

# Auswirkung differenzierter Bodenbearbeitung auf verschiedenen Böden auf die P-, K-, Mg- und S-Verlagerung in der Lysimeteranlage Leipzig

Michael Grunert<sup>1\*</sup>

## Zusammenfassung

In der Lysimeteranlage Leipzig wurde auf drei ackerbaulich genutzten Böden (lehmgiger Sand, sandiger Lehm, Lehm) die Wirkung differenzierter Bodenbearbeitung (Direktsaat, Grubber, Pflug) auf Ertrag, Sickerwasserbildung und Nährstoffaustrag in 1 m Bodentiefe untersucht. Die Auswertung umfasst Ergebnisse zu P, K, Mg und S aus 2000-2012. Aus den Messwerten können auf Grund der geringen Bodentiefe keine Rückschlüsse auf Elementgehalte im Grundwasser gezogen werden. Wichtige Ergebnisse sind:

- Die P-Einwaschung war mit 0,1 kg P/ha\*a für Nährstoffbilanzen ohne Bedeutung. Die Einwaschung stieg mit verfügbarem Boden-P-Gehalt und den Sickerwasserraten und war auf Sandboden und bei Direktsaat etwas höher als auf lehmigem Boden bzw. beim Grubber- und Pflugeinsatz. Die P-Konzentration des Sickerwassers betrug 0,1 mg P/l in 1 m Tiefe.
- K wurde im Mittel mit 7 kg K/ha\*a in Lysimeter eingetragen. Die Einwaschung stieg mit dem Boden-K-Gehalt und steigenden Sickerwasserraten und war auf Sand trotz geringerer Bodengehalte höher als auf Lehm. Verzicht auf Bodenbearbeitung fördert die Versickerung und indirekt die K-Verlagerung.
- Die jährliche Mg-Einwaschung lag bei 26 kg Mg/ha\*a. Hohe Bodengehalte an leicht löslichem Mg und hohe Sickerwasserraten förderten die Mg-Verlagerung. Diese war auf den Mg-reichen Lehm Böden höher als auf Sand und bei Direktsaat höher als bei Grubber- und Pflug-Einsatz.
- S wurde deutlich mehr eingewaschen (67 kg S/ha\*a) als durch Düngung und atmosphärische Depositionen zugeführt. Die mittlere S-Konzentration des Sickerwassers betrug 37 mg S/l in 1 m Tiefe.

*Schlagwörter:* Phosphor, Kalium, Magnesium, Schwefel

## Summary

At the lysimeter system Leipzig, were at three agricultural sites with varying soil characteristics (loamy sand, sandy loam and loam) the impact of differentiated tillage management (no-tillage, cultivator, plough) on yield, leachate generation and loss of nutrients at 1 m soil depth investigated.

The analysis included assessment results of P, K, Mg and S from the cultivation years from 2000-2012. Due to the small soil depth examined, it is not possible to conclude the concentration of the elements in the ground water from the measurements. Important results are:

- The leaching of P with a value of 0,1 kg P/ha\*a was not important for nutrient balance. The leaching increased with available P amount in the soil and percolation rate and was slightly higher with no-tillage on sand than on loamy soil or applying cultivator or plough, respectively. The P concentration in the leachate in 1 m depth was 0,1 mg P/l.
- For K an average of 7 kg K/ha\*a were detected in the lysimeter analysis. The leaching increased with an increasing K soil content leachate rates. Despite general low K amounts in the soil, the K leaching was higher at sandy soils than on loamy soils. No tilling promotes the leaching and indirectly K dislocation.
- The yearly average Mg leaching was 26 kg Mg/ha\*a. Mg dislocation is promoted by high amounts of easily soluble Mg in the soil and high percolation rates. Furthermore, it was higher on Mg rich loamy soils than on sand and higher for no-tillage than for cultivator or plough treated soil.
- The leaching of S was obviously higher (67 kg S/ha\*a) as the amount of S applied at field through atmospheric deposition and fertilization. The mean S concentration in the leachate in 1 m depth was 37 mg S/l.

*Keywords:* phosphorus, potassium, magnesium, sulphur

## Einleitung

Im Zentrum aktueller acker- und pflanzenbaulicher Untersuchungen steht die Effizienz der Nährstoffverwertung. Aus ökonomischen und ökologischen Gründen spielt dabei der Stickstoff eine herausragende Rolle. Die weiteren Hauptnährstoffe stehen dabei etwas zurück, werden in der landwirtschaftlichen Praxis teilweise sogar etwas vernachlässigt. Auf Grund regional zu hoher P-Gehalte im Grundwasser

wird jedoch über mögliche P-Verlagerungsvorgänge im Boden diskutiert, teilweise auch beim Schwefel. Kalium und Magnesium spielen in Bezug auf die Wasserqualität aktuell keine Rolle. Bei allen Elementen steht jedoch die Frage, in welchem Umfang mögliche Verlagerungsvorgänge auch für die Wirtschaftlichkeit des Anbaus und für die Düngung relevant sind.

In Sachsen werden aktuell ca. 60 % der Ackerflächen pfluglos bearbeitet. Daraus entsteht auch die Frage, ob und wie

<sup>1</sup> Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Waldheimer Straße 219, D-01683 NOSSEN

\* Ansprechpartner: Dr. Michael Grunert, michael.grunert@smul.sachsen.de



reduzierte Bodenbearbeitung eventuelle Nährstoffverlagerungen auf verschiedenen Böden beeinflusst.

Für die weitere Gestaltung eines wirtschaftlichen Anbaus und des Ressourcenschutzes werden Daten zum Verlagerungsverhalten auch von P, K, Mg und S benötigt. Versuche auf Lysimeteranlagen eignen sich hervorragend, um diese Fragestellungen zu bearbeiten. Auf dieser Grundlage können Lösungsvorschläge für die Optimierung des Acker- und Pflanzenbaus und damit für die Erreichung dieser teilweise in Konflikt stehenden Zielstellungen erarbeitet werden.

## Material und Methoden

Der Lysimeterversuch in Leipzig verfolgt seit dem Jahr 2000 Langzeiteffekte einer differenzierten Bodenbearbeitung (Direktsaat, Grubber, Pflug) auf Ertragsleistung, Sickerwasserbildung und Nährstoffaustrag. In der vorliegenden Auswertung stehen kumulative Effekte der differenzierten Bewirtschaftung auf die Verlagerung von Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel im Untersuchungszeitraum von 13 Jahren im Mittelpunkt. Eine entsprechende Auswertung zum Stickstoff kann Albert (2013) entnommen werden.

Die Lysimeteranlage umfasst 60 Gefäße mit drei unterschiedlichen Böden. Die quadratischen Gefäße besitzen eine Oberfläche von 1 m<sup>2</sup> mit 1 m Bodentiefe. Das Sickerwasser wird gravitativ über eine Filterstrecke aus Quarzsand und -kies gewonnen und jährlich zu Beginn und am Ende der Vegetationsperiode entnommen.

Auf Grund der geringen Tiefe von 1 m sind keine Schlussfolgerungen auf in das Grundwasser verlagerte Nährstoffmengen, jedoch Variantenvergleiche möglich.

Die Lysimetergefäße sind mit drei typischen, in Sachsen weit verbreiteten Böden befüllt. Die Böden wurden an ihren Herkunftsstandorten schichtgenau entnommen und gemäß ihrer natürlichen Lagerung in die Lysimeter einge-

füllt. Die wesentlichen Eigenschaften der Lysimeterböden sind in *Tabelle 1* zusammengefasst. Der Standort in Leipzig ist gekennzeichnet durch eine langjährige mittlere Jahrestemperatur von 9 °C und eine langjährige jährliche Niederschlagssumme von 607 mm.

In der Lysimeteranlage wird eine in vielen Betrieben gebräuchliche Fruchtfolge mit Winterweizen, Wintergerste, Wintererbsen und Mais angebaut. Das anfallende Stroh verbleibt nach der Ertragsfeststellung auf den Lysimetern. Die differenzierte Bodenbearbeitung wird folgendermaßen vorgenommen:

**Pflug:** Der Boden wird mit dem Spaten ca. 25 cm tief umgegraben.

**Grubber:** Mit einem Handgrubber wird der Boden ca. 15 cm tief gelockert.

**Direktsaat:** Es erfolgt keine Bodenbearbeitung. Das Saatgut wird in Bodenschlitze abgelegt.

Die Direktsaatvarianten sind je Boden in 6-facher Wiederholung, die Grubber- und Pflugvarianten jeweils in 7-facher Wiederholung angelegt.

Die N-Düngung erfolgt mineralisch entsprechend dem unterschiedlichen Bedarf der Kulturen. Seit Versuchsbeginn in 2000 wurden im Mittel jährlich 152 kg N/ha gedüngt. Phosphor wurde einheitlich in Gaben von 27 kg P/ha gegeben, die Kaliumgaben betragen zwischen 85 kg K/ha (Böden Niederbobritzsch, Döbeln) und 94 kg K/ha (Boden Sprotta).

Die Elementeinträge mit den Niederschlägen, gemessen mit Bulk-Sampler, nahmen seit Mitte der 90er Jahre stark ab. Sie lagen im Mittel bei ca. 7 kg S/ha, 6 kg K/ha und 5 kg Mg/ha je Jahr. Ein nennenswerter Phosphoreintrag war nicht feststellbar.

2013 wurde die gesamte Anlage von Leipzig an den Standort Nossen umgesetzt. Dabei wurden an 2 Gefäßen Undichtigkeiten festgestellt. Die Datenanalyse mittels statistischem

*Tabelle 1: Standortcharakteristik des Lysimeterversuchs in Leipzig.*

	Sandboden aus Sprotta	Lößboden aus Döbeln	Verwitterungsboden aus Niederbobritzsch
Bodenform	Braunerde-Podsol	Löss-Braunstaugley	Hangsandlehm-Braunerde
Bodenart	anlehmiger Sand	Lehm	sandiger Lehm
Bodenschätzung	D 2 Sl 26	Lö 4b L 65	V 7 sL 36
Entstehung	Diluvium	Löss	Gneis-Verwitterungsboden
Feinanteil (< 6 µm)			
0 – 35 cm	11,0	24,7	23,1
35 – 100 cm	9,1	26,1	23,3
Ton : Schluff : Sand (%)			
0 – 35 cm	6,8 : 24,7 : 68,5	17,5 : 77,2 : 5,3	15,7 : 51,8 : 32,5
35 – 100 cm	5,0 : 21,1 : 73,5	18,6 : 72,2 : 9,2	13,6 : 45,6 : 40,8
nutzbare Feldkapazität			
(mm in 0 – 100 cm)	128	218	228
PDL (mg/100 g Boden)	12,6 (E)	6,9 (C)	6,8 (C)
KDL (mg/100 g Boden)	7,7 (B)	34,2 (E)	13,6 (C)
pH	6,2 (C)	6,3 (C)	6,2 (C)
Humusgehalt (%)	1,9	2,1	2,2
N <sub>i</sub> -Gehalt (%)	0,10	0,14	0,11

Ausreißer-Test nach Grubbs (1969) bestätigte, dass die Beschädigungen bereits seit dem Ersteinbau der Lysimeter bestanden haben müssen. Die Messdaten der zwei beschädigten Lysimeter wurden bei den weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt.

Alle Analysen der Boden-, Pflanzen- und Wasserproben erfolgten in der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft bzw. der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft nach den Methoden der VDLUFA.

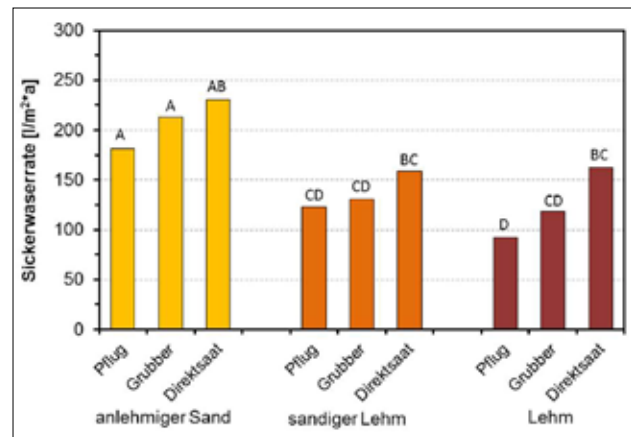
## Ergebnisse

Erwartungsgemäß zeigte der Sandboden mit jährlich 226 l/m<sup>2</sup> (= 226 mm) die höchsten Sickerwassermengen, gefolgt vom sandigen Lehm mit 142 l/m<sup>2</sup> und dem Lehm mit 134 l/m<sup>2</sup>. Etwa zwei Drittel der jährlichen Sickerwasserbildung entfallen auf die Wintermonate zwischen November und März, ein Drittel auf die Vegetationsperiode zwischen April und Oktober. Das geringe Speichervermögen und die hohen Sickerraten bewirkten, dass das gesamte Bodenwasser des Sandbodens mindestens einmal jährlich komplett ausgetauscht wurde, und zwar rechnerisch bis in eine Tiefe zwischen 0,6 m und 3,0 m. Die Schwankungen der Verlagerungstiefe sind witterungsbedingt; im Mittel lag sie bei gut 1,3 m. Im Bodenwasser enthaltene Nährstoffkonzentrationen werden somit innerhalb eines Jahres komplett aus der durchwurzelten Bodenzone ausgeschwemmt. Sie sind auf Praxisflächen für Pflanzen nur noch bedingt verfügbar und unterliegen mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits innerhalb eines Jahres der Verlagerung in tiefere Bodenhorizonte, auf grundwassernahen Standorten auch bis ins Grundwasser. Auf den beiden Lehm Böden hingegen betragen die errechneten jährlichen Verlagerungstiefen lediglich zwischen 0,3 m und 0,4 m. Im Sickerwasser enthaltene Nährstoffe bleiben auf diesen Böden größtenteils weiter für die Pflanzenwurzel erreichbar. Eine Auswaschung aus dem Durchwurzelungshorizont und möglicherweise ins Grundwasser tritt erst mit erheblicher zeitlicher Verzögerung ein.

Mit abnehmender Bodenbearbeitungsintensität steigen die Sickerwasserraten auf allen untersuchten Böden signifikant an, am stärksten auf dem reinen Lehm Boden, am geringsten auf dem Sandboden (*Abbildung 1*). Aus vielen Untersuchungen (z. B. Machulla et al. 2008) ist bekannt, dass vor allem bei Direktsaat die Anzahl durchgängiger und gut dränender Mittel- und Grobporen zunimmt, wodurch die Wasserinfiltration begünstigt wird. Dieser Effekt kommt auf dichter gelagerten Lehm Böden eher zum Tragen als auf Sandböden, die bereits natürlicherweise einen hohen Grob- und Mittelporenanteil haben.

Der Sandboden lieferte erwartungsgemäß bei allen Kulturen deutlich niedrigere Erträge als die beiden Lehm Böden. Die langjährig differenzierte Bodenbearbeitung verursachte keine signifikanten Ertragsunterschiede. Weitere Auswertungen zur Ertragsentwicklung finden sich bei Albert (2013). Wie das Ertragsniveau, war auch die Abfuhr von Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel mit dem Erntegut in erster Linie von der Bodenqualität beeinflusst. Infolge der geringeren Erträge war die Nährstoffabfuhr auf dem Sandboden stets deutlich geringer als auf den beiden Lehm Böden (*Tabelle 2*).

Die schlagbezogenen Nährstoffbilanzen zeigen für alle hier untersuchten Elemente und Böden bzw. Bodenbearbei-



*Abbildung 1: Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Sickerwasserraten der Lysimeterböden (Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant, Tuckey-Test, P<5 %).*

tungsvarianten positive Salden, besonders deutlich für Magnesium und Schwefel, wo die Bilanzüberschüsse 88 % bzw. 62 % des Gesamteintrages dieser Elemente über Düngemittel und die nasse Deposition erreichen. Vom jährlichen Eintrag wurden demnach nur 12 % bzw. 38 % mit der Ernte wieder abgefahren. Der Rest verblieb im Boden, wurde hier angereichert oder unterlag der Verlagerung in tiefere Bodenhorizonte. Bei Kalium hingegen wurden 58 % des Eintrages und bei Phosphor sogar 80 % mit der Ernte wieder abgefahren.

Die unterschiedliche Bodenbearbeitung hatte nur geringen Einfluss auf die Höhe der Bilanzsalden (*Tabelle 2*).

Die langjährig positiven Bilanzsalden führten auf allen Böden zu einem stetigen Anstieg der P<sub>DL</sub>-Gehalte aus der Gehaltsklasse B in die Gehaltsklasse C. Für Magnesium zeigt sich eine ähnliche Tendenz. Die Gehalte für K<sub>DL</sub> und S<sub>min</sub> änderten sich über die Versuchszeit praktisch nicht.

Trotz deutlich positiver Bilanzsalden wurden Phosphor und Kalium aus allen Böden nur in sehr geringen Mengen mit dem Sickerwasser aus den Lysimetergefäßen ausgetragen. Bei Phosphor lag die jährliche Einwaschung in 1 m Tiefe auch auf dem Sandboden zumeist deutlich unter 0,5 kg/ha, im Mittel lag sie bei lediglich 0,1 kg/ha oder 0,4 % der jährlichen P-Zufuhren. Kalium wurde in mittleren jährlichen Raten von 2 kg/ha bis 10 kg/ha in tiefere Bodenhorizonte verlagert. Wie zu erwarten, war die Kaliumeinwaschung auf dem Sandboden mit bis 32 kg/ha\*a am höchsten. Im Mittel lag sie bei diesem Boden bei knapp 11 kg K/ha\*a, gegenüber 8 kg K/ha\*a beim sandigen Lehm und 3 kg K/ha\*a beim lössbürtigen Lehm Boden (*Tabelle 2*). Gerade auf Sandböden hat die K-Verlagerung somit auch wirtschaftliche Bedeutung.

Magnesium und Schwefel sind im Boden beweglicher und wurden daher in erheblich höheren Raten verlagert. Bei Magnesium betrug die jährliche Einwaschung knapp 27 kg Mg/ha, bei Schwefel sogar knapp 67 kg S/ha. Sie übertraf damit die durchschnittliche jährliche Abfuhr (Entzug) jeweils um das 3-fache. In niederschlagsreichen Jahren, wie in 2010, waren für Schwefel sogar Einwaschungen > 200 kg S/ha\*a möglich.

Die Art der Bodenbearbeitung hatte nur auf den beiden lehmigen Böden, hier aber bei allen untersuchten Elemen-

Tabelle 2: Mittelwerte der P-, K-, Mg- und S-Abfuhr, -Einwaschungsmengen und -Bilanzen.

Boden	Bearb.	Abfuhr [kg/ha*a]				Einwaschung [kg/ha*a]				Bilanz [kg/ha*a]			
		P	K	Mg	S	P	K	Mg	S	P	K	Mg	S
lehm. Sand	ohne	19,1	41,7	6,7	14,9	0,1	10,2	15,9	68,5	8,4	58,7	69,4	36,2
lehm. Sand	Grubber	19,1	41,7	7,2	14,9	0,1	10,6	15,8	69,5	8,4	58,7	68,9	36,2
lehm. Sand	Pflug	19,2	43,8	7,2	15,1	0,1	11,0	16,1	70,7	8,3	56,6	68,8	36,0
sand. Lehm	ohne	23,9	58,2	9,3	19,4	0,1	9,4	25,8	69,4	3,6	33,0	62,2	25,6
sand. Lehm	Grubber	22,4	55,7	9,0	19,0	0,1	8,0	25,8	67,4	5,1	35,4	62,5	26,0
sand. Lehm	Pflug	21,9	55,1	8,9	18,2	0,1	7,7	26,4	67,0	5,6	36,0	62,6	26,8
Lehm	ohne	24,8	65,5	9,7	19,8	0,1	3,3	48,4	71,7	2,7	25,7	61,7	25,2
Lehm	Grubber	24,4	65,8	9,9	19,8	0,1	4,1	34,3	59,7	3,1	25,4	61,6	25,2
Lehm	Pflug	23,1	62,1	9,2	19,0	0,1	2,1	31,7	55,6	4,4	29,1	62,2	26,0
<b>Mittel</b>		<b>22,0</b>	<b>54,4</b>	<b>8,6</b>	<b>17,8</b>	<b>0,1</b>	<b>7,4</b>	<b>26,7</b>	<b>66,6</b>	<b>5,5</b>	<b>39,8</b>	<b>64,4</b>	<b>29,3</b>

Tabelle 3: Korrelationsmatrix (Pearson) für den Einfluss ausgewählter Standort- und Bewirtschaftungsparameter im Lysimeter-versuch Leipzig auf die Elementkonzentrationen im Sickerwasser in 1 m Bodentiefe und ihre Einwaschungsraten (signifikante Beziehungen sind fett hervorgehoben, Signifikanzniveau 5 %).

		Phosphor		Kalium		Magnesium		Schwefel	
		Konz. [mg/l]	Einwasch. [kg/(ha*a)]	Konz. [mg/l]	Einwasch. [kg/(ha*a)]	Konz. [mg/l]	Einwasch. [kg/(ha*a)]	Konz. [mg/l]	Einwasch. [kg/(ha*a)]
Bodengehalt nach Ernte		0,04	<b>0,29</b>	-0,16	<b>-0,30</b>	<b>0,59</b>	<b>0,24</b>	0,13	<b>-0,36</b>
Abfuhr	[kg/(ha*a)]	0,06	<b>-0,22</b>	0,02	0,06	<b>0,40</b>	<b>0,46</b>	0,08	<b>0,39</b>
Bilanzsaldo	[kg/(ha*a)]	0,04	<b>0,21</b>	0,01	-0,11	-0,07	<b>-0,23</b>	0,12	<b>-0,39</b>
Niederschlag	[mm/a]	<b>-0,21</b>	-0,15	-0,09	0,11	0,10	<b>0,43</b>	0,10	<b>0,55</b>
Sickerwassermenge	[mm/a]	<b>-0,31</b>	0,18	<b>-0,22</b>	<b>0,33</b>	<b>-0,33</b>	<b>0,25</b>	<b>-0,42</b>	0,37
Sickerwassermenge	L [mm/a]	-0,25	0,24	-0,30	0,04	<b>0,35</b>	<b>0,64</b>	-0,24	0,40
	sL [mm/a]	-0,29	-0,04	-0,33	<b>0,39</b>	-0,18	<b>0,42</b>	-0,20	0,50
	IS [mm/a]	<b>-0,33</b>	0,19	-0,26	0,23	<b>-0,39</b>	0,27	<b>-0,54</b>	0,19
Sickerwassermenge	Direktsaat [mm/a]	-0,28	0,14	-0,21	<b>0,42</b>	-0,26	<b>0,46</b>	<b>-0,41</b>	<b>0,56</b>
	Grubber [mm/a]	<b>-0,41</b>	0,10	-0,27	0,10	<b>-0,35</b>	0,27	<b>-0,42</b>	0,11
	Pflug [mm/a]	-0,26	0,28	-0,16	<b>0,46</b>	<b>-0,37</b>	<b>0,42</b>	<b>-0,41</b>	<b>0,60</b>

ten, gesicherten Einfluss auf den Elementaustrag. Generell war auf diesen Böden eine Zunahme der Einwaschung mit abnehmender Intensität der Bodenbearbeitung in der Reihenfolge Pflug < Grubber < Direktsaat festzustellen. Besonders deutlich war dieser Effekt bei Magnesium, dessen mittlere jährliche Einwaschung bei Direktsaat um bis zu 50 % gegenüber dem Pflug anstieg. In einzelnen Jahren lagen sie auf dem Lehm Boden bei Direktsaat sogar um das 3- bis 5-fache über denen bei Pflugeinsatz.

Die höchste mittlere jährliche Schwefel-Konzentration betrug 109 mg S/l, die höchste überhaupt gemessene S-Konzentration 124 mg S/l. Im langjährigen Mittel über alle Gefäße lag die Schwefelkonzentration des Sickerwassers in 1 m Tiefe bei lediglich 37 mg/l und damit weit unter dem zulässigen Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 250 mg Sulfat/l (entsprechend 83 mg S/l).

Der Richtwert für die P-Konzentration im Sickerwasser gemäß VDLUFA-Standpunkt (VDLUFA 2001) von 0,1 mg P/l wurde in den Leipziger Lysimetern in 1 m Bodentiefe nur in ca. 6 % aller Messungen überschritten. Die höchsten P-Konzentrationen des Sickerwassers wurden mit 0,46 mg/l gemessen. Diese geringen Werte sind mit Blick auf die Ökologie benachbarter Fließ- oder Stillgewässer unbedenklich, da davon ausgegangen werden kann, dass erhebliche Mengen des aus dem Oberboden ausgetragenen Phosphors

im Untergrund wieder gebunden und an der Passage ins Grundwasser sowie damit ggf. in Verbindung stehende Oberflächengewässer gehindert werden oder auch noch von Pflanzenwurzeln aufgenommen werden. Problematischer ist die Situation, wenn solche Sickerwässer in oberflächennah gesammelte Dränwässer gelangen.

Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse umfangreicher Korrelationsanalysen zum Einfluss verschiedener Standorteigenschaften und Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die P-, K-, Mg- und S-Konzentration im Sickerwasser sowie die Einwaschungsraten dieser Elemente. Danach hatten in diesem Versuch die Niederschlagsmenge und die davon abhängige jährliche Sickerwassermenge den größten Einfluss, sowohl auf die Element-Konzentration des Sickerwassers als auch auf die jährlichen Raten der Einwaschung. Je höher die Sickerwasserraten, desto geringer waren aufgrund des Verdünnungseffektes im Allgemeinen die Konzentrationen der untersuchten Elemente im Sickerwasser. Reduzierte Bodenbearbeitung kann somit möglicherweise umweltschädlichen P- oder auch S-Konzentrationen des Sickerwassers entgegen wirken.

Trotz sinkender Konzentrationen stiegen die absolut ausgetragenen Mengen der untersuchten Elemente mit steigenden Sickerwassermengen an, besonders deutlich bei den mobileren Elementen Magnesium und Schwefel,

weniger deutlich bei Kalium. Der Verdünnungseffekt wird hier vom Lösungs- oder Auswaschungsvermögen steigender Sickerwassermengen überkompensiert. Lediglich bei Phosphor bestand zwischen der Sickerwassermenge und der P-Einwaschung kein Zusammenhang.

Für Magnesium und Schwefel, sowie eingeschränkt auch für Kalium, zeigte sich darüber hinaus eine deutliche Abhängigkeit des sickerwassergebundenen Elementaustrages von der Bodenart. Je geringer der Sandanteil des Bodens desto höher war die Einwaschung bei gleicher Sickerwassermenge. Der Nährstoffgehalt des Bodens hatte in diesem Versuch einen indifferenten Einfluss. Höhere Bodengehalte begünstigen die Einwaschung von Phosphor und Magnesium, hemmen aber den Austrag von Kalium und Schwefel.

Entgegen den Erwartungen wurden die Einwaschungsraten und auch die Elementkonzentration des Sickerwassers in 1 m Bodentiefe von den Bilanzsalden der untersuchten Elemente kaum beeinflusst.

Eine ausführliche Auswertung kann der in Erarbeitung befindlichen Broschüre mit Ergebnissen der P-, K-, Mg- und S-Auswaschung aus langjährigen Lysimetermessungen in Deutschland entnommen werden (Grunert 2017). Die Auswertung des Lysimeterversuchs wurde im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie durch die Firma G.U.B. Ingenieur AG in Federführung von Herrn Dr. Meyer durchgeführt.

## Schlussfolgerungen

Aus den Messwerten der vorgestellten Lysimeteruntersuchungen können auf Grund der geringen Bodentiefe keine Rückschlüsse auf Elementgehalte im Grundwasser gezogen werden, jedoch sind Vergleiche der geprüften Varianten möglich.

Mit abnehmender Bodenbearbeitungsintensität ist unter den geprüften Bedingungen mit steigenden Sickerwassermengen zu rechnen. Dies kann die Menge verlagertes Nährstoffe erhöhen, senkt jedoch gleichzeitig die Nährstoffkonzentration des Sickerwassers.

Die durchschnittliche P-Konzentration des Sickerwassers betrug im Leipziger Versuch 0,1 mg P/l in 1 m Tiefe. Sie lag damit unter dem vom VDLUFA (2001) vorgeschlagenen Orientierungswert von 0,2 mg P/l für in Grund- und Dränwasser eingetragenes Sickerwasser aus landwirtschaftlichen Flächen. P-Verlagerung im Bodenprofil dürfte nach den vorliegenden Ergebnissen auf ackerbaulich genutzten Flächen ohne organische Düngung in Mitteldeutschland kaum eine Rolle spielen.

Die K- und Mg-Verlagerung kann am ehesten bei hohen verfügbaren Bodengehalten, auf sandigen Böden und bei geringer Bodenbearbeitungsintensität Bedeutung erlangen und dann für die Landwirtschaft evtl. eine Rolle spielen. Sie liegt beim Mg höher, dürfte jedoch auf Grund der in Mitteldeutschland meist sehr hohen verfügbaren Mg-Gehalte kaum negativ wirken.

S wird in vergleichsweise hohen Mengen verlagert. Auf Grund der stark zurückgegangenen atmosphärischen S-Einträge spielt dies eine zunehmende Rolle in der Pflanzenernährung. Der zulässige Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 83 mg S/l, entsprechend 250 mg SO<sub>4</sub>/l, wurde selbst in der untersuchten geringen Bodentiefe von 1 m nicht erreicht.

## Literatur

- Albert E. (2013) Untersuchungen zur Stickstoffauswaschung bei differenzierter mineralisch-organischer Düngung sowie bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung. In: Kooperation Lysimeter, Mehrländerprojekt: Wirkung landwirtschaftlicher Nutzung auf die N-Auswaschung anhand langjähriger Lysimetermessungen in Mittel- und Nordostdeutschland und Schlussfolgerungen für die Minimierung der N-Befruchtung der Gewässer. Jena, 143-175, ISSN 0944-0348.
- Godlinski F. (2005) Abschätzung der Phosphorausträge aus der ungesättigten Bodenzone anhand numerischer Interpretationen von Lysimeterversuchen. Diss. Univ. Rostock.
- Grubbs F. (1969) Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*, Vol. 11, 1-21.
- Grunert M. (2017) Austrag von P, K, Mg, S aus ackerbaulich genutzten Böden in Lysimeterversuchen in Sachsen. In: Kooperation Lysimeter, Mehrländerprojekt: Wirkung landwirtschaftlicher Nutzung auf die P-, K-, Mg- und S-Auswaschung anhand langjähriger Lysimetermessungen in Mittel- und Nordostdeutschland und Schlussfolgerungen. Jena, 2017, In Erarbeitung.
- Machulla G., Nitzsche O., Schmidt W. (2008) Veränderte Pflanzenschutzmittel- und Nährstoffausträge bei bodenschonender Bewirtschaftung – Risikoanalyse und -vorsorge. Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 29/2008.
- Richter G. (2003) Verlagerung von Sulfat in Böden und Ableitung von Empfehlungen zur Steuerung des Eintrags in das Grundwasser. Diss. Univ. Halle-Wittenberg.
- VDLUFA (2001) Mögliche ökologische Folgen hoher Phosphatgehalte im Boden und Wege zu ihrer Verminderung – Standpunkt. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), Darmstadt.

