

PHOSPHOR IN DER LANDSCHAFT

Management eines
begrenzt verfügbaren Nährstoffes



Bettina Holsten, Matthias Pfannerstill, Michael Trepel

Bettina Holsten, Matthias Pfannerstill, Michael Trepel

PHOSPHOR IN DER LANDSCHAFT

Management eines begrenzt
verfügbaren Nährstoffes

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Herausgeber:

Institut für Ökosystemforschung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel



Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Verfasser:

Bettina Holsten, Matthias Pfannerstill, Michael Trepel

Fotos:

B. Holsten: S. 8, 24, 31, 33, 39, 41

F. Steinmann: S. 6, 16, 21, 28, 36

M. Trepel: S. 10, 13, 19, 26, 27, 29, 45, 47

Zitiervorschlag:

Holsten, B., Pfannerstill, M. & Trepel, M. (2016): Phosphor in der Landschaft – Management eines begrenzt verfügbaren Nährstoffes. CAU Kiel, 52 S.

Layout:

Doris Kramer

Druck:

Hansadruck, Kiel

Auflage:

1000

Projektbeteiligte

Dr. Bettina Holsten
Doris Kramer
Dr. Matthias Pfannerstill
Prof. Dr. Joachim Schrautzer
PD Dr. Michael Trepel
Britta Witt

Institut für Ökosystemforschung
Olshausenstr. 75
D-24118 Kiel



Dr. Reinhard Sander

Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion e.V., ISIP e.V.
Rüdesheimer Str. 60-68
D-55545 Bad Kreuznach



Dank

Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Finanzierung des Projektes und einer Vielzahl von Personen, die wichtige Kommentare und Hinweise zur vorliegenden Broschüre beigetragen haben. Besonders ausführliche Kommentare verdanken wir Dr. M. Diepolder, Dr. F. Fritsch, Prof. Dr. H.-W. Olf und Prof. em. Dr. Dr. h. c. W. Werner. Das Korrekturlesen übernahm Hella Holsten. Bei allen möchten wir uns ganz herzlich bedanken!

Vorwort

Das Element Phosphor ist für jedes Leben von essentieller Bedeutung, da es am Aufbau der DNA beteiligt ist und damit die Weitergabe von Informationen im Erbgut steuert. In der Landwirtschaft ist es ein nicht ersetzbarer Hauptnährstoff für Nutzpflanzen. Für die Ernährungssicherheit zukünftiger Generationen ist die Versorgung der landwirtschaftlichen Produktion mit Phosphor essentiell. Da die weltweiten Reserven für den Abbau von mineralischem Phosphor begrenzt sind und geopolitisch teilweise in unsicheren Gebieten liegen, hat die Europäische Gemeinschaft im Mai 2014 Phosphatgestein in die Liste kritischer, d. h. in ihrem Vorkommen begrenzten Rohstoffe aufgenommen. Um den zukünftigen Rohstoffbedarf bei diesen Stoffen zu sichern, sind sorgsamer Umgang zu gewährleisten und Recyclingaktivitäten zu verbessern.

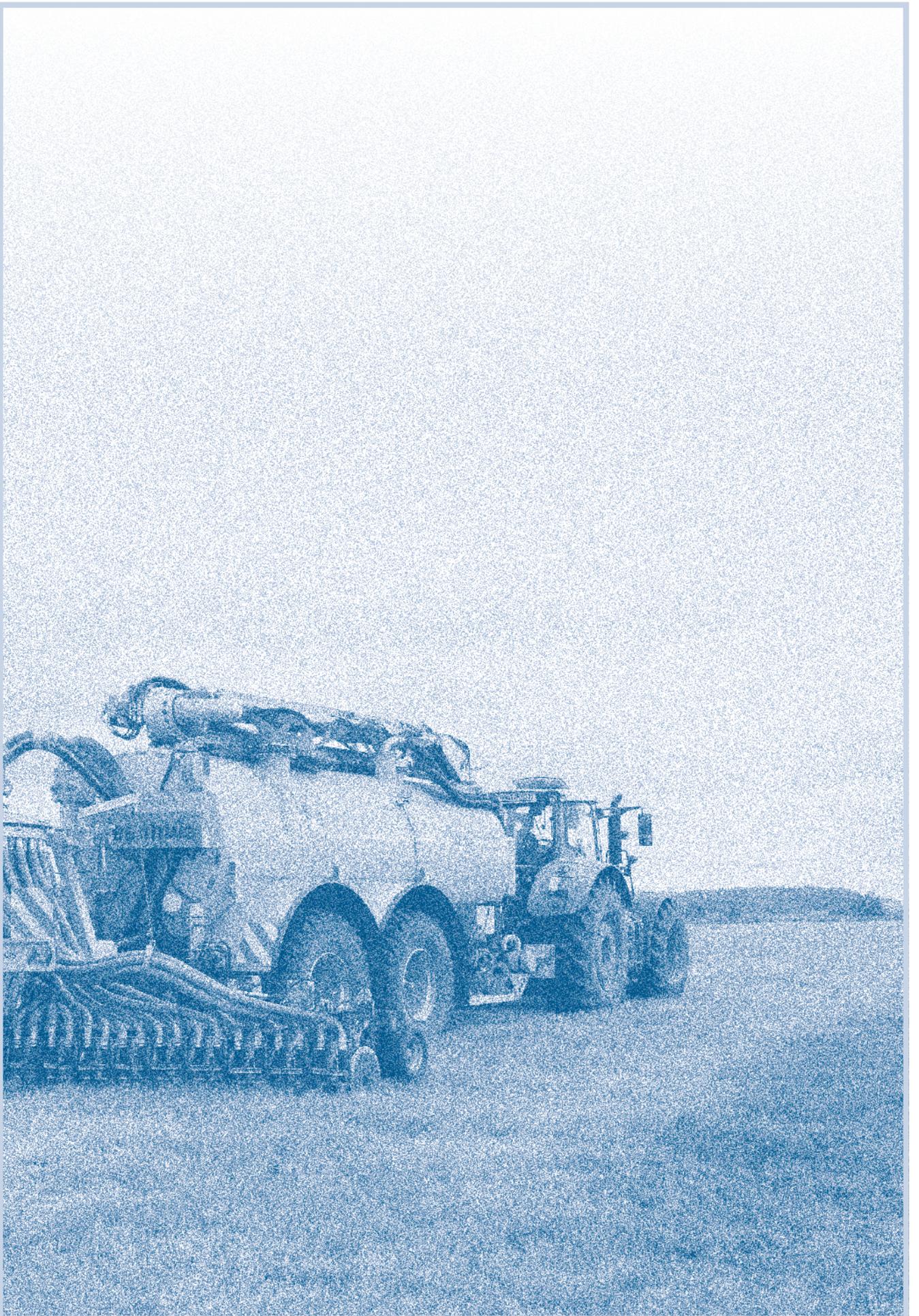
Phosphor entfaltet seine düngende Wirkung nicht nur in der Landwirtschaft, über Bodenabtrag und Wasserabfluss gelangt er auch auf benachbarte Flächen und in die Gewässer. Vor allem Seen und Fließgewässer reagieren auf Phosphoreinträge empfindlich. Durch die verbesserte Verfügbarkeit des Nährstoffs werden konkurrenzstarke Arten in ihrer Häufigkeit gefördert, typische Arten unbelasteter Lebensräume gehen zurück. In fast allen Seen und Fließgewässern Deutschlands werden die von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser erarbeiteten und in der Oberflächengewässerverordnung des Bundes festgelegten Orientierungswerte an der Klassengrenze gut zu mäßig überschritten. Dies ist ein Hinweis für die andauernde Belastung der Gewässer mit Phosphoreinträgen, die dazu beitragen, dass die Umweltziele der europäischen Wasserrahmenrichtlinie nicht fristgerecht erreicht werden. Nach Modellierungsergebnissen mit dem Modell MoRe im Auftrag des Umweltbundesamtes gelangen bundesweit aktuell etwa 55% der Phosphoreinträge diffus in die Gewässer. Während sich nach diesen Berechnungen die Einträge aus punktuellen Quellen wie Kläranlagen seit den 1980er Jahren um mehr als die Hälfte verringert haben, blieben die Einträge aus diffusen Quellen nahezu konstant.

Vor dem Hintergrund eines begrenzten und für die Landwirtschaft essentiellen Nährstoffs, ist ein sorgsamer Umgang mit Phosphor in der Landwirtschaft zwingend erforderlich. Ziel dieser Broschüre, die im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Vorhabens erarbeitet wurde, ist es, über die Eigenschaften von Phosphor, seine Verfügbarkeit und Verhalten in der Landschaft zu informieren. Wir hoffen mit diesen Informationen Entscheidungsträger in Umweltverwaltung, Landwirtschaft und Politik anzusprechen und für das Thema eines sorgfältigen Umgangs mit dem Rohstoff Phosphor zu gewinnen. Der anschließende Maßnahmenkatalog enthält eine Übersicht von knapp 100 Maßnahmen, die ergriffen werden können, um Verluste von Phosphor und Einträge in Gewässer zu vermeiden. Kurzfristig wirksam sind hier ausreichend breite, mit Gehölzen bewachsene Randstreifen

die eine physikalische Barriere gegenüber dem Gewässer bilden. Langfristig wirksamer ist eine am Nährstoffbedarf der Pflanzen angepasste Düngung. Seit langem wird in Deutschland über die Höhe der Gehaltsklassen in den Böden gerungen. Neue Empfehlungen der VDLUFA aber auch Erkenntnisse aus anderen Ländern Europas stimmen dahingehend überein, dass eine Absenkung der Gehaltsklassen ohne Einbußen bei den Erträgen möglich ist. Da mineralischer Phosphor als Düngemittel in seiner Verfügbarkeit begrenzt ist, ist es ein Gebot der Vernunft, die Bodenvorräte abzusenken und an die wissenschaftlichen Erkenntnisse anzupassen. Diese Maßnahme würde mittel- bis langfristig wesentlich dazu beitragen, dass die Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in Gewässer messbar zurückgehen werden. Eine zentrale Rolle kommt dabei dem Ersatz von mineralischen Phosphor durch organisch gebundenen Phosphor in Wirtschaftsdüngern zu. Die Absenkung der Bodengehalte und die Umverteilung der Wirtschaftsdünger sichern langfristig die landwirtschaftliche Produktion und entlasten die Umwelt. Hier ergibt sich eine win-win Situation für Landwirtschaft und Gewässerschutz, die vor allem im Eigeninteresse der Landwirtschaft von ihr selbst freiwillig umgesetzt werden sollte. Die vorliegende Broschüre möchte dazu beitragen, diese Chance zu erkennen und zum Wohle aller zu nutzen.

Kiel im Juni 2016

Michael Trepel
Projektleitung



Inhalt

1.	Hintergrund	8
1.1	Düngebedarf bei Phosphor.....	9
1.2	Phosphorvorrat im Boden.....	10
1.3	Phosphor-Nachweismethoden.....	11
1.4	Phosphor Bodengehaltsklassen.....	12
1.5	Sind die Bodengehaltsklassen richtig gewählt?.....	13
1.6	Phosphor Bodengehaltsklassen im Vergleich.....	14
1.7	Mobilisierbarkeit der Phosphorvorräte im Boden.....	16
1.8	Wirtschaftlichkeit von Phosphordüngung.....	17
1.9	Effizienter Phosphor Einsatz in der Landwirtschaft.....	18
2.	Phosphor-Verluste von landwirtschaftlichen Flächen	20
2.1	Die Transportwege: Wasserabfluss von Flächen.....	20
2.1.1	Oberflächenabfluss.....	21
2.1.1.1	<i>Abschwemmung</i>	21
2.1.1.2	<i>Erosion</i>	22
2.1.2	Grundwasserabfluss.....	26
2.1.3	Dränabfluss.....	27
2.1.4	Überflutungen.....	29
2.2	Die Quelle für Phosphor-Verluste: Bodeneigenschaften und Bewirtschaftung.....	30
2.2.1	Phosphor-Gehalte im Boden.....	30
2.2.2	Bodentyp.....	30
2.2.3	Kalkung.....	32
2.2.4	Humus.....	32
2.2.5	Bodenbearbeitung.....	33
2.2.6	Düngung mit Wirtschaftsdüngern.....	34
2.2.7	Zeitpunkt der Düngung.....	35
2.2.8	Art der Düngeausbringung.....	36
2.2.9	Art des Düngers.....	37
2.2.10	Ausbringungsrate.....	38
2.2.11	Kultur.....	38
2.3	Umweltbelastungen durch Phosphor-Verluste.....	39
2.4	Identifizierung von Problemflächen.....	40
2.5	Kosten und Erfolgsaussichten für Gewässersanierung.....	41
3.	Maßnahmen zur Reduzierung der Phosphor-Verluste	42
4.	Potenziale des Greenings	46
5.	Fazit	47
6.	Literatur	48



1. Hintergrund

Leicht abbaubares Rohphosphat ist ein begrenzt vorhandener Rohstoff, der in der Düngerherstellung nicht ersetzbar ist. In der EU wird Phosphor zu 92% importiert, wobei Dreiviertel aller bekannten Reserven in Marokko/West-Sahara, China und den USA liegen. Neueste Schätzungen der Bundesregierung ergaben, dass die weltweiten, kostengünstig abbaubaren Vorräte noch 385 Jahre lang reichen werden (Bundesregierung 2012), andere Schätzungen liegen deutlich darunter. Die Unterschiede entstehen vor allem durch unterschiedliche Angaben zu den Vorräten in den Minen, die entweder von den Eigentümern selber stammen, oder von anderen geschätzt wurden. Modellrechnungen mit niedrigen Schätzungen der weltweiten Reserven kommen zu dem Schluss, dass die weltweiten Reserven in weniger als 200 Jahren verbraucht sein werden (Van Vuuren et al. 2010). Aufgrund der begrenzten Zahl der Lagerstätten kam es jedoch bereits im Jahr 2008 infolge von in China erhobenen Zöllen und Spekulationen zu einem Preisanstieg von 580% bei Tripelsuperphosphat (EU 2013). Phosphor wurde daher am 26.5.2014 von der EU in die Liste der 20 kritischen Rohstoffe aufgenommen (European Commission - IP/14/599 26/05/2014). Diese begrenzt verfügbaren Stoffe bedürfen erhöhter Aufmerksamkeit bei der Reduzierung des Verbrauches und der Förderungen von Recyclingaktivitäten.

Gleichzeitig verursacht unkontrolliert in die Umwelt gelangter Phosphor Probleme in den Gewässern und trägt an Land wesentlich zum Artenrückgang bei (Wassen et al. 2005). Vor diesem Hintergrund ist eine

sparsame Verwendung von Phosphor von großer Dringlichkeit, denn wirtschaftlich sinnvolle Verfahren der Rückgewinnung sind noch in der Entwicklung. Eine effiziente Nutzung von Phosphor ist für die Versorgungssicherheit im Bereich der Lebensmittelproduktion für zukünftige Generationen von entscheidender Bedeutung (EU 2013). Der Landwirtschaft kommt dabei in Deutschland eine Schlüsselrolle zu, da hier jährlich 566 535 t mineralischer oder organischer Phosphor für die pflanzliche Produktion benötigt werden (Gethke-Albinus 2012), von denen etwa 20 000 t als Austräge über das Wasser verloren gehen (Behrendt et al. 2003). Hohe Phosphorkonzentrationen in Gewässern sind vielfach die Ursache dafür, dass die Ziele der Wasserrahmenrichtlinie nicht erreicht werden. Darüber hinaus ist mit der Ausbringung von mineralischem Phosphat je nach Herkunft des Rohphosphates eine unterschiedlich starke Verunreinigung der Böden mit Cadmium und Uran verbunden (Dittrich & Klose 2008). Die Gehalte an Cadmium schwanken zwischen den verschiedenen Abbauorten stark und liegen zwischen 0,1 und 0,3 mg Cd pro kg Rohphosphat bei magmatischem Phosphor aus Russland und 15–38 mg Cd pro kg bei Lagerstätten in Marokko. Nach der Verarbeitung zu Düngemitteln lag der Cadmium-Gehalt bei etwa 59% der untersuchten Proben über dem Grenzwert von 50 mg pro kg Dünger (Dittrich & Klose 2008). Der Umgang mit Phosphor ist heute in allen Phasen von Verschwendung und Verlusten gekennzeichnet, mit fatalen Folgen für die zukünftige Versorgung sowie für Wasser- und Boden.

Die zentrale Frage beim Umgang mit Phosphor ist daher, **wie viel Phosphor ist in der Pflanzenproduktion tatsächlich nötig, wie weit kann der Einsatz reduziert werden, ohne die Erträge zu gefährden**. Das komplizierte chemische Verhalten von Phosphor im Boden erfordert eine Vielzahl von Hintergrundinformationen, um diese einfache Frage zu beantworten. In den Fachgremien wird seit langem um eine Neubewertung der Höhe der Phosphor-Gehaltsklassen gerungen, wohl wissend, dass eine generelle Absenkung der Werte für Marktfruchtbetriebe zwar eine Einsparung bei den Betriebsmitteln bedeutet, für die intensive Tierhaltung aber zu großen Problemen führen kann. Die Bestimmung des minimal nötigen P-Einsatzes in der Landwirtschaft ist essentiell für die Zukunft der Menschheit; dem Ziel, den Phosphor-Verbrauch in Deutschland so weit wie möglich zu reduzieren, kommen die Regelungen der landwirtschaftlichen Praxis aber auch mit der Umsetzung der neuen Düngeverordnung, die nach dem bisherigen Stand der Entwürfe eine Düngung von Böden der Bodengehaltsklassen D und E in Höhe der Abfuhr erlaubt, nicht wesentlich näher. Ziel des Leitfadens ist es, die fachlich begründete, kritische Diskussion zur aktuellen Höhe der Phosphor-Bodengehaltsklassen anzuregen und Einsparpotenziale durch Vermeiden von Verlusten aufzuzeigen. Hierzu werden

- die Grundlagen des Phosphorkreislaufes,
- Methoden der P-Bedarfsermittlung und
- das Vorgehen bei den Bodengehaltsmessungen

vorge stellt.

- Es werden einige Hintergründe der Festlegung der Bodengehaltsklassen der VDLUFA beschrieben,
- die Eckwerte der Bodengehaltsklassen der Bundesländer und einiger europäischer Nachbarn präsentiert
- und es wird vor diesem Hintergrund eine Bewertung der aktuellen Praxis vorgenommen.

Abschließend widmet sich die Broschüre dem Thema Vermeidung von landwirtschaftlichen P-Verlusten, das ein weiterer wichtiger Faktor im ökonomisch und ökologisch optimierten Umgang mit dem Nährstoff ist.

Die Broschüre richtet sich an Entscheider in der Wasserwirtschaft, der Gewässerschutzberatung, in der landwirtschaftlichen Beratung, in der Politik, im Umweltschutz sowie an interessierte Landwirte. Für die Praxis wurden Übersichten zu geeigneten Maßnahmen zur Reduzierung der Phosphor-Verluste in den Betrieben zusammengestellt. Auf eine detaillierte Maßnahmenbeschreibung wird an dieser Stelle aber verzichtet und auf andere Quellen verwiesen. Ziel ist es, verschiedene Aspekte des Phosphorkreislaufes in der Landschaft verständlich aufzuarbeiten und die Dringlichkeit des Ressourcen schonenden Umgangs mit Phosphor deutlich zu machen. Für den Landwirt werden die wichtigsten Informationen in einem Faltblatt zusammengefasst (http://www.ecosystems.uni-kiel.de/projekt_phosphor.shtml).

Phosphor ist in der Pflanzenernährung nicht ersetzbar und die Frage nach dem minimal notwendigen P-Einsatz in der Landwirtschaft bestimmt die Ernährungssicherheit zukünftiger Generationen und dient zudem der Entlastung unserer Umwelt.

1.1 Düngebedarf bei Phosphor

Die Bestimmung des Phosphor-Düngebedarfs einer Kultur ist Gegenstand von intensiven Diskussionen, in deren Zentrum die Bodenversorgungsklassen stehen. Grundsätzlich wird der Gehalt an Phosphor in der landwirtschaftlichen Literatur als P oder P_2O_5 angegeben, wobei **1 kg P_2O_5 etwa 0,436 kg P** entspricht oder umgekehrt **1 kg P etwa 2,29 kg P_2O_5** sind. Für P_2O_5 ist die Bezeichnung „Phosphat“ gängig, chemisch korrekt handelt es sich jedoch um Phosphorpentoxid. Es gibt Bestrebungen, alle Angaben zum Thema Düngung von Phosphor nur noch in der Elementform zu machen; da in der zitierten Literatur jedoch häufig die Angaben in P_2O_5 gemacht wurden, werden hier beide Formen verwendet. Die obersten 20–30 cm eines landwirtschaftlichen Bodens enthalten 0,02–0,15% Phosphor, im Mittel sind es 0,05% und damit **1 500 kg P oder 3 437 kg P_2O_5 pro ha** (LTZ 2011). Damit enthält der Boden ein Vielfaches des

jährlichen Bedarfes einer Kultur. Allerdings sind davon nur einige Kilo direkt pflanzenverfügbar, wenn sie mit Wasser in Verbindung kommen. Pflanzen nehmen Phosphor als PO_4^{3-} auf, entweder direkt über die Wurzeln oder unter Mitwirkung von Pilzen (Mykorrhiza). Zu den wichtigsten mineralischen Bindungspartnern von Phosphor im Boden gehören Calcium, Aluminium, Eisen, Ton oder Kohlenstoff, zudem liegt Phosphor eingebunden in lebender und toter Biomasse vor. Aufgrund der vielfältigen möglichen Reaktionen des Phosphors im Boden ist es extrem schwer, den Anteil an der Düngergabe zu schätzen, der pflanzenverfügbar bleibt. Die Praktiker haben sich daher darauf geeinigt, als Zielwert einen gewissen P-Gehalt im Boden anzustreben und danach den Düngungsbedarf zu berechnen.

Die Unmöglichkeit, alle Aspekte des Phosphorkreislaufes auf Einzelflächen zu berücksichtigen, erfordert pragmatische Entscheidungen und führte zur Definition von Phosphor-Bodengehaltsklassen. Die Bestimmung des Phosphor-Düngebedarfs einer Kultur hängt wesentlich von der Bewertung der Boden-Messwerte ab.



1.2 Phosphorvorrat im Boden

Phosphor ist der am wenigsten mobile Makronährstoff im Boden. Generell tritt Phosphor in verschiedenen Formen auf, die unterschiedliche Eigenschaften haben. Von der insgesamt vorhandenen Gesamt-Phosphormenge (TP oder P_{ges}) sind etwa 25–65% anorganischer Phosphor (Pi) und der Rest organischer Phosphor (Po). Phosphor kommt in gelöster Form oder gebunden vor und ist unterschiedlich stark pflanzenverfügbar (DLG e. V. 2008):

- 0,5 – 1 kg P ha⁻¹ oder 1,2 – 2,3 kg P₂O₅ gelöstes anorganisches Ortho-Phosphat ist sehr leicht verfügbar.
- 200 – 500 (450–1 200 kg P₂O₅) kg P ha⁻¹ liegen in labiler gebundener Form vor und
- 1 500 – 3 000 (3 500 – 7 000 kg P₂O₅) kg P ha⁻¹ sind fest gebunden und nur sehr langsam löslich.

Bei dem gesamten P-Bodenvorrat handelt es sich um ein Fließgleichgewicht, in dem leicht verfügbare Formen in schwer lösliche umgewandelt werden, wenn gut verfügbarer Phosphor durch Düngung zugefügt wird, und umgekehrt. Der bei der routinemäßigen Bodenuntersuchung gemessene pflanzenverfügbare P-Gehalt erlaubt keine Einschätzung des gesamten Bodenvorrats. Früher

nahm man an, dass Phosphor durch Alterung in irreversible Bindungen überführt wird; heute nimmt man an, dass auch diese Bindungsformen von der Pflanze großenteils wieder genutzt werden können (Werner 2010).

Je nach Bodenart sind zwischen 25 und 65% des Phosphors in organischer Substanz gebunden (Scheffer 2002), der mit den in Deutschland gängigen Methoden zur Bestimmungen des P-Düngebedarfs nicht nachweisbar ist (Steffens et al. 2010). Grundsätzlich muss der organische Phosphor erst in anorganische Formen umgewandelt werden ($HPO_4^{2-}/H_2PO_4^-$), bevor er von den Pflanzen aufgenommen werden kann. Dieser Phosphor wird pflanzenverfügbar, wenn Pilze, Bakterien oder andere Mikroorganismen die Biomasse abbauen. Somit beeinflusst die Aktivität der Bodenorganismen den Anteil an pflanzenverfügbarem Phosphor. Durch Verwitterung und Abbau von organischer Substanz werden pro Jahr etwa **10–50 kg** Phosphor pro ha freigesetzt und pflanzenverfügbar (LTZ 2011). Verwitterung und Aktivität der Bodenorganismen werden unter anderem über die Bodentemperatur und den pH-Wert gesteuert. In schwach sauren Böden (pH-Wert 6,0–6,5) ist die Löslichkeit des anorganischen Phosphors am höch-

ten. In Moorböden wird Phosphor aufgrund fehlender Bindungspartner kaum gebunden und eine Vorratsdüngung ist nicht möglich. Zudem wird bei tiefer Entwässerung eine hohe Menge P durch den Abbau der organischen Substanz freigesetzt, so dass zum Beispiel in Schleswig-Holstein im Mittel 7,5 kg P-Austräge aus Dränagen von Niedermoorgrünland je ha gemessen wurden (Gerth & Matthey 1991).

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Bewertung der Phosphor-Vorräte im Ackerbau ist die Krumentiefe. Durch eine Erhöhung der Krumentiefe von 15 auf 30 cm verdoppelt sich die pflanzenverfügbare P-Menge bei gleichem Bodengehaltswert, wobei gleichzeitig die Menge an schwer extrahierbarem, nachlieferbarem Phosphor

pro Bodeneinheit ansteigt. Daher kann ein Boden mit 30 cm Krumentiefe mit z. B. 8 mg P genauso ertragsfähig oder sogar ertragsfähiger sein als ein flachgründiger Boden mit 15 mg P. Grundsätzlich nehmen verschiedene Pflanzenarten Phosphor auch aus großen Bodentiefen auf. Die tiefsten Wurzeln von 2 Sorten Winterweizen wurden in einem Versuch in Österreich in Tiefen von 118–133 cm gefunden, in anderen Studien wurden 150 cm erreicht (Schweiger et al. 2009). Mais kann sogar bis 2,5 m tief wurzeln (Deutsches Maiskomitee). Je tiefer Flächen durchwurzelt werden können, desto geringer können die Phosphorgehalte in den oberen Bodenschichten sein, ohne dass Ertragsrückgänge auftreten.

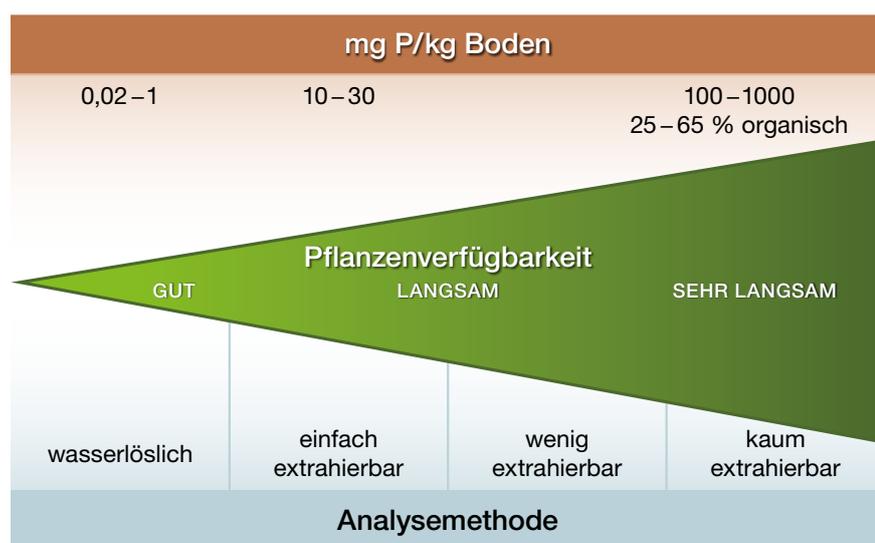


Abb. 1: Phosphorfractionen und ihre Nachweisbarkeit in den ersten 20–30 cm eines Bodens (effizient düngen (2012): nach Mengel & Kirkby 2001, verändert).

In den ersten 20–30 cm von jedem Hektar landwirtschaftlicher Fläche sind etwa 1 700–3 500 kg P gebunden und damit ein Vielfaches des Bedarfs einer Kultur, die sich in einem Fließgewicht zwischen leicht und kaum pflanzenverfügbaren Bindungsformen befinden. Auch aus dem kaum extrahierbaren P-Vorrat kann P freigesetzt werden, wenn die Bodengehaltswerte sinken.

1.3 Phosphor-Nachweismethoden

Leider gibt es bis heute kein chemisches Verfahren, mit dem sich die genaue Menge des pflanzenverfügbaren Phosphors im Boden bestimmen lässt. Bei der Bodenanalyse können verschiedene Extraktionsverfahren zum Einsatz kommen; insgesamt werden in Europa 16 verschiedene Methoden angewendet (Neyroud & Lischer 2003), deren Aussagekraft für die Praxis durch umfangreiche Düngungsversuche überprüft wurde. In Deutschland kommen zwei Verfahren routinemäßig zum Einsatz.

Doppel-Lactat-Methode (DL-Methode)

Die DL-Methode wird für Böden mit einem pH-Wert unter 7,0 empfohlen. Hier wird Calcium-Lactat mit Salz-

säure (HCl) versetzt. Von allen genannten Methoden wird hier der meiste Phosphor aus dem Boden extrahiert (Neyroud & Lischer 2003), wobei aus kalkhaltigen Böden auch kaum pflanzenverfügbare P-Formen gelöst werden. Zum Vergleich der Messwerte, die mit verschiedenen Analysemethoden ermittelt wurden, können Umrechnungen erfolgen (Jordan-Meille et al. 2012), die aber immer mit Unschärfen verbunden sind. Einige Institutionen betrachten Umrechnungen generell als nicht zulässig (Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2002), das Problem der Vergleichbarkeit von DL- und CAL-Messergebnissen bleibt damit aber bestehen. Eine Messung von 10 000 Proben mit beiden Extraktionsme-

thoden ergab um 25 % höhere Werte bei der DL-Methode (Baumgarten 2000) und bei einem europaweiten Vergleich verschiedener Messmethoden wurde eine sehr hohe Korrelation für die beiden Verfahren festgestellt (Schick et al. 2013). In dem aktuell vorliegenden Entwurf der neuen Düngeverordnung wird der DL-Gehalt durch Multiplikation mit 0,8 in den CAL-Gehalt umgerechnet.

Calcium-Acetat-Lactat-Methode (CAL-Methode)

Die CAL-Methode ist für kalkreichere Marschen, kalkreiche Niedermoore und aufgekalkte Lehmböden mit einem pH-Wert über 7,0 geeignet. Mittlere und schwere Lehmböden können mit beiden Methoden analysiert werden, wobei die mit der CAL-Methode gemessenen

Werte um bis zu 20 % niedriger ausfallen können (Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein 2011). Bei der Messung wird Boden mit Calcium-Acetat-Lactat versetzt. Die Methode erfasst wegen des höheren pH-Wertes desorbierbares P besser als die DL-Methode. Zur vereinfachten Umrechnung des CAL-Gehaltes in den DL-Gehalt multipliziert man den Messwert mit 1,25.

Ein Schwachpunkt bei beiden Analysemethoden ist der organische P-Pool, der kaum erfasst wird, aber teilweise durch mikrobielle Aktivität im Laufe der Vegetationsperiode freigesetzt wird. Bei organischen Böden wird der Anteil des pflanzenverfügbaren Phosphors damit systematisch unterschätzt.

Es gibt keine Messmethode, die den Anteil des pflanzenverfügbaren Phosphors direkt misst. Da zum Beispiel der organische Phosphor nicht mit gemessen wird, ist die P-Verfügbarkeit von Böden mit hohem Humusgehalt höher als bei geringer Humusversorgung bei gleichem Messwert.

1.4 Phosphor Bodengehaltsklassen

In der Vergangenheit erfolgte die Abgrenzung der unterschiedlichen P-Bodengehaltsklassen in den verschiedenen Regionen Deutschlands jeweils von der örtlichen LUFA. Zum Teil haben sich erhebliche Unterschiede in den Düngeempfehlungen bei gleichen Standortbedingungen ergeben. Ende der 1990er Jahre hat der Arbeitskreis Düngeberatung der Bundesländer diese Praxis überprüft und festgestellt, dass diese Unterschiede nicht gerechtfertigt sind (Kerschberger et al. 1997). Es wurde daher vorgeschlagen, die Klasse C einheitlich mit Werten zwischen 4,5 – 9 mg P bzw. 10 – 20 mg P₂O₅ anzugeben (Tab. 1). Dabei ist die Klasse C so definiert, dass die Düngung **einerseits ökonomisch sinnvoll** war und zu Mehrerträgen geführt hat und **andererseits die P-Gehalte im Boden konstant blieben**. In der Klasse C wird somit der jeweiligen Kultur so viel Phosphor über die Düngung zugeführt, wie mit der Ernte abgefahren wird.

Für den Ökolandbau wurde aufgrund der um ca. 30 % geringeren Produktion die Gehaltsklasse B als ausreichend angesehen (Kolbe 2010).

Bis heute wurden diese Empfehlungen bundesweit nicht einheitlich umgesetzt. In Schleswig-Holstein galten im Jahr 2013 für die Gehaltsklasse C noch Werte zwischen 17 und 32 mg P₂O₅ pro 100 g Boden, ohne dass die empfohlenen Düngemengen für die Erhaltungsdüngung geringer gewesen wären.

Die Zweiteilung der Definition der Gehaltsklasse C führt in der Praxis regelmäßig zu Konflikten. Versuche in Baden-Württemberg zeigten bei einem 10-jährigen Verzicht auf P-Düngung bei einem Ausgangswert von etwa 18 mg CAL-P₂O₅ pro 100 g Boden (Klasse C), dass eine Entzugsdüngung von 50 kg P₂O₅ pro ha und Jahr über diesen Zeitraum zwar gelegentlich Mehrerträge bei Getreide und Hackfrüchten gegenüber der ungedüngten Variante erzielt wurden, die Kosten für die Düngung aber höher lagen als der Gewinn durch den Mehrertrag. Die Düngung war demnach ökonomisch nicht sinnvoll. Da aber der P-Bodengehaltswert in dieser Zeit auf etwa 13 mg P₂O₅ pro 100 g Boden abgesunken war, wurde die Düngung dennoch als gerechtfertigt angesehen (Mokry 1996).

Besonders in den unteren Gehaltsklassen zeigen sich in der Praxis vielfach überraschende Ergebnisse. Hier konnte eine P-Düngung zum Teil keinen Mehrertrag erzielen und ein Verzicht auf P-Düngung konnte über viele Jahre durchgeführt werden, ohne dass geringere Ernten festgestellt wurden (Neyroud & Lischer 2003). Die Autoren empfehlen daher, die unteren Versorgungsklassen neu zu definieren. Durch eine Verwendung von leicht löslichen P-Düngern kann ein stabiler Ernteertrag erzielt werden, ohne dass die Bodengehaltsklasse angehoben werden muss. Wahrscheinlich sind biologische Faktoren dafür verantwortlich, dass der Mehrertrag durch

Tab. 1: Vorschläge für die Phosphor Bodengehaltsklassen (Kerschberger et al. 1997).

Versorgungsklasse	mg P pro 100 g Boden (CAL)	mg P ₂ O ₅ pro 100 g Boden (CAL)
A (sehr niedrig)	≤ 2,0	≤ 5
B (niedrig)	2,1–4,4	6–9
C (anzustreben)	4,5–9,0	10–20
D (hoch)	9,1–15,0	21–34
E (sehr hoch)	≥ 15,1	≥ 35

Düngung nur bedingt von den Bodengehaltswerten abhängt (Mengel 1985).

In vielen Versuchen wurde das optimale Ertragsniveau bereits bei 5 mg P oder 11 mg P_2O_5 erreicht, so dass diese Standorte nur auf Entzug gedüngt werden

müssen (Köster & Nieder 2007). Die vereinzelt aufgetretenen Fälle mit höheren Bodengehaltswerten, in denen mit Düngung noch Mehrerträge erzielt wurden, sollten neu bewertet werden.

Die Zweiteilung der Definition der Bodengehaltsklasse C führt in der Praxis zu Konflikten, wenn nur eine der Bedingungen erfüllt ist. Aus der Vergangenheit sind Entscheidungen bekannt, in denen der Erhalt der Phosphorgehalte im Boden als wichtiger angesehen wurde als die ökonomische Rentabilität der Düngung.

1.5 Sind die Bodengehaltsklassen richtig gewählt?

Die Festlegung der Bodengehaltsklassen ist seit langem heftig umstritten (z. B. Hege et al. 2008, Römer 2013). Bei einer Untersuchung in der Schweiz wurde festgestellt, dass eine Vielzahl von Böden in der Kategorie arm bis mäßig eingestuft waren, deren Ernteerträge keinen Hinweis auf eine Unterversorgung zeigten. Die Autoren schließen daraus, dass mit der gängigen Einteilung der Phosphor-Versorgungsklassen zurzeit die P-Versorgung der Böden unterschätzt wird.

Auch der VDLUFA (Kerschberger et al. 1997) schrieb, dass 4,5 mg P oder 10 mg P_2O_5 pro 100 g Boden fast immer ausreichen, um mit einer Erhaltungsdüngung den optimalen Ertrag zu erzielen. Dennoch wurde die Obergrenze der Klasse C mit 9 mg P pro 100 g Boden deutlich

höher gewählt. Um den Gehalt in den obersten 30 cm des Bodens um 1 mg P pro 100 g Boden anzuheben, sind im Mittel 100 kg P-Dünger nötig (Tab. 2). Rein rechnerisch müssten es nur etwa 30 kg P sein, aber ein Teil des zugeführten Phosphors wird in Bindungsformen umgewandelt, die nicht mehr mit der DL- oder CAL-Methode nachweisbar sind. Werner (2010) konnte durch Düngung einer Fläche ohne Pflanzenbewuchs zeigen, dass bereits nach einem Tag nur noch 87 bzw. 78% des zugeführten Phosphors nachweisbar waren, nach einem Monat waren es noch 82 bzw. 51%.

Da mehrere 100 kg Phosphor zwischen der unteren und oberen Grenze der Gehaltsklasse C liegen, ist die obere Grenze der Bodengehaltsstufe C sehr umstritten.



Tab. 2: Benötigte P-Menge zusätzlich zum Pflanzenentzug zur Erhöhung des Gehaltes an DL-löslichem Phosphat im Boden um 1 mg je 100 g Boden in kg P pro ha nach Römer (2013).

Boden	Bei DL-P-Gehalten < 3,5 mg/100 g Boden	Bei DL-P-Gehalten 3,5–7 mg/100 g Boden
Sandböden	100	82
Sand lehmig, lehmiger Sand	120	92
Sand Lehm, sandiger Lehm	100	96
Lehm, Sand Ton, Ton	136	106
Löss-Schwarzerde	80	100
Mittel	100	
3 Sandböden, Niedersachsen	125	
8 Böden, Bayern	150	

Verschiedenste Autoren halten die Werte seit langem für zu hoch (Isermann 2008, Römer 2014, Köster & Nieder 2007, Kuchenbuch 2010, Hege et al. 2008, Werner 2010).

Inzwischen hat auch die VDLUFA eine neue Empfehlung für die Richtwerte der Bodengehaltsklassen veröffentlicht (VDLUFA 2015). Die Neubewertung führt so-

wohl zur Absenkung des unteren Richtwertes der Bodengehaltsklasse C (von 4,5 mg P pro 100 g Boden auf 3 mg P pro 100 g Boden), als auch zur Absenkung des oberen Richtwertes der Bodengehaltsklasse C (von 9 mg P pro 100 g Boden auf 6 mg P pro 100 g Boden). Eine Erhöhung des oberen Richtwertes in Bodengehaltsklasse C auf 7,5 mg P pro 100 g Boden ist für Regionen mit niedriger Niederschlagssumme zulässig (VDLUFA 2015). Auch für die übrigen Bodengehaltstufen werden Anpassungen der Richtwerte vorgeschlagen (Tab. 3).

Tab. 3: Überarbeitete Richtwerte der Phosphor-Bodengehaltsklassen nach VDLUFA (2015) *6 mg P pro 100 g Boden (CAL) für alle Standorte mit Niederschlagsmengen > ~550 mm/Jahr, in Trockengebieten (<~550 mm) erhöht sich der Wert auf 7,5 mg P pro 100 g Boden (CAL)

Versorgungsklasse	mg P pro 100 g Boden (CAL)	mg P ₂ O ₅ pro 100 g Boden (CAL)
A (sehr niedrig)	≤ 1,5	≤ 3,4
B (niedrig)	1,5–3,0	3,4–7,0
C (anzustreben)	3,0–6,0*	7,0–14,0
D (hoch)	6,0–12,0	14,0–27,0
E (sehr hoch)	≥ 12,0	≥ 27,0

Um den Gehalt von 4 auf 9 mg P pro 100 g Boden anzuheben, werden im Mittel 500 kg P pro ha über den Pflanzenbedarf hinaus benötigt. Bei 3–6 mg CAL-P oder 7–14 mg CAL-P₂O₅ pro 100 g Boden ist eine Düngung in Höhe der Nährstoffabfuhr ausreichend.

1.6 Phosphor Bodengehaltsklassen im Vergleich

In den Bundesländern wurde unterschiedlich mit den bisherigen Empfehlungen der VDLUFA von 1997 zur Festlegung der Bodengehaltsklassen umgegangen. Während die Obergrenze der Klasse C in den meisten Bundesländern den Empfehlungen von 1997 entspricht oder sie unterschreitet, liegt sie in Schleswig-Holstein und Niedersachsen sehr deutlich darüber (Abb. 2). Theoretisch könnte eine Notwendigkeit für höhere P-Bodengehalte in diesen Bundesländern durch die hohen Ernteerträge bestehen. Im bundesweiten Vergleich zeigt sich dagegen, dass sich in Nordrhein-Westfalen mit niedrigeren Grenzwerten der Klasse C sogar höhere Weizenerträge als im 6 jährigen Durchschnitt in Niedersachsen erzielen lassen. Im europäischen Vergleich sind die Einstufungen aus Großbritannien von besonderem Interesse, da hier im Südwesten des Landes unter vergleichbaren Klima- und Bodenverhältnissen ähnlich hohe Erträge wie in Nordwest-Deutschland erzielt werden, jedoch bei sehr viel niedrigeren Phosphorgehalten im Boden. Eine Ana-

lyse von 22 000 Bodenproben aus ganz Europa mit einheitlicher Methode zeigte, dass nicht nur die Empfehlungen für die Höhe der Klasse C zwischen den beiden Ländern unterschiedlich hoch sind; die Bodengehaltswerte in Großbritannien liegen tatsächlich unter den Werten in Deutschland (Toth et al. 2014). Bei einem weiteren Versuch, um die unterschiedlichen Analysemethoden in Europa vergleichbar zu machen, wurden je zwei Bodenproben an 11 Labore in Europa verschickt und es wurde um eine Düngeempfehlung für die Erzeugung einer festgelegten Menge Winterweizen und Kartoffeln gebeten (Jordan-Meille et al. 2012).

Dabei zeigt sich, dass die Düngeempfehlungen in England insgesamt etwas von dem Vorgehen in Deutschland abweichen. Hier wird in der Klasse C nicht pauschal die Entzugsdüngung empfohlen, es werden stattdessen kulturartenspezifische Empfehlungen gegeben. Bei Gehalten von 7 mg CAL-P pro 100 g Boden wird zur Erzeugung eines Weizenertrages von bis zu 100 dt/ha

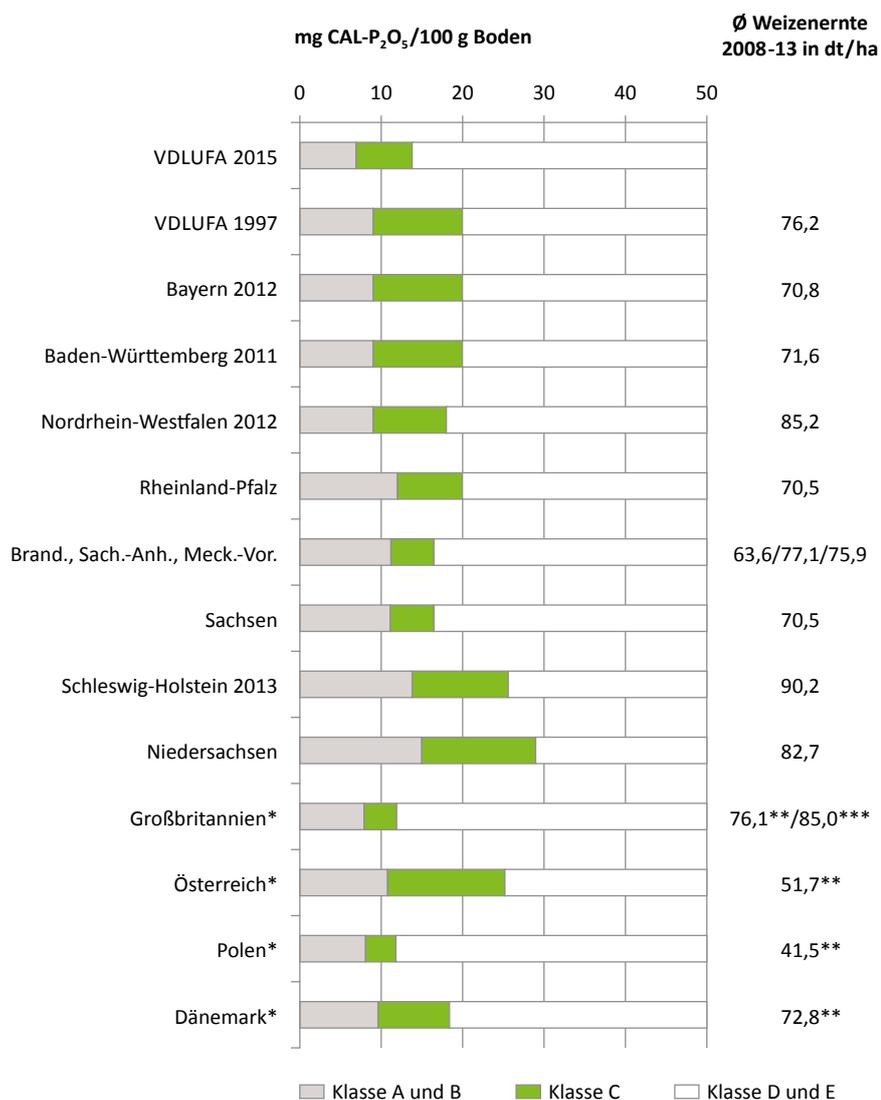


Abb. 2: Vergleich der Empfehlungen der VDLUFA von 1997 und Festlegung der Bodengehaltsklasse C in verschiedenen Bundesländern und europäischen Nachbarländern in mg CAL-P₂O₅ pro 100 g Boden sowie durchschnittliche Weizenernte 2008–2013.

(Quelle: Stat. Bundesamt, <http://berichte.bmelv-statistik.de/EQB-1002000-2014.pdf>). Angaben in DL wurden durch Multiplikation mit 0,8 in CAL-Werte umgerechnet; Angaben in P-Olsen (England und Dänemark) wurden mit der Formel $P-DL = (P-Olsen + 2,48) / 0,42$ (Vucans et al. 2008 in Jordan-Meille et al. 2012) umgerechnet.

* Werte aus Jordan-Meille et al. 2012

** Durchschnittliche Ernte 2008–2013, <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>

*** Durchschnittliche Ernte Eastern England 2013/2014 (https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/364157/structure-jun2013prov-UK-16oct14.pdf)

keine Phosphordüngung empfohlen; bei Kartoffeln, die ein schwach entwickeltes Wurzelsystem haben, wird über den Entzug gedüngt (Defra 2010). Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass der früher angenommene direkte Zusammenhang, dass hohe Erträge nur bei hohen Phosphorgehalten im Boden realisiert werden können, als widerlegt gilt. In Versuchen in Niedersachsen sank der P-Gehalt im Boden in 18 Jahren ohne Düngung von 5 mg P pro 100 g Boden auf 2 mg P pro 100 g Boden, während der bereinigte Zuckerertrag als Resultat des züchterischen Fortschritts und einer optimierten N-Düngung um 50% stieg (Römer 2009b).

Trotz einer Unschärfe, die bei der Umrechnung von Bodengehalts-Messwerten unterschiedlicher Analysemethoden entsteht, ergibt auch ein Vergleich mit Großbritannien Hinweise auf ein Reduktionspotenzial bei der Höhe der Bodengehaltsklasse C. Die Vereinbarkeit von reduzierten P-Bodengehalten und hohen Ernteerträgen ist in den überarbeiteten Richtwerten der VDLUFA (2015) aufgegriffen worden und in den überarbeiteten Empfehlungen berücksichtigt worden. Es gilt deshalb, diese Richtwerte zeitnah in die Praxis zu übertragen und in Deutschland flächendeckend, auch in der Beratung, anzuwenden.

Ein Vergleich der Bodengehaltsklassen mit Großbritannien zeigt, dass auch bei niedrigeren Phosphorgehalten im Boden hohe Ernten realisiert werden können. Die VDLUFA hat mit den überarbeiteten Richtwerten der Phosphor-Bodengehaltsstufen die Grundlage für eine Reduzierung oder gar vollständigen Verzicht der Phosphordüngung geschaffen.

1.7 Mobilisierbarkeit der Phosphorvorräte im Boden

Etwa 30 % der Ackerfläche in Deutschland liegen in den Bodengehaltsklassen A und B (Römer 2014); im Grünland liegt der Anteil bei fast 50 % (Übelhör & Hartwig 2012). Auf Böden der Gehaltsklasse A bringt eine Düngung mit hoher Sicherheit Mehrerträge, in der Gehaltsklasse B sind die Ergebnisse schon nicht mehr eindeutig (Römer 2014). Demnach kann auf dem Großteil der Ackerflächen die P-Düngung mehr oder weniger stark reduziert werden, ohne dass die Erträge zurückgehen. Hierbei stellt sich die Frage, ob zur Abreicherung vollständig auf eine Düngung verzichtet werden kann, oder nur die Höhe der Düngung reduziert werden sollte. Dieser Prozess dauert je nach Ausgangsmesswert auch bei Nulldüngung viele Jahre bis Jahrzehnte. Zurzeit ist die Empfehlung der Beratungspraxis, in der Gehaltsklasse E vollständig auf Düngung zu verzichten und in der Klasse D die Düngung um die Hälfte zu reduzieren. Auswertungen von langjährigen Versuchsreihen haben allerdings die Frage aufgeworfen, ob die Unterteilung in 5 Klassen wirklich sinnvoll ist oder eine dreistufige Unterscheidung von unter-, optimal und überversorgten Böden nicht ausreicht (Hege et al. 2008).

Die Zeit, die zur Absenkung der Phosphor-Boden-vorräte um 1 mg P pro 100 g Boden nötig ist, ist von der Höhe der Bodengehalte abhängig. Je höher die Ausgangswerte desto schneller sinken die Phosphorgehalte (Abb. 3). Um den Bodengehalt in der Klasse C um 1 mg P pro 100 g Boden zu senken, sind bei einem Ausgangswert von etwa 19 mg CAL-P₂O₅ pro 100 g Boden 3–5 Jahre Ernte ohne Düngung möglich; in der Gehaltsklasse A sind es etwa 10 Jahre (Mokry 1996, Römer 2011). Entgegen der Aussagen der VDLUFA sind verschiedene Autoren der Meinung, dass ab Werten von

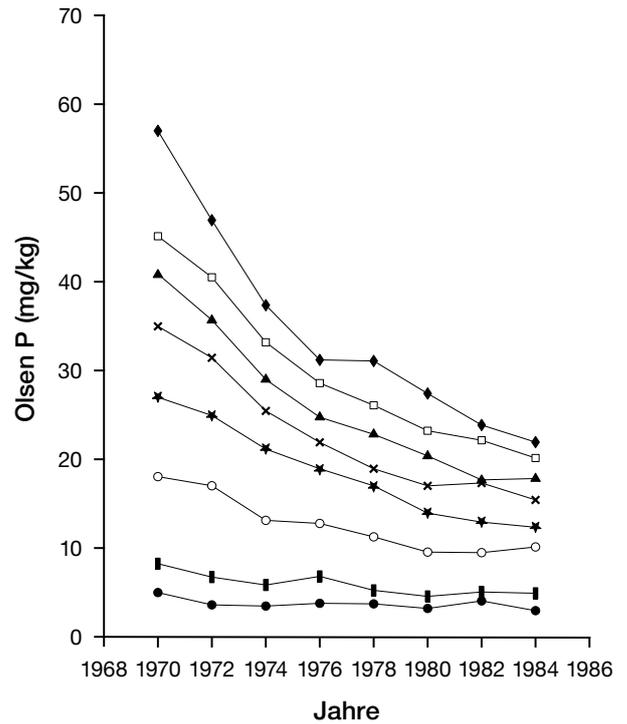


Abb. 3: Veränderung des Gehaltes an extrahierbarem P nach-Olsen von 8 Versuchsflächen in Abhängigkeit vom Ausgangsgehalt im Verlauf von 16 Jahren Pflanzenbau ohne P-Düngung (Johnston, Poulton & Syers 2001 in Syers et al. 2008, verändert).

20 mg CAL-P₂O₅ pro 100 g Boden die Düngung nicht nur reduziert werden sollte, sondern man ganz auf sie verzichten muss (Isermann 1999, Quirin et al. 2006).



In zahlreichen Abreicherungsversuchen (Tab.4) konnte gezeigt werden, dass die Pflanzenverfügbarkeit auch nach langer Verweildauer des Phosphors im Boden noch hoch ist, obwohl die Extrahierbarkeit mit den gängigen Methoden gering sein kann (Werner & Junge 1985). Wie lange ohne Ertragsverluste abgereichert werden kann, hängt unter anderem von der Höhe der P-Gehalte zu Beginn des Versuches ab.

Dass der Ertrag von Kartoffeln bei langjähriger P-Nulldüngung, wie bei den Versuchen von Stumpe et al. (1994) auf einer Sandlöß-Braunschwarzerde, erst nach mehr als 20 Jahren absinkt, ist sicher nicht auf alle Bodentypen übertragbar; die geringere Reaktion der Getreide-Erträge ist dagegen typisch für die stark und tief wurzelnden Kulturen. Andere Autoren fanden Rückgänge bei den Kartoffelerträgen schon nach wenigen

Jahren ohne P-Düngung (Gallet 2001). Hier zeigen sich die Effekte weiterer Einflussfaktoren auf den Ertrag. Neben der Höhe der Phosphor-Bodengehalte zu Versuchsbeginn waren es der P-Gehalt im Unterboden, pH-Wert, Ton- und Humusgehalt, Bodentextur, Wurzeltiefe der Kultur und die Witterung, die in unterschiedlichen Versuchsreihen einen Einfluss auf die Erträge hatten (Stumpe et al. 1994). Munk (1985) fand bei einer Auswertung bundesweiter Daten, dass bei Niederschlägen von weniger als 600 mm im Jahr die Phosphor-Bodengehalte nur selten einen Einfluss auf den Ertrag haben, da das Pflanzenwachstum meist durch die Trockenheit begrenzt wird. Mit einer Neuauswertung der vorhandenen Daten, die gezielt die Ertragsentwicklung bei einer P-Abreicherung beleuchtet, ließen sich detaillierte Empfehlungen entwickeln.

Tab. 4: Anzahl Jahre mit Nulldüngung, ohne signifikanten Ertragsrückgang nach unterschiedlichen Autoren.

Quelle	Jahre mit Nulldüngung	Ausgangswert in CAL-P ₂ O ₅ pro 100 g Boden	Kultur
Mokry (2011)	13 bzw. 14	23 mg P ₂ O ₅	Winterraps, Winterweizen, Wintergerste, Triticale
Köster & Nieder (2007)	23	25 mg P ₂ O ₅	Zuckerrübe
Baumgärtel (2003) in Köster & Nieder (2007)	27		Getreide
Stumpe et al. (1994)	20	~ 15,6 mg P ₂ O ₅ (DL = 19,5 mg)	Luzerne, Kartoffel, Zuckerrübe
Stumpe et al. (1994)	40	~ 15,6 mg P ₂ O ₅ (DL = 19,5 mg)	Winter-Roggen, Sommergerste

Eine langjährige Abreicherung der Phosphor-Bodenvorräte kann bei hohen Bodengehaltswerten mit Nulldüngung erfolgen, ohne dass Ertragseinbußen auftreten. Bei niedrigeren Werten ist wahrscheinlich eine kulturartenspezifisch unterschiedlich starke Reduktion der Düngungshöhe ökonomisch am effektivsten.

1.8 Wirtschaftlichkeit von Phosphordüngung

Damit eine P-Düngung wirtschaftlich ist, muss ein Mehrertrag erzielt werden, der über den Kosten für den Dünger und die Ausbringung liegt. Das Ergebnis ist zum einen davon abhängig, ob die P-Gabe bezahlt werden muss, oder als organischer Dünger im Betrieb anfällt und bei Nichtverwendung Kosten erzeugt. Zum anderen hängt die Wirtschaftlichkeit von den jeweiligen Marktpreisen für die Ernteprodukte ab, die stark schwanken. Muss der Dünger gekauft werden, haben Berechnungen von Köster & Nieder (2007) ergeben, dass durch die Düngung etwa eine Ertragssteigerung um 10% erzielt werden muss, um die Kosten zu decken; erst danach entsteht durch die Düngung ein Gewinn. Dieses Ergebnis wird nicht pauschal in allen Jahren für alle Kul-

turen exakt zutreffen, gibt aber einen Hinweis auf die Größenordnung.

Die Wirtschaftlichkeit kann einerseits aus schlagbezogenen und kulturspezifischen Daten für das jeweilige Düngungsjahr berechnet werden. Ein anderer Ansatz ist die Bilanzierung der langfristigen Phosphorzufuhr über Dünger und Futtermittel abzüglich der Abfuhr von tierischen und pflanzlichen Ernteprodukten. Dieser Bodenvorrat an Phosphor kann nicht direkt aus den DL- oder CAL-Messwerten abgelesen werden, da ein Großteil des Phosphors in nicht mit gemessenen stabilen Bindungsformen vorliegt. In der Vergangenheit wurde den Böden lange Zeit mehr Phosphor zu- als abgeführt, so dass die durchschnittliche P-Ausnutzung bei etwa 40%

lag (Scheffer 2002). Nach den Bilanzierungen von Frede & Bach (2010) sind zwischen 1950 und 1999 in den alten Bundesländern durchschnittlich 900–1100 kg P pro ha angereichert worden, in den neuen Bundesländern waren es 600–800 kg P pro ha (Berendt et al. 2003), die nicht in Ertrag umgesetzt wurden. Bereits zu Beginn der 1960er Jahre waren die durchschnittlichen Bodenvorräte so weit angestiegen, dass im Durchschnitt nur noch eine Erhaltungsdüngung sinnvoll gewesen wäre. Pro ha akkumulierten im Mittel 755 kg P, die nicht in Ertrag umgesetzt wurden.

Summiert man die Kosten für die Anreicherung des P-Gehaltes in Form von Mineraldünger in den Böden seit 1960 auf, kommt man bei einer Verzinsung von 5 % auf Kosten von 45 Mrd. €, die von den Landwirten aufgebracht wurden (Auerswald 1996 in Köster & Nieder 2007). Auch wenn der angereicherte P-Vorrat nicht auf allen Flächen gleich hoch ist, sind die Berechnungen ein Hinweis auf potenziell sehr hohe Phosphor-Reserven im Boden, auf deren Größe die routinemäßigen Bodenuntersuchungen nur sehr eingeschränkte Hinweise liefern.

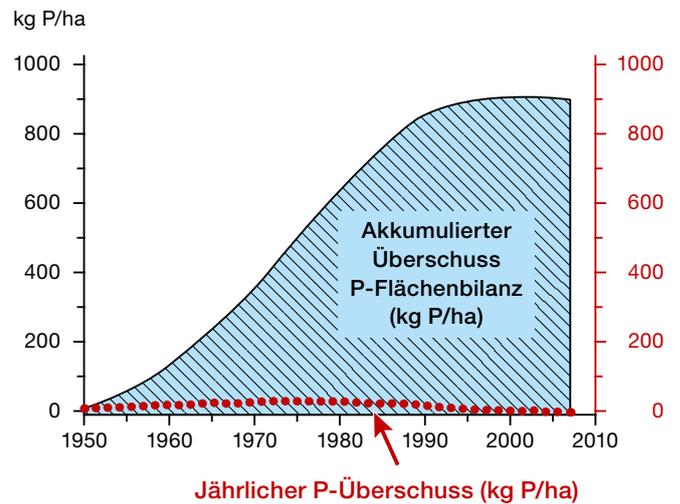


Abb. 4: Akkumulierte P-Mengen in den landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands im Zeitraum 1950-2007, Frede & Bach 2010.

Bei Düngerkosten von 30,- € pro 100 kg Tripelsuperphosphat (= 20 kg P) wurden mit den durchschnittlich 755 kg P pro ha zwischen 1950 und 2007 Phosphormengen im Wert von 1 130,- € pro ha angereichert, die es zu nutzen gilt.

1.9 Effizienter Phosphor Einsatz in der Landwirtschaft

Der Schlüssel für einen effektiven Einsatz von Phosphor in der deutschen Landwirtschaft liegt in der überregionalen Verteilung des Wirtschaftsdüngers. In vielen Betrieben mit hohen Tierzahlen übersteigt der P-Gehalt im zugekauften Futter die Abfuhr über die Produkte und in diesen Betrieben wird der Phosphor im Wirtschaftsdünger dann vom wertvollen Dünger zum Entsorgungsproblem. Auswertungen von europaweiten Daten haben gezeigt, dass nicht nur die Tierzahl sondern auch die Tierart entscheidend für die P-Bilanz eines Betriebes ist (Brouwer et al. 1995 in Sims et al. 2000). Bei Schweine- und Geflügelhaltung wurden Überschüsse von 269 kg P pro ha errechnet, 24 kg P pro ha bei Rinderhaltung und 12 kg P pro ha in Ackerbaubetrieben. Durch den Wirtschaftsdüngereinsatz wird der Phosphorbedarf der Pflanzen meist vor dem Stickstoffbedarf gedeckt und zu viel Phosphor ausgebracht, wenn die maximal mögliche

Menge Stickstoff durch Wirtschaftsdünger abgedeckt wird. Ein bedarfsgerechter Umgang mit Wirtschaftsdüngern erfordert die Berechnung der benötigten Güllemenge anhand des Phosphorbedarfs des Schlages. Grundsätzlich ist das N/P-Verhältnis, das auf den einzelnen Schlägen benötigt wird, variabel, während es im Wirtschaftsdünger eines Betriebes bei gleichbleibender Fütterung eher konstant ist. Wirtschaftsdünger mit unterschiedlichen P-Konzentrationen kann durch Gülleseparation hergestellt werden und ermöglicht phosphorarme Fraktionen in viehstarken Betrieben auszubringen. Die feste Fraktion, in der ein Großteil des Phosphors enthalten ist, kann exportiert werden. Durch das Senken des Wasseranteils steigt die Transportwürdigkeit des Wirtschaftsdüngers und er könnte in Ackerbauregionen einen wichtigen Beitrag leisten, um mineralischen Phosphordünger zu ersetzen.

Der Kernpunkt eines effizienten Umgangs mit Phosphor in der Landwirtschaft ist der Ersatz von Mineraldünger durch eine landesweite Verteilung von Wirtschaftsdüngern. Diese Strategie ist der Schlüssel zur Reduzierung der Importabhängigkeit von Rohphosphaten, zur langfristigen weltweiten Ernährungssicherheit und zur Verringerung der regionalen Umweltbelastungen.



2. Phosphor-Verluste von landwirtschaftlichen Flächen

Da die Absenkung der Bodengehaltswerte erst langfristig die Effizienz des Phosphor Einsatzes in der Landwirtschaft steigern kann, gilt es, die Phosphor-Verluste von den landwirtschaftlichen Flächen durch verschiedene Maßnahmen so weit wie möglich zu reduzieren. Hohe Phosphor-Verluste treten meist dann auf, wenn eine Phosphorquelle mit effektiven Transportwegen verbunden ist, wenn z. B. auf Flächen mit hohen P-Bodenvorräten hohe Wasserabflüsse auftreten. Wie groß die Wassermengen sind, die von einer Fläche über die verschiedenen Wege abfließen, hängt von räumlichen, bodenphysikalischen und wetterbedingten Faktoren ab.

Grundsätzlich ist die Kenntnis der relevanten Wasserwege auf einem Schlag die Voraussetzung dafür, effektive Maßnahmen zur Reduzierung der P-Verluste auswählen zu können.

Obwohl die Verluste über den Grundwasserabfluss pro Fläche gering sind, summieren sie sich bundesweit zum zweitwichtigsten Austragspfad auf, da sie auf jeder Fläche auftreten (Abb. 5). Die Verluste über Erosion sind potenziell auf der Einzelfläche sehr hoch, aber nicht alle Nährstoffe gelangen in die Gewässer, da die Sedimente vielfach auf anderen Flächen wieder abgelagert werden.

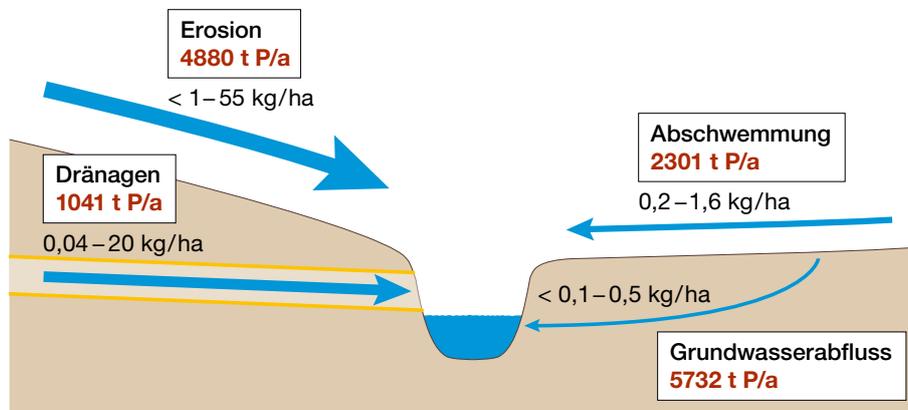


Abb. 5: Höhe der Phosphor-Verluste über verschiedene Wasserwege in kg P pro ha und Jahr (schwarz) nach Modellierungen von Tetzlaff (2006) und Berechnungen der potenziellen Erosion nach BGR (2014), Umrechnung des potenziellen Bodenabtrags von t pro ha in kg P pro ha nach Messungen von Klik (2004) sowie Höhe der Phosphor-Einträge in die Gewässer in Deutschland in t P pro Jahr (rot) nach Fuchs et al. (2014).

Das Risiko für Phosphor-Verluste steigt durch das Zusammentreffen von effektiven Transportwegen mit ergebigen Phosphorquellen. Die resultierende Umweltbelastung ergibt sich aus der räumlichen Anbindung dieser problematischen Flächen an die Oberflächengewässer.

2.1 Die Transportwege: Wasserabfluss von Flächen

Die landschaftliche Einbindung, die Bodenarten und künstliche Entwässerung beeinflussen die Aufteilung der Niederschläge auf bestimmte Wasserwege und damit die Höhe der P-Verluste. Wichtige Abflusswege sind:

- Oberflächenabfluss, Erosion und Abschwemmung
- Grundwasserabfluss
- Dränagen.

Im Folgenden werden für die wichtigsten Wasserwege typische Werte für die Höhe der Phosphor-Verluste angegeben, wobei ihre Wirksamkeit für die Umwelt von ihrer landschaftlichen Einbettung abhängt. An Partikel

gebundener Phosphor kann nach der Mobilisierung wieder abgelagert werden, wenn er nicht unmittelbar in Gewässer eingetragen wird.

Die Kenntnis der Wasserwege einer Fläche ist die Grundlage für die Auswahl effektiver Maßnahmen zur Reduktion der P-Austräge.



2.1.1 Oberflächenabfluss

Im Oberflächenabfluss wird Phosphor in gelöster Form (Abschwemmung) oder an Partikel gebunden (Erosion) transportiert (Kronvang 1992). Die Abschwemmung er-

reicht wahrscheinlich in den meisten Regionen maximal Werte von 1,6 kg P ha und Jahr, über Erosion werden bis zu 15 kg P pro ha und Jahr ausgetragen (Tetzlaff 2006).

2.1.1.1 Abschwemmung

Ø Bundesweite Verluste 2000–2011 * ➡ 2301 t P pro Jahr

Anteil an den diffusen P-Austrägen * ➡ 13%

Höhe der P Verluste landwirtschaftlicher Flächen pro ha ** ➡ 0,14–1,6 kg P pro ha und Jahr

* Fuchs et al. 2014, ** Tetzlaff 2006

Unter Abschwemmung wird der Austrag von gelöstem P mit dem Oberflächenabfluss verstanden, wenn die Niederschlagsmengen nicht mehr im Boden versickern. Dies kann bei extremen Witterungsverhältnissen geschehen, wenn der Boden nach lang anhaltenden Niederschlägen wassergesättigt ist. Abschwemmung tritt aber auch regelmäßig auf ebenen, undrinierten Flächen mit hohen Grundwasserständen auf, da hier die maximale Wasserkapazität des Bodens schneller überschritten wird. Daher

kann Dränung auf einigen Flächen eine Maßnahme sein, die Phosphor-Verluste zu verringern. Auch wenn die Gesamtmenge an Phosphor, die bei der Abschwemmung ausgetragen wird, im Vergleich zur Erosion gering ist, ist der gelöste Phosphor direkt pflanzenverfügbar und seine

Abschwemmungsrisiko

Hohes Risiko	Geringes Risiko
Oberflächliche Wirtschaftsdüngerausbringung im Grünland	Gülleinjektion im Grünland
Oberflächliche Mineraldüngerausbringung	Unterfußdüngung im Ackerbau
Hoher P-Gehalt im Boden	Geringer P-Gehalt im Boden
Geringe Wasserhaltekapazität/geringe Humusgehalte	Hohe Wasserhaltekapazität/hohe Humusgehalte

Umweltwirkung im Gewässer überproportional hoch.

Die Höhe der Austräge über Abschwemmung hängt vom Entstehungsort der Oberflächenabflüsse, seiner Höhe, den Fließwegen und von der P-Konzentration ab, die maßgeblich von der Bodengehaltssklasse und vom Zeitpunkt der letzten Phosphordüngung beeinflusst werden. Auffällig sind die hohen Werte, die vom Grünland gemessen werden (Preuße & Voss 1979, Erpenbeck 1987, Mollenhauer 1987 u.a. in Tetzlaff 2006). Es wird angenommen, dass die Grasnarbe die Sorption von P an Bodenpartikel behindert (Tetzlaff 2006). Auf einem Grünland mit 7% Hangneigung wurden bis zu 14 Wochen nach der Düngung erhöhte P-Verluste gemessen. Insgesamt wurden bei Verwendung von flüssigem P-Dünger doppelt so hohe P-Verluste gemessen wie ohne Düngung. Bei festem Mineraldünger waren die Verluste sogar fast 4-mal so hoch (Sharpley & Syers 1983).

Als typische mittlere Werte für die Abschwemmung von Ackerflächen gibt Tetzlaff (2006) einen jährlichen P-Verlust von 0,2 kg pro ha an; vom Grünland werden durchschnittlich 0,8 kg pro ha ausgetragen und von Grünland auf Marschböden sind es 1,4–1,6 kg pro ha. Andere Autoren haben Abschwemmungen von durchschnittlich 0,147 kg TP pro ha von Hanggrünländern gemessen und damit ähnlich hohe Werte wie von Ackerflächen vorgefunden (Diepolder & Raschbacher 2012).

Die Verluste über Abschwemmung sind insbesondere bei oberflächlicher Düngeausbringung auf Grünländern hoch, wenn die Düngung kurz vor starken Niederschlägen erfolgt.

2.1.1.2 Erosion

Ø Bundesweite Verluste 2000–2011 *	➔	4880 t P pro Jahr
Anteil an den diffusen P-Austrägen *	➔	43%
Höhe der P Verluste landwirtschaftlicher Flächen pro ha **	➔	< 1–55 kg P pro ha und Jahr

* Fuchs et al. 2014,

** BGR 2014, umgerechnet aus t potentielltem Bodenverlust pro ha

Erosion findet vornehmlich auf Ackerflächen statt und ist bundesweit in den verschiedenen Einzugsgebieten für 10–50% der diffusen Phosphor-Einträge verantwortlich (Behrendt et al. 2003). Der Anteil an Bodenverlusten durch Erosion wird sowohl von der Höhe und Intensität der Niederschläge bestimmt, als auch von Bodenbeschaffenheit, Kultur, Bodenbearbeitung und dem Gefälle und der Geländeform beeinflusst. Langjährige Messungen in Niedersachsen zeigten, dass etwa 50% der Bodenverluste im Sommer auftraten und zumeist nur kurzzeitig hohe Werte gemessen wurden, wenn z. B. starke Niederschläge unmittelbar nach der Bodenbearbeitung auftraten oder auf wassergesättigten Boden trafen (Mosimann et al. 2012).

Durch Erosion gelangen 75–90% der partikulären Phosphor-Austräge in die Gewässer. Erosion findet im Gelände etwa zur Hälfte in Rinnen, Rillen und reliefbedingten Senken statt und zur anderen Hälfte als flächenhafte Erosion (UBA 2015). Da es sich um keinen gleichmäßig verlaufenden Prozess handelt und bei wenigen Starkregenereignissen pro Jahr starke Bodenverluste auftreten, ist er durch Messungen schwer zu dokumentieren. Auch bei einer 14-tägigen Probenahme zur Bestimmung der Phosphorfrachten werden die Ereignisse oft nicht mit erfasst. Zudem hat das abgeschwemmte Ma-

terial eine andere Zusammensetzung als der restliche Boden und damit ist der P-Austrag schwer zu berechnen. Das Material ist in der Regel feiner und leichter als der durchschnittliche Boden, und, da Phosphor bevorzugt an Ton und organische Substanzen gebunden ist, wird meist mehr P ausgetragen, als von der reinen Materialmenge her zu erwarten wäre (Auerswald & Weigand 1999).

Eine effektive Bekämpfung von Erosionsverlusten muss mit der Identifikation der Wasser- und Erosionswege im Gelände beginnen.

Die Erosionswirkung wird neben den oben genannten Faktoren durch die Lagerungsdichte, den Humusgehalt, den Grad der Bodenbedeckung, die Verteilung der Korngrößenfraktionen im Boden und den Anfangswassergehalt zu Beginn des Niederschlages beeinflusst. Die Bearbeitungsrichtung und die Richtung von vorhandenen Fahrspuren sind entscheidend, ob es bei Niederschlägen zur Bündelung des Abflusses und damit zur Erhöhung des Erosionspotenzials kommt.

Eine Karte der potenziellen Erosionsgefährdung in Deutschland, die auf der Grundlage von bodenkundliche Daten, Geländemorphologie und Klimadaten erstellt wurde, zeigt einen potenziellen durchschnittlichen Bodenverlust von < 1 und 10 t Bodenabtrag pro ha und Jahr im Norddeutschen Flachland, wobei in den Jungmoränenlandschaften Schleswig-Holsteins, Mecklenburg-Vorpommerns und Brandenburgs das Risiko auch zwischen 10 und 30 t liegen kann (Abb. 6). Eine sehr hohe Erosionsgefährdung besteht im Niedersächsischen Berg- und Hügelland, im Sächsischen Hügelland, dem Erzgebirgsvorland, auf den Neckar- und Tauber-Gäuplatten und im Bayerischen Hügelland (BGR 2014). Der potenzielle Bodenverlust liegt sehr deutlich höher als der tatsächliche durchschnittliche Bodenverlust. In Niedersach-

Potentielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wasser in Deutschland

Herausgegeben von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe



Potentielle Erosionsgefährdung der Ackerflächen durch Wasser [t/(ha*a)]

Legend with color-coded risk levels: **<1** (äußerst gering), **1 - <5** (sehr gering), **5 - <10** (gering), **10 - <15** (mittel), **15 - <30** (hoch), **30 - <55** (sehr hoch), **≥55** (äußerst hoch), **nicht bewertet**.

Quellen:
 Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte von Deutschland 1:1.000.000 (FISBo BGR),
 Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes von 1961-1990 (DWD),
 Landnutzungsdaten CORINE Land Cover 2006 (Statistisches Bundesamt).

Methodik:
 Ad-hoc-AG Boden (2000); Methodendokumentation Boden;
 Anpassung dokumentiert im Methoden-Wiki des FISBo BGR.

Wiss. Bearbeitung: J. Bug (BGR)
Methodenumsetzung: W. Stolz (BGR)
Kartographie: U. Stegger (BGR)

Abb. 6: Karte der potentiellen Erosionsgefährdung durch Wasser (BGR 2014).



sen wurde aber bei einem einzelnen Ereignis von 1 300 Parzellenjahren ein Verlust von 50 t Boden gemessen (UBA 2015).

Die Phosphormenge, die mit dem Boden ausgetragen wird, variiert je nach Bodenversorgung sehr stark und zeigt selbst bei Messungen auf demselben Schlag keinen direkten Zusammenhang mit der Menge des Bodenabtrags. Je nachdem, wann starke Niederschläge nach der letzten Düngung auftreten, wurden auf einer Versuchsfläche in Bayern zwischen 1989 und 2002 **mittlere jährliche Phosphor-Verluste durch Erosion von 0,7 bis 6,19 g P pro kg Bodenverlust** gemessen (Lfl). Im Mittel lagen die Werte in den 14 Jahren bei 2,6 g P pro kg Bodenverlust. In Österreich geht man vereinfachend davon aus, dass mit einer Tonne Bodenverlust 1 kg Phosphor pro ha über Erosion verloren geht (Klaghofer et al. 1994 in Klik 2004). Der mobilisierte Phosphor gelangt anschließend entweder direkt in angrenzende Gewässer oder die Sedimente werden auf benachbarten Flächen wieder abgelagert. In der Schweiz gelangen etwa 20 % des erodierten Bodenmaterials in die Gewässer (Prasuhn et al. 2014). Der bundesweite P-Verlust von landwirtschaftlichen Flächen über Erosion liegt also deutlich höher als die etwa 8 900 t P pro Jahr, die über die Gewässer verloren gehen (Behrendt et al. 2003). Die Höhe der tatsächlichen Bodenverluste liegt sehr weit unter den potenziell möglichen und hängt zum Beispiel von den angebauten Kulturen ab (Tab. 5). Ein hohes Abtragungspotenzial haben Kulturarten wie spät ausgesätes Wintergetreide, Zuckerrüben, Mais und Kartoffeln, bei denen die Bodenbedeckung über mehrere Monate im Jahr unter 30 % liegt (Prasuhn 2012). Der Erosionsabtrag bei Zuckerrüben war bei den niedersächsischen Untersuchungen eher gering, da auf 85 % der Flächen im Winter Mulchsaat oder Zwischenfruchtanbau erfolgte (Mosimann et al. 2012).

Die Korngrößenzusammensetzung hat einen großen Einfluss auf die Erosion, da feinere und leichtere Sedimente eher durch Niederschläge mobilisiert werden als schwere. Bei einem hohen Anteil an feinen Bodenbestandteilen wie Schluff, wie ihn zum Beispiel Lössböden aufweisen, steigt das Erosionsrisiko; bei hohen Anteilen von Steinen auf der Bodenoberfläche, aber auch bei grober Saatbettgestaltung, die den Wasserabfluss ver-

Tab. 5: Mittlerer Bodenabtrag verschiedener Kulturen bei pflugloser und pflügender Bodenbearbeitung auf erosionsgefährdeten Flächen in Niedersachsen (Mosimann et al. 2012). Mittel = 1,7 t pro ha und Jahr.

Kultur	Mittlerer Bodenabtrag in t pro ha und Jahr	
	pfluglos	Pflug
Winterweizen	0,6	1,2
Zuckerrüben	1,1	0,8
Wintergerste	0,1	1,1
Winterraps	0,3	0,5
Kartoffeln	k. A.	4,2
Futtermais (Silomais)	0,2	1,0

Erosionsrisiko	
Hohes Risiko	Geringes Risiko
Starke Hangneigung	Hangneigung unter 2 %
Lange erosive Hanglänge	Hänge mit Querstrukturen
Bearbeitungsrichtung in Hangrichtung	Bearbeitungsrichtung quer zum Hang
Pflügende Bodenbearbeitung	Mulchsaat, Direktsaat, Strip-Till
Geringer Humusgehalt	Hoher Humusgehalt
Boden mit hoher Lagerungsdichte mit geringer Infiltrationskapazität	Lockerer Boden mit hoher Infiltrationskapazität
Hoher Anfangswassergehalt im Boden	Hohe Wasseraufnahmekapazität
Feines Saatbett in Hanglagen	Grobes Saatbett
Fruchtfolge mit langen Zeiträumen ohne Bodenbedeckung	Fruchtfolge mit fast kontinuierlicher Bodenbedeckung
Anbau von Mais, Zuckerrüben, Kartoffeln	Grünlandnutzung
Bei verdichteten Fahrspuren in Hangrichtung	

langsamem, und bei hohem Humusanteil, der die Wasserspeicherung erhöht, sinkt es. In Böden mit aktivem Bodenleben und vielen Regenwurmängen steigt die Versickerungsrate und die Erosion sinkt.

Je länger die Strecke ist, auf der das Wasser ohne Barrieren und Hindernisse abfließen kann, desto größer wird die Geschwindigkeit des abfließenden Wassers und damit des Bodenabtragsrisikos. Insbesondere in verdichteten Fahrspuren in Hangrichtung kann sich der Abfluss bündeln. Aus der Literatur ist bekannt, dass über Rillenerosion Bodenverluste von bis zu 5 t pro ha verursacht werden (Sanders & Mosimann 2005). Gleichzeitig bedingt das Gefälle die Abflussdynamik. Bei hohem Gefälle kann auch auf kurzen Hanglängen ein hoher Bodenverlust auftreten.

Bei einer Bodenbearbeitung mit dem Pflug werden Erntereste von der Oberfläche entfernt, die die Aufprallintensität von Regentropfen vermindern können, die Versickerung durch Regenwurmängen wird reduziert und der Boden verliert seine Stabilität. Daher sind mit dem Pflügen die höchsten Verluste an Sedimenten verbunden. Je geringer der Anteil der bearbeiteten Bodenoberfläche ist, desto geringer wird das Erosionsrisiko. Ist ein Verzicht auf Pflügen nicht möglich, sollte die Bearbeitung möglichst direkt vor der Neueinsaat stattfinden.

Schon ab einem Gefälle von 2 % und bei Regenernischen von mehr als 10 mm pro m² können Bodenverluste durch Erosion auftreten.

2.1.2 Grundwasserabfluss

Ø Bundesweite Verluste 1998–2000 *	➔ 5732 t P pro Jahr
Anteil an den diffusen P-Austrägen *	➔ 28%
Höhe der P Verluste landwirtschaftlicher Flächen pro ha **	➔ < 0,1–0,5 kg P pro ha und Jahr

* Fuchs et al. 2014, ** Tetzlaff 2006

Die Phosphor-Verluste über das Grundwasser sind meist gering, da Phosphor überwiegend an Bodenpartikel gebunden vorliegt und gelöster Phosphor während der Bodenpassage wieder gebunden werden kann. Dennoch wurden in Deutschland in den Jahren 1998–2000 durchschnittlich etwa 5 700 t Phosphor pro Jahr über das Grundwasser ausgetragen, und damit gelangen etwa 28% der Phosphor-Verluste aus diffusen Quellen über das Grundwasser in die Flüsse, Seen und Meere (Behrendt et al. 2003). Unter tonarmen Sandböden werden meist niedrige P-Konzentrationen im Grundwasser gemessen, unter lehmigen Böden liegen sie vielfach höher. Dieser Befund erscheint zunächst überraschend, da lehmige Böden eine höhere P-Bindungsfähigkeit besitzen; hier bieten jedoch häufiger Schumpfrisse und Regenwurmgänge stabile Abflusswege ins Grundwasser (Tetzlaff 2006). Im Einzugsgebiet der Ems liegen die modellierten jährlichen Phosphor-Einträge über das Grundwasser auf 62% der Flächen unter 0,1 kg pro Phosphor pro ha, höhere Einträge von 0,3 kg P pro ha wurden für gedrängte Niedermoore und Marschböden berechnet. In

den viehreichen Regionen dürften die hohen P-Gehalte im Boden die Hauptursache für die hohen Austräge über das Grundwasser sein.

Risiko des P-Verlustes über das Grundwasser	
Hohes Risiko	Geringes Risiko
Hoher P-Gehalt im Boden (Verlust: 0,4 kg P/ha/a)	Niedriger P-Gehalt im Boden (Verlust: < 0,1 kg P/ha/a)
Hohe Abflüsse über das Grundwasser	Geringe Abflüsse über das Grundwasser (Verlust: < 0,1 kg P/ha/a)
Großer Grobporenanteil	Geringer Grobporenanteil
Kurze Sickerstrecke im Boden	Lange Sickerstrecke im Boden
Existenz von bevorzugten Abflusswegen in lehmigen Böden	
Lange Verweilzeit des Sickerwassers	

Zur effektiven Reduktion der Phosphor-Verluste über den bundesweit zweitwichtigsten Austragspfad Grundwasser ist eine großflächige Absenkung der P-Bodengehalte erforderlich.



2.1.3 Dränabfluss

Ø Bundesweite Verluste 2000–2011 *  1041 t P pro Jahr

Anteil an den diffusen P-Austrägen *  16%

Höhe der P Verluste landwirtschaftlicher Flächen pro ha **  0,04–20 kg P pro ha und Jahr

* Fuchs et al. 2014, ** Tetzlaff 2006

Grundwassernahe Standorte stellen besondere Herausforderungen an das P-Management. Während man in der Vergangenheit davon ausging, dass man Phosphor-Verluste über Dränagen vernachlässigen kann, liegen heute viele Messungen von hohen Austrägen aus Flächen mit hohen Phosphor-Versorgungsstufen und von Sand- oder Moorböden mit geringer Phosphor-Bindungsfähigkeit vor (King et al. 2015). Eine hohe Bindungsfähigkeit liegt bei hohen Gehalten an Eisen, Aluminium, Calcium, Ton, hohen pH-Werten und in Mineralböden mit hohen Humusgehalten vor.

Dränagen verändern den Phosphorkreislauf auf verschiedene Weise. Zum einen erhöhen sie die Sauerstoffversorgung im Boden, fördern damit die Bindung von Phosphor an Eisen- und Aluminiumionen und reduzieren damit potenziell die P-Verluste. Gleichzeitig erhöht sich der Wasserabfluss um 10–25 % und damit die potenzielle Austragsgefahr. Dränagen reduzieren den Oberflächenabfluss und die oberflächlichen Sedimentverluste; in feinkörnigen Klei- und Tonböden können Schrumpfrisse, Regenwurmgänge und alte Wurzelkanäle aber gleichzeitig den direkten Eintrag von Phosphor in die Gewässer erhöhen. Zwischen 35 und 81 % des Abflusses gehen über diese sogenannten präferentiellen Fließwege direkt ins Dränwasser (z. B. Lennartz et al. 1999). **Pfluglose Bodenbearbeitung erhöht auf ebenen, dränierten Klei- und Tonböden den P-Verlust**, da solche schmalen Abflusswege in Kleiböden lange bestehen bleiben. Überraschend ist dabei, dass bis zu 70 % des über Dränagen ausgetragenen Phosphors in partikulärer Form stattfindet. In verschiedenen Untersuchungen wurden jährlich zwischen 5 und 407 kg Sedimentverluste pro ha über Dränagen dokumentiert (Radcliffe et al. 2015). Selbst unter Grünland bestand die P-Fracht nach künstlichen Starkregen bei Pralltellerabbringung zu 60 % und bei Gülleinjektion zu 50 % aus partikelgebundenem Phosphor (Diepolder et al. 2012). Ob ein und dieselbe Fläche ohne Dränagen höhere P-Verluste erfährt als mit einer Dränage, ist nicht generell zu beantworten. Zum einen existieren nur wenige Untersuchungen, bei denen alle Abflusswege gemessen wurden, zum anderen unterscheiden sich die Bodenarten erheblich. Die VDLUFA (2001) empfiehlt das Anlegen von Dränagen auf Mineralböden, auf denen es regelmäßig zu Oberflächenabfluss kommt.

In Moorböden erhöhen sich dagegen generell die Phosphor-Verluste mit der Dränagetiefe, da sich einerseits der Abbau der Torfschicht durch die Sauerstoffzu-



Risiko des P-Austrags über Drainageabfluss

Hohes Risiko	Geringes Risiko
Hoher P-Gehalt im Boden	Geringer P-Gehalt im Boden
Tonarme Sandböden bei hohen Grundwasserständen (Verlust: 1,8 kg P/ha*a)	Bindige Mineralböden (Verlust: 0,04–0,5 kg P/ha*a)
Organische Böden mit Grünlandnutzung (Verlust: 0,5–20 kg P/ha*a)	
Hochmoorböden in Ackernutzung (Verlust: bis 20 kg P/ha*a)	
niedrige Fe, Al, Ca, Ton- oder Humusgehalte sowie niedrige pH-Werte	hohe Fe, Al, Ca, Ton- oder Humusgehalte sowie hohe pH-Werte
Marschböden (Verluste: 0,3–1,4 kg P/ha*a)	
Mulch- oder Direktsaat auf Marsch-/Tonböden	
Hohe Phosphorgaben	Geringe Phosphorgaben
Hohe Wirtschaftsdüngergaben	Ausschließlich mineralische Phosphordüngung
Bei oberflächlicher Düngerausbringung	Bei Einarbeitung des Düngers in den Boden
Bei Düngung im Herbst	Bei Düngung im Frühjahr
Bei hohen Niederschlägen kurz nach der Düngerausbringung	Bei längerer Trockenheit nach Düngerausbringung

fuhr erhöht und Phosphor aus dem gespeicherten organischen Material freigesetzt wird und meist gleichzeitig die Nutzung und damit die Düngung intensiviert wird, weil die Fläche früher im Jahr mit schwereren Maschinen befahren werden kann.

Hohe jährliche Austräge von 0,3–1,4 kg P pro ha werden insbesondere in den Dränagen von **Marschböden** gemessen. In vielen Einzugsgebieten sind jedoch **Hoch- und Niedermoore** die wesentliche Phosphorquellen.

In den Flussgebieten der Nordseeküste und der Ems stammen 70 % der diffusen Phosphor-Austräge aus landwirtschaftlich genutzten Hochmoorböden, die oft weniger als 5 % der Fläche ausmachen (Behrendt et al. 2003). Da Moorböden meist eine geringe Speicherfähigkeit für Phosphor haben, werden hier jährliche **Verluste von 0,5 bis 20 kg P pro ha** gemessen.

Tief entwässerte Moorböden sind in vielen Einzugsgebieten die größten Phosphorquellen einer Landschaft, da sie den gedüngten Nährstoff kaum speichern und zusätzlich Phosphor durch den Torfabbau freigesetzt wird.





2.1.4 Überflutungen

Zu den Ereignissen, die einen sehr starken Einfluss auf die P-Freisetzung haben, gehören Überflutungen. Grundsätzlich wirken bei Überflutungen mit der Sedimentation und der Freisetzung zwei gegenläufige Prozesse auf die Phosphor-Austräge. Bei der Sedimentation wird partikelgebundener Phosphor auf den Flächen abgelagert und damit dem Gewässersystem entzogen. Bei **kurzen** Überflutungen können bis zu 128 kg Phosphor pro ha und Jahr auf den Flächen abgelagert werden (Hoffmann et al. 2009). **Längere** Überflutungen führen dagegen zu Sauerstoffmangel im Boden und damit ändert sich die Stabilität von mineralisch gebundenem Phosphor. Dann können bis zu 8 kg P pro ha und Jahr freigesetzt werden (Hoffmann et al. 2009). **Dauerhafte** Überflutungen führen dazu, dass organisches Material nicht abgebaut wird, sich Phosphor im Boden anreichert und die Austräge sinken (Delgado & Scalenghe 2008). Diese Moorbildungen treten allerdings nicht auf landwirtschaftlich genutzten Flächen auf.

Werden Ackerflächen überflutet, können durch die Strömung natürlich auch Bodenabträge erfolgen. Daher müssen Überflutungsräume als Grünland genutzt werden.

Risiko des P-Austrags bei Überflutungen

Hohes Risiko	Geringes Risiko
Hoher P-Gehalt im Boden	Geringer P-Gehalt im Boden
Hohe Phosphorgaben	Geringe Phosphorgaben
Hohe Wirtschaftsdüngergaben	Mineralische Phosphordüngung
Oberflächliche Düngerausbringung	Einarbeitung des Düngers in den Boden
Überflutung kurz nach der Düngerausbringung	Längere Trockenheit nach Düngerausbringung
Ackernutzung	Grünlandnutzung
Langandauernde Überflutung	Überflutungsdauer von wenigen Tagen

Kurzzeitig überflutete Grünländer können eine sehr effektive Phosphorsenke sein.

2.2 Die Quelle für Phosphor-Verluste: Bodeneigenschaften und Bewirtschaftung

Hohe Phosphor-Verluste treten dann auf, wenn effiziente Wasserwege mit dauerhaft oder kurzzeitig existierenden hohen Quellen zusammentreffen. Einige dieser Faktoren, wie Bodenbearbeitung oder Fruchtfolgege-

staltung, ermöglichen bei Umsetzung von Maßnahmen schnelle Erfolge bei der Austragsreduktion, andere, wie die Senkung der Bodengehalte, wirken erst in vielen Jahren oder nach Jahrzehnten.

2.2.1 Phosphor-Gehalte im Boden

Ein direkter Zusammenhang zwischen hohen Phosphor-Vorräten im Boden und hohen Phosphor-Verlusten wird nur für einzelne Wasserwege und Phosphorfraktionen gefunden. In verschiedenen Untersuchungen konnten bei hohen Phosphor-Bodengehalten hohe Austräge an gelöstem Phosphor im Oberflächenabfluss und im Dränagewasser gefunden werden (King et al. 2015). Bei Austrägen über das Grundwasser besteht für den gelösten Phosphor dagegen die Möglichkeit, dass er in tieferen Bodenschichten wieder gebunden wird und nicht in die Oberflächengewässer gelangt. Auch wenn die Um-

weltbelastung dann gering ist, ist eine P-Verlagerung in eine Bodentiefe von mehr als 50 cm für die landwirtschaftliche Produktion ein Verlust, den es aus ökonomischen Gründen zu vermeiden gilt.

Bei P-Verlusten über Erosion ist die Höhe der Bodengehalte ebenfalls von Bedeutung, auch wenn von den Bodenmesswerten nicht direkt auf die P-Gehalte in den abgetragenen Sedimenten geschlossen werden kann (Siehe Kapitel 2.1.1.2). Trotz dieser Einschränkungen gilt der Bodengehaltswert als wertvoller Hinweis auf die potenziellen Phosphor-Verluste (Paulter & Sims 2000).

Auch wenn die Höhe der Bodengehalte nur eingeschränkt für Vorhersagen von Phosphor-Verlusten verwendet werden kann, besteht ein Zusammenhang zwischen den Faktoren, so dass die Absenkung der Bodengehalte auf das benötigte Minimum der Schlüssel zum effektiven P-Einsatz bleibt.

2.2.2 Bodentyp

Trotz langjähriger Düngung können immer noch substratabhängige Unterschiede in den P-Gehalten zwischen den Böden gefunden werden (Pecoroni & Friedrich 2013). Die Auswertung von mehr als 1 900 Bodenproben ergab tendenziell höhere Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor auf Sandböden im Vergleich zu Tonböden; die Ursache hierfür dürfte allerdings der pH-Wert sein. Er lag bei den Sandböden mit einem pH-Wert von 5,5 bis 6,5 im Optimum der P-Verfügbarkeit, bei den tonigeren Böden lag er darüber. Der mittlere Gehalt an Gesamt-Phosphor lag bei den sandigen Böden bei 506 mg P pro kg Boden, bei lehmigen oder humosen Kolluvien, Lössen, Tonen, Carbonat- und Auenböden zwischen 827 und 848 mg P je kg und bei Böden aus vulkanischem Gestein bei über 1000 mg P je kg.

Zudem beeinflusst die Bodentextur die P-Austräge. Bei starken Regenfällen oder Überschwemmungen verlagern sich Bodenteilchen und es kommt zur Verschlammung. Das Ausmaß hängt stark von der Stabilität der Bodenaggregate ab, die wiederum durch die Korngrö-

ßenverteilung, aber auch die Art der Bodenbearbeitung, den Kalk- und Humusgehalt und die Bodenfeuchte beeinflusst wird. Einen Schutz vor Verschlammung bieten Pflanzen- und Mulchdecken und konservierende Bodenbearbeitung, wobei insbesondere Löss- und Sandlössböden zur Verschlammung und verstärkter Abschwemmung neigen. Über diesen Weg verlassen nach Angaben von Tetzlaff (2006) etwa 0,2 kg P pro ha und Jahr die Ackerflächen.

Wie viel Phosphor aus einem Boden ausgetragen wird, hängt auch stark von seiner Bindungsfähigkeit ab, die ebenfalls von der Bodentextur bestimmt wird. Die Sorptionsfähigkeit von sandigen und organischen Böden ist geringer und die P-Verluste entsprechend höher als in anderen Bodentypen. Die Sättigung kann als ein Indikator für die Gefahr für Phosphor-Verluste verwendet werden, indem die absolute Bindungsfähigkeit im Verhältnis zum bereits gebundenen Phosphor gesetzt wird (Werner 1999). Feine Bodenpartikel haben die größte Bindungskapazität und Kleiböden sollten



daher bei höheren Bodengehalten weniger Phosphor verlieren als Sandböden (King et al. 2015). Zweijährige Messungen in Dränagen von Kleiböden und sandigem Lehm haben aber genau den gegenteiligen Befund geliefert (Eastmann 2010). Die P-Verluste lagen bei dem Kleiboden 2–4 mal höher als bei dem dränierten sandigen Lehm, obwohl die Bodengehalte des Kleis und die Sättigung nur halb so hoch lagen. In dem Versuch verlor der Kleiboden große Mengen an partikulär gebundenem Phosphor, der wahrscheinlich durch Regenwurmgänge und andere bevorzugte Abflusswege in die Dränagen gelangte. In dem Jahr mit pflügender Bodenbearbeitung lagen die Verluste dabei nur halb so hoch wie in dem Jahr mit Direktsaat. Daher ist auch die Sättigung nur eingeschränkt zur Vorhersage der P-Verluste verwertbar, weil sie zwar die Verluste von gelöstem Phosphor einzuschätzen hilft, partikuläre Phosphor-Verluste aber nicht berücksichtigen kann.

Einen Sonderfall stellen Moorböden dar, die überwiegend ein geringes Phosphor-Bindungsvermögen besitzen und P-Dünger kaum speichern. Insbesondere die sauren Hochmoore können sehr starke Phosphorquellen sein, aus denen bei Ackernutzung bis zu 20 kg P pro ha und Jahr ausgetragen werden; bei Grünlandnutzung sind es bis zu 10 kg P pro ha und Jahr (Scheffer & Blankenburg 2002). Niedermoore liegen in ihren Austrägen meist darunter, in Schleswig-Holstein wurden aber ebenfalls Werte bis zu 7,5 kg P pro ha und Winterhalbjahr gemessen (Gerth & Matthey 1991). Da aus entwässerten Mooren beim Abbau der organischen Substanz Phosphor freigesetzt wird, ist die Entwässerungstiefe eine wesentliche Steuerungsgröße für die Intensität der Freisetzung.

Moorböden sind in vielen Einzugsgebieten des Flachlandes die größten Phosphorquellen. Sie sollten unter keinen Umständen als Acker genutzt werden und deutlich geringere Düngemengen als Mineralböden mit denselben Bodengehaltswerten erhalten.

2.2.3 Kalkung

Phosphor ist bei pH-Werten zwischen 5,5 und 7,5 am besten pflanzenverfügbar. Bei pH-Werten über 5,5 ist P an Calcium, bei pH-Werten unter 5,5 an Eisen (Fe) und Aluminium (Al) gebunden. Die pH-Werte bestimmen nicht nur die P-Verfügbarkeit, sondern auch ihre Nachweisbarkeit (Zorn & Krause 1999) und die Wirkung verschiedener Düngerarten. Steigt der pH-Wert im Ackerland von 4 auf 7 an, erhöht sich der DL-P-Gehalt in etwa um 1 mg pro 100 g Boden pro pH-Wert-Einheit. Im Mittel aller 28 Versuchsreihen waren es 2–3 mg DL-P pro 100 g Boden, die den Pflanzen zusätzlich zur Verfügung standen (König & Kerschberger 2014). Neben der Phosphor-Verfügbarkeit fördert eine Kalkung das Bodenleben und damit die biologische Umsetzung von organischem Phosphor aus Humus. Eine Kalkung ist im Grünland auf mineralischen Böden bei geringen pH-Werten effizienter als eine Düngung mit schwer löslichen Phosphatdüngern. Der Zielbereich sollte im Grünland bei einem pH-Wert von 5,0–6,2 liegen. Die insgesamt 21 verschiedenen industriell hergestellten Kalke, die in Deutschland als Düngemittel zugelassen sind, unterscheiden sich in ihren Kalkgehalten und Reaktivitäten, so dass ihre Wirksamkeit einzeln bewertet werden muss (LK Nordrhein-Westfalen 2015). Um die Wirkung von CaO-, CaCO₃- und MgCO₃-haltigen Kalken vergleichen zu können, wird die basische Wirksamkeit der Dünger angegeben. Zur Anhebung des pH-Wertes ist eine regelmäßige Kalkung alle 2–3 Jahre wahrscheinlich kostengünstiger als eine

Düngung mit kalkhaltigem Phosphordünger. Eine Prüfung der Herstellerangaben ist daher empfehlenswert.

Durch die Kalkung wird aber nicht nur die Phosphor-Verfügbarkeit erhöht; auch die Bodenstruktur verändert sich und damit die Wasserspeicherfähigkeit und die Erosionsgefahr. Die Calciumionen verbinden sich mit Ton und Humus über stabile Brücken zu sogenannten Ton-Humus-Komplexen, wodurch der Boden mehr Wasser aufnehmen kann. Dadurch verringert sich der Oberflächenabfluss, die Verschlammungs- und Erosionsgefahr sinkt. Außerdem werden die Böden tragfähiger und verdichten weniger.

Auf Moorböden sollte dagegen keine Kalkung zur Erhöhung der Phosphor-Verfügbarkeit stattfinden. Kalkgaben verstärken die Torfzersetzung und damit die CO₂-Freisetzung sowie die Sackung. Um die hohen Phosphor-Austräge aus Mooren zu reduzieren, sollten die Wasserstände bei einer Grünlandnutzung wenigstens in den Wintermonaten möglichst oberflächennah gehalten werden. Auf Moorböden sollte insgesamt nur eine extensive Nutzung stattfinden (Bayerische Staatsministerien für Landwirtschaft und Forsten 2012).

Eine Kalkung kann effizienter als eine Phosphordüngung sein, verursacht auf Moorböden jedoch verstärkten Torfabbau.

2.2.4 Humus

Als Humus bezeichnet man die Gesamtheit aller nicht-belebten organischen Verbindungen im Boden. Ein hoher Humusgehalt erhöht die Infiltrations- und Wasserhaltekapazität, die Nährstoffbindung und stabilisiert die Bodenstruktur. Zum einen verringert sich dadurch die Bodenerosion, gleichzeitig stellt Humus eine langsam verfügbare Nährstoffquelle dar, die durch mikrobielle Abbauprozesse freigesetzt wird, und schützt mineralische Nährstoffionen vor der Auswaschung, indem er sie austauschbar bindet. Insbesondere auf sandigen Lehm Böden ist ein deutlicher Zusammenhang von Humusgehalt und Ertrag gegeben, auf humusreicheren Lehmböden ist der Effekt schwächer (Rippel & Beck 2013). Der Humusgehalt wird wesentlich durch die Bewirtschaftung gesteuert. Ein hoher Humusgehalt kann durch die Gestaltung der Fruchtfolge erreicht werden, indem Humus zehrende Fruchtarten, wie Mais, Zuckerrüben, Kartoffeln, Raps, Sonnenblume, Getreide mit Strohabfuhr oder Gemüse, im Wechsel mit Humus mehrenden Fruchtarten, wie Klee gras, Luzerne, Körnerleguminosen oder Zwischenfrüchte, angebaut werden.

Die organische Substanz kann durch den Verbleib von Ernteresten auf dem Feld erhöht werden, durch Zwi-

schenfruchtanbau oder den Einsatz von Wirtschaftsdüngern wie Mist oder Gülle. Pflügen fördert dagegen den Humusabbau, da die Streuzersetzung angeregt wird.

Die Verbesserung der Bodenstruktur durch hohe Humusgehalte reduziert aber nicht nur die Erosionsgefahr, sondern senkt auf vielfältige Weise die Ertragsrisiken. Auf humusarmen, verdichteten Böden können mangelnde Wasserinfiltration und stehendes Bodenwasser zum Beispiel zu Ernteaufällen bei Kartoffeln führen. Insbesondere vor dem Hintergrund der zukünftig zu erwartenden geringeren Sommerniederschläge und stärkeren Niederschlagsereignisse rentiert sich eine gute Humuswirtschaft auch finanziell.

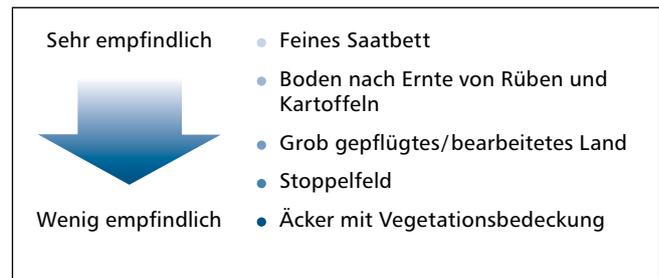
Hohe Humusgehalte fördern die Nährstoffspeicherung, verringern Erosion, stabilisieren den Boden, erleichtern die Bodenbearbeitung, verbessern die Durchwurzelbarkeit und erhöhen die Wasserspeicherfähigkeit.

2.2.5 Bodenbearbeitung

Die Art der Bodenbearbeitung beeinflusst in vielfältiger Weise die Phosphor-Verluste einer Fläche (Blume 2004). Die Richtung der Bearbeitung bestimmt die Geschwindigkeit, die abfließendes Oberflächenwasser erreichen kann, und damit die Höhe der Erosion. Quer zum Abfluss verlaufende Bodenbearbeitung vermindert die Bodenabträge, ist aber nicht auf allen Flächen praktikabel, weil Erntegeräte nicht richtig arbeiten oder die Bearbeitung quer zum Hang auch gefährlich sein kann (Chambers et al. 2000). Auf weniger steilen Flächen ist es dagegen eine einfache und teilweise auch kostenneutrale Maßnahme, um die partikelgebundenen Phosphor-Verluste zu senken, und sollte daher immer geprüft werden.

Darüber hinaus bestimmt die Bodenbearbeitung die Oberflächenstruktur der Ackerflächen und damit wiederum die Erosionsgefährdung. Aus feinen Saatbetten und unbearbeiteten Flächen nach der Ernte von Wurzelgemüse und Kartoffeln können Bodenpartikel leicht ausgetragen werden. Ein grobes Saatbett vermindert die Geschwindigkeit des abfließenden Wassers, kann aber bei einigen Kulturen zu einem ungleichmäßigen Saat-aufgang führen. Das **Saatbett** sollte aber **nie feiner als nötig** sein und auch das Walzen sollte vermieden werden, denn durch diese Maßnahme verringert sich die Versickerung (Chambers et al. 2000). Eine Reihung der Bodenoberflächen nach abnehmender Erosionsgefährdung ist in der folgenden Liste zusammengestellt.

Eine weitere Erosionsschutz-Maßnahme ist es, den **empfindlichen Bodenzustand so kurz wie möglich zu halten** und zum Beispiel Stoppeln erst unmittelbar vor einer Neueinsaat umzubrechen (Blume 2004).



Die Art der Bodenbearbeitung beeinflusst auch den Humusgehalt im Boden. Pflügen erhöht die Sauerstoffzufuhr, fördert den Abbau der organischen Substanz und führt damit zu sinkenden Humusgehalten. Auf **erosionsgefährdeten Standorten** ist **konservierende oder pfluglose Bodenbearbeitung** eine geeignete Maßnahme, um gleichzeitig den Anteil an organischer Substanz zu erhöhen und feine Oberflächen zu vermeiden (Chambers et al. 2000, Klik 2004). Kennzeichen der konservierenden Bodenbearbeitung ist eine Bedeckung von bis zu 30% der Bodenoberflächen mit organischem Material und eine Bodenbearbeitung auf weniger als 25% der Fläche sowie eine Fruchtfolge von mindestens drei Kulturen. Bei Mulchsaat gelten ähnliche Kriterien, der Anteil des organischen Materials liegt ganzjährig allerdings über 30%. Bei der pfluglosen Bodenbearbeitung wird der Boden nur insoweit bearbeitet, wie es die Saatgutaufbringung erfordert. Aber auch durch **Grubbern statt Pflügen im Herbst** lässt sich die Erosion senken (Chambers et al. 2000).



Eine tiefe Bodenbearbeitung kann in Einzelfällen auch eine Maßnahme sein, um die Phosphor-Verluste zu verringern, da sie die Durchwurzelbarkeit eines Bodens erhöht, **Bodenverdichtungen beseitigt** und direkte Abflüsse von Phosphor in Bodenrissen unterbricht. Diese bevorzugten Abflusswege können insbesondere auf drainierten Lehmböden zu hohen Phosphor-Verlusten führen. Auf diesen meist ebenen Flächen ist die Bodenerosion eher von untergeordneter Bedeutung und eine pflügende Bodenbearbeitung reduziert die Phosphor-Verluste hier wahrscheinlich.

Grundsätzlich erhöht jegliche Bodenverdichtung die Erosionsgefahr, weil sie zu verstärktem Oberflächenabfluss führt. Auf Ackerflächen konzentrieren sich die Verdichtungen zumeist auf die Fahrgassen, in denen jährlich bis zu 5 t Bodenabtrag pro ha gemessen werden kann (Sanders & Mosimann 2005). Bestehende Verdichtungen sollten daher durch Tiefenlockerung beseitigt und neue Verdichtungen vermieden werden. In Ausnahmen kann eine Lockerung der Fahrspur den Bodenabtrag erhöhen, wenn sich der Abfluss weiterhin in der nun gelockerten Fahrspur konzentriert (Chambers et al. 2000). Bodenverdichtungen lassen sich durch die Art der Bereifung reduzieren, indem die Anzahl der Überfahrten möglichst gering gehalten wird, und durch das Vermeiden von Überfahrten auf nassen Böden.

Aber auch im beweideten Grünland treten Bodenverdichtungen durch hohe Viehdichten auf, und hohe oberflächliche Dungansammlungen können dann über verstärkten Oberflächenabfluss ausgetragen werden.

Maschinenbedingte Bodenverdichtungen lassen sich

durch **die richtige Bereifung** verringern (DLG 2009). Sowohl die Wahl des Reifens als auch des Reifendrucks kann dabei von Bedeutung sein. Bei der Vermeidung von P-Verlusten stehen eine möglichst effiziente Zugkraftübertragung zur Vermeidung von Schlupf und ein geringer Bodendruck im Vordergrund.

Das tragende Element im Reifen ist die Luft. Damit sind Luftdruck und Luftvolumen die entscheidenden Faktoren. Eine identische Traglast kann also entweder durch einen höheren Luftdruck in Reifen gleicher Breite erreicht werden oder bei gleichem Luftdruck durch die Wahl eines breiteren Reifens.

Die Tragfähigkeit eines Reifens lässt sich auf drei Arten erhöhen:

- die Vergrößerung des Durchmessers (gleichzeitig kann so die Kraft besser auf den Boden übertragen werden),
- die Verbreiterung des Reifens oder
- die Verkleinerung des Felgendurchmessers (DLG 2009).

Bei einer Vergrößerung des Außendurchmessers von 1,93 auf 2,07 m bei gleichzeitiger Verkleinerung des Innendurchmessers (Reifen 650/65R42 und 650/85R38) kann die Tragfähigkeit um 1 155 kg erhöht werden.

Eine Verbreiterung des Reifens ist nicht so wirksam wie die oben beschriebene Vergrößerung des Luftvolumens, kann aber bei Maschinen mit begrenztem Anbau- raum eine sinnvolle Alternative sein. Bei gleichem Innen- und Außendurchmesser (650/85R38 und 900/60R38) steigt damit die Tragfähigkeit um 700 kg.

Die Wahl der Bodenbearbeitung sollte insbesondere auf erosionsgefährdeten Standorten in Bezug auf die Intensität des Umbruchs, die Bearbeitungsrichtung, die Beseitigung von Verdichtungen und die Wahl der Bereifung geprüft werden.

2.2.6 Düngung mit Wirtschaftsdüngern

Die Düngewirkung von organischen Substraten aus der Tierhaltung und Substraten aus der Biogasherstellung, in der meist tierische und pflanzliche Substrate im Gemisch eingesetzt werden, ist langfristig in Bezug auf die Düngewirkung beim Phosphor dem Mineraldünger gleichwertig (Lfl 2012). Deutliche Unterschiede gibt es allerdings zwischen den Nährstoffgehalten, die sich je nach Ausgangssubstrat und Wassergehalt stark unterscheiden können. Daher ist eine Messung der P-Gehalte vor der Applikation für eine effiziente Düngung unerlässlich.

Viehstarke Regionen sind häufig Gebiete mit hohen P-Austrägen. Dies liegt zum einen daran, dass Phosphor in Wirtschaftsdüngern mobiler ist als in Mineraldüngern (Blume 2004). Während die leicht löslichen Phosphate aus mineralischen Düngern relativ schnell in schwer lösliche Bodenphosphate überführt werden und damit vor

Auswaschung geschützt sind, werden organische Dünger leichter in tiefere Bodenschichten verlagert. Auch wenn die ausgebrachte Menge an Phosphor gleich ist, werden bei Mineraldüngereinsatz geringere Austräge gemessen als bei Wirtschaftsdüngereinsatz (King et al. 2015). Gleichzeitig ändern sich bodenchemikalische Parameter, die einen Einfluss auf die P-Mobilität haben. Wird der im Betrieb anfallende Wirtschaftsdünger dann noch ungleichmäßig über die Betriebsfläche verteilt, steigt das Austragsrisiko weiter. Generell liegen die Anteile der hoch versorgten Böden in den viehstarken Regionen höher als in ackerbauorientierten Regionen mit geringer Viehdichte (DLG e. V. 2008). Dabei variiert der Gehalt an Nährstoffen in Wirtschaftsdüngern sehr stark, wobei die Unterschiede von der Tierart bestimmt werden; aber auch die Art der Fütterung, Lagerung, die

Handhabung bei der Ausbringung und das Klima haben einen Einfluss, insbesondere auf den Stickstoffgehalt des Dunges. Wird nun die maximal zulässige Menge von 170 kg N ausschließlich mit Wirtschaftsdüngern gedüngt, können sich bei Geflügelhaltung sehr hohe P-Überschüsse auf den Flächen akkumulieren. Beispielhaft ist dies für mittlere Erträge und durchschnittliche Nährstoffgehalte nach den Angaben der Richtlinien für die Düngung in Schleswig-Holstein dargestellt (Tab. 6). Bei Einsatz von Geflügelmist entstehen Überschüsse von 13,5–39,6 kg P pro ha.

Durch die Art der Fütterung kann die Phosphor-Ausnutzung bei Nicht-Wiederkäuern gesteigert werden. Mais enthält beispielsweise etwa 70 % seines Phosphors in Form von Phytat, das von Geflügel und Schweinen nicht aufgeschlossen werden kann. Durch die Zugabe des Enzyms Phytase können etwa 25–30 % dieses Phosphors von den Tieren verdaut und die P-Ausscheidungen um 10–32 % gesenkt werden (Sands et al. 2001, Smith et al. 2004 und Saylor 2007 in Pesek et al. 2011). Phytase lässt sich auf unterschiedliche Weise herstellen und besitzt dann eine produktspezifische Wirksamkeit. Gleichzeitig ist Phytase in nicht erhitztem Weizen und Gerste vorhanden, so dass die Produktangaben zur P-Verdaulichkeit des jeweiligen Futters beachtet werden müssen (Alert 2001).

Eine weitere Möglichkeit der Reduktion von P-Ausscheidungen in der Tierhaltung ist die Berücksichtigung

des alters- und leistungsabhängig wechselnden P-Bedarfs eines Tieres. Jungtiere haben meist einen höheren Phosphorbedarf als ältere Tiere (Flachowsky & Rohdehutsord 2008).

Trotz dieser Einsparpotenziale wird ein verantwortungsvoller Umgang mit Phosphor in vielen Tierhaltungsbetrieben einen Export von Wirtschaftsdünger erfordern, da auf den Betriebsflächen aufgrund der hohen Bodengehaltswerte keine P-Düngung mehr erfolgen kann. Obwohl voraussichtlich auch in der neuen Düngerverordnung eine P-Düngung in Höhe der Abfuhr bei Phosphor-Bodengehalten in der Klasse D und E erlaubt sein wird, ist dies aus Gründen des Ressourcen- und Umweltschutzes strikt abzulehnen.

Gülle an sich besitzt eine geringe Transportwürdigkeit. Durch die Separation von Gülle kann der Phosphor jedoch in der dicken Phase konzentriert werden und die Kosten für einen Gülleexport sinken. Bei dem einfachsten Verfahren, das insbesondere bei Schweinegülle wirksam ist, wird allein die Schwerkraft genutzt und die Sinkschicht getrennt von der dünnen Schicht ausgebracht (Brosthaus 2009). Für eine stärkere Trocknung der Gülle können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden, wobei neben fest installierten Anlagen auch mobile Geräte in Frage kommen. Abhängig von den Eigenschaften des Ausgangssubstrates und der eingesetzten Separationstechnik können 10 bis 90 % des Phosphors abgetrennt werden.

Tab. 6: Nährstoffbedarf verschiedener Kulturen bei Erhaltungsdüngung und ausgebrachter P-Überschuss bei Orientierung der Wirtschaftdüngermenge am N-Gehalt nach Werten der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein (2013). Die maximal einsetzbare N-Menge durch Wirtschaftsdünger wird als 170 kg pro ha angenommen und mit einer N-Ausnutzung von 80 % gerechnet.

	Ernte dt/ha	Bedarf		Geflügelmist (28 kg N und 10,3 kg P pro t)		P-Überschuss kg pro ha
		P kg/ha	N kg/ha	Benötigte Menge Mist t pro ha	Ausgebrachte P-Menge kg pro ha	
Weizen	90	38,7	205	7,6	78,32	39,6
Raps	40	46,4	180	7,6	78,32	31,9
Kartoffeln	425	46,4	130	5,8	59,89	13,5
Mais	130	42,6	150	6,7	69,11	26,5

Insbesondere bei einer Düngung mit Geflügelmist ist die Bemessung der Düngemenge am Phosphorbedarf der Kulturen auszurichten. Der betrieblich anfallende Phosphor lässt sich bei Nicht-Wiederkäuern durch den Einsatz von Phytase in den Futtermitteln oder eine altersabhängige Fütterung senken. Oft ist bei intensiver Tierhaltung aber ein Export von Wirtschaftsdüngern erforderlich.

2.2.7 Zeitpunkt der Düngung

Die Effizienz des eingesetzten Phosphors hängt zum einen davon ab, ob Düngzeitpunkt und Pflanzenbedarf zeitlich aufeinander abgestimmt sind. Eine Düngung des

gesamten P-Bedarfs einer Kultur im Herbst ist immer ineffizienter als eine Düngung im Frühjahr. Zum anderen werden die P-Verluste durch die Zeit beeinflusst, die zwi-

schen Düngung und den nächsten Regenfällen liegt. Je länger der zugeführte Phosphor Zeit hat, sich mit Bodenpartikeln zu verbinden, desto geringer sind die Austräge über die Niederschläge. Nicht zuletzt hat auch die Niederschlagsmenge und -intensität nach einer Düngung einen Einfluss auf die Höhe der P-Verluste. Die Unvorhersehbarkeit der Witterung macht es erforderlich, den

Dünger erst zu Beginn der jährlich wechselnden Wachstumszeit im Frühjahr auszubringen.

Wenn eine P-Düngung als unverzichtbar erachtet wird, sollte sie erst zu Beginn der Wachstumsperiode erfolgen.

2.2.8 Art der Düngeausbringung

Dünger kann man entweder breitflächig ausbringen, nach der oberflächlichen Ausbringung einarbeiten oder bereits bei der Ausbringung in den Boden injizieren. Die unterschiedlichen Techniken führen zu unterschiedlich hohen P-Verlusten, wobei die höchsten Verluste bei der oberflächlichen Ausbringung ohne Einarbeitung auftreten und die geringsten bei der Injektion (Sharpley et al. 2001).

Darüber hinaus treten immer wieder Direkteinträge in Gewässer durch Einleitung oder Abschwemmung auf. Abhängig von der Ausbringungstechnik wurden Abstandsregelungen definiert, um solche Umweltgefährdungen zu vermeiden. Grundsätzlich darf im Abstand von 1 m von der Oberkante aller oberirdischen Gewässer kein Dünger ausgebracht werden, unabhängig von der Ausbringungstechnik (DüV §3 Abs. 6). Werden Maschinen ohne Grenzstreueinrichtung eingesetzt, bei denen

die Streubreite die Arbeitsbreite überschreitet, muss zwischen dem Rand der Streubreite und dem Gewässer ein Abstand von 3 m eingehalten werden. Darüber hinaus bestehen Einschränkungen für die Düngung von stark geneigten Flächen mit mehr als 10% Hangneigung und die Verpflichtungen, Abschwemmungen generell zu vermeiden. Einleitungen und Abschwemmungen von Düngern können als Ordnungswidrigkeiten oder Straftaten geahndet werden (BSLF 2002).

Auch für die Landwirtschaft gilt: Wer Gewässer oder das Grundwasser unter Missachtung seiner Sorgfaltspflicht verunreinigt, kann mit Geldstrafen oder Freiheitsentzug bis zu 5 Jahren bestraft werden (§§ 324, 330 StGB). Daneben können Verstöße gegen wasserrechtliche Vorgaben mit Geldbußen bis zu 50 000,- € geahndet werden (§ 41 WHG).



Zudem bestehen Einschränkungen für die Düngung von Überschwemmungsflächen. Hier dürfen Düngemittel erst nach der ortstypischen Überschwemmungszeit ausgebracht werden. In einigen Gebieten kann dies nach April sein, in anderen kann eine Ausbringung ganzjährig verboten sein. Dies ist bei den Wasserwirtschaftsämtern zu erfragen. Zudem existieren weitere größere Abstandsregeln für stark geneigte Hänge.

Durch Schlitz- und Injektionstechnik wird der Kontakt des Düngers mit dem Boden erhöht und eine Bindung des Phosphors an Bodenpartikel gefördert. Insbesondere bei pflugloser Bodenbearbeitung ist die gezielte Unterfußdüngung wichtig. Auf Böden der Klasse A ließ sich bei Versuchen in Thüringen (Zorn et al. 2012) durch Unterfußdüngung in Höhe von 50% der Abfuhr die gleiche Erntemenge erzielen wie bei einer P-Düngung in Höhe von 150% der Abfuhr.

Vorteile bietet diese Methode insbesondere:

- bei geringer Bodengüte,
- bei niedriger P-Versorgung des Bodens,
- in Trockengebieten oder in Trockenjahren ,
- bei flachgründigen Böden,
- bei schweren Böden,
- bei weitem Pflanzenbestand,
- bei starker Immobilisierung oder Fixierung,
- bei kleinen Düngergaben (Startdüngung),
- für Pflanzen mit kurzer Vegetationszeit
- und für Tiefwurzler.

Die Einarbeitung des Düngers reduziert die P-Austräge gegenüber einer oberflächlichen Düngung.

2.2.9 Art des Düngers

Tab. 7: Phosphorgehalte verschiedener klassischer Mineraldünger, nach Wiesler & Armbruster (2013).

P-Düngemittel	P-Gehalt (%)	Löslichkeit (Anteile in %)			
		schnell 1*	2*	3*	langsam 4*
Feinvermahlendes weicherdiges Rohphosphat, z. B. Hyperphos, Dolphos	13			80	20
Mit Schwefelsäure teil-aufgeschlossenes Rohphosphat, z. B. Novaphos 23	10	40	30		30
Mit Schwefelsäure voll aufgeschlossenes Rohphosphat, „Superphosphat“	8	> 93			
Mit Schwefelsäure voll aufgeschlossenes Rohphosphat, „Tripelsuperphosphat“	20	> 93			
Diammonphosphat	20	> 93			
Verhüttung P-haltiger Erze, Thomasphosphat	7		100		

Herstellungsprinzip, Gesamt-P-Gehalte und Größenordnungen ihrer Löslichkeit in Wasser und Ammoncitrat (1*), Zitronensäure (2*), Ameisensäure (3*) und Mineralsäure (4*)

Beim Mineraldünger bestimmen die chemischen Eigenschaften die Pflanzenverfügbarkeit. Man unterscheidet zwischen wasser-, ammoncitrat-, zitronensäure-, ameisensäure- und mineralsäurelöslichen Formen (Tab. 7), wobei sich die wasser- und ammoncitratlöslichen P-Dünger am schnellsten lösen und die mineralsäurelöslichen

am langsamsten. Die Verwendung von Rohphosphaten sollte auf den ökologischen Landbau und saure Böden beschränkt bleiben (Wiesler & Armbruster 2013). Je belebter ein Boden ist, desto unwichtiger ist die Phosphorform, und auch bei ausreichend mit P versorgten Böden hat die P-Form des Düngers keinen Einfluss auf den Ertrag (Steffens & Mengel 1985). Um eine optimale Düngewirkung zu erzielen, sollten auf Böden der Gehaltsklasse A möglichst wasserlösliche Düngerformen verwendet werden (LTZ 2011).

Tab. 8: Verfahren zur P-Rückgewinnung und geschätzte P-Wirksamkeit der Recyclingprodukte im Vergleich zu Superphosphat, nach Wiesler & Armbruster (2013).

Phosphatrückgewinnung	P-Gehalt (%)	P-Wirksamkeit
Thermische Verfahren		
• aus Tiermehlen (Sinterphosphat) Erhitzung der Tiermehle mit Soda/Quarzsand auf 1000 °C. Bildung von CaNa-Phosphaten	11	mittel
Chemische Verfahren		
• aus Klärschlämmen Lösung des Phosphats und der Schwermetalle im Klärschlamm mit konzentrierter Säure, anschließende Ausfällung der Schwermetalle in Form von Sulfiden und des Phosphats durch pH-Wertanhebung und Mg- oder Ca-Zugabe		mittel
• aus Abwasser (Struvit) Zugabe von Ammoniak bzw. Ammoniumsalzen und Magnesium und Ausfällung von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP, Struvit).	11	hoch

Direkt nach dem Ausbringen von Düngern ist die Austragsgefahr besonders hoch, da es einige Zeit dauert, bis der Phosphor an Bodenpartikel gebunden ist. Die Höhe der Verluste hängt dabei einerseits von der Art der Düngerausbringung ab, aber auch von dem verwendeten Düngertyp. Es wurde eine Steigerung in der Reihenfolge Mineraldünger, Gülle und Stallmist beobachtet (Diepolder et al. 2006).

Für die Auswahl des richtigen Düngers ist bei carbonathaltigen Böden, die zum Beispiel in Thüringen in Bereichen mit Muschelkalkvorkommen weit verbreitet sind, zu berücksichtigen, dass Rohphosphate (= Hyperphosphat) eine sehr niedrige Auflösungsgeschwindigkeit haben. Rohphosphat löst sich im Boden umso besser, je

niedriger der pH-Wert, kalkärmer und feuchter der Boden ist. Für trockene, kalkreiche Böden mit pH-Werten über 6,2 ist er wegen der geringen Düngeeffizienz nicht zu empfehlen.

In den letzten Jahren ist eine Reihe von Phosphor-Recycling-Produkten auf den Markt gekommen, die ebenfalls als Dünger eingesetzt werden können und von Wiesler & Armbruster (2013) auf ihre Dünge Wirkung bewertet wurden (Tab. 8). Die Wirkung von Struvit ist dabei mit Superphosphat vergleichbar; etwas geringer sind die Effizienzen von Sinterphosphaten aus Tiermehl und von Fällungsprodukten aus Klärschlamm, die durch Magnesium- und Calciumzugabe hergestellt wurden.

2.2.10 Ausbringungsrate

Um die Höhe der P-Düngung zu ermitteln, muss zunächst der pflanzenverfügbare P-Pool berücksichtigt werden, wobei die Phosphor-Bodengehaltsklassen in den verschiedenen Bundesländern nicht einheitlich eingeteilt wurden und auch die Wahl der Klassenbreite umstritten ist (siehe Kapitel 1.4–1.6). Ausreichend ist nach Kerschberger et al. (1997) ein Gehalt von 5 mg P pro 100 g Boden oder 12 mg P₂O₅ pro 100 g Boden.

Sollten die Bodengehalte einer Fläche eine Düngung erfordern, kann der potenzielle P-Entzug einer Kultur anhand von Tabellen der Beratungsinstitutionen der Länder bestimmt oder durch Verwendung von durchschnittlichen Nährstoffgehalten und Ertragserwartungen berechnet werden.

$$\text{Entzug (kg/ha)} = \text{Ertragsziel (dt/ha)} * \text{Nährstoffgehalt der Pflanze (kg/dt)}$$

Die richtige Einschätzung des Ertragspotenzials birgt dabei einige Unsicherheiten. Neben einer grundsätzlichen falschen Einschätzung des Standortes können auch

saisonale Effekte, wie eine ungünstige Witterung oder Pflanzenerkrankungen zu einem Minderertrag führen und somit Düngemengen ungenutzt auf der Fläche verbleiben. Solche nicht umgesetzten Düngemengen müssen in den Folgejahren als korrigierender Bilanzwert abgezogen werden. Sollten die P-Gehalte einer Fläche unter 3 mg CAL-P oder 7 mg CAL-P₂O₅ pro 100 g Boden liegen, empfiehlt es sich, mehr als die Abfuhr zu düngen und den Bilanzwert nach oben zu korrigieren.

$$\text{Gesamtbedarf (kg/ha)} = \text{Entzug (kg/ha)} + \text{Bilanzwert (kg/ha)}$$

Werte für den durchschnittlichen P-Gehalt von unterschiedlichen Ernteprodukten konventionell bewirtschafteter Flächen wurden zum Beispiel von LTZ (2011) zusammengestellt.

Auf großen Feldern mit heterogenen Standortverhältnissen können eine Unterteilung der Fläche und ein separates Düngemanagement sinnvoll sein.

2.2.11 Kultur

Das Phosphat-Aneignungsvermögen der verschiedenen Kulturpflanzen unterscheidet sich zum Teil deutlich. Pflanzen mit starkem Wurzelwachstum verfügen meist über eine gute Phosphat Aufnahme. Außerdem unterscheiden sich die Pflanzen in ihrer Fähigkeit, durch die Abgabe von Säure im Bereich der Wurzelhaare Phosphor aus dem Boden zu lösen. Neben der Aneignungseffizienz, die stark von der Pflanzenart abhängt, gibt es zwischen den einzelnen Sorten auch große Unterschiede in der Verwertungseffizienz, also in der Art, wie

der Nährstoff in Ertrag umgesetzt wird (Sattelmacher et al. 1994). Untersuchungen der VDLUFA ergaben bei Getreide einen geringeren Anspruch an die P-Gehalte im Boden als bei Hackfrüchten (Kerschberger et al. 1997). Da sich die P-Gehaltsklasse aber nicht an den jährlichen wechselnden Bedarf anpassen lässt, wurde empfohlen auf Standorten mit der Gehaltsklasse C Getreide ohne Düngung anzubauen, auch wenn die Werte am unteren Rand der Klasse liegen.

Das Austragsrisiko lässt sich bei Kulturen mit einem späten Erntezeitpunkt durch die Verwendung von frühen Sorten mindern, so dass vor dem Winter Zwischenfrüchte oder Winterungen etabliert werden können. Sollten keine weiteren Kulturpflanzen nach der Ernte etabliert werden können, kann die Erosion durch das Stehenlassen von Stoppeln, die Ausbringung von Strohhäcksel oder durch raues Pflügen verringert werden. Bei Raps- oder Wintergetreideanbau reduziert eine frühe Einsaat das Erosionsrisiko entscheidend. Im Mais lässt

sich die Erosion durch Engsaat verringern oder durch Anbau von Untersaaten. Auf Standorten mit hohem Erosionsrisiko sollten keine Kulturen mit hohem Austragsrisiko angebaut werden.

Beim Anbau von Kulturen mit hohem Austragpotenzial sollten zusätzliche Maßnahmen zur Reduktion der P-Austräge geprüft werden.

2.3 Umweltbelastungen durch Phosphor-Verluste

Die Umweltwirkung von Phosphor unterscheidet sich zwischen Wasser und Land sehr stark. Phosphorreiche Sedimente, die durch Erosionsprozesse verlagert werden, verändern die Pflanzengemeinschaften an Land meist eher lokal. Auch wenn die meisten seltenen Pflanzenarten durch Phosphor-Einträge verdrängt werden (Fujita et al. 2014), sind es die Wasserökosysteme, in denen die zusätzlichen Nährstoffe durch die Algenblüten die augenfälligsten Schäden verursachen. Die Wirkung von Phosphor auf das Pflanzenwachstum unterscheidet sich zwischen Meeren und Süßwasser. Im Süßwasser wird das Pflanzenwachstum meist durch Phosphor begrenzt, während Phosphor im Meer meist nur kurzzeitig oder lokal limitierend ist (Moore et al. 2013). Die Phosphor-Einträge in die Oberflächengewässer stammen

nicht ausschließlich aus der Landwirtschaft. Allerdings gelang es in den letzten Jahren durch Ausbau der Kläranlagen und Ersatz von Phosphat in Waschmitteln, die Einträge aus urbanen Quellen stark zu senken, wodurch der prozentuale Anteil aus landwirtschaftlichen Quellen anstieg (Fuchs et al. 2010). Die Anbindung der landwirtschaftlichen Flächen an die Oberflächengewässer ist entscheidend für die Umweltwirkung des ausgetragenen Phosphors. Eine Faustregel besagt, dass 1 g Phosphat-Phosphor die Entwicklung von 1000 g Phytoplankton-Biomasse ermöglicht (NLWKN 2014). Für die Gewässer ist die Unterscheidung von gelöstem organischen und anorganischem Orthophosphat und dem partikulären Phosphor von Bedeutung, die zusammen den TP- (Total Phosphorus) oder P_{ges} -Gehalt bilden. Der Anteil des



Tab. 9: Typspezifische Orientierungswerte für Seen für den Parameter TP gemäß LAWA (2015), Werte in Klammern noch nicht festgelegt.

Ökoregion	Seentyp nach WRRL	Grenzwert TP $\mu\text{g L}^{-1}$
Alpen	4	9 – 12
Alpen, Voralpen	1	(20 – 26)
Voralpen	2+3	20 – 26
Mittelgebirge	7+9	14 – 20
	5+8	8 – 25
	6.1	30 – 45
	6.2	35 – 50
	6.3	45 – 70
Tiefland	10.1	25 – 40
	10.2+14	30 – 45
	11.1	35 – 45
	11.2	35 – 55
	12	60 – 90
	13	25 – 35

Orthophosphates ist von besonderem Interesse, weil er für die Algen und Wasserpflanzen direkt verfügbar ist. Für Fließgewässer wurden Orientierungswerte für die P-Konzentration festgelegt, die zur Erreichung des guten ökologischen Zustandes eingehalten werden müssen (LAWA 2015). Sie liegen für die meisten Fließgewässertypen bei 0,1 mg P_{ges} pro Liter, bei organisch geprägten

Bächen und Flüssen (Typen 11 und 12) sowie bei Niedrigungsgewässern (Typ 19) bei 0,15 mg P_{ges} pro Liter sowie bei Marschengewässern (Typ 22) bei 0,3 mg P_{ges} pro Liter.

Auch stehende Gewässer sind empfindlich gegen P-Einträge, wobei sich die tolerierbaren Phosphor-Konzentrationen je nach Seevolumen und Größe des vorgelagerten Einzugsgebietes stark unterscheiden. Für die unterschiedlichen Seentypen wurden von der LAWA Grenzwerte für Phosphor festgelegt, die eingehalten werden müssen, um den guten ökologischen Zustand eines Gewässers zu erreichen. Eine Liste der Seentypen und ihrer tolerierbaren TP-Konzentrationen im Wasser sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass es große Unterschiede in den tolerierbaren P-Einträgen zwischen den Seentypen gibt. In den Zuflüssen der Seentypen 7 und 9 müssen die P-Konzentrationen bis zu 3-fach unter den Werten vom Seentyp 6.3 liegen. In Einzugsgebieten von empfindlichen Wasserkörpern erfordert die Vermeidung von Phosphor-Austrägen besondere Anstrengungen, unabhängig davon, ob es sich um eine Fläche mit hohem Austragsrisiko handelt (2.4).

Die größten Umweltbelastungen entstehen, wenn Phosphor in empfindliche Oberflächengewässer gelangt.

2.4 Identifizierung von Problemflächen

Der Großteil der in den Gewässern gemessenen P-Einträge kommt von gewässernahen Flächen und wird durch wenige Starkregenereignisse im Jahr mobilisiert. In vielen Einzugsgebieten hat sich gezeigt: Die **Mehrheit der P-Austräge kommt nur von wenigen Flächen**. Aus Gewässerschutzsicht ist es daher von entscheidender Bedeutung, Schutzmaßnahmen auf den austragsrelevanten Flächen durchzuführen.

Zu den Risikoflächen gehören Schläge mit:

- großer Hangneigung,
- langer Hanglänge,
- hohen P-Bodengehalten,
- Moorböden,
- hohem Wirtschaftsdüngereinsatz,
- oberflächlicher Düngerausbringung
- und direkter Gewässeranbindung.

Landwirtschaftliche Flächen unterscheiden sich in ihrem Risiko für P-Verluste. Es ist von entscheidender Bedeutung, das individuelle Risiko einzelner Flächen zu bestimmen und Maßnahmen auf gefährdeten Flächen durchzuführen, die an ihre speziellen P-Austragspfade angepasst sind.

2.5 Kosten und Erfolgsaussichten für Gewässersanierung

In den letzten Jahren und Jahrzehnten wurden zahlreiche Projekte umgesetzt, um die Phosphor-Einträge in die Oberflächengewässer zu senken. Dabei standen zu meist Maßnahmen zur Reduktion der landwirtschaftlichen Phosphorfrachten im Vordergrund (z. B. Prasuhn 2008, Diepolder & Raschbacher 2008); es wurden aber auch P-Fällungen in Seen und Fließgewässern vorgenommen (MELUR 2012, Schäfer 2013). Bei der Umsetzung von landwirtschaftlichen Maßnahmen wurde in einem günstigen Fall nach 6–10 Jahren ein Rückgang der Fracht von 10–30% erreicht (Prasuhn 2008). In einigen Gewässern, wie zum Beispiel im 90 ha großen Seeburger See, sind durch die Reduktion der Einträge

keine Effekte zu erwarten, da in den Gewässer-Sedimenten etwa 40 000 kg P lagern, die wieder rückgelöst werden können (Römer 2009a). In der Schweiz hat die Halbierung der P-Fracht aus einem etwa 6 200 ha großen Einzugsgebiet zwischen 1998 und 2009 13,1 Mio. Franken gekostet (Blum 2008). Eine Maßnahme zur Reduzierung der internen Phosphorfracht am Behlendorfer See durch Entnahme von Weißfischen und Fällung mit Benthophos summierte sich auf Gesamtkosten von 580 000 € (MELUR 2012).

See-interne Maßnahmen sind erst dann erfolgversprechend, wenn vorher die Phosphoreinträge aus dem Einzugsgebiet auf ein Minimum verringert wurden.

Da die Reduzierung der Gewässerbelastung mit Phosphor enorm zeit- und kostenaufwändig ist, kommt der Reduktion von nicht erforderlicher P-Düngerezufuhr eine herausragende Bedeutung zu.



3. Maßnahmen zur Reduzierung der Phosphor-Verluste

Es wurden insgesamt 83 Maßnahmen in der Literatur gefunden, mit denen sich die Phosphor-Austräge aus landwirtschaftlichen Flächen wirksam reduzieren lassen (Tab. 10). Neben der jeweils genannten Literaturquelle pro Maßnahme mit ausführlicheren Beschreibungen sind weitere Kataloge zu diesem Thema veröffentlicht worden, z. B. LfL (2009), Billen, N. (2007), VDLUFA (2001), Land Oberösterreich (2013), <http://www.cost869.alterra.nl/>. Eine Reihe von Maßnahmen lassen sich unter dem Überbegriff Nährstoffmanagement (A) zusammenfassen, weitere gehören zum Tierbestandsmanagement (B), Feldfruchtmanagement (C), Bodenmanagement (D), Landnutzungsmanagement (E) und weitere setzen beim Oberflächenwassermanagement (F) an (Abb. 7).

Die folgende Zusammenstellung zeigt eine Vielzahl von wirksamen Maßnahmen zur Reduktion der P-Verluste, die sich bei verschiedenen Abflussverhältnissen einsetzen lassen, flächig oder lokal wirksam sind und unterschiedlich schnell wirken. Für den Landwirt gilt es, die für seine Flächen günstigsten auszuwählen. Ist es betriebswirtschaftlich sinnvoll, die Entstehung von Oberflächenabfluss durch Zwischenfruchtanbau zu reduzieren (C 4.), weil z. B. gleichzeitig die Humusbilanz verbessert wird und anschließend die Düngung reduziert werden kann, ist es vielfach nicht mehr erforderlich, Sedimentverluste durch permanent installierte Versickerungsstrecken und Kiesfilter oder zeitlich variable begrünte

Wasserwege zu reduzieren (F 1., E 3.). Ist es sorten- oder witterungsbedingt nicht mehr möglich, Winterungen oder Zwischenfrüchte einzusäen (C 12., C 13., C 4.), bleibt immer noch die Ausbringung von Strohhacksel auf erosionsgefährdeten Standorten (C 9.).

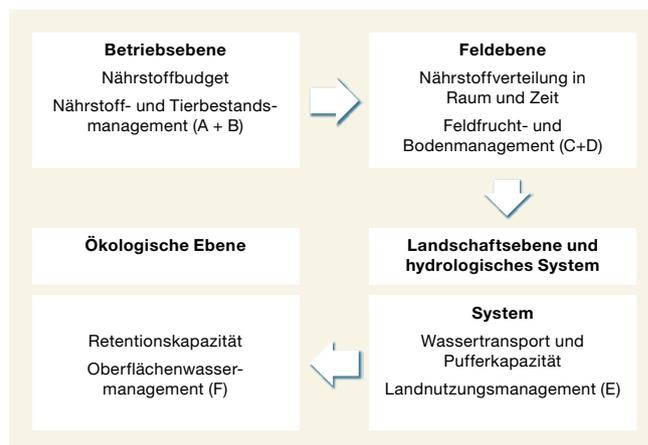


Abb. 7: Schematische Darstellung der vier Systeme, die an der Höhe der Phosphor-Austräge beteiligt sind, mit den Kategorien der Minderungs-Maßnahmen (nach Schoumans et al. 2014, verändert).

Tab. 10: Maßnahmen zur Reduzierung der Phosphor-Austräge aus landwirtschaftlichen Flächen, mit Angaben zur Wirkung auf den Wasserpfad, einer Einschätzung der räumlichen und zeitlichen Wirksamkeit, zur Effizienz und einer Literaturnennung mit weiteren Hinweisen zur Umsetzung (Legende siehe S. 45).

Nr.	Maßnahme	Wasserpfad	RW	ZW	E	Lit.
A: Nährstoffmanagement						
Nährstoff-Management						
A 1.	Analyse von Nährstoffgehalten von Wirtschaftsdüngern	E, A, D, G	F	L	++	1
A 2.	Nährstoffsalden berücksichtigen und Schlagkartei führen	E, A, D, G	F	L	+++	1
A 3.	Erstellung von Hoftorbilanzen	E, A, D, G	F	L	++	2
A 4.	Keine P-Düngung in den Bodengehaltsklassen D + E	E, A, D, G, Ü	F	L	+	
A 5.	Verlängerung der Sperrfrist für Düngerausbringung	E, A, D, G	F	L	+++	1
A 6.	P-Düngung auf Nährstoffbedarf abstimmen, N:P-Verhältnis im Dünger beachten	E, A, D, G, Ü	F	L	++	
A 7.	Düngezeitpunkt optimieren	E, A, D, G, Ü	F	L	+	1
A 8.	Düngung auf Problemstandorten anpassen	E, A, D, G, Ü	F	L	++	
A 9.	Schlitztechnik im Grünland	E, A, Ü	F	K	++	2
A 10.	Keine Düngerausbringung vor starken Regenfällen	E, A,	F	K	+	
A 11.	Unterfußdüngung statt flächiger Düngung	E, A, D, G	F	L	+	2
A 12.	Direkteinträge vermeiden, Abstände zu Gewässern einhalten	O	Lo	K	++	
A 13.	Ökologischer Landbau	E, A, D, G	F	L	++	2
A 14.	Keine P-Düngung auf moorigen oder anmoorigen Böden	D, G, Ü	F	L	++	

Tab. 10: Maßnahmen zur Reduzierung der Phosphor-Austräge aus landwirtschaftlichen Flächen, mit Angaben zur Wirkung auf den Wasserpfad, einer Einschätzung der räumlichen und zeitlichen Wirksamkeit, zur Effizienz und einer Literaturnennung mit weiteren Hinweisen zur Umsetzung (Legende siehe S. 45).

Nr.	Maßnahme	Wasserpfad	RW	ZW	E	Lit.
B: Tierbestandsmanagement						
Tierzucht						
B 1.	P-reduzierte Fütterung, Tierfütterung je nach Entwicklungsphase	E, A, D, G	F	L	++	2
B 2.	Futter mit reduziertem Phytase-P wählen oder Zugabe von Phytase um Verdaubarkeit von Phytase-P zu erhöhen	E, A, D, G	F	L	+	2
B 3.	Güllelager mit Speicherkapazität von 9 Monaten	E, A, D, G	F	L	++	1
B 4.	Separation von Gülle und Ferntransport	E, A, D, G	F	K	++	1
B 5.	Tierzahl reduzieren	E, A, D, G	F	L	++	
Fischzucht						
B 6.	Langsames Abfischen	O	Lo	K	+	10
B 7.	Anlegen eines Abfischgrabens oder einer Abfischgrube	O	Lo	K	+	10
B 8.	Reinigen von Teichen nach dem Ablassen, Entschlammung	O	Lo	K	+	3
B 9.	Einsatz von Feststoffabscheidern	O	Lo	K	+	
B 10.	Einsatz von Schlammfängen im Beckenboden	O	Lo	K	+	
B 11.	Anlage einer Pflanzenlagune für ablaufendes Wasser	O	Lo	K	+	
B 12.	Geringes Teichbodengefälle zum Abfluss hin	O	Lo	K	+	10
B 13.	Abfischen im Herbst	O	Lo	K	+	10
C: Feldfruchtmanagement						
Ackerbau						
C 1.	P-Vorrat im Boden messen und Bodengehaltswert kritisch prüfen	E, A, D, G	F	L	++	1
C 2.	Fruchtfolge optimieren	E, D, G	F	K	+++	6
C 3.	Anbau von Zwischenfrüchten	E, D, G	F	K	+++	1
C 4.	Anbau von Untersaaten im Mais	E	F	K	+	1
C 5.	Keine Stoppelbearbeitung im Herbst	E	F	K	+	1
C 6.	Konservierende Bodenbearbeitung, bei der 30 % der Fläche unbearbeitet bleibt.	E	F	K	+++	
C 7.	Moorböden als Grünland nutzen	D, G, Ü	F	K	+++	
C 8.	Bodenabdeckung mit organischem Material	E	F	K	+++	
C 9.	Querdammhäufelung im Kartoffelbau	E	F	K	+	8
C 10.	Raues Saatbett schaffen	E	F	K	+	
C 11.	Frühe Einsaat von Winterungen	E, D, G	F	K	+	
C 12.	Anbau früher Kartoffel- und Maissorten mit anschließender Einsaat von Zwischenfrüchten oder Winterungen	E	F	K	+	2
C 13.	Maisensaat	E	F	K	+	2
Grünland						
C 14.	Im Dauergrünland auf geschlossene Grasnarbe achten	E, D, G	F	K	+++	6
C 15.	Umbruchlose Grünlanderneuerung in Hanglagen	E	F	K	+++	6
C 16.	Tierzahl bei Nässe reduzieren	E	F	K	++	
C 17.	Standorte von Tränken und Futterplätzen verändern	E, A, D, G	Lo	K	++	
D: Bodenmanagement						
Allgemein						
D 1.	Regelmäßige Kalkung	E, A, D, G	F	L	+	
D 2.	Bodendruck auf Ackerflächen und auf dem Grünland so gering wie möglich halten	E, A	Lo	K	+	
D 3.	Radlast reduzieren und Radschlupf vermeiden	E, A	Lo	K	+	
D 4.	Beseitigung von Bodenschadverdichtungen	E, A	Lo	K	+	

Tab. 10: Maßnahmen zur Reduzierung der Phosphor-Austräge aus landwirtschaftlichen Flächen, mit Angaben zur Wirkung auf den Wasserpfad, einer Einschätzung der räumlichen und zeitlichen Wirksamkeit, zur Effizienz und einer Literaturnennung mit weiteren Hinweisen zur Umsetzung (Legende siehe S. 45).

Nr.	Maßnahme	Wasserpfad	RW	ZW	E	Lit.
D: Bodenmanagement						
D 5.	Humusbilanz fördern	E, A, D, G	F	L	+++	
D 6.	Einschränkung der Bodenbearbeitung auf Flächen mit Erosionsgefahr	E	F	K	+	1
D 7.	Bodenbearbeitung quer zum Hang	E	F	K	+++	1
D 8.	Mulch- und Direktsaat, insbesondere in erosionsgefährdeten Lagen	E	F	K	+++	1
D 9.	Nasse Böden nicht befahren	E, A	Lo	K	+	
Weinbau						
D 10.	Alternierende Dauerbegrünung jeder 2. Rebasse im Wechsel mit Bodenbearbeitung, kein Wechsel der dauerbegrüneten Gassen	E	F	K	+	5
D 11.	Böschungsbegrünung von Querterrassen	E	F	K	++	
D 12.	Alternierende Teilzeitbegrünung als Herbst- /Winterbegrünung im Wechsel mit Dauerbegrünung, Umbruch Mitte/Ende Mai	E	F	K	+	
D 13.	Rillenlose Bodenbearbeitung in Hanglagen	E	F	K	+	
D 14.	Beseitigung von Fahrspuren	E	F	K	+	
D 15.	Bodenabdeckung mit organischen Materialien	E	F	K	+	5
D 16.	Beidseitige Dauerbegrünung der Rebassen	E	F	K	+	5
D 17.	Keine Winterbodenbearbeitung	E	F	K	+	
D 18.	Anlage von Querterrassen in Steillagen	E	F	K	++	
D 19.	Rodung von Altanlagen nach dem 1.3.	E	F	K	+	
D 20.	Herausziehen von Altanlagen ohne Pflug	E	F	K	+	
D 21.	Winterbegrünung	E	F	K	+	5
E: Landnutzungsmanagement						
E 1.	Bei regelmäßigem Oberflächenabfluss Dränung optimieren	A	Lo	K	++	
E 2.	Verkürzung der erosiven Hanglänge bzw. Fließstrecken (Ranken, Gräben, Dämme, Furchen)	E	Lo	K	+	
E 3.	Einführung von begrüneten Wasserwegen	E	Lo	K	+	1
E 4.	Ersetzen von Silomais durch Klee gras, Wickroggen mit Graseinsaat oder Ganzpflanzensilage an erosionsgefährdeten Hängen	E, D, G	F	K	+++	
E 5.	Erosionsgefährdete Hänge und Überschwemmungsflächen als Grünland nutzen	E, D, G, Ü	F	K	+++	6
E 6.	Anlage von Schonstreifen	E, A, G	Lo	K	++	1
E 7.	Uferrandstreifen	E, A, G	Lo	K	++	1
E 8.	Aufforstung in Risikolagen	E, D, G	F	K	++	1
E 9.	Wasserstände in organischen Böden so hoch wie möglich	D, G	F	L	+	1
F: Oberflächenwassermanagement						
F 1.	Sickerstrecken, Kiesfilter	E, A	Lo	K	++	
F 2.	Klär- /Sedimentationsteiche	E, A, D	Lo	K	+++	1
F 3.	Vernässung von Feuchtgebieten	E, D, G	Lo	K	+++	1
F 5.	Verbreiterung der Grabensohle	E, D, G	Lo	K	+++	4
F 6.	Reduktion der Mahd von Strombetten und Grabenmanagement	E, D, G	Lo	K	+++	1
F 7.	Schaffung von Überflutungsräumen	E, D	Lo	K	+++	1
F 8.	Entrohrung von Gewässern	E	Lo	K	+	1
F 9.	Flurneuerungsverfahren unter dem Gesichtspunkt der Erosionsverminderung	E, D, G	F	L	++	7

Tab. 10: Maßnahmen zur Reduzierung der Phosphor-Austräge aus landwirtschaftlichen Flächen, mit Angaben zur Wirkung auf den Wasserpfad, einer Einschätzung der räumlichen und zeitlichen Wirksamkeit, zur Effizienz und einer Literaturnennung mit weiteren Hinweisen zur Umsetzung (Legende siehe S. 45).

LEGENDE

Wasserpfad

E = Erosion, A = Abschwemmung, D = Dränabfluss, O = Oberflächenabfluss, G = Grundwasserabfluss, Ü = Überflutungen

RW

Räumliche Wirkung: Lo = Lokal, F = Flächig

ZW

Zeitliche Wirkung: K = Kurzfristig (0–5 Jahre), L = Langfristig (> 5 Jahre)

E

Effizienz: + = 0–120 g P ha⁻¹ a⁻¹, ++ = 120–500 g P ha⁻¹ a⁻¹, +++ = >500 g P ha⁻¹ a⁻¹ (Literaturangaben und Schätzungen).

Lit.

Literatur:

- 1: Holsten, B., Ochsner, S., Schäfer, A. & Trepel, M. (2012): Praxisleitfaden für Maßnahmen zur Reduzierung von Nährstoffausträgen aus dränierten landwirtschaftlichen Flächen. CAU Kiel. http://www.ecosystems.uni-kiel.de/bilder/218_150/praxisleitfaden_interaktiv.pdf
- 2: Osterburg, B. & Runge, T. (2007): Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen in Gewässer – Eine wasserschutzorientierte Landwirtschaft zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. Landbauforschung Völkenrode, 307.
- 3: Phillipson, S. (2007): Sachgerechtes Bewirtschaften, Abfischen und Besetzen von oberschwäbischen Weihern. http://www.gewaesserberater.de/Sachgerechtes_Bewirtschaften_Abfischen_und_Besetzen_von_oberschw%C3%A4bischen_Weihern.pdf, abgerufen 11.9.2015.
- 4: Interwies, E., Kraemer, R.A. & Kranz, N. et al. (2004): Grundlagen für die Auswahl der kosteneffizientesten Maßnahmenkombinationen zur Aufnahme in das Maßnahmenprogramm nach Artikel 11 der Wasserrahmenrichtlinie – HANDBUCH. UBA Texte.
- 5: Umweltbundesamt (2003): Evaluierung der Effizienz von Erosionsschutzmaßnahmen im Österreichischen Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft (ÖPUL 2000) in Testgebieten. Endbericht Forschungsprojekt 1299.
- 6: Mohaupt, V., Rechenberg, J., Richter, S., Schulz, D. & Wolter, R. (2010): Gewässerschutz mit der Landwirtschaft. UBA. <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3894.pdf> UBA
- 7: Edelmann, H.-J. (2010): Erosionsschutz in der Flurneuordnung.: Erosionsschutz – Aktuelle Herausforderung für die Landwirtschaft 8. Kulturlandschaftstag. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 3, 55–61.
- 8: Billen, N. (2007): Landwirtschaftlicher Hochwasserschutz. Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre, Univ. Hohenheim. <https://www.uni-hohenheim.de/i410a/steckbriefe/HochwasserSteckbriefe.pdf>
- 9: Schwab, A., Wahl, K. und R. May (2002): Die Begrünungsfrage in Franken – Welche Formen haben sich bewährt? http://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/weinbau/dateien/w1_begr%C3%BCnung_in_franken.pdf
- 10: Institut für Binnenfischerei e. V. Potsdam-Sacrow (2001): Ordnungsgemäße Teichwirtschaft – Auswirkungen guter fachlicher Praxis auf Nährstoffe in Karpenteichen und Vorflutern. Schriften des Instituts für Binnenfischerei e. V. Potsdam-Sacrow, Band 7, 2. Auflage (2004).



4.

Potenziale des Greenings

Mögliche Impulse für die Umsetzungen von Maßnahmen zur Reduktion der Phosphor-Austräge haben sich durch die Neuregulungen der Agrarförderung ergeben. Die Europäische Union zahlt in ihrer aktuellen Agrarförderperiode 30% der Direktzahlungen für Landwirtschaftsmethoden, die dem Klima- und Umweltschutz dienen. Das sogenannte Greening verpflichtet konventionell wirtschaftende Betriebe von mehr als 15 ha Ackerfläche 5% der Fläche als ökologische Vorrangflächen einzurichten. Dabei ist den Landwirten ein hohes Maß an Flexibilität bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen möglich und mit einigen von ihnen lassen sich im Rahmen des Greenings die Phosphor-Austräge aus landwirtschaftlichen Flächen effektiv reduzieren. Anrechenbar ist beispielsweise der Anbau von Zwischenfrüchten, Grasuntersaat bei Maisanbau, die Anlage von Pufferstreifen an Gewässern oder von Hecken oder Gehölzstreifen. Wenn Gehölzreihen oder Pufferstreifen optimal im Gelände angeordnet werden, können sie einen wichtigen Beitrag zur Verminderung von Erosion leisten (Abb. 8).

Ob begrünte Schon- oder Uferstreifen tatsächlich mobilisierte Sedimente aus dem Oberflächenabfluss zurückhalten, hängt von der jeweiligen Geländesituation ab. Bei sehr konzentriertem Oberflächenabfluss werden Randstreifen in schmalen Streifen überspült, ohne dass sich Sedimente ablagern können; bei gleichmäßigem Wasserübertritt in den gesamten Streifen werden dagegen 41–90% des mitgeführten Phosphors zurückgehalten (Hoffmann et al. 2009).

Für den Phosphor-Rückhalt können als Greeningmaßnahme maximal 20 m breite Uferstreifen an Gewässerrändern oder Feldrandstreifen innerhalb eines Schrages angelegt werden, die mit dem Faktor 1,5 in die Berechnung der Greeningfläche eingehen. Mit Gras eingesäte Feldrandstreifen lassen sich zur Verkürzung der erosiven Hanglänge einsetzen, wenn erosionsgefährdete Ackerfrüchte auf stärker geneigten Hängen angebaut werden.

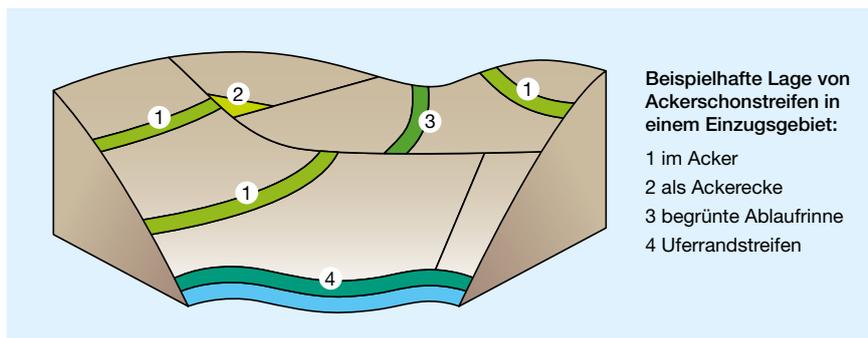


Abb. 8: Mögliche Lage von effektiven Schonstreifen im Einzugsgebiet. Nach cemagref, verändert.



5. Fazit

Die Schonung der weltweiten Phosphor-Reserven ist eine Aufgabe von elementarer Bedeutung für die Zukunft der Menschheit, die im Bewusstsein der meisten politischen Entscheider und Praktiker bisher nicht angekommen ist. Unabhängig von den zukünftigen Problemen, die unser heutiger Umgang mit Phosphor verursacht, belasten die Phosphor-Austräge aus den landwirtschaftlichen Flächen nach einer jahrzehntelangen Anreicherung der Phosphor-Vorräte im Boden die Wasserqualität unserer Oberflächengewässer.

Die Absenkung der Bodengehaltsklassen ist die wichtigste Maßnahme beim Umgang mit Phosphor in der Landwirtschaft. Bis sie zu einem Rückgang der P-Konzentrationen im Grundwasser führt, vergehen allerdings Jahre bis Jahrzehnte.

Darüber hinaus sind tief entwässerte und intensiv genutzte Moorböden eine bedeutende P-Quelle. Mit einer extensiven Nutzung bei möglichst hohen Wasserständen und geringem Düngereinsatz lassen sich die P-Verluste reduzieren.

Neben der Reduktion der Düngung stehen etwa 80 weitere Maßnahmen zur Auswahl, mit denen sich die Phosphor-Verluste aus der Landwirtschaft reduzieren lassen.

Eine Vielzahl der kurzfristig wirksamen Maßnahmen wirkt auf den Austragspfad Erosion, über den bundesweit die höchsten Verluste auftreten. In stark reliefiertem Gelände können große Phosphor-Austräge über Erosion auftreten; hier lassen sich aber auch die schnellsten Erfolge erzielen. Von entscheidender Bedeutung ist es, Maßnahmen auf den Hauptaustragsflächen umzusetzen, bei denen es sich auch um sehr kleine Areale handeln kann, die an nur wenigen Tagen im Jahr zur Phosphorquelle werden. In den viehstarken Regionen des Flachlandes mit hohen P-Bodengehaltswerten lässt sich auch bei einem völligen Düngungsverzicht keine schnelle Reduzierung der Phosphor-Belastungen der Gewässer erreichen.

Die Reduktion der Düngung und die Umverteilung von Wirtschaftsdüngern sind in fast allen Regionen Deutschlands die zentralen Elemente eines ökonomisch und ökologisch optimierten Umgangs mit Phosphor.

6. Literatur

- Alert, H.-J.** (2001): Informationsmaterial zu Futtermittelzusatzstoffen. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13735/documents/15957>, abgerufen 2.11.2015.
- Auerswald, K. & Weigand, S.** (1999): Eintrag und Freisetzung von P durch Erosionsmaterial in Oberflächengewässern. VDLUFA Schriftenreihe 50/1999.
- Bayerische Staatsministerien für Landwirtschaft und Forsten** (2012): Phosphordüngung und Gewässerschutz.
- Baumgärtel, G.** (2010): Effizient Phosphor und Kali düngen – brauchen wir neue Düngeempfehlungen? Bundesarbeitskreis Düngung BAD (Hrsg.), Frankfurt a.M., 151 – 162.
- Baumgarten, A.** (2000): Extraktion von pflanzenverfügbarem Phosphat: CAL- und DL-Methode im Vergleich. In: ALVA Jahrestagung 2000 Tagungsband: 39-40. www.alva.at/images/Publikationen/Alva2000/baumgart.pdf, abgerufen 3.11.2015.
- Behrendt, H., Bach, M., Opitz, D., Pagenkopf, W.-G., Scholz, G. & Wendland, F.** (2003): Internationale Harmonisierung der Quantifizierung von Nährstoffeinträgen aus diffusen und punktuellen Quellen in die Oberflächengewässer Deutschlands. UBA 82/03.
- BGR 2014:** http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Ressourcenbewertung-management/Bodenerosion/Wasser/Karte_Erosionsgefahr_node.html;jsessionid=079B12478D5D78FEB4CD26E7C681670D.1_cid284, abgerufen 9.9.2015.
- Billen, N.** (2007): Landwirtschaftlicher Hochwasserschutz. Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre, Universität Hohenheim. <https://www.uni-hohenheim.de/i410a/steckbriefe/HochwasserSteckbriefe.pdf>
- Blum, J.** (2008): 10 Jahre Phosphorprojekt am Sempachersee. 2. Internationale Seen Fachtagung, Bad Schussenried. http://www.seenprogramm.de/fileadmin/Seenfachtagung_2008/Referate_pdf/Blum%2030.pdf, abgerufen 16.10.2015.
- Blume, H.-P.** (Hrsg.) (2004): Handbuch des Bodenschutzes. 3. Auflage, ecomed Verlagsgesellschaft.
- BMVEL – Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft** (2002): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/Broschuere_GfP_Bodenschutz.pdf, abgerufen 26.10.2015.
- Brothaus, G.** (2009): Die Schwerkraft nutzen. Landpost 25.7.2009, 42 – 44.
- Bundesregierung** (2012): Phosphatvorräte reichen für rund 385 Jahre. <https://www.zfk.de/artikel/bundesregierung-phosphatvorrade-reichen-fuer-rd-385-jahre.html>, abgerufen 7.9.2015.
- Chambers, B.J., Garwood, T.W.D. & Unwin, R.J.** (2000): Controlling soil water erosion and phosphorus losses from arable land in England and Wales. *Journal of Environmental Quality* 29 (1), 145 – 150.
- Defra** (2010): Fertiliser Manual, 8th Edition. <http://www.ahdb.org.uk/documents/rb209-fertiliser-manual-110412.pdf>, abgerufen 7.9.2015.
- Delgado, A. & Scalenghe, R.** (2008): Aspects of phosphorus transfer from soils in Europe. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171 (4), 552 – 575.
- Diepolder, M., Peretzki, F., Heigl, L. & Jakob, B.** (2006): Nitrat- und Phosphorbelastung des Sickerwassers bei Acker- und Grünlandnutzung – Ergebnisse von zwei Saugkerzenanlagen in Bayern. Schule und Beratung, Heft 04/06, III-3-10. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten.
- Diepolder, M. & Raschbacher, S.** (2008): Saubere Seen (Forschungsprojekt Schwarzach) 2002 – 2005. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten. Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/saubere_seen.pdf, abgerufen 16.10.2015.
- Diepolder, M. & Raschbacher, S.** (2011): Gewässerschutz bei begüllten Grünlandflächen in Hanglage. SuB Heft 11-12/11, 16 – 18.
- Diepolder, M., Raschbacher, S. & Ebertseder, T.** (2012). P-Austräge aus Dränagen unter Wirtschaftsdünger. SuB 12/5, 6 – 11. http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/paustrag_drainagen.pdf, abgerufen 9.9.2015.
- Dittrich, B. & Klose, R.** (2008): Schwermetalle in Düngemitteln. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft 3/2008.
- DLG e.V.** (2008): DLG-Merkblatt 349: Grunddüngung effizient gestalten. http://www.dlg.org/dlg-merkblatt_349.html, abgerufen 7.9.2015.
- DLG e.V.** (2009): DLG-Merkblatt 356: Reifen richtig wählen und einsetzen. http://www.dlg.org/fileadmin/downloads/merkblaetter/dlg-merkblatt_356.pdf, abgerufen 7.9.2015.
- Eastman, M., Gollamudi, A., Stampfli, N., Madramootoo, C.A. & Sarangi, A.** (2010): Comparative evaluation of phosphorus losses from subsurface and naturally drained agricultural fields in the Pike River watershed of Quebec, Canada. *Agricultural Water Management* 97, 596 – 604.
- Effizient düngen** (2012): Newsletter November 2012. http://www.effizientduengen.de/download/Phosphor_Bodenanalyse_Newsletter_11_2012.pdf
- EU 2013: Konsultative Mitteilung zur nachhaltigen Verwendung von Phosphor.** Mitteilungen der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. COM(2013) 517 final. <http://ec.europa.eu/environment/consultations/>

pdf/phosphorus/DE.pdf, abgerufen 8.9.2015.

European Commission - IP/14/599 26/05/2014: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-599_en.htm, abgerufen 8.9.2015.

Flachowsky, G. & Rodehutschord, M. (2008): Steigerung der P-Effizienz in der Tierproduktion. Braunschweiger Nährstofftage 2008, Braunschweig, 10./11.11.2008. http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_koordinierend/bs_naehrstofftage/phosphor_landwirtschaft/8_Flachowsky.pdf, abgerufen 27.5.2015.

Frede, H.G. & Bach, M. (2010): Phosphor in der deutschen Landwirtschaft – Bilanzen und Effizienzen. In: Phosphor- und Kaliumdüngung – Brauchen wir neue Düngekonzepte? Bundesarbeitskreis Düngung BAD (Hrsg.), Frankfurt a.M., 7–14.

Fuchs, R., Dimitrova, S., Kittlaus, S. & Wander, R. (2014): Aktualisierung der Stoffeintragsmodellierung (Regionalisierte Pfadanalyse) für die Jahre 2009 bis 2011. Im Auftrag des UBA, Projektnummer 28104.

Fuchs, R., Scherer, U. et al. (2010): Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS. Nährstoffe, Schwermetalle und Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. UBA Texte 45/2010. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4017.pdf>, abgerufen 27.5.2015.

Fujita, Y., Olde Venterink, H. et al. (2014): Low investment in sexual reproduction threatens plants adapted to phosphorus limitation. *Nature* 505, 82–86.

Gallet, A. (2001): Phosphorus availability and crop production in seven Swiss field experiments. Diss. ETH Nr. 14476, Zürich, Switzerland.

Gethke-Albinus, K. (2012): Verfahren zur Gewinnung von Sekundärphosphaten aus flüssigen Stoffströmen und deren Einfluss auf die deutsche Phosphorbilanz. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Gerth, H. & Matthey, J. (1991): Nährstoffe im Dränwasser. Betriebswirtschaftliche Mitteilungen 441, 1–67.

Hege, U., Wendland, M. & Offenberger, K. (2008): Zur Bedeutung der Bodenversorgung mit Phosphat und Kali: Wie hoch müssen die Nährstoffgehalte im Boden sein? *Pflanzenbauwissenschaften* 12 (2), 53–63.

Hoffmann, G., Thun, R., Herrmann, R. & Knickmann, E. (1991): Methodenhandbuch. Band I: Die Untersuchung von Böden. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Hoffmann, C.C., Kjaergaard, C., Uusi-Kämpä, J., Hansen, H.C.B. & Kronvang B. (2009): Phosphorus retention in riparian buffers: review of their efficiency. *Journal of Environmental Quality* 38, 1942–1955.

Isermann, K. (1999): Handlungsziele angesichts hoher Phosphorgehalte in Böden vor dem Hintergrund eines nachhaltigen Phosphorhaushaltes der Landwirtschaft. VDLUFA-Schriftenreihe 50, 103-131.

Isermann, K. (2008): Sustainable phosphorus balances and managements in the nutrition system of agriculture, human nutrition, waste and waste water management taking Germany as an example: P-Recommendations, - Shortages, - Recycling. Poster-Beitrag: Braunschweiger Nährstofftage 2008.

Jordan-Meille, L., Rubæk, G.H., Ehlert, P.A.I., Genot, V., Hofman, G., Goulding, K., Recknagel, J., Provolo, G., & Barraclough, P. (2012): An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management* 28 (4), 419–435.

Kerschberger, M., Hege, U. & Jungk, A. (1997): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. VDLUFA-Standpunkt, Eigenverlag Darmstadt.

King, K.W., Williams, M.R. et al. (2015): Phosphorus transport in agricultural subsurface drainage: A review. *Journal of Environmental Quality* 44 (2), 467–485.

Klik, A. (2004): Bodenerosion durch Wasser. *Ländlicher Raum* 6/2004, 1–11.

König, V. & Kerschberger, M. (2014): Langzeitbeurteilung der Düngekalkwirkung auf die Pflanzenverfügbarkeit im Boden. 125. VDFUFA-Kongress, 69/2014, 234–243.

Kolbe, H. (2010): Phosphor und Kalium im ökologischen Landbau – Aktuelle Probleme, Herausforderungen, Düngungsstrategien. [Phosphorus and potassium in organic farming – current problems, challenges, fertilization strategies.] In: Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), Frankfurt/Main (Hrsg.) Phosphor- und Kaliumdüngung – brauchen wir neue Düngekonzepte? Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD), Nr. April 2010 in Würzburg. BAD, Frankfurt/Main, 117–137.

Köster, W. & Nieder, R. (2007): Wann ist eine Grunddüngung mit Phosphor, Kalium und Magnesium wirtschaftlich vertretbar? http://www.beratung-malanders.de/pdf/Wann_ist_eine_Grundduengung_wirtschaftlich_DIN_A_4.pdf, abgerufen 9.9.2015.

Kronvang, B. (1992): The export of particulate matter, particulate phosphorus and dissolved phosphorus from two agricultural river basins: implications on estimating the non-point phosphorus load. *Water Research* 26 (10), 1347–1358.

Kuchenbuch, R. (2010): Brauchen wir neue Düngekonzepte? Bundesarbeitskreis Düngung BAD (Hrsg.), Frankfurt a.M., 163–168.

Land Oberösterreich (2013): Oberflächengewässerschutz in der Landwirtschaft – Stoffeintrag durch Erosion, Phosphor. http://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/OGW_Informationsbroschuer_Oberflaechengewasserschutz.pdf, abgerufen 2.11.2015.

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein (2011): Richtwerte für die Düngung. 21. Auflage.

LAWA (2015): Rahmenkonzeption Monitoring (RaKon) Teil B: Bewertungsgrundlagen und Methoden-

beschreibungen. Arbeitspapier II: Hintergrund- und Orientierungswerte für physikalisch-chemische Qualitätskomponenten zur unterstützenden Bewertung von Wasserkörpern entsprechend EG-WRRL.

Lennartz, B., Michaelsen, J., Widmoser, P. & Wichtmann, W. (1999): Time variance analysis of preferential solute movement at a tile-drained field site. *Soil Science Society of America Journal* 63 (1), 39–47.

LfL, Internetseite, Messwerte Station Pettenbrunn 1989-2002, abgerufen Juli 2013.

LfL (2009): Landwirtschaft und Gewässerschutz. Möglichkeiten – Grenzen – Kosten. 7. Kulturlandschaftstag am 18.02.2009 in Freising-Weißenstephan. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft.

LfL (2012): Düngung mit Biogasgärresten – Effektiv-umweltfreundlich-bodenschonend. 10. Kulturlandschaftstag. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_45175.pdf, abgerufen 10.9.2015.

LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenburg) (2011): Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung. Nr. 4, 3. Auflage. http://www.ltz-bw.de/pb/site/pbs-bw-new/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Service/Schriftenreihen/Merkblatt%20f%C3%BCr%20die%20Umweltgerechte%20Landbewirtschaftung/D%C3%BCngung_DL/Grundd%C3%BCngung%20im%20Ackerbau_ENDG.pdf, abgerufen 9.9.2015.

LK Nordrhein-Westfalen (2015): Kalkung. <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/basisinfos/kalkung-pdf.pdf>, abgerufen 29.10.2015.

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein (2011): Richtwerte für die Düngung. 21. Auflage.

Mathes, J., Plambeck, G. & Schaumburg, J. (2002): Das Typisierungssystem für stehende Gewässer in Deutschland mit Wasserflächen ab 0,5 km² zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. In: Nixdorf, B. & Deneke, R. (Hrsg.), Ansätze und Probleme bei der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie. BTUC-AR 5/2002, BTU Cottbus: 15–24.

MELUR (2012): Zwischenbilanz 2012 über die Umsetzung der Maßnahmenprogramme. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/W/wasserrahmenrichtlinie/Downloads/WRRL_Zwischenbilanz.pdf?__blob=publicationFile&v=1, abgerufen 16.10.2015.

Mengel, K. (1985): Aktuelle Probleme der Bodenfruchtbarkeit und Düngung. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft* 43/1, 107–122.

Mengel, K. & Kirkby, E.A. (2001): Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publishers.

Mokry, M. (1996): P-Düngungsversuche – Baden-Württemberg. Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. *VDLUFA-Schriftenreihe* 42/1996, 4–10.

Mokry, M. (2011): P-(Nährstoff-)Dynamik von Böden mit langjähriger organischer Düngung. P-Dynamik Dauerversuch – Stand 2011. https://www.landwirtschaft-bw.info/pb/MLR.Landwirtschaft,Lde/Startseite/Ackerbau/Grundnaehrstoffe+_Spurenaehrstoffe, abgerufen 10.9.2015.

Mosimann, T., Bug, J. & Steinhoff, B. (2012): Zwölf Jahre Bodenerosionsmonitoring in Niedersachsen: Wie hoch ist der Bodenabtrag und was trägt Dauerbeobachtung zur Modellierung der Bodenerosion und des Stofftransports in die Gewässer bei? *GeoBeichte* 23, 95–110.

Moore, C.M., Mills M.M. et al. (2013): Processes and patterns of oceanic nutrient limitation. *Nature Geoscience*, 6, 701–710.

Neyroud, J.-A. & Lischer, P. (2003): Do different methods used to estimate soil phosphorus availability across Europe give comparable results? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 188 (4), 422–431.

NLWKN (2014): Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN) – Nährstoffe in niedersächsischen Oberflächengewässern. *Oberirdische Gewässer Band 35*.

Paulter, M.C. & Sims J.T. (2000): Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus, and phosphorus saturation in Delaware soils. *Soil Science Society of America Journal* 64, 765-773.

Pecoroni, D. & Friedrich, K. (2013): Phosphat- und Phosphorgehalte in hessischen Oberböden – Grundlage zur Abschätzung des P-Austrags durch Bodenerosion. http://eprints.dbges.de/922/1/DBG2013_Phosphor.pdf, abgerufen 7.4.2015.

Pesek, J.D., Bernard, J.C. & Gupta, M. (2011): Consumer interest in environmentally beneficial chicken feeds: Comparing high available phosphorus corn and other varieties. *Journal of Agricultural and Applied Economics* 43 (4), 591–605.

Prasuhn, V. (2008): Phosphorabschwemmung von Graslandflächen in der Schweiz – Eintragspfade und Massnahmen zur Reduzierung. 2. Internationale Seenfachtagung, Bad Schussenried 2008. http://www.seenprogramm.de/fileadmin/Seenfachtagung_2008/Referate_pdf/Prasuhn%2030.pdf, abgerufen 16.10.2015.

Prasuhn, V. (2012): On-farm effects of tillage and crops on soil erosion measured over 10 years in Switzerland. *Soil and Tillage Research* 120, 137–146.

Prasuhn, V., Alder, S., Liniger, H. & Herweg, K. (2014): Hoch aufgelöste Erosionsrisiko- und Gewässeranschlusskarten als Hilfsmittel für den Vollzug. 4. Umweltökologisches Symposium 2014, 75–80.

Quirin, M., Emmerling, C. & Schröder, D. (2006): Phosphorgehalte und -bilanzen konventionell, integriert und biologisch bewirtschafteter Acker- und Grünlandflächen und Maßnahmen zum Phosphorabbau hoch versorgter Flächen. *Pflanzenbauwissenschaften* 10 (2), 60–65.

Radcliffe, D.E., Reid, D.K. et al. (2015): Applicability of models to predict phosphorus losses in drained fields: A review. *Journal of Environmental Quality* 44 (2), 614–628.

- Rippel, R. & Beck, R.** (2013): Ertragswirkung unterschiedlicher Humusgehalte. <http://www.lfl.bayern.de/iab/boden/031146/>, abgerufen 27.4.2015.
- Römer, W.** (2009a): Diffuse Phosphateinträge in das Stillgewässer Seeburger See – Aktuelle Belastung und Strategien zur Minderung. Vortrag auf dem Niedersächsischen Gewässerforum des NLWKN vom 1.–3.9. 2009 in Hildesheim.
- Römer, W.** (2009b): Ansätze für eine effizientere Nutzung des Phosphors auf der Basis experimenteller Befunde. *Berichte über Landwirtschaft*, 87/1, 5–30.
- Römer, W.** (2011): Das Phosphataneignungsvermögen der Kulturpflanzen, insbesondere der Leguminosen und welche Möglichkeiten gibt es in der Zukunft, den P-Bedarf zu decken? Vortrag Ackerbautagung, Bernburg-Strenzfeld, 1.2.2011.
- Römer, W.** (2013): Gehaltsklassen neu bewerten. *-Mitteilungen* 5, 68–71.
- Römer, W.** (2014): Die Versorgung der deutschen Ackerböden mit Phosphat und die Herausforderungen der Zukunft. *Bodenschutz* 4, 125–130.
- Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft** (2002): Hinweise zur Düngung im integrierten Freilandgemüseanbau und bei Erdbeeren. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13665/documents/15744>, abgerufen 2.11.2015.
- Sanders, S. & Mosimann, T.** (2005): Erosionsschutz durch Intervallbegrünung in Fahrgassen. *Wasser und Abfall* 10, 34–38.
- Sattelmacher, B., Horst, W.J. & Becker, H.C.** (1994): Factors that contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 157, 215–224.
- Scheffer, F.** (2002): Lehrbuch der Bodenkunde / Scheffer/Schachtschabel. 15. Auflage, neubearb. und erw. von Hans-Peter Blume et al., Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg.
- Schäfer, W.** (2013): Diffuse Phosphoreinträge im Einzugsgebiet der Oberen Hunte. Vortrag
- Scheffer, B. & Blankenburg, J.** (2002): Diffuse Stoffeinträge aus nordwestdeutschen Niederungsgebieten. *Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 2002 – Sonderheft 2*, 118.
- Schick, J., Kratz, S., Rückamp, D., Shwiekh, R., Haneklaus, S. & Schnug, E.** (2013): Comparison and inter-calibration of different soil P tests used in the Baltic Sea Countries. WP4 standardisation of manure types with focus on phosphorus. http://www.baltic-manure.eu/download/Reports/method_calibration_final_web.pdf, abgerufen 5.11.2015.
- Schoumans, O.F., Chardon, W.J., Bechmann, M.E., Gascuel-Oudou, C., Hofman, G., Kronvang, B., Rubæk, G.H., Ulén, B. & Dorioz, J.M.** (2014): Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: A review. *Science of the Total Environment* 468, 1255–1266.
- Schweiger, P., Petrusek, R., Ableidinger, C., Hartl, W.** (2009): Tiefenverteilung von Wurzeln bei Winterweizen. Beiträge zur 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, ETH Zürich, 11.-13. Februar 2009, Band 1, 119–122. <http://orgprints.org/15160/1/band-01-gesamt-exemplar-oe.pdf>, abgerufen 16.11.2015.
- Sharpley, A.N. & Syers, J.K.** (1983): Transport of phosphorus in surface runoff as influenced by liquid and solid fertilizer phosphate addition. *Water, Air, and Soil Pollution* 19, 321–326.
- Sharpley, A.N., McDowell, R.W. & Kleinman, P.J.A.** (2001): Phosphorus loss from land and water: Integrating agricultural and environmental management. *Plant Soil* 237, 287–307.
- Sims, J. T., Edwards, A.C., Schoumans, O.F. & Simard, R.R.** (2000): Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices. *Journal of Environmental Quality* 29, 60–71.
- Steffens, D. & Mengel, K.** (1985): Umsatzrate und Verfügbarkeit verschiedener Phosphatformen aus langjährigen Feldversuchen. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft* 43/1, 71-78.
- Steffens, D., Leppin, T., Luschin-Ebengreuth, N., Yang, Z. M. & Schubert, S.** (2010): Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soiltesting methods. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173, 765–771.
- Stumpe, H., Garz, J. & Scharf, H.** (1994). Wirkung der Phosphatdüngung in einem 40 jährigen Dauerversuch auf einer Sandlöß-Braunschwarzerde in Halle. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 157, 105-110.
- Syers, J.K., Johnston, A.F. & Curtain, D.** (2008): Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bull.* 18, <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/fpnb18.pdf>, abgerufen 11.11.2015.
- Tetzlaff, B.** (2006): Die Phosphatbelastung großer Flusseinzugsgebiete aus diffusen und punktuellen Quellen. *Forschungszentrum Jülich.*
- UBA** (2015): Erosion. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen/erosion>, abgerufen 7.9.2015.
- Übelhör, W. & Hartwig, H.** (2012). Phosphorklassen im Wandel der Zeit. *Landinfo* 1, 33-36.
- Van Vuuren, D., Bouwman, A. & Beusen, A.** (2010): Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion. *Global Environmental Change* 20, 428–439.
- VDLUFA** (2001): Standpunkt – Mögliche ökologische Folgen hoher Phosphatgehalte im Boden und Wege zu ihrer Verminderung. Eigenverlag Darmstadt.
- Von Werner, M., Schmidt, J. & Schindewolf, M.** (2014): Minderung von Wassererosion auf Kartoffelflächen. *Schriftenreihe, Heft 4/2014.*
- Wassen, M.J., Olde Venterink, H., Lapshina, E.D. & Tanneberger, F.** (2005): Endangered plants persist under phosphorus limitation. *Nature* 437, 547–550.
- Werner, W. & Junge, A.** (1985): Einfluss der Umwandlungszeit auf die Löslichkeitskriterien und Wirksamkeit der aus Phosphatdüngung angereicherten

Bodenphosphate. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft 43/1, 79–86.

Werner, W. (1999): Die Eignung der P-Sättigung des Bodens und der P-Konzentration der Bodenlösung zur Prognose der P-Verlagerung im Profil. VDLUFA-Schriftenreihe 50, 79–94.

Werner, W. (2010): Langzeitverhalten von Düngerphosphat im Boden und Konsequenzen für die Phosphatnachlieferung. Bundesarbeitskreis Düngung BAD (Hrsg.), Frankfurt a.M., 15–30.

Wiesler, F. & Armbruster, M. (2013): Auf die

Pflanzenverfügbarkeit kommt es an. Pflanzenbau, LW 39, 23–25.

Zorn, W. & Krause, O. (1999): Untersuchungen zur Charakterisierung des pflanzenverfügbaren Phosphats in Thüringer Carbonatböden. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 162, 463–469.

Zorn, W., Schröter, H. & Heß, H. (2012): Was bringen neue Verfahren der Unterfußdüngung bzw. der Einsatz von Design-N-Mischungen zum Winteraps? <http://www.tll.de/imperia/rapstag/rpt30612.pdf>, abgerufen 9.9.2015.

