

Projekt „Saubere Seen“ - Untersuchungen zu Phosphorausträgen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen

Michael Diepolder^{1*} und Sven Raschbacher¹

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Saubere Seen“ wurden von unterschiedlich strukturierten Wassereinzugsgebieten die ausgetragenen Phosphorfrachten ermittelt. Ein Kernpunkt lag hierbei in der Quantifizierung unterschiedlicher Austragspfade, speziell der aus landwirtschaftlichen Nutzflächen. Die mittleren Phosphor-Frachten aus der LN bewegten sich in einer Spannweite von 0,20 bis 0,64 kg Gesamt-Phosphor (TP) je Hektar und Jahr. P-Austragspfade aus landwirtschaftlich genutzten Flächen waren in erster Linie die Erosion und der vertikale Austrag durch die Bodenmatrix. Der oberflächliche P-Abfluss vom Grünland spielte nur eine untergeordnete Rolle.

In einem weiteren Projektschwerpunkt wurde mit Beregnungsversuchen gezeigt, dass Starkregenereignisse 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 dem Pralltellerverfahren gemessen.

Ebenfalls konnte durch Beregnungsversuche bewiesen werden, dass bei hängigen Grünlandflächen ungedüngte Randstreifen in Gewässernähe dazu beitragen können, die P-Konzentration im abfließenden Wasser und damit den P-Austrag nach intensiven Niederschlägen signifikant zu mindern.

Einleitung

Zielsetzung des INTERREG-III-A-Projektes „Saubere Seen“ war es, im Einzugsgebiet von zwei eutrophierten Stauseen in der Oberpfalz/Bayern anhand von mehrjährigen Messreihen den Phosphoreintrag zu quantifizieren sowie Erkenntnisse über die Ursachen und Wege des Phosphoreintrags zu gewinnen und daraus Möglichkeiten zu dessen Reduzierung abzuleiten. Im folgenden Beitrag werden drei Teilprojekte des Forschungsprojektes vorgestellt und deren Ergebnisse diskutiert:

- P-Austräge aus Gebieten mit unterschiedlicher Landnutzung
- P-Austräge über Drainagen aus Grünlandflächen nach Starkregenereignissen (Beregnungsversuche)

Schlagwörter: Oberflächengewässer, Drainagen, Randstreifen, Beregnungsversuch, P-Austräge

Summary

Within the framework of the research project „clean lakes“ P-loads from different catchment areas were calculated. Primary aim was the quantification of different forms of P-losses mainly from agriculturally used areas. Mean P-loads ranged from 0.20 to 0.64 kg total P per hectare and year. P-losses from agriculturally used areas were dominated by soil erosion and leaching. P-losses from grasslands by surface runoff were of minor importance.

Our irrigation experiments showed, that intense rain events immediately after the application of an organic fertilizer to grassland soils can lead to remarkable P-inputs into surface waters through macro-pores and drainages (interflow). The injection of slurry resulted in lower P-concentrations, lower P-loads and a lower fraction of particulate P in the drain-water in comparison with slurry application by baffle.

Furthermore, our irrigation experiments showed, that unfertilized buffer-strips near surface waters can contribute to a decrease in the P-concentration of the water, that is running off from steeper slopes, resulting in lower P-outputs from grasslands after intense rain events.

Keywords: surface water, drainages, buffer-strips, irrigation experiment, P-losses

- P-Austräge aus hängigem Grünland nach Starkregenereignissen und Wirkung eines Randstreifens (Beregnungsversuche)

P-Austräge aus Gebieten mit unterschiedlicher Landnutzung

Material und Methoden

Zur Erfassung der Nährstoffeinträge in die Gewässer wurden verschiedene Messstellen eingerichtet. Um einen möglichst genauen Überblick über die verschiedenen Frachtanteile (punktuell, diffus) zu erhalten, wurde am Seezulauf des eu-

¹ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz, Lange Point 12, D-85354 FREISING

* Ansprechpartner: michael.diepolder@lfl.bayern.de

trophen Eixendorfer Stausees eine Messstelle eingerichtet, welche die Nährstoffeinträge aus dem Gesamteinzugsgebiet (GEZG) erfassen sollte. Zudem wurden in vier unterschiedlich großen (43 ha bis 289 ha) Teileinzugsgebieten (TEZG) mit unterschiedlichen Flächenanteilen an Acker-, Grünland-, Wald und Siedlungsflächen, unterschiedlicher Erosionsgefährdung der Ackerflächen sowie unterschiedlichem Grad der Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion (Viehichte, Anteil dräniertes Flächen) Messstellen installiert.

An den Messstellen wurden die Nährstoffeinträge sowohl qualitativ als auch quantitativ erfasst, d.h. es wurden zum Einen die P-Konzentrationen und zum Anderen die Abflussmengen in den Fließgewässern bestimmt. Zur kontinuierlichen Probenahme an den Hauptmessstellen wurden automatische Probenehmer eingesetzt, die mit einem Einperlmodul versehen waren, welches die Pegelhöhe misst und diese in Intervallen von 15 Min. abspeichert. Aus den Pegelhöhen wurde der Durchfluss über Formeln für geeichte V-Wehre, welche in den Teileinzugsgebieten verwendet wurden, errechnet. Für die Messstelle am Seezulauf wurde der Durchfluss anhand einer gemessenen Pegel-Abfluss-Kurve ermittelt.

Die Berechnung des durchschnittlichen jährlichen Eintrags an Gesamt-P (TP-Fracht) aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) in die Vorfluter erfolgte indirekt durch Differenzbildung. Es wurden von der (gemessenen) gesamten TP-Fracht aus einem Einzugsgebiet die aus der Literatur und eigenen stichpunktartigen Untersuchungen für die Region bekannten (hochgerechneten) TP-Frachten aus Wald, Teichwirtschaft, Siedlung und Verkehr abgezogen.

Die Ermittlung des Umfangs der jeweiligen Einzugsgebiete erfolgte mittels topographischer Karten im Maßstab 1:25.000 mit Hilfe des EDV-Programmes „ArcView“ anhand der Höhenlinien. Es erwies sich hierbei als hilfreich, vor Ort eine weitere Überprüfung vorzunehmen. Die Ermittlung der Flächengröße und Flächennutzungen erfolgte mittels Luftbilder sowie topographischer Karten in ArcView und mit Hilfe der InVeKos-Daten der bayerischen Landwirtschaftsverwaltung. Informationen zum Viehbesatz

und zur Nutzung landwirtschaftlicher Förderprogramme stammen ebenfalls aus InVeKos-Daten.

Ergebnisse

Im oberen Teil der *Tabelle 1* sind neben einer Charakterisierung der landwirtschaftlichen Nutzung die kalkulierten TP-Frachten aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche in den jeweiligen Einzugsgebieten dargestellt. Der untere Teil zeigt eine Abschätzung der einzelnen Herkunftsbereiche der kalkulierten TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche.

Die durchschnittlichen jährlichen TP-Frachten aus den landwirtschaftlichen Nutzflächen bewegten sich in einer Spannweite von 0,20 kg TP/ha und 0,64 kg TP/ha.

Die Obergrenze der oben angegebenen Spannweite wurde im TEZG Saxlmühle erreicht. Die Erklärung für den höchsten TP-Austrag dürfte darin zu sehen sein, dass sich die landwirtschaftliche Nutzung in diesem Teileinzugsgebiet durch viehstarke Betriebe und einen hohen Anteil an vorwiegend mittel bis stark erosionsgefährdeten Ackerflächen auszeichnet. Ebenfalls stellte ein kalkulierter Anteil der Erosion von fast zwei Drittel an der gesamten TP-Fracht aus den landwirtschaftlichen Nutzflächen das Maximum der vier Teileinzugsgebiete dar.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lässt sich somit für vergleichbare Einzugsgebiete mit einem hohen Anteil an Ackerbau in erosionsgefährdeten Lagen übertragen und belegen, dass in der Förderung von erosionsmindernden Maßnahmen wesentliche Ansatzpunkte für die Minderung von diffusen P-Austrägen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen zu sehen sind. Dies gerade deshalb, weil nach Analyse der Messreihen in vielen Fällen hohe P-Frachten mit hohen Abflussraten im Winterhalbjahr einhergingen, also in einer Jahreszeit, wo auf Ackerflächen häufig nur eine fehlende bis geringe Bodenbedeckung vorhanden ist.

Wie stark sich – neben einem hohen Waldanteil – eine ganzjährige Bodenbedeckung auf die Senkung der P-Frachten in Gewässer auswirken kann, zeigen die Teileinzugsgebiete Irlach und Breitenried. Zu vermerken ist allerdings, dass

Tabelle 1: Übersicht zur landwirtschaftlichen Nutzung, zur kalkulierten TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche sowie Abschätzung des Anteils von TP-Frachten aus einzelnen Austragspfaden in den jeweiligen Einzugsgebieten

Parameter	TEZG Saxlmühle	TEZG Irlach	TEZG Zillendorf	TEZG Breitenried	GEZG Eixendorf
Flächennutzung der LN (%)					
- Grünland	24	50	58	70	49
- Acker	76	50	42	30	51
- davon mittel – stark erosionsgefährdet	70	52	61	0	n.b.
Besonderheiten	Verrohrung	viele Dränagen	viel Klee gras	extensives GL	-
Ø Viehbesatz (GV/ha LN)	1,8	1,8	1,6	1,1	1,7
Ø TP-Fracht aus LN (kg TP/ha u. Jahr)	0,64	0,47	0,55	0,20	0,56
	Anteil unterschiedlicher Austragspfade an der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche (in %)				
Oberflächenabfluss Grünland	2	8	5	14	3
Erosion von Ackerflächen	65	47	48	18	60
Sickerw., Zwischenabfluss, Dränagen	33	45	47	67	37

auch in Irlach und Breitenried deutliche Unterschiede in Bezug auf die TP-Frachten aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche bestanden. Dabei ließ sich für das TEZG Irlach ein wesentlich höherer mittlerer TP-Austrag (0,47 kg TP/ha und Jahr) aus der LN ableiten als für das TEZG Breitenried (0,20 mg TP/ha und Jahr). Verständlich wird dies, wenn man berücksichtigt, dass beim TEZG Irlach der Ackeranteil an der LN – bei nicht unerheblicher Erosionsgefährdung – sowie der durchschnittliche Viehbesatz wesentlich höher lagen als beim TEZG Breitenried.

Mit einem P-Austrag aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) von durchschnittlich 0,20 kg TP/ha und Jahr (entsprechend 0,46 kg P_2O_5) wies das TEZG Breitenried den geringsten P-Austrag aller Einzugsgebiete auf. Ursache dafür sind die extensive Form der Landwirtschaft, bestehend aus einem hohen Grünlandanteil (70 % der LN), einer vergleichsweise geringen Viehdichte (1,1 GV/ha) und Ackerflächen (30 % der LN), die keine bedeutende Erosionsgefährdung aufwiesen. Die in Breitenried gewonnenen Erkenntnisse können als ein Beispiel dafür gewertet werden, bis zu welcher Grenze sich diffuse P-Belastungen aus der Landwirtschaft senken lassen. Aber auch hier besteht ein in der Relation (siehe *Tabelle 1*) bemerkenswert hoher vertikaler P-Austragspfad durch Sickerwasser, Zwischenabfluss und/oder evtl. Drainagen. Dieser dürfte sich in der Praxis kaum senken lassen.

Schlussfolgerung

Unter Berücksichtigung der wichtigen Tatsache, dass die P-Konzentration im Zulauf nicht identisch mit der P-Konzentration im See sein muss, lässt sich vorsichtig folgender Schluss ziehen: Nur extrem extensive, grünland- und walddreiche Landnutzungssysteme in Kombination mit einer optimalen Abwassersituation im Siedlungsbereich können eine für touristische Zwecke befriedigende Gewässerqualität des Eixendorfer Stausees gewährleisten. Gegenwärtig ist dies aber unter den gegebenen regionalen Verhältnissen nicht der Fall, wie die Ergebnisse zeigen. Vielmehr wurden selbst beim TEZG Breitenried bei weitgehender Ausschöpfung landwirtschaftlicher Extensivierungsmöglichkeit, einem hohem Grünland- und Waldanteil mit 0,09 mg TP/l wesentlich höhere P-Konzentrationen gemessen, als dies für mesotrophe Verhältnisse in stehenden Gewässern (ca. 0,03 mg TP/l) erforderlich wäre. Das heißt selbst wenn alle landwirtschaftlichen Nutzflächen des GEZG langfristig den gleichen vergleichsweise niedrigen P-Austrag wie die Flächen des TEZG Breitenried hätten und gleichzeitig alle anderen Rahmenbedingungen gleich blieben, bliebe der Eixendorfer Stausee eutroph.

Hier zeigen sich demnach Grenzen des möglichen Gewässerschutzes. Es zeigt sich aber auch die nicht vollständig aufzuhebende Diskrepanz zwischen einer seit langem bestehenden landwirtschaftlich betonten Flächennutzung unter gegebenen ökonomischen Rahmenbedingungen einerseits sowie den aus gesamtgesellschaftlicher Sicht ebenfalls nachvollziehbaren gestiegenen Anforderungen (Freizeit, Tourismus) an die Gewässerqualität neu geschaffener (flacher) Seen, die ursprünglich primär dem Hochwasserschutz dienen sollten. Wohl aber weisen die Ergebnisse

des Forschungsprojekts darauf hin, dass durchaus noch reale Optimierungsmöglichkeiten sowohl im kommunalen Abwassersektor als auch in der landwirtschaftlichen Produktionstechnik bestehen, die es auszuschöpfen gilt.

P-Austräge über Drainagen aus Grünlandflächen nach Starkregenereignissen (Berechnungsversuche)

Einleitung

Während die Erosion als Eintragspfad bereits gemeinhin bekannt ist, 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 (WITHERS et al. 2003). Dabei kann der Austrag aus Drainagen auch als Teil des Zwischenabflusses angesehen werden. Nach Ergebnissen der o.g. Autoren können Starkregenereignisse nach Düngungsmaßnahmen mehr als 50 % des gesamten jährlichen P-Austrages bewirken.

Es soll an dieser Stelle deutlich herausgestellt werden, dass es sich bei der 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 P_2O_5 /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. Der schematische Aufbau

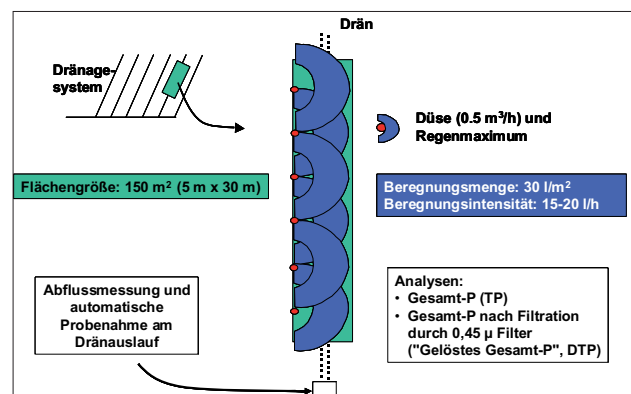


Abbildung 1: Aufbau und Durchführung der Berechnungsversuche

des Versuchs wird in *Abbildung 1* gezeigt. Die einzelnen Berechnungen 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 Untersuchungsjahre 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 ausgetragenen P-Frachten selbst bei gleichen Varianten in einem weiten Rahmen. Dies erfordert eine differenzierte Betrachtung.

Mittlere P-Austräge

Tabelle 2 zeigt, dass im Mittel aller Versuche nach einem künstlichen „Starkregenereignis“ über die Drainage ohne Gülledüngung 45 g Gesamtphosphor (TP), nach Gülleappli-

Tabelle 2: P-Frachten und P-Konzentrationen im Drainageabfluss nach künstlich erzeugten Starkregenereignissen

Parameter	Gesamt-Mittel (n = 29)	Effekt Varianten (Pr>F)		ohne Gülle (n = 10)	Varianten 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 76 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

Erklärungen zu *Tabelle 2*:

Effekt Varianten Pr>F): Höhe der Irrtumswahrscheinlichkeit (z.B. 0,176 = 17,6%), 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.

kation 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, erreichte bei letzterem aber im Maximalfalle eine Höhe von rund 5 %.

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, 2007).

Jedoch ist zu berücksichtigen, dass unter den gewählten Versuchsbedingungen bereits ohne Düngung im Mittel 8 %, bei flächiger Gülledüngung über 50 % und bei der flachen Gülleinjektion ca. 20 % von der gesamten durchschnittlichen jährlichen P-Fracht aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen (0,56 kg TP/ha) im Einzugsgebiet des Eixendorfer Stausees erreicht wurden. Versuchsergebnisse von DIEPOLDER et al. (2006) ergaben bei undrainiertem Grünland im Allgäuer Alpenvorland einen jährlichen P-Austrag aus dem Wurzelraum in einer Größenordnung von ca. 300-400 g TP bzw. 0,7-0,9 kg P₂O₅ pro Hektar und Jahr. Bezieht man die Extremwerte von *Tabelle 2* in die Betrachtung mit ein, so wird die Bedeutung des Zwischenabflusses aus Drainagen – und der damit verbundenen P-Fracht – gerade nach direkt auf Düngungsmaßnahmen folgenden Starkregenereignissen ersichtlich.

Es wird deutlich, dass die Technik der Gülleapplikation eine bedeutende Rolle zu spielen scheint. Bemerkenswert ist aber auch, dass bei fehlender Düngung vor einem Starkregenereignis Phosphor ausgetragen wurde.

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 *Abbildung 2* und *Tabelle 3* geht hervor, dass - trotz der

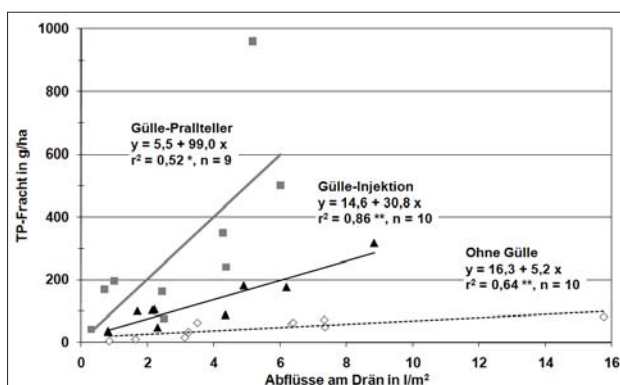


Abbildung 2: Beziehungen zwischen Abfluss-Menge und Austrag an Gesamt-Phosphor (TP) bei verschiedenen Düngungsvarianten

Tabelle 3: 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	$y = 16,3 + 5,23x$ $r^2 = 0,64$ **	$y = 5,5 + 99,00 x$ $r^2 = 0,52$ *	$y = 14,6 + 30,77 x$ $r^2 = 0,86$ **
Fracht DTP	$y = 9,0 + 4,61x$ $r^2 = 0,70$ **	$y = 18,1 + 44,9 x$ $r^2 = 0,84$ ***	$y = 18,8 + 12,47 x$ $r^2 = 0,77$ ***
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.

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 3*). 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 der 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 2*). 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 3*) 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 Schrumpfrisse. Gülle-Phosphor, welcher breit verteilt auf der Oberfläche liegt (Ausbringung mit Prallteller), scheint nach Starkregenereignissen stärker von der Auswaschung betroffen zu sein als in den Boden injizierter bzw. nicht-flächig applizierter 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 3*). Dies lässt darauf schließen, dass im Falle hoher anfallender Wassermengen aus den Drainagen nicht zwangsläufig mit niedrigen Nähr-

stoffkonzentrationen („Verdünnungseffekt“) des von der Fläche abfließenden Wassers zu rechnen ist.

Zwischen den einzelnen Varianten zeigten sich im Mittel signifikante Unterschiede 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. So betragen die P-Konzentrationen im Drainagewasser nach Starkregen bei der Variante ohne vorherige Gülleapplikation im Mittel 0,85 mg TP/l bzw. 0,63 mg DTP/l. Diese Werte erhöhten sich bei der flachen Gülleinjektion nur tendenziell auf 3,9 mg TP/l bzw. 2,0 mg DTP/l. Sie stiegen jedoch im Falle des konventionellen Pralltellerverfahrens sprunghaft und hoch signifikant absicherbar auf 12,0 mg TP/l bzw. 3,9 mg DTP/l an (siehe *Tabelle 2*). Hingewiesen sei auch auf die großen Streuungen (Minimum bis Maximum) der aufgetretenen P-Konzentrationen bei den Einzelmessungen. Bemerkenswerterweise wies das relative, auf den Mittelwert bezogene Streuungsmaß (Variationskoeffizient) bei der Gülleinjektion den niedrigsten Wert auf.

Bei mehrjährigen Untersuchungen von Saugkerzenanlagen unter Wirtschaftsgrünland fanden DIEPOLDER et al. (2006) 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 2* aufgeführten Konzentrationen von ca. 4-12 mg TP/l, so liegen die auf drainiertem Grünland gemessenen P-Konzentrationen in Drainagewasser um etwa ein bis zwei Zehnerpotenzen höher. Folglich stellen Starkregenereignisse, welche unmittelbar auf Gülledüngung folgen, nicht nur wegen der ausgetragenen P-Frachten, sondern auch hinsichtlich der auftretenden hohen P-Konzentrationen im abfließenden Drainagewasser Phosphor-Belastungsspitzen für Gewässer dar.

Fazit und Ausblick

Starkregenereignisse nach Düngungsmaßnahmen können nicht nur im Ackerbau, sondern auch auf Wirtschaftsgrünland über Drainagen gerade im Einzugsbereich von sensiblen Oberflächengewässern ökologisch bedenklich sein. Die daraus resultierende Konsequenz, Güllegaben vor zu erwartenden starken Niederschlägen zu unterlassen, führt zweifelsohne zu einem gewissen Zielkonflikt zwischen der Abwägung von P-Verlusten in Oberflächengewässer und Ammoniak-Verlusten in die Luft. Zudem stößt sie in der Praxis auch auf Probleme bezüglich der Wettervorhersage („Normaler Regen oder Starkregen?“)

Durch die Wahl der Gülleapplikationstechnik können P-Einträge verringert werden. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei flacher Injektion („Gülle-Schlitz“) die TP-Frachten aus der Drainage um ca. 60 % gegenüber dem Pralltellerverfahren (flächige Applikation) reduziert wurden. Inwieweit dies auch für andere nicht-flächige Applikationstechniken wie Schleppschlauch- und Schleppschuhverfahren zutrifft, konnte in diesem Projekt aus Gründen des Versuchsumfanges nicht vollständig geklärt werden.

Allerdings deuten jüngere Untersuchungen des österreichischen Bundesamtes für Wasserwirtschaft (STRAUSS, pers. Mitteilung) in der bayerisch-österreichischen Grenzregion (Landkreis Traunstein) diesbezüglich ebenfalls positive Effekte an. Es besteht aber noch weiterer Forschungsbedarf.

P-Austräge aus hängigem Grünland nach Starkregenereignissen und Wirkung eines Randstreifens (Beregnungsversuche)

Einleitung

Das nachfolgend dargestellte dritte Teilprojekt beschäftigt sich mit der Frage, ob bzw. inwieweit sich bei hängigen und an Oberflächengewässer angrenzende Grünlandflächen durch ungedüngte Randstreifen eine Minderung des P-Austrags erreichen lässt. Dies speziell bei Starkregenereignissen, welche kurz auf eine Gülledüngung folgen.

Material und Methoden

Drei Versuchsglieder wurden hinsichtlich ihres Abflussverhaltens und P-Austrages verglichen: Eine Kontrollvariante ohne Düngung (1) sowie bei zwei mit Gülle gedüngten Varianten eine solche ohne Randstreifen (2) und eine weitere, wo zwischen der begüllten Fläche und der Abflussfassung ein 5 m breiter ungedüngter Randstreifen (3) lag. Das Versuchsprinzip und den Versuchsaufbau verdeutlicht *Abbildung 3*. Bei den Varianten 2 und 3 wurde die Gülle (ca. 25 m³/ha mit ca. 5,0 % TS) per Hand mit einer Gießkanne kurz vor der Beregnung ausgebracht. Damit wurden durchschnittlich ca. 10 kg Gesamt-P/ha (TP in Elementform) bzw. 23 kg P₂O₅/ha (Oxidform) gedüngt; etwa ein Viertel des TP lag als „löslicher“ - d. h. einen Mikrofilter passierbarer - Phosphor (DTP) vor. Anzumerken ist, dass auf dem Praxisschlag (ca. 3 ha mit 14 % Gefälle) die drei Varianten nicht zu einem einzelnen Beregnungstermin zusammen geprüft wurden. Vielmehr wurde die Untersuchungsreihe folgendermaßen durchgeführt: Während der jeweils mehrere Tage dauernden „Versuchsperioden“ vom Frühjahr bis Herbst 2004 wurde zu den ortsüblichen Düngungsterminen (niedriger Grünlandbestand im Frühjahr bzw. kurz nach den Schnitten) pro Tag

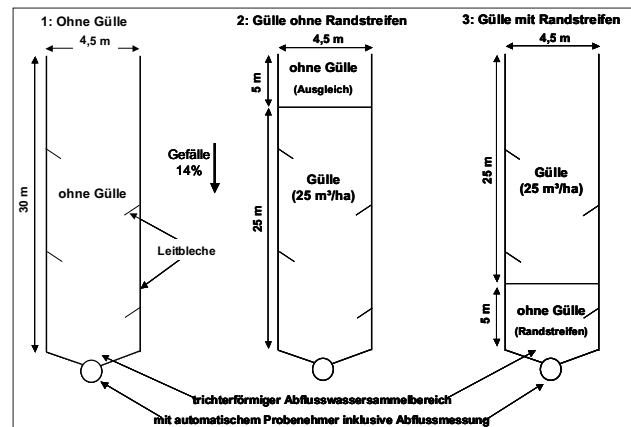


Abbildung 3: Darstellung von Versuchsaufbau, Varianten und Abflussmessung

eine Variante durchgeführt. Die einzelnen Varianten waren auch nicht ortsgebunden, sondern wechselten über den Praxis Schlag, womit eine räumlich-zeitliche Randomisierung erreicht wurde. Es wurden pro Versuchsglied während jeder Versuchsperiode in der Regel mehrere Wiederholungen durchgeführt. Die Versuchsanordnung erfolgte in der Weise, dass bei allen Varianten nicht nur die begüllte Fläche (25 x 4,5 m) sondern auch die beregnete Fläche (30 x 4,5 m) stets gleich war. Somit erklärt sich die in *Abbildung 3* ersichtliche Ausgleichsfläche bei Variante 2. Dadurch sollte erreicht werden, dass das Wasser bei allen drei Varianten stets über die gleiche Flächengröße läuft. Mittels eines Leitblechsystems wurde das Wasser sowohl innerhalb der Versuchsparzelle gehalten als auch die Ausbildung bevorzugter Fließwege entlang der Seitenleitbleche verhindert.

Mit einer Beregnungsanlage wurden künstlich Starkregenergieereignisse simuliert. Da während der einzelnen Versuchstage im Boden unterschiedliche Feuchteverhältnisse vorlagen, erwies es sich methodisch in Hinblick auf eine geeignete Auswertung am günstigsten, die Beregnung und Abflussmessung in folgender Weise durchzuführen: Es wurde so lange beregnet, bis der Abfluss begann und die bis dahin ausgebrachte Wassermenge festgehalten. So konnten „einheitliche Ausgangsvoraussetzungen“ geschaffen werden. Dann wurde die Wassermenge stufenweise um je 5 l/m²

erhöht. Pro Stufe wurde jeweils der entsprechende Abfluss aufgefangen, dann erst weiter berechnet. Dadurch erhielt man eine einheitliche Beregnungssteigerungsreihe (5, 10, 15, 20, 25, 30 l/m²) „nach Abflussbeginn“.

Die Erfassung des Wasserabflusses und die Probenahme erfolgten automatisch. Im aufgefangenen Wasser wurden die Konzentrationen an Gesamt-P (TP) und an „löslichem“, Phosphor (DTP) bestimmt. Dadurch konnten die dazugehörigen, auf einen Hektar bezogenen TP/DTP-Frachten errechnet werden.

Ergebnisse und Diskussion

Wirkung des Randstreifens bei Starkregen

Bezogen auf die über die Gülle ausgebrachte durchschnittliche TP-Menge von 12,2 kg/ha ließen sich die mit dem Oberflächenabfluss ausgetragenen „scheinbaren“, das heißt berechneten mittleren TP-Verluste ohne Randstreifen [(Variante 2 – Variante 1)/Dünge-TP] auf 1,2 % bei der niedrigsten und auf 4,2 % bei der höchsten Beregnungsstufe quantifizieren.

Aus *Tabelle 4* kann entnommen werden, dass die Anlage eines 5 m breiten ungedüngten Randstreifens zwischen der begüllten Fläche und der Auffangvorrichtung (siehe

Tabelle 4: Mittlere Beregnungsmengen, Wasserabflüsse, P-Konzentrationen und P_{gesamt}-Frachten sowie Anteil der löslichen P-Fracht an der TP-Fracht der drei Varianten bei unterschiedlichen Beregnungsmengen nach Abflussbeginn (unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikant unterschiedliche Mittelwerte)

Parameter	Varianten	Beregnungsmenge nach Abflussbeginn (l/m ²)					
		5	10	15	20	25	30
Anzahl Messungen (n)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	7 12 10	7 13 10	6 12 9	6 13 10	5 8 8	3 7 8
Ø Beregnungsmenge _{insgesamt} (l/m ²)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	37,1 ^a 28,8 ^a 31,0 ^a	42,1 ^a 35,4 ^a 36,0 ^a	45,0 ^a 38,8 ^a 37,8 ^a	50,0 ^a 45,0 ^a 45,0 ^a	50,0 ^a 41,3 ^b 46,3 ^{ab}	53,0 ^a 45,0 ^b 50,6 ^{ab}
Ø Abflussmenge (l/m ²)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	1,3 ^{ab} 1,9 ^a 0,8 ^b	2,4 ^a 2,9 ^a 1,8 ^a	3,5 ^a 4,3 ^a 3,0 ^a	5,2 ^a 5,9 ^a 4,7 ^a	7,5 ^a 7,8 ^a 6,1 ^a	9,2 ^a 10,1 ^a 9,3 ^a
Verhältnis Abfluss zu Beregnung (%)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	4 ^{ab} 8 ^a 3 ^b	5 ^a 7 ^a 5 ^a	6 ^a 8 ^a 5 ^a	11 ^a 14 ^a 11 ^a	7 ^a 9 ^a 7 ^a	18 ^a 23 ^a 19 ^a
Ø P _{gesamt} -Konzentration (mg TP/l)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	0,7 ^b 6,6 ^a 1,6 ^b	0,6 ^b 5,7 ^a 1,6 ^b	0,6 ^b 5,3 ^a 1,6 ^b	0,5 ^b 4,7 ^a 1,7 ^b	0,5 ^b 5,3 ^a 1,6 ^b	0,4 ^b 5,1 ^a 1,8 ^b
Ø P _{löslich} -Konzentration (mg DTP/l)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	0,4 ^b 3,7 ^a 1,0 ^b	0,4 ^b 3,4 ^a 1,0 ^b	0,4 ^b 3,3 ^a 1,0 ^b	0,4 ^b 3,1 ^a 1,2 ^b	0,3 ^b 3,5 ^a 1,1 ^b	0,3 ^b 3,5 ^a 1,3 ^b
Ø P _{gesamt} -Fracht (g TP/ha)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	8 ^b 150 ^a 16 ^b	14 ^b 189 ^a 33 ^b	21 ^b 255 ^a 54 ^b	28 ^b 302 ^a 84 ^b	36 ^b 446 ^a 106 ^b	39 ^b 554 ^a 188 ^b
Ø P _{löslich} -Fracht (g DTP/ha)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	6 ^b 85 ^a 10 ^b	10 ^b 114 ^a 21 ^b	15 ^b 160 ^a 35 ^b	22 ^b 200 ^a 59 ^b	26 ^b 299 ^a 72 ^b	31 ^b 380 ^a 142 ^b
Ø DTP-Anteil an TP-Fracht (%)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	62 ^a 59 ^a 58 ^a	65 ^a 61 ^a 61 ^a	69 ^a 63 ^a 61 ^a	72 ^a 67 ^a 67 ^a	73 ^a 66 ^a 64 ^a	78 ^a 66 ^a 68 ^a

Abbildung 3) bei allen Beregnungsstufen eine signifikante Minderung der Konzentrationen an Gesamtphosphor (TP) bzw. löslichem Phosphor (DTP) des abgeflossenen Wassers bewirkte. Dadurch konnte eine erhebliche Reduzierung der ausgetragenen P-Frachten erreicht werden. Es wurde zudem durch den ungedüngten Randstreifen umso mehr Phosphor (sowohl Gesamt-P als auch löslicher Phosphor) auf dem Grünland zurückgehalten, je intensiver beregnet wurde. So lag der Rückhalt bei Beregnungsmengen von 5-10 l/m² nach Abflussbeginn in einer Größenordnung von ca. 135-155 g TP/ha und stieg bei Beregnungsmengen von 25-30 l/m² auf 340-365 g TP/ha an.

Aus *Tabelle 4* ist ferner ersichtlich, dass innerhalb der sechs Beregnungsstufen sich die Differenzen der mittleren P-Frachten zwischen den drei Varianten fast ausschließlich auf Unterschiede in der P-Konzentration zurückführen ließen und nicht auf unterschiedliche Wasserabläufe zwischen den Varianten. Dies kann auch als ein Indiz für die Güte der gewählten Versuchsdurchführung gelten.

Randstreifen und ungedüngt

Rein statistisch gesehen bestanden weder bei den P-Frachten noch bei den P-Konzentrationen Unterschiede zwischen der Variante mit Randstreifen und der ungedüngten Kontrolle. Dennoch geht zumindest tendenziell aus den Ergebnissen deutlich hervor, dass der Randstreifen den gedüngten Phosphor nach einem Starkniederschlag nicht vollständig zurückhalten konnte. Konzentrationen und Frachten lagen rund um das zwei- bis fünffache über der ungedüngten Kontrollvariante.

Ergänzend sei noch hinzugefügt, dass die simulierten Starkregenereignisse auf hängigen Grünlandflächen bereits ohne vorherige Gülledüngung zu oberflächlichen P-Austrägen führten. Im Versuch wurden mit zunehmender Beregnungsmenge Frachten von 8-39 g/ha Gesamt-P (TP) gemessen. Die TP-Konzentration des abgeflossenen Wassers lag überwiegend bei rund 0,5-0,6 mg TP/l. Würde – rein hypothetisch betrachtet – ein Gewässer ausschließlich aus diesem Oberflächenabfluss (ohne vorherige Düngung!) gespeist, so läge damit seine P-Konzentration um das 25 - 30fache höher als der Grenzwert von 0,02 mg TP/l, den VOLLENWEIDER (1982) für eine tragbare Belastung des Gewässerzuflusses angibt.

Abfluss und P-Fractionen

Von der durch die künstliche Beregnung ausgebrachten Wassermenge flossen durchschnittlich in Abhängigkeit von Variante und Regenintensität oberflächlich nur 3 % bis 23 % ab; überwiegend betrug der Oberflächenabfluss unter 10 % der Niederschlagshöhe.

Interessant ist, dass der ausgetragene Phosphor bei allen Beregnungsintensitäten vorwiegend (meist zu ca. 60-70 %) aus löslichem Phosphor bestand, mit leicht zunehmender Tendenz bei höheren Niederschlagsmengen. Unterschiede zwischen den drei Varianten bestanden jedoch kaum; nur der Anteil an DTP bei der ungedüngten Kontrolle war tendenziell geringfügig etwas höher, er ließ sich jedoch in keinem Fall absichern.

Dieses Resultat eines P-Austrags in überwiegender Form von leicht löslichem (und damit sehr reaktivem) Phosphor

ist auch aus folgenden Gründen bemerkenswert: Zum Einen besteht der in der Michviehgülle enthaltene Phosphor vorwiegend (ca. 65-75 %) aus partikulärem Phosphor. Zum Anderen zeigen die Beregnungsversuche über drainiertem Grünland, dass bei Gülledüngung mit dem Pralltellerverfahren durchschnittlich 60 % des durch Starkregen vertikal ausgetragenen Phosphors in partikulärer Form vorlag, bei der flachen Gülleinjektion waren es immerhin etwas über 45 %. Daraus ergibt sich folgende mögliche Interpretation: Starkregenereignisse führen bei drainiertem, kurz vorher mit Gülle gedüngtem Wirtschaftsgrünland zu einem „Durchdrücken“ partikulärer Teile im Makroporensystem. Beim Oberflächenabfluss kommt es hingegen verstärkt zu einem „Auskämmeffekt“ durch die Grasstopeln, so dass im Abfluss vorwiegend leicht löslicher Phosphor zu finden ist. Jedenfalls scheinen Starkniederschläge auf hängigem Grünland vorzugsweise P-Konzentrations- bzw. P-Frachtspitzen in angrenzende Gewässer zu bewirken, die schnell für Umsetzungsprozesse verfügbar sind.

Fazit

Starkregenereignisse nach Gülledüngung führen in hängigem Gelände zu einem erheblichen Anstieg der P-Konzentration des vom Grünland abfließenden Wassers. Im Versuch betrug die Konzentrationszunahme im Mittel ungefähr das Zehnfache gegenüber der ungedüngten Kontrollvariante. Damit ging bei Gülledüngung (ohne Randstreifen) in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität ein mittlerer P-Austrag von 0,15 bis 0,55 kg Gesamt-P (TP), entsprechend 0,34 bis 1,27 kg P₂O₅ einher. Aus den Ergebnissen geht jedoch ebenfalls hervor, dass bei hängigem Grünland ungedüngte 5 m breite Randstreifen eine signifikante Reduzierung des P-Eintragspfades „Oberflächenabfluss vom Grünland“ bewirken und damit einen wertvollen Beitrag zum Gewässerschutz leisten können. Dies gerade in Gebieten, die durch hängige Flächen und eine hohe Gewässerdichte geprägt sind.

Hinweis: Der komplette 130seitige Forschungsbericht des Projektes „Saubere Seen 2002-2005“ findet sich unter der Adresse www.lfl.bayern.de/iab/duengung/ im Internet-Angebot des Instituts für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz (IAB) der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) unter der Rubrik „Düngung und Umwelt – Gewässerschutz“.

Danksagung

Den Autoren ist es ein Anliegen, allen Personen und Institutionen, die an diesem Forschungsprojekt mitgearbeitet haben, auch auf diesem Wege ganz herzlich zu danken. Ein Projekt dieser Größenordnung ist ohne Drittmittelfinanzierung nicht durchführbar. Besonderer Dank gehört daher unserem Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie der Europäischen Union, welche jeweils 50 % der Kosten dieses Interreg-III-A-Projektes trugen.

Literatur

BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2007: Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland „Gelbes Heft“; 8. überarbeitete Auflage, Hrsg. LfL, 98 Seiten, 2007; als Internetversion (www.LfL.bayern.de/IAB/).

- DIEPOLDER, M., F. PERETZKI, L. HEIGL und B. JAKOB, 2006: Nitrat- und Phosphorbelastung des Sickerwassers bei Acker- und Grünlandnutzung – Ergebnisse von zwei Saugkerzenanlagen in Bayern. Schule und Beratung, Heft 4/06, Seite III-3 bis III-11, Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten.
- DIEPOLDER, M. und S. RASCHBACHER, 2008: Abschlussbericht des Forschungsprojekts Saubere Seen 2002-2005. Internetangebot der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz (www.lfl.bayern.de/iab/duengung/; siehe unter Rubrik Düngung und Umwelt – Gewässerschutz).
- VOLLENWEIDER, R. and J. KEREKES, 2008: Eutrophication of waters, monitoring, assessment and control. OECD Paris.
- WITHERS, P.J.A., B. ULEN, CH. STAMM and M. BECHMANN, 2003: Incidental phosphorus losses – are they significant and can they be predicted? J. Plant Nutr. Soil Sci., 166, 459-468.