

# Nährstoffauswaschung (P, K, Mg, Ca, S) aus einem Löß- und Keuperverwitterungsboden im Thüringer Becken unter Ackernutzung

Steffi Knoblauch<sup>1\*</sup>

## Zusammenfassung

Anhand langjähriger Lysimetermessreihen wird über die Auswaschung von Phosphor, Kalium, Magnesium, Schwefel und Calcium aus zwei für das Thüringer Becken typischen Böden mit ackerbaulicher Nutzung berichtet. Die P-Konzentration des Sickerwassers lag auf dem Lößboden deutlich unter dem für Oberflächengewässer angegebenen Grenzwert. Auf der Para-Rendzina aus unterem Keuper zeigte sich vereinzelt nach Ausbringung von Gülle eine erhöhte P-Konzentration des Sickerwassers, die sich langfristig aber in eine niedrige P-Auswaschung einfügte. Die K-Konzentration des Sickerwassers wie auch der K-Austrag fiel auf beiden stark tonhaltigen Böden sehr niedrig aus. Eine durch Nutzungsänderung verursachte mehrfach höhere Sickerwasserspende führte auf dem Lößboden zu einem Anstieg der Mg-, Ca- und  $\text{SO}_4$ -Konzentrationen des Sickerwassers. Die Mg- und  $\text{SO}_4$ -Konzentrationen des Sickerwassers sind geogen bedingt auf beiden Böden hoch, wie auch die Ca-Konzentration des Sickerwassers des Lößbodens. Ein Einfluss der Düngung auf die Nährstoffauswaschung war kaum zu erkennen.

## Summary

Using long-term lysimeter data the leaching of phosphorus, potassium, magnesium, sulphur and calcium from two agricultural used soils of the Thuringian Basin in Central Germany is described. The P-concentration of the seepage water of a haplic phaeozem originated from loess was lower than the limit value which is specified for surface water. Following the application of slurry the P-concentration of the seepage water of a stony calcareous regosol increased occasionally. But in the long term average the P-leaching risk of this soil was low. The K-concentration of the seepage water and the K leaching rate from both soils were low due to their high clay contents. Following a change in the agricultural use the amount of seepage water from the loess soil rose by several times and also the Mg-, Ca- and  $\text{SO}_4$ -concentration of the seepage water. The Mg- and  $\text{SO}_4$ -concentration of the seepage water of both soils were high due to geogenic influences. The impact of fertilization was hardly noticeable.

## Einleitung

Die Auswaschung von Nährstoffen aus dem durchwurzelbaren Bodenraum bedeutet einerseits einen Verlust für die pflanzliche Ernährung und kann andererseits zu einer Beeinträchtigung angrenzender Ökosysteme, wie die der Gewässer führen. Mit Hilfe von Lysimetern können Stoffe im System Pflanze, Wasser und Boden bilanziert werden. Vor allem langjährige Messreihen können Auskunft geben über den Einfluss von Boden, Klima, Jahreswitterung und Bewirtschaftung auf die Nährstoffauswaschung. Auf dieser Grundlage lassen sich Schlussfolgerungen ableiten für die Düngung und den Gewässerschutz.

Im folgenden Beitrag wird über die Nährstoffauswaschung aus einem Braunerde-Tschernosem aus Löß und einer Para-Rendzina aus unterem Keuper des Thüringer Beckens berichtet auf der Grundlage einer 31- und 10-jährigen Lysimeter-Messreihe.

## Material und Methoden

Die Versuchsböden befinden sich am südöstlichen Rand des Thüringer Beckens im mitteldeutschen Trockengebiet. Die vieljährige Jahresniederschlagssumme beträgt 544 mm, die vieljährige Jahresdurchschnittstemperatur 8,3 °C (1960 bis 1991).

Der tiefgründige Braunerde-Tschernosem aus Löß ist durch einen etwa 43 cm mächtigen Ap-/Ah-Horizont gekennzeichnet und bis in 65 cm Tiefe entkalkt (*Tabelle 1*). Die Bodenart ist durchgängig schluffiger Lehm. Ab etwa 70 cm Tiefe deutet sich ein Fazieswechsel der Lößablagerungen an, erkennbar an der Einlagerung von Gesteinsbruchstücken des Keupers. Die über den gesamten Tiefenverlauf gleichförmige Korngrößenverteilung deutet auf vorwiegenden Matrixwasserfluss.

Die Para-Rendzina ist aus carbonathaltigen, lockeren und festen Mergelgesteinen hervorgegangen. Der Ah-Horizont reicht bis in 30 cm Tiefe und ist der Bodenart stark toniger Lehm zuzuordnen (*Tabelle 1*). Darunter folgen lehmige, schluffige und tonige Verwitterungsprodukte des unteren Keupers mit im Tiefenverlauf stark wechselnden Korngrößenanteilen, Skelett- und Carbonatgehalten. Form und Lage der Horizontgrenzen sind aufgrund kryoturbater Umlagerungen häufig geneigt, zungen- und taschenförmig und begründen die Annahme der Neigung zu präferentiellem Fluss. Der teilweise hohe  $\text{S}_t$ -Gehalt der Bodenhorizonte spiegelt die Ablagerung von Gips in den abflusslosen Senken während der Zeit des Keupers wider (Fiedler & Hunger 1970).

Die Werte der P-Bindungskapazität an sorptionsaktiven Fe- und Al-Oxiden (PSC) der Böden kann als mittel bis

<sup>1</sup> Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Lysimeterstation Buttelstedt, D-99439 BUTTELSTEDT

\* Ansprechpartner: Dr. Steffi Knoblauch, s.knoblauch@tllmail.de



**Tabelle 1: Ausgewählte physikalische und –chemische Kennwerte der Böden.**

Horizont	Tiefe	Bodenart	Tongehalt	Skelett	kf	KAK <sub>eff</sub>	C <sub>org</sub>	N <sub>t</sub>	S <sub>t</sub>	pH Ca Cl <sub>2</sub>	Ca CO <sub>3</sub>	PSC	P <sub>ox</sub>
	cm		%	Gew.-%	cm d <sup>-1</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	%	%	%		%	mmol kg <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>
Braunerde-Tschernosem aus Löß													
Ap	0..25	Lu	26,6	0,08	68	20,2	1,7	0,14	0,05	6,6	0,3	42,3	9,44
Ah	..43				32	20,6	1,2	0,1		6,5	0,3	43,0	8,47
Ah-Bv	..65	Lu	29,4	0,08	18	20,0	0,8	0,06	0,04	6,7	0,2	37,0	4,13
Ckc1	..110	Lu	20,3	4,4	31	12,4	0,3	0,02	0,03	7,4	17,8	22,6	4,44
Ckc2	..160	Lu	19,2	8	12	13,0	0,2	0,02		7,6	15,3	17,5	4,45
Ckc3	..195	Lu	23,2	2,5	8	14,7	0,4	0,02		7,7	12,7	19,9	4,75
Ap/Ah	0..30	Lt3	38,8	34,0	6	21,6	1,56	0,16	0,30	7,5	7,2	37,4	13,4
Para-Rendzina aus unterem Keuper													
II e/Cv	..65	Ls2	24,6	16,4	12	14,1	0,3	0,03	0,13	7,6	16,8	31,1	8,7
III e/Cv	..72	Lt2	27,3	11,1	1	18,8	0,36	0,04	0,09	7,6	1,1	26,1	7,5
IV e/Cv	..90	Lu	20,6	15,3	3	11,6	0,03	0,02	0,08	7,7	13,0	20,9	7,5
V e/Cv	..100	Ls2	20,3	15,3	10	13,1	0,22	0,03	0,06	7,6	1,1		
VI e/Cv	..110	Ls3	22,1	17,5	7	14,4	0,19	0,03	0,08	7,6	5,4		
VII Cv	..140	Ls2	24,5	15,9	0,4	15,1	0,23	0,03	0,11	7,5	<0,5		
VIII Cv	..150	Lu	24,8	18,1	1	16,9	0,27	0,03	0,12	7,4	<0,5		
IX Cv	..160	Tu3	35,0	30,4	6	21,1	0,17	0,04	0,06	7,5	<0,5		
X Cv	..200	Lt2	32,5	32,2		17,4	0,07	0,03	0,19	7,5	<0,5		

hoch bezeichnet werden (Tabelle 1). Sie ordnen sich in den oberen Bereich der von Piehl & Werner (1997) für sandige und lehmige Böden aus Kalkstein, Ton und Löß ermittelten Werte von 30 bis 43 mmol kg<sup>-1</sup> ein. Der von Leinweber et al. (2001) für sandige Böden ermittelte PSC-Wert von 18 mmol kg<sup>-1</sup> liegt demgegenüber niedriger.

Für die Erfassung des Sickerwassers dienen die Feldlysimeter Butteldstedt. Sie sind monolithisch befüllt, weisen eine Oberfläche von 2 m<sup>2</sup> und eine Tiefe von 2,5 m (Braunerde-Tschernosem) bzw. 2,0 m (Para-Rendzina) auf. Die Verdunstung wird mit Hilfe von Brückenwaagen und Wägezellen mit einer Genauigkeit von 100 g bzw. 0,05 mm gemessen. Für die Vermeidung von Oaseneffekten befinden sich die Lysimeter inmitten eines ebenso wie die Lysimeter bewachsenen 30ha großen Feldschlages.

Die Entnahme des Sickerwassers erfolgt tensionsgesteuert mit Hilfe von keramischen Saugkerzen (Braunerde-Tschernosem) oder gravitativ über eine körnungsabgestufte Filterstrecke aus Quarzmehl und -sand (Para-Rendzina). Eine Testung des oxidkeramischen Werkstoff Thermomodur im Labor der TLL ergab, dass sich im Fall von TDP (total dissolved phosphorus) nach Durchfluss von 3 Liter ein Konzentrationsgleichgewicht einstellt und deshalb Ad- und Desorptionseffekte für die im praktischen Probenahmebetrieb realisierten vierzehntägigen Mischproben vernachlässigbar sind. Gegenüber den Anionen Nitrat, Nitrit, Chlorid und Sulfat wurden keine Sorptionseffekte festgestellt. Dem DWA-Merkblatt M 905 zufolge ist Oxidkeramik auch geeignet für die Bestimmung von Kalium, Magnesium, Calcium und Hydrogencarbonat.

Das Sickerwasser wird täglich bis mehrmals wöchentlich entnommen. Die Analyse erfolgt in der Regel an wöchentlichen Durchschnittsproben, teilweise auch an ereignisbezogenen Einzelproben. Das Analysespektrum umfasst wöchentlich N-Verbindungen, vierzehntägig S- und P-Verbindungen, monatlich alle weiteren Kationen,

**Tabelle 2: Applizierte Nährstoffmengen.**

Zeitraum	Düngung	P	K	Mg	Ca	S	N
kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>							
Braunerde-Tschernosem aus Löß							
1984...1994	min.-org.	47	150	14	57	34	205
1995...2004	min.	24	70	1	14	15	151
2005...2014	min. (Var.1) <sup>1</sup>	38	120	14	68	14	140
1984...2014		37	114	10	46	22	167
Para-Rendzina aus unterem Keuper							
2005...2014	min. (Var.1)	26	83	19	70	22	146
	min.-org. (Var. 4)	33	129	24	56	27	152

<sup>1</sup> die mineralisch-organische Variante wird in dieser Publikation nicht dargestellt

**Tabelle 3: Nährstoffdeposition von 1996 bis 2014 (bulk-Sammler).**

	P	K	Mg	Ca	SO <sub>4</sub> -S	NO <sub>3</sub> -N + NH <sub>4</sub> -N
kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>						
Mittelwert	0,3	1,5	3,9	14,6	8,1	10,0
Standardabw.	0,2	0,8	2,9	10,0	5,3	1,4

Anionen, Gesamtgehalte, pH, Leitfähigkeit und mehrmals jährlich DOC, TOC, Schwermetalle und Mikronährstoffe. Die Bewirtschaftung der mit dem Lößboden befüllten Lysimeter teilt sich in drei Perioden. Von 1984 bis 1994 erfolgte eine ackerbauliche Nutzung mit mineralisch-organischer Düngung nach dem pflanzlichen Nährstoffbedarf. In der Fruchtfolge standen Zuckerrübe, Winterweizen, Kartoffel, Sommergerste, Welsches Weidelgras und Silomais. Jeweils im Herbst vor Anbau von Kartoffeln und Zuckerrübe wurden 40 t/ha Stallmist verabreicht und zu Welschem Weidelgras in drei Gaben 50 bis 80 m<sup>3</sup>/ha Gülle. Das Stroh wurde ab-

Tabelle 4: Nährstoffgehalte der Böden.

Tiefe	Boden	P-CAL	K-CAL	Mg-CaCl <sub>2</sub>	Tiefe	S <sub>min</sub>
cm		mg 100g <sup>-1</sup>	mg 100g <sup>-1</sup>	mg 100g <sup>-1</sup>	cm	kg ha <sup>-1</sup>
0...20	Braunerde-Tschernosem (Lö) <sup>1</sup>	10,3 D	19,8 D	20,8 E		
0...20	Para-Rendzina (k), Var. 1 <sup>2</sup>	7,7 D	35,0 D	14,2 D	0...30 30...60	19,0 35,8
0...20	Para-Rendzina (k), Var. 2 <sup>2</sup>	7,8 D	35,7 D	14,1 D	0...30 30...60	19,6 30,2

<sup>1</sup> Lysimeterboden, Mittelwert der Jahre 2006, 2009, 2012, <sup>2</sup> Boden der begleitenden Feldversuche, Mittelwert der Jahre 2006, 2009, 2012, 2015 (P, K, Mg) sowie der Jahre 2005...2014 (S<sub>min</sub>, Frühjahr)

Tabelle 5: Nährstoffsalden.

Zeitraum	Düngung	P	K	Mg	Ca	S	N
		kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>					
Braunerde-Tschernosem aus Löß							
1984...1994	min.-org.	+22	-45	-8	+16	+17	+25
1995...2004	min.	+4	-54	-19	-47	-12	+6
2005...2014	min. (Var.1)	+6	+28	-7	+39	0	-44
1984...2014		+12	-24	-11	+3	+3	-3
Para-Rendzina aus unterem Keuper							
2005...2014	min. (Var.1)	+4	0	+6	+52	+11	+4
	min.-org. (Var. 4)	+9	+40	+10	+36	+15	-5

gefahren. Als mineralische Dünger kamen Superphosphat, Kali, Harnstoff und Kalkammonsalpeter zum Einsatz. In der darauffolgenden Periode von 1995 bis 2004 gelangte Feldgemüse zum Anbau mit den Kulturen Buschbohne, Gurke, Kopfkohl, Zwiebel, Blumenkohl und Pfefferminze und in einem Jahr Winterraps. Die Düngung erfolgte mineralisch mit Mehrnährstoffdüngern (N/P/K/S) und 60-er Kali. Die Nebenprodukte blieben meist auf dem Feld. Im Jahr 2005 wird die Lysimeteranlage um einen zweiten Boden, eine Para-Rendzina aus unterem Keuper erweitert. Ab diesem Jahr beginnt für beide Böden eine ackerbauliche Nutzung mit der Fruchtfolge Winterraps, Winterweizen, Silomais/Sorghum, Sommergerste. Es werden eine mineralische und eine mineralisch-organische Düngungsvariante geprüft. Die Höhe der N-Düngung richtet sich nach dem N-Düngungsempfehlungsprogramm der TLL. Bei der mineralisch-organischen Variante wird ein Teil der empfohlenen N-Düngermenge als Rindergülle ausgebracht, im Mittel der Fruchtfolge 50 kg N/ha. Das Stroh bleibt auf dem Feld. Die Grunddüngung erfolgt teils zur wachsenden Kultur in Form von Mehrnährstoffdüngern, teils nach der Ernte mit Thomaskali, Triplesuperphosphat, 60-er Kali, Kornkali und Patentkali. Als mineralischer N-Dünger kommt Kalkammonsalpeter zum Einsatz. Die im Mittel der Jahre zugeführten Nährstoffmengen enthält Tabelle 2.

Die mit Hilfe eines bulk-Sammlers ermittelte Deposition stellt Tabelle 3 dar. Es handelt sich dabei um den Anteil der feuchten und sedimentierenden trockenen Deposition.

In unmittelbarer Nähe der Entnahmestellen der Lysimeter wurden im Jahr 2005 Parzellen-Feldversuche angelegt mit der Prüfung der gleichen Varianten wie im Lysimeterversuch für die Entnahme von Bodenproben und zwei weiterer Varianten mit einer höheren N-Düngermenge.

## Ergebnisse und Diskussion

### Bodengehalte und Nährstoffsalden

Die pflanzenverfügbaren Nährelementgehalte der Ackerkrume (0...20 cm) beider Böden weisen auf eine ausreichende Versorgung der Pflanzen für ein optimales Wachstum (Tabelle 4). Sie liegen in Gehaltsklasse D und E (nur Mg) und sind nach VDLUFA als hoch und sehr hoch zu bezeichnen. Der Gehalt an leichtlöslichen Nährelementen ist damit etwas höher als für einen wirtschaftlichen Ertrag erforderlich.

Der im Frühjahr ermittelte pflanzenverfügbare S<sub>min</sub>-Gehalt war nur in vier von zehn Jahren zu niedrig für die pflanzliche Ernährung. Dementsprechend gering fiel die mineralische S-Düngung in den letzten zehn Jahren mit 14 kg S/ha zum Lößboden und 22 kg/ha zur Para-Rendzina aus (Tabelle 2).

Die Nährstoffabfuhr der letzten zehn Jahre liegt in etwa in der Größenordnung der Düngung und die P- und Mg-Salden sind leicht positiv bis leicht negativ (Tabelle 5). Der positive K-Saldo des Lößbodens gleicht eine K-Aushagerung in den zwanzig Jahren zuvor aus. Der positive K-Saldo in der mineralisch-organischen Variante auf der Para-Rendzina ist die Folge des zusätzlich mit der Gülle verabreichten Kaliums. Die positiven Ca-Salden kommen durch den Einsatz kalkhaltiger mineralischer Dünger zustande. Beim S ist in den letzten zehn Jahren auf dem Lößboden ein ausgeglichener Saldo zu verzeichnen und auf der Para-Rendzina ein leichter Überhang.

Der 31-jährige Nährstoff-Saldo auf dem Lößboden bringt eine leichte Anreicherung bei Phosphor und Abreicherung bei Kalium und Magnesium zum Ausdruck. Die Ca-, S- und N-Salden sind in etwa ausgeglichen.

### Sickerwassermenge

Auf dem Braunerde-Tschernosem aus Löß kommt es unter dem Einfluss ackerbaulicher Nutzung im Mittel der Jahre 1984 bis 1994 zu einer Sickerwassermenge von 12 mm je Jahr. In vier von elf Jahren bleibt eine Sickerwasserbildung aus (Abbildung 1).

In den darauffolgenden zehn Jahren mit Anbau von Feldgemüse steigt die Sickerwassermenge auf durchschnittlich 79 mm je Jahr an. In der dritten Anbauperiode von 2005 bis 2014 führt Ackernutzung erneut zu einer sehr niedrigen Sickerwassermenge von 17 mm je Jahr und kommt es in vier von zehn Jahren zu keiner Auffüllung des Bodenwasservorrats. Die aus der Sickerwassermenge und der Feldkapazität des effektiven Wurzelraums berechnete Austauschrate des

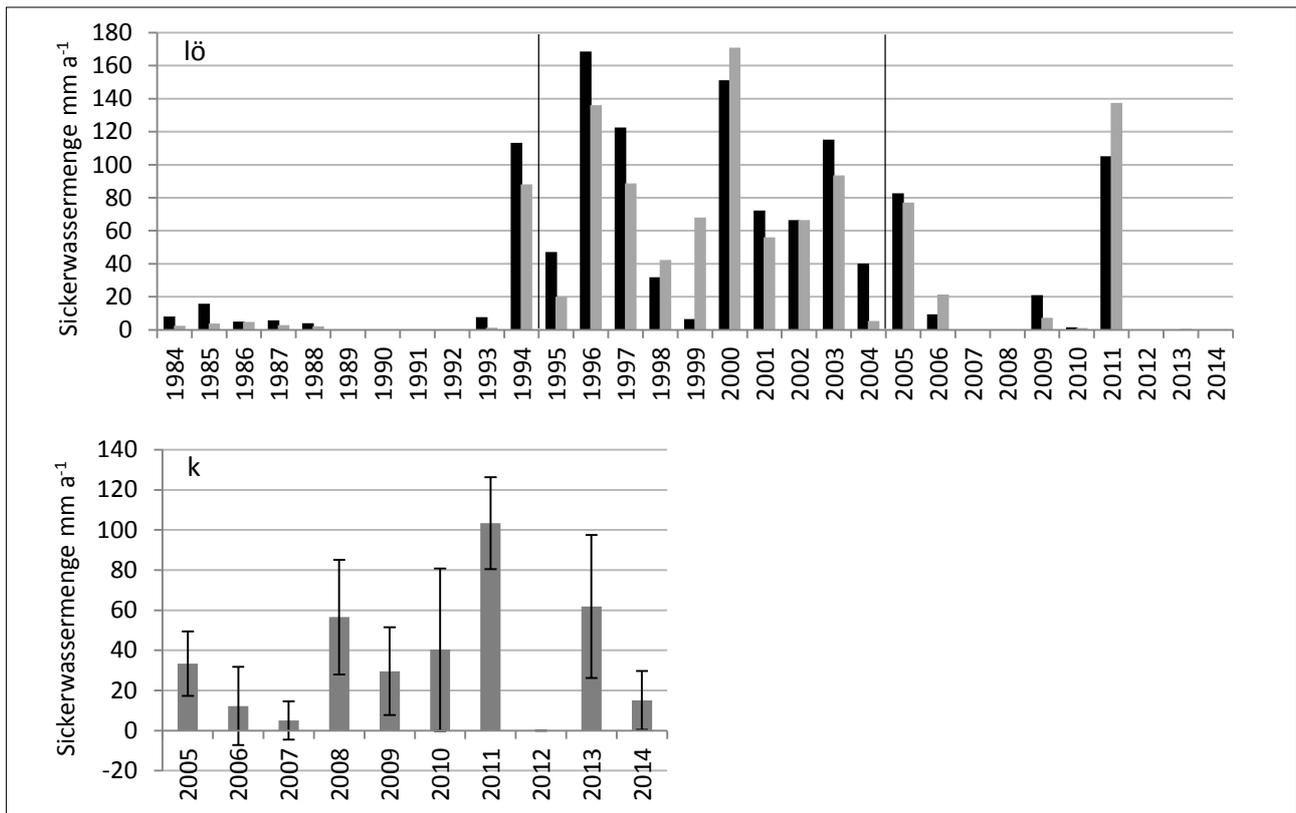


Abbildung 1: Sickerwassermenge, Jahreswerte im zeitlichen Verlauf, Braunerde-Tschernosem aus Löß (lö, 2 Wiederholungen), Para-Rendzina aus unterem Keuper (Mittelwert und Standardabweichung k1 bis k7).

Bodenwassers belüftet sich in den drei Anbauperioden auf 2, 16 und 3 %.

Die Para-Rendzina bildet demgegenüber jedes Jahr Sickerwasser (Abbildung 1). Im Mittel der Jahre sind es 36 mm je Jahr mit einer Spannweite von 17 bis 60 mm je Jahr zwischen den Lysimetern. Bei einer effektiven Durchwurzelungstiefe von 110 cm und einer Feldkapazität von etwa 30 Vol. % errechnet sich daraus eine Austauschrate des Bodenwassers von 7 bis 26 %. Das heißt, es kommt auch auf diesem Boden nicht zu einem vollständigen Austausch der im Bodenwasser gelösten Stoffe während eines Winterhalbjahres.

### Nährstoffkonzentration des Sickerwassers und Stoffaustrag des Braunerde-Tschernosem aus Löß

Die P<sub>i</sub>-Konzentration des Sickerwassers liegt in der Anbauperiode mit Ackerkulturen von 1984 bis 1994 bei sehr niedriger Sickerwassermenge etwas über dem LAWA-Grenzwert für Oberflächengewässer, 0,15 mg P<sub>i</sub>/l (Tabelle 6). Mehrfach höhere Sickerwassermengen in der Anbauperiode mit Feldgemüse von 1995 bis 2000 bringen eine deutliche Reduzierung der P<sub>i</sub>-Konzentration mit sich. Ab 2001 erfolgt ein Wechsel der P-Analytik von P<sub>i</sub> (ICP-AES) auf TP (Mikrowellendruckaufschluss mit K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> und ICP-OES). Der Vergleich der TP-Konzentration unter Feldgemüse von 2001 bis 2005 und Ackerkulturen von 2006 bis 2014 zeigt erneut eine Verdünnung durch höhere Sickerwassermenge.

Von den ersten vier Jahren abgesehen wird der LAWA-Grenzwert für Oberflächengewässer deutlich unterschritten. Ein hoher pflanzenverfügbare P-Gehalt in der Ackerkrume (GK D) hat keine Auswirkung auf die P-Konzentration des Sickerwassers in 2,3 m Tiefe und bedeutet keine Gefahr für die Gewässer. Mit zunehmender Sickerwassermenge geht eine Verdünnung der P-Konzentration einher und der P-Austrag steigt nur geringfügig an.

Die P-Sättigungskapazität an Fe- und Al-Oxiden und die in hoher Menge im Lößboden vorhandenen austauschbaren Ca-Ionen führen offenbar zu einer starken Bindung des Phosphat-Ions an den Boden.

Die K-Konzentration des Sickerwassers schwankte in den drei Zeitabschnitten zwischen 0,36 und 0,54 mg/l (Tabelle 7). Eine 6-fach höhere Sickerwasserspende unter Feldgemüse führte zu einem Rückgang der K-Konzentration. Der K-Austrag war dennoch etwa 4-fach höher als in den beiden Zeitabschnitten mit Ackerkulturen. B- und C-Horizonte von Lößböden werden in Scheffer & Schachtschabel (2010) durch bereits im Löß vorhandene hochgeladene Smectite charakterisiert, die spezifische Bindungsplätze für Kalium bieten und die sehr geringe K-Konzentration des Sickerwassers erklären. Während das austauschbare K sehr schnell in die Bodenlösung übergeht (Scheffer & Schachtschabel 2010), was im Lößboden auch begünstigt ist durch den hohen Gehalt an austauschbarem Ca, wird das im Zwischenraum spezifisch gebundene K über Diffusion nur sehr langsam nachgeliefert, was die bei höherer Sickerwassermenge geringere K-Konzentration des Sickerwassers erklärt. Der K-Austrag ist sehr gering. Pflanzenverfügbare K-Gehalte in

Tabelle 6: P-Konzentration des Sickerwassers und P-Austrag.

Zeitraum	Nutzung	Sickerwassermenge mm a <sup>-1</sup>	P-Konzentration des Sickerwassers <sup>1</sup> mg l <sup>-1</sup>				P-Austrag kg ha <sup>-1</sup>	
			P <sub>t</sub>	TP	o-PO <sub>4</sub> -P	MRDP	P <sub>t</sub>	TP
1984...1994	Ackerkulturen	12	0,18		0,026		0,022	
1995...2000	Feldgemüse	88	0,064		0,010		0,056	
2001...2005	Feldgemüse	68		0,013		0,006		0,009
2006...2014	Ackerkulturen	17		0,048		0,012		0,008
1984...2014		37						0,022 (P <sub>t</sub> bzw. TP)

Tabelle 7: K-Konzentration des Sickerwassers und K-Austrag.

Zeitraum	Nutzung	Sickerwassermenge mm a <sup>-1</sup>	K-Konzentration des Sickerwassers mg l <sup>-1</sup>	K-Austrag kg ha <sup>-1</sup>
1984...1994	Ackerkulturen	12,0	0,54	0,06
1995...2005	Feldgemüse	78,6	0,31	0,24
2006...2014	Ackerkulturen	16,9	0,36	0,06
1984...2014		37,1	0,34	0,13

Tabelle 8: Mg-, Ca- und SO<sub>4</sub>-Konzentration des Sickerwassers und Mg-, Ca- und S-Austrag.

Zeitraum	Nutzung	Sickerwassermenge mm a <sup>-1</sup>	Nährstoffkonzentration mg l <sup>-1</sup>			Nährstoffaustrag mg l <sup>-1</sup>		
			Mg	S	Ca	Mg	S	Ca
1984...1994	Ackerkulturen	12,0	59,4	435	247	7,2	17	29,8
1995...2005	Feldgemüse	78,6	61,1	446	256	48,0	117	201,3
2006...2014	Ackerkulturen	16,9	53,8	248	224	9,1	14	38,0
1984...2014		37,1	60	419	251	22,2	52	93,0

Gehaltsklasse D ziehen keine erhöhte K-Verlagerung aus dem Wurzelraum nach sich.

Im Unterschied zu P und K ist das Sickerwasser reich an Mg-, Ca- und SO<sub>4</sub>-Ionen (Tabelle 8).

Ab dem Jahr 1994 mit einer überdurchschnittlich hohen Sickerwasserspende unter Ackernutzung steigt die Konzentration dieser Nährstoffe um das Mehrfache. Dieser Trend setzt sich in der sickerwasserergiebigen Anbauperiode mit Feldgemüse weiter fort (Abbildung 2). Etwa ab dem Jahr 2003 wird das zu Beginn der Messungen niedrigere Niveau der Konzentrationen wieder erreicht.

Während der sickerwassergebundene Verlust unter Ackernutzung mit durchschnittlich 8 kg Mg/ ha, 16 kg S/ ha und 34 kg Ca/ ha moderat ausfällt, kommt es durch eine Nutzungsänderung mit der Folge einer mehrfach höheren Sickerwasserspende zu einem beträchtlichen Verlust dieser Nährstoffe (Tabelle 8).

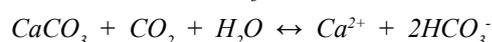
In Abbildung 2 offenbart sich ein enger Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Verlauf der Mg-, Ca- und SO<sub>4</sub>-Konzentration. Jeweils von Beginn eines Jahres an vollzieht sich ein Anstieg der Konzentration dieser Ionen. Das molare Verhältnis des Anstiegs deutet daraufhin, dass es zu einer Auflösung von Mg- und CaSO<sub>4</sub> gekommen ist nach folgender Gleichung:



Sulfate der zweiwertigen Kationen mit kleinerem Ionenradius, wie z.B. Mg werden von Alaily (1996) als leicht wasserlöslich bezeichnet. Die ab 1994 und in den Folgejahren in hohen Mengen in Lösung gegangenen Ionen stammen

mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der Ansammlung atmosphärischer Salze in vielen Jahren zuvor. Möller (2003) nennt für belastete Gebiete in Mitteleuropa vor 1990 atmosphärische Einträge von 60 bis 130 kg S/ ha und 50 bis 60 kg Ca/ ha. Als Hintergrundwerte gibt er für diese Elemente 12 bis 15 kg S/ha und 6 kg Ca/ ha an. Außerdem sind die im Thüringer Becken abgelagerten Lössen beeinflusst durch die während ihrer Entstehung vom Wind abgetragenen Verwitterungsprodukte des Gipskeupers.

Für die verstärkte Lösung von Ca und Mg kommt noch ein weiterer Prozess infrage: die durch Zufuhr von CO<sub>2</sub> angetriebene Auflösung von pedogenem CaCO<sub>3</sub> und auch Dolomit, dessen Bildung bei magnesiumreicher Bodenlösung möglich ist (Alaily 1996). Da nach Auffassung von Furrer et al. (1999) neben dem CO<sub>2</sub>-Partialdruck die Versickerungsgeschwindigkeit noch wichtiger ist, kann es durch die mehrfach höhere Sickerwassermenge unter Feldgemüse zu einer dementsprechend höheren Auflösung von pedogenem Calcit und Dolomit gekommen sein. Bei einem pH von 7,65 und einem angenommenen P<sub>CO<sub>2</sub></sub> von 0,003 bar geben Furrer et al. (1999) eine Lösung von 1,05 mmol Ca<sup>2+</sup> l<sup>-1</sup> und 2,1 mmol HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> l<sup>-1</sup> an. Die Gleichung dafür lautet:



Der Verlauf der HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentration zeigt im Zeitraum vom 1.11. 1994 bis 31.10.1998 einen ausgeprägten Peak von bis zu 8 mmol HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> im Jahr 1996. Gegenläufig dazu verhalten sich die NO<sub>3</sub>-Konzentrationen des Sickerwassers, die in den Jahren 1995 und 1996 unter 1 mmol l<sup>-1</sup> sinken. Die Sickerwasserspenden waren in den Jahren 1995 und

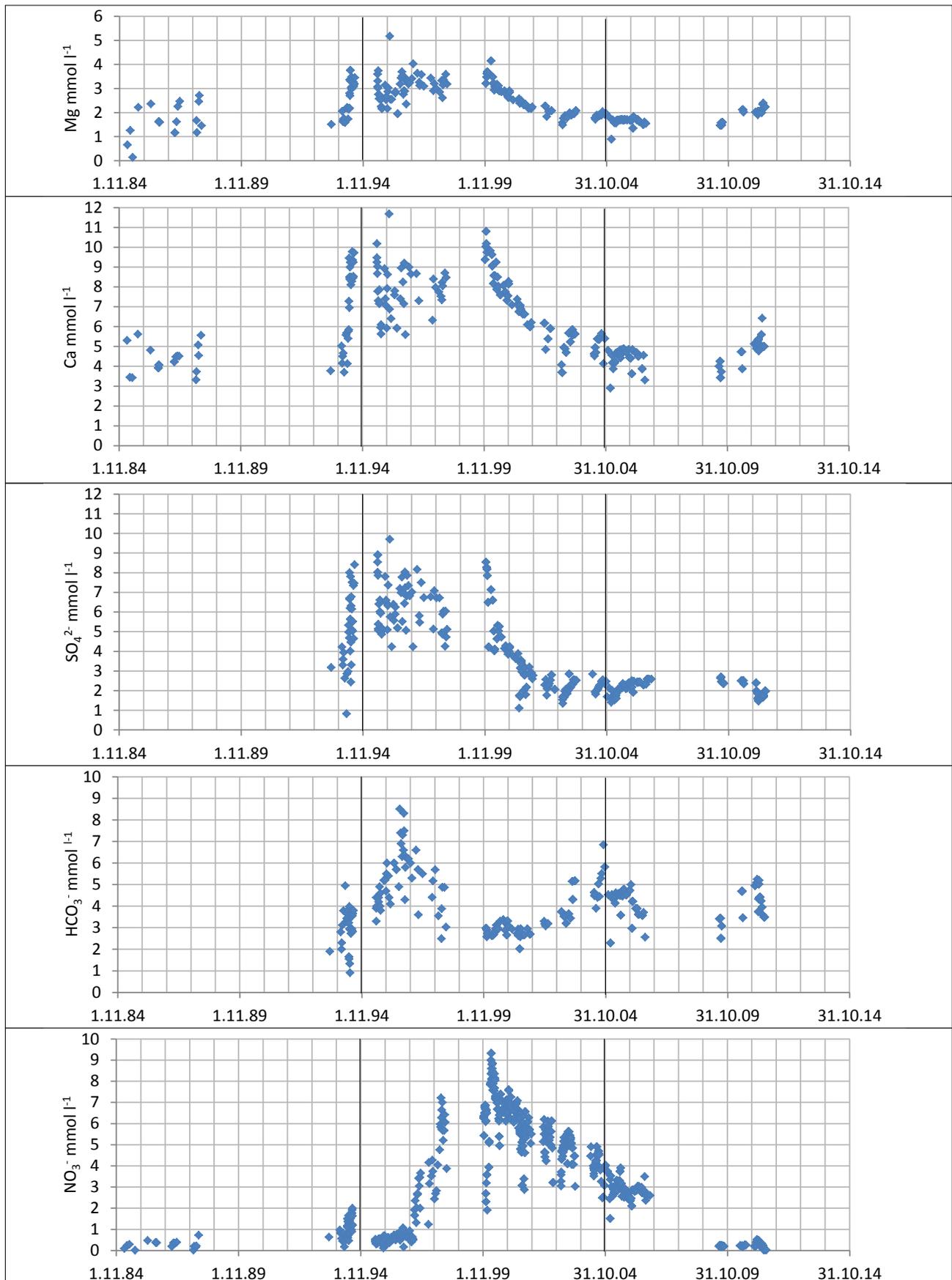
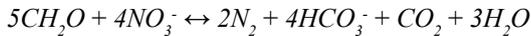


Abbildung 2: Verlauf der Mg-, Ca-, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>- und NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentration des Sickerwassers von 1984 bis 2014 auf einem Braunerde-Tschernosem im Thüringer Becken.

1996 mit 47 und 169 mm sehr hoch und haben im Unterboden anaerobe Verhältnisse begünstigt, so dass vermutlich die chemo-heterotrophe Denitrifikation zeitweilig in Gang gesetzt worden ist und ein Teil des  $\text{HCO}_3^-$ -Ions auch aus diesem Prozess stammt:



Da in den Jahren 2003, 2004 und 2005 der molare Anstieg von Ca- und Mg-Ionen nicht allein mit dem molaren Anstieg der  $\text{SO}_4^-$ -Ionen erklärt werden kann, kann dennoch davon ausgegangen werden, dass der Anstieg der Ca- und Mg-Konzentration des Sickerwassers bei hohen Sickerwasserspenden sowohl von der Auflösung von Sulfat als auch von pedogenem Calcit und Dolomit herrührt.

### Nährstoffkonzentration des Sickerwassers und Stoffaustrag der Para-Rendzina aus unterem Keuper

Die TP-Konzentration des Sickerwassers beträgt 0,078 mg/l bei mineralischer Düngung und spiegelt ebenso wie beim Lößboden eine ausreichend hohe P-Bindungskapazität an Al- und Fe-Oxiden sowie an austauschbarem Ca wider (Tabelle 9).

Etwa 84 % des Gesamt-P ist leicht löslicher, molybdatreaktiver P. Bei mineralisch-organischer Düngung fällt die TP-Konzentration höher aus (Tabelle 9). Als Ursache dafür kommt der Einsatz von Gülle infrage, durch den in zwei von acht Anwendungsfällen wenige Tage nach der Ausbringung die P-Konzentration des Sickerwassers deutlich über den LAWA-Grenzwert, 0,15 mg P/l anstieg. Aufgrund der höheren Skelett- und Tonanteile ist auf diesem Boden die Ausbildung präferentieller Fließbahnen begünstigt, wodurch es zu einem bypass-Fluss von P-Verbindungen der Gülle bis in 2m Tiefe in kurzer Zeit gekommen ist. Der flüssige organische Dünger wurde jeweils zu Winterraps und Silomais während der Vegetationszeit und zur Strohrotte von Braugerste im Spätsommer mit Gabenhöhen von 5 bis 14 kg P/ha appliziert. Diese Form der Düngung entspricht der guten fachlichen Praxis. Die unter dieser Bedingung zeitweilig gemessene erhöhte P-Verlagerung ist vor allem dem P-Verlagerungsrisiko des Bodens geschuldet. Im zehnjährigen Mittel unterscheidet sich die bei mineralisch-organischer Düngung erhöhte P-Konzentration nicht signifikant von der mineralischen Düngungsvariante, was zeigt, dass Einzelereignisse einer P-Verlagerung sich in eine langfristig sehr niedrige Gefahr der P-Verlagerung aus der Wurzelzone einordnen können. Der P-Austrag ist erwartungsgemäß sehr gering.

Die K-Konzentration des Sickerwassers fällt mit 3,2 und 2,8 mg/l in beiden Düngungsvarianten gering aus. Offenbar steht in den Bodenhorizonten mit 18 bis 39 %

Ton ausreichend K-Fixierungskapazität an Dreischichttonmineralen zur Verfügung. Der K-Austrag ist bei beiden Düngungsvarianten sehr niedrig. Der höhere K-Saldo bei mineralisch-organischer Düngung hat keinen Einfluss auf die K-Auswaschung.

Die Mg-Konzentration des Sickerwassers bewegt sich bei den Düngungsvarianten zwischen 24,7 und 22 mg/l. Als Quelle kommen leicht lösliche Mg-Sulfate und dolomitische Gesteine des unteren Keupers infrage. Der Mg-Austrag der Düngungsvarianten beläuft sich auf 10 und 6,5 kg/ha. Demgegenüber stehen leicht positive Mg-Salden von +6 und +10 kg/ha. Die Düngungsvariante hatte keinen Einfluss auf die Höhe der Mg-Auswaschung.

Die  $\text{SO}_4^-$ -Konzentration des Sickerwassers beträgt 139 mg/l bei mineralischer und 149 mg/l bei mineralisch-organischer Düngung. Sie hängt vor allem mit der Auflösung von im unteren Keuper reichlich vorhandenem Gips über den Prozess der Hydratation zusammen. Dem S-Austrag von 16,8 und 15 kg S/ha der beiden Düngungsvarianten stehen S-Überschuss-Salden von +11 und +15 kg S/ha gegenüber, die in Anbetracht der geogenen S-Nachlieferung nur von untergeordneter Bedeutung für die S-Auswaschung sind. Da der  $\text{S}_{\text{min}}$ -Gehalt des Bodens im Frühjahr nur in vier von zehn Jahren eine geringe S-Düngung erforderte und in 60 bis 90 cm Tiefe ein  $\text{S}_{\text{min}}$ -Wert von 52 kg/ha eine S-Nachlieferung über kapillaren Aufstieg zum Ausdruck bringt, hat der S-Austrag von 16 kg/ha wenig Bedeutung für die pflanzliche Ernährung.

### Schlussfolgerungen

Auf tiefgründigen Lößböden begünstigen die P-Bindungskapazität des Bodens und ein vorwiegend über die Bodenmatrix ablaufender Wasserfluss, dass die P-Konzentration des Sickerwassers deutlich unter dem Grenzwert für die Gewässer liegt. Von einem hohen pflanzenverfügbaren P-Gehalt in der Ackerkrume geht über den Sickerwasserpfad keine Gefahr für die Gewässer aus. Im Unterschied hierzu zeigte sich auf der Para-Rendzina aus unterem Keuper nach einer ordnungsgemäßen Ausbringung von Gülle in zwei von acht Fällen ein Anstieg der P-Konzentration des Sickerwassers auf zeitweilig über 0,15 mg P/l. Grund dafür ist ein durch präferentielle Fließbahnen geprägtes Abflussregime dieses Bodens. Insgesamt ordnen sich diese Einzelereignisse aber in eine langfristig sehr niedrige Gefahr erhöhter P-Konzentrationen im Sickerwasser ein.

Die Auswaschung von P und K ist auf diesen stark tonhaltigen Böden vernachlässigbar bis sehr niedrig und erfordert keinen Ausgleich über die Düngung.

Eine durch Nutzungsänderung hervorgerufene Erhöhung der Sickerwasserspende kann auf einem Lößboden im mitteldeutschen Trockengebiet einen starken Nährstoffverlust an

Tabelle 9: P-, K-, Mg- und  $\text{SO}_4^-$ -Konzentration des Sickerwassers sowie P-, Mg-, Ca- und S-Austrag.

Düngungs- variate	Sickerwasser- menge $\text{mm a}^{-1}$	Nährstoffkonzentration $\text{mg l}^{-1}$						Nährstoffaustrag $\text{kg ha}^{-1}$			
		TP	MRDP	K	Mg	$\text{SO}_4^-$	TP	K	Mg	$\text{SO}_4^-$ -S	
mineralisch	39,4	0,078	0,067	2,08	24,7	139,3	0,029	0,75	10,0	16,8	
mineralisch-organisch	30,9	0,121	0,101	1,82	21,6	148,9	0,037	0,53	6,47	15,0	
GD <sub>Tukey, 5%</sub>		0,049	0,037	1,08	6,06	53,2	0,028	0,38	7,36	9,0	

Mg, Ca, S und auch N nach sich ziehen. Grund dafür ist die sehr niedrige Sickerwasserspende unter Ackerkulturen und die dadurch mögliche Retardation von Nährstoffüberhängen über viele Jahre. Auch wenn der Mg- und Ca-Vorrat eines Lößbodens groß ist, sollte dieses Ergebnis insbesondere im Hinblick auf S und N bei der Gestaltung von Fruchtfolgen beachtet werden.

## Literatur

- Alaily F. (1996) Carbonate, Gips u. lösliche Salze. Handbuch der Bodenkde 1. Erg.Lfg., 1-8.
- Furrer G., Sticher H. (1999) Chemische Verwitterungsprozesse. Handbuch der Bodenkunde 6. Erg. Lfg., 1-16.
- Leinweber P., Meissner R., Eckardt K.U., Seeger J. (1999) Management effects on forms of phosphorus in soil and leaching losses. *European J. of Soil Science* 50, 414-424.
- Möller D. (2003) Deposition von Spurenstoffen. *Luft. De Gruyter*, 220-242.
- Scheffer & Schachtschabel (2010) Lehrbuch der Bodenkunde.
- Pihl U., Werner W. (1997) Erhebungsuntersuchungen zu P-Gehalten, P-Sorptionskapazität und relativer P-Sättigung der Böden in NRW als Prognosekriterien des potentiellen P-Austrages in Drain- und Grundwasser. H.4.