



LAND

OBERÖSTERREICH

# Forschungsprojekt Lysimeter

Berichtszeitraum  
1995 – 2016

10

15

20

25

30

35

40

45

50

Langfristige  
Lysimeteruntersuchungen  
in Oberösterreich



GTW



lebensministerium.at

## IMPRESSUM

Medieninhaber:  
Land Oberösterreich

Herausgeber:  
Amt der Oö. Landesregierung  
Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft  
Abteilung Grund- und Trinkwasserwirtschaft  
Kärntnerstraße 10–12, 4021 Linz,  
E-Mail: [gtw.post@ooe.gv.at](mailto:gtw.post@ooe.gv.at)  
[www.land-oberoesterreich.gv.at](http://www.land-oberoesterreich.gv.at)

Projektleiter:  
DI Karl Seltenhammer, Land OÖ

Autoren:  
Dipl.–Ing. Dr. Max Kuderna  
wpa Beratende Ingenieure GmbH,  
1090 Wien  
Dipl.–Ing. Erwin Murer  
Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt  
Bundesamt für Wasserwirtschaft  
3252 Petzenkirchen

Grafik (Umschlag):  
text.bild.media GmbH, Linz (911003), Land OÖ/Denkmaier

Grafik (Kern):  
wpa Beratende Ingenieure GmbH

1. Auflage, Juli 2017

DVR: 0069264

INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Beschreibung der Lysimeteranlagen .....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Bewirtschaftung .....</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Untersuchungsumfang .....</b>	<b>10</b>
5.1	Zeitraum .....	10
5.2	Laufende Durchführung .....	10
5.3	Sonderprogramme .....	10
<b>6</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>11</b>
6.1	Mineralischer Stickstoff - N <sub>min</sub> .....	11
6.2	Niederschläge und Sickerwasserbildung .....	12
6.3	Nitratkonzentration im Sickerwasser und NitratAuswaschung.....	14
6.3.1	Einfluss des Bodens auf die Nitratverlagerung .....	14
6.3.2	Einfluss der Kultur auf die Nitratverlagerung.....	16
6.3.3	Einfluss des Stickstoffsaldos auf die Nitratverlagerung .....	17
6.3.4	Düngung und Ertrag .....	18
6.3.5	Düngezeitpunkt .....	19
6.4	Phosphat.....	20
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>21</b>

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 3-1: Physikalische und chemische Bodenkennwerte vom Lysimeter tgEB (Bodentyp: pseudovergleyte Lockersediment-Braunerde) .....	6
Tab. 3-2: Physikalische und chemische Bodenkennwerte vom Lysimeter tgPE (Bodentyp: Parabraunerde).....	6
Tab. 3-3: Physikalische und chemische Bodenkennwerte vom Lysimeter sgPU (Bodentyp: kalkhaltige Lockersediment-Braunerde) .....	6
Tab. 6-1: Niederschlags- und Sickerwassersummen.....	12
Tab. 6-2: Ertrag (14% Feuchte), N-Düngung und Obergrenze der Düngung lt. AP Nitrat .....	18
Tab. 6-3: Phosphatgehalt an den drei Lysimeterstandorten .....	20

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1: Errichtung der Lysimeteranlage .....	4
Abb. 3-1: Lage der Lysimeter.....	5
Abb. 3-2: Bodenprofil aus der Österr.Bodenkarte 1:25.000 für tgPE (links) und sgPU (rechts).....	5
Abb. 3-3: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage .....	7
Abb. 3-4: Schematische Darstellung der Kontrollmessstelle (Saugkerzenanlage).....	7
Abb. 3-5: Lysimeteroberfläche tgEB nach der Ernte .....	8
Abb. 3-6: Lysimeteroberfläche tgPE im Frühjahr .....	8
Abb. 3-7: Lysimeteranlage sgPU - Deckel des Messschachts .....	8
Abb. 4-1: Ackerkulturen in der Fruchtfolge bei tgEB .....	9
Abb. 4-2: Ackerkulturen in der Fruchtfolge bei tgPE.....	9
Abb. 4-3: Ackerkulturen in der Fruchtfolge bei sgPU.....	9
Abb. 6-1: Durchschnittlicher Verlauf der Nmin-Gehalte an den drei Standorten .....	11
Abb. 6-2: Durchschnittlicher Verlauf der Nmin-Gehalte je nach Kulturart <sup>1</sup> .....	11
Abb. 6-3: Nmin in Jahren mit Winterweizen oder Wintergerste im Jänner oder Februar (Spannbreite, Interquartilenbereich mit Median).....	12
Abb. 6-4: Nmin in Jahren mit Mais im März oder April (Spannbreite, Interquartilenbereich mit Median).....	12
Abb. 6-5: Monatliche Niederschlagssummen (Mittelwerte).....	12
Abb. 6-6: Durchschnittliche monatliche Sickerwassermenge an den drei Standorten.....	13
Abb. 6-7: Durchschnittliche monatliche Sickerwassermenge je nach angebaute Kultur .....	13
Abb. 6-8: Durchschnittliche Nitratkonzentration im Sickerwasser (gewichtetes Mittel).....	14
Abb. 6-9: Summenlinien der Bromidauswaschung .....	14
Abb. 6-10: Bromidkonzentrationen .....	15
Abb. 6-11: Verlauf der Nitratkonzentration (Monatswerte) im Zeitraum Herbst 2013 bis Herbst 2015 .....	15
Abb. 6-12: Durchschnittlicher Verlauf der Nitratauswaschung (Monatssummen) an den drei Standorten .....	16
Abb. 6-13: Durchschnittlicher Verlauf der Nitratauswaschung (Monatssummen) je nach Kultur <sup>2</sup> . .....	16
Abb. 6-14: Stickstoffsaldo und -auswaschung am Standort tgPE.....	17
Abb. 6-15: Stickstoffsaldo und -auswaschung am Standort tgEB.....	17
Abb. 6-16: Stickstoffsaldo und -auswaschung am Standort sgPU.....	18
Abb. 6-17: Verlauf der monatlichen Nitratauswaschung an den tiefgründigen Standorten in Jahren mit Winterungen .....	19
Abb. 6-18: Phosphatauswaschung, kumulativ .....	20

## 1 Zusammenfassung

Im Zuge der Pilotprojekte zur Grundwassersanierung wurden im Jahr 1995 Feldlysimeteranlagen errichtet. Diese wurden später im Rahmen des „Forschungsprojekts Lysimeter“ weiterbetrieben. Aus den mehr als 20 jährigen Messreihen unter Praxisbedingungen lassen sich wertvolle Rückschlüsse auf eine grundwasser-schonende Landwirtschaft ziehen.

Die Lysimeteranlagen befinden sich auf zwei tiefgründigen Standorten in Eberstalzell und Pettenbach sowie einem seichtgründigen Standort in Pucking. Von den beiden tiefgründigen Standorten wurde einer bis 2013 nur mineralisch gedüngt, am anderen wurde regelmäßig Schweingülle zur Düngung eingesetzt.

Das laufende Messprogramm beinhaltet die Nitrat- und Phosphatauswaschung im wöchentlichen Abstand, den mineralischen Stickstoff im Boden sechsmal im Jahr sowie die Ermittlung der N- und P-Salden der Pflanzenproduktion.

Die wichtigsten Schlussfolgerungen sind:

Der **Stickstoffsaldo** stellt eine wesentliche Steuerungsgröße für die **Nitratauswaschung** dar und stimmt auf den tiefgründigen Standorten bei mehrjähriger Betrachtung sehr gut mit der als Nitrat ausgewaschenen Stickstoffmenge überein.

Am Standort mit langjähriger Wirtschaftsdüngeranwendung ergab sich nur dann eine gute Übereinstimmung, wenn der **feldfallende Stickstoff** zur Berechnung des Saldos herangezogen wurde. Offensichtlich werden jene Anteile, die nicht im Anwendungsjahr wirksam werden, später verfügbar.

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass bei der Bemessung der Düngung die **Obergrenzen des AP Nitrat** für die jeweilige Ertragslage bei weitem **nicht ausgeschöpft** wurden und dennoch überwie-

gend hohe Erträge (h1, teilweise auch h2) erwirtschaftet werden konnten.

Am seichtgründigen Standort war die Nitrat- auswaschung höher als der Stickstoffsaldo. Neben dem hohen Auswaschungsrisiko dürfte auf diesem Standort das hohe **Stickstoffnachlieferungs- potenzial** eine Rolle spielen, das eine Folge einer langjährigen Wirtschaftsdüngeranwendung sein dürfte. In Verbindung mit einer raschen **Bodenerwärmung oder Bodenbearbeitungsmaßnahmen** kann das die Nitratauswaschung fördern. Besonders gefährdet sind die Monate September bis März, wenn die Stickstoffmineralisierung auf dem leichten Boden bei Erwärmungsphasen rasch zunimmt, eine hohe Sickerwasserbildung zu erwarten ist und die Aufnahme von Wasser und Stickstoff durch die Pflanzen nur in beschränktem Ausmaß stattfindet.

Die **Nitratauswaschung** verläuft je nach **Kulturart** sehr unterschiedlich. Bei **Winterungen** erreicht sie im **Dezember** ihr Maximum, fällt dann bis zum Juni ab, um anschließend wieder anzusteigen. Bei **Mais** erreicht hingegen die **Auswaschung im Juni** ihr Maximum. Im Wesentlichen belegt dies den großen **Einfluss des Pflanzenwachstums**. Gleichzeitig ist davon abzuleiten, dass **größere zeitliche Abstände zwischen Düngung und Hauptwachstumsphasen ein bedeutendes Risiko für die Nitratauswaschung** darstellen. Im Fall von **Winterungen** bedeutet das, dass solche, die im Herbst kein nennenswertes Massenwachstum mehr aufweisen, im Herbst auch **nicht gedüngt** werden sollten. Tatsächlich verlief die Nitratauswaschung am Standort, wo zu Winterungen im Herbst Wirtschaftsdünger ausgebracht wird, im Zeitraum November bis März auf deutlich höherem Niveau als am Standort ohne Herstdüngung. Zu **Mais** hingegen sollte aus Gründen des Grundwasserschutzes ein **Großteil des Stickstoffs erst im Mai oder Anfang Juni** gedüngt werden.

## 2 Zielsetzung

Im Zuge der Pilotprojekte zur Grundwassersanierung wurden im Jahr 1995 Feldlysimeteranlagen errichtet. Die Pilotprojekte wurden durchgeführt, um allgemein anwendbare Grundsätze für die Grundwassersanierung zu erarbeiten, Erfahrung bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Grundwassersanierung zu sammeln und die Effekte einzelner Maßnahmen zu überprüfen. Der Zweck der Lysimeteranlagen bestand darin, Messergebnisse zu liefern, die Grundlage eines wissenschaftlichen Begleitprogramms waren.



Abb. 2-1: Errichtung der Lysimeteranlage

Nach Beendigung des Pilotprojekts entschloss man sich, jene drei Lysimeteranlagen, die auf Ackerstandorten errichtet worden waren, weiter zu betreiben. Die Zielsetzungen blieben im Wesentlichen die gleichen, nämlich die Voraussetzungen für eine grundwasser-schonende Landwirtschaft zu untersuchen und weiter zu entwickeln. Dazu zählen die Wirkung von Umweltmaßnahmen und gesetzlichen Rahmenbedingungen, der Einfluss der Bewirtschaftungsform, vor allem der unterschiedlichen Formen der Düngung (mineralisch, mit Wirtschaftsdünger) und der Einfluss des Standorts mit seinen jeweiligen Boden- und Klimaeigenschaften.

Neben der Auswirkung auf die Nitratauswaschung wurden auch jene auf die Phosphatauswaschung in das Untersuchungsprogramm aufgenommen und der Zusammenhang mit den Nitrat- und Phosphatgehalten im Boden, den Nährstoffbilanzen und dem Düngezeitpunkt untersucht. Zum besseren Verständnis des Einflusses von Bodeneigenschaften auf die Nitratauswaschung wurde ein Tracerversuch mit Kaliumbromid (KBr) durchgeführt, die Ausrüstung eines Standorts zu einer Bodenwasserhaushaltsmessstelle für die ungesättigte Zone erlaubt eine detaillierte Betrachtung von Einflüssen der Witterung und der Bodentemperatur.

Ein wesentlicher Aspekt der Lysimeteranlagen ist, dass die Bewirtschaftung unter Praxisbedingungen erfolgt, sodass die Ergebnisse eine hohe Relevanz aufweisen und im Rahmen von Empfehlungen, der Beratung oder von Landwirt zu Landwirt weitergegeben werden können und anwendbar sind.

### 3 Beschreibung der Lysimeteranlagen

Zwei Lysimeteranlagen befinden sich im Bereich des Grundwasserkörpers Traun-Enns-Platte (Eberstallzell, Pettenbach), ein weiterer im Bereich des Grundwasserkörpers Welscher Heide (Pucking; vgl. Abb. 3-1).



sgPU: seichtgründig Pucking; tgEB: tiefgründig Eberstallzell; tgPE: tiefgründig Pettenbach

Abb. 3-1: Lage der Lysimeter

Die beiden Anlagen im Bereich der Traun-Enns-Platte befinden sich an tiefgründigen Standorten, jene in Pucking an einem seichtgründigen (vgl. Abb. 3-2). Die wichtigsten Bodenkennwerte sind in den Tab. 3-1 bis Tab. 3-3 dargestellt.

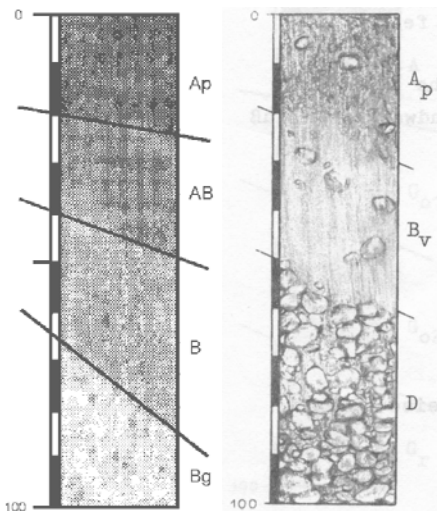


Abb. 3-2: Bodenprofil aus der Österr. Bodenkarte 1:25.000 für tgPE (links) und sgPU (rechts)

Die Lysimeter des Bautyps MURER (1995) wurden als monolithische Feldlysimeter ausgeführt. Sie besitzen eine kreisförmige Oberfläche von 1 m<sup>2</sup>. Die Lysimetersohle liegt 1,5 m unter Gelände (Abb. 3-3). Die Lysimeter werden einerseits frei auslaufend und andererseits über keramische Saugkerzen - eingebaut im Boden an der Lysimetersohle - entwässert. An diesen Saugkerzen liegt ein Unterdruck von 60 hPa an. Nach oben schließen die Lysimeter mit einem Stahlblechring ab, der zur Bodenbearbeitung temporär entfernt wird.

Innerhalb einer Bewirtschaftungs- und Bodeneinheit wurden zu jedem Lysimeter jeweils zwei Vergleichsmessstellen, an den tiefgründigen Standorten als Saugkerzenanlagen (Abb. 3-4) und am seichtgründigen Standort als Sickerwassersammler, zusätzlich eingebaut.

In Pettenbach wurde außerdem im Jahr 2013 eine hydrographische Messstelle der ungesättigten Zone (UZ-Messstelle) errichtet. Sie besteht aus einem mit Gipsblöcken, Tensiometern (für die Saugspannungsmessung), Temperatursensoren und Wassergehaltssensoren in den Tiefen 10, 35, 60, 90, 120 und 140 cm bestücktem Freilandprofil.



Tab. 3-1: Physikalische und chemische Bodenkennwerte vom Lysimeter tgEB (Bodentyp: pseudovergleyte Lockersediment-Braunerde)

Tiefe [cm]	Horizont (ÖBG)	Bodenart (AG Boden)	Ton [%]	Porenvolum. [%]	Luftkap. [%]	nFK [%]	Humus [%]	pH	C/N
0 - 30	Ap	Ut4 G0	20	51	15	21	2,1	6,4	7,8
30 - 85	Bv	Lu G0	27	42	10	11	0,3	6,5	5,8
85 - 150	BvS	Lu G0	30	41	5	12	0,0	6,6	2,4

Tab. 3-2: Physikalische und chemische Bodenkennwerte vom Lysimeter tgPE (Bodentyp: Parabraunerde)

Tiefe [cm]	Horizont (ÖBG)	Bodenart (AG Boden)	Ton [%]	Porenvolum. [%]	Luftkap. [%]	nFK [%]	Humus [%]	pH	C/N
0 - 30	Ap	Lu G0	22	45	10	20	2,0	6,6	7,6
30 - 75	AB/B	Lu G0	22	45	12	14	0,4	6,7	5,8
75 - 110	Bg	Lu G0	23	42	8	15	0,4	6,9	4,9

Tab. 3-3: Physikalische und chemische Bodenkennwerte vom Lysimeter sgPU (Bodentyp: kalkhaltige Lockersediment-Braunerde)

Tiefe [cm]	Horizont (ÖBG)	Bodenart (AG Boden)	Ton [%]	Porenvolum. [%]	Luftkap. [%]	nFK [%]	Humus [%]	pH	C/N
0 - 30	Ap	Sl3 G3	10,9	48	23	23	1,5	7,3	10
30 - 80	Bv/D	Ss G5	2,1	27	13	12	1,2	7,2	9,7
80 - 150	D	Ss G5	1,1	20	10	10	0,2	7,7	9,7



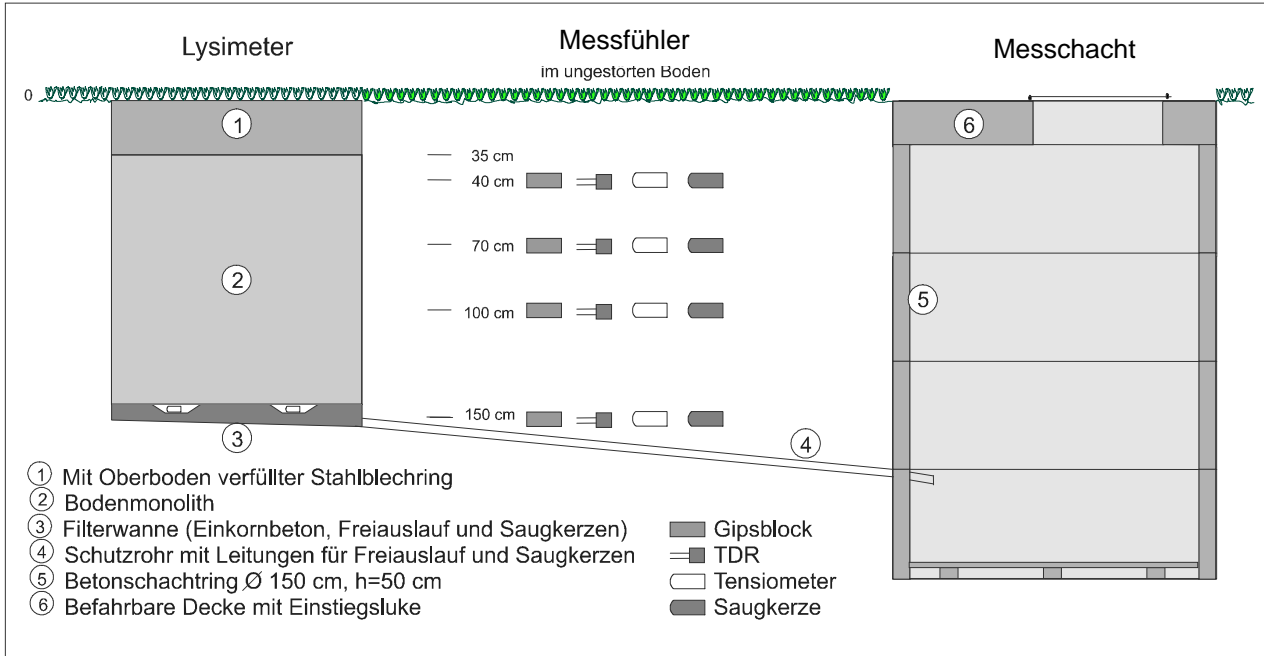


Abb. 3-3: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage

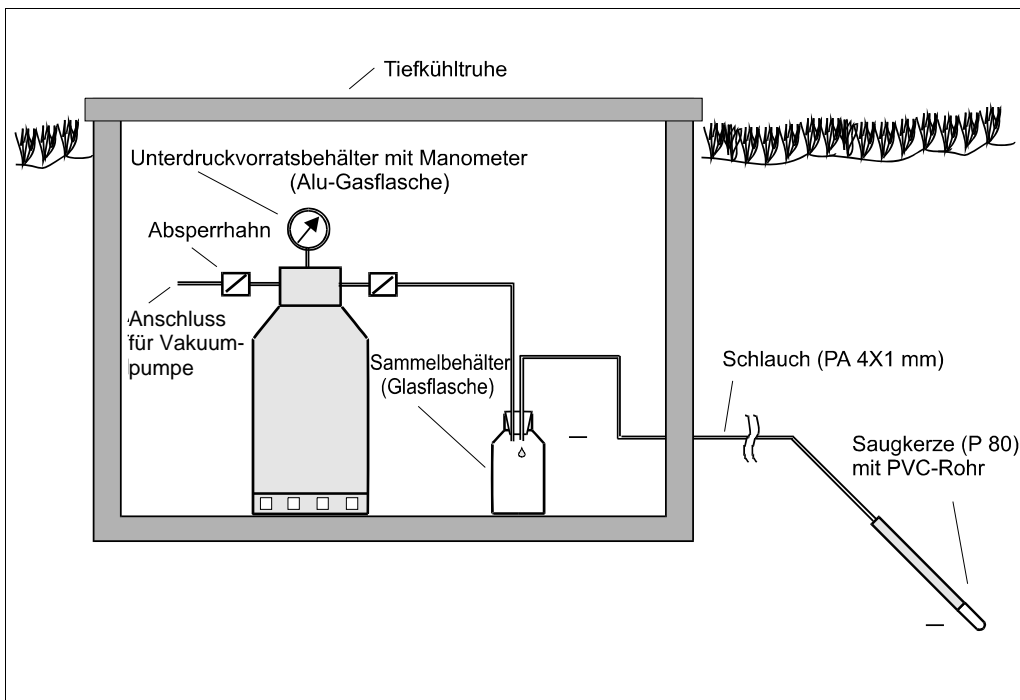


Abb. 3-4: Schematische Darstellung der Kontrollmessstelle (Saugkerzenanlage)



Abb. 3-5: Lysimeteroberfläche tgEB nach der Ernte



Abb. 3-7: Lysimeteranlage sgPU - Deckel des Messschachts



Abb. 3-6: Lysimeteroberfläche tgPE im Frühjahr

#### 4 Bewirtschaftung

Alle drei Standorte werden unter landwirtschaftlichen Praxisbedingungen bewirtschaftet. Es erfolgt eine konventionelle Bewirtschaftungsweise mit wendender Bodenbearbeitung. Die Fruchtfolge besteht hauptsächlich aus Körnermais, Winterweizen und Wintergerste. Daneben werden Körnerraps und Soja sowie in einzelnen Jahren auch andere Kulturen angebaut (Abb. 4-1 bis Abb. 4-3). Vor Körnermais oder Soja wurden Zwischenbegrünungen angelegt.

Am seichtgründigen Standort (sgPU) wurde bis 2000 unter anderem Hühnergülle zur Düngung eingesetzt, ab 2000 wurde nur mineralisch gedüngt. Am tiefgründigen Standort in Eberstalzell (tgEB) wird unter anderem Schweinegülle zur Düngung eingesetzt, in Pettenbach erfolgte die Düngung bis 2013 rein mineralisch, ab 2013 auch mit Putenmist.

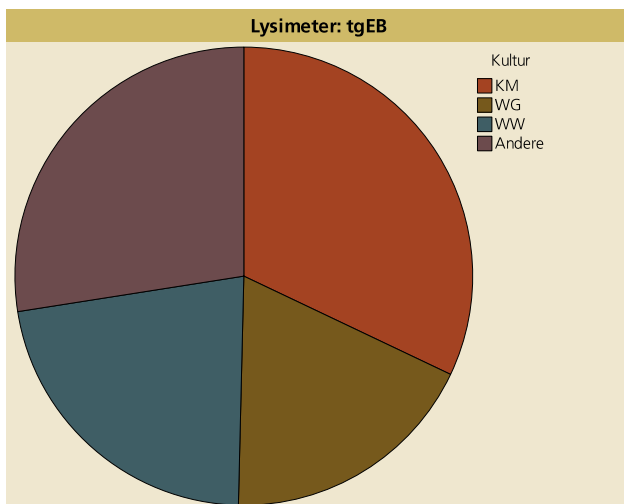


Abb. 4-1: Ackerkulturen in der Fruchtfolge bei tgEB

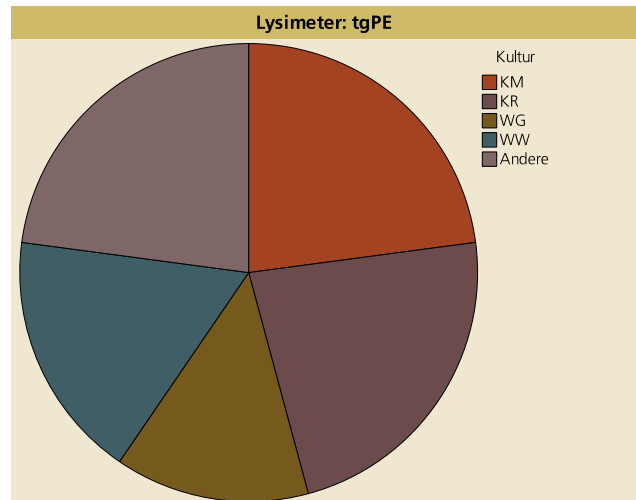


Abb. 4-2: Ackerkulturen in der Fruchtfolge bei tgPE

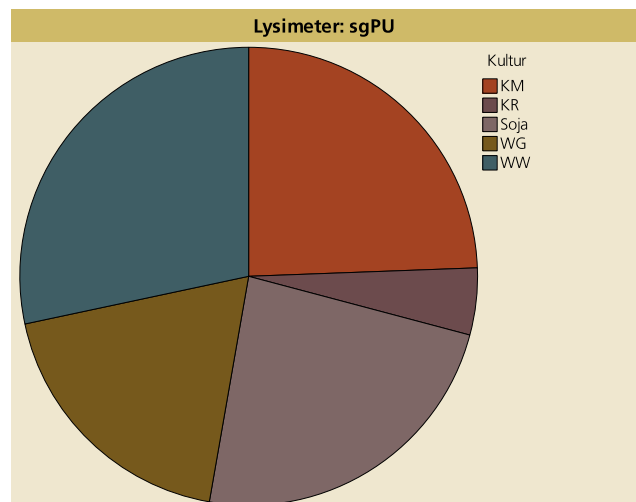


Abb. 4-3: Ackerkulturen in der Fruchtfolge bei sgPU

## **5 Untersuchungsumfang**

### **5.1 Zeitraum**

Die ausgewerteten Daten stammen aus dem Zeitraum seit Inbetriebnahme der Lysimeteranlagen (je nach Lysimeter Ende 1994 bis Anfang 1995) bis Ende Oktober 2016. Es stehen somit Daten aus beinahe 22 Jahren zur Verfügung.

### **5.2 Laufende Durchführung**

Die Bewirtschaftung wurde an allen drei Standorten mit laufenden Aufzeichnungen dokumentiert. Dokumentiert wurden Bodenbearbeitung (Art, Termin), Anbaudatum, angebaute Kultur, Düngemaßnahmen (Termin, Art des Düngers, Nährstoffgehalt), das Erntedatum und die Erntemenge. Bei Wirtschaftsdüngern wurde der N- und der P-Gehalt analytisch bestimmt. Vom Erntegut sowie vom gesamten restlichen oberirdischen Aufwuchs wurde an der Lysimeteroberfläche und jeweils zwei weiteren Stellen die Masse, die Feuchte, der N- und der P-Gehalt bestimmt. Aus Nährstoffzufuhr und -abfuhr wurden Nährstoffbilanzen errechnet.

An allen drei Standorten wurde seit dem Jahr 2002 sechsmal im Jahr eine  $N_{\min}$  Untersuchung gem. ÖNORM L1091 durchgeführt, wobei Nitrat in den Tiefenstufen 0 - 30, 30 - 60 und 60 - 90 cm gemessen wurde, Ammonium nur in 0 - 30 cm. Am seichtgründigen Standort ist eine Beprobung nur bis 60 cm Bodentiefe möglich. Die Messungen fanden ca. alle zwei Monate statt, wobei die Beprobungstermine von Jahr zu Jahr witterungsbedingt und je nach angebaute Kultur etwas variierten.

An allen drei Standorten wurde der Niederschlag gemessen. Dazu werden die Niederschlagssummen in wöchentlichen Abständen ermittelt. In Pettenbach erfolgt außerdem eine automatisierte tägliche Erfassung der Niederschlagsmenge und der Temperatur.

Die hydrographischen Messstelle der ungesättigten Zone am Standort erfasst außerdem Temperatur, Wassergehalt und Wasserspannung in den Bodentiefen 10, 35, 60, 90, 120 und 140 cm.

An den Lysimetern wurde wöchentlich (bis zum Jahr 2000 täglich) die Sickerwassermenge ermittelt und, sofern Sickerwasser anfiel, dieses beprobt. An den Kontrollmessstellen wurde in gleicher Weise verfahren. In allen Proben wird die Nitratkonzentration gemessen. In den Proben aus den Lysimetern seit Herbst 2001 auch die Phosphatkonzentration. Aus der Sickerwassermenge und der Konzentration (bei Nitrat aus dem Mittelwert der Konzentrationen des Lysimeters und der Kontrollmessstellen) wurde die N- und P-Fracht, die unterhalb von 1,5 m Tiefe ausgetragen wurde, berechnet.

### **5.3 Sonderprogramme**

In den Jahren 2002 bis 2006 wurde bei allen Bodenproben aus 0 - 30 cm Tiefe neben Ammonium und Nitrat auch der nachlieferbare Stickstoff bestimmt.

Im Jahr 2002 wurde der Phosphatgehalt an allen drei Standorten bis 140 cm Bodentiefe in 20 cm Tiefenintervallen bestimmt.

Im Herbst 2008 wurde Kaliumbromid (KBr) als Tracer ausgebracht und anschließend bis Ende 2011 bzw. am seichtgründigen Standort bis Ende 2010 im Sickerwasser gemessen. Ziel war die Verlagerungsgeschwindigkeit anhand eines dem Nitrat vergleichbaren Anion (Br<sup>-</sup>) zu studieren. Von Herbst 2008 bis Sommer 2009 war an allen drei Standorten Wintergerste angebaut. Es folgten eine Begrünung und Körnermais.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Mineralischer Stickstoff - $N_{min}$

Die  $N_{min}$ -Gehalte im Boden unterscheiden sich zwar von Jahr zu Jahr (vgl. Abb. 6-3 und Abb. 6-4), es lassen sich aber im mehrjährigen Durchschnitt bestimmte Muster ablesen. Generell nimmt der Gehalt an mineralischem Stickstoff im Boden im Laufe des Frühjahrs zu und dann bis zu Jahresende wieder ab. Ein Vergleich der Standorte zeigt, dass dieser Anstieg bei sgPU früher stattfindet (Abb. 6-1), was auf die leichtere Erwärmbarkeit dieses Bodens bei steigenden Temperaturen im Frühjahr zurückzuführen sein dürfte. Die höchsten  $N_{min}$ -Gehalte werden dort im Durchschnitt bereits im März/April erreicht, an den anderen Standorten im Mai/Juni. Auf die leichtere Erwärmbarkeit lässt sich von der Bodenart des oberen Horizonts schließen. Am seichtgründigen Standort sgPU ist das lehmiger Sand, am tiefgründigen in Pettenbach (tgPE) schluffiger Lehm und am tiefgründigen in Eberstallzell (tgEB) stark toniger Schluff (vgl. Tab. 3-1 bis Tab. 3-3).

Deutliche Unterschiede gibt es auch je nach Kulturart. Der Anstieg der  $N_{min}$ -Gehalte in Jahren, in denen Mais angebaut wird, fällt im Durchschnitt weitaus deutlicher aus, als in Jahren mit Winterungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Mais erst ab Mitte/Ende Juni beginnt, den mineralischen Stickstoff in größeren Mengen aufzunehmen, die Düngemaßnahmen aber teilweise bereits im April erfolgen und auch die Stickstoffmineralisierung durch steigende Bodentemperaturen bei (in diesem Gebiet üblicherweise) ausreichender Bodenfeuchte zunimmt.

Die Spannweite der  $N_{min}$ -Gehalte (vgl. Abb. 6-3 und Abb. 6-4, unterschiedliche Skalierung) verweist auf den Nutzen der  $N_{min}$  Sollwertmethode, bei der die Stickstoffdüngung an den Gehalt des im Boden bereits vorhandenen mineralischen Stickstoffs angepasst wird.

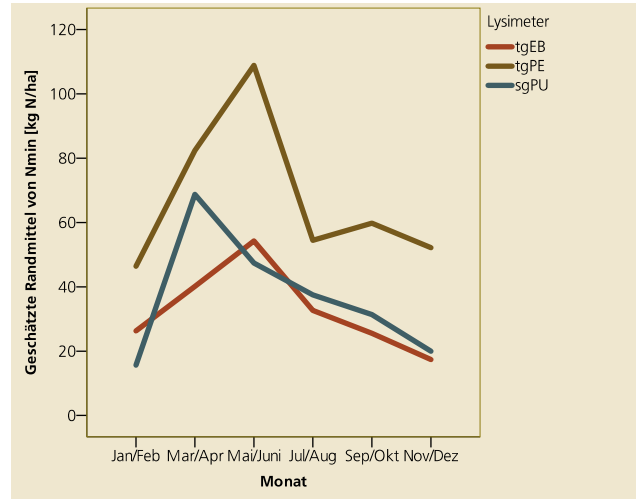


Abb. 6-1: Durchschnittlicher Verlauf der  $N_{min}$ -Gehalte an den drei Standorten<sup>1</sup>

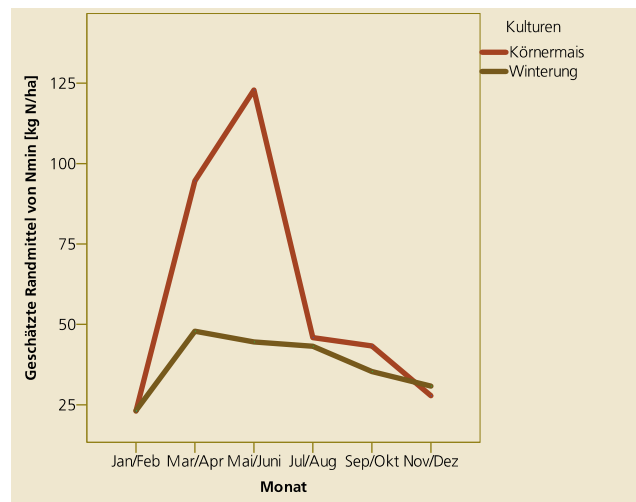


Abb. 6-2: Durchschnittlicher Verlauf der  $N_{min}$ -Gehalte je nach Kulturart<sup>1</sup>

<sup>1</sup> geschätzte Randmittel aus einer Varianzanalyse mit den Faktoren Monat (= Durchschnittswert aus Messungen in zwei Monaten), Standort und Kultur

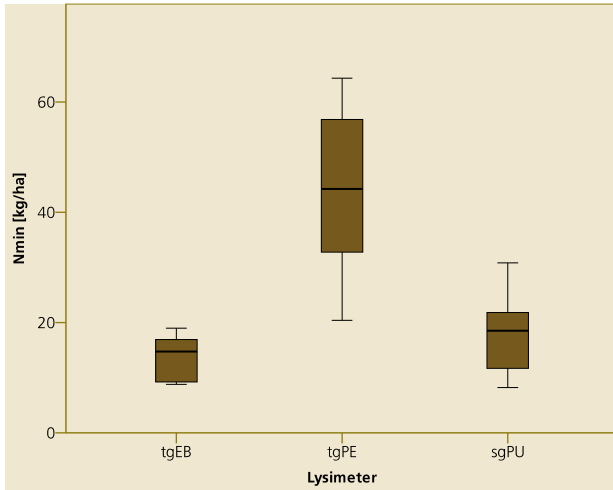


Abb. 6-3:  $N_{min}$  in Jahren mit Winterweizen oder Wintergerste im Jänner oder Februar (Spannbreite, Interquartilenbereich mit Median)

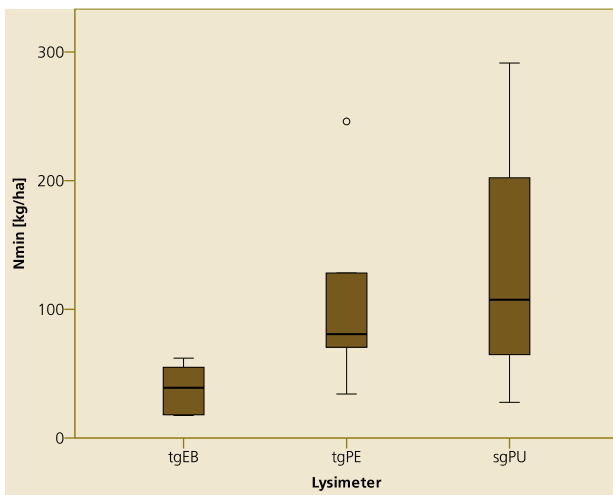


Abb. 6-4:  $N_{min}$  in Jahren mit Mais im März oder April (Spannbreite, Interquartilenbereich mit Median)

## 6.2 Niederschläge und Sickerwasserbildung

Die mittleren jährlichen Niederschläge nehmen in der Region von Norden nach Süden zu (Tab. 6-1). Der Verlauf ist an allen drei Standorten im Durchschnitt relativ ähnlich mit einem Maximum im Sommer (siehe Abb. 6-5).

Tab. 6-1: Niederschlags- und Sickerwassersummen

	NS [mm/a]	SiWa [mm/a]	SiWa % vom NS
sgPU	805	295	37%
tgEB	967	305	32%
tgPE	1047	353	34%

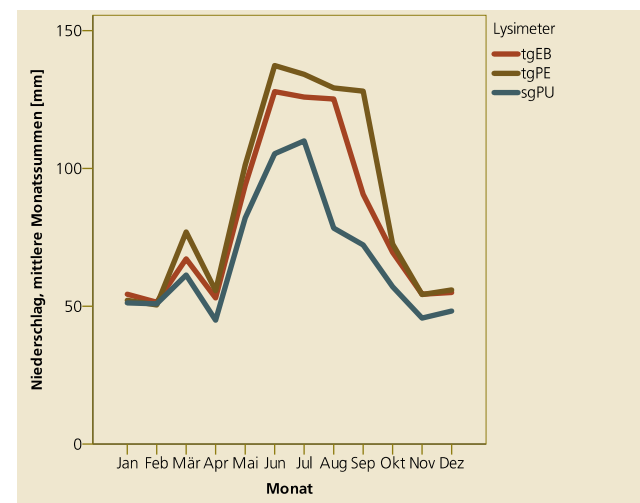


Abb. 6-5: Monatliche Niederschlagssummen (Mittelwerte)

Die Sickerwasserbildung erfolgt überwiegend während der Wintermonate mit einem Maximum im März und nimmt dann stark ab (Abb. 6-6). Die erneute Zunahme im Jahresverlauf hängt unter anderem von der Höhe der Niederschläge ab und erfolgt durchschnittlich als erstes am südlichsten Standort (tgPE) bereits im Juli, an den anderen Standorten entsprechend später. Die größten Unterschiede zwischen Monaten mit hoher Sickerwasserbildung und geringer Sickerwasserbildung

sind am seichtgründigen Standort zu beobachten und eine Folge der geringen Wasserspeicherfähigkeit des dort vorhandenen Bodens.

Der Verlauf der monatlichen Sickerwassermenge unterscheidet sich je nach angebauter Kultur. Bei Winterungen (Winterweizen, Wintergerste, Körnerriaps) erfolgt eine stetige Abnahme von März bis Juni, bedingt durch den zunehmenden Wasserverbrauch. Nach dem Abreifen bzw. der Ernte der Winterung steigt die Sickerwassermenge wieder an. Bei Mais führen hingegen die im Jahresverlauf zunehmenden Niederschläge zu einem relativen Maximum des Sickerwassers im Juni, da die Entwicklung der Blattmasse und die Wasseraufnahme erst ab diesem Zeitpunkt in stärkerem Umfang einsetzt (Abb. 6-7).

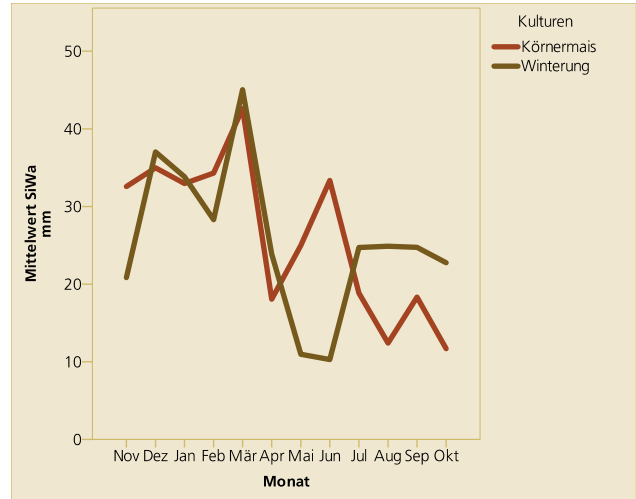


Abb. 6-7: Durchschnittliche monatliche Sickerwassermenge je nach angebauter Kultur

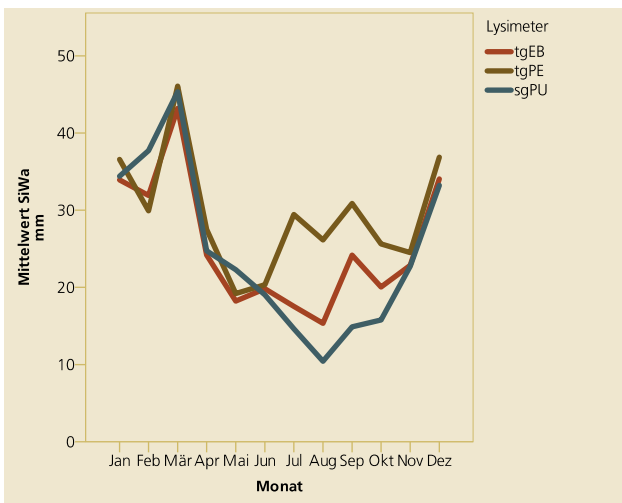


Abb. 6-6: Durchschnittliche monatliche Sickerwassermenge an den drei Standorten



### 6.3 Nitratkonzentration im Sickerwasser und Nitratauswaschung

Die durchschnittliche Nitratkonzentration im Sickerwasser lag bei Lysimeter tgPE bei 23 mg/l, bei tgEB bei 39 mg/l und bei sgPU bei 82 mg/l (Abb. 6-8). Die Unterschiede sind auf mehrere Ursachen zurückzuführen, wie in den folgenden Unterkapiteln ausgeführt wird.

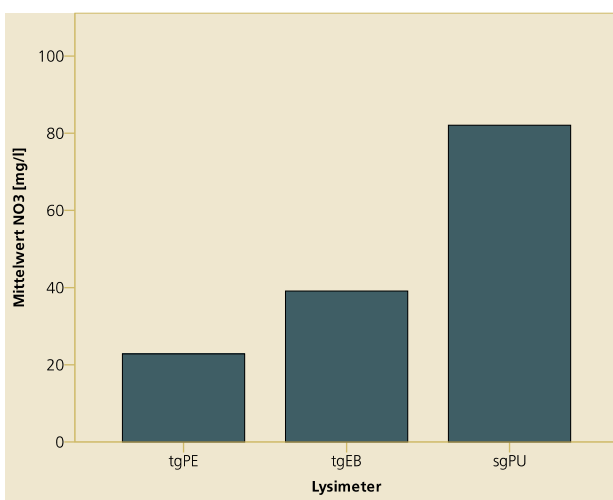


Abb. 6-8: Durchschnittliche Nitratkonzentration im Sickerwasser (gewichtetes Mittel)

### 6.3.1 Einfluss des Bodens auf die Nitratverlagerung

Um den Einfluss der physikalischen Bodeneigenschaften auf die Nitratverlagerung zu untersuchen, wurde ein Versuch mit Bromid als Tracer durchgeführt (siehe Kap. 5.3), dessen Auswaschungsverhalten jenem von Nitrat gleicht. Die Verlagerung des Bromids in 1,5 m Tiefe verlief an den drei Standorten sehr unterschiedlich. Am seichtgründigen Standort (sgPU) fand beinahe die gesamte Auswaschung (die Wiederfindungsrate betrug 70%) innerhalb von sechs Monaten statt (Abb. 6-9). Die Bromidkonzentration stieg rasch an und erreichte bereits drei Monate nach der Ausbringung ihr Maximum (Abb. 6-10). An den tiefgründigen Standorten gab es kurz nach der Ausbringung des KBr einen deutlichen Anstieg der Bromidkonzentration im Sickerwasser, anschließend bildet der Auswaschungsverlauf (in Abb. 6-9) das typische Muster der Sickerwasserbildung in Jahren mit Winterungen ab, die vor allem im Spätwinter und dann nach der Ernte im Sommer erfolgt (vgl. Abb. 6-7). Anschließend verläuft die Auswaschung dann relativ gleichmäßig. Das Bromid wird relativ gleichmäßig nach unten verlagert.

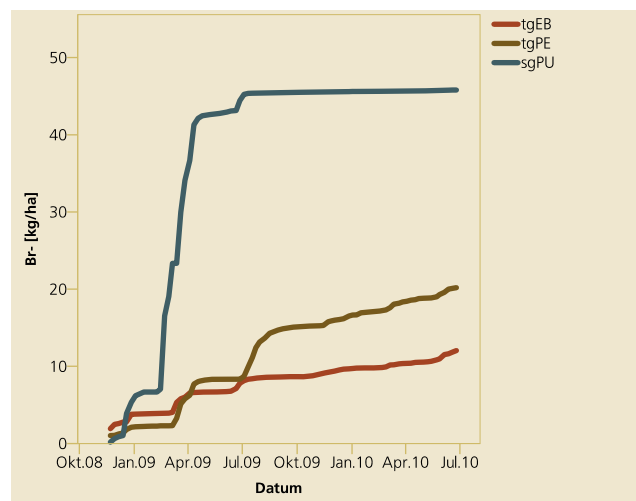


Abb. 6-9: Summenlinien der Bromidauswaschung

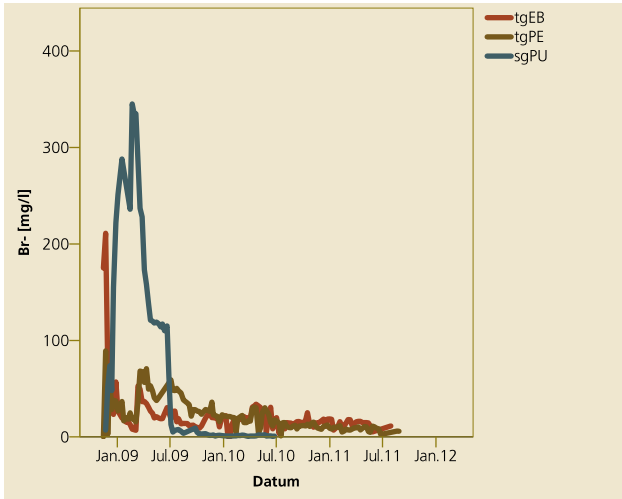


Abb. 6-10: Bromidkonzentrationen

Die Verlagerungsgeschwindigkeit des Bromids ist somit bei Lysimeter sgPU deutlich höher als bei tgPE und tgEB und vor allem eine Folge der geringen Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Aus der nutzbaren Feldkapazität (nFK) und der Horizonttiefe lassen sich aus den Tab. 3-1 bis Tab. 3-3 folgende Werte für Speicherung pflanzenverfügbaren Wassers ableiten (Berechnung bis 1m Bodentiefe, bei sgPU bis 0,55 m, vgl. Profilbild in Abb. 3-2):

sgPU: 99 mm, tgPE 161 mm, tgEB 142 mm.

Eine weitere Eigenschaft des Standorts sgPU ist die leichtere Erwärmbarkeit des Bodens, die ebenfalls mit der geringeren Wasserspeicherfähigkeit zusammenhängt und die dazu führt, dass die Mineralisierung von Stickstoff, also die Bildung von Ammonium und Nitrat aus organischen Stickstoffverbindungen bei steigenden Temperaturen früher anspringt (siehe Kap. 6.1). Die Folgen werden in Abb. 6-11 beispielhaft anhand des Zeitraums Herbst 2013 bis Herbst 2015 illustriert. Nach einer Zwischenbegrünung wurde 2014 auf allen drei Standorten Körnermais angebaut, anschließend Winterweizen. Die Nitratkonzentration im Sickerwasser des Standorts sgPU nimmt im Unterschied zu den anderen Standorten im Herbst 2013 stark zu, ebenso im Herbst 2014 und, nach einem vorübergehenden

Absinken, wieder im Spätwinter 2015. Hervorzuheben ist, dass kurz zurückliegende Düngemaßnahmen als Ursache ausscheiden, da weder zur Zwischenbegrünung im Jahr 2013 noch zum Winterweizen im Herbst 2014 Stickstoffdünger ausgebracht wurde. Auch der Anstieg im Spätwinter 2015 erfolgte vor der ersten Düngegabe zu Winterweizen. Die Nitratauswaschung ist hier vielmehr als Folge der Stickstoffmineralisierung zu interpretieren, die zu den Jahresrändern an solchen eine erhebliche Rolle spielen kann und vermutlich auch durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen zum Anbau der Begrünung und der Winterung verstärkt wurde.

Anzumerken ist, dass an diesem Standort der Wert des nachlieferbaren Stickstoffs von 112 mg/kg/7d (Probe vom 16.12.2016) als hoch einzustufen ist. Es ist also an diesem Standort im Boden auch ausreichend „Ausgangsmaterial“ vorhanden (zu den anderen Standorten liegen keine aktuellen Werte vor).

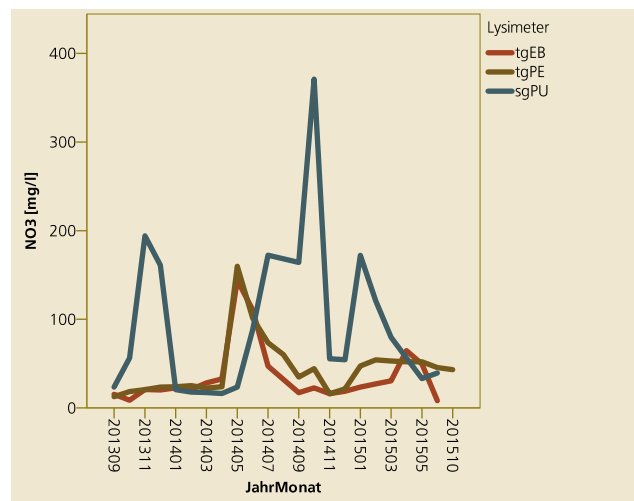


Abb. 6-11: Verlauf der Nitratkonzentration (Monatswerte) im Zeitraum Herbst 2013 bis Herbst 2015

Die rascher einsetzende Stickstoffmineralisierung bei steigenden Temperaturen und die geringe Wasserspeicherfähigkeit des seichtgründigen Bodens bei Lysimeter sgPU sind somit die Ursachen dafür, dass dort die Stickstoffauswaschung in größerem Umfang stattfindet als bei den beiden tiefgründigen Standort-

ten. Abb. 6-12 verdeutlicht, dass die Unterschiede vor allem auf eine erhöhte Auswaschung in den Monaten September bis April zurückzuführen sind, also jenem Zeitraum, in dem ein paar Grad Unterschied in der Bodentemperatur eine große Rolle spielen können und die Aufnahme von Wasser und Stickstoff durch die Pflanzen nur in geringerem Ausmaß stattfindet.

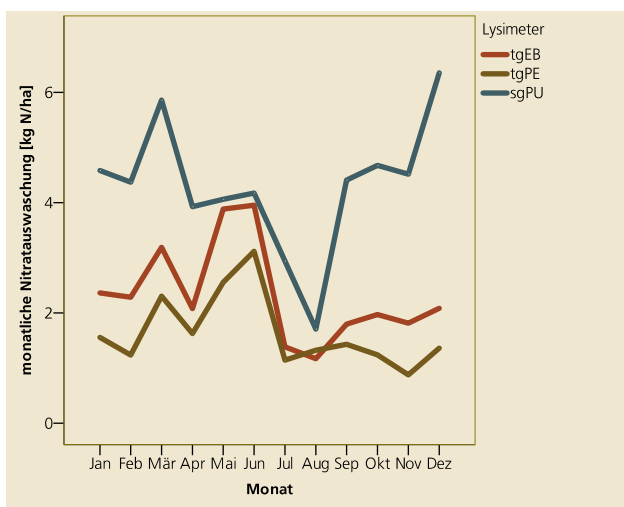


Abb. 6-12: Durchschnittlicher Verlauf der Nitratauswaschung (Monatssummen) an den drei Standorten<sup>2</sup>

### 6.3.2 Einfluss der Kultur auf die Nitratverlagerung

Die Nitratauswaschung verlief in Jahren, in denen Winterungen angebaut sind, unterschiedlich zu Jahren mit Körnermais (Abb. 6-13). Winterungen haben im Durchschnitt vor allem von November bis Februar eine deutlich höhere Auswaschung (mit einem Maximum im Dezember), Mais von Mai bis Juli (mit einem Maximum im Juni).

Zu den niedrigeren Werten im Winter vor dem Maisanbau ist anzumerken, dass vor Mais stets eine Begrünung angelegt wurde. Der folgende Anstieg ab April steht im Zusammenhang mit den ebenfalls stark steigenden  $N_{min}$ -Gehalten (siehe Abb. 6-2) der in Maisjahren in diesem Zeitraum zunehmenden Sickerwasserbildung (Abb. 6-7).

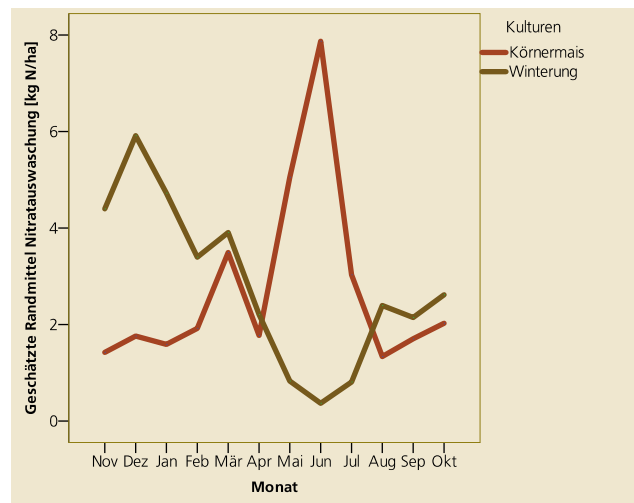


Abb. 6-13: Durchschnittlicher Verlauf der Nitratauswaschung (Monatssummen) je nach Kultur<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> geschätzte Randmittel aus einer Varianzanalyse mit den Faktoren Monat, Standort und Kultur

### 6.3.3 Einfluss des Stickstoffsaldos auf die Nitratverlagerung

Langfristig ist auf den tiefgründigen Standorten eine gute Übereinstimmung zwischen dem Stickstoffsaldo und der Nitratauswaschung feststellbar, auch wenn bei der Betrachtung einzelner Jahre Abweichungen auftreten (Abb. 6-14 und Abb. 6-15). Zur Berechnung des Stickstoffsaldos wurde die Differenz aus gedüngter Stickstoffmenge und Stickstoffentzug gebildet. Da die Stickstofffixierung durch Leguminosen nicht ermittelt wurde, wurde in Jahren, in denen Leguminosen angebaut waren, die Vorfruchtwirkung gem. RL.sg.Dg.<sup>3</sup> als Stickstoffsaldo eingesetzt. Als Entzug wurden die vom Feld abgeführten Produkte bewertet. Der Entzug durch Stroh wurde also zur Berechnung des N-Saldos nur herangezogen, falls dieses abgeführt wurde.

Eine gute Übereinstimmung zwischen Auswaschung und N-Saldo ergab sich nur, wenn der Wirtschaftsdünger in seiner feldfallenden Wirkung<sup>1</sup> bewertet wurde. Eine Bewertung mit der Jahreswirksamkeit hätte am Standort tgEB, wo regelmäßig Wirtschaftsdünger eingesetzt wurde, einen N-Saldo ergeben, der deutlich unter der ausgewaschenen Stickstoffmenge liegt.

Am seichtgründigen Standort sgPU lässt sich die Höhe der Auswaschung nicht mit dem Stickstoffsaldo erklären. Obwohl seit 2000 der N-Saldo weitgehend ausgeglichen ist, findet dennoch eine laufende Stickstoffauswaschung statt (Abb. 6-16). Wie in Kap. 6.3.1 beschrieben, ist in diesem Fall die Mineralisierung von ausreichend vorhandenem nachlieferbarem Stickstoff des Bodens als Ursache zu sehen, der in Zeiten geringer Pflanzenaufnahme sehr rasch ausgewaschen werden kann.

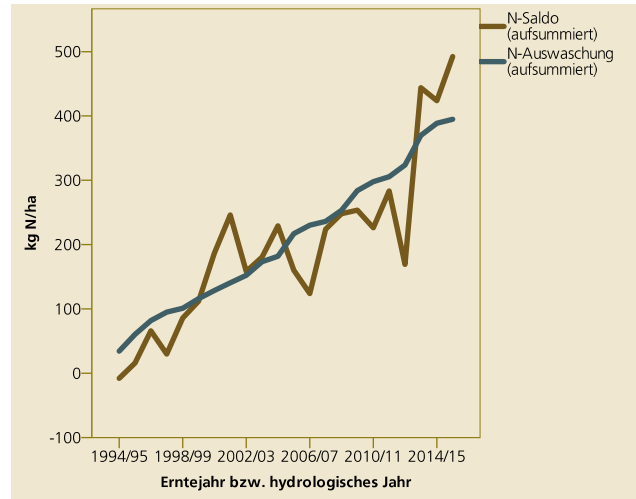


Abb. 6-14: Stickstoffsaldo und -auswaschung am Standort tgPE

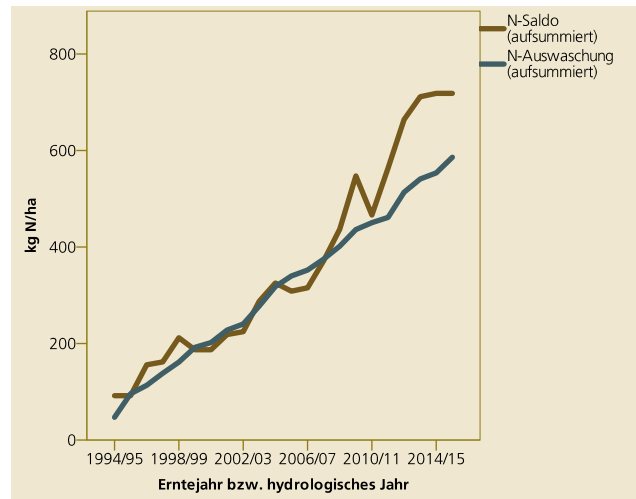


Abb. 6-15: Stickstoffsaldo und -auswaschung am Standort tgEB

<sup>3</sup> Richtlinien für die sachgerechte Düngung des BMLFUW, 6. Auflage

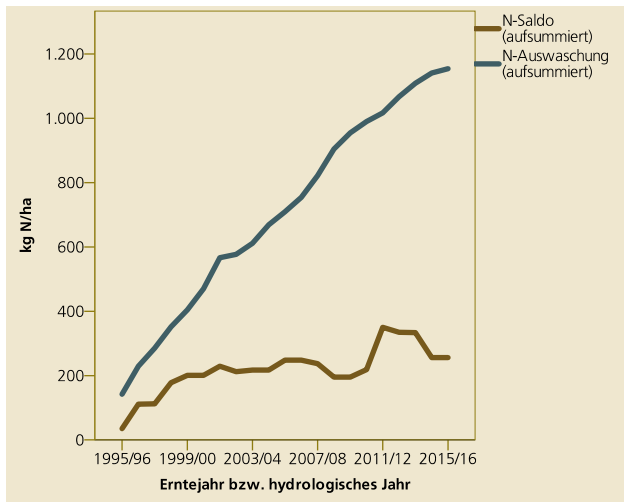


Abb. 6-16: Stickstoffsaldo und -auswaschung am Standort sgPU

### 6.3.4 Düngung und Ertrag

Da der Stickstoffsaldo von der Düngung und dem Ertrag abhängt, werden beide für die wichtigsten Kulturen hier gegenübergestellt. Die Ertragsangaben beziehen sich auf 14% Wassergehalt, Wirtschaftsdünger werden hier für eine Vergleichbarkeit mit gesetzlichen Obergrenzen (Aktionsprogramm Nitrat) mit ihrer Jahreswirksamkeit bewertet. Tab. 6-2 zeigt, dass die Erträge überwiegend einer hohen Ertragslage entsprachen. Lediglich Wintergerste hatte in Pucking und Pettenbach Erträge im Bereich einer mittleren Ertragslage. Der Maisertrag erreicht in Eberstalzell und Pettenbach die Ertragslage hoch 2, in Pucking hoch 1, Winterweizen in Pettenbach hoch 2, an den anderen Standorten hoch 1.

Tab. 6-2: Ertrag (14% Feuchte), N-Düngung und Obergrenze der Düngung lt. AP Nitrat

Kultur	Standort	KornErtrag [t/ha]	Düngung [kg N/ha]	AP Nitrat [kg N/ha]
KM	sgPU	10,2	116	180
	tgEB	12,3	162	195
	tgPE	12,6	158	195
WG	sgPU	5,9	100	130
	tgEB	6,3	112	155
	tgPE	5,7	103	130
WW	sgPU	6,6	116	170
	tgEB	6,8	128	170
	tgPE	8,7	142	180

Eine Gegenüberstellung mit den seit dem AP 2008 geltenden gesetzlichen Obergrenzen zeigt, dass diese bei weitem nicht ausgeschöpft wurden, sondern vielmehr mit einer maßvollen Düngung überwiegend hohe oder sehr hohe Erträge erzielt werden konnten.

### 6.3.5 Düngezeitpunkt

Wie bereits in Kap. 6.1 und 6.3.2 dargestellt, verlaufen die  $N_{\min}$ -Gehalte im Boden und die Nitratauswaschung im langjährigen Durchschnitt je nach angebaute Kultur unterschiedlich. Bei Winterungen findet die Nitratauswaschung vor allem über die Wintermonate statt (vgl. Abb. 6-13). Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Düngung im Herbst das Risiko einer solchen Auswaschung erhöht. Ein Vergleich der durchschnittlichen monatlichen Nitratauswaschung an den beiden tiefgründigen Standorten in Jahren, in denen Winterungen angebaut wurden, zeigt, dass in den Monaten November bis März in Eberstallzell die Werte deutlich höher liegen als in Pettenbach. Während in Eberstallzell im Herbst zu Winterungen regelmäßig Schweinegülle ausgebracht wird, wird in Pettenbach lediglich Winterweizen im Herbst mit Stickstoff gedüngt.

kann abgeleitet werden, dass eine zeitige Stickstoffdüngung zu Mais das Risiko einer Nitratauswaschung jedenfalls erhöht.

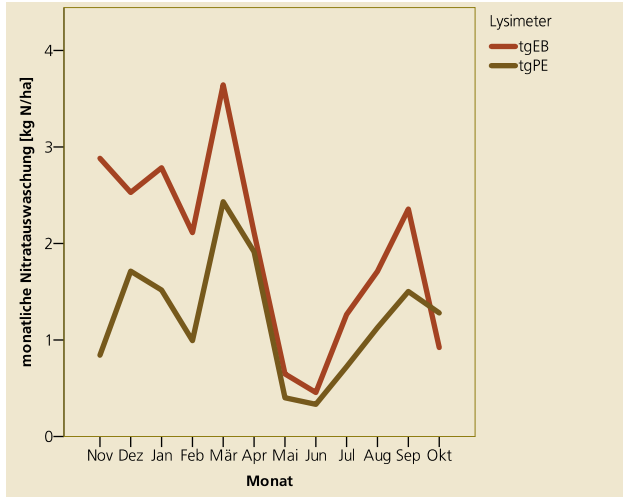


Abb. 6-17: Verlauf der monatlichen Nitratauswaschung an den tiefgründigen Standorten in Jahren mit Winterungen

Bei Mais nehmen die  $N_{\min}$ -Gehalte im Boden bis Mai/Juni stark zu (vgl. Abb. 6-2). Die Nitratauswaschung erfolgt im langjährigen Durchschnitt dann großteils im Juni (vgl. Abb. 6-13) und nimmt anschließend stark ab. Auch wenn der Anstieg teilweise auf die Stickstoffmineralisierung zurückzuführen ist,

## 6.4 Phosphat

Die Phosphatgehalte an den drei Lysimeterstandorten unterscheiden sich in mehrerer Hinsicht deutlich. Am seichtgründigen Standort (sgPU) sind die Gesamtgehalte ungefähr doppelt so hoch wie an den beiden tiefgründigen Standorten. Noch größer sind allerdings die Unterschiede des pflanzenverfügbaren Phosphats (PCAL, siehe Tab. 6-3), dessen Gehalt im Oberboden des seichtgründigen Standorts ca. neunmal so hoch ist wie an den tiefgründigen Standorten und in die Gehaltsklasse E (sehr hoch versorgt) reicht. Ursache dürfte die langjährige Anwendung von Biogasgülle aus Hühnermist sein. Die Ausbringung der Hühnermistgülle wurde nach Vorliegen der Untersuchungsergebnisse eingestellt.

Tab. 6-3: Phosphatgehalt an den drei Lysimeterstandorten

Tiefe [cm]	tgEB		tgPE		sgPU	
	P <sub>gesamt</sub> [mg/kg]	P <sub>CAL</sub> [mg/kg]	P <sub>gesamt</sub> [mg/kg]	P <sub>CAL</sub> [mg/kg]	P <sub>gesamt</sub> [mg/kg]	P <sub>CAL</sub> [mg/kg]
0-20	229	22,3	214	21,0	407	174
20-40	218	4,5	196	6,9	420	187
40-60	156	3,4	140	1,9	Auf Grund des hohen Grobanteils nicht beprobt	
60-80	201	1,7	171	2,1		
80-100	209	1,2	133	3,8		
100-120	222	1,9	183	2,8		
120-140	191	0,2	215	1,5		

Die Phosphatauswaschung war am seichtgründigen Standort vor allem zu Beginn der Messreihe deutlich höher als auf den tiefgründigen Standorten (Abb. 6-18). Dies weist darauf hin, dass vor allem die Phosphorübersorgung des Bodens eine Rolle gespielt haben dürfte. Darüber hinaus dürfte sich auch die Seichtgründigkeit und die leichtere Bodenart ausgewirkt haben. Jedenfalls ist erkennbar, dass die Auswaschung an diesem Standort vor allem zu Beginn der

Messreihe nicht gleichmäßig, sondern stoßweise stattfand.

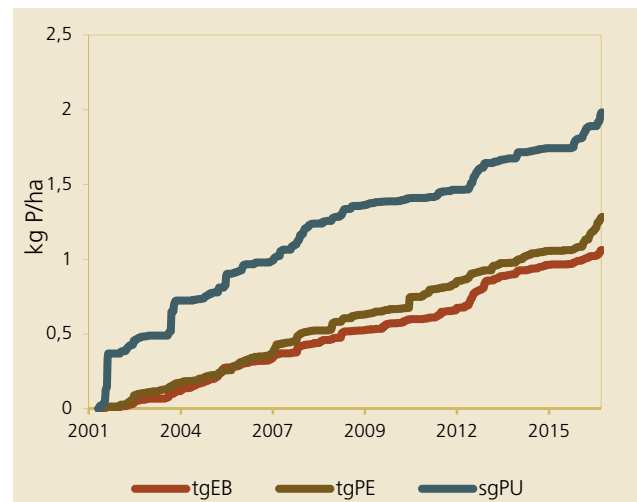


Abb. 6-18: Phosphatauswaschung, kumulativ

Insgesamt betrug auch am seichtgründigen Standort die Summe der Phosphatauswaschung lediglich 2 kg P/ha in 15 Jahren.



## 7 Schlussfolgerungen

Aus den langjährigen Messreihen an den drei Lysimeterstandorten lassen sich eine Reihe von Rückschlüssen und Empfehlungen für eine grundwasser-schonende Landwirtschaft ableiten.

Eine wesentliche Steuerungsgröße für die **Nitratauswaschung** ist der **Stickstoffsaldo**, der auf den tiefgründigen Standorten bei mehrjähriger Betrachtung sehr gut mit der als Nitrat ausgewaschenen Stickstoffmenge übereinstimmt.

Am Standort mit langjähriger Wirtschaftsdüngeranwendung ergab sich nur dann eine gute Übereinstimmung, wenn der **feldfallende Stickstoff** zur Berechnung des Saldos herangezogen wurde. Offensichtlich werden jene Anteile, die nicht im Anwendungsjahr wirksam werden, später verfügbar.

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass bei der Bemessung der Düngung die **Obergrenzen des AP Nitrat** für die jeweilige Ertragslage bei weitem **nicht ausgeschöpft** wurden und dennoch überwiegend hohe Erträge (h1, teilweise auch h2) erwirtschaftet werden konnten.

Am seichtgründigen Standort war die Nitratauswaschung höher als der Stickstoffsaldo. Neben dem hohen Auswaschungsrisiko dürfte auf diesem Standort das hohe **Stickstoffnachlieferungspotenzial** eine Rolle spielen, das eine Folge einer langjährigen Wirtschaftsdüngeranwendung sein dürfte. In Verbindung mit einer raschen **Bodenerwärmung oder Bodenbearbeitungsmaßnahmen** kann das die Nitratauswaschung fördern. Besonders gefährdet sind die Monate September bis März, wenn die Stickstoffmineralisierung auf dem leichten Boden bei Erwärmungsphasen rasch zunimmt, eine hohe Sickerwasserbildung zu erwarten ist und die Aufnahme von Wasser und Stickstoff durch die Pflanzen nur in beschränktem Ausmaß stattfindet. Im Durchschnitt der

Jahre erreichen die  $N_{\min}$ -Gehalte im Boden des seichtgründigen Standorts ihr Maximum ein bis zwei Monate früher als die tiefgründigen Standorte.

Die  $N_{\min}$ -Gehalte im Boden und die Nitratauswaschung verlaufen je nach **Kulturart** sehr unterschiedlich. Bei **Winterungen** steigen die  $N_{\min}$ -Gehalte im Boden im Winter an und sinken ab März wieder ab. Dementsprechend erreicht die **Nitratauswaschung im Dezember** ihr Maximum, fällt dann bis zum Juni ab, um anschließend wieder anzusteigen. Die  $N_{\min}$ -Gehalte bei **Mais** erreichen hingegen im Mai ihr Maximum und die **Auswaschung im Juni**. Im Wesentlichen belegt dies den großen **Einfluss des Pflanzenwachstums**. In jenen Monaten, in denen die jeweilige Kultur den Großteil der Pflanzenmasse bildet, nimmt die Stickstoffaufnahme und der Wasserverbrauch stark zu und die Nitratauswaschung ab. Gleichzeitig ist davon abzuleiten, dass **größere zeitliche Abstände zwischen Düngung und Hauptwachstumsphasen ein bedeutendes Risiko für die Nitratauswaschung** darstellen. Im Fall von **Winterungen** bedeutet das, dass solche, die im Herbst kein nennenswertes Massenwachstum mehr aufweisen, im Herbst auch **nicht gedüngt** werden sollten. Tatsächlich verlief die Nitratauswaschung am Standort, wo zu Winterungen im Herbst Wirtschaftsdünger ausgebracht wird, im Zeitraum November bis März auf deutlich höherem Niveau als am Standort ohne Herbstdüngung. Zu **Mais** hingegen sollte aus Gründen des Grundwasserschutzes ein **Großteil des Stickstoffs erst im Mai oder Anfang Juni** gedüngt werden.

Das Tracerexperiment zeigte eindrücklich, dass auf einem seichtgründigen Standort das Risiko einer raschen Auswaschung von Stickstoff, der nicht aufgenommen wird, besonders hoch ist. Allerdings war auch auf den tiefgründigen Standorten eine Auswaschungsspitze kurz nach der Ausbringung des Tracers zu beobachten.

Bei Phosphat spiegelt das **Auswaschungsgeschehen** vor allem die deutlichen Unterschiede an **pflanzenverfügbarem und daher potenziell auch mobilem Phosphat im Boden** wider. Ursache dürfte eine Langjährige Anwendung von Hühnergülle aus einer Biogasanlage sein. Nach Vorliegen erster Ergebnisse wurde diese Düngung eingestellt und der Verlauf der Phosphatauswaschung glich sich zwischen den Standorten an.