

TEXTE

98/2015

Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz

Zusammenfassung

TEXTE 98/2015

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3713 26 301
UBA-FB 002120/KURZ

Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz

Zusammenfassung

von

Dr.-Ing. David Montag, Dipl.-Ing. Wibke Everding, Dipl.-Ing. Susanne Malms,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp
Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Aachen

Dipl.-Geoök. Joachim Reinhardt, Dipl.-Biol. Horst Fehrenbach
IFEU Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg

Dr. Ute Arnold, Dr. Manfred Trimborn, Prof. Dr. Heiner Goldbach
Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz,
Rheinische-Friedrich-Wilhelms Universität, Bonn

Prof. Dr. Wolfgang Klett, Thomas Lammers
Köhler & Klett Partnerschaft von Rechtsanwälten mbH, Köln

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
52056 Aachen

Abschlussdatum:

November 2014

Redaktion:

Fachgebiet III 2.5 Überwachungsverfahren, Abwasserentsorgung
Andrea Roskosch

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bewertung-konkreter-massnahmen-einer-weitergehenden>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, November 2015

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3713 26 301 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Einleitung

Vor dem Hintergrund der aktuellen politischen Entwicklungen - Düngemittelverordnung sowie dem Entwurf der Klärschlammverordnung mit integrierten Regelungen zur Phosphorrückgewinnung – werden im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens einzelne Fragestellungen zur Phosphorrückgewinnung beantwortet. Neben dem Greifen der strengeren Grenzwerte der Düngemittelverordnung für landwirtschaftlich verwertete Klärschlämme ab 2015 wird über einen Ausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlammverwertung und die Einführung einer Vorgabe zur Phosphorrückgewinnung diskutiert (Entwurf Klärschlammverordnung).

Schwerpunkte des Berichts bilden das Einsparpotenzial von Phosphor in Produkten und von phosphathaltigen Produkten sowie die Qualität der Rezyklate und deren Einsatz als Düngemittel in der Landwirtschaft bzw. in der Düngemittelindustrie. Außerdem werden Verfahren zur P-Rückgewinnung identifiziert und bewertet, die Kosten und der Energieaufwand der Verfahren dargestellt sowie mögliche Umstellungen der Kläranlagen in Bezug auf eine erleichterte Phosphorrückgewinnung geprüft. Weitere zentrale Inhalte sind Mengenerrechnungen zur Entwicklung der thermischen Klärschlamm Entsorgung und die Möglichkeit des Landfill Minings sowie die Langzeitlagerung der Klärschlammaschen. Anhand einer Expertenbefragung wurden Aspekte zur Markteinführung der Rezyklate diskutiert. Weiterhin werden bereits durchgeführte Maßnahmen zur Klärschlamm Entsorgung und P-Rückgewinnung aus dem Ausland dargestellt. Abschließend erfolgt eine Prüfung der rechtlichen Umsetzungsmöglichkeiten, u.a. zur Finanzierung und Subventionierung der P-Rückgewinnung sowie zur Abnahmeverpflichtung der produzierten Rezyklate.

Themenschwerpunkt: Einsparpotenziale von Phosphor

Die außerlandwirtschaftlichen Anwendungen für Phosphor fallen vergleichsweise unbedeutend aus. Die höchsten Einsparpotenziale in diesem Bereich finden sich bei den Maschinengeschirrspülmitteln. Der Ersatz von Phosphaten ist hier aber mit größeren Schwierigkeiten verbunden als bei den Waschmitteln. Die Ersatzstoffe müssen in der Mischung genauso wirksam sein und dürfen ökobilanziell über ihren ganzen Lebensweg hinweg nicht schlechter abschneiden. Außerdem sind gute Abbaubarkeit, geringe Toxizität und ein ökologisch unbedenkliches Verhalten in den aquatischen Systemen sowie hohe Eliminationsraten in den Kläranlagen für eine Anwendung Voraussetzung. Eine Einsparung von Phosphor darf nicht zu größeren ökologischen Lasten führen. Grundsätzlich erscheint dies als machbar, entsprechende Maßnahmen können jedoch einen Preisanstieg bei Maschinengeschirrspülmitteln bedingen. Das jährliche Einsparpotenzial liegt bei 10.000 – 20.000 Mg P/a. Danach folgt das Einsparpotenzial bei Lebensmitteln, in welchem insbesondere Phosphor in Form von Zusatzstoffen eingespart werden könnte. Dazu bedarf es aber der Einschätzung von Lebensmittelchemikern.

In der Metallbearbeitung kann die Phosphatierung durch neuartige Verfahren ersetzt werden, die über einen verringerten Energieeinsatz und geringere Schlamm bildung auch weitere Vorteile aufwiesen. Der damit verbundene Phosphorverbrauch ist mangels verlässlicher Zahlen äußerst unsicher und liegt bei maximal 7.000 Mg P/a, wahrscheinlich aber deutlich niedriger.

In weiteren Bereichen ist Phosphor nicht einfach substituierbar bzw. nur unter Erhöhung der Einsatzmengen anderer Stoffe.

Themenschwerpunkt: Phosphorrückgewinnung auf Kläranlagen

Phosphorrückgewinnungsverfahren sind Techniken, mit denen Phosphor aus Sekundärrohstoffen rückgewonnen werden kann. Ziel ist es, eine Verwertung direkt in der Landwirtschaft als Dünger, in der Düngemittelindustrie oder in der Phosphorindustrie zu ermöglichen (Montag et al. 2010). Phosphorrückgewinnungsverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass mit ihnen eine gezielte Schadstoffentfrachtung bzw. Wertstoff-Schadstoff-Trennung vollzogen wird. Demzufolge werden die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung bzw. die Verwendung von (aufgeschlossener) Klärschlammasche als Düngemittel nicht als Verfahren zur Phosphorrückgewinnung gewertet.

Auch in Deutschland werden bereits mehrere groß- und halbtechnische Anlagen zur Phosphorrückgewinnung betrieben und erprobt. Der Entwicklungsstand bzw. die Anwendungsreife der Verfahren sind sehr unterschiedlich. Auch in den letzten Jahren sind noch neue Verfahrenskonzepte entwickelt worden, woran abgelesen werden kann, dass in diesem Bereich noch mit weiteren Innovationen zu rechnen ist. Die Rückgewinnungspotenziale liegen für den Stoffstrom Klärschlamm im Bereich von bis zu 45 – 70 %, für Klärschlammasche bis zu 90 % bezogen auf den Phosphorgehalt im Kläranlagenzulauf. Diese Werte berücksichtigen jedoch nicht den Grad der Pflanzenverfügbarkeit des enthaltenen Phosphors. Unter bestimmten Randbedingungen ist bereits heute ein wirtschaftlicher Betrieb einiger Verfahren möglich.

Beim Vergleich des jeweiligen Aufwands an Kosten und Energie von Phosphatdünger aus Rückgewinnungsprozessen mit Phosphatdünger aus primären Rohstoffen ist eine konsistente Systemgrenze entscheidend. Die Problematik besteht in der großen Unterschiedlichkeit eines sekundären und primären Systems, insbesondere aufgrund der Kopplung der Phosphorrückgewinnung mit den komplexen Prozessen der Abwasserreinigung und der Klärschlamm Entsorgung. Ist beispielsweise die Behandlung des Klärschlammes integraler Bestandteil des Rückgewinnungsverfahrens, ist dies als zusätzlicher Nutzen dem Verfahren anzurechnen. Dem Verfahren werden in dem Fall die Lasten und Kosten der ersparten Monoverbrennung gutgeschrieben. Analog wird bei Rückgewinnungsverfahren, die die zu deponierende Aschemenge aus der Klärschlamm Entsorgung reduzieren, gleichfalls ein „Bonus“ aus dieser reduzierten Last angerechnet.

Dieses Vorgehen erlaubt, die Systemgrenze sowohl konsistent als auch eng zu halten und das Ergebnis auf die wesentlichen Faktoren fokussieren zu können. In einer erweiterten Systembetrachtung wird anschließend die thermische Behandlung und Entsorgung des Klärschlammes mit in die Systemgrenze aufgenommen, um mögliche Interaktionen von Klärschlammbehandlung und Rückgewinnungsverfahren zu berücksichtigen.

Die Beschränkung auf Energie und daraus abgeleitete Klimagasbilanzen soll nicht davon ablenken, dass mit einer vollständigen Ökobilanz für die Phosphorrückgewinnung ganz deutliche Umweltvorteile zum Tragen kommen. Gesamtökologisch wiegen die höheren Cadmium- und Uraneinträge in den Boden durch Primärdünger sowie die Umweltauswirkungen durch den Abbau von Phosphatgestein im Tagebau stärker als die höheren Energielasten der Rückgewinnung. Hierzu sei auf die Ergebnisse des Projekts PHOBE (Pinnekamp et al. 2011) verwiesen.

Ein Vergleich zwischen den verschiedenen Rückgewinnungsverfahren hängt vom betrachteten Einzelfall ab und kann nicht auf dieser allgemeinen Basis gezogen werden. In der Modellierung wird von einem theoretisch durchschnittlichen Klärschlamm ausgegangen. Insbesondere die Kosten für die Rückgewinnung hängen sehr stark vom betrachteten Einzelfall ab und lassen sich kaum pauschalisiert bewerten. Es können verfahrensbedingte Synergieeffekte eintreten, wodurch Betriebsmittel an anderer Stelle eingespart werden. Hinzu kommt, dass die

größtechnische Umsetzung in den meisten Fällen noch aussteht. Die Angaben der Hersteller, die der Energie- und Treibhausgasbilanz sowie Kostenrechnung zugrunde liegen, beziehen sich somit teilweise auf Anlagen im Labormaßstab oder stellen theoretisch errechnete Daten dar. Da insbesondere die Investitionskosten einen starken Skaleneffekt aufweisen, wird in dieser Studie auf verfahrensspezifische Kostenangaben verzichtet. Die ausgewiesenen Spannweiten sollen eine Orientierung geben, mit welchen Kosten auch volkswirtschaftlich bei einer flächendeckenden Einführung von Phosphorrückgewinnungsverfahren gerechnet werden kann.

Mit Blick auf die Energie- und Treibhausgasbilanz bezüglich der engen Systemgrenze ist die Rückgewinnung von Phosphor aus dem Abwasserbereich mit höheren Lasten verbunden als die Herstellung von primärem Phosphordünger. Diese höheren Lasten werden jedoch insgesamt als niedrig bewertet:

Das Phosphorpotenzial im jährlich in Deutschland anfallenden Klärschlamm von ca. 82 Mio. Einwohnerwerten beläuft sich auf knapp 60.000 Mg Phosphor, womit der mineralische Phosphorbedarf von ca. 30 Mio. Einwohnern in Deutschland, entsprechend 30 Mio. Einwohnerdurchschnittswerten (EDW), gedeckt werden könnte. Wenn diese Phosphormenge über Rückgewinnungsverfahren produziert würde, anstatt aus Phosphorerzen über herkömmliche Herstellungsformen der Primärdüngerherstellung gewonnen würden, ergäbe sich je nach Verfahren eine zusätzliche Belastung von maximal 60.000 EDW bezüglich Treibhauseffekt und 80.000 EDW bezüglich Energieverbrauch.¹

In der erweiterten Systemraumbetrachtung bleiben die normierten Ergebnisse von Treibhauseffekt und Energieverbrauch um zwei Größenordnungen hinter der eingesparten Phosphormenge zurück. Die mit der Rückgewinnung einhergehenden Umweltlasten sind folglich im Hinblick auf die dadurch erzielbare Ressourcenschonung relativ gering. Die Rückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser oder Faulschlamm lassen sich auch mit einer Mitverbrennung des Klärschlammes in einem Kraft- oder Zementwerk kombinieren. Verbrannt wird dann ein an Phosphor angereicherter Schlamm, dessen Asche aufgrund der Mischung anschließend nicht mehr als Phosphorressource zur Verfügung steht. Gemessen an der Energie- und Treibhausgasbilanz weisen solche Systeme Vorteile gegenüber einer Monoverbrennung auf und auch gegenüber den Systemen, die aufgrund des Ansatzpunktes der Rückgewinnung (P-Rückgewinnung aus Klärschlamm-Asche) auf eine Monoverbrennung angewiesen sind. Nach einer Normierung auf Einwohnerdurchschnittswerte zeigt sich aber einerseits, dass die Unterschiede zwischen den Systemen gering ausfallen. Aus anderen Studien ist andererseits bekannt, dass die Unterschiede zwischen Mono- und Mitverbrennung bezüglich Quecksilberemissionen sehr viel relevanter sind und hier die Mitverbrennung deutlich ungünstiger abschneidet (Fehrenbach und Reinhardt 2010). Daher ist aus den Ergebnissen dieser Studie bezüglich Treibhauseffekt und Energieaufwand alleine kein Rückschluss auf eine ökologische Priorisierung von Mono- oder Mitverbrennung nach Rückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser oder Faulschlamm möglich.

Die ermittelte Kostenspannweite für die Rückgewinnungsverfahren liegt zwischen 0,40 €/kg P und 20 €/kg P, wobei die 0,40 €/kg P von der Modellierungsart abhängen und in der Praxis nicht erreicht werden dürften. Demgegenüber liegen die Herstellungskosten für Primärdünger je nach Verarbeitungsgrad mit 0,60 €/kg P bis maximal 2,20 €/kg P niedriger. Wenn die Phos-

¹ Ein EDW repräsentiert dabei die entsprechenden Lasten, die ein Einwohner Deutschlands jährlich über die gesamte Volkswirtschaft betrachtet verursacht. Dies stellt eine Normierung dar, um die relativen Unterschiede zwischen verschiedenen Indikatoren abschätzen zu können.

phormenge, die im jährlich in Deutschland anfallenden Klärschlamm vorliegt, über die Rückgewinnungsverfahren produziert würde, dann kämen je nach Verfahren auf einen Einwohner Kosten von jährlich minimal 0,30 € bis maximal 14 € zu. Die 0,30 € dürften wiederum in der Praxis nicht erreicht werden. Im Vergleich hierzu zahlt er für die gleiche Menge primären Phosphors in Form von Rohphosphat 0,40 € und in Form von Phosphor-Düngemitteln bis zu 1,60 €.

Die thermische Behandlung des Klärschlammes verursacht pro Einwohner jährlich Kosten zwischen 4,30 € und 6,40 € im Falle der Monoverbrennung und im Bereich 2,70 € – 4,00 € bei Mitverbrennung im Braunkohle-Kraftwerk. Wird die Phosphorrückgewinnung mitbetrachtet, würden daraus je nach Verfahren und Verbrennungsart Gesamtkosten von 4,30 € bis 11,40 € resultieren. Für diesen volkswirtschaftlichen Preis könnte je nach Verfahren gut 1/9 bis zu 1/3 des gesamtdeutschen mineralischen Phosphorbedarfs gedeckt werden, entsprechend jährlich 15,13 kg Phosphorerz je Einwohner, wobei ein Phosphaterzbedarf von 8,23 kg/kg Phosphor angenommen wird.

Insgesamt bewegen sich somit sowohl der Energieverbrauch und der zusätzliche Treibhauseffekt als auch die Kostensteigerung für den einzelnen Bürger durch eine Implementierung der Phosphorrückgewinnung im Abwasserbereich in einem vertretbaren Rahmen. Als Gegenwert sind die dadurch eingesparte Menge Ressource zu sehen sowie die oben erwähnten weiteren Umweltentlastungen.

Eine grundsätzliche Frage bleibt, wie die Rezyklate in der Düngemittelindustrie verarbeitet werden können und ob eine direkte Anwendung einiger Produkte möglich ist. Davon hängt ab, welche Gutschriften und Erlöse für die Rezyklate angerechnet werden. Aus ökologischer Sicht ist die Energiegutschrift für den Herstellungsaufwand einer entsprechenden Menge Primärdünger nicht entscheidend. Vielmehr zählt hier der Einspareffekt von Phosphor-Primärressourcen. Die Einsatzweise der Rezyklate sollte darauf ausgelegt sein, eine maximale Einsparung primärer Phosphor-Ressourcen durch die rückgewonnene Phosphormenge effektiv zu erreichen. Das Ausbringen eines Rezyklats mit nicht pflanzenverfügbarem Phosphor auf den Acker spart keine primäre Phosphor-Ressource ein.

Gemäß der Daten der DWA-Klärschlammhebung 2003 wird auf 6 % (bezogen auf Einwohnerwerte) der kommunalen Kläranlagen eine ausschließlich vermehrte biologische P-Elimination eingesetzt. Unter optimalen Bedingungen ergibt sich auf diesen Anlagen ein Potenzial von 1.300 Mg P/a zur Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser (einschließlich Wirkungsgrad der Prozesse), welches möglichst bald und umfassend genutzt und in die Phosphorstrategie eingeflochten werden sollte. Hierfür kommen z.B. leicht implementierbare MAP-Fällungsverfahren in Frage, bei denen ein Rezyklat mit sehr hohem pflanzenverfügbarem P-Anteil erzeugt werden kann.

Eine weitgehende Umstellung auf Bio-P-Elimination erscheint allerdings wenig realistisch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Betreiber häufig die betrieblichen Nachteile der Bio-P scheuen und/oder zusätzliche Beckenvolumina erforderlich sind, für die auf vielen Kläranlagen keine Flächen verfügbar sind.

Themenschwerpunkt: Düngemittel und Düngung

Einsparungen im P-Verbrauch sind vor allem durch Düngungsmaßnahmen zu erzielen. Aufgrund des aktuellen Versorgungsstatus der Böden kann Phosphor in Deutschland sowohl durch Reduzierung als auch durch eine regionale Umverteilung von Nährstoffen eingespart werden, da ein beachtlicher Anteil der Böden hoch bzw. sehr hoch mit Phosphor versorgt ist,

v.a. in Gegenden mit intensiver Viehhaltung.

Die größten Einsparungen erfolgen zurzeit durch den Abbau von über die letzten Jahrzehnte angehäuften Bodenvorräten. Diese Einsparungen können aber nur über eine begrenzte Zeit durchgeführt werden. In den nächsten 50 -100 Jahren werden die Vorräte erschöpft sein, so dass die folgenden Generationen wieder mehr Phosphor düngen müssen, um die P-Bilanzen (P-Düngung minus P-Entzug) auszugleichen. Dauerhaft lassen sich Einsparungen durch die Umverteilung von regionalen Überschüssen erzielen. Das Potenzial dieser Einsparungen liegt bei über 20.000 Mg P/ Jahr. Hierzu müssen aber Separationstechniken weiterentwickelt werden um diese Phosphatmengen kostengünstig zu transportieren.

Bodenverbessernde Maßnahmen führen zwar zu einer Erhöhung der P-Ausnutzung, das Potenzial hierzu ist aber in der deutschen Landwirtschaft weitgehend ausgeschöpft. Im Zuge der weiteren Intensivierung des Ackerbaus ist eher mit einer gleichbleibenden oder verschlechterten P-Ausnutzung zu rechnen als mit einer verbesserten.

Pflanzenbauliche Maßnahmen haben zwar das Potenzial auf nationaler Ebene eine gewisse Menge an Phosphat einzusparen, bringen aber für die globale P-Bilanz kaum etwas und sind mit immensen volkswirtschaftlichen Kosten verbunden, sodass sie letzten Endes ungeeignet sind.

Als Rezyklate werden die mit den Phosphorrückgewinnungsverfahren gezielt erzeugten phosphorhaltigen Erzeugnisse bezeichnet. Klärschlamm und Klärschlammasche sind keine Rezyklate in diesem Sinne.

Ziel für die Verwertung von P-Rezyklaten sollte ihre Eignung als eigenständiges Düngemittel sein. Dazu müssen Qualitätsanforderungen des Düngemittelrechts sowie eine ausreichende Wirksamkeit (Pflanzenverfügbarkeit) vorliegen. Daneben sind Verkaufspreis und technische Eigenschaften wichtig. Besteht die Möglichkeit nicht, könnten Rezyklate anderen Düngemitteln beigemischt werden, sofern nicht schlechte Qualitäten in guten „versteckt“ werden bzw. das Ziel haben Schadstoffe zu verdünnen. Als dritte Möglichkeit könnten Rezyklate zusammen mit Rohphosphaten zu Super- oder Tripelphosphat aufgeschlossen werden. Auch eine Schadstoffentfrachtung belasteter P-Rezyklate im Zuge der Aufbereitung von P-Düngern wäre denkbar.

Zur Beurteilung der Düngewirkung dienen Untersuchungen des Düngers (P-Löslichkeit), Bodenuntersuchungen und Pflanzenversuche im Gefäß oder Feld. Die nach der Düngemittelverordnung vorgeschriebenen Löslichkeitsuntersuchungen dienen als erster Anhaltspunkt zur Wirksamkeit des Düngers, können jedoch die komplexe Situation im Boden nicht vollständig abbilden.

Die P-Löslichkeit eines Düngemittels wird zunächst durch die Phosphor-Bindungsform sowie durch die Eigenschaften des gebundenen Kations bestimmt. Primäre Phosphate ($\text{H}_2\text{PO}_4^- \cdot \text{Me}^+$) sind gut, sekundäre bedingt und tertiäre Phosphate nicht wasserlöslich. Weitere Einflussfaktoren sind Korngröße des Materials, Charge und weitere Nebenbestandteile. Die Rezyklate enthalten i.d.R. keine wasserlösliche P-Fraktion, jedoch verschieden hohe Anteile an ammoncitratlöslichem Phosphat.

Die Düngewirkung resp. Pflanzenverfügbarkeit des im Dünger enthaltenen Phosphats wird im Vergleich zu einem verfügbaren Mineraldünger bewertet. Bei den untersuchten Rezyklaten zeigten sich folgende Wirksamkeiten:

Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP oder Struvit) verhält sich in seiner Wirkung ähnlich wie Super- bzw. Tripelsuperphosphat und stellt damit einen wirksamen P-Dünger dar. Etwas weniger wirksam zeigen sich Mg-Phosphate, Ca-Silico-Phosphate, Ca-Phosphate, die in ihrer Wirkung etwa im Bereich von Thomasphosphat liegen. Aufgrund mangelnder Wirksamkeit können Rezyklate mit Al-P- und Fe-P-Verbindungen ebenso wie nicht aufbereitete Aschen

nicht empfohlen werden. Zu beachten ist, dass die Düngewirkung mancher Rezyklate vom pH-Wert des Bodens beeinflusst wird.

Der Kenntnisstand zu Schadstoffgehalten in Rezyklaten ist sehr beschränkt. Insbesondere zu Gehalten an organischen Schadstoffen existieren kaum (publizierte) Analysen.

Eine umfangreiche Untersuchung zu Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung von Krüger & Adam (2014) zeigte, dass Aschen aus der Monoverbrennung die Schwermetall-Grenzwerte der DüMV nicht immer einhalten konnten. Bei rd. 2/3 der Aschen war der Grenzwert für ein Metall oder mehrere Metalle überschritten. Diese Überschreitung war insbesondere für Klärschlämme/Aschen zu beobachten, die aus Kläranlagen mit höherem industriellem Abwasseranteil stammen.

Zur Aufbereitung der Rezyklate aus Klärschlämmen bzw. Klärschlammaschen werden verschiedene thermochemische oder nasschemische Verfahren angewendet um die Schadstoffe zu eliminieren. Die wenigen Untersuchungen zeigen, dass diese Verfahren i.d.R. zu einer Reduzierung der Schadstoffgehalte führen, jedoch nicht immer ausreichen um Qualitäten zu erreichen, die den Qualitätsanforderungen der DüMV entsprechen. Überschreitungen konnten für Ni und As gezeigt werden; es traten auch erhöhte Werte bei Zn, Cu, Cd auf.

Bei der Entwicklung von Strategien zur Verwertung ist die Abwasserbehandlung mit einzubeziehen. Die Verfahren der vermehrten biologischen Phosphorelimination oder eine chemische Fällung von Mg- bzw. Ca-Phosphaten wären gegenüber der Fällung mit Eisen zu bevorzugen, um aus Abwasser P-Rezyklate zu generieren, da hohe Eisengehalte die Wirksamkeit der P-Düngung beschränken.

Zur Beurteilung einer „Recyclingeffizienz“ reicht es nicht aus, die Gesamt-Mengen an zurückgewonnenem Phosphor zu bilanzieren. Auch der P-Gesamtgehalt in einem potenziellen Düngerprodukt ist nicht ausreichend. Berücksichtigt werden muss die mögliche P-Aufnahme in die Pflanze, d.h. die P-Verfügbarkeit des Rezyklats oder des daraus gewonnenen Düngers, die letztendlich das entscheidende Kriterium für ein effizientes Recycling darstellen.

Themenschwerpunkt: Verbrennung, Langzeitlagerung und Landfill Mining

Die Phosphormengen in den Klärschlämmen, die einer Mitverbrennung (Kohlekraftwerke, Zementwerke, Müllverbrennungsanlagen) zugeführt werden, gehen derzeit noch unwiederbringbar verloren. Die Rückstände der Verbrennungsanlagen werden bspw. im Straßenbau oder auf Deponien abgelagert und stehen aufgrund ihrer starken Verdünnung für die Phosphorrückgewinnung nicht zur Verfügung. Diese Phosphormengen werden auf ca. 16.900 Mg P/a geschätzt. Um den Phosphor dennoch nutzen zu können, muss eine Phosphorrückgewinnung vor der Mitverbrennung des Klärschlammes stattfinden. Hierzu stehen Möglichkeiten zur Rückgewinnung aus dem Schlammwasser oder Faulschlamm zur Verfügung. Nach dem aktuellen Entwurf der Klärschlammverordnung (Stand April 2014) darf Klärschlamm nur noch mitverbrannt werden, wenn er einen P-Gehalt von max. 20 g P/kg TR aufweist. Bei einem üblichen P-Gehalt von ca. 35 g P/kg TR im Klärschlamm würde dies einer notwendigen Abreicherung von 45 % entsprechen. Die Rückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser können diese Abminderung des P-Gehalts im Klärschlamm nicht erreichen. Bei dem Budenheim- und Stuttgarter Verfahren kann die Abreicherung nach den derzeit vorliegenden Ergebnissen der Prozessoptimierung gerade erreicht werden.

Anhand der Verteilung der Schadstoffgehalte in landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämmen wurde ermittelt, welche Mengen an Klärschlamm in Zukunft (ab 2015) durch die Verschärfung der Grenzwerte der Düngemittelverordnung (DüMV) nicht weiter stofflich verwer-

tet werden können. Neben Cadmium könnte auch die Grenzwertverschärfung für Quecksilber und PCB dazu führen, dass ca. ein Drittel der 2003 noch stofflich verwerteten Klärschlämme nicht mehr in der Landwirtschaft oder zum Landschaftsbau eingesetzt werden können. Die weiteren untersuchten Parameter dürften zu keinem signifikanten Rückgang der stofflichen Verwertung führen. Die Auswertungen aus Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen mit deutlich aktuelleren Daten zur Klärschlammqualität kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Es wird vermutet, dass aufgrund einer Intensivierung der Indirekt-einleiterüberwachung die Schwermetallgehalte in den Klärschlämmen sinken könnten. Andererseits ist es möglich, dass durch die Novellierung der Düngeverordnung die Ausbringung des Klärschlammes im Herbst deutlich eingeschränkt wird und die Klärschlammmenge nicht durch eine gesteigerte Ausbringung im Frühjahr kompensiert werden kann. Diese Aspekte können zu einer Reduzierung der zu verwertenden Klärschlamm-mengen um ca. 40 % führen. Abhängig vom Szenario (30 % bzw. 50 % der bislang landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme halten die Grenzwerte der DüMV nicht mehr ein), würden die Mengen der thermischen Klärschlammverwertung um ca. 234.000 bzw. 390.000 Mg TR/a steigen.

Unter der Annahme, dass mit Einführung des Verbots der bodenbezogenen Klärschlammverwertung eine P-Rückgewinnung noch nicht erfolgreich durchgeführt werden kann, müssten 90 % der Klärschlämme in Monoverbrennungsanlagen verbrannt werden und die Mitverbrennung verliert für Kläranlagen der Größenklasse 4 und 5 ihre Rechtskonformität. Die Kläranlagen der Größenklasse 1 - 3 können ihren Klärschlamm weiterhin einer stofflichen Verwertung oder der Mitverbrennung zuführen (ca. 10 %). Dies hätte zur Folge, dass bei heutigen zur Verfügung stehenden Monoverbrennungskapazitäten von ca. 611.300 Mg TR/a zusätzlich ca. 1,05 Mio. Mg TR/a geschaffen werden müssten.

Ausgehend davon, dass in Zukunft P-Rückgewinnungsverfahren auf den Kläranlagen implementiert werden und der Klärschlamm unter den geforderten P-Grenzwert abgereichert werden kann, könnten diese Klärschlämme einer Mitverbrennung angedient werden und die vorhandenen Mitverbrennungskapazitäten weiterhin genutzt werden. Dies würde jedoch bedeuten, dass alle Kläranlagen der Größenklasse 5 und ein Anteil der GK 4 mit einem P-Rückgewinnungsverfahren ausgestattet werden müssten.

Da belastbare Kostenabschätzungen zu den P-Rückgewinnungsverfahren noch nicht vorliegen und sich die Entsorgungspreise der Klärschlämme in Zukunft voraussichtlich stark verändern werden, können noch keine konkreten Aussagen getroffen werden, welches P-Rückgewinnungsverfahren mit welcher Klärschlamm-entsorgungsvariante das kostengünstigste Verfahren darstellt.

Da eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm-aschen derzeit noch nicht wirtschaftlich ist, aber der enthaltene Phosphor eine wertvolle Ressource darstellt, sollten Klärschlamm-aschen aus der Monoverbrennung separat gelagert werden, um eine spätere Phosphorrückgewinnung zu ermöglichen.

Mit der im Mai 2013 in Kraft getretenen Novelle der DepV wird eine Lagerung von Klärschlammmonoverbrennungsaschen in Langzeitlagern ermöglicht. Nach DepV kann bei diesen Aschen bei separater Lagerung ein Antrag auf eine Ausnahme von der Nachweispflicht, dass die nachfolgende ordnungsgemäße und schadlose Verwertung gesichert ist, zugelassen werden. Diese Ausnahme ist zunächst auf maximal fünf Jahre zu befristen und kann befristet bis zum 30. Juni 2023 verlängert werden. Mit der sich derzeit im Entwurf befindlichen Novellierung der AbfKlärV ist zu erwarten, dass die separate Langzeitlagerung für nicht P-abgereicherte Klärschlamm-aschen aus der Monoverbrennung nach den gewährten Übergangsfristen verpflichtend wird.

Mögliche Standorte für Langzeitlager könnten vorhandene Deponiestandorte oder Standorte von Monoverbrennungsanlagen sein. Als Mindestkapazität wird eine Lagergröße von 200.000 m³ Ausbauvolumen empfohlen.

Generell gelten nach § 23 DepV für Langzeitlager (Klassen LK 0 – III) identische Anforderungen wie an entsprechende Deponien. Es kann davon ausgegangen werden, dass für die meisten Klärschlammaschen die Anforderungen der LK II einzuhalten sind. Lediglich bei einzelnen Klärschlammmonoverbrennungsaschen ist eine Lagerung in einem Langzeitlager der Klasse II ausgeschlossen, wohingegen einige Klärschlammaschen auch in einem Langzeitlager der LK I gelagert werden könnten.

Für ein Langzeitlager der LK II ist oberhalb der geologischen Barriere eine Basisabdichtung als Kombinationsdichtung mit zwei Dichtungskomponenten herzustellen, während für eine LK I eine Basisabdichtung mit einer Dichtungskomponente ausreichend ist.

Die beispielhaft abgeschätzten Kosten der Errichtung und des Betriebes von Langzeitlagern für Klärschlammaschen betragen bei vorhandener geologischer Barriere je nach Größe und Verfüllungszeitraum zwischen 19 €/Mg Asche und 42 €/Mg Asche; entsprechend 0,21 €/kg P bis 0,47 €/kg P bei einem Phosphorgehalt von 9 %. Die Kosten für den Rückbau der Aschen können derzeit nicht sicher abgeschätzt werden.

In der Praxis ist aufgrund der zeitlichen Befristung der Langzeitlagerung gemäß DepV fraglich, ob potenzielle Betreiber von Langzeitlagern eine Investitionsentscheidung für die Langzeitlagerung von Klärschlammmonoverbrennungsaschen treffen werden, da das Risiko besteht, die gelagerten Aschen vor dem 30.06.2023 auskoffern und auf einer Deponie ablagern zu müssen.

Anhand von Phosphorkonzentrationen in Klärschlämmen, den angefallenen Klärschlamm-mengen sowie den Klärschlammmentsorgungswegen wurden die in den letzten 33 Jahren auf Deponien bzw. in Lagern abgelagerten Phosphormengen aus Klärschlamm und Klärschlamm- asche ermittelt. Die gesamte abgelagerte Phosphormenge beträgt von 1979 bis 2012 ca. 335.800 Mg P, wovon ca. 293.800 Mg P im Klärschlamm und 42.000 Mg P in den Klär- schlammmonoverbrennungsaschen vorhanden sind. Anfang der 80er Jahre waren die abgelagerten Klärschlamm-mengen hoch (ca. 55 % Deponierung), die P-Konzentrationen (10,4 g P/kg TR) im Klärschlamm jedoch gering. Zum Ende des Betrachtungszeitraums war das Verhältnis umgekehrt. Die P-Konzentrationen im Klärschlamm haben sich mehr als verdoppelt (24 g P/kg TR) und die abgelagerte Klärschlamm-menge ist im Zuge der Umsetzung der TA Siedlungsabfall bis zum Jahr 2005 ganz zurückgegangen. Bei einem Inlandsabsatz von phosphorhaltigen Düngemitteln von rd. 124.000 Mg P/a im Wirtschaftsjahr 2012/2013 könnte die in den Deponien vorhandene Phosphormenge den Düngemittelbedarf für ca. 2,7 Jahre decken. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der im Betrachtungszeitraum abgelagerten Klärschlämme bzw. Klärschlamm- aschen gemeinsam mit Hausmüll bzw. Sied- lungsabfällen abgelagert wurden. Der Klärschlamm-anteil betrug in Abhängigkeit der Einbau- variante zwischen 5 bis 13 % bzw. 1 bis 3 % vom Hausmüll- bzw. Siedlungsabfallvolumen, so dass der Klärschlamm stark verdünnt in den Deponien bzw. Lagern vorliegt. Ebenso ist nicht davon auszugehen, dass bspw. bei der Mietendeponierung nur gezielt die Klärschlamm- miete rückgebaut werden kann. Verfahren und Techniken zur Phosphorrückgewinnung aus den De- ponierückständen stehen derzeit nicht zur Verfügung und Erfahrungen liegen noch nicht vor. Ebenso ist fraglich, ob eine Trennung zwischen Hausmüll bzw. Siedlungsabfall und Klär- schlamm möglich ist.

Die Phosphormengen in den Lagern und Deponien stehen zwar theoretisch zur Verfügung, sie werden aber nach jetzigem Kenntnisstand nicht zur Ressourcenschonung beitragen können.

Themenschwerpunkt: Strategien und Maßnahmen

Neben Deutschland beschäftigen sich auch andere Länder bereits mit dem Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlamm Entsorgung und einem verstärkten Phosphorrecycling. Bspw. ist in den Niederlanden aufgrund sehr niedriger Schadstoffgrenzwerte eine landwirtschaftliche Klärschlammverwertung nicht mehr möglich und sämtliche Klärschlämme werden verbrannt. In Österreich haben bereits die Bundesländer Wien und Tirol ein Verbot zur landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung erlassen, ebenso die Schweiz. Der Kanton Zürich erbaut derzeit eine Klärschlammmonoverbrennungsanlage mit einem anliegenden Klärschlammaschenlager. Die Klärschlammasche wird bis zur späteren Verwertung, bspw. in Form einer P-Rückgewinnung, gelagert.

Es zeigt sich, dass auch ohne ein Gebot zur Phosphorrückgewinnung in einzelnen Ländern Verfahren zur Phosphorrückgewinnung errichtet wurden. In Belgien wird insbesondere in der Industrie das NuReSys[®]-Verfahren verwendet und in Deutschland wird zunehmend das AirPrex[®]-Verfahren auf Kläranlagen errichtet. In den USA und Kanada findet bisher ausschließlich das Ostara PEARL[®]-Verfahren Anwendung.

In Japan wird ebenso wie in den Niederlanden und der Schweiz der anfallende Klärschlamm zu 100 % verbrannt. Eine Rückgewinnung wird sowohl aus Klärschlammaschen als auch aus Abwasser und sowohl auf kommunalen Kläranlagen als auch in der Industrie durchgeführt. Es existiert in Japan bisher kein etablierter Markt für gewonnene Rezyklate; sie werden entweder an die Düngemittelindustrie oder den Großhandel abgegeben, wo sie mit anderen Düngemitteln vermischt und als NPK Dünger verkauft werden. Die Verkaufserlöse können die Kosten der P-Rückgewinnung nicht decken. Unterstützung oder Anreize zur Finanzierung der Anlagen durch die Regierung existieren nicht.

Status von P-Rezyklaten als Abfall oder Produkt

In rechtlicher Hinsicht ist wesentlich, ob P-Rezyklate aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammaschen als Abfall oder Produkt einzustufen sind. Weil es sich bei den genannten Ausgangsmaterialien für die Erzeugung von P-Rezyklaten um Abfälle handelt, ist der rechtliche Maßstab für die Abgrenzung zwischen Abfall und Produkt die Regelung über das Ende der Abfalleigenschaft nach § 5 Abs. 1 KrWG. P-Rezyklate erfüllen die in dieser Vorschrift enthaltenen Voraussetzungen des Durchlaufens eines Verwertungsverfahrens, der Verwendung zu bestimmten Zwecken und des Vorhandenseins eines Marktes oder einer Nachfrage. Ob die Voraussetzungen des § 5 Abs. 1 Nr. 3 KrWG an die Erfüllung der technischen und rechtlichen Anforderungen für die jeweilige Zweckbestimmung – im Fall der P-Rezyklate also die Verwendung als Inputstoff in der Düngemittelproduktion – erfüllt sind, hängt demgegenüber von den Eigenschaften des jeweiligen Rezyklats ab und lässt sich nicht allgemein beantworten. Gleiches gilt für die Anforderung des § 5 Abs. 1 Nr. 4 KrWG, die das Vorhandensein abfallspezifischer Risiken ausschließen soll. Im Hinblick auf eventuelle Risiken von P-Rezyklaten, die nicht bereits vom Düngemittelrecht erfasst sind, besteht darüber hinaus ein weiterer Untersuchungsbedarf in tatsächlicher Hinsicht. Eine abschließende Einstufung von P-Rezyklaten als Abfall oder Produkt ist daher derzeit nicht möglich.

Maßnahmen zur Förderung des Phosphorrecyclings

Als mögliche gesetzgeberische Maßnahmen zur Förderung des Phosphor-Recyclings werden die Einführung einer Rechtspflicht von Düngemittelherstellern zur Abnahme von P-Rezyklaten, eine staatliche Subventionierung, die Schaffung einer Sonderabgabe oder eines Umlagemodells sowie die Verpflichtung von Klärschlammherzeugern zur Durchführung von Phosphor-Recycling auf ihre Vereinbarkeit mit höherrangigem Recht untersucht.

Abnahmepflicht für P-Rezyklate

Eine Abnahmepflicht der Düngemittelindustrie ist in verfassungsrechtlicher Hinsicht als Eingriff in die Berufsfreiheit in Form einer Berufsausübungsregelung zu bewerten. Als solche ist sie aufgrund der Zielsetzung des Umwelt- und Ressourcenschutzes zulässig, wenn die Anforderungen des Verhältnismäßigkeitsprinzips gewahrt werden. Damit bestehen keine grundsätzlichen verfassungsrechtlichen Bedenken gegen die Einführung einer Abnahmepflicht; die Ausgestaltung muss jedoch in einer Weise erfolgen, dass die mit einer Pflicht zur Abnahme und Verwendung von P-Rezyklaten einhergehenden Belastungen technischer, wirtschaftlicher und rechtlicher Art dem verfolgten Zweck angemessen sind.

Unionsrechtlich stellt sich die Einführung einer Abnahmepflicht aufgrund der Weite der sog. Dassonville-Formel als Maßnahme gleicher Wirkung wie eine mengenmäßige Einfuhrbeschränkung und damit als Beeinträchtigung der Warenverkehrsfreiheit dar. Auch dieser Eingriff kann jedoch durch die Erfordernisse des Ressourcenschutzes, der als umweltpolitische Zielsetzung ausdrücklich im Primärrecht verankert ist, bei Beachtung des Verhältnismäßigkeitsprinzips gerechtfertigt werden. Dabei wird eine Abnahmepflicht als Anforderung an den Produktionsprozess (im Gegensatz zu einer produktbezogenen Anforderung) auszugestalten sein, um die Verkehrsfähigkeit ausländischer Düngemittel in Deutschland nicht zu beeinträchtigen.

Staatliche Subventionierung der P-Rückgewinnung

Subventionen für Maßnahmen der P-Rückgewinnung durch den Staat einschließlich Abgabenerleichterungen unterliegen dem europäischen Beihilferecht. Aus diesem ergeben sich jedoch unter der Voraussetzung, dass das erforderliche Beihilfeverfahren ordnungsgemäß durchgeführt wird, keine prinzipiellen Bedenken gegen solche Fördermaßnahmen.

Eine Besonderheit, die sich daraus ergibt, dass die P-Rückgewinnung dem Abfallrecht unterliegt, besteht jedoch darin, dass als zusätzlicher unionsrechtlicher Maßstab für Subventionen Art. 14 AbfRRL heranzuziehen ist, wonach die Kosten für Maßnahmen der Abfallbewirtschaftung – also Kosten des Recyclings von Abfällen – vom Abfallerzeuger oder -besitzer zu tragen sind. Die Übernahme von Kosten des P-Recyclings durch den Staat läuft dem dadurch festgelegten Verursacherprinzip zuwider. Aufgrund der unionsrechtlichen Pflicht der Mitgliedstaaten zur Förderung einer hochwertigen Verwertung ist die Zulässigkeit von vorübergehenden Subventionen mit dem Ziel der Einführung neuer Rückgewinnungsverfahren gleichwohl zu bejahen.

Sonderabgabe

Zur Refinanzierung von Maßnahmen zur Förderung der P-Rückgewinnung kommt die Einführung einer Sonderabgabe in Betracht. Eine Sonderabgabe ist eine nicht-steuerliche Abgabe, die zulässig ist, wenn sie einen Sachzweck verfolgt und gestaltend auf den geregelten Sachbereich Einfluss nimmt, eine homogene Gruppe in Anspruch genommen wird, die eine besondere Finanzierungsverantwortung trifft, und die gruppennützige Verwendung des Abgabenaufkommens sichergestellt ist. Kläranlagenbetreiber können als homogene Gruppe in diesem Sinne angesehen werden. Zweifelhaft ist jedoch, ob ihnen eine besondere Finanzierungsverantwortung für die P-Rückgewinnung zukommt. Gegen die Einführung einer „Phosphor-Abgabe“ als Sonderabgabe bestehen daher rechtliche Bedenken.

Umlagemodell

Die Einführung eines Umlagemodells, bei dem im Gegensatz zu einer Sonderabgabe keine Geldmittel dem öffentlichen Haushalt zufließen würden, ist unionsrechtlich nicht an den Anforderungen des Beihilferechts zu messen. Auch mit verfassungsrechtlichen Vorgaben ist ein

Umlagemodell bei entsprechender Ausgestaltung vereinbar. Bei der Ausgestaltung einer Umlage für Kläranlagenbetreiber ist allerdings zu beachten, dass Mittel zur Förderung der P-Rückgewinnung nur dann zur Verfügung stehen, wenn mehr Kläranlagenbetreiber zur Zahlung der Umlage verpflichtet sind als Förderung aus der Umlage erhalten. Die Einführung einer Verpflichtung zur P-Rückgewinnung kann daher zum Leerlaufen einer Umlagefinanzierung führen. Dies führt zu der Empfehlung, die Umlagefinanzierung für die Übergangsfrist bis zum Inkrafttreten einer Verpflichtung zur P-Rückgewinnung vorzusehen.

Pflicht zur Durchführung von Phosphor-Rückgewinnung

Die Verpflichtung von Kläranlagenbetreibern zur Durchführung einer P-Rückgewinnung ist mit dem Unionsrecht vereinbar. Zweifelhaft ist bereits, ob ein Eingriff in die Warenverkehrsfreiheit überhaupt vorliegt, weil es sich allenfalls um eine Maßnahme gleicher Wirkung wie ein Ausfuhrverbot handeln kann, eine spezifische Beschränkung der Ausfuhrströme jedoch nicht vorliegen dürfte. Jedenfalls wäre eine solche Pflicht bei Einhaltung des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes jedoch aufgrund der umweltschützenden Zielsetzung als Eingriff gerechtfertigt.