

# Untersuchungen zur Phosphor- und Schwefelbelastung des Bodenwassers unter Acker und Grünland

M. DIEPOLDER, L. HEIGL UND S. RASCHBACHER

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)  
 Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz (IAB)  
 Lange Point 12; 85354 Freising  
 michael.diepolder@lfl.bayern.de

## Einleitung und Problemstellung

Im Frühjahr 2018 hat die Lysimeterkooperation der Länder Thüringen, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Hessen und Bayern eine neue gemeinsame Broschüre zur Auswaschung der Nährstoffe Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel aus landwirtschaftlich genutzten Böden veröffentlicht (Knoblauch et al., 2018). Ausgewertet wurden hierfür langjährige, präzise Messreihen der Stoffkonzentrationen des Sickerwassers und des Stoffaustrages, welche mit Hilfe von Lysimetern und Saugsonden auf mehreren Standorten und unter dem Einfluss verschiedener Bewirtschaftungsvarianten ermittelt worden sind.

Der folgende Beitrag ist eine kurze Darstellung der Ergebnisse mehrerer bayerischer Untersuchungsreihen auf zwei Versuchsstationen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) ab dem Jahr 2000. Eine ausführliche Zusammenfassung der Einzelversuche geben Diepolder und Heigl (2018) in der o.g. Broschüre.

## Material und Methoden

Auf zwei Versuchsstationen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) wurden mittels Saugkerzenanlagen auf lehmigen Böden (Parabraunerde) die P- und S-Konzentrationen in 60-130 cm Tiefe über 10 Jahre in mehreren Messreihen bei Acker- und Grünlandnutzung (Dauergrünland) erfasst. Am Standort Spitalhof/Kempton stehen nur Grünlandparzellen, die Anlage in Puch/Fürstenfeldbruck umfasst sowohl Acker- als auch Grünlandnutzung.

Tab. 1: Standortbeschreibung

Naturraum Standort	Alt-Moränenhügelland Puch (Fürstenfeldbruck)	Allgäuer Alpenvorland Spitalhof (Kempton)
Höhe (m ü. NN)	550	730
Ø Temperatur (°C)	8,0	7,0
Ø Niederschlag (mm)	920	1290
Ø Sickerwasseranfall (mm)	280 (Acker) / 220 (Grünland)	570 (Grünland)
Bodentyp Bodenart	Parabraunerde Ls // Lu-Ut4	Parabraunerde Lu (mit Steinen durchsetzt)
Corg (%)	1,50 (A); 1,99 (GL)	3,74 (GL)
CAL-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg 100 g <sup>-1</sup>	14,0 (A); 8,2 (GL)	8,9 (GL)
Pflanzenbestand Acker (A)	WW-Zwfr.-KM	-
Pflanzenbestand Grünland (GL)	Dauergrünland, Leitgras Dt. Weidelgras	Dauergrünland, sehr weidelgrasreich

Alle drei Versuche befanden sich über Saugkerzenanlagen nach Czeratzki (1971). Bei diesen Anlagen wird das unter den Parzellen versickernde Bodenwasser durch dauerhaft im Boden installierte Keramik-Saugkerzen, an die mit einer automatisch gesteuerten

Vakuumpumpe mehrmals am Tag ein Unterdruck von 0,5 bar angelegt wird, kontinuierlich aufgefangen. Die Saugkerzen sind in ca. 60 cm und 120-130 cm Bodentiefe eingebaut. Gemessen wurden die Stoffkonzentrationen im aufgefangenen Bodenwasser, eine Messung der Sickerwassermengen zur exakten Frachtberechnung konnte nicht erfolgen. Allerdings wurde versucht, die mittleren P- und S-Frachten zumindest grob, unter Einbeziehung klimatischer Literaturangaben und Wasserbilanzen nach Wetterdaten, zu quantifizieren.

## Ergebnisse und Diskussion

Phosphor

TP-Konzentrationen:

Auf dem Standort Puch bewegten sich die mittleren Konzentrationen an Gesamt-P (TP) im aufgefangenen Bodenwasser in 60-130 cm Bodentiefe bei der Winterweizen-Zwischenfrucht-Körnermais-Fruchtfolge in einer Größenordnung von 0,10 bis 0,19 mg TP l<sup>-1</sup>, unter Dauergrünland lagen sie bei einer Größenordnung von 0,19 bis 0,33 mg TP l<sup>-1</sup> tendenziell höher.

Wesentlich niedrigere P-Konzentrationen als in Puch wurden auf dem niederschlagsreicherem Grünlandstandort Spitalhof im Allgäu in 60-120 cm Bodentiefe gemessen. Hier bewegten sich die mittleren P-Konzentrationen in einer Größenordnung von 0,04 bis 0,07 mg TP l<sup>-1</sup>. Bei allen Versuchen zeigten beide Beprobungstiefen (60 und 120/130 cm) hinsichtlich der mittleren P-Konzentrationen keine signifikanten Unterschiede.

TP-Frachten:

Für die Fruchtfolge (WW-Zwfr.-KM) in Puch, einem tiefgründigen Ackerbaustandort mit Bodengehaltsklasse „C“ wurde eine durchschnittliche TP-Fracht aus dem Wurzelraum von rund 0,37 kg P (0,85 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ermittelt. Dies entsprach knapp 1 % der gedüngten P-Menge.

Auf dem Pucher Grünland, welches ebenfalls hinsichtlich der Bodenkennwerte eine optimale P-Versorgung aufweist, jedoch für einen Grünlandboden vergleichsweise humusarm ist (Ansaat 1986), wurden P-Frachten in einem Bereich von ca. 0,5 bis 0,7 kg TP (1,1-1,6 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ermittelt, was in etwa 1-2 % des gedüngten Phosphors entsprach. Eine Beziehung zwischen der Höhe des P-Saldos und der Höhe der P-Konzentration bzw. des kalkulierten P-Austrags ließ sich aus den Einzelversuchen nicht ableiten.

Am Spitalhof, einem gegenüber Puch deutlich niederschlags- und humusreicheren, jedoch an CAL-P nicht so hoch versorgten Grünland-Standort (Tab. 1), wurden mit rund 0,3 kg P (ca. 0,7 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> weniger als 1 % der gedüngten P-Menge aus dem Wurzelraum ausgetragen. Bei fehlender P-Düngung unterschied sich der P-Austrag nicht von den gedüngten Varianten.

Die gemessenen P-Konzentrationen bzw. die errechneten P-Frachten unter Ackernutzung sind ähnlich wie die Ergebnisse von Amberger (1996), der anhand langjähriger Lysimeteruntersuchungen (1 m Tiefe) in Weihestephan mit „üblicher, meist dreigliedriger Fruchtfolge“ bei lehmigen Böden mit rund 280 mm mittlerem jährlichem Sickerwasseranfall mittlere P-Konzentrationen im Perlokationswasser von 0,05-0,3 mg P l<sup>-1</sup> und jährliche P-Austräge von 0,3-0,5 kg P ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> quantifizierte.

Langjährige Messungen von Knoblauch et al. (2018) ergaben auf mittel- bis norddeutschen Lysimetern (Acker) - bei durchschnittlichen Niederschlagsverhältnissen von rund 550-690 mm a<sup>-1</sup> bzw. Sickerwasserraten von <50 bis <200 mm a<sup>-1</sup> - P-Konzentrationen von 0,02-0,28 mg TP/l bzw. P-Frachten von 0,02-0,37 kg P ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> im mehrjährigen Mittel. Dabei kam es im Mittel von 10-32 Jahren auf Böden mit P-Gehaltsklasse „B“ bis „D“ nur auf einem von sechzehn Ackerstandorten zu einer Überschreitung von 0,15 mg TP l<sup>-1</sup> (Grenzwert für Oberflächengewässer nach LAWA, 2007) im Sickerwasser.

Bohner und Rohrer (2013) fanden auf einem Grünlandstandort in der Steiermark/Österreich mit 1035 mm Niederschlag und Bodengehaltsklasse „B“ P-Konzentrationen im Hauptwurzelraum von durchschnittlich etwa 0,01-0,03 mg P l<sup>-1</sup>, was in der Größenordnung den mittleren P-Konzentrationen am Spitalhof entspricht. Um ein Vielfaches höhere mittlere P-Konzentrationen (Bereich 0,1- >5 mg TP l<sup>-1</sup>) können dagegen im Drainagewasser unter Grünland gefunden werden (Diepolder und Raschbacher, 2010; Ulrich und Forster, 2012). Amberger (1996) vermerkt, dass „unter Grünlandnutzung, mit Ausnahme von sehr intensiven Mähweiden, praktisch keine P-Auswaschung auftritt“. Dies lässt sich für den Standort Spitalhof bestätigen. Interessanterweise liegen dagegen in Puch die P-Konzentrationen bzw. geschätzten Auswaschungsraten bei Grünland nicht niedriger, sondern sogar tendenziell höher als bei der Ackerfruchtfolge. Dieses Ergebnis lässt sich nicht schlüssig durch stark unterschiedliche Bodenarten, verfügbare P<sub>CAL</sub>-Gehalte, oder P-Bilanzen erklären. Vermutet werden Makroporenflüsse nach Starkregen evtl. in Zusammenhang mit lückigen Grasnarben als Ursache für die erhöhten P-Austräge unter dem Pucher Grünland.

## Schwefel

### SO<sub>4</sub>-Konzentrationen:

Die mittleren Schwefelkonzentrationen lagen in Puch unter Acker in den Varianten mit Gülle (S org. gebunden) in einer Größenordnung von ca. 15 mg SO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>. Für den Fall, dass Schwefel nicht über Gülle, sondern in einer Höhe von 40 kg S ha<sup>-1</sup> als Sulfat mit der mineralischen Grunddüngung nach der Winterweizenernte ausgebracht wurde, erhöhte sich die Konzentration signifikant auf über 24 mg SO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>; dies trotz rechnerisch gleichem und – über die Fruchtfolge betrachtet - ausgeglichenem S-Saldo.

Unter Grünland bewegten sich die mittleren S-Konzentrationen am Standort Puch in einer Größenordnung von rund 7 bis 16 mg l<sup>-1</sup>, sofern Schwefel über Gülle ausgebracht wurde.

Am niederschlagsreicheren Standort Spitalhof lagen die mittleren SO<sub>4</sub>-Konzentrationen im aufgefangenen Bodenwasser bei den Versuchsvarianten mit fehlender bzw. geringer S-Zufuhr über Gülle bzw. Stallmist in einem Bereich von 0,9 mg SO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup> bis 2,8 mg SO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup> und damit niedriger als in Puch.

Auf beiden Grünlandstandorten bewirkten mineralische S-Gaben, welche bei weitem die S-Aufnahme durch die Biomasse überstiegen, einen signifikanten Anstieg der S-Konzentration im Bodenwasser. Dabei betragen in den Teilversuchen in Puch bei einem positiven S-Saldo von knapp 60 kg S ha<sup>-1</sup> die Konzentrationen ca. 26 mg SO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>. Das war mehr als das Dreifache gegenüber den Varianten mit einem mehr oder weniger ausgeglichenen S-Saldo. Interessanterweise wurden auch am Spitalhof in einem Teilversuch im fünfjährigen Mittel bei positiven S-Salden von rund 50-60 kg S ha<sup>-1</sup> mittlere Konzentrationen von etwa 23 bis 25 mg SO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup> erreicht, jedoch wurde, obwohl gleichfalls weit über Entzug gedüngt, in einem weiteren, dreijährigen Teilversuch auf dem gleichen Standort eine wesentlich niedrigere mittlere S-Konzentration (5,1 mg SO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>) gemessen. Diese lag jedoch immerhin noch signifikant rund um das Drei- bis Fünffache über den Messwerten bei Varianten mit deutlich niedrigerem S-Saldo. Teilweise unterschieden sich die mittleren SO<sub>4</sub>-Konzentrationen der einzelnen Beprobungstiefen, jedoch lag kein einheitlicher Trend vor.

### S-Frachten

Als mittlere S-Frachten wurden für den Standort Puch bei Ackernutzung mit Gülle rund 13 kg S ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> bzw. bei mineralischer S-Düngung nach der Weizenernte (PK-Grunddüngung alle 2 Jahre mit Triple-Superphosphat) ca. 21 kg S ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ermittelt. Dies entsprach rechnerisch im Mittel in etwa der durch Düngung zugeführten Schwefelmenge. Die für den Standort Puch berechneten S-Frachten bei Grünlandnutzung bewegten sich in einer Spannweite von ca. 6-9 kg S ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, sie stiegen jedoch auf ca. 20 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> an, wenn mineralischer Schwefel weit über dem Entzug ausgebracht wurde.

Am Spitalhof wurden aus dem Grünland im Falle von S-Salden bis max. 20 kg S ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> schätzungsweise rund 2-5 kg S ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> aus dem Wurzelraum ausgetragen. Bei fehlender

S-Düngung unterschied sich der S-Austrag nicht von den organisch gedüngten Varianten. Bei mineralischer S-Düngung und hohem S-Saldo lag dagegen die kalkulierte jährliche S-Fracht teilweise in der Größenordnung des positiven S-Saldos, teilweise auch deutlich darunter.

Insgesamt konnte für Schwefel mit den Saugkerzenanlagen nachgewiesen werden, dass eine nicht dem Pflanzenwachstum angepasste Düngung in Sulfatform zu einer deutlichen Belastung des Sickerwassers beitragen kann.

Im Vergleich zu den mittel- und norddeutschen Untersuchungen (Knoblauch et al., 2018) lagen die im Alpenvorland gemessenen S-Konzentrationen und S-Frachten auf sehr niedrigem Niveau. Extrem hohe Konzentrationen von 630 bzw. ca. 1400 mg SO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup> im Sickerwasser wurden dagegen bei niederschlagsarmen Standorten auf tiefgründigen Lößböden mit hoher S-Zufuhr u.a. durch atmosphärische Deposition bzw. aufgrund geogener Besonderheiten (Gipseinlagerungen in Tonmergeln) gemessen, verbunden mit mittleren S-Frachten von 130 bzw. 600 kg S ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>.

### Schlussfolgerungen

Die auf zwei süddeutschen Standorten über 900 mm durchschnittlichem Jahresniederschlag gewonnenen Ergebnisse mehrerer Messreihen sind in Tab. 2 zusammengefasst. Bei landwirtschaftlicher Nutzung lag die mittlere Phosphorbelastung des Sickerwassers bei 0,05-0,32 mg Gesamt-P (TP) pro Liter und die mittlere Schwefelbelastung bei 1,2-15,1 mg Sulfat-S pro Liter Sickerwasser. Daraus ergeben sich, grob geschätzt, P-Frachten von etwa 0,3-0,7 kg TP (ca. 0,7-1,6 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) bzw. 2-14 kg Schwefel pro Hektar und Jahr.

Eine über dem aktuellen Bedarf liegende mineralische Ergänzungsdüngung mit Sulfat führte sowohl bei Acker- als auch bei Grünland zu einem starken Anstieg der mittleren S-Konzentrationen.

Tab. 2: Zusammenfassung der Ergebnisse von Saugkerzenanlagen mit Acker und Grünlandnutzung in zwei Naturräumen Bayerns

Naturraum	Alt-Moränenhügelland		Allgäuer Alpenvorland
Standort	Puch (Fürstenfeldbruck)		Spitalhof (Kempten)
Ø Niederschlag (mm)	920		1290
Bodentyp	Parabraunerde	Parabraunerde	Parabraunerde
Bodenart	Sandiger Lehm	Schluffiger Lehm	Schluffiger Lehm
Nutzung	Acker (WW-Zw.fr.-KM)	Dauergrünland	Dauergrünland
Zeitraum Messungen	2000-2013	2003-2010	2000-2010
ØP-Konzentration [mg TP l <sup>-1</sup> ]	0,13	0,22-0,32	0,055
ØS-Konzentration [mg SO <sub>4</sub> l <sup>-1</sup> ]	15,1	7,5-12,8	1,2-2,2
Geschätzter Ø Sickerwasseranfall [mm a <sup>-1</sup> ]	280	220	570
Geschätzte Ø P-Fracht [kg TP ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	0,36	0,5-0,7	0,3
Geschätzte Ø S-Fracht [kg S ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	14	6-9	2-4

## Literatur

AMBERGER (1996): Pflanzenernährung: Ökologische und physiologische Grundlagen, Dynamik und Stoffwechsel der Nährelemente. 4. Neubearb. Aufl., Stuttgart (Hohenheim), Ulmer Verlag, 319 S..

BOHNER, A. & ROHRER, V. (2013): Jahreszeitlicher Verlauf der Phosphor-Konzentrationen im Bodenwasser eines Grünlandbodens. In: Bericht über das 18. Alpenländische Expertenforum 2013 „Phosphor im Grünlandbetrieb – Bedeutung und aktuelle Problembereiche“, 33-40, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein.

CERATZKI (1997): Saugvorrichtung für kapillar gebundenes Bodenwasser. Landbauforschung Völkenrode 21, 13-14.

DIEPOLDER, M. & RASCHBACHER, S. (2010): Projekt „Saubere Seen“ - Untersuchungen zu Phosphorausträgen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen. In: Bericht über das 2. Umweltökologische Symposium „Boden- und Gewässerschutz in der Landwirtschaft“, 79-88. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, A-Irdning.

KNOBLAUCH, S, SCHRÖDTER, M., TAUCHNITZ, N., GRUNERT, M., KOCH, D., BULL, I., SCHULZ, CH., RAMP, C., HAFERKORN, U., RUST, M., DIEPOLDER, M., HEIGL, L. & MEIßNER, R. (2018): Kooperation Lysimeter – Langjährige Untersuchungen zur P-, K-, Mg-, und S-Auswaschung aus landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland. Berichte 2018-1: Neues aus Untersuchung und angewandter Forschung. Beiheft zur Schriftenreihe „Landwirtschaft und Landespflege in Thüringen“. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena, 250 S..

LAWA-RAHMENKONZEPTION (RAKON, TEIL B) (2007): Arbeitspapier II „Hintergrund- und Orientierungswerte für physikalisch-chemische Komponenten“; Stand 07.03.2007.

ULRICH, H. & FORSTER, M. (2012): Untersuchungen zum Phosphoraustrag aus drainierten Grünlandböden im Einzugsbereich des Waginger-Tachinger Sees. In: Bericht über das 3. Umweltökologische Symposium „Wirkung von Maßnahmen zum Boden- und Gewässerschutz“, 87-90. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, A-Irdning.