

# Umwelt

## Phosphorverfügbarkeit in intensiv genutzten Graslandböden

Armin Keller, Agroscope FAL Reckenholz, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, CH-8048 Zürich  
Sjoerd van der Zee, Wageningen University, Environmental Sciences, NL-6700 EC Wageningen  
Auskünfte: Armin Keller, E-Mail: armin.keller@fal.admin.ch, Fax +41 (0)1 377 72 01, Tel. +41 (0)1 377 72 07

### Zusammenfassung

Um die langfristige potenzielle Gefahr von landwirtschaftsbedingten Phosphorverlusten zu beurteilen, die von hohen Phosphorgehalten im Boden ausgeht, wurde die Speicherkapazität und die Verfügbarkeit von Phosphor (P) im Einzugsgebiet Lippenrütibach (LU) untersucht. Die im Boden unterschiedlich verfügbaren P-Anteile wurden mit sechs verschiedenen P-Bestimmungsmethoden charakterisiert. Die Böden im Untersuchungsgebiet wiesen in der Regel eine hohe P-Speicherkapazität und mittlere bis hohe P-Gehalte auf. Diese betragen in den oberen fünf Zentimetern ein Mehrfaches der Gehalte als in der Bodenschicht in 5 bis 20 cm Tiefe. Der P-Sättigungsindex, welcher das Verhältnis vom P-Gehalt zur P-Speicherkapazität im Boden ausdrückt, erreichte in 0 bis 5 cm Tiefe durchschnittlich einen Wert von 0,48 und in 5 bis 20 cm Tiefe von 0,36. Der Index zeigte einen engen Zusammenhang sowohl mit den leicht löslichen als auch mit den langfristig pflanzenverfügbaren P-Gehalten. Der P-Sättigungsindex variierte nicht nur stark zwischen Parzellen der landwirtschaftlichen Betriebe, sondern auch zwischen den Parzellen innerhalb eines Betriebes. Aufgrund der hohen P-Speicherkapazität und -Sättigung der untersuchten Böden wird vermutet, dass die langfristige potenzielle Gefahr von P-Verlusten im Untersuchungsgebiet durch eine reduzierte P-Düngung nur langsam, das heisst in der Grössenordnung von zehn bis 20 Jahren, substantiell vermindert werden kann.

Die landwirtschaftsbedingte P-Belastung der Oberflächen-gewässer kann mit geeigneten Massnahmen vermindert werden (Braun und Prasuhn 1997). Um die Wirksamkeit von Massnahmen zu evaluieren, wurden empirische Modelle zur Abschätzung von P-Verlusten durch Abschwemmung und Drainageverluste (Denoth *et al.* 1998, Braun *et al.* 2001) und durch Erosion (Grünig und Prasuhn 2001) entwickelt. Diese berücksichtigen

sowohl die Bewirtschaftungs- als auch die Standortcharakteristik der Untersuchungsgebiete. Anhand der Modellergebnisse können folglich standortspezifisch geeignete Massnahmen zur Reduzierung der kurzfristigen Gefahr von P-Verlusten von landwirtschaftlich genutzten Böden in Oberflächengewässer bewertet werden. Um jedoch die langfristige potenzielle Gefahr von P-Verlusten beurteilen zu können, sind zusätzlich Kenntnisse der P-Speicherkapazität der Böden sowie der P-Vorräte und der langfristigen P-Verfügbarkeit erforderlich. Das Ziel unserer Studie war, diese Kenngrössen für Graslandböden im Einzugsgebiet Lippenrütibach (LU) zu bestimmen.

### Untersuchungsgebiet und Probenahme

Das Einzugsgebiet Lippenrütibach am Sempachersee um-

fasst 334 Hektaren, wovon rund 255 ha landwirtschaftlich genutzt werden. Im Zusammenhang mit der P-Belastung des Sempachersees wurden in diesem Gebiet in den letzten zehn bis 15 Jahren eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt (Denoth *et al.* 1998, Braun *et al.* 2001, Lazzarotto *et al.* 2004). Vorherrschend sind Naturwiesen und Weiden sowie Obstanlagen (Abb. 1). Die Böden im Einzugsgebiet Lippenrütibach und die klimatischen Verhältnisse lassen nur bedingt eine ackerbauliche Nutzung zu, weshalb lediglich etwa ein Fünftel der landwirtschaftlichen Fläche für Fruchtfolgen mit Getreide, Kunstwiesen und Hackfrüchten genutzt werden. Eine detaillierte Beschreibung des Gebiets findet sich in Braun *et al.* (2001).

Obwohl das Untersuchungsgebiet nur etwa fünf Prozent des gesamten Einzugsgebiets des Sempachersees umfasst, trägt es substantiell zu den in den See gelangenden P-Frachten bei. In den Jahren 1990 bis 1998 variierten die mit dem Lippenrütibach transportierten P-Frachten zwischen 0,5 und 1,2 Tonnen pro Jahr. Der partikuläre P-Austrag war hierbei in der Regel etwas grösser als der gelöste. Braun *et al.* (2001) klassifizierten mit einem empirischen Modell die Gefahr von P-Verlusten durch Abschwemmung. Für Parzellen mit einer hohen Gefahr wurden die P-Verluste auf 1,6 bis 1,7 kg P/ha geschätzt, für Parzellen mit einer niedrigen Gefahr auf 0,6 bis 0,9 kg P/ha.

Abb. 1. Einzugsgebiet Lippenrütibach: Etwa drei Viertel der Fläche wird als Dauergrünland genutzt. (Foto: Armin Keller, Agroscope FAL Reckenholz).



Von den insgesamt 270 Parzellen im Einzugsgebiet Lippenrütibach wurden 61 Parzellen mit möglichst breitem Variationspektrum hinsichtlich P-Bodengehalte, Bodentyp und Bodeneigenschaften ausgewählt und Bodenproben im Herbst 2002 auf diesen Parzellen entnommen. Im Gegensatz zur Probenahmemethode für die Prüfung der Nährstoffversorgung von Böden wurde eine Mischprobe aus je 15 bis 20 Einzeleinstichen aus einer Fläche von 5 mal 5 m<sup>2</sup> gewonnen (Abb. 2). Es wurde jeweils eine Mischprobe aus 12 bis 16 Einzeleinstichen der obersten Bodenschicht der Tiefe 0 bis 5 cm und eine aus der darunter liegenden Bodenschicht der Tiefe von 5 bis 20 cm entnommen. Die P-Gehalte der Bodenproben können deshalb nicht mit den Normwerten der Düngungsrichtlinien verglichen werden, sind aber besser zur Beurteilung von oberflächigen P-Verlusten geeignet.

Die beprobten Parzellen waren überwiegend Naturwiesen und Weiden. Auf 23 Parzellen wurden nach einem stratifiziert-zufälligen Schema mehrere Mischproben entnommen, um die Variation der P-Bodengehalte innerhalb der Parzellen zu bestimmen. Ausgeschlossen wurden Parzellen beziehungsweise Schläge, die innerhalb der letzten vier Wochen vor der Probenahme gedüngt worden sind, und Teilflächen, die visuell auf einen typischen Aufenthaltsplatz von Weidevieh hinwiesen. Um die P-Gehalte auch in tieferen Bodenschichten abschätzen zu können, wurden auf vier Naturwiesen Tiefenprofile von 0 bis 60 cm mit je acht Schichten von 0 bis 5 cm Tiefe bis zu 50 bis 60 cm Tiefe beprobt.

### Bodeneigenschaften

Vorherrschende Bodentypen im Einzugsgebiet Lippenrütibach sind Braunerden, Parabraunerden

sowie Pseudogleye. Die pH-Werte der Böden liegen insgesamt im neutralen bis schwach sauren Bereich (Tab. 1). Wenige Böden weisen einen pH-Wert über 7,5 auf. Die Böden sind in den oberen fünf Zentimetern humos bis humusreich. Auch in der tieferen Bodenschicht (5 bis 20 cm) weisen die Böden noch stets um die fünf Prozent Humus auf. Die vorherrschende Bodenart ist Lehm bis toniger Lehm mit Tongehalten von 22 bis 32 % und Schluffgehalten von 26 bis 45 %. Zur Abschätzung der P-Speicherkapazität der Böden wurden die mit Ammoniumoxalat-Oxalsäure extrahierten Eisen- ( $Fe_{ox}$ ) und Aluminiumgehalte ( $Al_{ox}$ ) bestimmt. Mit diesem Extraktionsmittel werden unter anderem die im Boden amorph vorliegenden Eisen- und Aluminiumoxide beziehungsweise -Hydroxide erfasst, an die in neutralen bis sauren Böden Phosphor stark gebunden ist (Torrent 1997). Die  $Fe_{ox}$ - und  $Al_{ox}$ -Werte der Böden im Untersuchungsgebiet kennzeichnen eine hohe P-Speicherkapazität von durchschnittlich 91,4 Millimol Phosphor pro Kilogramm in den obersten fünf Zentimetern. Dieser Wert war in der Bodentiefe 5 bis 20 cm nur unwesentlich geringer.

### Bestimmungsmethoden für Phosphor

Die im Boden unterschiedlich verfügbaren P-Anteile wurden mit sechs verschiedenen P-Bestimmungsmethoden charakterisiert. Neben den in der Schweiz nach FAL (2001) verwendeten Methoden mit CO<sub>2</sub>-gesättigtem Wasser ( $P_{CO_2}$ ) und Ammoniumacetat-EDTA ( $P_{AAE}$ ) wurden für die leicht löslichen P-Gehalte zudem die  $P_{CaCl_2}$ -Methode und für die längerfristig pflanzenverfügbaren P-Gehalte die  $P_{AL}$ -Methode (Houba *et al.* 1997) verwendet, um so die Ergebnisse mit internationalen Studien vergleichen zu können. Die  $P_{AL}$ - und  $P_{AAE}$ -Methode extrahieren jenen P-Anteil im Boden,

welcher in der Regel als langfristig pflanzenverfügbar interpretiert wird. Allerdings ist dieser P-Anteil vermutlich langfristig nicht vollständig für Pflanzen verfügbar und gibt eher den für die Pflanzen langfristig maximal verfügbaren P-Anteil wieder.

Die mit Ammoniumoxalat-Oxalsäure extrahierten P-Gehalte  $P_{ox}$  (Schwertmann 1964) umfassen neben dem pflanzenverfügbaren P-Anteil im Boden auch die langfristig schwer- beziehungsweise nicht verfügbaren P-Anteile. Das molare Verhältnis von  $P_{ox}$  zu der P-Speicherkapazität, ausgedrückt durch die Summe von  $Fe_{ox}$  und  $Al_{ox}$ , wird als P-Sättigungsindex bezeichnet (van der Zee und van Riemsdijk 1988). Dieser dient der Beurteilung der potenziellen Gefahr von P-Verlusten (Schoumans und Groenendijk 2000). Je höher der Index, desto höher sind in der Regel die löslichen P-Gehalte im Boden und damit die Gefahr von P-Verlusten. Der P-Sättigungsindex kann einen maximalen Wert von 1,0 erreichen. Der P-Gesamtgehalt,  $P_{tot}$ , erfasst neben dem verfügbaren auch das für die Pflanzen im Boden nicht verfügbare P, wie zum

**Tab. 1. Eigenschaften des Bodens im Untersuchungsgebiet in verschiedenen Bodentiefen.  $Al_{ox}$  und  $Fe_{ox}$ : mit Ammoniumoxalat-Oxalsäure extrahierte Aluminium- und Eisenoxide.**

	Humus [ % ]	pH (H <sub>2</sub> O) [ - ]	$Al_{ox}$ [mmol/kg]	$Fe_{ox}$ [mmol/kg]
Anzahl Proben	112	112	112	112
<b>Bodentiefe 0 bis 5 cm</b>				
Minimum	3,2	5,3	22,3	35,5
Maximum	17,9	7,7	62,2	107,1
Median	8,6	6,0	36,1	55,3
Variationskoeffizient	0,21	0,08	0,19	0,17
<b>Bodentiefe 5 bis 20 cm</b>				
Minimum	2,2	5,3	21,2	30,7
Maximum	9,3	8,2	61,9	114,9
Median	5,3	5,9	34,3	49,4
Variationskoeffizient	0,19	0,08	0,21	0,19

Beispiel in Tonmineralien fest gebundenes oder eingeschlossenes P (Houba *et al.* 1997).

### Phosphorgehalte im Boden

Die Böden im Untersuchungsgebiet weisen in der Regel sowohl in den obersten fünf Zentimetern als auch in der Bodenschicht 5 bis 20 cm mittlere bis sehr hohe P-Gehalte auf (Tab. 2). Vom P-Gesamtgehalt sind im Mittel lediglich etwa 0,5 % des Phosphors leicht löslich ( $P_{CO_2}$  und  $P_{CaCl_2}$ ) und 10 % ( $P_{AAE}$ ) beziehungsweise 16 % ( $P_{AL}$ ) langfristig pflanzenverfügbar und somit potenziell mobilisierbar. In der Bodentiefe 5 bis 20 cm sind die entsprechenden Anteile geringer und betragen 0,1 %, 4 % und 10 %. Ein grosser Anteil des im Boden gespeicherten P liegt somit zwar nicht in einer pflanzenverfügbaren Form vor. Biotische und abiotische Prozesse im Boden können diese P-Anteile jedoch in pflanzenverfügbare P-Verbindungen überführen (Frossard *et al.* 2000). Wie schnell eine solche Nachlieferung erfolgt ist unter anderem von den Bodeneigenschaften abhängig und kann nicht gesagt werden. In der Grössenordnung dürfte es sich hierbei vermutlich um Monate bis Jahre handeln.

Die leicht löslichen P-Gehalte in den obersten fünf Zentimetern der Graslandböden betragen gegenüber der Bodenschicht 5 bis 20 cm durchschnittlich das 5- bis 6-fache, die langfristig pflanzenverfügbaren P-Gehalte etwa das 2- bis 3-fache. Diese in der obersten Bodenschicht akkumulierten P-Mengen werden kurz- bis mittelfristig vor allem durch die Menge und Häufigkeit der P-Düngung bestimmt. Im Gegensatz zu den leicht löslichen P-Gehalten reagieren die längerfristig potenziell verfügbaren P-Vorräte nur langsam auf eine Veränderung der P-Düngung. Die  $P_{ox}$ -Gehalte zwischen den beiden untersuchten Probenahmetiefen unterscheiden sich lediglich um den Faktor 1,4, die P-Gesamtgehalte nur unwesentlich. Dass sich eine Veränderung der potenziell pflanzenverfügbaren P-Vorräte in den untersuchten Böden nur langsam vollziehen kann, wird durch die Umrechnung der  $P_{AAE}$ -Gehalte in die entsprechende P-Menge in den obersten 20 cm deutlich. Diese beträgt durchschnittlich rund 190 kg/ha (berechnet mit Raumgewicht von 1400 kg/m<sup>3</sup>). Mit den P-Anteilen im Boden, die nur schwer oder nicht ver-

fügbare sind, beträgt die P-Menge durchschnittlich 1431 kg/ha für  $P_{ox}$  und 3528 kg/ha für  $P_{tot}$ . Dieser Vergleich der unterschiedlich verfügbaren P-Mengen im Boden zeigt die Bedeutung der oben genannten biotischen und abiotischen Prozesse auf, welche nicht pflanzenverfügbare P-Verbindungen in pflanzenverfügbare überführen können.

Die Messwerte der  $P_{CO_2}$ - und der  $P_{CaCl_2}$ -Methode einerseits und der  $P_{AAE}$ - und der  $P_{AL}$ -Methode andererseits zeigen einen linearen Zusammenhang mit Korrelationskoeffizienten grösser als 0,9, wobei die  $P_{CaCl_2}$ - beziehungsweise die  $P_{AL}$ -Methode jeweils einen grösseren P-Anteil ergeben (Abb. 2). Auch die  $P_{CO_2}$ - und die  $P_{AAE}$ -Gehalte weisen einen starken linearen Zusammenhang auf (Korrelationskoeffizient 0,93). Im Vergleich mit den  $P_{ox}$ -Gehalten steigen die  $P_{CO_2}$  und  $P_{AAE}$ -Gehalte exponentiell an. In den obersten fünf Zentimetern sind beispielsweise für  $P_{ox}$ -Gehalte bis etwa 500 mg P/kg die leicht löslichen Gehalte der  $CO_2$ -Methode niedriger als 5 mg P/kg. Für höhere  $P_{ox}$ -Gehalte steigen die leicht löslichen Gehalte stark an.

**Tab. 2. Verfügbarkeit der Phosphorgehalte im Untersuchungsgebiet.  $P_{CaCl_2}$  und  $P_{CO_2}$ : leicht pflanzenverfügbar;  $P_{AL}$ ,  $P_{AAE}$  langfristig pflanzenverfügbar;  $P_{ox}$ : P-Verfügbarkeit im Bezug zur Speicherkapazität des Bodens;  $P_{tot}$ : Gesamtgehalt.**

	$P_{CaCl_2}$ [mg/kg]	$P_{CO_2}$ [mg/kg]	$P_{AAE}$ [mg/kg]	$P_{AL}$ [mg/kg]	$P_{ox}$ [mg/kg]	$P_{tot}$ [mg/kg]
Anzahl Proben	112	61	61	112	112	60
<b>Bodentiefe 0 bis 5 cm</b>						
Minimum	0,4	0,5	26,7	11,9	268,2	742,3
Maximum	19,7	18,5	433,6	609,6	1226	2129
Median	5,6	6,3	124,7	202,1	657,6	1277
Variationskoeffizient	0,71	0,68	0,68	0,67	0,34	0,27
<b>Bodentiefe 5 bis 20 cm</b>						
Minimum	0,1	0,2	8,8	5,5	179,4	266,1
Maximum	9,2	9,6	383,4	526,6	956,6	2153
Median	1,2	1,3	49,4	120,9	462,2	1257
Variationskoeffizient	0,98	1,01	0,95	0,78	0,35	0,26

### Phosphor-Sättigungsindex

In den obersten fünf Zentimetern variiert der P-Sättigungsindex zwischen 0,22 auf einer extensiven Naturwiese, welche 14 Jahre nicht gedüngt wurde, und 0,88 auf einer intensiv gedüngten Naturwiese. In der tieferen Bodenschicht (5 bis 20 cm) liegen die Werte zwischen 0,16 und 0,72. Die oberste Bodenschicht (0 bis 5 cm) weist mit einem durchschnittlichen P-Sättigungsindex von 0,48 eine grössere P-Sättigung auf als die darunter liegende Bodenschicht (5 bis 20 cm) mit 0,36. Mit zunehmendem P-Sättigungsindex steigen in den beiden Bodenschichten die leicht löslichen und längerfristig pflanzenverfügbaren P-Gehalte an und zeigen einen engen Zusammenhang mit der P-Sättigung (Abb. 3). Folglich können sowohl die leicht löslichen als auch die langfristig potenziell pflanzenverfügbaren P-Anteile der Böden mit dem P-Sättigungsindex prognostiziert werden. Die  $P_{AAE}$ -Gehalte zeigen in beiden Bodenschichten einen sehr engen, leicht nichtlinearen Zusammenhang mit dem P-Sättigungsindex. Der in dieser Studie festgestellte Zusammenhang zwischen P-Sättigungsindex und den  $P_{CO_2}$  und  $P_{AAE}$ -Gehalten kann jedoch nicht ohne weiteres auf andere Untersuchungsgebiete und Böden übertragen werden (Koopmans *et al.* 2002).

Im Vergleich mit der Streuung, welche die  $P_{AAE}$ - gegenüber den  $P_{ox}$ -Gehalten aufweisen (siehe Abb. 2), wird in Abbildung 3 die Rolle der Eisen- und der Aluminiumoxide für die Bindung von P in Böden deutlich. Ein grosser Anteil der Streuung der  $P_{AAE}$ -Gehalte wird durch den Einbezug der Eisen- und der Aluminiumoxide erklärt. Die leicht löslichen P-Gehalte zeigen im Vergleich mit dem P-Sättigungsindex eine etwas grössere Streuung und sind deutlich unterschiedlich in den beiden untersuchten

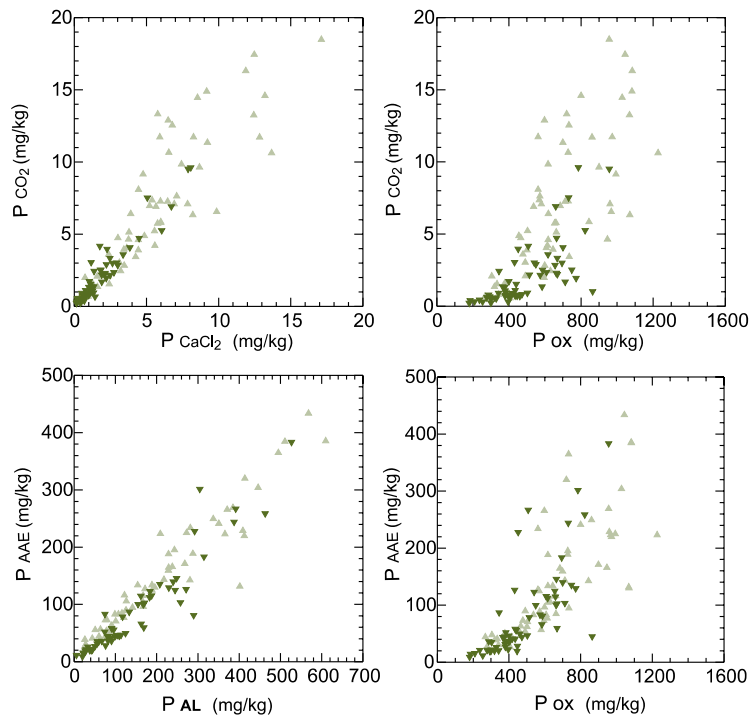


Abb. 2. Zusammenhang zwischen leicht pflanzenverfügbarem Phosphor ( $P_{CO_2}$ ,  $P_{CaCl_2}$ ), langfristig pflanzenverfügbarem Phosphor ( $P_{AL}$ ,  $P_{AAE}$ ) und Oxalat extrahierbarem Phosphor ( $P_{ox}$ ) in einer Tiefe von 0 bis 5 cm (hellgrün) und 5 bis 20 cm (dunkelgrün).

Bodenschichten (Abb. 3). Bei gleichem P-Sättigungsindex ist der lösliche P-Gehalt, und damit die Gefahr von P-Verlusten, in den obersten fünf Zentimetern wesentlich grösser als in der darunter liegenden Bodenschicht. Bereits ab einem P-Sättigungsindex von 0,4 bis 0,5 liegen die löslichen Gehalte in den obersten fünf Zentimetern zwischen 3 und 8 mg P/kg. Auf Basis des P-Sättigungsindex können somit die  $P_{CO_2}$ -Gehalte gegenüber den  $P_{AAE}$ -Gehalten in den obersten fünf Zentimetern nur mit einer grösseren Streubreite geschätzt werden.

### Räumliche Variation

Die Gefahr von P-Verlusten innerhalb eines Einzugsgebiets kann

stark variieren. Daher ist eine räumlich differenzierte Beurteilung der möglichen P-Verluste erforderlich. Auf vier der untersuchten Naturwiesen mit hohen P-Gehalten liegt der P-Sättigungsindex bis in eine Tiefe von etwa 30 cm in der Grössenordnung von 0,4 bis 0,6 (Abb. 4). In der Tiefe von 40 bis 60 cm nehmen die Werte stark ab und liegen unter 0,2. Die leicht löslichen und die pflanzenverfügbaren P-Gehalte sind in dieser Bodentiefe erwartungsgemäss sehr gering. Der P-Vorrat der untersuchten Graslandböden befindet sich somit zum überwiegenden Teil in der oberen Bodenschicht von 0 bis 30 cm.

Horizontal variieren die P-Sättigungsgrade im Untersuchungs-

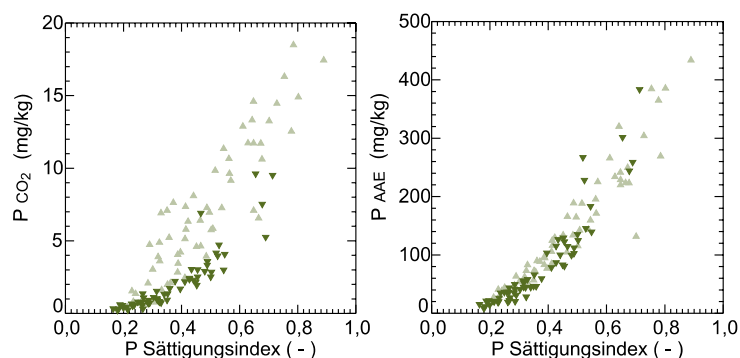
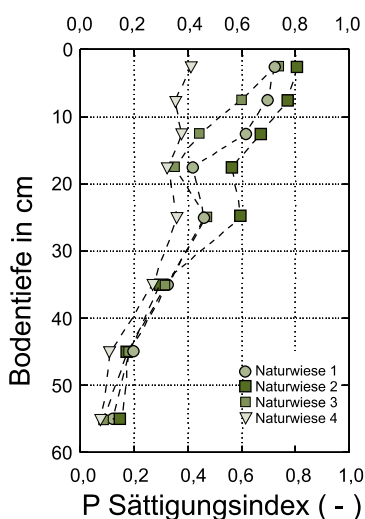


Abb. 3. Mit zunehmendem P-Sättigungsindex im Boden steigt der mit der  $P_{CO_2}$ -Methode gemessene, leicht pflanzenverfügbare und der mit der  $P_{AAE}$ -Methode bestimmte langfristig pflanzenverfügbare P-Gehalt an. Hellgrün: Bodenproben in 0 bis 5 cm Tiefe, dunkelgrün in 5 bis 20 cm Tiefe.

**Abb. 4. Tiefenverteilung des P-Sättigungsindex auf vier Naturwiesen innerhalb des Untersuchungsgebiets mit erhöhten P-Gehalten im Oberboden.**



gebiet Lippenrütibach sowohl zwischen den Parzellen der verschiedenen landwirtschaftlichen Betriebe als auch zwischen den Parzellen innerhalb eines Betriebes stark (Abb. 5). Dies gilt für die obersten fünf Zentimeter ebenso wie für die Bodenschicht 5 bis 20 cm. Diese Unterschiede der P-Sättigung zwischen den Parzellen erklären sich einerseits durch die unterschiedlichen Betriebscharakteristika und andererseits durch Standortfaktoren, wie zum Beispiel Lage und Standorteigenschaften der Parzellen, und der dadurch bedingten unterschiedlichen Bewirtschaftung. Infolgedessen kann die potenzielle Gefahr von P-Verlusten auf Parzellen desselben Betriebes sehr unterschiedlich sein. Eine räumlich differenzierte Beurteilung der landwirtschaftlichen P-Verluste kann deshalb mit wenigen Stichproben innerhalb eines Untersuchungsgebiets nicht gewährlei-

stet werden und erfordert eine angepasste räumliche Stratifizierung der Bodenprobenahme.

Innerhalb der 23 Parzellen, welche mehrfach beprobt wurden, variiert der P-Sättigungsindex in beiden untersuchten Bodentiefen mit Variationskoeffizienten von 10 % bis 15 % hingegen nur wenig. Folglich ist für die Bestimmung des P-Sättigungsindex in der Regel eine Mischprobe pro Parzelle genügend aussagekräftig.

### Folgerungen

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die langfristige potenzielle Gefahr von P-Verlusten in den untersuchten Böden mit hohen P-Vorräten und hohem P-Sättigungsindex nur langsam vermindert werden kann. Eine entsprechende Begrenzung der P-Düngung, wie sie im Rahmen der Phosphorprojekte an den Mittellandseen des Kantons Luzern umgesetzt werden (Seevertrag), ist ein wichtiger Schritt zur langfristigen Reduzierung der potenziellen P-Verluste. Schoumans (1997) berechnete für mit dieser Studie vergleichbare  $P_{AL}$ -Gehalte und P-Speicherkapazitäten im Boden, dass mit einer P-Düngung, die 15 kg/ha und Jahr unter der P-Normdüngung liegt, eine Halbierung der  $P_{AL}$ -Gehalte in den obersten fünf Zentimetern in etwa zehn Jahren erreicht werden kann. Für die Bodenschicht 0 bis 20 cm wurde, je nach Höhe des  $P_{AL}$ -Gehaltes, eine Zeitspanne von zehn bis 20 Jahren geschätzt.

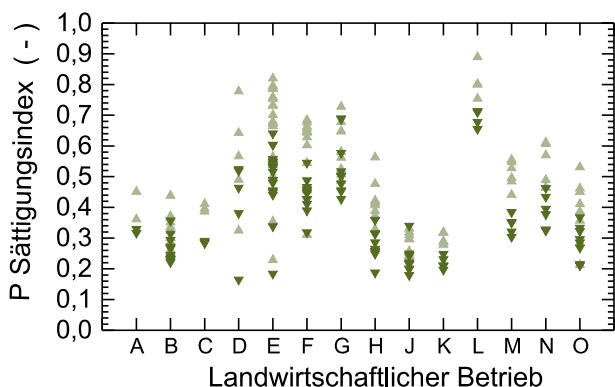
Eine Begrenzung der P-Düngung muss jedoch gleichzeitig mit einer ausreichenden P-Versorgung der Pflanzen einhergehen. Eine Reduzierung der P-Düngung auf ein Niveau unter dem P-Entzug von Futterpflanzen führte beispielsweise in zwei Langzeitversuchen von etwa einem Jahrzehnt auf einer mittelintensiv (Gallet *et al.* 2003) und einer

wenig intensiv (Philipp *et al.* 2004) bewirtschafteten Wiese zu Abnahmen der P-Gehalte in den Futterpflanzen innerhalb weniger Jahre. Eine signifikante Abnahme der Erträge hingegen wurde in den beiden Studien frühestens nach sieben Jahren beobachtet. Inwiefern dies auf die im Einzugsgebiet Lippenrütibach intensiv bewirtschafteten Wiesen und Weiden zutrifft kann nicht gesagt werden. Die aktuelle P-Verfügbarkeit und P-Sättigung der untersuchten Böden lassen jedoch vermuten, dass auch bei einer begrenzten P-Düngung eine ausreichende P-Versorgung der Futterpflanzen gewährt ist. Um diese Frage eindeutig beantworten zu können, ist ein besseres Verständnis der standortspezifischen Prozesse im Boden erforderlich, welche die langfristige P-Verfügbarkeit im Boden bestimmen.

### Literatur

- Braun M. und Prasuhn V., 1997. Massnahmen um die Gewässerbelastung zu vermindern. *Agrarforschung* 4 (8), 339-342.
- Braun M., Wütrich-Steiner C., Aschwanden N. und Denoth F., 2001. Wirkungskontrolle der Öko-Massnahmen in der Landwirtschaft: Phosphorbelastung der Oberflächen-gewässer durch Abschwemmung. Bundesamt für Statistik. Schriftenreihe Land- und Forstwirtschaft Nr. 7, 132 S.
- Denoth F., Egli M. und Allgöwer B., 1998. P-Verluste durch Abschwemmung – Ein Bewertungsmodell. *Agrarforschung* 5 (4), 165-168.
- FAL (Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau), 2001. Referenzmethoden der Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. CH-8048 Zürich. Band 1. Bodenuntersuchung zur Düngeberatung.
- Frossard E., Condron L.M., Oberson A., Sinaj S. and Fardeau J.C., 2000. Processes governing Phosphorus availability in temper-

**Abb. 5. P-Sättigungsindex im Boden gruppiert nach zugehörigem landwirtschaftlichem Betrieb. Die Ziffern kennzeichnen jeweils die Gruppe der untersuchten Parzellen eines Betriebes. Hellgrün: Bodentiefe 0 bis 5 cm, dunkelgrün: 5 bis 20 cm.**



ate soils. *Journal of Environmental Quality* **29**, 15-23.

■ Gallet A., Flisch R., Ryser J.P., Frossard E. and Sinaj S., 2003. Effect of phosphate fertilization on crop yield and soil phosphorus status. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **166**, 568-578.

■ Grünig K. und Prasuhn V., 2001. Phosphorverluste durch Bodenerosion. *Agrarforschung* **8** (1), 30-35.

■ Houba V., van der Lee J.J. and Novozamsky I., 1997. Soil Analysis Procedures – Soil and Plant Analysis. Department of Soil Science and Plant Analysis. Wageningen University. The Netherlands, S. 182

■ Koopmans G.F., McDowell R.W., Chardon W.J., Oenema O. and Dolfing J., 2002. Soil phosphorus quantity-intensity relationships to predict increased soil phosphorus

loss to overland and subsurface flow. *Chemosphere* **48**, 679-687.

■ Lazzarotto P., Prasuhn V., Butscher E., Crespi C., Flühler H. and Stamm C., 2004. Phosphorus export dynamics from two Swiss grassland catchments. *Journal of Hydrology* (accepted).

■ Philipp A., Huguenin-Elie O., Flisch R., Gago R., Stutz C. und Kessler W., 2004. Einfluss der Phosphordüngung auf eine Fromentalwiese. *Agrarforschung* **11** (3), 86-91.

■ Schoumans O.F. and Groenendijk P., 2000. Modelling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in The Netherlands. *Journal of Environmental Quality* **29**, 111-116.

■ Schoumans O.F., 1997. Relation between phosphate accumu-

lation, soil P levels and P leaching in agricultural land. Report No. 146. DLO Winand Staring Centre. Wageningen. The Netherlands. 47 S.

■ Schwertmann U., 1964. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **105**, 194-202.

■ Torrent J., 1997. Interactions between Phosphate and Iron Oxide. *Advances in GeoEcology* **30**, 321-344.

■ Van der Zee, S.E.A.T.M and Van Riemsdijk W.H., 1988. Model for long-term phosphate reaction kinetics in soil. *Journal of Environmental Quality* **17**, 35-41.

## RÉSUMÉ

### Disponibilité du phosphore dans les sols des herbages intensifs

La capacité de stockage et la disponibilité du phosphore (P) ont été étudiées dans le bassin versant du Lippenrütibach (LU) afin d'évaluer le risque potentiel que représentent à long terme les pertes de phosphore dues à l'agriculture et liées à de fortes teneurs en phosphore dans le sol. Les teneurs en P, disponibles de manière variable dans le sol, ont été caractérisées par six méthodes différentes. Dans la zone d'étude, les sols affichaient en général une capacité élevée de stockage du P et des teneurs en P moyennes à élevées. Dans les cinq centimètres supérieurs, ces teneurs étaient nettement plus élevées que les teneurs en P de la couche du sol située entre 5 et 20 cm de profondeur. L'indice de saturation en P, c'est-à-dire la teneur en P par rapport à la capacité de stockage de P dans le sol, affichait en moyenne une valeur de 0,48, de 0 à 5 cm de profondeur et une valeur de 0,36, de 5 à 20 cm de profondeur. L'indice a montré qu'il existait une étroite connexion aussi bien par rapport aux teneurs en P facilement solubles que par rapport aux teneurs disponibles à long terme pour les plantes. L'indice de saturation en P variait non seulement de manière très importante entre les parcelles des exploitations agricoles, mais aussi entre les différentes parcelles d'une même exploitation. Etant donné la forte capacité de stockage du P et la saturation élevée des sols étudiés, on suppose que le risque potentiel de pertes de P à long terme ne peut être atténué de manière substantielle en réduisant les apports de phosphore par fumure que très lentement, à une échelle de dix à vingt ans.

## SUMMARY

### Availability of phosphorus in intensive used grassland soils

We investigated the sorption capacity and availability of phosphorus (P) in soils of the Lippenrütibach catchment (Canton Luzern, Switzerland) to assess the risk of P-losses from agricultural land in the long-term. The different available P-forms in soil were characterised using six P-extraction methods. The soils in the study area revealed a high P-sorption capacity and medium to high P-contents. In the top 5 cm soil layer these were a few times larger than in the soil layer 5 to 20 cm. The P-saturation index, expressed as the ratio between P-content and P-sorption capacity in soil, was on average 0,48 (0 to 5 cm) and 0,36 (5 to 20 cm) and was closely related to both the soluble P and plant available P in soil. The P-saturation index varied strongly between sites of different farms as well as between sites of the same farm. Based on the P-sorption capacity and the P-saturation of the soils investigated, we presume that a reduced P-fertilization below the P-demand of the plants may decrease the potential risk of P-losses in the catchment only slowly, i.e. within 10 to 20 years.

**Key words:** phosphorus, soil, grassland, phosphorus saturation index