fehlen von amorphen Sesquioxiden eine geringe Phosphor-Speicherkapazität auf; folglich sind die Gehalte an wasserlöslichem Phosphor und das Phosphor-Austragspotenzial relativ hoch (SCHEFFER und BLANKENBURG 1978, KUNTZE und SCHEFFER 1979). Dieser Bodentyp ist daher bei regelmäßiger Düngung für eine Gewässereutrophierung prädestiniert. Die Phosphor-Speicherkapazität war bei den untersuchten Bodentypen in den Braunerden am höchsten. Braunerden mit hoher Phosphor-Speicherkapazität und niedrigem Phosphor-Sättigungsgrad sind im Hinblick auf die Gefahr einer Gewässereutrophierung günstig zu beurteilen. Die Braunerde zählt im österreichischen Grünland zu den flächenmäßig bedeutendsten Bodentypen. In den Braunerden war die Phosphor-Speicherkapazität wider Erwarten höher als in den Kalkbraunlehmen. Die Ursache dafür könnte eine geringere Extrahierbarkeit der Eisen-Oxide in Lehm- und Tonböden sein (SCHWERTMANN 1964). Da neben den amorphen Sesquioxiden auch Tonminerale zur Adsorption von Phosphaten beitragen (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002), darf angenommen werden, dass Kalkbraunlehme den Phosphor ebenfalls gut speichern können. Untersuchungen in Belgien haben gezeigt, dass lehmige Böden oft eine höhere Phosphor-Speicherkapazität als sandige Böden aufweisen (LOOKMAN et al. 1995). Auch finnische Böden speichern Phosphor umso besser, je tonreicher sie sind (HARTIKAINEN 1982).

Die Phosphor-Speicherkapazität korrelierte hoch signifikant positiv mit dem oxalateextrahierbaren Phosphor-Gehalt in den terrestrischen und hydromorphen Talböden. In den Alm- und Gebirgsböden war der Korrelationskoeffizient ebenfalls positiv, allerdings nicht signifikant. Die positiven Korrelationen waren zu erwarten und dokumentieren die große Bedeutung der amorphen Sesquioxide für die Phosphor-Speicherung in Grünlandböden. Sowohl in den hydromorphen Talböden als auch in den Alm- und Gebirgsböden wurden signifikante bzw. hoch signifikante negative Korrelationen zwischen der Phosphor-Speicherkapazität und dem wasserlöslichen Phosphor-Gehalt festgestellt. In den terrestrischen Talböden war der Korrelationskoeffizient ebenfalls negativ, allerdings nicht signifikant. Auch dieses Ergebnis war zu erwarten und ist ein Hinweis dafür, dass Böden mit hoher Phosphor-Speicherkapazität häufig auch niedrige Gehalte an wasserlöslichem Phosphor aufweisen. Auf Grund der Korrelationsanalyse wird vermutet, dass in den terrestrischen, insbesondere aber in den hydromorphen Talböden, die Phosphor-Speicherkapazität vor allem vom oxalatlöslichen Eisen bestimmt wird. In den sauren Alm- und Gebirgsböden hingegen hat auch das oxalatlösliche Aluminium eine große Bedeutung für die Speicherung von Phosphaten. In allen untersuchten Bodengruppen wurde eine hoch signifikant positive Korrelation zwischen

dem oxalatextrahierbaren Phosphor und dem Phosphor-Sättigungsgrad festgestellt. Der oxalatextrahierbare Phosphor-Gehalt kann offensichtlich für die Prognose des Phosphor-Sättigungsgrades verwendet werden. Sowohl in den Alm- und Gebirgsböden als auch in den terrestrischen Talböden wurden signifikante bzw. hoch signifikante positive Korrelationen zwischen dem Phosphor-Sättigungsgrad und dem wasserlöslichen bzw. CAL-löslichen Phosphor-Gehalt festgestellt. Die Korrelationskoeffizienten waren in den Alm- und Gebirgsböden relativ hoch und in den terrestrischen Talböden ziemlich niedrig. Die positiven Korrelationen waren zu erwarten und sind ein Hinweis dafür, dass terrestrische Böden mit hohem Phosphor-Sättigungsgrad oft auch hohe Gehalte an wasserlöslichem und CAL-löslichem Phosphor aufweisen. Für die hydromorphen Talböden gilt dieser Zusammenhang nicht, hier wurden sogar negative Korrelationskoeffizienten ermittelt. Offensichtlich wird in hydromorphen Böden die Phosphor-Löslichkeit weniger vom Phosphor-Sättigungsgrad sondern vielmehr von den Redoxbedingungen im Boden bestimmt. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass – unter sonst vergleichbaren Bedingungen – hydromorphe Böden mit hohem Phosphor-Sättigungsgrad ein größeres Phosphor-Austragspotenzial als jene mit niedrigem Sättigungsgrad besitzen. Aus der Korrelationsanalyse kann gefolgert werden, dass allein auf Grund der wasserlöslichen und CAL-löslichen Phosphor-Gehalte im Oberboden das Phosphor-Austragspotenzial von Grünlandflächen nur sehr grob beurteilt werden kann. Das Risiko einer Fehleinschätzung wird minimiert, wenn weitere Standortfaktoren und Bodeneigenschaften, die die Phosphor-Löslichkeit im Boden beeinflussen, in die Beurteilung einbezogen werden. LEINWEBER et al. (1999) konnten im Rahmen von Lysimeterversuchen keine signifikanten Korrelationen zwischen dem DL-löslichen oder wasserlöslichen Phosphor-Gehalt und den Phosphor-Auswaschungsverlusten feststellen. Die Phosphor-Speicherkapazität und der Phosphor-Sättigungsgrad hingegen korrelierten mit der Phosphor-Konzentration im Sickerwasser. Daraus wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass beide Bodenparameter geeignete Indikatoren für die Abschätzung von Phosphor-Auswaschungsverlusten aus landwirtschaftlich genutzten Böden sind. Sie sollten daher in die Beurteilung einbezogen werden.

Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf

Das vorliegende Datenmaterial ermöglicht einige praxisrelevante Schlussfolgerungen:

- Die Phosphor-Speicherkapazität kann im Grünlandboden allein durch Bewirtschaftungsmaßnahmen, also ohne kulturtechnische Eingriffe wie beispielsweise Entwässerung oder Wiedervernässung, kaum verändert werden. Sie zählt deshalb zu den bewirtschaftungsunabhängigen Bodenfaktoren. Der Phosphor-Sättigungsgrad hingegen wird durch Bewirtschaftungsmaßnahmen (Düngung) deutlich beeinflusst. Er zählt somit zu den bewirtschaftungsabhängigen Bodenfaktoren.
- Die Grünlandböden besitzen in den obersten 10 cm in der Regel eine hohe Phosphor-Speicherkapazität (etwa 100 mmol pro kg Feinboden) und sie weisen sehr häufig einen niedrigen Phosphor-Sättigungsgrad (meist 10-20 %) auf. Somit dürfte die Gefahr einer erhöhten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser im Falle einer standortangepassten Bewirtschaftung, sachgerechten Düngung und bei durchschnittlichen Witterungsverhältnissen gering sein.
- Regelmäßig gedüngte und intensiv genutzte Grünlandböden weisen in den obersten 10 cm in der Regel höhere Phosphor-Gehalte und Phosphor-Sättigungsgrade und somit auch ein größeres Phosphor-Austragspotenzial als langjährig ungedüngte und extensiv genutzte Böden auf. Der Phosphor-Sättigungsgrad ist vor allem in übernutzten Weideböden und stark gedüngten Wiesenböden relativ hoch. Auf diesen Flächen sollte die jährlich ausgebrachte Düngermenge reduziert werden.
- Die Phosphor-Speicherkapazität des Grünlandbodens ist begrenzt. Sie kann durch praxisübliche Bewirtschaftungsmaßnahmen kaum erhöht werden. Um Phosphor-Verluste durch Auswaschung möglichst gering zu halten, sollte in bereits gut mit Phosphor versorgten Grünlandböden ein weiterer Anstieg des Phosphor-Sättigungsgrades durch wiederholte hohe Düngergaben vermieden werden.
- Humusreiche, saure Alm- und Gebirgsböden besitzen in den obersten 10 cm eine sehr große Phosphor-Speicherkapazität und weisen sehr hohe Gehalte an oxalatextrahierbarem Phosphor auf. Ein säurebedingter hoher Gehalt an amorphen Aluminium- und Eisen-Oxiden sowie eine starke Komplexbildung von Aluminium und Eisen mit der organischen Bodensubstanz dürften dafür verantwortlich sein. Bei starker Bodenversauerung können von Natur aus hohe Phosphor-Sättigungsgrade und hohe Gehalte an wasserlöslichem Phosphor auftreten.
- Die Bodentypen unterscheiden sich in der Art und Menge ihrer Sorbenten und folglich auch in ihrer Phosphor-Speicherkapazität. Die Braunerde zeichnet sich auf Grund ihrer hohen Gehalte an amorphen Sesquioxiden durch eine große Phosphor-Speicherkapazität in den obersten 10 cm aus. Dieser Bodentyp ist somit im Hinblick auf die Gefahr einer Gewässereutrophierung günstig zu beurteilen. In carbonathaltigen A-C-Böden und Kalkbraunlehmen sind neben den amorphen Sesquioxiden auch Carbonate und Tonminerale an der Phosphor-Speicherung beteiligt und es finden Fällungsreaktionen von Calcium-Ionen mit Phosphat-Ionen statt. Daher können diese Bodentypen den Phosphor ebenfalls gut speichern.
- Die untersuchten hydromorphen Grünlandböden (Auböden, Augleye, Gleye, Anmoore, carbonathaltige Niedermoore) weisen in den obersten 10 cm keine geringere Phosphor-Speicherkapazität als terrestrische Grünlandböden auf. Vor allem carbonathaltige Niedermoore können im Oberboden auf Grund ihrer hohen Gehalte an amorphen Eisen-Oxiden und komplexierend wirkender organischer Bodensubstanz Phosphate gut speichern. Das Phosphor-Austragspotenzial dürfte beträchtlich niedriger sein. Diese Bodentypen sind bei regelmäßiger Düngung für eine Gewässereutrophierung prädestiniert.
- In Grünlandböden haben amorphe Eisen-Oxide für die Phosphor-Speicherkapazität eine große Bedeutung. Der

an und in amorphen Eisen-Oxiden gebundene Phosphor kann sehr leicht durch Reduktionsprozesse freigesetzt und bei geringer pflanzlicher Aufnahme aus dem Boden ausgewaschen werden. Daher sollte vor allem in sauren, hydromorphen Böden eine stärkere Phosphor-Anreicherung durch langjährig hohe Düngergaben oder eine Phosphor-Vorratsdüngung vermieden werden, insbesondere wenn der Oberboden häufig durch Grund-, Stau-, Hang- oder Überflutungswasser vernässt wird.

- Saure, nicht entwässerte Moorböden sowie stark saure Alm- und Gebirgsböden haben einen geringen Phosphor-Düngerbedarf.
- Der Phosphor-Versorgungszustand von Grünlandböden und das Phosphor-Austragspotenzial von Grünlandflächen können auf Grund der wasserlöslichen und CAL-löslischen Phosphor-Gehalte im Oberboden beurteilt werden, wenn gleichzeitig auch das Klima (insbesondere Menge, Verteilung und Intensität der Niederschläge im Jahresverlauf sowie Intensität der Verdunstung), das Relief (insbesondere Geländeform und Hangneigung), die Durchwurzelungstiefe und Durchwurzelbarkeit des Bodens, der Bodentyp, der Bodenwasserhaushalt, die Tiefe und Schwankungsamplitude des Grundwasserspiegels, die Lage und Durchlässigkeit des Staukörpers, Zeit und Dauer des Auftretens von Nassphasen sowie weitere relevante Bodeneigenschaften (insbesondere pH-Wert, Redoxpotenzial, Phosphor-Speicherkapazität, Phosphor-Sättigungsgrad, Bodengründigkeit, Bodenart, Bodenskelettanteil, Bodenstruktur, Lagerungsdichte) und der Pflanzenbestand (Zeigerpflanzen) in die Beurteilung einbezogen werden.

Diese Studie wurde in einem räumlich eng begrenzten Gebiet durchgeführt. Bisher wurden 239 Bodenproben hinsichtlich Phosphor-Speicherkapazität und Phosphor-Sättigungsgrad untersucht. Weitere systematische Bodenuntersuchungen in anderen Naturräumen und auf unterschiedlichen Standorten sind für eine Gesamtbeurteilung und für einen überregionalen Vergleich erforderlich. Vor allem carbonatfreie Nieder- und Anmoore, Übergangs- und Hochmoore sowie Nassogleye, Hangogleye und Pseudogleye müssen bei künftigen Untersuchungen stärker berücksichtigt werden. Die Phosphor-Speicherkapazität und der Phosphor-Sättigungsgrad sollten nicht nur im Oberboden, sondern auch im Unterboden ermittelt werden. Vor allem die Tiefenstufe 60-90 cm ist für den Phosphor-Austrag in das oberflächennahe Grundwasser und/oder Drainwasser relevant. Ideal wäre eine Probenahme in verschiedenen Tiefenstufen. Dadurch könnte eine vertikale Veränderung im Boden festgestellt und folglich auch das Phosphor-Austragsrisiko besser beurteilt werden. Außerdem sollten die bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse mit Hilfe von langjährigen Lysimeterversuchen auf verschiedenen Standorten überprüft werden.

Literatur

- BMLFUW, 2006: Richtlinien für die sachgerechte Düngung. Hrsg.: Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz, 6. Auflage, Wien, 80 S.
- BOHNER, A., 2005: Bodenindikatoren für die Bewirtschaftungsintensität und die floristische Artenvielfalt im Wirtschaftsgrünland. Mitt. der Österr. Bodenkundl. Ges. 72, 67-73.
- BOHNER, A. und G. EDER, 2006: Boden- und Grundwasserschutz im Wirtschaftsgrünland. Seminar Umweltprogramme für die Landwirtschaft. Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 53-64.
- BOHNER, A., G. EDER und M. SCHINK, 2007: Nährstoffkreislauf und Stoffflüsse in einem Grünland-Ökosystem. 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 91-99.
- BOHNER, A. und M. SCHINK, 2007: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen im Einzugsgebiet des Mondsees und Irrsees mit besonderer Berücksichtigung des Phosphors. Schriftenreihe BAW 26, 34-50.
- BOHNER, A., 2008: Phosphor-Pools und Phosphor-Verfügbarkeit im Grünlandboden als Basis für Phosphor-Düngempfehlungen. Umweltökologisches Symposium „Sachgerechte Düngung im Blickfeld von Untersuchungsergebnissen“, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 59-66.
- BOHNER, A., 2010: Eigenschaften und Merkmale von Almböden. Mitt. der Österr. Bodenkundl. Ges. 77, 65-76.
- BOHNER, A., C. HUEMER, J. SCHAUMBERGER und P. LIEBHARD, 2013: Phosphor in landwirtschaftlich genutzten Böden in einem Teileinzugsgebiet der Antiesen im oberösterreichischen Innviertel. In: Das INTERREG IV A-Projekt „Gewässer-Zukunft“ 2009-2013. Ausgewählte Ergebnisse aus den Einzugsgebieten des Waginger und Tachinger Sees (Bayern) und der Antiesen (Oberösterreich), HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 45-57.
- BOHNER, A. und V. ROHRER, 2013: Jahreszeitlicher Verlauf der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser eines Grünlandbodens. 18. Alpenländisches Expertenforum, 33-40.
- BRAUN, M., M. FREY und P. HURNI, 1991: Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer im Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen (Stand 1986). FAC Liebefeld, 87 S.
- DE SMET, J., G. HOFMAN, J. VANDERDEELEN, M. VAN MEIRVENNE und L. BAERT, 1996: Phosphate enrichment in the sandy loam soils of West-Flanders, Belgium. Fertilizer Research 43, 209-215.
- ECKHARDT, K.-U. und P. LEINWEBER, 1997: P-Fractionen zur Vorhersage von P-Austrägen aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 85, 871-874.
- FREESE, D., S. VAN DER ZEE und W.H. VAN RIEMSDIJK, 1992: Comparison of different models for phosphate sorption as a function of the iron and aluminium oxides of soils. Journal of Soil Science 43, 729-738.
- FROSSARD, E., P. JULIEN, J.-A. NEYROUD und S. SINAJ, 2004: Phosphor in Böden, Düngern, Kulturen und Umwelt – Situation in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 368, 172 S.
- GERZABEK, M.H., A. BAUMGARTEN, M. TULIPAN und S. SCHWARZ, 2004: Ist die Nährstoffversorgung der Pflanzen noch ausgewogen? Eine Analyse aufgrund von Bodenuntersuchungsergebnissen und Langzeitversuchen. Ländlicher Raum 2/2004, 1-8.
- HARTIKAINEN, H., 1982: Water soluble phosphorus in Finnish mineral soils and its dependence on soil properties. J. Scient. Agric. Soc. Finl. 54, 89-97.
- HEINZLMAIER, F., M.H. GERZABEK, M. TULIPAN und A. BAUMGARTEN, 2005: Pflanzennährstoffe in Österreichs Böden: Räumliche und zeitliche Variationen sowie Wechselwirkungen mit Bodeneigenschaften. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 17, 96-97.
- HOLFORD, I.C.R. und W.H. PATRICK, 1979: Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 43, 292-297.
- KELLER, A. und S. VAN DER ZEE, 2004: Phosphorverfügbarkeit in intensiv genutzten Grünlandböden. Agrarforschung 11, 396-401.
- KUMMERT, R. und W. STUMM, 1989: Gewässer als Ökosysteme. Grundlagen des Gewässerschutzes. Teubner Verlag, 331 S.
- KUNTZE, H. und B. SCHEFFER, 1979: Die Phosphatmobilität im Hochmoorboden in Abhängigkeit von der Düngung. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 142, 155-168.

- LEINWEBER, P., F. LÜNSMANN and K.U. ECKHARDT, 1997: Phosphorus sorption capacities and saturation of soils in two regions with different livestock densities in northwest Germany. *Soil Use and Management* 13, 82-89.
- LEINWEBER, P., R. MEISSNER, K.-U. ECKHARDT and J. SEEGER, 1999: Management effects on forms of phosphorus in soil and leaching losses. *European Journal of Soil Science* 50, 413-424.
- LOOKMAN, R., N. VAN DE WEERT, R. MERCKX and K. VLASSAK, 1995: Geostatistical assessment of the regional distribution of phosphate sorption capacity parameters (Fe_{ox} and Al_{ox}) in northern Belgium. *Geoderma* 66, 285-296.
- LOOKMAN, R., K. JANSEN, R. MERCKX and K. VLASSAK, 1996: Relationship between soil properties and phosphate saturation parameters. A transect study in northern Belgium. *Geoderma* 69, 265-274.
- MARSCHNER, H., 1998: Mineral nutrition of higher plants. Academic press, 889 S.
- MEISSNER, R., H. KLAPPER and J. SEEGER, 1992: Wirkungen einer erhöhten Phosphatdüngung auf Boden und Gewässer. *Wasser und Boden* 4, 217-220.
- MEISSNER, R., H. RUPP and M. SCHUBERT, 2000: Novel lysimeter techniques – a basis for the improved investigation of water, gas, and solute transport in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 603-608.
- OTTO, A., 1980: Gewässerbelastung durch Land- und Forstwirtschaft. *Wasser und Boden* 1, 26-30.
- PIHL, U. und W. WERNER, 1993: Zur Interpretation von Quantitäts-/ Intensitäts-Quotienten als Kriterien vertikaler Phosphatverlagerung in Böden. *VDLUFA*, 37. Kongressband, 99-102.
- PIHL, U. und W. WERNER, 1995: Bodenchemische Parameter zur Prognose des vertikalen P-Austrags in Drain- und Grundwasser. *VDLUFA*, 40. Kongressband, 289-292.
- PRASUHN, V. und M. BRAUN, 1994: Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. *Schriftenreihe der FAC Liebefeld* 17, 214 S.
- PRASUHN, V. und P. LAZZAROTTO, 2005: Abschwemmung von Phosphor aus Grasland im Einzugsgebiet des Sempacher Sees. *Schriftenreihe der FAL Reckenholz* 57, 95-107.
- RÖMER, W., 1997: Phosphoraustrag aus der Landwirtschaft in Gewässer. *Wasser & Boden* 49, 51-54.
- RUTHSATZ, B., 2001: Pflanzen- und Boden-Indikatoren für die Intensivierung der Landwirtschaft in Mittelgebirgen – am Beispiel des Wirtschaftsgrünlandes einer kleinen Gemeinde bei Trier. *Arch. für Nat.-Lands.* 40, 289-323.
- SCHEFFER, B., 1977: Stickstoff- und Phosphorverlagerung in nordwestdeutschen Niederrungsböden und Gewässerbelastung. *Geol. Jb.* F4, 203-221.
- SCHEFFER, B. und J. BLANKENBURG, 1978: Löslichkeit und Wanderung von Phosphaten in saurem Hochmoorboden. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 27, 271-280.
- SCHEFFER, B. und J. BLANKENBURG, 1983: Phosphoraustrag aus Niedermoorböden – Ergebnisse eines Lysimeterversuches ohne Pflanzenbewuchs. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 146, 275-284.
- SCHEFFER, F. und P. SCHACHTSCHABEL, 2002: Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 593 S.
- SCHLICHTING, A., P. LEINWEBER, R. MEISSNER and M. ALTERMANN, 2002: Sequentially extracted phosphorus fractions in peat-derived soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 290-298.
- SCHOETERS, L., R. LOOKMAN, R. MERCKX and K. VLASSAK, 1995: Inventorisation and evaluation of phosphate saturation in Northern Belgium. *Proceedings of the International Workshop. Phosphorus Loss to Water from Agriculture*, Wexford, 79-80.
- SCHUSTER, R., A. DAURER, H.G. KRENMAYR, M. LINNER, G.W. MANDL, G. PESTAL und J.M. REITNER, 2013: Rocky Austria. *Geologie von Österreich – kurz und bunt*. Geologische Bundesanstalt Wien, 80 S.
- SCHWEITZER, K. und H. PAGEL, 2001: Einfluss niedriger pH-Werte auf den Gehalt amorpher Al- und Fe-Oxide, die P-Sorption und P-Nachlieferung in einem Sandboden. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 96, 283-284.
- SCHWERTMANN, U., 1964: Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. *Z. f. Pflanzenernähr. Düngung und Bodenkunde* 105, 194-202.
- WEISSENSTEINER, C., 2014: Phosphor pools und Phosphorbilanzen im österreichischen Dauergrünland. Masterarbeit am Institut für Ökologischen Landbau der Universität für Bodenkultur, Wien, 154 S.
- WIECHMANN, H., 1968: Einfluss der Pseudovergleyung auf verschiedene chemische Eigenschaften von Lössböden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 120, 20-31.
- WELP, G., U. HERMS und G. BRÜMMER, 1983: Einfluss von Bodenreaktion, Redoxbedingungen und organischer Substanz auf die Phosphatgehalte der Bodenlösung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 146, 38-52.
- ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik), 2002: Klimadaten von Österreich 1971-2000. http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm.