

P-Austrag aus Drainagen unter Wirtschaftsgrünland

Versuchsergebnisse bei Düngerapplikation unmittelbar vor einem Starkregenereignis

von Dr. Michael Diepolder, Sven Raschbacher und Prof. Dr. Thomas Ebertseder

Forschungsergebnisse der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft lassen darauf schließen, dass Starkregen direkt nach (organischer) Düngung bei Grünland über den Pfad Makroporen und Drainagen (Zwischenabfluss) erhebliche Belastungsspitzen für den P-Eintrag in Oberflächengewässer bedeuten können. Beim über die Drainage ablaufenden Wasser wurden in den Versuchen bei Gülleinjektion niedrigere P-Konzentrationen, P-Frachten und ein geringerer Anteil an partikulärem Phosphor gegenüber oberflächlicher Ausbringung gemessen. Die Ergebnisse werden im Hinblick auf Literatur und praktische Umsetzung diskutiert.

Einleitung

Nährstoffverluste aus landwirtschaftlich genutzten Flächen (sog. diffuse Quellen) können erheblich zur Belastung von Oberflächengewässern beitragen. Dies gilt vor allem für Phosphor, einem wichtigen Faktor für das Algenwachstum und damit für die Eutrophierung. Die Gefahr von sogenannten „Algenblüten“ nimmt vor allem dann rapide zu, wenn mehrere Faktoren zusammentreffen: Geringer Wasserwechsel im Oberflächengewässer, Flachgründigkeit und damit schnelle Erwärmung in den Frühjahrs- und Sommermonaten und ein im Verhältnis zur Wasserfläche großer Einzugsbereich mit P-Eintragspfaden.

Ziel eines Forschungsprojektes der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft war es, am Beispiel eines eutrophierten Stausees in der Oberpfalz für dessen Einzugsbereich die Ursachen und Anteil

le der einzelnen P-Belastungspfade bei der dortigen Acker- und Grünlandnutzung zu quantifizieren sowie Maßnahmen zur Verringerung des P-Eintrags in den See zu erarbeiten. Mit einem Verhältnis von 400:1 ist dabei der Einzugsbereich des Sees im Verhältnis zu seiner Wasserfläche als sehr groß zu bezeichnen.

Während die Erosion als Eintragspfad für die P-Belastung in Oberflächengewässer bereits gemeinhin bekannt ist, stellte sie auch im vorliegenden Fall den größten Anteil der P-Fracht in den See - hat die Bedeutung anderer P-Eintragspfade in Gewässer erst in jüngerer Zeit wissenschaftliche Beachtung erlangt. Dazu zählt auch der P-Austrag aus der Fläche durch Zwischenabfluss über Makroporen („preferential flow“) nach unmittelbar auf Düngungsmaßnahmen folgenden Starkregenereignissen (WIT-

HERS *et al.*, 2003). Dabei kann der Austrag aus Drainagen auch als Teil des Zwischenabflusses angesehen werden, was schematisch in Abbildung 1 dargestellt ist. Nach Ergebnissen der o.g. Autoren können Starkregenereignisse nach Düngungsmaßnahmen mehr als 50% des gesamten jährlichen P-Austrages bewirken.

Im Untersuchungsgebiet ist bei intensiver Rinderhaltung etwa die Hälfte der landwirtschaftlich genutzten Fläche Dauergrünland. Da dieses zum Teil drainiert ist, lag ein Schwerpunkt des o.g. Forschungsvorhabens in der Quantifizierung des P-Austrages aus Drainagen unter Wirtschaftsgrünland bei Düngerapplikation unmittelbar vor einem Starkregenereignis.

Es soll an dieser Stelle deutlich herausgestellt werden, dass es sich bei der

Abbildung 1: Transporte in Gewässer unter besonderer Berücksichtigung des Makroporen- und Zwischenabflusses

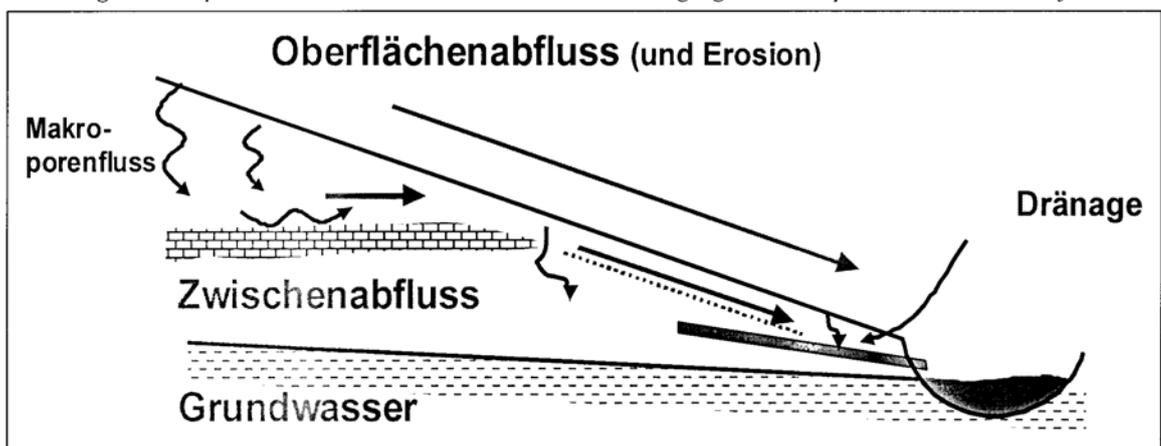
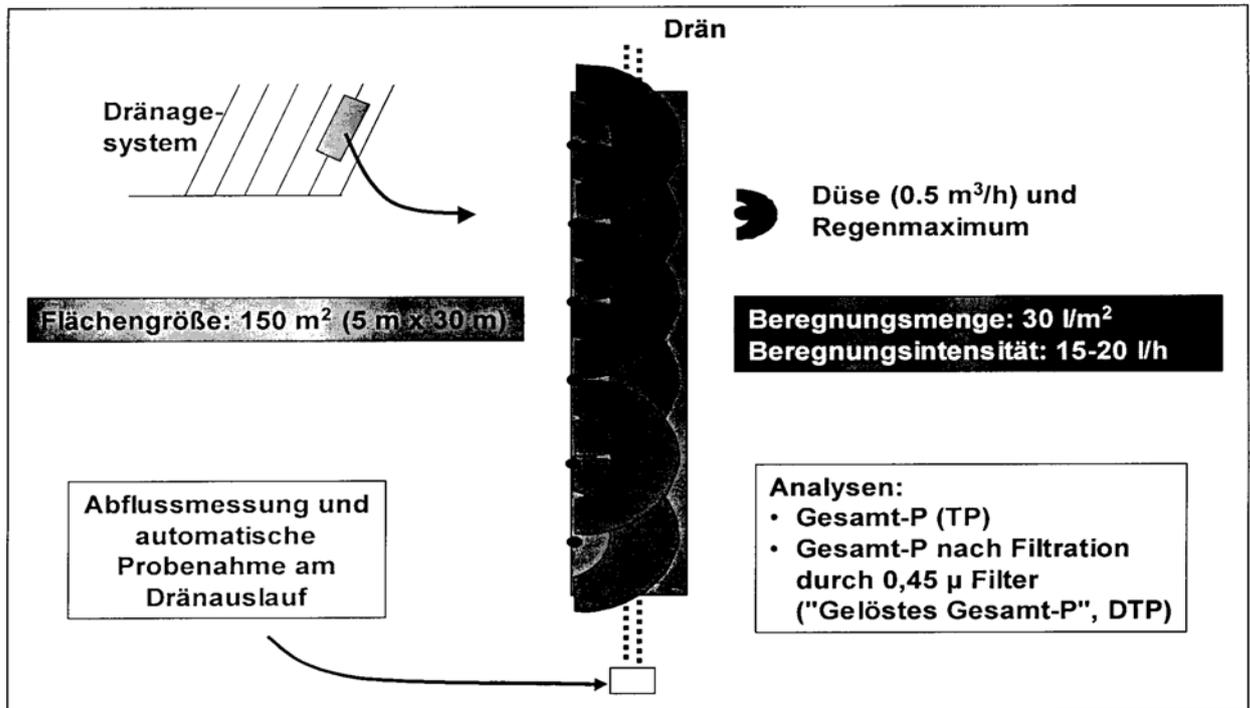


Abbildung 2: Aufbau und Durchführung der Beregnungsversuche



Versuchsanstellung (siehe Material und Methoden) um eine „Worst-Case-Situation“ handelt, die jedoch durchaus realitätsbezogen ist, bedenkt man die Auswirkungen von kräftigen Gewitterregen. In diesem Zusammenhang wurde auch der Frage nachgegangen, ob und inwiefern unter derartigen Bedingungen Unterschiede hinsichtlich der Gülleapplikations-Technik bestehen.

Material und Methoden

Die im folgenden beschriebenen Messungen wurden auf natürlichem Dauergrünland auf Pseudogley mit optimaler P-Versorgung (Stufe „C“, 14 mg P₂O₅/100g Boden) eines landwirtschaftlichen Betriebes im Einzugsbereich des „Eixendorfer Stausees“ (Landkreis Schwandorf/Oberpfalz) durchgeführt. Die Versuchsanlage bestand aus fünf nebeneinander liegenden Plots von je 150 m² (30 m x 5 m) Größe über einem bereits vorhandenen Drainagesystem (Sauger in 70 cm Tiefe mit 7 cm Durchmesser). Jeder Plot befand sich dabei mittig über je einem Drän. Das Starkregenereignis wurde mittels einer Beregnungsanlage simuliert. Die Beregnungsmenge betrug 30 l/m², die Beregnungsintensität lag bei 15-20 l/h.

Der Versuchsanlage ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

Die einzelnen Beregnungen wurden zu Vegetationsbeginn und bei geeignetem Wetter nach jedem Schnitt durchgeführt. Die Versuche wurden in einem dreijährigen Zeitraum durchgeführt.

Da die Böden naturgemäß unterschiedliche Ausgangswassergehalte aufwiesen, erfolgte am Abend vor der Gülleapplikation und dem künstlichen „Starkregenereignis“ solange eine Vorwässerung, bis der jeweilige Drän anfang zu laufen. Als Varianten wurden untersucht: Beregnung ohne Gülleapplikation (Null), Beregnung unmittelbar nach oberflächlicher Gülleausbringung mit Prallteller und praxisüblicher Technik (Gülle-Prall) sowie Beregnung nach Gülleapplikation mittels Injektion in 2 cm Tiefe (Gü-Inj.), wobei auch das hierfür verwendete Gerät in der Region in der Praxis eingesetzt wurde. Bei beiden Güllevarianten wurden einheitlich jeweils 25 m² Rindergülle, entsprechend im Mittel ca. 15 kg P (bzw. ca. 34 kg P₂O₅) ausgebracht. Die drei Versuchsvarianten rotierten im Verlauf der insgesamt drei Untersuchungs-jahre auf den fünf Plots, so dass eine

gleichmäßige Verteilung der Versuchsvarianten (Randomisierung) über einen räumlich-zeitlichen Ansatz erzielt wurde. Die Abflussmessung und Probenahme für die P-Bestimmung im Labor erfolgte automatisch jeweils am Ende eines Dräns, der zu diesem Zweck aufgegraben und mit einem automatischen Probenehmer bestückt war. Das Dränwasser wurde auf Gesamt-P (TP) und nach Filtration durch einen Filter mit 0,45 Mikrometer Durchmesser auf „Gelöstes Gesamt-P“ (DTP) untersucht.

Hingewiesen sei, dass Phosphor in Tabellen und Text als Rein-P und nicht als Oxidform angegeben ist, sofern dies nicht ausdrücklich anders dargestellt ist.

Ergebnisse und Diskussion

Bei der gewählten Beregnungsintensität und -menge betrug die durchschnittliche Abflussrate 13 % (4,0 l/m²). Trotz der Vorwässerung der Parzellen am Abend vor der eigentlichen künstlichen Beregnung schwankten die Abflüsse am Drän, die P-Konzentrationen und die abgetragenen P-Frachten selbst bei gleichen Varianten in einem weiten Rahmen. Dies erfordert eine differenzierte Betrachtung.

Tabelle 1: P-Frachten und P-Konzentrationen im Drainageabfluss nach künstlich erzeugten Starkregenereignissen

Parameter	Gesamt-Mittel (n = 29)	Effekt Varianten (Pr>F)		Varianten		
				ohne Gülle (n = 10)	G-Prall (n = 9)	G-Inj. (n = 10)
Abfluss am Drän (l/m ²)	4,0	0,176 n.s.	Mittel v (%) Min – Max	5,6 a 77 0,9 – 15,8	3,0 a 70 0,3 – 6,0	3,4 a 76 0,8 – 8,8
Düngung (kg TP/ha)	14,2 (n = 19)	0,680 n.s.	Mittel v (%) Min – Max	-	13,9 a 27 10,0 – 19,7	14,6 a 23 10,0 – 19,7
TP-Fracht (g/ha)	150	0,008 **	Mittel v (%) Min – Max	45,4 bc 62 4 – 82	299,8 a 95 42 – 960	120,0 b 72 34 – 317
DTP-Fracht (g/ha)	69	0,028 *	Mittel v (%) Min – Max	34,6 b 68 2 – 72	115,3 a 88 13 – 282	61,6 ab 60 13 – 126
DTP/TP (%)	57	0,0005 ***	Mittel v (%) Min – Max	75 a 23 49 – 95	40 c 40 7 – 57	54 b 32 33 – 93
Konz. TP (mg/l)	5,4	< 0,0001 ***	Mittel v (%) Min – Max	0,85 bc 47 0,49– 1,81	12,02 a 61 3,0 – 24,2	3,89 b 33 2,1 – 6,0
Konz. DTP (mg/l)	2,1	< 0,0001 ***	Mittel v (%) Min – Max	0,63 c 47 0,25– 1,20	3,90 a 43 1,5– 6,1	2,01 b 34 1,1– 3,4

Beratung und
BildungErklärungen zu Tabelle 1

Effekt Varianten Pr>F): Höhe der Irrtumswahrscheinlichkeit (z.B. 0,176 = 17,6%) bedeutet, dass signifikante Effekte zwischen den Varianten vorhanden sind. Eine Irrtumswahrscheinlichkeit von >0,05 bedeutet definitionsgemäß, dass keine signifikanten Unterschiede (n.s.) zwischen den Varianten vorliegen. Von signifikanten Unterschieden (*) spricht man, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit zwischen >0,01 und 0,05 liegt. Eine Irrtumswahrscheinlichkeit im Bereich von >0,001 bis 0,01 wird als hoch signifikant (**) und eine solche von 0,001 und kleiner als sehr hoch signifikant (***) bezeichnet.

Mittelwerte: Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Mittelwertsunterschiede bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%.

v (%): Der Variationskoeffizient (Standardabweichung*100/Mittelwert) erlaubt einen Vergleich der Streuung der Einzelwerte um den Mittelwert bei verschiedenen Merkmalen, unbeeinflusst von der Art und Größe des Mittelwertes. So zeigt z.B. bei der Variante „G-Prall“ der Vergleich der Variationskoeffizienten zwischen der TP-Fracht (95%) und der TP-Konzentration (61%), dass bei letzterer die Einzelwerte relativ betrachtet wesentlich weniger um den Mittelwert streuten.

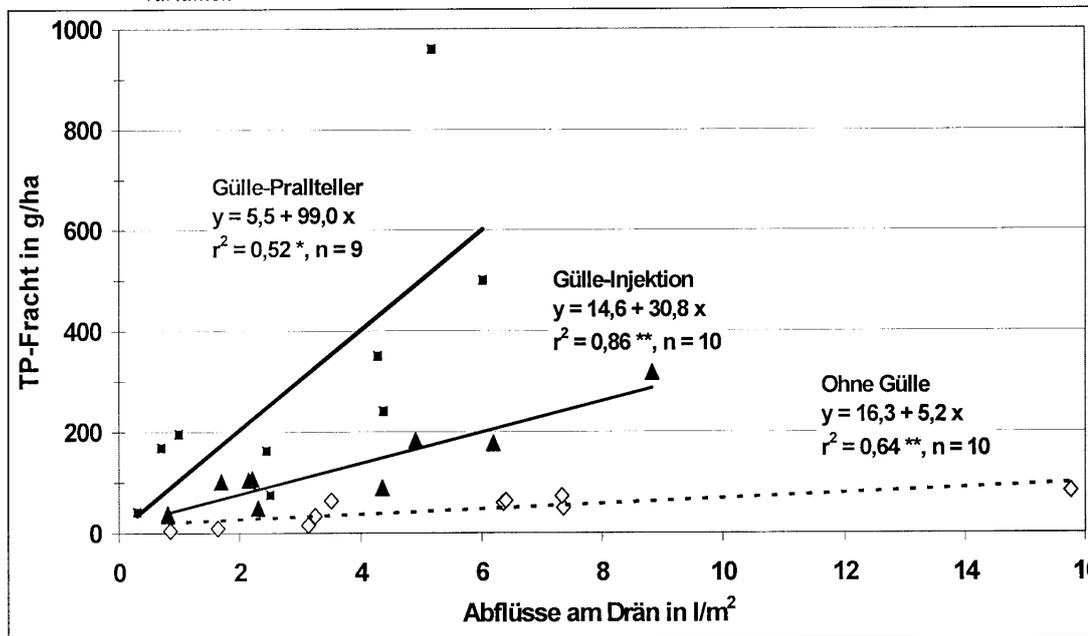
Tabelle 1 zeigt, dass im Mittel aller Versuche nach einem künstlichen „Starkregenereignis“ über die Drainage ohne Gülledüngung 45 g Gesamtphosphor (TP), nach Gülleapplikation mit Prallteller 300 g TP und nach Gülle-Injektion 120 g TP pro Hektar ausgetragen wurden. Der maximale P-Austrag (siehe Gülle-Prall_{max}) erreichte einen Wert von knapp einem

Kilogramm Gesamt-Phosphor (TP), was 2,2 Kilogramm P₂O₅ pro Hektar entspricht.

Bezogen auf die über die Gülle ausgebrachte P-Menge betrug der apparente, d.h. scheinbare Verlust des Gülle-TP [(Gülle-TP – Null-TP)/Dünge-TP] am Drain 0,5 % bei Schlitztechnik bzw. 1,8 % beim Pralltellerverfahren.

Diese Zahlen erscheinen auf den ersten Blick niedrig, insbesondere wenn man die im Vergleich dazu die verhältnismäßig hohe Nährstoffmenge von 30-35 kg Phosphor bzw. 70-80 kg P₂O₅ pro Hektar gegenüberstellt, die bei den gegebenen Standortverhältnissen vom Grünland abgefahren werden (Lfl, 2003). Jedoch ist zu berücksichtigen,

Abbildung 3: Beziehung zwischen Abfluss-Menge und Austrag an Gesamt-Phosphor (TP) bei verschiedenen Düngungsvarianten



Beratung und Bildung

dass unter den gewählten Versuchsbedingungen bereits ohne Düngung im Mittel 8% bzw. bei Gülledüngung 20-50% der gesamten durchschnittlichen jährlichen P-Fracht aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen (0,6 kg TP/ha) im Einzugsgebiet des Eixendorfer Stausees erreicht wurden. Bezieht man noch die Extremwerte von Tabelle 1 in die Betrachtung mit ein und berücksichtigt die Ergebnisse von DIEPOLDER *et al.* (2005), woraus sich

bei undrainiertem Grünland in anderen Naturräumen ein P-Austrag aus dem Wurzelraum in einer Größenordnung von ca. 200-500 g TP bzw. 0,5-1,1 kg P₂O₅ pro Hektar und Jahr ermitteln ließ, der sich unter ungünstigen Standortvoraussetzungen (organische Düngung bei lückiger Grasnarbe mit Mäuseschäden) auf 1,2 kg TP bzw. 2,7 kg P₂O₅ erhöhte, so gewinnen die beim „Eixendorfer Stausee“ gemessenen P-Austräge eine andere Dimension. Es

wird deutlich, dass der Austragspfad Makroporen - Drainage (Zwischenabfluss) bei einzelnen Starkregenereignissen nach einer kurz zurückliegenden Gülledüngung erheblich zur jährlichen Belastung eines Gewässers beitragen kann. Ebenfalls scheint die Wahl der Ausbringtechnik bei der Düngung eine große Rolle zu spielen. Die landläufige Meinung „Phosphor wird insbesondere bei Grünland kaum aus dem Boden ausgetragen“ sollte daher bei Diskussionen, wo es um Wasserqualität geht, sehr vorsichtig benutzt werden!

Tabelle 2: Beziehung zwischen Abflussmenge am Drän [x (l/m²)] und P-Fracht [y (g/ha TP, DTP)] sowie P-Konzentration [y (mg/l TP, DTP)]

Y	Varianten		
	ohne Gülle (n = 10)	G-Prall (n = 9)	G-Inj. (n = 10)
Fracht TP	$Y = 16,3 + 5,23x$ $r^2 = 0,64^{**}$	$Y = 5,5 + 99,00 x$ $r^2 = 0,52^*$	$Y = 14,6 + 30,77x$ $r^2 = 0,86^{**}$
Fracht DTP	$Y = 9,0 + 4,61x$ $r^2 = 0,70^{**}$	$Y = 18,1 + 44,9 x$ $r^2 = 0,84^{***}$	$Y = 18,8 + 12,47x$ $r^2 = 0,77^{***}$
Konz. TP	$r^2 = 0,02$ n.s.	$r^2 = 0,18$ n.s.	$r^2 = 0,20$ n.s.
Konz. DTP	$r^2 < 0,01$ n.s.	$r^2 < 0,01$ n.s.	$r^2 = 0,21$ n.s.

Erklärung zu * siehe Anmerkung Tabelle 1 r^2 = Bestimmtheitsmaß

Beziehung zur Abflussmenge

Relativ unabhängig von den Varianten schwankten die Abflüsse am Drän wohl aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität des Porensystems zwischen 0,3 und 16 l/m². Aus Tabelle 2 und Abbildung 1 geht hervor, dass - trotz der starken Streuung - mit steigender Abflussmenge bei allen Varianten eine kontinuierliche und signifikante ($r^2 = 0,52$ bis $0,86$) Zunahme der ausgetragenen TP- und DTP-Frachten zu verzeichnen war.

Dabei war der Anstieg der TP-Fracht

mit zunehmender Abflussmenge bei breitflächiger Gülleausbringung mit dem Prallteller um den Faktor 19 und bei Gülleinjektion um den Faktor 6 höher als bei der Kontrollvariante (Verlagerung von Boden-TP). Für das gelöste Phosphor (DTP) wurden bei den Güllevarianten ebenfalls signifikante, jedoch deutlich weniger steile Anstiege gemessen (siehe Tabelle 2). Das Verhältnis von „Gülle-Prall“ und „Gülle-Inj.“ zu „Null“ betrug hier ca. 10:1 bzw. 2,7:1. Damit zeichnete sich für beide P-Fractionen eine ähnliche Abstufung zwischen den beiden Gülle-Applikationstechniken zugunsten der Injektion ab.

P-Formen

Bei der ungedüngten Kontrollvariante bestand das ausgetragene Phosphor weitestgehend aus gelöstem Phosphor, während bei der Ausbringung mit dem Prallteller rund 60 % und bei Gülleinjektion rund 50 % der am Drän abgelaufenen P-Fracht aus partikulärem Phosphor bestand (siehe Tabelle 1).

Der insgesamt höhere Anteil an partikulärem Phosphor am ausgetragenen Gesamt-P bei den Güllevarianten bzw. der niedrigere Anstieg an DTP im Verhältnis zu TP (siehe Tabelle 2) kann als ein deutlicher Hinweis darauf angesehen werden, dass nur ein geringer Teil des Dünger-P über die Bodenmatrix in die Drainagen gelangt, sondern der Haupt-Eintragspfad direkt über die Makroporen erfolgt. Beispiele für derartige Makroporen sind Regenwurmgänge, abgestorbene Wurzelgänge oder Schrumpfungsrisse. Gülle-Phosphor, welches breit verteilt auf der Oberfläche liegt (Ausbringung mit Prallteller), scheint nach Starkregenereignissen stärker von der Auswaschung betroffen zu sein als in den Boden injiziertes Phosphor.

P-Konzentration

Aus ökologischer Sicht ist neben der P-Fracht auch die Konzentration im Dränwasser entscheidend. Interessanterweise bestand bei keiner Variante eine Beziehung zu der Abflussmenge ($r^2 = 0,01$ bis $0,21$, siehe Tabelle 2). Dies lässt darauf schließen, dass im Falle hoher anfallen-

der Wassermengen aus den Drainagen nicht zwangsläufig mit niedrigen Nährstoffkonzentrationen („Verdünnungseffekt“) des von der Fläche abfließenden Wassers zu rechnen ist.

Wohl aber zeigten sich im Mittel signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten bei den TP- und DTP-Konzentrationen, wobei auch hier durch die organische Düngung und insbesondere bei der oberflächlichen Ausbringung ein deutlicher Anstieg der P-Konzentrationen gegenüber der Kontrollvariante (Null) zu verzeichnen war.

Bei mehrjährigen Untersuchungen von Saugkerzenanlagen unter Wirtschaftsgrünland fanden *DIEPOLDER et al. (2005)* unter organisch gedüngten Parzellen durchschnittliche P-Konzentrationen von $0,04-0,39$ mg TP/l im langsam dränenden Bodenwasser. Hierbei zeichnete sich nicht eindeutig eine erhöhte P-Belastung bei gedüngten gegenüber ungedüngten Varianten ab. Vergleicht man diese Werte mit den in Tabelle 1 aufgeführten Konzentrationen von ca. $4-12$ mg TP/l, so lässt sich folgern: Auf drainiertem Grünland können Starkregenereignisse, welche unmittelbar auf Gülledüngung folgen, nicht nur wegen der ausgetragenen P-Frachten, sondern auch hinsichtlich der auftretenden P-Konzentrationen im abfließenden Drainagewasser Phosphor-Belastungsspitzen für Gewässer darstellen. Die gemessenen P-Konzentrationen lagen im Vergleich zu aufgefangenem Bodenwasser unter Saugkerzenanlagen etwa um ein bis zwei Zehnerpotenzen höher! Deutliche Vorteile zeichneten sich auch hier zugunsten der Gülleinjektion gegenüber der oberflächlichen Ausbringung ab.

Fazit

Starkregenereignisse nach Düngungsmaßnahmen können nicht nur im Ackerbau, sondern auch auf Wirtschaftsgrünland über Drainagen gerade im Einzugsbereich von sensiblen Oberflächengewässern ökologisch bedenklich sein.

Allerdings stößt die daraus resultierende Konsequenz, Güllegaben vor zu erwartenden starken Niederschlägen zu

unterlassen, in der Praxis sicherlich auf Probleme hinsichtlich der Wettervorhersage. Außerdem besteht zweifelsohne ein gewisser Zielkonflikt zwischen der Abwägung von P-Verlusten in Oberflächengewässern und Ammoniak-Verlusten in die Luft.

Durch die Wahl der Gülleapplikationstechnik (Injektion statt oberflächliche Ausbringung mit Prallteller) können P-Einträge verringert werden. Allerdings sind bei der Gülleinjektion sowohl betriebswirtschaftliche Aspekte (teurere Technik, höherer Verschleiß, geringere Schlagkraft) und bei Grünland auch pflanzenbauliche Gesichtspunkte (mögliche Narbenverletzungen, evtl. Zunahme von Verunkrautung) zu berücksichtigen.

Wohl aber deuten die dargestellten Ergebnisse darauf hin, dass die Gülleinjektion trotz der genannten Nachteile gerade in ökologisch sensiblen Gewässern mit hohem Anteil an drainierten Grünlandflächen im Einzugsbereich eine wirkungsvolle Möglichkeit bietet, die P-Einträge zu senken. Inwieweit dies auch für andere nicht-flächige Applikationstechniken (Schleppschlauch und Schleppschuh) zutrifft, konnte bislang aus Gründen des Versuchsumfanges nicht geklärt werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Danksagung

Gedankt werden soll an dieser Stelle dem Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten und der EU für die Bereitstellung von Forschungsmitteln, sowie allen Beteiligten, die an dem langjährigen Projekt mitgewirkt haben.

Literatur

BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2003): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland; 7. überarbeitete Auflage, Hrsg. LfL, 81 Seiten, 2003; als Internetversion (www.LfL.bayern.de/IAB/).
DIEPOLDER, M., JAKOB, B., HEIGL, L. (2005): Durchschnittliche P-Konzentrationen und P-Frachten im langsam dränenden Sickerwasser – Ergebnisse von Saugkerzenanlagen der LfL, Vortrag bei einer internen

Fachtagung zu einem Interreg IIIA-Projekt am 22. 03. 2005 in Freising, LfL, unveröffentlicht.

WITHERS, P.J.A., ULEN, B., STAMM, Ch., BECHMANN, M. (2003): Incidental phosphorus losses – are they significant and can they be predicted? J. Plant Nutr. Soil Sci., 166, 459-468.

*Dr. Michael Diepolder, Landwirtschafts-
oberrat; Sven Raschbacher, Landwirtschafts-*

oberinspektor; beide Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz, Vöttinger Straße 38, 85354 Freising und Prof. Dr. Thomas Ebertseder, Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Land- und Ernährungswirtschaft, Am Hofgarten 1, 85350 Freising



Führungshilfe

Die Mitarbeiter wollen keine
„weichen“ Vorgesetzten:
Aufrichtigkeit und klare Linie
sind gefragt.