

Abschätzung der Phosphorausträge anhand von Lysimeterversuchen

F. GODLINSKI, P. LEINWEBER, R. MEISSNER und B. LENNARTZ

Abstract

Lysimeterstudien mit unterschiedlichen Bodenarten, Nutzungssystemen und Düngungsvarianten sind besonders zur Abschätzung von P-Austrägen aus landwirtschaftlichen Flächen geeignet. In der vorliegenden Studie wurden die P-Gehalte von Ober- und Unterböden mit verschiedenen Extraktionsmethoden bestimmt. Signifikante Zusammenhänge zwischen P-Konzentrationen bzw. -Austrägen und den Gehalten an AL-P, DL-P und Olsen-P in Oberböden wurden für sandige Lehmböden unter Dauergras abgeleitet. Zudem wurden P-Anreicherungen infolge 15-jähriger unterschiedlicher Nutzung in den ursprünglich homogenen Unterböden an acht ausgebauten Lysimetern mit allen angewandten Extraktionsmethoden nachgewiesen. Signifikante Zusammenhänge zwischen P- und C_t -Gehalten bzw. Lagerungsdichten bei Unterboden-Proben erscheinen relevant für Verlagerungsvorgänge und fließen in eine anschließende Modellierung ein.

Studies of lysimeters with different soil texture, land uses and forms of fertilisation are helpful to predict P-leaching losses from agricultural soils. In this study P-contents in topsoils and subsoils were analysed with different extraction methods. For sandy loam under grass the agronomic soil P tests (AL-P, DL-P and Olsen-P) enabled reasonable predictions of P in leachate. In eight set aside and dismantled lysimeters it was shown, that all P extractants reflected P enrichments in subsoils, and the development of distinct depth profiles after 15-years of different land use. The P-contents in subsoils with the C_t contents and bulk densities. This evidence will be considered to calibrate and validate P leaching models.

Problemstellung

Eine Gefährdung des Grund- und Oberflächengewässer durch Verlagerung von Phosphat im Bodenprofil ist besonders unter intensiv genutzten landwirtschaftlichen Flächen zu erwarten. Vorhersagen der P-Verlagerung und -Auswaschung sind aufgrund der räumlichen Heterogenität von Böden, der aufwendigen Erfassung der Wasserhaushaltsgrößen und deren Randbedingungen sowie vielfältige Nutzungsvarianten der Flächen problematisch. Aus diesem Grund wurden Lysimeterversuche ausgewertet, die eine bessere Erfassung der Wasserhaushaltsparameter ermöglichen. Ziel war es, verschiedene in der Europäischen Union gebräuchliche P-Extraktionsmethoden auf ihre Eignung zur Prognose von P-Austrägen zu untersuchen. Weiterhin wurde ermittelt, inwieweit die angewendeten Methoden den P-Status und die Entwicklung im Ober- und Unterboden von ursprünglich zweischichtig hergerichteten Lysimetern widerspiegeln. Diese Ergebnisse sollen nachfolgend zur Modellierung der P-Austräge aus Lysimetern genutzt werden.

Untersuchungsmaterial und -methoden

Untersucht wurden mindestens 100 quadratische Lysimeter mit 1 m³ Bodeninhalt, die in der Lysimeterstation des UFZ Umweltforschungszentrums Halle-Leipzig betrieben werden. Diese wurden 1985 mit homogenem Ober- und Unterbodenmaterial gefüllt, jeweils unterteilt in 30 cm Oberboden, 70 cm Unterboden und 25 cm Dränschicht. Die Befüllung erfolgte mit den Bodenarten Sand, sandiger Lehm, Lehm und toniger Schluff aus Löß, wobei die sandigen Lehme überwiegen (74%). Die Nutzungssysteme umfassen unter anderem Grasland und Acker mit den Bewirtschaftungswei-

sen Flächenstilllegung, Extensivierung, Integrierter Landbau und nachwachsende Rohstoffe. Die Düngungsvarianten umfassen eine gestaffelte Mineraldüngung und organische Düngung in Form von Stallmist und Gülle. Zusätzliche Varianten entstehen durch Beregnung und Bearbeitungsmaßnahmen.

Die Bestimmung der P-Gehalte im Oberboden erfolgte jährlich im Frühjahr an Mischproben in der Periode 1998 bis 2001. Zusätzlich wurden acht ausgebaute und zerlegte Lysimeter mit den Nutzungssystemen Acker, Grasland und Aufforstung durchgängig schichtweise in 10 cm-Abschnitten beprobt. Alle Proben wurden luftgetrocknet und auf < 2 mm gesiebt bzw. 0,125 mm gemörsert. Gesamt-P Gehalte (P_t) wurden nach Aufschluß mit Natriumhypobromid (DICK and TABATABAI, 1977) bestimmt. Pflanzenverfügbare P-Anteile wurden mit Ammoniumacetatlactat (AL-P) (EGNÉR and RIEHM, 1960), Doppellactat (DL-P) (HOFFMANN, 1991), NaHCO₃ (Olsen-P) (HOFFMANN, 1991) und Ammoniumoxalat (OX-P) (SCHWERTMANN, 1964) extrahiert. Zusätzlich wurden im Oxalatrextrakt die Gehalte an Al_{ox} und Fe_{ox} bestimmt. Elementkonzentrationen in den Extrakten wurden mit ICP (OES-ICP, Jobin Yvon 238 Ultrace, Instruments S.A. GmbH, D-85630 Grasbrunn, Germany) bei 214.914 nm (P), 396.152 nm (Al) und 238.204 nm (Fe) bestimmt. Aus den Al-, Fe und P-Gehalten im Oxalatrextrakt wurden die P-Sättigungsgrade (DPS [%]) = $200 \times \text{OX-P} [\text{mmol kg}^{-1}] \times (\text{Al}_{\text{ox}} [\text{mmol kg}^{-1}] + \text{Fe}_{\text{ox}} [\text{mmol kg}^{-1}])^{-1}$ (SCHOUMANS, 1995) bestimmt.

Die Sickerwassermenge und die Gesamt-P Konzentration im Sickerwasser der Lysimeter wurde monatlich photometrisch nach der Molybdänblau-Methode (MURPHY und RILEY, 1962) ermittelt

Autoren: Frauke GODLINSKI, Prof. Dr. Peter LEINWEBER und Bernd LENNARTZ, Institute of Soil Science and Plant Nutrition, University of Rostock, Justus-von-Liebig-Weg 6, D-18051 ROSTOCK; Prof. Dr. Ralph MEISSNER, UFZ-Centre for Environmental Research Leipzig-Halle GmbH, Department of Soil Science, Lysimeterstation Falkenberg, Dorfstraße 55, D-39615 FALKENBERG

und ebenfalls für einen Zeitraum von drei Jahren ausgewertet.

Ergebnisse und Diskussion

P-Gehalte und Methodenvergleich

Die P_t-Gehalte im Oberboden für sandig-lehmige Böden liegen bei Ackernutzung im Bereich von 327 bis 768 mg kg⁻¹ und reflektieren damit die große Variabilität der Nutzungs- und Düngungsregimes. Alle anderen Bodenarten und Nutzungen liegen ebenfalls in diesem Bereich, variieren jedoch weniger. Mit den Extraktionsmethoden werden im Mittel folgende Anteile an P_t extrahiert: OX-P (~ 68%) > AL-P (~ 35%) > DL-P (~ 16%) > Olsen-P (11%). Diese Anteile schwanken in Abhängigkeit von Bodenart und Nutzung. Die Einflüsse von Bodenart und Nutzung wurden durch die AL- und DL-Methode wesentlich stärker widergespiegelt als durch andere Methoden. Die ermittelten P-Sättigungsgrade (DPS) liegen zwischen 24 und 65% mit den niedrigsten Werten für Lehm (25%) sowie tonigen Schluff (28%) und den höchsten für Sand (65%). Damit ist nach der Einstufung von DE SMET et al. (1996) und SCHOUMANS und GROENENDIJK (2000) bei den sandigen Böden mit erhöhten P-Austrägen zu rechnen, da hier der kritische Wert von 25% überschritten wird.

Zum Vergleich der mit verschiedenen Methoden ermittelten Ergebnisse wurden einfache Regressionen für alle Kombinationen von Bodenart und Nutzung berechnet. Signifikante ($P < 0,001$) Zusammenhänge wurden zwischen den Ergebnissen der Extraktionen bei sandig-lehmigen Böden mit Ackernutzung ermittelt. Dabei hängen die Korrelationskoeffizienten wesentlich von Bodenart und -bewirtschaftung ab. Für Böden unter Grasland sind die Zusammenhänge aufgrund der geringeren Variationsbreite niedriger, aber dennoch signifikant. Die engsten Zusammenhänge wurden für die Unterböden der ausgebauten Lysimeter ermittelt. Der Einfluss der organischen Substanz ist hier wahrscheinlich wesentlich geringer. Die aus diesen Zusammenhängen abgeleiteten Umrechnungsfaktoren variieren je nach Bodenart, Nutzung, Düngung sowie Herkunft aus Ober- bzw. Unterboden. Aus diesem

Grund weichen die kalkulierten Faktoren von veröffentlichten Werten (z.B. SIBBESEN und SHARPLEY, 1998) ab, bei denen die Bewirtschaftung keine Berücksichtigung fand.

P-Konzentrationen und P-Austräge

Die gemessene jährliche Sickerwassermenge der Lysimeter liegt zwischen < 1 und 468 mm mit den höchsten Abflüssen in den Wintermonaten. Unter Ackernutzung wurden bei allen Bodenarten und Düngungsvarianten geringere Abflussmengen als unter Grasland gemessen; die niedrigsten bei Lehm- und Lößböden. Dies ist durch die hydraulischen Parameter bedingt, die im Wesentlichen die Evapotranspiration und die Grundwasserneubildung beeinflussen. Diese Ergebnisse bestätigen Untersuchungen von KNAPPE et al. (2002).

Die mittleren jährlichen P-Konzentrationen der Sickerwässer liegen zwischen 0,4 - 1,2 mg l⁻¹ bei Sandböden und $< 0,001$ - 0,1 mg l⁻¹ bei allen anderen Bodenarten. Abgesehen von den sandigen Böden gibt es keine signifikanten Unterschiede in den mittleren P-Konzentrationen zwischen den Nutzungsformen Acker und Grasland.

Die errechneten zugehörigen Austräge liegen im Bereich von 0,005 - 2846 g ha⁻¹ a⁻¹. Dabei weisen alle Bodenarten unter Grasland höhere Austräge auf mit den höchsten Werten bei sandigen Böden. Die berechneten Frachten entsprechen einem Austrag von $< 8\%$ der jährlich zugeführten P-Menge bei Sandböden bzw. $< 1\%$ bei den sandigen Lehmen. Für alle Bodenarten konnte festgestellt werden, dass die höchsten Austräge nicht den höchsten Düngerstufen entsprachen. Dies kann im Wesentlichen durch ein erhöhtes Pflanzenwachstum und folglich höheren P-Entzug, veränderte Wassergehalte und erhöhte mikrobielle Aktivität erklärt werden. Diese Ergebnisse bestätigen die Untersuchungen von LEINWEBER et al. (1999) und MEISSNER et al. (1995). Trotz negativer P-Bilanzen in den Oberböden wurde aus allen Lysimetern P ausgetragen. Dies verdeutlicht, dass im Boden zu dem pflanzenverfügbaren P-Pool noch ein leicht mobilisierbarer P-Pool vorhanden ist.

Zur Abschätzung der P-Austräge wurden mögliche Zusammenhänge zwi-

schen den P-Gehalten im Oberboden und der mittleren jährlichen P-Konzentration, der höchsten gemessenen P-Konzentration und den P-Frachten untersucht. Bei sandig-lehmigen Böden unter Ackernutzung variieren die Parameter Düngung, Nutzungsform, Bearbeitungstiefe und Beregnung so stark, dass sich keine Methode für eine Vorhersage eignet. Unter Grasland hingegen gibt es signifikante Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der agronomischen P-Tests und den P-Austrägen bei sandigen Lehm Böden. Bei sandigen Böden wurden ebenso höchst signifikante lineare Zusammenhänge zu den OX-P der Oberböden unter Ackernutzung ermittelt. Dies bestätigt entsprechende Befunde von LOOKMAN et al. (1995, 1996) und SCHOUMANS und GROENENDIJK (2000).

Diese Untersuchungen zeigen, dass eine Abschätzung der P-Austräge mit verschiedenen P-Tests teilweise möglich ist. Allerdings stellt der Unterboden zu Beginn einen unbegrenzt großen Speicherpool dar, aus dem nach Sättigung hohe P-Mengen ausgewaschen werden können. In dieser Zone ist der Einfluss durch Pflanzenentzug und mikrobielle Aktivität wesentlich geringer, jedoch ist eine Verlagerung durch Makroporenfluss in den Unterboden nicht zu vernachlässigen. Aus diesem Grund ist die Vorhersage von maximalen P-Konzentrationen, z.B. nach Starkregenereignissen, anhand von P-Gehalten in Oberböden nicht möglich. Die Bedeutung des Unterbodens für eine Abschätzung der P-Austräge wurde schon in Untersuchungen von DE SMET et al. (1996) deutlich. Hier erfolgte eine Berechnung der DPS für das gesamte Bodenprofil.

P-Verteilung im Unterboden

Anhand von ausgebauten und zerlegten Lysimetern konnte der Einfluss des Unterbodens für die P-Verlagerung untersucht werden. Es zeigt sich, dass nach 15-jähriger Nutzung eine P-Anreicherung im Vergleich zum Ausgangssubstrat und Differenzierung der P-Gehalte im Profil stattgefunden hat. Dabei ist besonders die Zone der Bodenbearbeitung stark beeinflusst, in der sowohl Erhöhungen als Verringerungen der P-Gehalte in Folge der Nutzung auftraten. Im ehemals homogen eingefüllten Unterboden sind

jetzt unter allen Nutzungen (Acker, Grasland, Aufforstung) erhöhte sowie im Profil variierende P-Gehalte festzustellen (Abbildung 1). Die P-Gehalte der Nutzungsvarianten unterscheiden sich nicht signifikant.

Die P_t -Gehalte im Unterboden stiegen von 124 mg P kg⁻¹ im Ausgangsmaterial auf 153 - 305 mg P kg⁻¹ nach der Nutzung. Dieser Anstieg wird von allen P-Bestimmungsmethoden gleichermaßen widerspiegelt. Die Sättigungsgrade der Unterböden verdoppelten sich während der Nutzung, betragen aber dennoch weniger als die Hälfte der Oberböden.

Die Variationen im Lysimeterprofil können nicht durch die Al_{ox} - bzw. Fe_{ox} -Gehalte oder die pH-Werte erklärt werden. Es sind aber signifikante Zusammenhänge zu den C_t -Gehalten im Profil sowie den Lagerungsdichten im Oberboden vorhanden. Dies zeigt, dass vertikaler Transport von organischem Material, die Bodenentwicklung und Unterschiede in der Porosität zu der heterogenen P-Verteilung im Unterboden beitragen. Diese, erstmals an Unterböden aus Lysimetern nachgewiesenen Zusammenhänge sollen für eine weitere Modellierung des P-Transportes genutzt werden.

Simulation des Wasserhaushaltes

Die Simulation des Wasserhaushaltes erfolgte im ersten Abschnitt mittels eines einfachen kapazitiven Ansatzes und in Anlehnung daran mit einer numerischen Lösung der Richards-Gleichung mittels Hydrus 1d. Die Abschätzung der potentiellen und aktuellen Verdunstung wurde zunächst mit der Verdunstungsgleichung nach Turc-Wendling bzw. dem Bodenwasserhaushaltsmodell nach Wendling (DVWK, 1996) vorgenommen. Entscheidenden Einfluss auf den Sickerwasserabfluss haben in diesem Ansatz die bodenartenspezifischen Parameter Feldkapazität, permanenter Welkepunkt und die gewählte Durchwurzelungstiefe sowie der zu Beginn der Simulation angenommene vorhandene Bodenwasservorrat. Es zeigt sich, dass die berechnete Verdunstung und Sickerwassermenge für Lysimeter unter Gras optimal den Werten der einfachen Wasserhaushaltsgleichung ($N - SW = ETa$) angepasst werden kann, da in den Lysimetern z.B. Oberflächenabfluss, kapil-

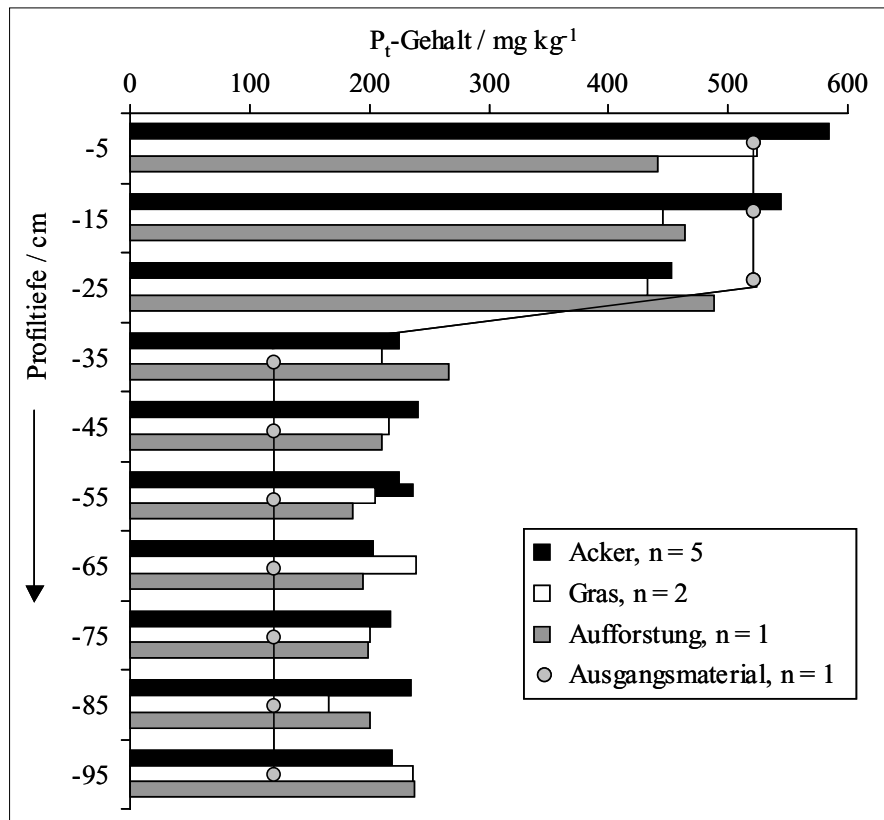


Abbildung 1: Tiefenverteilung von Gesamt-P (P_t) bei verschiedenen Nutzungsvarianten im Vergleich zum Ausgangsmaterial in einem ausgebauten Lysimeter gefüllt mit sandigem Lehm

larer Aufstieg aus dem Grundwasser und seitlicher Zufluss ausgeschlossen werden können. Für Lysimeter unter Acker- und Nutzung ist eine kumulative Anpassung möglich, allerdings ist die Anpassung an den zeitlichen Verlauf nicht ausreichend. Die numerische Lösung brachte für die Lysimeter unter Gras vergleichbare Ergebnisse. Bei den Lysimetern unter Acker waren die Simulationsergebnisse aufgrund stationärer Pflanzenparameter nicht zufriedenstellend. Eine Unterteilung in einzelne Wachstumsphasen bzw. Sommer- und Winterhalbjahr brachte keine Verbesserung der Ergebnisse. Diese Ergebnisse verdeutlichen das Problem der Parametererfassung und die Verwendung von Literaturwerten der wichtigsten Parameter für eine Wasserhaushalts-simulation.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Unter Berücksichtigung von Bodenart und Nutzungsform ist eine Umrechnung von P-Gehalten aus unterschiedlichen Extraktionsmethoden möglich. Die Untersuchungen an Lysimetern zeigen, dass

höhere P-Düngung nicht unbedingt zu höheren P-Austrägen führen muss. Zusätzlich zum P-Eintrag wird der vertikale P-Transport im Lysimeterprofil durch den P-Status, die P-Aufnahme durch die Pflanzenwurzeln, die Sorptionskapazität, Makroporenfluss und die hydraulischen Verhältnisse des Bodens beeinflusst. Eine P-Anreicherung im Unterboden sowie die Verteilung und Zusammenhänge der P-Gehalte zu chemischen und bodenphysikalischen Parametern zeigen, dass der Unterboden einen nicht zu vernachlässigenden P-Pool darstellt. Diese Ergebnisse sollen in Kombination mit den Ergebnissen der Wasserhaushalts-simulation aufgrund der Vielzahl an Nutzungsvarianten eine Modellierung und Validierung der P-Verlagerung in einem Bodenprofil ermöglichen.

Literatur

DE SMET, J., G. HOFMAN, J. VANDERDEELEN, M. Van MEIRVENNE and L. BAERT, 1996: Phosphate enrichment in the sandy loam soils of West-Flanders, Belgium. Fertiliser Research 43: 209 - 215.
 DICK, W.A. and M.A. TABATABAI, 1977: An alkaline oxidation method for determination of

- total phosphorus in soils. Soil Science Society of American Journal 41: 511-514.
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau), 1996: Ermittlung der Verdunstung von Land und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 238. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- EGNÉR, H., H. RIEHM und W.R. DOMINGO, 1960: Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II. Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor- und Kaliumbestimmung. Kungl Lantbr Hdgsk Ann 26: 199-215.
- HOFFMANN, G., 1991: Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Methodenbuch. Band I, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- KNAPPE, S., U. HAFERKORN and R. MEISSNER, 2002: Influence of different agricultural management systems on nitrogen leaching: results of Lysimeter studies. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 165: 73 - 77.
- 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. VANDEWEERT, 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.
- MEISSNER, R., H. RUPP, J. SEEGER, and P. SCHONERT, 1995: Influence of mineral fertilizers and different soil types on nutrient leaching: results of lysimeter studies in East Germany. Land Degradation & Rehabilitation 6: 163-170.
- MURPHY, J. and J.R. RILEY, 1962: A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal Chem Acta 27: 31 - 36.
- SCHOUMANS, O.F., 1995: Validation of the process description of abiotic phosphate reactions in acid sandy soils, Rapport 381 (in Dutch). The Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.
- SCHOUMANS, O.F. and P. GROENENDIJK, 2000: Modelling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands. Journal of Environmental Quality 29: 111-116.
- SIBBESEN, E. and A.N. SHARPLEY, 1998: Setting and Justifying upper critical limits for phosphorus in soils. In: Tunney, Carton, Brookes, Johnston (Ed.) Phosphorus loss from soil to water. CAB international, Wallingford, pp 151.