



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Recyclingphosphate in der Düngung – Nutzen und Grenzen

Standpunkt des Wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen

Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen:

- Prof. Dr. Franz Wiesler (Vorsitzender)
Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) Speyer, Speyer
- Dr. Kerstin Hund-Rinke (stellvertretende Vorsitzende)
Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie, Schmallenberg
- Prof. Dr. Eckhard George
Leibniz Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren e. V., Großbeeren
- Prof. Dr. Jörg-Michael Greef
Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI), Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Braunschweig
- Prof. Dr. Falko Holz
Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (LLG), Bernburg
- Prof. Dr. Ludwig E. Hölzle
Universität Hohenheim, Institut für Nutztierwissenschaften, Fachgebiet Infektions- und Umwelthygiene bei Nutztieren, Stuttgart
- Prof. Dr. Kurt-Jürgen Hülsbergen
Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, Freising
- Dr. Sabine Martin
Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), Berlin
- Dr. Karl Severin
Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), Hameln
- Prof. Dr. Sandra Spielvogel
Christian-Albrechts-Universität Kiel, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Kiel
- Peter Geiger (Gast bis 2018)
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Verkehrs- und Betriebskontrollen, Freising
- Christian Nawotke (Gast seit 2018)
LMS Agrarberatung GmbH, Rostock
- Dr. Hella Kehlenbeck (Gast)
Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI), Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Kleinmachnow
- Prof. Dr. Hans Schenkel (Gast)
Universität Hohenheim, Institut für Nutztierwissenschaften, Fachgebiet Tierernährung, Stuttgart

Externe Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die an der Erstellung des Standpunktes beteiligt waren:

- Dr.-Ing. Christian Adam
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachbereich 4.4, Berlin
- Dr. Elke Bloem
Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI), Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Braunschweig
- Dr. Daniel Frank
Deutsche Phosphor-Plattform DPP e. V., Frankfurt
- Prof. Dr. em. Heiner E. Goldbach
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, INRES, Bereich Pflanzenernährung, Bonn
- Markus Heene
ICL Fertilizers Deutschland GmbH, Ludwigshafen
- Dr. Sylvia Kratz
Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI), Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Braunschweig
- Prof. Dr. Andrea Kruse
Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Fachgebiet Konversionstechnologien nachwachsender Rohstoffe, Stuttgart
- PD Dr. Kurt Möller
Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), Referat 11 – Pflanzenbau, Rheinstetten
- Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH Aachen), Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Aachen
- Dr. Ir. Oscar F. Schoumans
Wageningen University and Research (WUR), Environmental Research, Wageningen/NL
- Dr. Christian Vogel
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachbereich 4.3, Berlin
- Dr. Sebastian Wulf
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Darmstadt

Geschäftsführung des Wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen

Dr. Thomas Nessel
Referat 324 – Agrarforschung, Entscheidungshilfe, Modellvorhaben
Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
Deichmanns Aue 29
53179 Bonn

Inhalt

1	<i>Veranlassung</i>	4
2	<i>Potenzieller Beitrag von Reststoffen zur Deckung des Phosphor-Bedarfs in der deutschen Pflanzenproduktion</i>	5
3	<i>Technische Verfahren zur Herstellung von Düngemitteln aus Reststoffen</i>	7
4	<i>Anforderungen an organische Dünger und Phosphor-Rezyklate</i>	12
5	<i>Bewertung verschiedener organischer Dünger und Phosphor-Rezyklate aus agronomischer Sicht</i>	14
6	<i>Bewertung verschiedener organischer Dünger und Phosphor-Rezyklate aus rechtlicher Sicht</i>	16
7	<i>Empfehlungen</i>	17
8	<i>Literatur</i>	18

1 Veranlassung

Weltweit werden etwa 80–85 % aller abgebauten Rohphosphate für die Produktion von Düngemitteln verwendet. Bei noch steigendem Bedarf an Phosphor (P) geht man derzeit davon aus, dass die weltweiten P-Reserven noch über 200 Jahre ausreichen (Horst, 2014; US Geological Survey, 2020). Um den P-Vorrat langfristig abzusichern, sollte der in Reststoffen enthaltene Phosphor möglichst umfänglich genutzt werden. Dieser Forderung trägt das von der Bundesregierung 2012 erstmals beschlossene Deutsche Ressourceneffizienzprogramm ProgRess Rechnung (BMUB, 2016). Rohphosphat wird auch seitens der Europäischen Kommission aufgrund seiner ökonomischen Bedeutung und des unsicheren Angebots als „kritischer Rohstoff“ eingestuft (Europäische Kommission, 2017). Vor diesem Hintergrund hat die Bundesregierung in der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27. September 2017 in Deutschland eine verpflichtende technische Rückgewinnung von Phosphor für Abwasserbehandlungsanlagen ab einer Ausbaugröße von 100.000 Einwohnerwerten (12 Jahre nach Inkrafttreten der Verordnung) bzw. ab einer Ausbaugröße von über 50.000 Einwohnerwerten (15 Jahre nach Inkrafttreten der Verordnung) vorgeschrieben. Die Verordnung enthält keine Vorgaben hinsichtlich der anzuwendenden Technologie bei der Phosphorrückgewinnung. Ausgenommen von der Rückgewinnungspflicht sind Klärschlämme mit niedrigen Phosphorgehalten (weniger als 20 Gramm Phosphor je Kilogramm Klärschlamm-Trockenmasse).

Auch die im Jahre 2017 verabschiedeten neuen Rechtsvorschriften für die Düngung verlangen zukünftig einen nachhaltigen und ressourceneffizienten Umgang mit Nährstoffen bei der landwirtschaftlichen Erzeugung (Düngegesetz, zuletzt geändert am 5. Mai 2017) und schränken die P-Zufuhr insbesondere auf hoch versorgten Böden ein (Düngeverordnung vom 26. Mai 2017). Dies wird zu einem mehr am Pflanzenbedarf orientierten und ggf. vermehrt überbetrieblichen Einsatz von wirtschaftseigenen Düngern führen.

Um den politischen und gesetzlichen Anforderungen gerecht zu werden, müssen einerseits wirksame und kosteneffiziente technische Verfahren zum P-Recycling (weiter)entwickelt werden. Andererseits müssen die Recyclingprodukte die Anforderungen für eine direkte Verwendung in der Landwirtschaft oder als Rohstoff für die Herstellung von Düngemitteln erfüllen. In dem vorliegenden Standpunkt wird zunächst der potenzielle Beitrag von Reststoffen zur Deckung des P-Bedarfs in der deutschen Pflanzenproduktion geschätzt. Für die wichtigsten Reststoffe werden technische Verfahren zur P-Rückgewinnung bzw. Aufarbeitung skizziert. Auf Basis der Anforderungen der Landwirtschaft bzw. der Düngemittelindustrie an die P-Recyclingprodukte werden deren Herstellungsverfahren bewertet. Schließlich wird der Regelungs- und Forschungsbedarf formuliert.

2 Potenzieller Beitrag von Reststoffen zur Deckung des Phosphor-Bedarfs in der deutschen Pflanzenproduktion

In seinem Standpunkt „Anwendung von organischen Düngern und organischen Reststoffen in der Landwirtschaft“ hat der Wissenschaftliche Beirat für Düngungsfragen (2015) berechnet, dass der P-Bedarf der deutschen Pflanzenproduktion (533.000 t P) rechnerisch zu ca. 71 % mit anfallenden organischen Düngern und organischen Reststoffen gedeckt werden könnte, wobei jedoch die Nährstoffverfügbarkeit nicht berücksichtigt wurde (siehe Tabelle 1). Die wichtigsten P-Träger sind die wirtschaftseigenen Dünger (202.000 t P), die Gärreste aus Biogasanlagen (73.000 t P) sowie die Erntereste (74.000 t P). Wirtschaftsdünger und Gärückstände fallen regional in extrem unterschiedlichen Mengen an und führen in den tierintensiven Regionen zu sehr hohen P-Überschüssen, während in Ackerbauregionen der P-Saldo häufig negativ ist (Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2019; Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2018). P-Mengen von geringerer Bedeutung finden sich im Klärschlamm (16.000 t P unter Zugrundelegung der 2015 bodenbezogen verwerteten Klärschlammmenge), in tierischen Nebenprodukten (9.000 t P), im Kompost (6.000 t P) und in weiteren pflanzlichen Nebenprodukten (keine Abschätzung der P-Mengen verfügbar). Die Angaben zu den tierischen Nebenprodukten beziehen sich nur auf Material der Risikokategorien 2 und 3. Bei einer Nutzung von Aschen aus Material der Kategorie 1 (hochkritisch) würden zusätzliche P-Mengen in Höhe von ca. 8.000 t P anfallen. Hinsichtlich des Klärschlammes ist anzumerken, dass die aktuell landwirtschaftlich verwertete Klärschlammmenge ca. 3 % des potenziellen

P-Bedarfs der deutschen Pflanzenproduktion deckt. Die Nutzung des gesamten Klärschlammmanfalls aus der öffentlichen Abwasserbehandlung (ca. 1,85 Millionen t Trockenmasse, ca. 53.000 t P) für Düngungszwecke würde zu einer Deckung von 10 % des gesamten P-Bedarfs der deutschen Pflanzenproduktion beitragen. Dies entspräche ca. 40 % der heute eingesetzten P-Menge aus Mineraldüngern.

Zentrale Ansatzpunkte einer nachhaltigen Nutzung der in den **wirtschaftseigenen Düngern und Gärresten** enthaltenen P-Mengen sind die bessere räumliche Verteilung der tierhaltenden Betriebe sowie der Biogasanlagen, aber auch die Aufarbeitung dieser organischen Dünger und Reststoffe, um diese für den Export in Regionen mit P-Düngebedarf transportfähig bzw. transportwürdig zu machen. Für die Rückgewinnung von Phosphor aus **Abwasser und Klärschlamm** müssen technische Verfahren (weiter)entwickelt werden, die eine hohe P-Rückgewinnungsrate erzielen und zugleich schadstoffarme Recyclingprodukte mit einer hohen P-Verfügbarkeit für Pflanzen erzeugen. Bei anderen Reststoffen, z. B. **tierischen Nebenprodukten** wie Knochenmehlen, könnte durch eine Aufarbeitung die P-Verfügbarkeit für Pflanzen ebenfalls wesentlich verbessert werden. Da **Erntereste** größtenteils auf dem Feld verbleiben und in der Regel eine gute P-Verfügbarkeit aufweisen, ist eine Aufarbeitung bzw. Nährstoffrückgewinnung aus dieser Stoffgruppe hingegen nur in Ausnahmefällen sinnvoll.

Tabelle 1: Der Bedarf an Phosphor (P), Stickstoff (N) und Kalium (K) in der deutschen Pflanzenproduktion sowie der Anfall dieser Stoffe mit organischen Düngern sowie humusmehrenden Früchten bzw. Zwischenfrüchten zur Gründüngung (Wissenschaftlicher Beirat für Düngungsfragen, 2015; Statistisches Bundesamt, 2015)

	P (1.000 t)	N (1.000 t)	K (1.000 t)
Bedarf	533	2.833	2.888
Anfall			
Wirtschaftsdünger	202	1.270	976
Gärreste (mit Gülle)	73	518	389
Kompost	6	24	18
Klärschlämme	16	22	1
Tierische Nebenprodukte	9	153	1
Pflanzliche Nebenprodukte	k.A.	k.A.	k.A.
Erntereste	74	374	812
Humusmehrende Früchte	-	191	-
Zwischenfrüchte zur Gründüngung	-	24	-
Summe Anfall	380	2.576	2.197
Anfall – Bedarf	-153	-257	-691
Nährstofflieferung durch Mineraldünger	131	1.823	381
Saldo	-22	+1.566	-310

3 Technische Verfahren zur Herstellung von Düngemitteln aus Reststoffen

Aufbereitung von flüssigen Wirtschaftsdüngern und Gärrückständen

In Regionen mit hoher Viehdichte und großer Anzahl an Biogasanlagen ist eine am Pflanzenbedarf orientierte Verwertung der gesamten Menge der anfallenden Wirtschaftsdünger vor Ort oft nicht möglich. Um dies zu gewährleisten, sollte mittelfristig eine bessere räumliche Verteilung, d. h. eine flächengebundene Tierhaltung angestrebt werden. Solange dies nicht der Fall ist, muss man flüssige Wirtschaftsdünger, einschließlich Gärrückstände, häufig über weite Strecken transportieren. Da der Transport über lange Strecken teuer und die Abnahmebereitschaft in den Ackerbauregionen nicht immer gegeben ist, gewinnen Verfahren zur Aufbereitung flüssiger Wirtschaftsdünger an Bedeutung (siehe Tabelle 2).

Die einfachste Form der Aufbereitung ist die **Separierung** mittels Eindickung, Pressschneckenseparator oder Dekanterzentrifuge. Hierbei wird ein Teil der Festphase abgeschieden und man erhält einen Feststoff mit etwa 30 % Trockenmasse. Dieser ist, abhängig vom Separierungsverfahren, mit Phosphor und organischen Stickstoff-Verbindungen (N-Verbindungen) angereichert. Zum Teil werden Flockungsmittel eingesetzt, die einen vergleichsweise hohen Abscheidegrad ermöglichen. Jedoch ist das Abbauverhalten dieser Stoffe im Boden noch nicht eindeutig geklärt. Die Gefahr einer Anreicherung im Boden ist zu vermeiden, wenn es sich um langsam oder nicht abbaubare Verbindungen handelt.

Die **Festphase** kann durch aerobe Behandlung oder Trocknung stabilisiert und so transport- und lagerungsfähig gemacht werden. In Ihren Eigenschaften unterscheiden sich die P-Verbindungen in der Festphase nicht von denen der ursprünglichen Wirtschaftsdünger. Sie

sind in der Regel verhältnismäßig gut pflanzenverfügbar, sofern als Flockungs- und Fällungshilfsmittel keine Eisensalze verwendet worden sind, da durch diese die P-Löslichkeit herabgesetzt wird.

In einigen Konzepten zur Aufbereitung von flüssigen Wirtschaftsdüngern ist eine Verbrennung der Festphase nach der Separierung vorgesehen. Abhängig vom gewählten Verfahren und von der Verbrennungstemperatur entstehen dabei häufig Produkte mit geringer P-Löslichkeit. Um deren Gehalt an Phosphor zur Düngung nutzen zu können, müssen Verfahren angewendet werden, wie sie nachfolgend für Klärschlammaschen skizziert sind.

Ebenfalls in Prüfung oder in Entwicklung sind Verfahren, bei denen in getrennten Schritten Phosphor und Ammonium entzogen und die verbleibenden festen Bestandteile mittels Pyrolyse in „Biokohle“ umgewandelt werden.

Die **Flüssigphase** aus der Separierung weist einen deutlich höheren mineralischen N-Anteil am Gesamt-N auf als der nicht separierte Wirtschaftsdünger und kann somit zu einer gezielteren N-Düngung verwendet werden. Eine weitere Aufbereitung der Flüssigphase dient vor allem der Aufkonzentrierung von Stickstoff und Kalium und somit einer verbesserten Transportwürdigkeit dieser Nährstoffe. Hierzu werden Verfahren wie Vakuumeindampfung, Membrantechnik (Filtration in Kombination mit Umkehrosmose) und Strippung eingesetzt. Auch sind Verfahren in der Entwicklung, in denen P-Fällungsprodukte (z. B. Struvit) aus der Flüssigphase gewonnen werden. Hierfür ist es notwendig, vor der Separierung die mineralische P-Fraktion durch Ansäuerung in Lösung zu bringen, sodass diese nicht in die Festphase abgeschieden wird.

Table 2: Verfahren zur Separierung und zur Aufbereitung der Fest- und Flüssigphase von Gülle (Wulf, persönliche Mitteilung)

Verfahren	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
Separierung			
Eindickung	Natürliche Phasentrennung im Lagerbehälter wird genutzt. Dickgülle mit höheren Gehalten an P und org. N wird im unteren Bereich des Behälters entnommen, größere Mengen min. N verbleiben in der Dünngülle.	Einfaches, kostengünstiges Verfahren, große Mengen an P können mit Dickgülle abgeschieden werden.	Relativ hohes Transportvolumen für Dickgülle (50 %). Dick- und Dünngülle sind nicht zur weiteren Aufbereitung geeignet.
Pressschnecken-separator	Rotierende Schnecke transportiert die Gülle in Siebkorb mit bestimmter Maschenweite. Durch eine Widerstandklappe entsteht ein Staupropfen, an dem die Festphase abgeschieden und ausgestoßen wird.	Einfaches, technisch robustes Verfahren.	Feststoffe (0,5–1 mm Partikelgröße) verbleiben auch bei kleinen Maschenweiten häufig in der Flüssigphase.
Dekanterzentrifuge	In rotierender, kontinuierlich beschickter Trommel scheidet sich die Festphase an der Wand ab. Feststoff wird durch eine Schnecke von der Trommelwand zum Ausstoß transportiert.	Gute Abscheidung von Partikeln mit sehr kleinem Durchmesser, hohe P-Abtrennung möglich.	Konstante Zusammensetzung des Eintrittsmaterials notwendig. Teures Verfahren (Investition und Betrieb).
Aufbereitung Festphase			
Trocknung	In anderen Bereichen etablierte Verfahren können angewendet werden, z. B. Trommel-, Band- oder Schubwendetrockner. In den meisten Trocknersystemen wird die Wärme durch heiße Luft übertragen, die das Trockengut über- oder durchströmt. Bei Biogasanlagen ist die Nutzung von BHKW-Abwärme möglich, falls diese nicht anderweitig genutzt wird.	Stabiles, lager- und transportfähiges Produkt im Vergleich zu ungetrockneter Festphase.	Nur in Verbindung mit Biogasanlagen und bei Verfügbarkeit von Überschusswärme ökonomisch umsetzbar. Verdrängt u. U. andere Verwendungen der Wärme, mit denen fossile Energieträger ersetzt würden.
Aufbereitung Flüssigphase			
Eindampfung	In der Regel mehrstufig betrieben. Die Entgasung erfolgt durch Unterdruck und Erwärmung bis zum Siedepunkt. Wärme jeder Stufe wird zurückgewonnen und für die Folgestufe verwendet.	Es entsteht ein mit Nährstoffen angereichertes Konzentrat (bei direkter Eindampfung Ammoniumsulfatlösung) und ein (nahezu) nährstofffreies Kondensat. Kondensat bis zu 50 % des Volumens der Flüssigphase.	Siehe Trocknung (wegen Wärmenutzung). Einleitqualität des Kondensats nicht immer gesichert.
Membrantechnik*	Technik aus der Wasseraufbereitung. Kombination von Filtrationsverfahren mit abnehmender Porengröße, gefolgt von einer Umkehrosmose.	Konzentrat ist mit Ammonium und Kalium angereichert. Permeat als Prozesswasser nutzbar oder sogar einleitfähig. Permeat bis zu 50 % des Volumens der Flüssigphase.	Hoher Energieaufwand. Häufig Einsatz von Flockungsmitteln bzw. Separierung notwendig. Hoher Pumpaufwand. Standzeit Membranen der Umkehrosmose oft eingeschränkt.
Strippung*	Gase (Luft, Wasserdampf) werden durch die Gülle geleitet und Ammoniak ausgetrieben. Temperatur- und pH-Wert-Erhöhen unterstützen dies. In nachgeschaltetem Schritt wird Ammoniak aus dem Gasstrom entfernt.	Stark nährstoffangereichertes Produkt (z. B. Ammoniumsulfatlösung), das ähnlich bereits als Düngemittel gehandelt wird.	Abwasser enthält noch Organik und Nährstoffe und muss weiter behandelt oder verwertet werden.
Biologische Behandlung	Nitrifikation/Denitrifikation zur Entfernung von Stickstoff-Verbindung (Klärtechnik), z. T. mit Rückführung des Belebtschlammes (Membranbioreaktor).	Weitgehende Entfernung von N aus dem Ablauf, Rückführung von P in den Schlamm.	Meist nur in Kombination mit anderen Verfahrensschritten möglich.

* Häufig Separation durch Dekanterzentrifuge notwendig, da sehr geringer Feststoffgehalt in Flüssigphase für stabilen Betrieb erforderlich.

Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm

Größte Aufmerksamkeit haben in den letzten Jahren technische Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm erfahren. Ziel ist es, eine Verwertung der Recyclingprodukte direkt als Dünger oder zur Düngemittelherstellung zu ermöglichen. Dabei zeichnen sich fortschrittliche Phosphorrückgewinnungsverfahren dadurch aus, dass mit ihnen eine gezielte Schadstoffentfrachtung bzw. Wertstoff-Schadstoff-Trennung vollzogen wird.

Bei den Prozessen der kommunalen Abwasser- und Klärschlammbehandlung besteht an mehreren Stellen die Möglichkeit, Anlagen zur Phosphorrückgewinnung zu integrieren bzw. konsekutiv einzusetzen. Folgende Maßnahmen sind grundsätzlich möglich, um die Zielvorgaben der neuen Klärschlammverordnung zu erreichen:

- (1) **Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser** nach forcierter P-Rücklösung mit dem Ziel, den P-Gehalt im Klärschlamm auf weniger als 20 g P/kg TM zu reduzieren. Für die hier ansetzenden Technologien sind Kläranlagen mit vermehrter biologischer Phosphorelimination Voraussetzung. Die P-armen Klärschlämme (< 20 g P/kg TM) dürfen einer Mitverbrennung zugeführt werden und unterliegen nicht mehr dem Zwang einer P-Rückgewinnung.
- (2) **Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm.** Hierbei ist der P-Gehalt im Klärschlamm durch Verfahren auf weniger als 20 g P/kg TM zu reduzieren oder eine Rückgewinnung von mindestens 50 % des Phosphors zu erzielen. Es wurden thermische und nasschemische Verfahren entwickelt, um dieses Ziel zu erreichen.
- (3) **Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche** nach der Monoverbrennung von Klärschlamm mit dem Ziel, mind. 80 % des in der Klärschlammasche enthaltenen Phosphors zurückzugewinnen. Hierfür wurden thermische und nassmechanische Verfahren entwickelt. Alternativ zur sofortigen Behandlung der Aschen ist eine Langzeitlagerung zur späteren Nutzung der Asche zulässig.

Eine detaillierte Zusammenstellung des derzeitigen Standes verschiedener chemischer oder thermochemischer Verfahren der Phosphorrückgewinnung aus Schlammwasser, Klärschlamm und Klärschlammaschen, mit denen die neuen rechtlichen Anforderungen auf den Kläranlagen bzw. beim Klärschlammmanagement umgesetzt werden können, findet sich in der Tabelle 3.

Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Schlammwasser kommen grundsätzlich bei Kläranlagen in Betracht, in denen Phosphor mittels vermehrter biologischer P-Elimination aus dem Abwasser entfernt wird. Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser sind häufig leicht integrier- und umsetzbar. Die gewonnenen Rezyklate sind Magnesiumammoniumphosphat (MgAP), Magnesiumphosphat (MgP) oder Calciumphosphat (CaP). Das Rückgewinnungspotenzial ist allerdings geringer als bei den Stoffströmen „Faulschlamm“ und „Asche“ (Pinnekamp et al., 2013).

Zur Phosphorrückgewinnung aus **Rohschlamm oder Faulschlamm** stehen, nach nasschemischem Aufschluss und Schwermetallabtrennung, Fällungs- bzw. Adsorptionsverfahren zur Verfügung. Ein Aufschluss mit dem Ziel der Absenkung der P-Konzentration unter 20 g P/kg TM bzw. einer Rückgewinnung von mindestens 50 % geht in der Regel mit einem hohen Einsatz von anorganischen Säuren einher. Die produzierten Sekundärphosphate liegen ebenfalls hauptsächlich in Form von MgAP, MgP und CaP vor.

Ebenfalls eingesetzte thermochemische Verfahren mit entwässertem bzw. getrocknetem Klärschlamm führen zur Bildung eines kohlenstoffhaltigen Rückstandes („Klärschlammkarbonisat“), der mineralische Phosphate unterschiedlicher Zusammensetzung enthält. Die Schwermetallentfrachtung und die P-Verfügbarkeit sollen durch die Temperaturführung und verschiedene Additive gesteuert werden. Beim metallurgischen Phosphorrecyclingverfahren (Mephrec) wird Klärschlamm getrocknet, brikettiert und unter Zugabe von Koks und weiteren Zuschlagstoffen in Brenngas überführt. Die Abtrennung von Phosphor erfolgt nach Abkühlung über die Schlacke in Form von Materialien, die dem sogenannten „Thomasphosphat“ ähnlich sind. Demonstrationsuntersuchungen im Rahmen des Projekts KRN Mephrec (Nürnberg) zeigten, dass ein Teil des Phosphors auch in die Gasphase übergeht (Hagspiel, 2018).

Ebenso wie beim metallurgischen Phosphor-Recycling werden bei einer Monoverbrennung von Klärschlamm alle organischen Schadstoffe, Pharmazeutika und Pathogene zerstört. Die entstehenden Klärschlammaschen können direkt in einem Prozess zur Phosphorrückgewinnung eingesetzt oder einer rückholbaren, separaten Langzeitlagerung in Deponien zugeführt werden. Die nasschemischen oder thermochemischen Verfahren zur P-Rückgewinnung beinhalten Säuren- oder Laugenaufschlüsse, Zugabe von Additiven

Table 3: Wichtige Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammaschen (nach Pinnekamp et al., 2013)

Verfahren	Wesentliche Verfahrensschritte	Produkte	Technologiebeispiele
Stoffstrom Abwasser/Schlammwasser			
Kristallisation oder Fällung	ggf. pH-Wert-Einstellung (NaOH), Zugabe von Mg-Salzen (oder einer Mg-Opferanode) bzw. Kristallisationskeimen (z. B. Sand, Calcium-Silikat-Hydrat: CSH) in den Kristallisations-/Fällungsreaktor, Rezyklat-Abtrennung	Magnesiumammoniumphosphat (Struvit), Magnesiumphosphat, Calciumphosphat in getrockneter und ggf. granulierter Form	P-RoC (Neuburg), Ostara PEARL (z. B. Edmonton, CAN), Phosphogreen (z. B. Marselisborg, DK)
Stoffstrom Faulschlamm			
Fällung/Adsorption	ggf. (Klär-) Schlammaufschluss, pH-Wert-Einstellung nach Faulung durch Belüftung und/oder Chemikalienzugabe (NaOH), Ausfällung von MgAP im Faulschlamm, Rezyklat-Abtrennung	Magnesiumammoniumphosphat (Struvit), Magnesiumphosphat, Calciumphosphat in getrockneter und ggf. granulierter Form	Air Prex, Berliner Verfahren (z. B. Mönchengladbach-Neuwerk, Berlin-Waßmannsdorf)
Nasschemischer Aufschluss	Säureaufschluss des Faulschlammes, Fest-/Flüssigtrennung, Filtratbehandlung: ggf. Metallkomplexierung, pH-Wert-Einstellung, Zugabe von Mg-Salzen oder Ca, Fällung des Rezyklats, Rezyklat-Abtrennung	Magnesiumammoniumphosphat (Struvit), Magnesiumphosphat, Calciumphosphat in getrockneter und ggf. granulierter Form	Gifhorner Verfahren (modif. Seaborne-Verfahren, Gifhorn), Stuttgarter Verfahren (Offenburg), ExtraPhos
Stoffstrom Klärschlamm			
Thermochemische Behandlung	Entgasung und Karbonisierung bei 500–700 °C; Gase in Nachbrennkammer bei 1.000 °C	Karbonisat (kohlenstoffhaltiger Rückstand)	Pyreg
	Zugabe von Additiven in KS, Reduktion bei T 650–750 °C und Entstehung von Koks, Überführung der Metalle in die Gasphase und Abtrennung über Rauchgasreinigung, Oxidation des Koks bei T 900–1.000 °C	mineralisches Phosphat, geeignet zur Herstellung von Düngemitteln	EuPhoRe
Stoffstrom Klärschlamm/Asche			
Metallurgie	Trocknung, Brikettierung des Klärschlammes, Zugabe von Koks, Einblasen von Sauerstoff, Schmelzvergasung bei T 1.000–2.000 °C, Abtrennung von P über die Schlacke	„Thomasphosphat“	Mephrec (Nürnberg), ATZ-Eisenbadreaktor
Stoffstrom Klärschlammasche			
Nasschemischer Aufschluss nach Klärschlammmonovorbrennung	Säure- oder Lauge-Aufschluss, Fest-/Flüssigtrennung, Filtratbehandlung/Metallabtrennung: Fällung, Flüssig-Flüssig-Extraktion, Ionenaustausch; Zugabe von Ca-/Mg-Salzen, Fällung des Rezyklats, Rezyklat-Abtrennung; Phosphorsäure teils durch Membranfiltration	Calciumphosphat, Magnesiumphosphat, Phosphorsäure	LEACH-Phos (Bern/CH), PASCH, TetraPhos, Phos4Life, SESAL-Phos
Thermochemischer Aufschluss nach Klärschlammmonovorbrennung	Zugabe von Additiven (NaHCO ₃ oder Na ₂ CO ₃), T 800–900 °C im Drehrohrofen, Überführung der Phosphate in „Rhenianaphosphat“ (CaNaPO ₄), Überführung der Metalle in die Gasphase und Abtrennung über Rauchgasreinigung	metallabgereicherte Asche mit P-Phase CaNaPO ₄ (analog Rhenania-Phosphat), granuliert	AshDec
	Zugabe von Koks in einen Reaktor, Reduzierung der Phosphate bei T > 1.300 °C, Abtrennung P über Gasphase als weißen Phosphor.	weißer Phosphor	RecoPhos-ICL

zur Verbesserung der P-Löslichkeit sowie verschiedene Techniken zur Schwermetallabscheidung.

Sowohl die Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm als auch diejenigen zur Phosphorrückgewinnung aus Aschen sind technisch aufwendig und in der Regel noch nicht großtechnisch umgesetzt, sodass in diesen Bereichen weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich sind. Derzeit befinden sich wenige Anlagen in Bau (TetraPhos-Anlage in Hamburg) bzw. in Planung (AshDec-Anlage in Bayern). Diese wurden zwar unter der Voraussetzung der Wirtschaftlichkeit geplant, allerdings unter den besonderen Bedingungen einer Förderung des Anlagenbaus.

Nutzbarmachung tierischer Nebenprodukte für Düngungszwecke

Tierische Nebenprodukte sind alle vom Tier stammenden Reststoffe, die nicht für den menschlichen Verzehr bestimmt sind. Sie werden aufgrund der EU-VO 1069/2009 und 142/2011 risikoorientiert in drei Kategorien eingeteilt. K1-Material (z. B. von mit TSE oder verbotenen Substanzen belasteten Nutztieren; von

Wild- und Zootieren) besitzt das höchste epidemiologische Risiko. K2-Material (z. B. mikrobiologische Risiken, Falltiere außer Wiederkäuer über 12 Monate, Rückstände) spiegelt ein mittleres, K3-Material (z. B. tierische Nebenprodukte von gesunden Tieren) ein geringes Risiko. Derzeit wird der überwiegende Teil des K1-Materials in einer Mischverbrennung verbrannt und steht für eine Rückführung nicht unmittelbar zur Verfügung. Um die Aschen des K1-Materials für eine P-Rückgewinnung nutzen zu können, wäre eine Monoverbrennung erforderlich. Da Phosphor in diesem Material überwiegend als Apatit festgelegt wird und für die Pflanze kaum nutzbar ist, sind weitere Verfahrensschritte zum P-Aufschluss erforderlich.

K2- und K3-Material kann als Düngemittel eingesetzt werden, wobei die P-Verfügbarkeit sehr stark vom Knochenanteil abhängt. Bei Materialien mit hohem Knochenanteil kann eine weitere Aufarbeitung (Säureaufschluss oder Verbrennung mit anschließendem Aufschluss) die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor verbessern.

Beschrieben wird in der Literatur auch die Herstellung eines P-reichen Karbonisats mittels Pyrolyse sowie einem alkalischen Aufschluss mit Natrium- bzw. Kaliumhydroxid.

4 Anforderungen an organische Dünger und Phosphor-Rezyklate

Organische Dünger und Reststoffe können direkt (z. B. Gülle, Gärrückstände, Klärschlamm, Fleischknochenmehl), nach einfacher Aufbereitung wie z. B. Separierung (Gülle, Gärrückstände) oder nach aufwendiger technischer Verarbeitung (z. B. P-Rezyklate aus Klärschlämmen oder tierischen Nebenprodukten) zu Düngungszwecken in Verkehr gebracht und eingesetzt werden.

Wirtschaftsdünger, Gärrückstände und Klärschlamm zum direkten Einsatz in der Landwirtschaft

Voraussetzung für den überbetrieblichen Einsatz von **organischen Düngemitteln wie Wirtschaftsdüngern oder Gärresten** ist, dass die Vorgaben der Düngemittelverordnung in Bezug auf Schadstoffgrenzwerte, Seuchen- und Phytohygiene sowie die Kennzeichnung eingehalten werden. Die richtige Kennzeichnung ist von besonderer Bedeutung für den abnehmenden Betrieb, um das Düngemittel bedarfsgerecht einsetzen und erforderliche Nährstoffvergleiche bzw. die Stoffstrombilanzierung richtig durchführen zu können. Verantwortlich für die Deklaration in einem Warenbegleitpapier ist der inverkehrbringende Betrieb, das heißt der Betrieb für Tierhaltung oder Biogasanlagen, ggf. aber auch die Nährstoffbörse oder das Lohnunternehmen, das Wirtschaftsdünger in eigener Verantwortung an Landwirtinnen und Landwirte abgibt. Die Deklaration enthält unter anderem die Typenbezeichnung sowie Angaben zum Ausgangsprodukt und insbesondere zu den Nährstoffgehalten. Für die Angabe der Nährstoffgehalte sind keine Untersuchungen vorgeschrieben, sondern es kann auf Tabellenwerte zurückgegriffen werden, die einer Kontrolle allerdings standhalten müssen. Neben der Kennzeichnung ist der Inverkehrbringer auch dafür verantwortlich, dass die in der Düngemittelverordnung festgelegten Grenzwerte für Schadstoffe eingehalten werden und dass die in Verkehr gebrachten Düngemittel keine Krankheitserreger, Toxine oder Schaderreger enthalten, von denen eine Gefahr für die Gesundheit von Menschen, Tieren und Nutzpflanzen ausgehen kann. Insbesondere in unbehandelten organischen Materialien, wie Gülle oder Gärresten aus mesophilen Biogasanlagen, ist mit einer Vielzahl von Erregern zu rechnen, sodass das Aufbringen dieser Dünger ein potenzielles

seuchen- und phytohygienisches Risiko darstellt. Der überbetriebliche Einsatz dieser Dünger würde durch die Schaffung eines bundesweit einheitlichen Rahmens zum Aufbau eines freiwilligen Qualitätssicherungssystems für Wirtschaftsdünger, wie dies im novellierten Düngegesetz vom 5. Mai 2017 angekündigt wird, sicherlich erleichtert.

Auch die **bodenbezogene Klärschlammverwertung** wird, wenn auch eingeschränkt, in Zukunft noch möglich sein (s. Kapitel 1). Dabei sind alle bodenbezogenen und alle klärschlammbezogenen Vorgaben der Abfallklärschlammverordnung einzuhalten.

P-Rezyklate

Aschen aus der Verbrennung von Klärschlamm sowie von Stoffen tierischer Herkunft können in der Düngemittelindustrie weiterverarbeitet und aufgeschlossen werden und so zur Einsparung von Rohstoffen beitragen. Dabei ist eine Abtrennung von Schadstoffen (Schwermetallen) im Produktionsprozess häufig nicht mehr möglich, sodass eine entsprechende Schadstoffarmut in den Aschen erforderlich ist. Kritisch sind auch die hohen Qualitätsanforderungen an die Endprodukte (Mindestnährstoffgehalte, Grad der P-Löslichkeit) sowie die gleichbleibende Verfügbarkeit der Aschen. Beim Aufschluss von Klärschlammaschen als Substitut für Rohphosphat in der konventionellen Düngemittelproduktion wirken sich hohe Aluminium- und Eisengehalte störend aus. Daher schätzt die Düngemittelindustrie, nur etwa 20 % des Inputs an Rohstoffen durch Klärschlammaschen ersetzen zu können. Entsprechende Großversuche wurden bereits bei Düngemittelherstellern durchgeführt.

Voraussetzungen für den Einsatz und ggf. die düngemittelrechtliche Zulassung von **industriell weiterverarbeiteten P-Recyclingprodukten** zu Düngungszwecken in der Landwirtschaft sind

- (i) die Einhaltung düngemittelrechtlicher Vorschriften in Bezug auf Ausgangsstoffe, Nährstoffgehalte, Nährstofflöslichkeiten und Schadstoffgehalte,
- (ii) der Nachweis einer Düngewirkung sowie
- (iii) die ausreichende Homogenität des Produkts.

Schließlich muss eine düngemittelrechtliche Zulassung für diese Produkte vorliegen bzw. beantragt werden.

Die Herstellung von P-Recyclingdüngern kann nach der Düngemittelverordnung aus verschiedenen Ausgangsstoffen bzw. Produktionsprozessen erfolgen, die nicht auf die Erzeugung dieser Ausgangsstoffe ausgerichtet sind (Tabelle 4). Phosphatdünger aus diesen Ausgangsstoffen müssen einen Mindestgehalt von 10 % P_2O_5 und ab dem 1. Juni 2020 die in Tabelle 4 genannten Löslichkeiten aufweisen. Insbesondere der geforderte Anteil von 2,5 % wasserlöslichem Phosphat stellt eine sehr große Herausforderung für P-Recyclingdünger dar.

Die Bewertung der P-Löslichkeit von Düngemitteln mittels verschiedener chemischer Extraktionsverfahren ist standardisiert und reproduzierbar und im Rahmen der Düngemittelverkehrskontrolle unverzichtbar. Allerdings sind die Beziehungen zwischen den Extraktionswerten und der Düngewirkung in Feld- und Gefäßversuchen oft nur mäßig, was auf die stark variablen Bodeneigenschaften, die Art der Versuchsdurchführung sowie das unterschiedliche P-Aufnahmevermögen der Pflanze zurückgeführt werden kann (Kratz und Schnug, 2009). So unterscheiden sich Pflanzenarten und -sorten sehr stark in ihrem P-Aneignungsvermögen, was durch chemi-

sche Extraktionsverfahren nicht abgebildet wird und zu uneinheitlichen Ergebnissen in Vegetationsversuchen beiträgt (Otani und Ae, 1996). Nicht zuletzt ist die Aussagekraft einzelner Extraktionsmittel für die P-Verfügbarkeit im Pflanzenversuch umstritten. So ist Struvit (MgAP) praktisch unlöslich in Wasser, zeigt jedoch in nahezu allen Pflanzenversuchen die gleiche Wirksamkeit wie die weitgehend wasserlöslichen Düngemittel Super- und Triple-Superphosphat (Römer und Steingrobe, 2018).

Neben den Anforderungen an die P-Gehalte und die P-Löslichkeit müssen P-Rezyklate auch weitere agronomische Anforderungen einhalten, insbesondere im Hinblick auf Mindestmahlfeinheit, Korngrößenverteilung, Homogenität, Streufähigkeit etc. Für das Streuverhalten sollten mit den gängigen Düngerstreuer Tests durchgeführt werden und die jeweiligen optimalen Einstellungen in die Streutabellen aufgenommen werden. Organisch-mineralische Düngemittel können durch Pelletieren von organischen (z. B. entwässerten Gärresten) und mineralischen (z. B. P-haltigen Aschen) Ausgangsstoffen hergestellt werden. Die geringe physikalische Stabilität beim Transport und die eingeschränkte biologische Stabilität bei der Lagerung erfordern kurze Zeitspannen zwischen Herstellung und Ausbringung.

5 Bewertung verschiedener organischer Dünger und Phosphor-Rezyklate aus agronomischer Sicht

Unbehandelte Wirtschaftsdünger und Klärschlamm

Mit **Wirtschaftsdüngern** aus der Tierhaltung oder **Gärrückständen** erfolgt eine Zufuhr von Nährstoffen und von organischen Verbindungen zur Humusproduktion. Nicht aufbereitete Gülle weist in der Regel eine gute P-Verfügbarkeit auf und kann beispielsweise als Ersatz für P-Mineraldünger bei der Unterfußdüngung eingesetzt werden (Federolf et al., 2015). Der überbetriebliche Einsatz von Gülle wird am meisten eingeschränkt durch stark schwankende Nährstoffgehalte, die nur schwer kalkulierbare N-Freisetzung (Gutser et al., 2005), eine Erhöhung der N-Überhänge beim betrieblichen Nährstoffvergleich und evtl. stoffliche Risiken sowie Einträge von Krankheitserregern (Wissenschaftlicher Beirat für Düngungsfragen, 2015). Durch Separierung aufbereitete Güllen und Gärrückstände vermindern die Transportkosten und erlauben durch den erhöhten Ammoniumanteil in der Flüssigphase einen zielgerichteten Einsatz als N-Dünger.

Bei der **bodenbezogenen Klärschlammverwertung** werden ebenfalls Nährstoffe und organische Substanz zur Humusproduktion dem Boden zugeführt. Die P-Verfügbarkeit kann jedoch bei einem hohen Überschuss von Eisen bei der P-Fällung stark herabgesetzt sein (El-Samie, 2003). Darüber hinaus stellen Klärschlämme eine der bedeutendsten Quellen für Schwermetalle sowie eine potenzielle Quelle für organische Schadstoffe und Krankheitserreger in der Pflanzenproduktion dar. Zur Risikominimierung kann sich eine Klärschlammnoverbrennung mit anschließender P-Aufbereitung als eine Alternative erweisen (Wissenschaftlicher Beirat für Düngungsfragen, 2015).

P-Rezyklate

Die verschiedenen technischen Verfahren zur **Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammaschen** wurden im Kapitel 3 umrissen und in der Tabelle 3 zusammengefasst. Ein Teil dieser Verfahren eignet sich grundsätzlich auch zur P-Abreicherung in Gülle aus der Tierhaltung oder in Gärrückständen.

Die verschiedenen P-Recyclingprodukte unterscheiden sich sehr stark im Hinblick auf ihre P-Bindungsformen und ihre chemische Struktur. Letztere hängt u. a. von der Mineralstoffzusammensetzung, d. h. insbesondere von der Konzentration an Eisen, Aluminium, Calcium und Natrium, ab. Ausschlaggebend für einen Einsatz der P-Recyclingprodukte in der Landwirtschaft ist ihre agronomische Wirksamkeit. Hierzu wird häufig in Gefäßversuchen die P-Aufnahme von Pflanzen im Vergleich zu einem Referenzdünger ermittelt. Auf der Basis verschiedener Studien und vergleichender Übersichtsarbeiten (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015; Römer und Steingrobe, 2018; Möller et al., 2018; Kratz et al., 2019) werden im Folgenden einige wichtige P-Rezyklate agronomisch bewertet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass selbst bei gleichen P-Rezyklattypen eine erhebliche Variabilität der erzielten Ergebnisse zu verzeichnen ist. Diese beruht nicht nur auf einer variablen chemischen Zusammensetzung des gleichen Rezyklattyps, sondern auch auf den unterschiedlichen Versuchsbedingungen, z. B. im Hinblick auf Versuchsdauer, Versuchspflanzen und Versuchsboden (pH-Wert, organische Substanz, Textur etc.). Hier ist es wünschenswert, auch in Vegetationsversuchen über standardisierte Testverfahren einheitliche Bewertungsgrundlagen zu schaffen.

Eine der am häufigsten eingesetzten Methoden zur P-Rückgewinnung aus Faulschlamm oder Schlammwasser in der Kläranlage ist die **Ausfällung als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MgAP, „Struvit“)**, teilweise unter Einbeziehung zusätzlicher Verfahrensschritte, wie das Aufschließen der Phosphate im Faulschlamm mit Säuren oder die Schwermetallabtrennung. Die Entwicklung entsprechender Verfahren ist schon weit fortgeschritten bzw. in der Praxis erprobt (z. B. AirPrex®, Stuttgarter Verfahren, PEARL®-Verfahren). In einer umfangreichen Studie des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2015) konnte gezeigt werden, dass verschiedene MgAP-Recyclingdünger eine mit einem wasserlöslichen Referenzdünger vergleichbare P-Aufnahme von Mais und Raps aufwiesen. Die Grenzwerte für Schwermetalle und organische Schadstoffe in diesen Düngern wurden ausnahmslos unterschritten. Im Hinblick auf die P-Aufnahme konnten Römer und Steingrobe (2018), die verschiedene Gefäßversuche mit unterschiedlichen

P-Recyclingprodukten auswerteten, ähnliche Ergebnisse ermitteln. Insgesamt ist die P-Wirksamkeit von MgAP somit mit wasserlöslichen P-Düngern vergleichbar und macht dieses Produkt damit zu einem interessanten P-Dünger. Ein Nachteil ist allerdings das geringe P-Rückgewinnungspotenzial der meisten Verfahren (Ausnahme: Stuttgarter Verfahren).

P-Rezyklate aus **Klärschlamm- oder Tiermehlbriketts, gewonnen mittels des Mephrec-Prozesses**, zeigten in Vegetationsversuchen häufig eine geringe P-Verfügbarkeit.

Unbehandelte Klärschlammaschen eignen sich nicht für den direkten Einsatz als Düngemittel, weil sie eine geringe P-Verfügbarkeit in Vegetationsversuchen zeigen und zudem noch hohe Schwermetallgehalte aufweisen können.

Verschiedene Produkte, in denen **Klärschlammaschen zur Verbesserung der P-Verfügbarkeit und zur Schwermetallabscheidung mit Zuschlagstoffen versehen und thermisch weiterbehandelt** werden, können direkt als Düngemittel eingesetzt werden. So können aus der Monoverbrennung gewonnene Klärschlammaschen zusammen mit $MgCl_2$ auf 1.000 °C erhitzt werden, sodass die Schwermetalle als Chloride in die Gasphase übergehen und abgeschieden werden können. Eine Alternative zu diesem sogenannten ASH DEC-Verfahren ist die Erhitzung im Drehrohrofen mit Alkaliverbindungen wie Natriumsulfat, Kaliumsulfat oder Natriumcarbonat, was ebenfalls zur Überführung von Schwermetallen in die Gasphase genutzt werden kann. Zugleich werden die schwerlöslichen Phosphatverbindungen der Klärschlammasche in besser pflanzenverfügbare Calcium-Natrium-Phosphate ($CaNaPO_4$) überführt (Stemann et al., 2015; Herzel et al., 2016). Diese Phosphate sind vom in der Vergangenheit etablierten Rhenania-Phosphat bekannt. Dieses als ASH DEC der zweiten Generation bezeichnete Verfahren soll zu einer besseren Pflanzenverfügbarkeit der Rezyklate auf neutralen und alkalischen Böden führen, erreicht aber nicht die Schwermetallabreicherung des ursprünglichen Verfahrens. Auch bei einer Kombination von anaerober Verswelung und nachfolgender oxidativer Behandlung im Drehrohrofen (EuPhoRe-Verfahren) kann durch Zugabe von z. B. $MgCl_2$ sowohl eine Reduzierung von Schwermetallgehalten als auch eine Verbesserung der P-Verfügbarkeit erreicht werden. Insgesamt ergaben bisher durchgeführte Vegetationsversuche sehr variable

Ergebnisse hinsichtlich der P-Verfügbarkeit praktisch aller getesteten Produkte aus Klärschlammaschen. Sie weisen auf einen deutlichen Einfluss der Bodenbedingungen, der angebauten Pflanzenart und sogar der Sorte auf die erzielten Ergebnisse hin.

Nicht zuletzt können die aus der Monoverbrennung gewonnenen Klärschlammaschen in der **Düngemittel-industrie** eingesetzt und, als Zuschlagstoff zu Rohphosphaten, zu wirksamen P-Düngern aufgeschlossen werden.

Im Hinblick auf **Klärschlammkarbonisate** liegen nur wenige Berichte über positive P-Wirkungen vor (Mindermann et al., 2014; Kern et al., 2016). Häufig führt die Pyrolyse von Klärschlamm zu einer Verminderung der P-Wirkung im Vergleich zum unbehandelten Klärschlamm.

Bei allen Verfahren, die einen **Verbrennungsschritt der Festphase von Wirtschaftsdüngern** vorsehen, sollte berücksichtigt werden, dass dies mit dem Verlust wichtiger Pflanzennährstoffe, insbesondere Stickstoff, Schwefel und organischem Kohlenstoff verbunden ist. Auch die Verkohlung von organischen Stoffen führt zu Nährstoffverlusten und zur Überführung von organischem Kohlenstoff in inerten Kohlenstoff. Insbesondere werden durch diese Prozesse Einsparpotenziale, zum Beispiel hinsichtlich des Bedarfes an synthetischen Düngern, die auf dem energieintensiven Haber-Bosch-Verfahren beruhen, nicht genutzt.

Die Nutzung von **tierischen Nebenprodukten** für die Pflanzenernährung könnte durch die Monoverbrennung von K1-Material und den anschließenden Aufschluss der Aschen deutlich erhöht werden. Entsprechende Produkte, die mittels Drehrohrofen unter Zusatz von Soda und Quarzsand hergestellt wurden, ergaben in Gefäßversuchen eine wesentlich höhere P-Ausnutzung als die Verabreichung von unbehandelter Asche (Römer und Steingrobe, 2018). So konnte bei Mais eine P-Aufnahme im Vergleich zu Triple-Superphosphat von 65 bis 67 % erzielt werden. Da bei der Verwendung von Knochenmehlen und Fleischknochenmehlen aus K2-Material die P-Verfügbarkeit sehr stark mit dem Knochenanteil abnimmt, könnte durch entsprechende Aufschlüsse auch deren P-Verfügbarkeit stark verbessert werden.

6 Bewertung verschiedener organischer Dünger und Phosphor-Rezyklate aus rechtlicher Sicht

Für viele der Rezyklate, die derzeit in der technischen Entwicklung und der agronomischen Bewertung sind, fehlt noch eine düngemittelrechtliche Zulassung. Im Hinblick auf eine angestrebte Zulassung muss darauf hingewiesen werden, dass die in der Düngemittelverordnung formulierten Anforderungen teilweise schwer zu erfüllen sind. So kann in Anlehnung an verschiedene Studien (Kratz et al., 2010; Kratz et al., 2014; Römer, 2013; Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015) festgestellt werden, dass die Wasserlöslichkeit von P aus Recyclingprodukten in der Regel sehr niedrig ist und daher die Voraussetzungen der Düngemittelverordnung nicht

erfüllt werden (siehe Tabelle 4). Dabei muss angemerkt werden, dass die Wasserlöslichkeit nicht in allen Fällen ein geeigneter Indikator ist. So ist z. B. MgAP kaum wasserlöslich, weist in vielen Vegetationsversuchen aber eine mit wasserlöslichen Mineraldüngern vergleichbare P-Pflanzenverfügbarkeit auf. Bei einem Teil der Produkte, z. B. bei Klärschlammkarbonisaten, ist wegen der prozessbedingten Aufkonzentrierung nur die Verwendung von schwermetallarmen Klärschlämmen möglich, da sonst die düngemittelrechtlich vorgegebenen Grenzwerte überschritten werden können.

Tabelle 4: Anforderungen an die Löslichkeit von Phosphatdüngern aus bestimmten Ausgangsstoffen, Stoffgruppen oder Herkünften ab dem 1. Juni 2020 (DüMV, zuletzt geändert 9. Oktober 2019; nach Wiesler, 2016)

Ausgangsstoff, Stoffgruppe oder Herkunft	Mindestanforderung an Löslichkeit
<ul style="list-style-type: none"> ● Verkohlung von Knochen tierischer Herkunft ● Verbrennung von Stoffen tierischer Herkunft ● Verbrennung von Klärschlämmen ● Phosphatfällung ● Schmelzvergasung 	<ul style="list-style-type: none"> → 2,5 % wasserlösliches Phosphat → 5 % neutral-ammonicitratlösliches und wasserlösliches Phosphat → 2 % ausschließlich mineralsäurelösliches Phosphat

7 Empfehlungen

Im Hinblick auf die Aufbereitung von flüssigen Wirtschaftsdüngern, die wirtschaftliche und ressourceneffiziente Rückgewinnung von P aus Abwasser, Klärschlamm, Klärschlammaschen sowie die Bewertung der P-Düngewirksamkeit der P-Recyclingprodukte besteht noch erheblicher Forschungs-, Entwicklungs- und auch Regelungsbedarf.

- Für den überbetrieblichen Einsatz von Wirtschaftsdüngern müssen Schnelltestverfahren zur zuverlässigen Ermittlung der Nährstoffgehalte entwickelt werden.
- Unter den betrachteten P-Rezyklaten weist Struvit eine gute P-Verfügbarkeit auf, die mit wasserlöslichen P-Mineraldüngern vergleichbar ist. Bei allen anderen P-Rezyklaten ergibt sich kein einheitliches Bild. Das macht die Prüfung dieser Produkte unter Gefäßversuchs- und möglichst auch unter Feldbedingungen erforderlich, um zu vermeiden, dass aus technischer Sicht geeignete Verfahren der P-Rückgewinnung entwickelt werden, die aber zu keinen wirksamen Düngemitteln für die Landwirtschaft führen.
- Für die Zulassung neuer Düngemitteltypen sollten Vegetationstests entwickelt und standardisiert werden. Zusätzlich können auch alternative Verfahren, die zeitnah Ergebnisse liefern, z. B. die DGT-Methode (Diffusive Gradient in Thin Films), weiter erprobt und ggf. verwendet werden.
- Um eine Nichtzulassung von für die Landwirtschaft geeigneten Rezyklaten zu vermeiden, sollten die sehr strengen Anforderungen an die P-Löslichkeit nach der DüMV hinterfragt und überarbeitet werden.
- Aus Gründen des Ressourcenschutzes sollte die P-Verfügbarkeit in Rezyklaten nicht schlechter sein als im verwendeten Ausgangsmaterial.
- Vor der Zulassung neuer Düngemitteltypen sollte eine Gesamtbetrachtung durchgeführt werden, in welcher u. a. ermittelt werden sollte, ob bei der Herstellung andere wertgebende Stoffe, z. B. Stickstoff oder organischer Kohlenstoff, verloren gehen.
- Zwischen den relevanten Wirtschaftssektoren, z. B. Landwirtschaft, Düngemittelerzeugung und Abwasserwirtschaft, sollte der Austausch hinsichtlich der Verfahrensentwicklung und des Einsatzes rezyklierter Phosphate als Düngemittel in der Landwirtschaft gepflegt und intensiviert werden.
- Da die Qualität von Rezyklaten sowohl im Hinblick auf die P-Löslichkeit als auch auf die Belastung mit Kontaminanten sehr variabel ist, sollte sich die Düngemittelverkehrskontrolle verstärkt dieser Stoffgruppe annehmen.
- Die Etablierung von Qualitätssicherungssystemen ist eine wichtige Maßnahme zur Erhöhung der Sicherheit und der Akzeptanz von Düngemitteln aus dem P-Recycling.

8 Literatur

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2015):** Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen. Abschlussbericht, 112 Seiten.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016):** Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II, 143 Seiten.
- El-Samie, I. M. F. A. (2003):** Phosphordüngewirkung von Klärschlämmen aus Klärwerken mit Phosphatelimination durch Eisensalze. Dissertation, Universität Göttingen.
- Europäische Kommission (2017):** Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/DE/COM-2017-490-F1-DE-MAIN-PART-1.PDF> (heruntergeladen am 09.06.2020).
- Federolf, C.-P., Westerschulte, M., Olf, H.-W. und Trautz, D. (2015):** Optimizing nitrogen and phosphorus use efficiencies from liquid manure by slurry injection to reduce environmental pollution. *Procedia Environmental Sciences* 29, 227–228.
- Gutser, R., Ebertseder, Th., Weber, A., Schraml, M. und Schmidhalter, U. (2005):** Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *J. Plant Nutrition Soil Sci.* 168, 439–446.
- Hagspiel, B. (2018):** Abschlussbericht: Klärschlamm zu Energie, Dünger und Eisen mit metallurgischem Phosphorrecycling in einem Verfahrensschritt (KRN-Mephrec). https://bmbf.nawam-erwas.de/sites/default/files/20180425_krn-mephrec_abschlussbericht_online.pdf (heruntergeladen 02.03.2020).
- Herzel, H., Krüger, O., Hermann, L. und Adam, C. (2016):** Sewage sludge ash – A promising secondary phosphorus source for fertilizer production. *Science of the Total Environment* 542, 1136–1143.
- Horst, W. J. (2014):** Wege aus der Phosphor-Krise. Recycling und eine bessere Aufnahme von Nährstoffen im Fokus. *Trendbuch 2014/Agrarzeitung*, 62–66.
- Kern, D., Friedrich, K. und Appel, T. (2016):** Phosphordüngewirkung und Schwermetallverfügbarkeit von karbonisiertem Klärschlamm in Abhängigkeit von der Dauer der Karbonisierung und der Zugabe von Natriumsulfat. *VDLUFA-Schriftenreihe* 73, Kongressband 2016, 355–361.
- Kratz, S. und Schnug, E. (2009):** Zur Frage der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor in Düngemitteln. *Journal für Kulturpflanzen* 61, 2–8.
- Kratz, S., Haneklaus, S. und Schnug, E. (2010):** Chemical solubility and agricultural performance of P-containing recycling fertilizers. *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research* 4 (60), 227–240.
- Kratz, S., Schick, J., Shwiekh, R. und Schnug, E. (2014):** Abschätzung des Potentials erneuerbarer P-haltiger Rohstoffe in Deutschland zur Substitution rophosphathaltiger Düngemittel. *Journal für Kulturpflanzen* 66, 261–275.
- Kratz, S., Vogel, C. und Adam, C. (2019):** Agronomic performance of P recycling fertilizers and methods to predict it: a review. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10010-7>.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2019):** Nährstoffbericht für Niedersachsen 2017/2018. Herausgeber: Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Oldenburg.
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (2018):** Nährstoffbericht 2017 über Wirtschaftsdünger und andere organische Düngemittel für Nordrhein-Westfalen. Herausgeber: Der Direktor der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen als Landesbeauftragter, Münster.
- Mindermann, B., Friedrich, K., Mertens, M. und Appel, T. (2014):** P-Düngewirkung von karbonisierten Klärschlämmen in Abhängigkeit von der Art der P-Fällung. *VDLUFA-Schriftenreihe* 70, Kongressband 2014, S. 246–252, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

- Möller, K., Oberson, A., Bünemann, E. K., Cooper, J., Friedel, J. K., Glaesner, N., Hörtenhuber, S., Loes, A.-K., Mäder, P., Meyer, G., Müller, T., Symanczik, S., Weissengruber, L., Wollmann, I., Magid, J. (2018):** Improved phosphorus recycling in organic farming: Navigating between constraints. *Adv. Agronomy* 147, 159–237.
- Otani, T. und Ae, N. (1996):** Phosphorus (P) uptake mechanisms of crops grown in soils with low P status. I. Screening crops for efficient P uptake. *Soil Science and Plant Nutrition* 42:1, 155–163, DOI: 10.1080/00380768.1996.10414699.
- Pinnekamp, J., Baumann, P., Cornel, P., Everding, W., Göttlicher-Schmidle, U., Heinzmann, B., Jardin, N., London, J. Meyer, C., Mocker, M., Montag, D., Müller-Schaper, J., Petzet, S. und Schaum, C. (2013):** Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. In: *Korrespondenz Abwasser Abfall* 10/13 Seite 837–844 sowie 11/13 Seite 976–981. Hrsg.: GFA, Hennef, ISSN 1866-0029.
- Römer, W. (2013):** Phosphordüngewirkung neuer Phosphorrecyclingprodukte. *Berichte über Landwirtschaft* 91,1–24.
- Römer, W. (2013):** Phosphor-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 2013 (60), Nr. 3, S. 202–215.
- Römer, W. und Steingrobe, B. (2018):** Fertilizer effect of phosphorus recycling products. *Sustainability* 10, DOI:103390/su10041166.
- Statistisches Bundesamt (2015):** Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2015. Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup.
- Stemann, J., Peplinski, B. und Adam, C. (2015):** Thermochemical treatment of sewage sludge ashes with sodium salt additives for phosphorus fertilizer production – Analysis of underlying chemical reactions. *Waste Management* 45, 385–390.
- US Geological Survey (2020):** Phosphate Rock Data Sheet. Mineral Commodity Summaries, January 2020, 122–123. http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/
- Wiesler, F. (2016):** Anforderungen an die Verwertung von Reststoffen in der Pflanzenproduktion. *VDLUFA-Schriftenreihe* 73, 10–26. https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Schriftenreihe/SR073_2016_Kongressband.pdf.
- Wissenschaftlicher Beirat für Düngungsfragen (2015):** Anwendung von organischen Düngern und organischen Reststoffen in der Landwirtschaft. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/duengung/OrgDuengung.html

HERAUSGEBER

Bundesministerium für Ernährung
und Landwirtschaft (BMEL)
Referat 711
11055 Berlin

STAND

Februar 2020

GESTALTUNG

design idee, büro für gestaltung, Erfurt

TEXT

BMEL

DRUCK

BMEL

BESTELLINFORMATIONEN

Diese und weitere Publikationen können Sie kostenlos
bestellen:

Internet: www.bmel.de/publikationen

E-Mail: publikationen@bundesregierung.de

Tel.: 030 18 272 2721

Fax: 030 1810 272 2721

Schriftlich: Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 48 10 09 | 18132 Rostock

**Diese Publikation wird vom BMEL kostenlos
herausgegeben. Sie darf nicht im Rahmen
von Wahlwerbung politischer Parteien oder
Gruppen eingesetzt werden.**

Weitere Informationen unter

www.bmel.de

 @bmel

 Lebensministerium