

Nachhaltige Phosphorversorgung

Themenkurzprofil Nr. 39 | Sonja Kind | April 2020

Phosphor ist ein natürlicher Rohstoff, der als Nährstoff essenziell für alles Leben auf der Erde ist. Phosphor wird zu 95 % in der Düngemittelproduktion für die Landwirtschaft verwendet und ist damit entscheidend für die Welternährung. Die auf der Erde natürlich vorkommenden Phosphorreserven sind jedoch begrenzt. Phosphor lässt sich weder synthetisch herstellen noch ersetzen. Wie lange die Reserven reichen, wird unterschiedlich bewertet: Schätzungen gehen von 150 bis 300 Jahren aus. Vor dem Hintergrund einer wachsenden Erdbevölkerung und dem damit verbundenen Mehrbedarf an Phosphor wird in Zukunft die nachhaltige Phosphornutzung eine immer größere Rolle spielen.

Doch nicht nur die langfristige Verfügbarkeit, sondern auch die kurzfristige Versorgung ist mit Herausforderungen verbunden. So befinden sich die natürlichen Vorkommen und Reserven nur in einigen wenigen Regionen der Welt. Die größten Lagerstätten liegen in Marokko, gefolgt von China und den USA. Rund 95 % der Lagerstätten sind unter der Kontrolle von nur zehn Staaten, und fast 80 % der weltweiten Phosphatmineralproduktion werden allein von China, Marokko und Westsahara, den USA und Russland geleistet. Deutschland und die anderen Staaten der Europäischen Union (EU) sind nahezu vollständig von Phosphorimporten abhängig. Die Phosphorverfügbarkeit hängt neben den vorhandenen Reserven von zahlreichen weiteren Faktoren ab, die kurzfristig Engpässe in der Lieferkette verursachen könnten, wie die hohe Abhängigkeit von wenigen Produzentländern und deren geopolitische (In-)Stabilität, schwankende Marktpreise, unterschiedliche Qualität des phosphathaltigen Gesteins und Wirtschaftlichkeit der Phosphorherstellung. Phosphor steht daher seit 2017 auf der Liste der kritischen Ressourcen.

Methoden zur Rückgewinnung und Wiederverwendung von Phosphor entlang des Stoffkreislaufs, insbesondere aus Klärschlämmen, werden deshalb immer bedeutender. Deutschland ist neben der Schweiz eines der ersten Länder, das die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen gesetzlich verankert hat. Mit der Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) wird ab 2029 die Phosphorrückgewinnung in Deutschland bei Kläranlagen mit Kapazitätsauslegung für über 50.000 Einwohnerinnen und Einwohner zur Pflicht.

Eine effiziente und nachhaltige Steuerung der Phosphorkreisläufe (Phosphorgovernance) berührt eine Vielzahl europäischer und nationaler Gesetze und Verordnungen im Bereich des Umweltschutzes und der Landwirtschaft. Wenngleich es vielversprechende Ansätze gibt, z.B. in Deutschland mit der Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, findet sich bis heute noch kein ausgewiesener Schwerpunkt auf einen nachhaltigen Phosphoreinsatz in der europäischen Gesetzgebung.

Hintergrund und Entwicklung.

Phosphor ist essenziell für das Leben auf der Erde

Phosphor ist eine endliche, nichterneuerbare Ressource. Er kann weder aus anderen Stoffen hergestellt noch durch einen anderen Stoff ersetzt werden. Phosphor ist als Nährstoff für Lebewesen essenziell. Pflanzen nehmen Phosphor über den Boden auf, Menschen und Tiere über die Nahrung. Im Organismus ist er elementar für den Aufbau von Zellwänden oder die Festigkeit von Knochen und Zähnen; auch ist er Bestandteil der Erbsubstanz (DNA) und wichtig für den Energiestoffwechsel (Daneshgar et al. 2018; DPP 2019; Filippelli 2008).

Phosphor, bzw. in seiner gebundenen Form Phosphat, hat eine immense Bedeutung für das Pflanzenwachstum. Phosphat ist neben Stickstoff und Kalium der wichtigste Nährstoff, um die Bodenfruchtbarkeit und somit landwirtschaftliche Erträge in ausreichendem Maße zu erhalten oder zu steigern. Pflanzen nehmen Phosphat über die Wurzeln auf, und bei Phosphatmangel im Boden ist das Wachstum stark eingeschränkt – z.B. bleiben die Blätter klein oder die Wurzeln wachsen nicht ausreichend in die Tiefe. Eine Unterversorgung mit Phosphor kann so zu schlechten Erträgen führen; in von bodenbezogenem Phosphatmangel besonders stark betroffenen Weltregionen können sogar Mangel- bzw. Unterernährung die Folge sein. Ein Phosphatmangel in Böden kann nur durch die Gabe von Phosphatdüngemitteln ausgeglichen werden (BGR 2013).

Effizienter Einsatz von Phosphaten notwendig

Während die zu geringe Phosphatversorgung das Pflanzenwachstum beschränkt, gefährdet der übermäßige Gebrauch die Umwelt und führt zu eutrophierten, also mit Nährstoffen übermäßig angereicherten Gewässern sowie zu möglichen negativen Auswirkungen für Böden und Biodiversität (Scholz et al. 2013). Pflanzen können im ersten Anbaujahr allerdings nur ca. 15 % der durch Düngemittel eingebrachten Phosphate aufnehmen. Der weitaus größte Teil wird im Boden gespeichert und kann erst in nachfolgenden Jahren aufgenommen werden. Daher ist der effiziente Einsatz von Düngemitteln wichtig, um Phosphatverluste zu vermeiden (BGR 2013).

Das Hauptanwendungsgebiet von Phosphat liegt in der Landwirtschaft. Etwa 95 % der globalen Phosphatproduktion werden für die Herstellung von Nahrungsmitteln und Tierfutter verwendet (Daneshgar et al. 2018). Jährlich werden weltweit über 45 Mio. t Phosphat in Form minera-

lischer Düngemittel in der Landwirtschaft eingesetzt – mit steigender Tendenz. Seit 2015 ist der Verbrauch um durchschnittlich 2,2 % pro Jahr gewachsen (FAO 2017). Bis 2023 soll dieser auf 50 Mio. t jährlich steigen, mit Afrika, Indien und Südamerika als Hauptabnehmer von Phosphatdüngemitteln (USGS National Minerals Information Center 2020). Die mengenmäßig größten Verbraucher sind China, Indien, die USA und Brasilien, auf die zusammen rund 70 % des Phosphatdüngemittelverbrauchs entfallen. Weitere wichtige Abnehmerländer sind Australien, Pakistan, Kanada, Vietnam und Argentinien. Weltweit verteilt sich die Gewinnung und der Verbrauch von Phosphatdüngemitteln sehr ungleich (BGR 2013).

Der deutlich geringere Anteil (5 %) der Phosphatprodukte dient industriellen Zwecken, z.B. als Zusatzstoff in Wasch- und Reinigungsmitteln, als Ergänzungsstoff in Nahrungsmitteln, etwa in Softdrinks, oder zur Wasser- und Metallbehandlung zum Schutz vor Kalk und Korrosion (Boer 2019; Daneshgar et al. 2018).

Phosphatvorkommen und -eigenschaften

Phosphor kommt in der Natur nicht als freies Element vor, sondern findet sich meist in gebundener Form als Phosphat (PO_4^{3-}) in der Erdkruste, zumeist handelt es sich dabei um sogenannte Apatite (BGR 2013). Der Phosphatgehalt dieser Minerale liegt typischerweise zwischen 15 und 20 % (Daneshgar et al. 2018). Die Qualität des Mineralgesteins fällt je nach dessen Zusammensetzung unterschiedlich aus. Neben Phosphat enthalten die Minerale in der Regel Verunreinigungen durch Metalle oder radioaktive Substanzen. Häufig in Apatiten vorkommende Elemente wie Cadmium oder Uran sind aufgrund der Strahlungsrisiken gesundheitsgefährdend und schränken die Brauchbarkeit als Düngemittel ein (BGR 2013; Boer 2019).





Lagerstätten von Phosphaten werden nach der Art ihrer Entstehung unterschieden. Phosphatminerale können durch marine Sedimente, Vulkantätigkeit oder Guanoablagerungen entstanden sein (Boer 2019). Weltweit dominieren die durch chemisch-biologische Vorgänge im Meer gebildeten Lagerstätten, die rund 90 % der Vorkommen ausmachen. Etwa drei Viertel der weltweit abgebauten Menge stammen aus den marinsedimentären Lagerstätten. Den kleineren Teil, ca. 10 %, bilden aus Magma erstarrte Ablagerungen und nur rund 0,3 % haben sich aus Knochen von Vögeln und Exkrementen gebildet. Diese guanobasierten Vorkommen sind jedoch größtenteils bereits erschöpft (BGR 2013).

Kurzfristige und langfristige Verfügbarkeit von Phosphat

Die Angaben zur globalen Verfügbarkeit reichen je nach Quelle von 70 (International Fertilizer Association) bis 300 Mrd. t (United States Geological Survey) (BGR 2013; Daneshgar et al. 2018). Ein großer Teil dieser Reserven ist aktuell jedoch nicht wirtschaftlich oder ökologisch nachhaltig zu erschließen. So liegen etwa substantielle Mengen in Marokkos Schelfgebiet (Festlandsockel) und müssten unter Wasser abgebaut werden (Daneshgar et al. 2018; USGS National Minerals Information Center 2020). Die Frage, wie lange die Phosphorreserven reichen, wird in der Wissenschaft kontrovers diskutiert und ist nur schwer zu beantworten. Auf der einen Seite nimmt der Bedarf an Phosphat bzw. Phosphatdünger stetig zu, auf der anderen Seite werden immer wieder neue Phosphatvorkommen erschlossen, und die wirtschaftliche Abbauwürdigkeit bisher wenig lukrativer Reserven steigt mit wachsendem Bedarf (UBA 2018). Zudem gibt es keine international einheitliche Klassifikation, welche Art von Ressourcen mit unterschiedlicher Aussicht auf Abbaubarkeit in die Berechnung mit einbezogen werden sollen (Boer 2019).

Grundsätzlich gibt es zwei Berechnungsansätze. Beim ersten wird davon ausgegangen, dass die Dauer der Verfügbarkeit durch den Quotienten von Reserve zu Verbrauch bestimmt wird. Nach diesen Berechnungen wird die Verfügbarkeit von Phosphat auf ca. 300 Jahre geschätzt. Eine zweite Berechnung basiert auf der Annahme, dass die Phosphatproduktion, einer Verteilung nach Gauß folgend, einen Höhepunkt erreicht, wenn die Hälfte der Reserven verbraucht ist (Peak Phosphor). Cordell und White (2014) haben nach dieser Berechnung den Peak zunächst für 2035, mit später korrigierten Zahlen für 2070 angegeben. Dieser Peak-Phosphoransatz hat in Wissenschaftskreisen jedoch einige Kritik erfahren, da zukünftig neue Reserven erschlossen werden könnten, die heute technisch und/oder wirtschaftlich noch nicht zugänglich sind (Daneshgar et al. 2018). Wird der aktuelle Pro-Kopf-Verbrauch an Phosphat in Bezug zum angenommenen Weltbevölkerungswachstum der UN gesetzt und in die Zukunft projiziert, reichen die Reserven bis etwa 2315. Sollte die Wachstumsrate der Bevölkerung jedoch bei dem aktuell hohen Niveau verbleiben, würden die Reserven nur bis 2170 reichen. Die Zeitspanne der Reserven liegt also zwischen ca. 150 und 300 Jahren.

Der globale Bedarf wächst – Europa ist von Phosphatimporten abhängig

Weltweit wurden 2019 ca. 240 Mio. t Phosphatminerale in rund 40 Ländern abgebaut. Dabei werden 77 % des internationalen Phosphatmineralangebots von China (46 %), Marokko und Westsahara (15 %), den USA (10 %) und Russland (6 %) hergestellt (USGS National Minerals Information Center 2020). Weiterhin sind Saudi-Arabien, Jordanien, Brasilien und Ägypten wichtige Produzenten. Nordafrika ist die Region mit den reichsten Reserven an Phosphatmineralen, und die dortigen Länder exportieren zugleich

auch den Großteil ihrer Phosphatproduktion. Alle anderen Länder bzw. Regionen sind auf zusätzliche Importe angewiesen. Selbst die USA und China müssen trotz der eigenen Phosphatvorkommen und im Vergleich hohen Produktionsraten Rohphosphat bzw. Düngemittel importieren. Europa ist die Region mit der höchsten Importrate, rund 86 % des Bedarfs werden über Importe gedeckt (USGS National Minerals Information Center 2020). Die restlichen 14 % werden in Finnland produziert.

Der Abbau von Phosphatmineralen ist seit 1945 stark angestiegen und erreichte in den späten 1980er Jahren einen ersten Spitzenwert. Ein Grund dafür war ein verstärkter Einsatz von Düngemitteln in der Sowjetunion. Mit deren Auflösung sank die Abbaurate wieder. Auch nahm mit zunehmendem Umweltbewusstsein in den westlichen Ländern der Düngereinsatz zum Teil wieder leicht ab. Seit 2010 ist jedoch erneut ein starker Anstieg beim Abbau und Verbrauch von Phosphatmineralen zu verzeichnen. Der weltweit zunehmende Konsum tierischer Produkte, der damit verbundene erhöhte Futtermittelbedarf sowie die stetig steigende Weltbevölkerung sind Gründe hierfür: gemeinsam führen sie zu einem immer höheren Bedarf an und Verbrauch von Düngemitteln für die Lebensmittelproduktion. Insbesondere Schwellenländer haben ihren Düngemiteleinsatz in den vergangenen Jahren massiv erhöht (Daneshgar et al. 2018).

Klärschlämme eignen sich besonders für die Phosphatrückgewinnung

Schon seit einigen Jahren werden für verschiedene Stoffströme Rückgewinnungstechniken für Phosphat entwickelt. Relevant sind hier die Stoffströme aus Klärschlamm, Abwasser, Überschussgülle, Tiermehl und anderen phosphorhaltigen organischen Materialien. Jeder Mensch scheidet pro Tag ca. 1,8 g Phosphor aus (DPP 2019). Die geschätzte rückgewinnbare Phosphormenge aus den genannten Stoffströmen beträgt allein in Deutschland 124.000 t jährlich (UBA 2018). Die Rezyklate eignen sich entweder direkt oder nach weiterer Aufbereitung für den Einsatz als Düngemittel oder in der chemischen Industrie (DPP 2019).

Als zurzeit besonders vielversprechend gelten das nasschemische Verfahren, bei dem durch Fällung Magnesium-Ammonium-Phosphat entsteht (MAP bzw. Struvit), sowie thermische Verfahren. Mittels des nasschemischen Verfahrens können vergleichsweise kostengünstig 5 bis 30 % des enthaltenen Phosphors zurückgewonnen werden. Allerdings verbleiben im Rezyklat auch organische Anteile, die für den Einsatz als Düngemittel ungünstig sein können und eine weitere Aufbereitung erfordern. Im Vergleich dazu haben die aufwendigeren und teureren thermischen Verfahren einen deutlich höheren Rückgewinnungsgrad von mehr als 90 %; zudem werden während der Verbrennung die organischen Restbestandteile zerstört. Theoretisch ließen sich mit thermischen Verfahren aus dem in Deutschland anfallenden Klärschlamm –



ca. 1,8 Mio. t Trockenmasse jährlich – etwa 50.000 t Phosphor zurückgewinnen. Das entspräche gut 40 % des aktuellen landwirtschaftlichen Verbrauchs an mineralischem Phosphor (UBA 2018).

Weltweit gibt es derzeit ca. 120 großtechnische Anlagen zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasserströmen (Krämer 2019). Auch wenn Deutschland an der Entwicklung der eingesetzten Verfahren maßgeblich beteiligt ist, findet sich die großtechnische Realisierung zurzeit vorwiegend in Kanada, Japan und den USA (UBA 2018).

Gesellschaftliche und politische Relevanz

Sichere und bezahlbare Versorgung der internationalen Agrarmärkte mit Phosphat

Weil die Produktion von Phosphatmineralen und deren Gebrauch für die Herstellung von Düngemitteln verknüpft sind, ist die Entwicklung des Phosphatmarktes eng an die der internationalen Agrarmärkte gekoppelt. Das Verlangen nach landwirtschaftlichen Produkten wird in den nächsten Jahren und Jahrzehnten weiter ansteigen. Die Vereinten Nationen (UN 2019) gehen in ihrer Projektion der Weltbevölkerung davon aus, dass diese von aktuell etwa 7,7 Mrd. Menschen auf ungefähr 9,7 Mrd. im Jahr 2050 anwachsen wird. Dadurch wächst die Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermitteln, hinzu kommt der steigende Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen für den Ausbau der Bioökonomie. Vor diesem Hintergrund ist die sichere und bezahlbare Versorgung der internationalen Agrarmärkte mit Phosphat von großer Bedeutung (BGR 2013).

Aufgrund ihrer hohen Importabhängigkeit hat die EU 2014 Phosphat als kritischen Rohstoff eingestuft und 2017 in die Liste der kritischen Rohstoffe (European Critical Material List) aufgenommen (Krämer 2019). Die Liste umfasst jene 20 Rohstoffe, die von besonders hoher wirtschaftlicher Bedeutung für die EU sind und deren Versorgung mit Risiken verbunden ist (Boer 2019). Auch Deutschland ist vollständig von Rohphosphat- bzw. Düngemittelimporten abhängig, weshalb Phosphor für Deutschland ebenfalls eine strategische Ressource darstellt (UBA 2018).

Selbst wenn ein akuter Engpass von Phosphatmineralen momentan nicht zu erwarten ist (USGS National Minerals Information Center 2020) und zudem mit großer Wahrscheinlichkeit neue Ressourcen – technisch und wirtschaftlich machbar – zukünftig erschlossen werden können, wird in wissenschaftlichen Publikationen betont, dass die verfügbaren Ressourcen so nachhaltig und effizient wie möglich genutzt werden sollten. Doch nicht nur die langfristige, sondern auch die kurzfristige Versorgung ist aus folgenden Gründen mit Herausforderungen verbunden (Daneshgar et al. 2018):

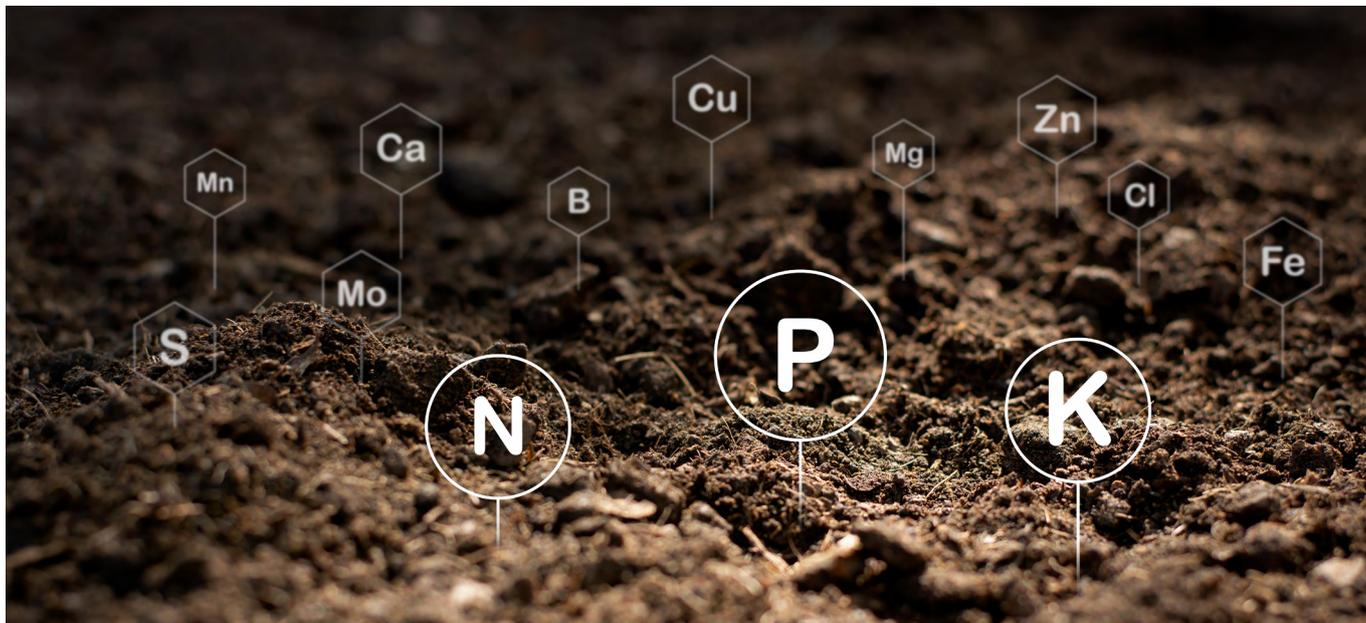
- **Hohe Abhängigkeit von wenigen Ländern mit geopolitischen Instabilitäten:** Nahezu 80 % der weltweiten Phosphatmineralproduktion erfolgt von nur wenigen Ländern (China, Marokko und Westsahara, den USA und Russland (USGS National Minerals Information Center 2020). Die einzigen europäischen Phosphatvorkommen in Finnland machen weniger als 1 % der globalen Reserven aus (UBA 2018). Marokko ist nach Russland der zweitwichtigste Rohphosphatlieferant der EU. Marokkos Reserven befinden sich aber größtenteils in der – von den Vereinten Nationen nicht anerkannten – annektierten Westsahara, was politische Risiken hinsichtlich der Versorgungssicherheit Deutschlands und der EU birgt. Ferner werden von China, dem Land mit der zweitgrößten Reserve und fast der Hälfte der global erzeugten Menge an Rohphosphat, die Exporte von Düngemitteln sehr stark reglementiert (UBA 2018; USGS National Minerals Information Center 2020). Insgesamt liegt ein Risiko darin, dass die produzierenden Länder von Konflikten geprägt sind sowie zunehmend Handelsbarrieren implementieren, Exportquoten festlegen oder andere protektionistische Maßnahmen durchführen (Boer 2019; de Ridder et al. 2012).
- **Enge Kopplung von Rohphosphat-, Düngemittel- und Nahrungsmittelpreisen:** In der Vergangenheit war Phosphat ein vergleichsweise preiswerter Rohstoff. Nach einem langjährigen konstanten Preisniveau von ca. 50 US-Dollar je t Rohphosphat stieg allerdings der Preis 2008 im Zuge der internationalen Nahrungsmittelkrise sprunghaft an und erhöhte sich kurzfristig um das 10-Fache auf bis zu 425 US-Dollar. Danach fiel der Preis zwar wieder, ist aber im Vergleich zu 2008 immer noch doppelt so hoch. Im gleichen Maße wie die Preise für Rohphosphat steigen die Preise für Düngemittel.

Grundsätzlich zeigt sich eine enge Korrelation zwischen weltweiten Nahrungsmittelpreisen und den Preisen für Düngemitteln bzw. Rohphosphat: Deshalb spielen stabile Preise für Düngemitteln eine wichtige Rolle für die Versorgungssicherheit (BGR 2013; de Ridder et al. 2012).

- **Düngemittel sind besonders von Handelsbarrieren betroffen:** Die Phosphatindustrie ist sehr stark integriert, d.h., die meisten Phosphatdüngemittelproduzenten betreiben aktiv Bergbau und verarbeiten den Rohstoff direkt zu Düngemitteln und anderen Phosphatprodukten weiter. Nur ein knappes Drittel der Phosphatdüngemittelhersteller ist auf den Ankauf von Rohphosphat angewiesen. Zudem werden rund 80 % des weltweit geförderten Rohphosphats direkt vor Ort weiterverarbeitet (BGR 2013). Dies bedeutet, kein Rohphosphat wird nach Europa importiert, sondern die fertigen Düngemittel sind von möglichen Handelsbarrieren betroffen.
- **Phosphatreserven enthalten krebserregendes Cadmium:** Problematisch an den verbleibenden Reserven ist die abnehmende Qualität, weil diese zunehmend durch toxische Schwermetalle – vor allem Cadmium – kontaminiert sind. Besonders die Phosphatreserven in Marokko sind mit Cadmium belastet (Boer 2019). Hieraus ergeben sich Risiken für Mensch und Umwelt (UBA 2018). Die Böden in Europa sind in den vergangenen Jahren durch die verunreinigten Düngemittel zunehmend mit Cadmium belastet worden. Schon heute wird die täglich empfohlene Höchstgrenze der Cadmiumaufnahme bei einer durchschnittlichen Ernährung teilweise überschritten. Im Falle vegetarischer Ernährung oder auch bei Kindern wird der Wert bereits um das Doppelte überschritten (EC 2017). Aus toxikologischen Gründen sollte die Einbringung von Cadmium über Düngemittel aus Rohphosphaten reduziert werden. Bei der Phosphatrückgewinnung aus Klärschlämmen lassen sich Schwermetalle wie Cadmium weitgehend mittels thermochemischer Verfahren entfernen (UBA 2019).

Deutschland strebt Phosphorrecycling an

Angesichts der beschriebenen Situation mit steigendem Phosphatbedarf einerseits und Phosphatknappheit sowie volatiler Versorgung andererseits wächst die Herausforderung, Phosphatreserven zu schonen und Phosphatverluste entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu vermeiden. Wichtige Maßnahmen sind die Steigerung des effizienten Einsatzes von Düngemitteln, falls möglich, der Einsatz von Phosphoralternativen sowie das Recycling von Phosphat. Politik und Wissenschaft beschäftigen sich bereits seit einigen Jahren mit der Entwicklung geeigneter Rückgewinnungstechniken (Garske et al. 2020; UBA 2018). Schon im Koalitionsvertrag von 2013 hat die damalige Bundesregierung entschieden, die Klärschlammausbringung zu Düngezwecken zu beenden und Phosphor sowie andere Nährstoffe aus dem Klärschlamm zurückzugewinnen zu wollen. Die jetzige Bundesregierung (2019) bekräftigt das Ziel, Phosphatreserven zu schonen und nachhaltig mit den verfügbaren Ressourcen umzugehen.



Derzeit ist der aus dem kommunalen Abwasser bzw. dem Klärschlamm rückgewonnene Phosphatanteil jedoch als eher gering einzustufen. Von den 1,7 Mio. t Trockenmasse jährlich in Deutschland anfallenden Klärschlämmen werden lediglich rund 18 % in der Landwirtschaft und 10 % für Rekultivierungsmaßnahmen eingesetzt. Der Hauptteil von 70 % wird verbrannt, womit der darin enthaltene Phosphor verlorengeht (Bundesregierung 2019). Ein wichtiger Schritt, die Importabhängigkeit Deutschlands zu reduzieren und eine nachhaltige Wirtschaftsweise mit Phosphor voranzutreiben, stellt die Novellierung der Klärschlammverordnung vom 2. Oktober 2017 dar. Mit dieser wird die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm oder Klärschlammverbrennungssasche mit einer Übergangsfrist ab 2029 für alle kommunalen Kläranlagen, deren Klärschlamm einen Gehalt von mehr als 20 g Phosphat pro kg Trockenmasse aufweist, verpflichtend vorgegeben. Dies gilt aber ausschließlich für größere Kläranlagen. Anlagen mit einer Auslegung für bis zu 50.000 Einwohnerinnen und Einwohner sind auch nach 2032 von der Phosphatrückgewinnungsverpflichtung ausgenommen (Bundesregierung 2019). Zudem gelten für diese keine gesetzlich bindenden Vorgaben für Phosphatmissionen (Leinweber et al. 2018).

Ab 2032 könnten wohl etwa 30.000 t Phosphor pro Jahr zurückgewonnen werden. Dies entspräche ca. 25 % des aktuellen landwirtschaftlichen Verbrauchs. Derzeit befinden sich allerdings noch viele der Phosphorrückgewinnungsverfahren in der Entwicklung bzw. in der großtechnischen Umsetzung in Pilotanlagen. Die Bundesregierung (2019) erwartet dennoch, dass spätestens ab 2032 genügend Kapazitäten für die Rückgewinnung zur Verfügung stehen werden.

Inwieweit die technische Phosphorrückgewinnung wirtschaftlich und marktnah umgesetzt werden kann, wird momentan noch kritisch diskutiert (Krämer 2019). Eine

bundesweite Regelung für die Finanzierung der Phosphorrückgewinnung gibt es laut der DPP (2019) zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht. Lösungsansätze der Bundesländer zur Finanzierung tendieren in Richtung einer Erhöhung der Abwassergebühren. Offene Fragen ergeben sich auch noch hinsichtlich des zu vermarktenden Endprodukts, der Phosphorrezyklate. Bis jetzt übersteigen die Kosten der meisten Rezyklate den Marktpreis herkömmlicher Dünger um ein Vielfaches. Eine weitere Voraussetzung für den Erfolg der Rückgewinnung ist die Verwendbarkeit der Rezyklate. Nur wenn die Rezyklate marktfähig, qualitativ akzeptabel und rechtlich zugelassen sind, kann das Verfahren wirtschaftlich betrieben werden. So stellt etwa die Überführung der aus Abfall gewonnenen Rezyklate in den Produktstatus noch eine rechtliche Schwierigkeit dar (UBA 2018). Ein Vorteil der Rezyklate besteht darin, dass sie im Vergleich zu den konventionellen Düngern häufig weniger Schadstoffe wie Schwermetalle enthalten, z.B. Cadmium und Uran (UBA 2018). Wenngleich mit der Novellierung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 über Düngemittel und der Verordnung (EU) Nr. 2019/1102¹ vom Juni 2019 vorgesehen wurde, dass bei phosphorhaltigen Düngemitteln einheitliche Cadmiumgrenzwerte eingehalten werden müssen, bieten die Rezyklate angesichts der zunehmenden Cadmiumbelastung der Böden eine wichtige Chance, potenzielle Gesundheitsrisiken in der Ernährung zu reduzieren.

Phosphorrückgewinnung ist ein aktuelles Forschungsthema

In der Vergangenheit wurden bereits zahlreiche Studien zum Thema Phosphorrückgewinnung durchgeführt (Krämer 2019). Beispiele hierfür sind das EU-Projekt „P-REX – Nachhaltiges Klärschlammmanagement zur Förderung

¹ Verordnung (EU) Nr. 2019/1102 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 über Düngemittel zwecks Anpassung ihrer Anhänge I und IV

des Phosphorrecyclings und der Energieeffizienz“ (2012), bei dem es um eine systematische Analyse verschiedener Verfahrensansätze geht, oder die 2018 in der Schweiz durchgeführte Studie zur verfahrenstechnischen Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad (Krämer 2019). Auch in Deutschland gab und gibt es verschiedene Forschungsprojekte zum Thema Rückgewinnungstechnologien. Deutschland zählt hier zu den führenden Nationen (UBA 2018). Im Rahmen einer Initiative der Bundesregierung für den Ressourcenschutz wurden 2004 bis 2011 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie dem damaligen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) die Entwicklung von Verfahren sowie die großtechnische Umsetzung von Techniken zur Rückgewinnung von Phosphor gefördert (UBA 2018). Aktuell unterstützt das BMBF das Vorhaben „Regionales Phosphor-Recycling“ (RePhoR) im Rahmen des Förderprogramms „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA) (Krämer 2019), ein Forschungsvorhaben zur „Abschätzung zusätzlich aus Abwasser und Klärschlämmen kommunaler und gewerblicher Herkunft extrahierbarer Wertstoffe“ wird im Rahmen des Ressortforschungsplans des BMU gefördert (Bundesregierung 2019). Ziel ist es, Phosphorströme und andere Wertstoffströme zu untersuchen, die noch nicht von den aktuellen gesetzlichen Regelungen, insbesondere der Klärschlammverordnung, erfasst werden. Mit Ergebnissen ist im Verlauf von 2020 zu rechnen (Bundesregierung 2018). Zudem hat das BMU 2018 den Förderschwerpunkt „Innovative Abwassertechnik“ neu eingerichtet (Bundesregierung 2019).

Darüber hinaus gibt es verschiedene Initiativen unter Beteiligung von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik, die sich

mit dem nachhaltigen Umgang mit Phosphor befassen. Zu nennen sind etwa die European Sustainable Phosphorus Platform, unter deren Schirmherrschaft im Frühjahr 2021 die 4. European Sustainable Phosphorus Conference stattfinden soll. In Deutschland ist seit 2015 die Deutsche Phosphor-Plattform DPP e.V. aktiv, welche 70 Mitglieder aus unterschiedlichen Bereichen der Phosphorwertschöpfungskette vereint. Ihr Ziel ist es, Strategien für ein nachhaltiges Phosphormanagement in deutschsprachigen Ländern zu erarbeiten. Ferner haben die Umweltministerien der Länder 2017 im Zuge der Novellierung der Klärschlammverordnung eine Ad-hoc-Gruppe der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) eingerichtet, die einen Bericht (LAGA 2018) erarbeitet hat.

Phosphorgovernance in Europa

Bislang sind Deutschland und die Schweiz die einzigen Länder in Europa, die eine Phosphorrückgewinnung gesetzlich verankert haben. In der Schweiz gilt seit 2016 die Verpflichtung, Phosphor nach einer Übergangszeit von 10 Jahren aus Klärschlamm zurückzugewinnen. Auch Österreich will zukünftig Phosphor aus Abwasser rückgewinnen (Krämer 2019).

Die Steuerung bzw. der nachhaltige Umgang mit Phosphat in Europa berührt zahlreiche gesetzliche Regulierungen (Garske et al. 2020). Die wichtigsten betroffenen Gesetze beziehen sich auf die Gemeinsame Agrarpolitik der EU sowie verschiedene europäische und nationale Gesetze zum Boden- und Gewässerschutz, zum Düngemittelleinsatz, zur Kreislaufwirtschaft und zur ökologischen Landwirtschaft. Den übergeordneten Rahmen bilden die internationale und die nationale Umweltgesetzgebung mit dem Ziel, die biologische Diversität zu erhalten und das 1,5- bzw.



2-Grad-Celsius-Ziel des Pariser Abkommens mit Blick auf die Klimaerwärmung einzuhalten (Garske et al. 2020). Der regulatorische Rahmen weist beim nachhaltigen Umgang mit Phosphor noch einige Defizite auf. Handlungsbedarf gibt es u. a. beim Bodenschutz, bei der Sicherstellung langfristiger Fruchtbarkeit des Bodens, der Vermeidung von Gewässereutrophierung und der Implementierung einer Kreislaufwirtschaft. Das Phosphatmanagement als eigenständiges Thema findet in den verschiedenen Gesetzen und Verordnungen noch zu wenig Berücksichtigung. Potenziale für eine bessere Phosphorgovernance liegen in der effizienten, bedarfsorientierten, regionalspezifischen und an die Pflanzen angepassten Düngung sowie in einer stärker diversifizierten Fruchtfolge und dem Einsatz organischer und recycelter Dünger (Garske et al. 2020). Daneben sind auch andere Lösungsansätze denkbar: eine Besteuerung oder Limitierung des Einsatzes phosphathaltiger Düngemittel, eine Cadmiumobergrenze in Düngern, die spezielle Förderung des Phosphatrezyklateinsatzes, erleichterte Feststellung des möglichen Einsatzes von Rezyklaten aus Biomasse als Düngemittel – d.h. die Feststellung darüber, ob es sich um Abfall oder ein Produkt handelt – oder verbindliche Quoten zum Viehbesatz landwirtschaftlicher Flächen (Garske et al. 2020).

Mögliche vertiefte Bearbeitung des Themas

Sämtliche Verfahren zum Recycling von Phosphor befinden sich in Deutschland noch in der Entwicklung. Aufgrund der novellierten Klärschlammverordnung und der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 stehen Klärwerksbetreiber aber unter Druck, in den nächsten Jahren neue Verfahren zur Phosphorrückgewinnung zu implementieren. Ab 2029 müssen alle Klärwerke mit über 50.000 Einwohnerwerten Phosphor aus Klärschlämmen verpflichtend recyceln. Zur Weiterverfolgung des Themas böte sich ggf. ein Sachstandsbericht zur Technologieentwicklung und Forschung an, der folgende Fragestellungen behandeln könnte:

- Wie ist der Stand von Forschung und Technologieentwicklung allgemein? Wie ist der Stand der Technologieimplementierung bei den Klärwerksbetreibern?
- Welche Verfahren und Technologieimplementierungen zeichnen sich in anderen EU-Ländern ab, aber auch z.B. in der Schweiz oder in den USA? Gibt es Verfahren, die sich schon in der Praxis bewährt haben?
- Welche Erkenntnisse gibt es zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphorrezyklaten und deren Güte als Düngemittel? Welche diesbezüglichen Produktionserfolge, aber auch welche möglichen Umweltwirkungen gibt es bzw. zeichnen sich ab?
- Welche Mechanismen begünstigen den marktfähigen Einsatz von Phosphorrezyklaten? Welche Voraussetzungen sind darüber hinaus notwendig? Wie entwickeln sich Märkte für Phosphorreyclingverfahren und Rezyklate?

- Welche Verbünde und Netzwerke eignen sich, das Phosphorreycling zu befördern? Welche neuen Akteure werden aktiv und finden ggf. alternative Anwendungen (z.B. Industriekraftwerke der Kohleverbrennung)?

Literatur

- ▶ BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2013): Phosphat: Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit (Autoren: Killisches, F.; Gebauer, H.-P.; Franken, G.; Röhling, S.; Schulz, P.; Müller, H. Werner). Hannover, https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Politikberatung_SV_MER/Downloads/phosphat.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (18.2.2020)
- ▶ Boer, M. A. de (2019): Sustainable use of phosphorus. Capturing the philosopher's stone
- ▶ Bundesregierung (2018): Phosphor in Klärschlämmen. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Judith Skudelny, Frank Sitta, Renata Alt, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/4001 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/4289, Berlin
- ▶ Bundesregierung (2019): Weltweite Nahrungsmittelproduktion. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Christoph Hoffmann, Alexander Graf Lambsdorff, Olaf in der Beek, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/8772 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/9803, Berlin
- ▶ Cordell, D.; White, S. (2014): Life's Bottleneck: Sustaining the World's Phosphorus for a Food Secure Future. In: *Annu. Rev. Environ. Resour.* 39(1), S. 161–188
- ▶ Daneshgar, S.; Callegari, A.; Capodaglio, A.; Vaccari, D. (2018): The Potential Phosphorus Crisis: Resource Conservation and Possible Escape Technologies: A Review. In: *Resources* 7(2), S. 37
- ▶ De Ridder, M.; de Jong, S.; Polchar, J.; Lingemann, S.; (2012): Risks and Opportunities in the Global Phosphate Rock Market. *Robust Strategies in Times of Uncertainty*. The Hague Centre for Strategic Studies (20.2.2020)
- ▶ DPP (Deutsche Phosphor-Plattform DPP e.V.) (2019): Die meistgestellten Fragen von Bürgern und Entscheidungsträgern zum Thema „Phosphorreycling“ ... und die Antworten der Deutschen Phosphor-Plattform. Frankfurt a.M., <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2019/02/FAQs-zur-Phosphorr%C3%BCckgewinnung.pdf> (18.2.2020)
- ▶ EC (European Commission) (2017): Cadmium | Food Safety. https://ec.europa.eu/food/safety/chemical_safety/contaminants/catalogue/cadmium_en (25.2.2020)
- ▶ FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2017): World fertilizer trends and outlook to 2020. Summary Report. Rome (19.2.2020)
- ▶ Filippelli, G. M. (2008): The Global Phosphorus Cycle: Past, Present, and Future. In: *Elements* 4(2), S. 89–95

- ▶ Garske, B.; Stubenrauch, J.; Ekardt, F. (2020): Sustainable phosphorus management in European agricultural and environmental law. In: RECIEL 29(1), S. 107–117
- ▶ Krämer, J. (2019): Phosphorrecycling: Wer, wie, was? Umsetzung einer iterativen, zielgruppenorientierten Kommunikationsstrategie. Abschlussbericht. Deutsche Phosphor-Plattform DPP e.V., Frankfurt a.M., https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2019/09/DBU_Abschlussbericht.pdf (18.2.2020)
- ▶ LAGA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall) (2018): Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung. LAGA Ad-hoc-AG, Berlin
- ▶ Leinweber, P.; Bathmann, U.; Buczko, U.; Douhaire, C.; Eichler-Löbermann, B.; Frossard, E.; Ekardt, F.; Jarvie, H.; Krämer, J.; Kabbe, C.; Lennartz, B. et al. (2018): Handling the phosphorus paradox in agriculture and natural ecosystems: Scarcity, necessity, and burden of P. In: Ambio 47(Suppl 1), S. 3–19
- ▶ Scholz, R. W.; Ulrich, A. E.; Eilittä, M.; Roy, A. (2013): Sustainable use of phosphorus: a finite resource. In: The Science of the total environment 461–462, S. 799–803
- ▶ UBA (Umweltbundesamt) (2018): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland (Roskosch, A.; Heidecke, P.). Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_uba_fb_klaerschamm_bf_low.pdf (18.2.2020)
- ▶ UBA (2019): Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung. Abschlussbericht (Kraus, F.; Zamzow, M.; Conzelmann, L.; Remy, C.; Kleyböcker, A.; Seis, W.; Miehe, U.; Hermann, L.; Hermann, R.; Kabbe, C.). Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19_texte_13-2019_phorwaerts.pdf (31.3.2020)
- ▶ UN (United Nations) (2019): Revision of World Population Prospects. <https://population.un.org/wpp> (20.2.2020)
- ▶ USGS National Minerals Information Center (2020): Phosphate Rock Data Sheet. Mineral Commodity Summaries 2020. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf> (31.7.2020)

Das Horizon-Scanning ist Teil des methodischen Spektrums der Technikfolgenabschätzung im TAB.

Horizon SCANNING

Mittels Horizon-Scanning werden neue technologische Entwicklungen beobachtet und diese systematisch auf ihre Chancen und Risiken bewertet. So werden technologische, ökonomische, ökologische, soziale und politische Veränderungspotenziale möglichst früh erfasst und beschrieben. Ziel des Horizon-Scannings ist es, einen Beitrag zur forschungs- und innovationspolitischen Orientierung und Meinungsbildung des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung zu leisten.

In der praktischen Umsetzung werden im Horizon-Scanning softwaregestützte Such- und Analyseschritte mit expertenbasierten Validierungs- und Bewertungsprozessen kombiniert.

Herausgeber: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)

Gestaltung: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Bildnachweise: © New Africa/AdobeStock (S. 1), © Dusan Kostic/AdobeStock (S. 2), © Patrick Daxenbichler/AdobeStock (S. 3), © Horst/AdobeStock (S. 4), © 994yellow/AdobeStock (S. 6), © Andrea Izzotti/AdobeStock (S. 7)

ISSN-Internet: 2629-2874