

Umwelt

P-Verluste in Wiesen auf drainierten grundnassen Böden

Ruth Maria Hausherr, Hans Conradin und René Flisch, Agroscope FAL Reckenholz, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, CH-8046 Zürich

Auskünfte: René Flisch, E-Mail: rene.flisch@fal.admin.ch, Fax +41 (0)44 377 72 01, Tel. +41 (0) 44 377 73 23

Zusammenfassung

Nährstoffverluste in der Landwirtschaft sind sowohl ökologisch wie ökonomisch unerwünscht. In einem etwa zehn Hektaren grossen Einzugsgebiet in der Gemeinde Reichenburg (SZ) in der Linthebene wurde die Phosphorauswaschung aus futterbaulich genutzten Flächen ins Drainagewasser untersucht.

Die hauptsächlichsten Einflussfaktoren für Phosphorverluste ins Drainagewasser sind Niederschlagsereignisse, Grundwasserstand, Bodentyp und Nutzung, insbesondere die Düngung. Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass in diesem Gebiet mit Jahresniederschlägen von 1550 bis 2050 mm die Phosphorverluste über Drainagen hauptsächlich von den Niederschlagsereignissen abhängig sind. Auch das Ausbringen von Hofdüngern vor Niederschlägen kann die P-Verluste zum Teil stark beeinflussen. Die aufgrund von Messperioden hochgerechneten totalen Phosphorverluste im untersuchten Einzugsgebiet betragen 1,4 bis 8,1 kg P pro Hektare und Jahr. Der Anteil des für die Eutrophierung der Gewässer hauptsächlich verantwortlichen gelösten Phosphors betrug zwischen 10 und 55 % davon. Die Landwirtschaft kann durch die standortgerechte Nutzung und den optimierten Einsatz der Hofdünger auf Verlust gefährdeten Flächen das Risiko für Phosphorverluste vermindern.

Abb. 1. Übersichtsplan des Einzugsgebietes mit Bodentypen, Drainagesystem, Nutzung und den Messstationen.

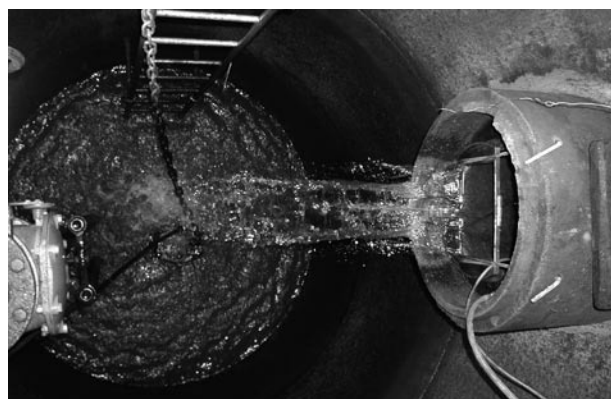
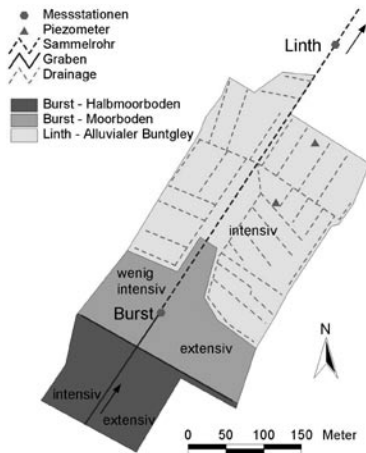


Abb. 2. Pumpwerk mit der Messstation Linth. (Foto: René Flisch, Agroscope FAL Reckenholz)

Phosphat, aus einer drainierten Wiesenfläche in der Linthebene im Zeitraum von 1998 bis 2001 untersucht.

Standortbeschreibung und Untersuchungen

Die untersuchte Fläche liegt in der Linthebene südwestlich des Linthkanals bei Reichenburg. Sie erstreckt sich mit einer Breite von knapp 200 m und einer Länge von knapp 500 m gegen Süd-West und liegt zwischen 411 und 414 m ü. M.; der linthfernste Bereich steigt mit ein bis zwei Prozent gegen den Hangfuss der Molassehöhen im Südwesten an.

Das Einzugsgebiet wird auf der ganzen Länge durch ein in der Mitte verlaufendes Fließgewässer entwässert. Im oberen Teil geschieht dies im offenen Graben, im unteren Bereich ist es eingedolt und dient als Sammler für mehrere Drainagestränge (Abb. 1). Ein Pumpwerk fördert das anfallende Drainagewasser in den linken Linth-Nebengraben (Abb. 2).

Boden und Nutzung

Das Einzugsgebiet umfasst insgesamt 10,1 ha und wird durch drei unterschiedliche Bodentypen und Nutzungsintensitäten charakterisiert (Tab. 1): Der «Alluviale Buntgley» (5,8 ha) wird durch eine mehrere Stränge umfassende 1,1 m tief verlegte Röhrendrainage entwässert. Südwestlich schliesst sich ein nicht drainierter «Moorboden» an. Der Grundwasserstand liegt aufgrund der langsamen Fließgeschwindigkeit mit etwa

Nährstoffverluste in der Landwirtschaft und damit verbundene Gewässerbelastungen müssen möglichst verhindert werden. Obwohl die Phosphorverluste durch Erosion und oberflächliche Abschwemmung in der Landwirtschaft den Hauptanteil der P-Verluste ausmachen (Braun *et al.* 1994) und die P-Verluste durch Auswaschung für den Landwirt ökonomisch von geringer Bedeutung sind, tragen die P-Auswaschungsverluste ins Drainagewasser zur Eutrophierung der Oberflächengewässer bei (Grant *et al.* 1996).

Ein standortgerechter Einsatz der Phosphor-Dünger könnte die Gewässerverschmutzung reduzieren (Toor *et al.* 2004). Besonders Nassböden werden häufig zu intensiv genutzt. Dies trifft nicht nur bei ackerbaulicher, sondern auch bei futterbaulicher Nutzung zu. Deshalb wurde die Nährstoffauswaschung, im Besonderen die Auswaschung von

0,2 Meter unter Terrain (m u. T.) recht hoch. Durch einen quer verlaufenden Wassergraben ist der weiter südwestlich anschliessende «Halbmoorboden» vom ebenen Moorboden abgegrenzt. Die Fläche des Halbmoorbodens und des Moorbodens beträgt zusammen 4,3 ha.

Niederschläge und Grundwasserstand

Die Niederschlagsmessungen sowie die Grundwasserstandsmessungen wurden auf einer Teilfläche des alluvialen Buntgley in einem Intervall von 15 Minuten erfasst. Für die jährlichen Niederschlagsmengen und -verteilungen wurden die Daten der zwei Kilometer entfernten Wetterstation von MeteoSchweiz in Schänis (415 m ü. M.) konsultiert (Abb. 3, Tab. 2). Diese Daten sind für das ganze Jahr vorhanden und stimmen mit den Messungen im Einzugsgebiet überein.

Der Grundwasserstand war generell starken Schwankungen unterworfen. Piezometer-Messungen mit dem Orphimedes Pegel-Messgerät zeigten mindestens einmal pro Monat Werte zwischen 0 und 0,04 m u. T. Der tiefste gemessene Grundwasserstand betrug 1,28 m u. T.

Wasserproben

Die Durchflussmessungen und Probenahme wurden am Eingang und am Ende des Drainagesammelrohres (Abb. 1, «Burst» und «Linth») mit einem kombinierten Probenahme-Durchflussmessgerät (ISCO, Serie 7600) vorgenommen und gesteuert. Die Beprobung erfolgte durchflussabhängig. Die Messreihen während der vier Untersuchungsjahre sind jedoch nicht lückenlos vorhanden.

Phosphoranalysen

Das gelöste Phosphat (P_{gel}) wurde mittels Molybdänblau-Methode nach Murphy und Riley

Tab. 1. Bodentypen, Nutzung und Bodeneigenschaften des Einzugsgebietes

| Bodentyp | Nutzung (Anz. Parzellen) | Bodentiefe (cm) | pH ¹⁾ (H ₂ O) | Humus ¹⁾ (%) | P-Gehalt ¹⁾ (Testzahl) |
|---|--------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Halbmoorboden tieftorfig, stark grundnass flachgründig, sauer 1 bis 2 % geneigt | extensiv (1) | 0-10 | 4,8 | 10 | 2,3 |
| | | 10-30 | 5,1 | 3 | 0,6 |
| | intensiv (1) | 30-60 | 4,1 | 50 | 0,4 |
| | | 0-10 | 6,0 | 12 | 8,4 |
| | | 10-30 | 6,0 | 6 | 1,0 |
| | | 30-60 | 5,5 | 60 | 0,7 |
| Moorboden tieftorfig, grundnass flachgründig, sauer | wenig intensiv (2) | 0-10 | 5,0-5,9 | 23 | 8-14 |
| | | 10-30 | 4,6-5,6 | 35 | 0,4-0,5 |
| | | 30-60 | 4,0-4,8 | 60 | 0,6 |
| Alluvialer Buntgley mullhumos, skelettfrei mässig tiefgründig kalkreich | intensiv (5) | 0-10 | 7,1-7,3 | 5-10 | 19-34 |
| | | 10-30 | 8,0-8,4 | 3,5 | 0,5-2 |
| | | 30-60 | 8,3-8,5 | 1-3 | 0,2-0,4 |
| | | 60-90 | 8,1-8,5 | 1-2 | 0,3-0,5 |

¹⁾Analyse nach den Referenzmethoden der Eidgenössischen Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten

(1962) bestimmt (FAL, RAC und FAW 2004). Für die Bestimmung des totalen Phosphats (P_{tot}) wurden Aliquote der Proben vor der Farbreaktion mit Oxisolv[®] und Schwefelsäure behandelt. Das partikuläre Phosphat (P_{par}) wurde als Differenz von P_{tot} minus P_{gel} berechnet.

Statistik und Berechnungen

Die Frachten für die ausgewählten Beobachtungsperioden der Jahre 1998 bis 2001 wurden mit dem Programm Mathematica, Version 5.1 berechnet.

Um die Lücken der Wasserbeobachtung zu füllen, wurden lineare Interpolationen für die Konzentrationen von gelöstem Phosphat und von partikulärem Phosphat für 15 Minuten-Intervalle durchgeführt. Die Werte der Konzentrationen wurden danach mit dem für die erwähnten Beobachtungsperioden erfassten Durchfluss multipliziert, womit die Frachtkurven berechnet werden konnten. Die Integration des Produkts von Konzentration und Durchfluss wurde mit dem Modul ListIntegrate des Programmes Mathematica ermittelt¹⁾. Die Schlussergebnisse wurden mit dem Faktor 0,326 multipliziert, das heisst

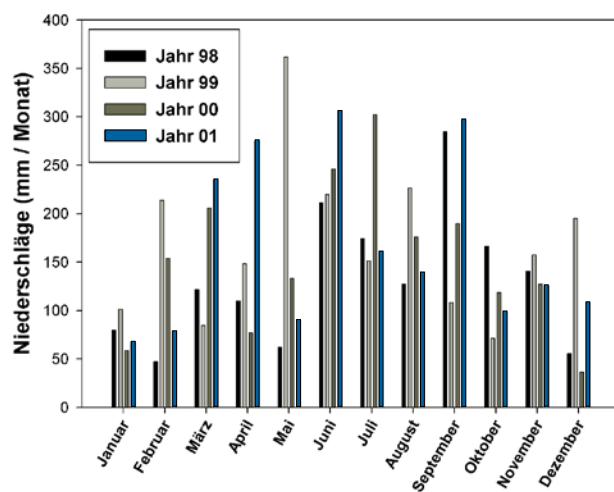
in Frachten von PO₄-Phosphor umgerechnet.

Gründe für P-Verluste

Während den Messperioden wurden an den Messstationen «Burst» und «Linth» (Abb. 4) erhöhte P-Konzentrationen beobachtet, wenn ein bis sieben Tage vor Niederschlagsereignissen Gülle ausgebracht wurde. Heftige Niederschläge, wie sie im Mai und Juni 1999 vorkamen, führten im Drainagewasser zu Spitzenwerten von P_{gel} und P_{par} , auch wenn vorher nicht gedüngt worden war.

¹⁾Für die Auswahl der mathematischen Modelle für die Frachtberechnungen erhielten wir in verdankenswerter Weise die fachliche Unterstützung von Arthur Gut, Winterthur.

Abb. 3. Monatliche Niederschläge (mm) in Schänis (SZ), 415 m ü. M.



Tab. 2. Niederschläge (mm) in Schänis

| Jahr | Jan. – Juni | Juli – Dez. | Total |
|------|-------------|-------------|-------|
| 1998 | 633 | 949 | 1582 |
| 1999 | 1130 | 910 | 2040 |
| 2000 | 875 | 951 | 1825 |
| 2001 | 1052 | 930 | 1982 |

Tab. 3. Deskriptive Statistik für PO₄-P-Konzentrationen im Drainagewasser an den Messstationen «Burst» und «Linth» in der Linthebene, 1998 bis 2001

| Jahr | P-Fraktion (mg/l)* | Statistische Parameter | Burst | Linth |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|-------|-------|
| 1998 | PO ₄ – P gelöst | n | 469 | 693 |
| | | Mittelwert | 0,03 | 0,02 |
| | | VK % | 66,6 | 200,0 |
| | PO ₄ – P partikulär | Maximum** | 0,13 | 0,72 |
| | | Mittelwert | 0,11 | 0,23 |
| | | VK % | 81,8 | 152,2 |
| 1999 | PO ₄ – P gelöst | Maximum** | 0,97 | 3,39 |
| | | n | 448 | 744 |
| | | Mittelwert | 0,08 | 0,04 |
| | PO ₄ – P partikulär | VK % | 85,0 | 100,0 |
| | | Maximum** | 0,39 | 0,20 |
| | | Mittelwert | 0,14 | 0,40 |
| 2000 | PO ₄ – P gelöst | VK % | 118,6 | 148,3 |
| | | Maximum** | 0,90 | 4,16 |
| | | n | 185 | 382 |
| | PO ₄ – P partikulär | Mittelwert | 0,17 | 0,05 |
| | | VK % | 147,1 | 140,0 |
| | | Maximum** | 1,17 | 0,49 |
| 2001 | PO ₄ – P gelöst | Mittelwert | 0,14 | 0,42 |
| | | VK % | 178,6 | 111,7 |
| | | Maximum** | 1,59 | 3,58 |
| | PO ₄ – P partikulär | n | 517 | 592 |
| | | Mittelwert | 0,04 | 0,03 |
| | | VK % | 100,0 | 116,6 |
| PO ₄ – P partikulär | Maximum** | 0,39 | 0,24 | |
| | Mittelwert | 0,07 | 0,36 | |
| | VK % | 71,4 | 196,7 | |
| PO ₄ – P partikulär | Maximum** | 0,46 | 5,76 | |

* Mittelwert PO₄ – P total \equiv PO₄ – P gelöst plus PO₄ – P partikulär

** Minimum in der Regel annäherungsweise Null

Das P_{gel} korrelierte mit einem Korrelationskoeffizienten von r = 0,18 bis 0,51 an beiden Messstationen deutlich mit dem Durchfluss. Die P_{par}-Konzentration korrelierte nur bei der Messstation «Linth» mit dem Durchfluss, nicht aber bei der Messstation «Burst». Die Beziehungen zwischen Durchfluss und den Konzentrationen aller P-Fraktionen waren auf der Linthseite ausgeprägter. Der Durchfluss zeigte einen stär-

keren Bezug zum Grundwasserstand (r = 0,35 bis 0,67) als zur Niederschlagsmenge (r = 0,18 bis 0,32).

Die mittlere Konzentration des P_{gel} war in allen vier Jahren am Messort «Burst» höher als am unteren Messort «Linth» (Tab. 3). Die mittleren Konzentrationen des P_{par} und des P_{tot} verhielt sich genau umgekehrt; sie war bei der Messstation «Linth» immer höher als bei «Burst».

Die berechneten Angaben der Frachten pro Flächeneinheit, wie sie in Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellt sind, weisen eine gewisse Unschärfe auf, da das Einzugsgebiet wegen des Hangwassereinflusses im Bereich des Halbmoorbodens nicht präzise definierbar ist. Da die Messstationen «Burst» und «Linth» durch das Drainagehauptrohr miteinander verbunden sind, gilt dies sowohl für das Einzugsgebiet von «Burst» (4,3 ha) als auch für das Einzugsgebiet von «Linth» (10,1 ha). Die berechneten Tagesmittel der Frachten pro Hektare an P_{par} und P_{tot} waren am Messort «Linth» immer höher als am Messort «Burst». Dies gilt nicht für die mittlere Fracht von P_{gel} pro Hektare, welche in den Jahren 1999 und 2000 am Messort «Burst» höher war. An der Messstation «Linth» wurden durchschnittlich 1,3 bis fünfmal höhere Tagesverluste an P_{tot} berechnet als am Messort «Burst». Beispiele ausgewählter Ereignisse zeigen, dass die Tagesfracht an P_{gel} am Eingang, an P_{par} jedoch immer am Ausgang des Drainagehauptrohrs grösser war (Tab. 5). Das Ausbringen von Gülle bewirkte im Herbst, trotz praktisch gleicher Niederschlagsmenge (Tab. 5), grössere P-Verluste als im Frühling. Die P-Frachten, die durch das Hochwasser von Mai 1999 ausgelöst wurden, übertrafen die mengenmässigen P-Verluste, die nach dem Ausbringen von Gül-

le gemessen wurden, bei Weitem (Tab. 5). Die Konzentrationen an P_{gel} und P_{par} waren hingegen nach dem Ausbringen von Gülle, unmittelbar gefolgt von einem Niederschlagsereignis, höher als während des Hochwassers im Mai 1999 (Abb. 4).

Schwankungen bei Fracht und Konzentration

Die Konzentrationen und Frachten von P_{gel}, P_{par} und P_{tot} unterlagen in den vier Beobachtungsjahren starken Schwankungen. Diese waren in der Regel an der Messstation «Linth» ausgeprägter als bei «Burst». Die Variationskoeffizienten (VK) der Konzentrationen schwankten zwischen 66 und 200 % (Tab. 3).

Die Frachten variierten in noch grösserem Ausmass als die Konzentrationen (VK bis zu 250 %). Während das Minimum immer nahe bei Null war, erreichte die Fracht an P_{tot} auf der Linthseite ein Maximum von 235 mg/s; auf der Burstseite betrug der Höchstwert 31 mg/s.

Generell war der gelöste Anteil am P_{tot} klein; der partikuläre Anteil machte bei der Messstation «Burst» 41 bis 80 %, bei der Station «Linth» 83 bis 92 % des P_{tot} aus (Tab. 3 und 4).

Einfluss von Niederschlag und Düngung

Insgesamt traten in den niederschlagsreicheren Jahren 1999 und 2001 (Tab. 2) die grösseren P_{tot} Verluste auf (Tab. 4) als in den Jahren 1998 und 2000, die in der ersten Jahreshälfte deutlich weniger Niederschlag zu verzeichnen hatten.

Der von Natur aus hohe Grundwasserspiegel im Einzugsgebiet reagierte schnell auf den Niederschlag und stieg an. Leicht verzögert zu den Niederschlägen erhöhte sich der Drainagedurchfluss. Deshalb war die Korrelation der Durchflussrate der Drai-

nage mit dem Grundwasserstand höher als mit dem Niederschlag. De Vos *et al.* (2000) beobachteten dieselben Phänomene bei ihrer Untersuchung der Nitrat- auswaschung ins Drainagewasser. Während sie bei der Fluktuation der NO_3 -Konzentrationen eine hohe Korrelation mit dem Grundwasserstand und der Durchflussrate fanden, korrelierten die bei uns gemessenen P_{gel} - und P_{par} -Konzentrationen nur schwach mit diesen Merkmalen.

Zu den grössten P-Verlusten führten Hochwasser oder längere Regenperioden (Tab. 5). Das Hochwasser im Mai 1999 und die regenreiche Periode im Juni 1999 mit zusammen 25 Regentagen trugen 20 % zum P_{tot} - Jahresverlust 1999 auf der Linthseite bei. Andere Forscher wie Grant *et al.* (1996) und Toor *et al.* (2004) massen auch erhöhte P-Verluste ins Drainagewasser nach mit Unwettern verbundenen heftigen Regenfällen. Einzelne Gülleereignisse, wie in Tabelle 5 gezeigt, bewirkten geringere P_{tot} -Verluste als ein Hochwasser des Ausmasses vom Mai 1999. Die summierten Verluste mehrerer übers Jahr verteilter Güllegaben könnten durch ein einzelnes Hochwasserereignis verursachten P_{tot} -Verlust allerdings deutlich über treffen. Nebst hohem Grundwasserspiegel und Niederschlag beeinflusste auch die Jahreszeit die P-Auswaschung, da sich die Evaporation und der P-Bedarf der Pflanzen innerhalb der Jahreszeiten verändern. So bewirkte das Gülleausbringen am 17. März 1999 einen kleineren P_{tot} -Verlust als das Austragen von Gülle am 27. Oktober 2000 (Tab. 5). Diese Befunde stimmen mit denen von Van Es *et al.* (2004) überein, die nach Gülleapplikation auf Grasland im Herbst eine grössere P-Auswaschung fanden als nach einer Frühjahrsapplikation.

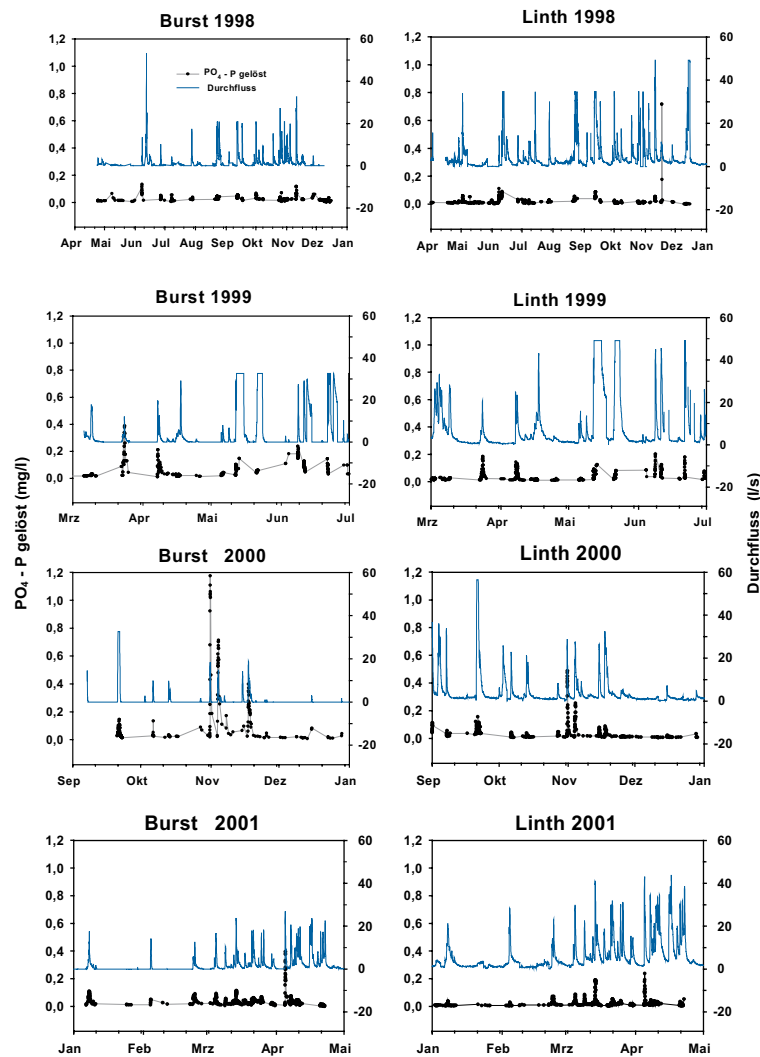


Abb. 4. Konzentration des gelösten Phosphors (mg/l) in Phosphat-Form und Durchfluss (l/s) des Drainagewassers an den Messstationen «Burst» und «Linth» in der Linthebene während ausgewählten Beobachtungszeiten zwischen 1998 und 2001. Schwarze Punkte = gemessene Werte.

Geohring *et al.* (2001) fanden in ihren Bewässerungsversuchen auf gegüllten Flächen, dass die P-Auswaschungsverluste auf den bewässerten Parzellen signifikant höher waren als auf den trockenen. Diese Befunde stimmen mit unseren Beobachtungen überein, die gezeigt haben, dass die P-Konzentrationen im Drainagewasser anstiegen, wenn es nach dem Gülleaustragen innerhalb von ein bis drei Tagen regnete, während sie konstant tief blieben, wenn eine Trockenperiode auf das Gülleausbringen folgte. Die Überwachung des Drainagewassers durch Geohring *et al.* (2001) zeigte, dass die P-Konzentration nach einer Gülleapplikation relativ tief blieb, wenn ein regenfreier Zeitabschnitt folgte.

Die Analysen unserer Wasserproben ergaben, dass das P_{par} den grösseren Anteil am P_{tot} -Verlust ins Drainagewasser ausmacht als das P_{gel} . In den Drainagewasserstudien von Grant *et al.* (1996) wurden in zwei Einzugsgebieten ebenfalls höhere Anteile an P_{par} als P_{gel} am gesamten P-Verlust gemessen. Toor *et al.* (2005) folgerten, dass das reaktive P_{gel} auf dem Transportweg leichter an Bodenpartikeln fixiert werden kann als das partikuläre P, das deshalb den grössten P-Anteil des Sickerwassers bildet.

Die geschätzten Jahresverluste an P_{tot} ins Drainagewasser (Tab. 4) geben zwar einen Hinweis auf die Grössenordnung der Verluste, aber es kann daraus nicht mit Sicherheit gefolgert werden, dass die niederschlags-

Tab. 4. Absolute und flächenbezogene Frachten für PO₄-Phosphor im Drainagewasser 1998 bis 2001

| Messort Jahr | | Burst 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | Linth 1998 | 1999 | 2000 | 2001 |
|--------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| Beobachtungsperiode | | 23.4. – 8.12.98 | 1.3. – 30.6.99 | 16.9. – 31.12.00 | 1.1. – 30.4.01 | 23.4. – 8.12.98 | 1.3. – 30.6.99 | 16.9. – 31.12.00 | 1.1. – 30.4.01 |
| Anzahl Tage | | 230 | 122 | 107 | 120 | 230 | 122 | 107 | 120 |
| PO ₄ – P gelöst | kg absolut | 0,9 | 3,3 | 1,1 | 0,9 | 2,5 | 4,7 | 1,4 | 2,3 |
| PO ₄ – P partikulär | kg absolut | 3,2 | 5,9 | 0,7 | 1,1 | 20,1 | 22,6 | 11,0 | 21,2 |
| PO ₄ – P Total | kg absolut | 4,1 | 9,2 | 1,8 | 2,0 | 22,6 | 27,3 | 12,4 | 23,5 |
| PO ₄ – P gelöst | kg / ha* Jahr** | 0,3 | 2,3 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 1,4 | 0,5 | 0,7 |
| PO ₄ – P partikulär | kg / ha* Jahr** | 1,2 | 4,1 | 0,6 | 0,8 | 3,1 | 6,7 | 3,7 | 6,4 |
| PO ₄ – P Total | kg / ha* Jahr** | 1,5 | 6,4 | 1,4 | 1,4 | 3,5 | 8,1 | 4,2 | 7,1 |

* Einzugsgebiet: 4,3 ha Burst; 10,1 ha Linth

** Jahresschätzung: Berechneter Tagesdurchschnitt für Beobachtungsperiode mal 365 Tage

reicheren Jahre 1999 und 2001 wirklich die verlustreicheren waren, da die Probenahme 1999 und 2001 in der ersten, 1998 und 2000 jedoch in der zweiten Jahreshälfte statt gefunden hat.

Einfluss von Boden und Nutzung

Lademann *et al.* (1994) stellten in ackerbaulich genutzten Böden fest, dass P-Überschüsse nicht für alle Bodenarten hohe P-Verluste ins Drainagewasser bedeuten, sondern die Bodenart mit ihrer P-Sorptionsfähigkeit eine wichtige Rolle für die Bewertung der P-Belastbarkeit spielt. Während die von Lademann *et al.* (1994) berichteten P_{tot}-Verluste ins Drainagewasser nur 0,054 und 0,062 mg/l

betragen, erreichten sie in unseren Untersuchungen 0,14 bis 0,47 mg/l (Tab. 3), das bedeutet zwei bis acht Mal mehr. Dies obwohl die Böden in unserem Einzugsgebiet im Oberboden nur vereinzelt und unterhalb von 10 cm Bodentiefe auf keiner Parzelle erhöhte P-Gehalte aufwiesen (Tab. 1). Einer der wichtigsten Unterschiede zwischen unserer und der Studie von Lademann *et al.* (1994) betrifft den Grundwasserstand. Unsere Erhebungen stammen aus einem Gebiet mit hohem Grundwasserstand (0,9 m u. T.), der mindestens einmal pro Monat bis an die Oberfläche stieg, während die Untersuchungen von Lademann *et al.* auf einem grundwasserfernen Boden (15 m u T.)

durchgeführt wurden. Gemäss Scheffer und Schachtschabel (2002) ist die P-Auswaschung in flach drainierten Böden höher als in tief drainierten Böden. Aufgrund langfristiger Beobachtungen unter schweizerischen Bedingungen sind die P-Drainageverluste unter Grasland höher einzustufen als unter Ackerland (Braun *et al.* 1991).

Die mittleren jährlichen P_{tot}-Konzentrationen waren auf der Burstseite immer tiefer, die mittleren jährlichen P_{gel}-Konzentrationen jedoch immer höher als auf der Linthseite (Tab. 3). Hier kommen die unterschiedlichen Nutzungsintensitäten der Wiesen und die Eigenart der verschiedenen Bodentypen (Abb.1) zum Ausdruck. In den Flusswasserproben eines Einzugsgebiets mit extensiv genutztem Grasland haben Sileika *et al.* (2005) P_{tot}-Konzentrationen von 0,06 bis 0,25 mg/l gemessen, die ähnlich sind wie unsere Werte an der «Burst»-Messstation (0,11 – 0,32 mg/l). Djodjic *et al.* (2004) sowie Cogger und Duxbury (1984) stellten signifikante Unterschiede bezüglich P-Auswaschungsverlusten zwischen verschiedenen Bodentypen fest. P-Auswaschungsverluste von organischen Böden sind oft mehrfach höher als jene von mineralischen Böden (Cogger und Duxbury, 1984). Was-

Tab. 5. Flächenbezogene Frachten für PO₄-Phosphor im Drainagewasser der Linthebene zu einzelnen Ereignissen

| Ereignis | Gülleapplikation 17. März 99 | | Hochwasser Mai 99 | | Regenreiche Periode Juni 99 | | Gülleapplikation 27. Okt. 00 | |
|--|---------------------------------|-------|-----------------------|--------|--------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Beobachtete Tage (n) | 17. – 24.3.99 (8) | | 10. – 21.5.99 (11) | | 8. – 21.6.99 (14) | | 27.10. – 10.11.00 (15) | |
| Niederschlag (mm) | 33,2 | | 299,7 | | 119,2 | | 63,2 | |
| Messort | Burst | Linth | Burst | Linth | Burst | Linth | Burst | Linth |
| PO ₄ – P gelöst (g/ha und Tag) | 3,30 | 1,33 | 31,52 | 21,63 | 9,87 | 5,65 | 8,01 | 2,85 |
| PO ₄ – P partikulär (g/ha und Tag) | 4,41 | 7,94 | 21,04 | 84,30 | 21,46 | 29,00 | 6,03 | 20,04 |
| PO ₄ – P Total (g/ha und Tag) | 7,71 | 9,27 | 52,26 | 105,93 | 31,33 | 34,64 | 14,05 | 22,88 |

* Einzugsgebiet: Burst: 4,3 ha; Linth: 10,1 ha

sertransportmechanismen durch den Boden sowie Bodeneigenschaften des Unterbodens scheinen eine wichtigere Rolle für die P-Auswaschung zu spielen als der P-Gehalt des Oberbodens (Djodjic *et al.* 2004).

Die Düngemittel, die innerhalb des Einzugsgebiets zum Einsatz kamen, waren meistens Gülle und Mist, also organische Hofdünger. Lei *et al.* (2004) haben die P-Auswaschung verschiedener Dünger untersucht. Sie fanden eine höhere P-Auswaschung auf mineralisch und auf gemischt mineralisch-organisch gedüngten Böden als auf rein organisch gedüngten Böden. Wie die Untersuchungen von Ulén (1999) hingegen gezeigt haben, sind mit einer rein organischen Düngung im Vergleich zu mineralischer Düngung keine höheren P-Auswaschungsverluste zu erwarten.

Gezieltes Ausbringen von Hofdüngern

Die beobachteten Düngungen mit Gülle und Mist liessen

die P_{gel} - und P_{par} -Konzentration sprunghaft ansteigen, wenn unmittelbar danach ein grosses Niederschlagsereignis folgte, oder wenn eine Güllegabe nach einer längeren Regenperiode erfolgte und der Boden schon wassergesättigt war. Hochwasser lassen die P_{gel} - und P_{par} -Konzentration ebenso ansteigen, auch wenn kurz vorher keine Dünger ausgebracht worden sind.

Die P_{gel} -, P_{par} - und P_{tot} -Konzentrationen und ebenso die entsprechenden Frachten variierten stark innerhalb der beobachteten Jahresausschnitte. Die Fluktuationen der Niederschläge und vor allem des Grundwasserstandes haben diese massgeblich verursacht. Die Unterschiede der P-Werte des Drainagewassers bei der Messstation «Burst» und «Linth» unterscheiden sich vermutlich aufgrund des unterschiedlichen Grundwasserstandes, der unterschiedlichen Bodentypen, sowie der unterschiedlichen Nutzungs- und Düngungsintensität.

Insgesamt sind die P_{tot} -Verluste ins Drainagewasser mit 1,4 bis 8,1 kg pro Hektare und Jahr in der Linthebene beträchtlich, jedoch repräsentieren die P_{gel} -Verluste davon nur 0,3 bis 2,3 kg pro Hektare und Jahr, das heisst 10 bis 55 %. Das Hochwasserjahr 1999 führte zu einem viermal höheren Verlust.

Die Untersuchungen im Linthgebiet haben gezeigt, dass sich durch eine standortgerechte Nutzung und gezielte Düngung unter Berücksichtigung der Boden- und Niederschlagverhältnisse die P-Verluste auf drainierten Böden vermindern lassen.

Literatur

Die Literaturliste kann bei René Flisch, Agroscope FAL Reckenholz, bezogen werden.

RÉSUMÉ

Pertes en phosphore par drainage lors de l'utilisation herbagère de sols à nappe phréatique

Pour des raisons écologiques et économiques, la perte d'éléments nutritifs des sols agricoles doit être évitée. Le lessivage du phosphore par l'eau de drainage a été étudié sur une surface de production fourragère située dans un bassin versant d'environ 10 ha, près de la commune de Reichenburg (SZ).

Les principaux facteurs ayant une influence sur les pertes en phosphore dans les eaux de drainage sont: les précipitations, le type de sol, le type d'exploitation, la fertilisation ainsi que le niveau de la nappe phréatique. Les investigations ont montré que les pertes en phosphore dépendent principalement de l'abondance des précipitations (valeurs annuelles entre 1550 et 2050 mm). Les pertes annuelles en phosphore total ont été estimées entre 1,4 et 8,1 kg/ha pour le bassin versant étudié. Le taux de phosphore résolu, principal responsable de l'eutrophisation des eaux, se situait entre 10 et 55 % du phosphore total. L'apport en engrais de ferme immédiatement avant un événement pluvieux important peut également favoriser les pertes.

Une exploitation adaptée au site et une utilisation optimale des engrais peuvent donc contribuer à une réduction des pertes en phosphore sur les surfaces à hauts risques.

SUMMARY

Phosphorus losses in the drainage water of wet soils used as grassland

Nutrient losses from agricultural systems should be avoided for ecological and economical reasons. The leaching of phosphorus into the drainage water was investigated in a catchment area of about 10 ha used as grassland in the village of Reichenburg (SZ, Linthebene).

The main factors that affect phosphorus leaching into the drainage water are precipitation, soil type, land use, fertilization and groundwater level. These investigations have shown that phosphorus leaching in the studied catchment area depended mainly on the extent and time of precipitation events (annual precipitations of 1550 mm to 2050 mm). The application of liquid manure immediately before rainfall had also an impact on phosphorus leaching. The total annual phosphorus losses through drainage, which were based on periodically measured values, were 1,4 kg to 8,1 kg P/ha between 1998 and 2001 in this catchment area. The proportion of the dissolved phosphorus, mostly responsible for the eutrophication of surface water, was about 10 to 55 % of the total phosphorus. Adapted land use and optimal fertilization in agricultural systems may contribute to a reduction of phosphorus losses in a catchment area with a high risk of nutrient losses.

Key words: phosphorus leaching, artificial drainage, grassland, groundwater level, dissolved phosphate P, particulate phosphate P