

Lysimeteruntersuchungen zu den Nährstoffen Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel an Böden der Sächsischen Lößgefilde in Abhängigkeit von Bewirtschaftung und Bodeneigenschaften

Ulrike Haferkorn^{1*}, Martin Rust¹ und Anke Winkler¹

Zusammenfassung

In der Station Brandis wurden die pflanzenverfügbaren Bodengehalte, Salden und die Auswaschung der Pflanzennährstoffe Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel von sechs verschiedenen Böden unter regionaltypischer Bewirtschaftung untersucht. Unter Berücksichtigung der Einträge seit Beginn der Untersuchungen im Jahr 1981, konnte für den Zeitraum 1999 bis 2013 für keinen der untersuchten Nährstoffe ein Zusammenhang zwischen Bewirtschaftung (Höhe der Salden) und Höhe der Austräge in 3 m Tiefe festgestellt werden. Ursache dafür sind, das in diesem Zeitraum niedrige Düngeneiveau, der Einfluss der Deposition (im Fall des S) und der Bodeneigenschaften. Negative Salden führen beim P und K zu einem relevanten Rückgang der Bodengehalte, während diese im Fall von Mg infolge bodenchemischer Wechselwirkungen mit anderen Kationen, ansteigen. Die Höhe der P-Austräge in 3 m Tiefe ist gering und lässt keine bodenartabhängige Differenzierung erkennen. In Abhängigkeit vom Tongehalt der Böden liegt der mittlere jährliche K-Austrag zwischen 28 kg ha⁻¹ und kleiner 1 kg K ha⁻¹a⁻¹. Die Mg-Austräge korrelieren mit den Ton- und Mergelgehalten der Böden und betragen beim leichten Sandboden 8 kg Mg ha⁻¹a⁻¹, beim Lößboden dagegen 25 kg Mg ha⁻¹a⁻¹. Infolge hoher industriebedingter S-Einträge bildete sich vor allem in Böden mit geringen Sickerwassermengen über Jahrzehnte ein erheblicher S-Pool, dessen Auswaschung noch immer nicht vollständig abgeschlossen ist.

Schlagwörter: Nährstoffgehalte, Nährstoffsalden, Auswaschung

Einleitung

Die Verfügbarkeit der Pflanzennährstoffe Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Schwefel (S) beeinflusst sowohl den Pflanzenertrag und die Qualität des Erntegutes als auch die Effizienz der Stickstoffdüngung. Die Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Düngung, Pflanzenschutz) der Böden in der sächsischen Lysimeterstation Brandis orientiert sich seit Beginn der Messungen im Jahr 1981 an der Wirtschaftsform der regionalen Agrarbetriebe und unterlag, neben sich tendenziell ändernden klimatischen, auch wechselnden agrarpolitischen Rahmenbedingungen. Auf Basis der vorliegenden Messreihen ist es möglich, für typische sächsische Ackerböden, Aussagen zur Entwick-

lung der bewirtschaftungsbedingten pflanzenverfügbaren Bodengehalte und zur Höhe der Nährstoffauswaschung zu treffen. Aufgrund ihrer spezifischen Notwendigkeit für die Pflanzenernährung, unterschiedlichen chemischen Eigenschaften, Höhe und Form der Einträge und der bodenabhängigen Verfügbarkeit für die Pflanzen, ergibt sich für jeden der untersuchten Nährstoffe und für jeden der sechs untersuchten Böden, eine spezielle Versorgungssituation und Höhe der Auswaschung. Die Untersuchungsergebnisse werden in diesem Beitrag dargestellt und bewertet.

Material und Methoden

Die Untersuchungen zu den Nährstoffen Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel wurden in der Lysimeterstation Brandis (Haferkorn 2013) an sechs für Sachsen typischen Bodenformen der Löß- und Sandlößlandschaften durchgeführt. Die als Monolith gewonnenen Böden sind, ihrer Herkunftsflächen entsprechend, durch zunehmende Tiefgründigkeit, Wasserspeicher- und Sorptionskapazität gekennzeichnet (*Tabelle 1*). Es handelt sich um Standorte mit Sandlöß über Schmelzwassersanden (Gr.5/D3, Gr.4/D5), Sandlöß über Geschiebelehm (Gr.8/D3, Gr.1/D6 und Gr.7/D4) und um einen Standort mit tiefgründigem Löß (Gr.9/Lö3).

Seit Beginn der Untersuchungen im November 1980 werden die Böden hinsichtlich Fruchtfolge, Düngung und Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, einheitlich und in regional üblicher Weise bewirtschaftet. Den wechselnden agrarpolitischen Rahmenbedingungen entsprechend, kamen auf den Lysimetern und dem umliegenden Feld nacheinander drei unterschiedliche Formen der Bewirtschaftung zur Anwendung (*Tabelle 2* und *Abbildung 1*), die sich in der Fruchtfolge sowie durch Art und Umfang des Düngemittels einsetzes unterscheiden:

1. Periode (1981-1992): konventionelle Bewirtschaftung (Anbau von Wintergetreide und Hackfrüchten, Abfuhr der Koppelprodukte) mit intensiver, auf Nährstoffbevorratung ausgerichteter Düngung (**organisch** im Mittel jährlich in Höhe von 11 kg P, 38 kg K, 52 kg Mg und 4 kg S ha⁻¹; **mineralisch** mit Superphosphat im Mittel jährlich 35 kg P ha⁻¹, 127 kg K ha⁻¹ und 54 kg S ha⁻¹). Die Standorte wurden im Abstand von zwei bis drei Jahren mit Mg-haltigen Produkten (10,9 Prozent Mg) gekalkt.

2. Periode (1993-1998): Flächenstilllegung (Grünbrache), anschließend 3 Jahre ökologischer Landbau, ab 1996 verbleiben die Koppelprodukte auf der Fläche. Im Jahr 1995

¹ Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL), Kleinsteibberger Str. 13, D-04821 BRANDIS

* Ansprechpartner: Dr. Ulrike Haferkorn, ulrike.haferkorn@smul.sachsen.de



Tabelle 1: Bodeneigenschaften, Nährstoffgehalte und Bindungsverhältnisse (KAK_{eff} - effektive Kationenaustauschkapazität, BS – Basensättigung) von 6 Ackerböden der Lysimeterstation Brandis (0–25 cm Tiefe), Angaben aus der Zeit der Lysimetergewinnung (1978/79).

Standort (Lys.-Gr.)	Bodenart	Tongehalt [%]	Skelett [%]	Bodendichte [g cm ³]	nFK [Vol. %]	kf [m s ⁻¹]	KAK _{eff} [cmol kg ⁻¹]	C _{org} * [%]	N _t * [%]	C/N**	BS** %	pH-Wert (CaCl ₂)*
BB/D3 (LG 5)	IS	8	16	1,56	16,8	1,8×10 ⁻⁴	8,75	1,2 (1,3)	0,11	11,1	89,7	5,2 (6,8)
LL-BB/D3 (LG 8)	sL	6	4	1,59	22,6	6,8×10 ⁻⁴	7,39	1,2 (1,1)	0,10	12,6	96,1	5,2 (6,9)
BB-LF/D5 (LG 4)	sL	8	5	1,42	26,6	3,7×10 ⁻⁵	11,32	1,5 (1,4)	0,13	10,7	87,5	6,6 (7,2)
IBB-SS/D6 (LG 1)	sL	11	5	1,45	28,0	8,5×10 ⁻⁶	14,76	2,9 (2,6)	0,16	13,6	122,3	6,5 (6,8)
BB-SS/D4 (LG 7)	sL	10	2	1,68	21,6	1,2×10 ⁻⁶	9,62	1,3 (1,2)	0,11	11,6	79,5	5,5 (6,7)
LL/Lö3 (LG 9)	L	17	0,1	1,62	22,0	3,7×10 ⁻⁷	15,84	1,3 (1,3)	0,13	11,6	98,3	5,4 (7,1)

Bodenart: IS (lehmgiger Sand), sL (sandiger Lehm), L (Lehm); *Mittel der Jahre 1980–1994 (Analytik im Jahr 2015); **Analytik im Jahr 2015

Tabelle 2: Formen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung auf den Böden der Lysimeterstation Brandis im Zeitraum von 1981 bis 2016.

1. Periode: konventionelle, intensive Landbewirtschaftung	2. Periode: Flächenstilllegung und ökologischer Landbau	3. Periode: konventioneller Landbau mit Düngedarfsermittlung
mineralische und organische Düngung, Abfuhr der Koppelprodukte	organische Düngung (Stallmist, Erntereste), keine mineralische NPK-Düngung, Kalkung	standortdifferenzierte, bedarfsgerechte mineralische N-Düngung, keine Abfuhr der Koppelprodukte
1981 Zuckerrüben 1982 Winterweizen 1983 Wintergerste 1984 Wel. Weidelgras 1985 Kartoffeln 1986 Winterweizen 1987 Kartoffeln 1988 Winterweizen 1989 Wintergerste/Ölrettich (SZF) 1990 Zuckerrüben 1991 Winterweizen 1992 Wintergerste	1993 Grünbrache 1994 Grünbrache 1995 Rotklee 1996 Kartoffeln 1997 Sommerweizen 1998 Winterroggen	1999 Wintergerste/Senf (WZF) 2000 Erbsen 2001 Winterweizen 2002 Wintergerste 2003 Winterraps 2004 Winterweizen 2005 Sommergerste 2006 Winterraps 2007 Winterweizen 2008 Wintergerste 2009 Winterraps 2010 Winterweizen 2011 Wintergerste 2012 Winterraps 2013 Winterweizen/Ölrettich (WZF) 2014 Mais 2015 Winterweizen 2016 Winterraps

WZF - Winterzwischenfrucht

erfolgte mit der Herbstfurche eine standortspezifische Kalkung mit magnesiumhaltigen Produkten zwischen 10 bis 35 dt ha⁻¹. 1996 erhielten alle Standorte eine einheitlich hohe Stalldunggabe (200 dt ha⁻¹ Rinderstallmist).

3. Periode (seit 1999): Die Bewirtschaftung der Lysimeterböden verfolgt weiterhin das Ziel, die aktuellen Bewirtschaftungsmaßnahmen der umliegenden Praxisbetriebe abzubilden. Charakteristisch für die Bewirtschaftung seit 1999 ist ein konventioneller Marktfruchtanbau. Aus betriebswirtschaftlichen Gründen erfolgt eine reduzierte P- und K-Düngung (*Abbildung 1*). Aufgrund des nunmehr geringen Tierbesatzes in der Region mit weniger als 45 Großvieheinheiten je 100 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche (Schwede 2010) und einer großen räumlichen Entfernung zu Stallanlagen, entfällt der Einsatz von organischen Düngern

nahezu vollständig. Gemittelt über alle Untersuchungsstandorte (Böden) beläuft sich der Einsatz von mineralischem Dünger im Zeitraum von 1999 bis 2013 pro Hektar und Jahr auf 5 kg P, 8 kg K und 14 kg S. Im Vergleich zur 1. Bewirtschaftungsperiode liegt der Düngaufwand damit für K bei nur 4 Prozent, für P bei 18 Prozent und für S bei 26 Prozent.

Brandis und die Herkunftsflächen der Lysimeterböden liegen in der nördlichen gemäßigten Zone, im Übergangsbereich zwischen maritimem und kontinentalem Klima mit überwiegend westlichen Winden, wobei das Sommerhalbjahr regenreicher ist als das Winterhalbjahr.

Die Jahresmitteltemperatur der 30jährigen Referenzperiode von 1981 bis 2010 beträgt am Standort Brandis 9,3 °C und der Jahresniederschlag (korrigiert) liegt im Mittel bei

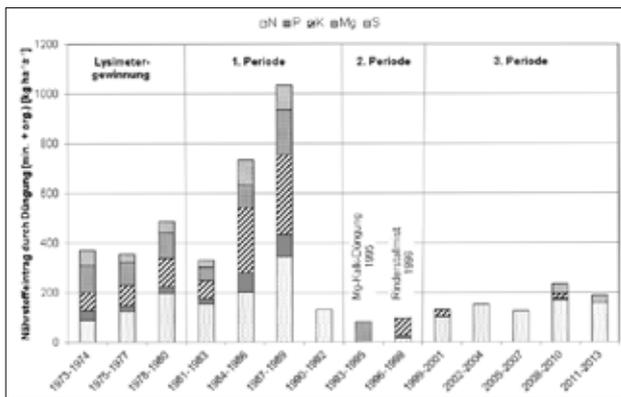


Abbildung 1: Jährlicher, über alle Lysimeterböden der Station Brandis gemittelter Nährstoffeintrag über mineralische und organische Düngung (Elementform) – im Mittel dreijähriger Zeiträume von 1973 bis 2013.

673 mm. Über alle drei Dekaden zeigt sich ein Anstieg der Lufttemperatur, des Jahresniederschlags, der Sonnenscheindauer und der Dauer der thermischen Vegetationsperiode (Tabelle 3). Der Anstieg der Niederschlagsmengen resultiert vor allem aus der Zunahme spätsommerlicher Starkniederschläge. Die klimatische Wasserbilanz ist im langjährigen Mittel leicht negativ (Tabelle 4).

Der innerjährliche Verlauf der klimatischen Wasserbilanz zeigt von April bis August eine Periode mit erheblichen Wasserdefiziten, die in Einzeljahren sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. Problematisch für die Landwirtschaft ist die Trockenheit im Frühling, wobei sich in den für die Pflanzenentwicklung wichtigen Monaten von April und Juni eine deutliche Zunahme der Wasserdefizite abzeichnet (Tabelle 4).

Die seit 1993 mittels Bulk-Sammler gemessene jährliche P (TDP)-Deposition unterliegt geringen jährlichen Schwankungen zwischen 1 und 4 kg P ha⁻¹a⁻¹, die K-Deposition bewegt sich zwischen 2 und 8 kg K ha⁻¹a⁻¹ (Abbildung 2). Die Mg-Deposition liegt im Beobachtungszeitraum relativ konstant bei rd. 3 kg Mg ha⁻¹a⁻¹ und zeigt auch innerjährlich nur geringe Schwankungen. Es ist anzunehmen, dass sich der atmosphärische Eintrag dieser Stoffe vor 1993 nicht wesentlich von dem gemessenen Eintragsniveau unter-

scheidet. Dagegen unterlag die SO₄-S-Deposition großen Veränderungen. Betrug sie zu Beginn der 1990er Jahre noch über 150 kg ha⁻¹a⁻¹, verringerte sie sich nach Stilllegung der braunkohleverarbeitenden Industriebetriebe auf derzeit unter 10 kg ha⁻¹a⁻¹.

Ergebnisse

Pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte der Böden im Verlauf der Jahre 1981 bis 2013

Phosphor-Gehalt

Durch das Ausbleiben einer regelmäßigen Grunddüngung ab 1990 gehen die P_{CAL}-Gehalte im Oberboden aller Standorte während der 2. und 3. Bewirtschaftungsperiode kontinuierlich zurück (Tabelle 5). Dieser Rückgang liegt in der Größenordnung einer Versorgungsstufe. Abbildung 2 zeigt den Rückgang der P-Gehalte bis auf ein Niveau, ab dem eine Erhaltungsdüngung angeraten ist.

Kalium-Gehalt

Die sehr hohe K-Düngung während der 1. Bewirtschaftungsperiode zeigt keine Langzeitwirkung. Auf Grund fehlender K-Düngung sinkt der K_{CAL}-Gehalt der Böden kontinuierlich (Abbildung 2). Für einen zwischenzeitlichen Anstieg sorgte eine standortspezifische K-Grunddüngung mit 60er Kali im Frühjahr 2000. Der rasante Rückgang bis zur Beprobung 2003 ist u.a. mit der K-Verlagerung aus dem Oberboden infolge hoher Niederschläge in den Jahren 2001 und 2002 zu erklären. Derzeit liegt der K_{CAL}-Gehalt bei 4 bis 6 mg K 100 g⁻¹ und damit im unterversorgten Bereich. Bei unverändertem Düngenniveau wird sich der rückläufige Trend fortsetzen.

Magnesium-Gehalt

Bei den Mg-Gehalten der Böden ist eine zu den K-Gehalten gegenläufige Entwicklung zu beobachten. Zu Beginn der Untersuchungen im Jahr 1974 (auf den Herkunftsflächen der Lysimeterböden) liegen die Mg-Gehalte in den Versorgungsstufen „niedrig“ bis „mittel“. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen steigen die Mg-Gehalte auf allen Böden, insbesondere aber auf dem Lößboden, um mehr als 100 Prozent. Dieser Anstieg hält bis heute unverändert an (Abbildung 2). Bei regelmäßigen Kalkungen fanden stets Mg-

Tabelle 3: Dekadenmittel (hydrologische Jahre) von Lufttemperatur, Niederschlag, klimatischer Wasserbilanz, Sonnenscheindauer und Dauer der thermischen Vegetationsperiode der Klimastation Brandis.

Zeitraum	Lufttemperatur °C	Niederschlag (korrigiert) mm	Klimatische Wasserbilanz mm	Sonnenscheindauer h	Dauer der Vegetationsperiode d
1981-1990	9,1	638	3	1529	242
1991-2000	9,2	681	-11	1659	257
2001-2010	9,7	700	-34	1774	274
1981-2010	9,3	673	-14	1654	258

Tabelle 4: Dekadenmittel (Monats- und Halbjahreswerte) der klimatischen Wasserbilanz am Standort Brandis.

Zeitraum	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Wi	So	Jahr
1981-1990	37	55	38	23	9	2	-51	-24	-55	-23	-9	-1	165	-162	3
1991-2000	42	38	29	23	21	-22	-47	-41	-22	-36	-4	8	131	-142	-11
2001-2010	48	39	35	17	9	-38	-33	-62	-23	-30	4	1	110	-143	-34
1981-2010	42	44	34	21	13	-19	-43	-42	-33	-30	-3	3	135	-149	-14

Tabelle 5: Mittlerer P-, K- und Mg-Gehalt [mg 100 g⁻¹] und Versorgungsstufen (LfULG, o.J.) der Böden (0-25 cm Tiefe) während der drei Bewirtschaftungsperioden im Verlauf der Jahre 1981-2013.

Nährstoff [mg 100 g ⁻¹]	Bew.- Periode	BB/D3 LG 5 (IS)	LL-BB/D3 LG 8 (sL)	BB-LF/D5 LG 4 (sL)	IBB-SS/D6 LG 1 (sL)	BB-SS/D4 LG 7 (sL)	LL/Lö3 LG 9 (L)
P	1	9,0 D	8,0 D	20,3 E	10,6 E	11,4 E	12,9 E
	2	10,7 E	8,4 D	18,9 E	12,3 E	7,8 D	12,2 E
	3	8,3 D	6,6 C	9,4 D	8,1 D	4,7 B	8,6 D
K	1	16,9 D	14,6 C	20,4 D	15,9 D	14,5 C	15,4 C
	2	11,2 C	10,1 C	12,9 C	13,6 D	10,3 C	12,6 C
	3	8,3 C	8,2 B	8,7 B	9,9 C	7,7 B	8,1 B
Mg	1	5,2 C	4,8 B	7,5 C	8,9 D	5,5 B	11,4 C
	2	14,2 E	12,0 E	12,2 E	14,4 E	10,8 E	25,3 E
	3	12,4 E	12,4 E	11,7 E	10,0 D	9,6 D	20,6 E
Bodenbezeichnung		leicht	leicht	mittel	mittel	mittel	schwer

Versorgungsstufen: A = sehr niedrig, B = niedrig, C = mittel, D = hoch, E = sehr hoch; (Bodenart): IS = lehmiger Sand, sL = sandiger Lehm, L = Lehm

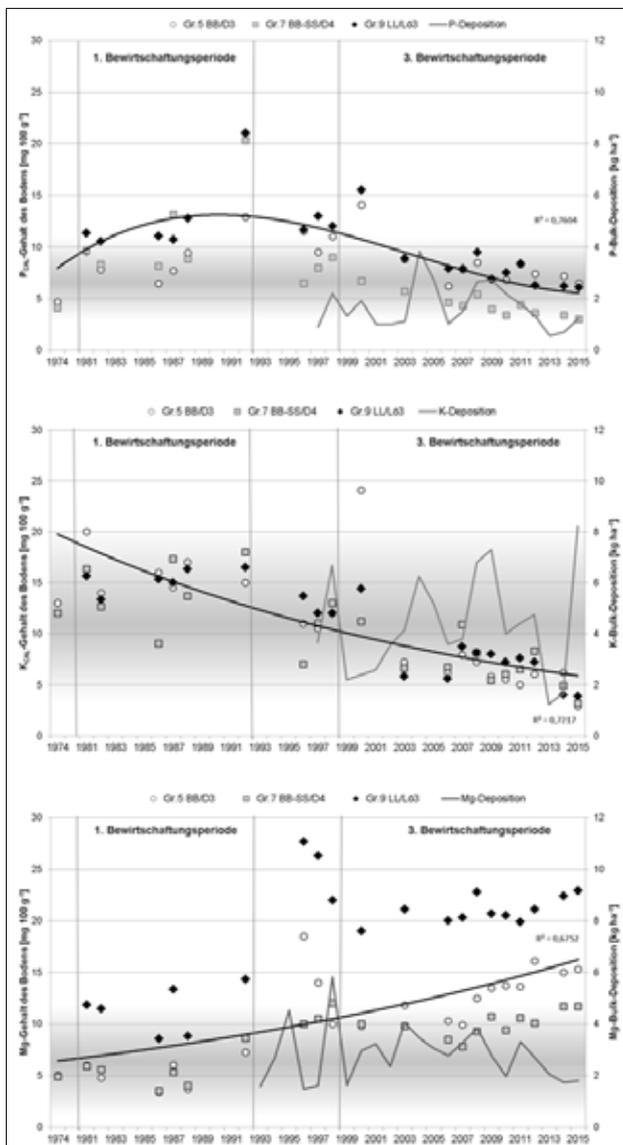


Abbildung 2: Entwicklung des P-, K- und Mg-Gehalts in der Ackerkrume nach der Ernte (grauer Balken = Optimum, schwarz = Trendlinie aller Standorte, graue Linie = Bulk-Deposition).

haltige Substrate Verwendung. In den Boden eingearbeitet, geben sie das Magnesium nach und nach frei und sorgen so für eine lange Nährstoffverfügbarkeit. Des Weiteren werden die Mg-Gehalte von bodenchemischen Wechselwirkungen mit anderen Kationen beeinflusst.

Schwefel-Gehalt

Die Schwefelversorgung der Böden war in Nordwestsachsen bis Anfang der 90er Jahre stark durch Emissionen der kohleverarbeitenden Industrie geprägt, wodurch die S-Einträge weit über den Pflanzenbedarf hinausgingen. Jährliche S_{min}-Untersuchungen in 0-30 und 30-60 cm Bodentiefe begannen in der Station Brandis erst im Jahr 2009. Zu dieser Zeit hatte die SO₄-S-Deposition bereits das heutige Niveau von unter 10 kg SO₄-S ha⁻¹a⁻¹erreicht. Inzwischen besteht aufgrund des vermehrten Rapsanbaus und der geringen S-Deposition, ein S-Düngebedarf. Eine erste S-Düngung in Höhe von 29 bis 33 kg S ha⁻¹ erfolgte im Jahr 2008 zur dritten N-Gabe bei Wintergerste in Form von Schwefelsaurem Ammoniak (SSA). In den Jahren 2009, 2012 und 2016 mit Wintertraps erhielten die Böden weitere S-Gaben mit SSA, je nach Standort in Höhe von 75 bis 115 kg S ha⁻¹.

Im Mittel der Jahre 2010 bis 2015 liegen die S_{min}-Werte in 0-60 cm Tiefe mit S-Gehalten in Höhe von 13,6 kg S ha⁻¹ auf dem leichten Sandboden (D3 LG 5), 19,6 kg S ha⁻¹ auf dem Geschieblehm (D6 LG 1) und 15,5 kg S ha⁻¹ auf dem Lößboden (Lö3 LG 9) unter dem sachsenweiten Durchschnitt, der von Grunert (2015) für das Frühjahr 2014 mit 36 kg S ha⁻¹ und das Frühjahr 2015 mit 43 kg S ha⁻¹ angegeben wird.

Nährstoffsalden und Höhe der Auswaschung

Der am Sickerwasserauslauf, weit unterhalb der Wurzelzone in 3 m Tiefe gemessene Nährstoffaustrag, resultiert sowohl aus den bewirtschaftungsbedingten Einträgen (einschließlich Deposition) als auch aus bodenspezifischen Umsatzprozessen. Neben Bewirtschaftung und Bodenchemie hat die Verlagerungsdisposition der Böden Einfluss auf die Höhe der Auswaschung. Bei durchschnittlich 673 mm Jahresniederschlag bildet der leichte Sandboden (BB/D3 LG 5) ca. 200 mm Sickerwasser. Mit einer Austauschrate des Bodenwassers in der Wurzelzone von 345 Prozent ist dieser Standort stark auswaschungsgefährdet. Bei D-Standorten mit höheren Tongehalten liegen die Austauschraten bei

Tabelle 6: P-Salden, P-Gehalt im Boden, Sickerwassermenge, P-Austrag mit dem Sickerwasser (Fracht) und P-Konzentration im Sickerwasser in 3 m Tiefe für 6 Ackerböden der Lysimeterstation Brandis (Jahresmittelwerte für den Zeitraum 1999-2013).

	BB/D3 LG 5	LL-BB/D3 LG 8	BB-LF/D5 LG 4	IBB-SS/D6 LG 1	BB-SS/D4 LG 7	LL/Lö3 LG 9
P-Saldo [kg ha ⁻¹]	-9	-15	-18	-18	-18	-29
P-Gehalt [mg 100 g ⁻¹]	8,3 D	6,6 C	9,4 D	8,1 D	4,7 B	8,6 D
Sickerwasser [mm a ⁻¹]	201	152	160	144	133	65
P-Austrag [kg ha ⁻¹]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	<0,1
P-Konzentration [mg l ⁻¹]	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12

Tabelle 7: K-Salden, K-Gehalte der Böden, Sickerwassermenge, K-Austrag mit dem Sickerwasser (Fracht) und K-Konzentration im Sickerwasser in 3 m Tiefe für 6 Ackerböden der Lysimeterstation Brandis (Jahresmittelwerte für den Zeitraum 1999-2013).

	BB/D3 LG 5	LL-BB/D3 LG 8	BB-LF/D5 LG 4	IBB-SS/D6 LG 1	BB-SS/D4 LG 7	LL/Lö3 LG 9
K-Saldo [kg ha ⁻¹]	-7	-11	-18	-20	-23	-33
K-Gehalt [mg 100 g ⁻¹]	8,3 C	8,2 B	8,7 B	9,9 C	7,7 B	8,1 B
Sickerwasser [mm a ⁻¹]	201	152	160	144	133	65
K-Austrag [kg ha ⁻¹]	28	14	5	6	3	<1
K-Konzentration [mg l ⁻¹]	14	9	3	4	2	1

118 bis 169 Prozent (mittel bis groß). Auf dem Braunerde-Pseudogley-Standort (BB-SS/D4) und dem Löß (LL/Lö3) fallen nur 136 mm bzw. 60 mm Sickerwasser an. Hier sind die Austauschraten mit 86 bzw. 36 Prozent gering bis sehr gering.

Phosphor

In der 1. Bewirtschaftungsperiode (1981-92) liegt die mineralische Düngung bei durchschnittlich 35 kg P ha⁻¹a⁻¹ und die organische bei 11 kg P ha⁻¹a⁻¹. Die P-Abfuhr über Erntegut und Strohreste beträgt über alle Standorte im Mittel 28 kg P ha⁻¹a⁻¹ (BB/D3: 18 kg P ha⁻¹a⁻¹, LL/Lö3: 40 kg P ha⁻¹a⁻¹). Daraus resultiert während dieser Bewirtschaftungsperiode ein mittlerer positiver P-Saldo von +18 kg P ha⁻¹a⁻¹, im Einzelnen sind es bei BB/D3: +28 und bei LL/Lö3: +6 kg ha⁻¹. Seit 1996, mit Beginn der ökologischen Landbewirtschaftung, verringert sich der Pflanzenentzug durch den Verbleib der Erntereste auf der Fläche um ca. 20 Prozent. Auf leichten Standorten bedeutet dies einen Rückgang des Entzugs von 16 auf 12 kg P ha⁻¹a⁻¹ auf Lößstandorten von 35 auf 31 kg P ha⁻¹a⁻¹. Seit 1999 sind die P-Salden aufgrund der geringen Düngung auf allen Standorten negativ (Tabelle 6).

Mit P-Gehalten von bis zu 9,4 mg 100 g⁻¹ (BB-LF/D5 LG 4) liegen die untersuchten Böden im Mittel der Jahre 1999-2013 noch überwiegend in einer hohen Versorgungsstufe, zeigen aber einen kontinuierlichen Rückgang (Abbildung 2).

Die höchsten P-Konzentrationen im Bodenwasser werden bei allen Standorten in der 1. Ebene in 0,5 m Tiefe gemessen, nehmen vom leichten Sandboden (0,47 mg P l⁻¹) bis zum

schweren Lößboden (0,15 mg P l⁻¹) und ebenso mit der Tiefe ab. In der 3. Ebene (2,5 m Tiefe), ebenso im Sickerwasser in 3 m Tiefe, liegen die Konzentrationen zwischen 0,11 und 0,12 mg l⁻¹ und lassen keine bodenartabhängige Differenzierung mehr erkennen. Die mittlere jährliche P-Fracht auf den D-Standorten liegt bei ca. 0,2 kg P ha⁻¹. Auf dem Löß-Standort ist die P-Fracht kleiner als 0,1 kg P ha⁻¹a⁻¹.

Kalium

Trotz hoher K-Düngung ist der K-Saldo im Mittel 1. Bewirtschaftungsperiode auf dem ertragsstarken Löß-Standort mit hohem K-Entzug negativ (-50 kg ha⁻¹). Der hohe K-Entzug bis Mitte der 1990er Jahre (Ø 142 kg K ha⁻¹a⁻¹) resultiert insbesondere aus dem Anbau kaliumzehrender Kulturen (Kartoffeln, Zuckerrüben) und der vollständigen Abfuhr der Koppelprodukte. Allein durch deren Verbleib auf der Fläche verringert sich der K-Pflanzenentzug seit 1996 um ca. 75 Prozent auf durchschnittlich 42 kg K ha⁻¹a⁻¹. Seit 1990, mit dem Ausbleiben einer regelmäßigen Grunddüngung, sind die K-Salden auf allen Standorten negativ, der K_{CAL}-Gehalt liegt im Mittel der Jahre 1999-2013 zunehmend im unterversorgten Bereich (Tabelle 7).

Der sickerwassergebundene Kalium-Austrag wird maßgeblich vom Tongehalt der Böden bestimmt. Unter der sandigen Braunerde (BB/D3) mit geringem Feinanteil beträgt die mittlere jährliche K-Auswaschung (1999 bis 2013) in 3 m Tiefe 28 kg K ha⁻¹. Unter dem Lößboden (LL/Lö3) wurden, auf Grund des hohen Tongehaltes, bei sehr niedrigen K-Konzentrationen (<1 mg l⁻¹) K-Frachten von kleiner 1 kg K ha⁻¹a⁻¹ registriert.

Magnesium

Der Mg-Saldo über den gesamten Untersuchungszeitraum lässt sich nur näherungsweise ermitteln, da der Mg-Gehalt der verwendeten Kalke und organischen Dünger der 1. Bewirtschaftungsperiode nicht exakt bekannt ist. Der mittlere jährliche Mg-Pflanzenentzug beträgt je nach Standort 12 bis 26 kg Mg ha⁻¹. Bei einer in der Regel alle drei Jahre applizierten Gabe von Kalk, liegt der geschätzte Mg-Eintrag bei 52 kg Mg ha⁻¹a⁻¹. So ergibt sich für die 1. Bewirtschaftungsperiode für alle Standorte ein Mg-Überschuss in Höhe von mindestens +26 (LL/Lö3) und maximal +39 kg Mg ha⁻¹a⁻¹ (BB/D3).

Durch den Verbleib der Koppelprodukte (seit 1996) sinkt der mittlere Mg-Entzug ab der 2. Bewirtschaftungsperiode von ca. 16 kg Mg ha⁻¹a⁻¹ auf 7 kg Mg ha⁻¹a⁻¹. Dennoch sind im Mittel der Jahre 1999-2013 leicht negative Mg-Salden zu verzeichnen (Tabelle 8).

Lagen die Mg-Gehalte im Verlauf der 80er Jahre in den Versorgungsstufen B (niedrig) und C (mittel), so erhöhen sich die Gehalte bis zum Jahr 2015 kontinuierlich bis auf die Versorgungsstufe E (sehr hoch).

Auch der Mg-Austrag mit dem Sickerwasser in 3 m Tiefe wird nicht von der Bewirtschaftung sondern von der Bodenart dominiert. Tonig-mergelige Böden bestehen zu großen Anteilen aus magnesiumhaltigen Silikaten, aus denen beim Verwitterungsprozess Magnesium freigesetzt wird. Die Mg-Konzentrationen im Sickerwasser liegen bei Böden

mit geringen oder fehlenden Mergel- und Tonanteilen (D3 LG 5) bei 4 mg Mg l⁻¹ und beim Lößboden (Lö3 LG 9) bei 38 mg Mg l⁻¹. Die Mg-Austräge betragen beim leichten Sandboden (D3 LG 5) 8 kg Mg ha⁻¹a⁻¹ und beim Lößboden (Lö3 LG 9) 25 kg Mg ha⁻¹a⁻¹ (Tabelle 8).

Schwefel

Im Verlauf der 1. Bewirtschaftungsperiode resultiert der bewirtschaftungsbedingte S-Eintrag aus dem Schwefelanteil der mineralischen Düngung mit Superphosphat in Höhe von 54 kg S ha⁻¹a⁻¹. Hinzu kamen weitere 4 kg S ha⁻¹a⁻¹ aus organischer Düngung. Die Nährstoffabfuhr durch Erntegut betrug 17 kg S ha⁻¹a⁻¹ auf dem leichten bzw. 34 kg S ha⁻¹a⁻¹ auf dem ertragsstarken Lößboden. Daraus ergaben sich, ohne Berücksichtigung der S-Deposition, auf allen Standorten positive S-Salden von +40 kg ha⁻¹a⁻¹ bei der sandigen Braunerde (BB/D3) und +23 kg ha⁻¹a⁻¹ beim tiefgründigen Löß (LL/Lö3). Mit dem Ausbleiben der S-Düngung werden von 1990 bis 2007 auf allen Standorten negative Salden erzielt. Erst seit 2008 sorgt eine kulturartspezifische, mineralische Düngung mit schwefelsaurem Ammoniak im Mittel der Jahre 1999-2013 wieder für leichte S-Überschüsse (Tabelle 9).

Um die Höhe der S-Auswaschung der untersuchten Böden erklären zu können, muss die ehemals hohe S-Zufuhr durch Emissionen der braunkohleverarbeitenden Industrie berücksichtigt werden, die in die Saldenbildung nicht eingeht. Auf Grund der S-Deposition, die weit über dem Pflanzenbedarf

Tabelle 8: Mg-Salden, Mg-Gehalte der Böden, Sickerwassermenge, Mg-Austrag mit dem Sickerwasser (Fracht) und Mg-Konzentration im Sickerwasser in 3 m Tiefe für 6 Ackerböden der Lysimeterstation Brandis (Jahresmittelwerte für den Zeitraum 1999-2013).

	BB/D3 LG 5	LL-BB/D3 LG 8	BB-LF/D5 LG 4	IBB-SS/D6 LG 1	BB-SS/D4 LG 7	LL/Lö3 LG 9
Mg-Saldo [kg ha ⁻¹]	-3	-6	-6	-6	-7	-10
Mg-Gehalt [mg 100 g ⁻¹]	12,4 E	12,4 E	11,7 E	10,0 D	9,6 D	20,6 E
Sickerwasser [mm a ⁻¹]	201	152	160	144	133	65
Mg-Austrag [kg ha ⁻¹]	8	8	30	23	31	25
Mg-Konzentration [mg l ⁻¹]	4	5	19	16	23	38

Tabelle 9: S-Salden, S_{min}-Gehalte der Böden, Sickerwassermenge, S-Austrag mit dem Sickerwasser (Fracht) und S-Konzentration im Sickerwasser in 3 m Tiefe für 6 Ackerböden der Lysimeterstation Brandis (Jahresmittelwerte für den Zeitraum 1999-2013).

	BB/D3 LG 5	LL-BB/D3 LG 8	BB-LF/D5 LG 4	IBB-SS/D6 LG 1	BB-SS/D4 LG 7	LL/Lö3 LG 9
S-Saldo [kg ha ⁻¹]	7	4	3	3	2	4
S _{min} -Gehalt* [mg 100 g ⁻¹]	13,6	14,7	13,7	19,6	18,4	15,5
Sickerwasser [mm a ⁻¹]	201	152	160	144	133	65
S-Austrag [kg ha ⁻¹]	82	87	142	154	185	257
SO ₄ -Konzentration [mg l ⁻¹]	41	57	89	107	139	396

*Mittel (0-60 cm Tiefe) der Jahre 2009 bis 2016

lag, kam es in den sickerwasserarmen Böden zu einer erheblichen S-Anreicherung. Bei Messbeginn im Jahr 1993 lagen die SO_4 -Konzentrationen im Sickerwasser der D-Standorte zwischen 197 mg l^{-1} (D3, LG 5) und 582 mg l^{-1} (D6, LG 1). Unter der Parabraunerde aus Löß (L63, LG 9) wurde 1995 mit einem Jahresmittel von $1.470 \text{ mg SO}_4 \text{ l}^{-1}$ die höchste SO_4 -Konzentration gemessen. Im Jahr 2015 liegt die SO_4 -Konzentration bei diesem Boden bei $192 \text{ mg SO}_4 \text{ l}^{-1}$.

Obwohl die S-Deposition seit Beginn der 90er Jahre stark rückläufig ist und die SO_4 -Konzentrationen im Sickerwasser dramatisch gesunken sind, ist der S-Pool aus der Vergangenheit, insbesondere aus dem tiefergründigen Lößboden mit geringen Austauschraten des Bodenwassers, noch immer nicht vollständig ausgewaschen. Deshalb gilt für den Zeitraum 1999-2013: je geringer die Verlagerungsdisposition der Böden desto höher die S-Austräge, die aus den atmosphärischen S-Einträgen der Vergangenheit resultieren (*Tabelle 9*).

Diskussion und Schlussfolgerungen

Ziel der langjährigen Untersuchungen in der Lysimeterstation Brandis ist es, regionaltypische Bewirtschaftungssysteme in ihrer zeitlichen Abfolge abzubilden. Es wird deutlich, dass eine ausschließliche Betrachtung der Salden nicht ausreicht, um eine Abschätzung der Nährstoffverfügbarkeit und eine realistische Prognose der Nährstoffausträge mit dem Sickerwasser vornehmen zu können. Vielmehr müssen bodenphysikalische Eigenschaften und bodenchemische Prozesse in die Betrachtung mit einfließen.

Das derzeitige Düngeregime auf den sächsischen Ackerböden führt zu negativen Salden und einer Abnahme der P- und K-Gehalte im Boden. P-Überschüsse infolge intensiver Düngung in den 80er Jahren wurden über viele Fruchtfolgen hinweg abgebaut. Mit Gehalten zwischen 5 und $9 \text{ mg P } 100 \text{ g}^{-1}$ besteht auf den untersuchten Böden derzeit noch kein P-Mangel, jedoch wird ab diesem Niveau eine Erhaltungsdüngung angeraten. Die K-Gehalte liegen dagegen im Jahr 2015 mit Werten von 4 bis $6 \text{ mg K } 100 \text{ g}^{-1}$ bereits im unterversorgten Bereich.

P-Konzentrationen zwischen $0,11$ und $0,12 \text{ mg Pt l}^{-1}$ im Sickerwasser in 3 m Tiefe lassen keine bewirtschaftungs- und bodenartabhängige Differenzierungen erkennen und liegen unter dem Orientierungswert von $0,2 \text{ mg Pt l}^{-1}$, den der VD-LUFA (2001) für das Sickerwasser in 90 cm Tiefe abgeleitet hat. Der P-Austrag in 3 m Tiefe ist mit $0,1$ bzw. $0,2 \text{ kg/ha}$ sehr gering. Die Höhe der K-Konzentration und die Höhe der K-Austräge in 3 m Tiefe werden dagegen ausschließlich vom Tongehalt der Böden bestimmt. In tonarmen, sickerwasserreichen Sandböden wird Kalium nur in geringem Maße an Tonminerale gebunden und unterliegt daher der Auswaschung. Unter der erodierter Braunerde (D3 LG 5) wurden in 3 m Tiefe 28 kg/ha/a , unter dem stark tonhaltigen Lößboden (L63 LG 9) weniger als 1 kg/ha/a ausgetragen.

Die Verwendung Mg-haltiger Kalke in den 80er Jahren führte auf allen Standorten, bei einem bis heute leicht steigendem Trend, zu einer sehr guten Mg-Versorgung der Böden. In 3 m Tiefe liefern Lößböden und mergelhaltige Böden, trotz geringer Sickerwassermengen, mit jährlich 23 kg/ha bis 31 kg/ha deutlich höhere Mg-Frachten als Sandböden mit 8 kg/ha . Ursache dafür ist auch hier nicht vordergründig der Einfluss der Bewirtschaftung, sondern die Freisetzung von löslichem Magnesium bei der Verwitterung von tonig-mergeligen Ausgangssubstraten.

Infolge hoher industriebedingter S-Einträge bildete sich vor allem in Böden mit geringen Sickerwassermengen über Jahrzehnte ein erheblicher S-Pool. Drei Faktoren sorgten seit Anfang der 90er Jahre für ein enormes Absinken der Schwefelgehalte in und unterhalb der Wurzelzone: a) der erhebliche Rückgang der S-Deposition, b) die parallel dazu erfolgte Umstellung auf schwefelarme N-Dünger und c) der vermehrte Anbau schwefelzehrender Kulturen. Atmosphärischer Schwefeleintrag und S-Nettomineralisation allein decken den S-Bedarf der Pflanzen nicht mehr ab. Unabhängig davon wurden im Mittel der Jahre 1999 bis 2013 in 3 m Tiefe deutlich höhere S-Mengen ausgewaschen als durch Düngung und Deposition zugeführt. So betrug die durchschnittliche jährliche S-Auswaschung bei den Sandböden 82 kg/ha und bei den Lößböden 257 kg/ha . Bei abnehmendem Trend näherte sich die S-Auswaschung auf den tiefergründigen Lößböden jedoch bis zum Jahr 2015 dem Niveau der leichten Böden an.

Literatur

- Grunert M. (2015) Aktueller Rat zum Pflanzenschutz und Pflanzenbau vom 04.03.2015, im Internet: <http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/35489.htm>.
- Haferkorn U. (2013) N-Auswaschung unter Ackernutzung auf Böden der sächsischen Lößgefilde. In: Knoblauch, S., Albert, E., Haferkorn, U., Heyn, J., Herold, L., Lippold, T., Lehmann, E., Lorenz, J., Zachow, B., Meißner, R., Seeger, J., Schrödter, M., Strauß, C. (2013): Kooperation Lysimeter - Wirkung landwirtschaftlicher Nutzung auf die N-Auswaschung anhand langjähriger Lysimetermessungen in Mittel- und Nordostdeutschland und Schlussfolgerungen für die Minimierung der N-Befrachtung der Gewässer. Broschüre, BfUL, Brandis, 2013, S. 117-142, im Internet: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/20214>.
- LfULG (o.J.) Grenzwerte [mg/100g Boden] der Versorgungsstufen für Makronährstoffe und pH-Stufen des Bodens. Angaben für die Nutzungsart Ackerland, im Internet: http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/pflanzliche_Erzeugung/Broschue-re_Ackerland_Grenzwerte.pdf.
- Schwede H. (2010) Landwirtschaftszählung 2010 Teil 3 - Viehbestände. Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, Statistik in Sachsen 2/2012, im Internet: https://www.statistik.sachsen.de/download/300_Voe-Zeitschrift/2012_02_18bis22_Schwede.pdf.

