Aufbau eines Netzwerks zum ressourceneffizienten Phosphor-Recycling und -Management in der Region Harz und Heide – Erfahrungen aus dem Verbundprojekt P-Net

Thomas Dockhorn, Andreas Kolb, Hooman Mohammadi, Paul Keßeler, Sylvia Kratz, Elke Bloem, Joachim Clemens, Martina Winker, Jonathan Pillen, Markus Rauchecker, Michaela Rohrbach, Engelbert Schramm, Stefanie Meyer, Christoph Siemers, Franziska Gromadecki, Janina Heinze, Hans-Oskar Baron, Johannes Müller-Schaper, Oliver Hermanussen,

Gewässerschutz - Wasser - Abwasser, Aachen 2024, ISBN 978-3-938996-XX-X

1 Einleitung

Das Modell der „circular economy“ gewinnt in vielen Bereichen der Gesellschaft an Bedeutung. Auch im Kontext der Abwasserbehandlung wird dieser Ansatz zunehmend verfolgt. Dabei kommt dem essenziellen und limitierten Nährstoff Phosphor (P) und dessen Kreislaufführung eine besondere Stellung zu. Dies hat letztendlich in der 2017 novellierten Klärschlammverordnung (AbfKlärV) zu einer gesetzlichen Verpflichtung zur P-Rückgewinnung geführt. Einen möglichen Schlüssel zur Schließung des P-Kreislaufs stellt die P-Rückgewinnung mittels Struvit-Fällung dar.

Das vom BMBF geförderte und in die Fördermaßnahme RePhoR (Regionales Phosphor-Recycling) eingebettete Forschungsprojekt „P-Net“ hat es sich zur Aufgabe gemacht, eine nachhaltige und ganzheitliche Alternative zum P-Recycling durch die Ertüchtigung der „Struvit-Schiene“ anzubieten. Nachhaltig durch den bewussten Anspruch, ein möglichst betriebsmittelarmes und damit ressourcenschonendes Verfahren zu entwickeln, an dessen Ende ein hochwertiges P-Recyclat für den Einsatz in der Landwirtschaft steht. Ganzheitlich, da das Projekt nicht nur die verfahrenstechnischen Aspekte auf Kläranlagen untersucht, sondern alle Akteure der Wertschöpfungskette über den Düngemittelhersteller bis zum späteren Anwender, dem Landwirt, im Projektdesign bereits mit einbezieht. Dadurch soll ein Netzwerk zur Förderung des regionalen P-Recyclings in der Region Harz und Heide aufgebaut werden. In dieser Region hat sich in den letzten 15 Jahren ein „Kristallisationspunkt“ für großtechnische Anlagen zur Struvit-Fällung auf kommunalen Kläranlagen herausgebildet. Um die bestehende Infrastruktur zu nutzen und auszubauen, hat sich das interdisziplinäre Projektkonsortium „P-Net“ formiert. Abb. 1 zeigt alle beteiligten Projektpartner.

Abb. 1: Projektkonsortium P-Net

2 Technikbeschreibung und Verfahrensführung

2.1 Anaerob-biologische P-Remobilisierung

Der überwiegende P-Anteil in kommunalen Abwässern wird in der Regel durch die gezielte P-Elimination in den Überschussschlamm (ÜS) fixiert. Um hohe P-Recyclingraten mittels Struvit-Fällung zu erreichen, ist eine Remobilisierung (Rücklösung) des im ÜS gebundenen P notwendig. Dies kann z.B. über einen chemischen Aufschluss mit mineralischen Säuren oder Laugen geschehen. Eine nachhaltige Alternative bietet hingegen die anaerob-biologische P-Remobilisierung (Dockhorn 2005; Dockhorn 2007; Esemen 2012).

Durch die anaerobe Inkubation von ÜS unter Zugabe einer Kohlenstoffquelle (C-Quelle) als Co-Substrat kann ein Großteil der biologisch aufgenommenen Phosphate zurückgelöst werden. Des Weiteren entstehen aufgrund der Aktivität von anaerob-fakultativen Bakterien organische Säuren, die eine pH-Absenkung im Remobilisierungsreaktor verursachen. Die Entstehung dieses Milieus begünstigt die bakterielle Eisenreduktion, weshalb auch die eisenfixierten Phosphate rückgelöst und somit höhere P-Rücklöseraten erzielt werden (Dockhorn 2007; Mohammadi et al. 2023)

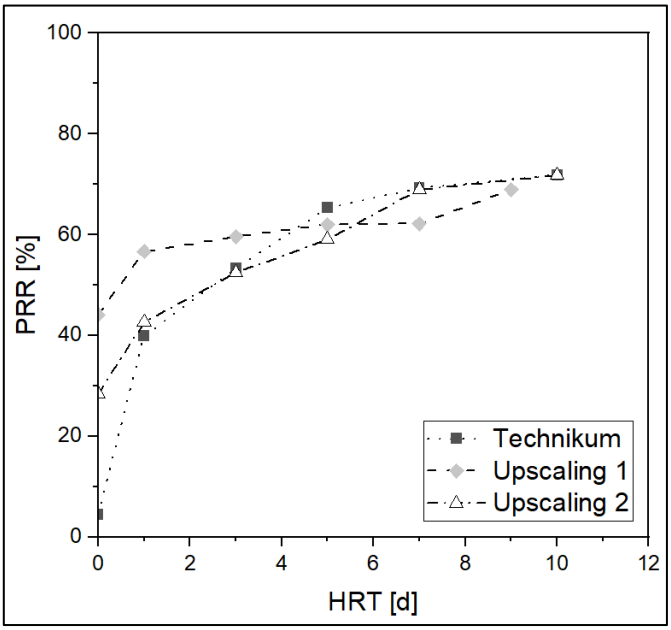

Abb. 2: P-Remobilisierungsraten in Technikumsmaßstab und Upscaling-Versuchen (KWS) mit ÜS und PS als Co-Substrat im Batch-Betrieb.

Die Kinetik der P-Remobilisierung wird neben der Art und Menge des zugegebenen Co-Substrats von mehreren Parametern, wie Inkubationsdauer (HRT), Betriebstemperatur und Feststoffgehalt im ÜS beeinflusst. Diese Abhängigkeiten wurden im Rahmen von P-Net vom Labor- über den Technikumsmaßstab bis hin zur großtechnischen Implementierung untersucht.

Das Konzentrationsverhältnis zwischen dem gelösten und gesamten P im Schlamm wurde als P-Remobilisierungsrate (PRR) definiert. Die Untersuchungen im Technikumsmaßstab mit dem ÜS aus der kommunalen Kläranlage der Stadt Braunschweig (Klärwerk Steinhof, KWS) haben gezeigt, dass unter Anwendung des kläranlageneigenen Primärschlamms (PS) als C-Quelle, Remobilisierungsraten über 70% erzielbar sind. Diese Ergebnisse wurden im Rahmen von zwei Upscaling-Versuchen in einem Schlammspeicher mit 1.300 m^3 Gesamtvolumen bestätigt (Abb. 2).

Basierend auf diesen Ergebnissen startete im November 2023 der erste großtechnische kontinuierliche Betrieb der P-Remobilisierung auf dem KWS. Auch hier wurden in einer Mischung von 100% ÜS mit ca. 25-30% des gesamten kläranlageneigenen PS Rücklöseraten bis 70% erzielt. Zudem wurde eine sehr gute Eindick- bzw. Entwässerbarkeit des remobilisierten ÜS (Remobilisats) festgestellt. Anhand dieser Ergebnisse hat die modelhafte Berechnung der P-Frachten für das KWS gezeigt, dass nach der Implementierung der anaerob-biologischen P-Remobilisierung die Einhaltung eines P-Gehaltes von 20 g P / kg TM im Faulschlamm erreichbar ist (Abb. 3).

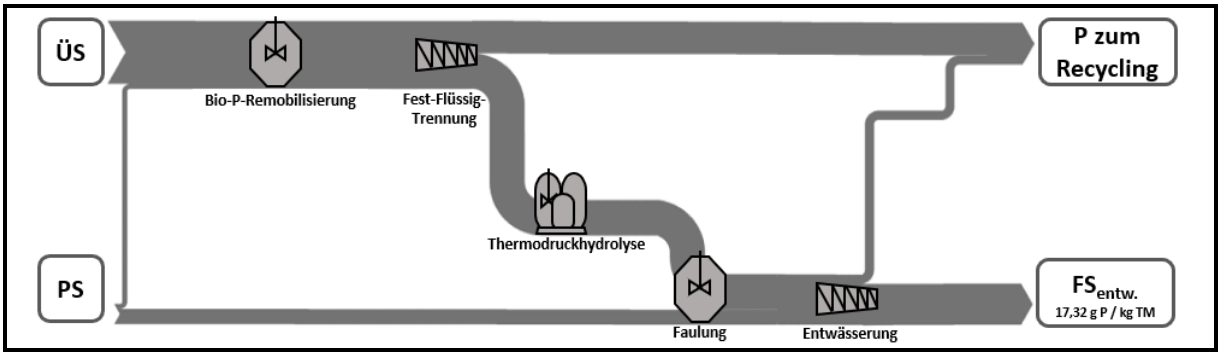

Abb. 3: Rechnerische P-Frachten nach Implementierung der anaerob-biologischen P-Remobilisierung auf dem KWS; $FS_{entw.}$: entwässerter Faulschlamm

2.2 Struvit-Fällung

Nach der erfolgreichen P-Remobilisierung in der anaerob-biologischen Stufe muss in dem nachfolgendem Verfahrensschritt das gelöste P refixiert werden. Im Rahmen von P-Net wird dies durch die gezielte Ausfällung von Struvit realisiert.

Struvit ist ein Salz bestehend aus Magnesium-Ammonium-Phosphat und kristallin gebundenem Wasser. Landläufig wird aus diesem Grund oft der Begriff „MAP“ verwendet. Treffen die drei Reaktionspartner in gelöster Form aufeinander, läuft die chemische Reaktion nach folgender Gleichung ab (Le Corre et al. 2009):

$$Mg^{2+} + NH_4{}^{+} + H_nPO_4{}^{3-n} + 6H_2O \longrightarrow MgNH_4PO_4 * 6H_2O + nH^{+}\ (n = 0{,}1{,}2)$$

Für eine vollständige Fällung ist, je nach Grad der Übersättigung, ein alkalischer pH-Bereich zwischen 7 und 9 erforderlich. Ggf. kann die Struvitfällung bereits bei einem pH von 6,5 einsetzten. Zudem müssen alle Reaktionspartner im äquimolaren Verhältnis vorliegen. Für gewöhnlich ist Ammonium überstöchiometrisch vorhanden, jedoch kaum gelöstes Magnesium. Als Betriebsmittel für den Prozess müssen demnach eine Magnesium-Quelle sowie eine Lauge zur pH-Steuerung eingesetzt werden.

Durch das im Remobilisat vorherrschende saure Milieu werden neben P weitere Ionen zurückgelöst. Dazu zählen auch Eisen- und Calcium-Ionen, welche bei der Struvit-Fällung zu einer Konkurrenzsituation um das gelöste P führen können.

Tabelle 1: Filtrat$_{REM}$ Zusammensetzung

Parameter	Konzentration [mg/l]	Molares Verhältnis zu P
P	518	1
Mg	173	0,43
NH_4	601	2
Ca	326	0,48
K	252	0,39
Na	115	0,3
Fe	74	0,08

In Tabelle 1 ist die Zusammensetzung vom Filtrat des Remobilisats (Filtrat$_{REM}$) dargestellt, die sich in den großtechnischen Versuchen eingestellt hat. Daraus wird ersichtlich, dass bereits ca. 40% des für die Struvit-Fällung benötigten Magnesiums zur Verfügung steht, wodurch Betriebsmittel eingespart werden können.

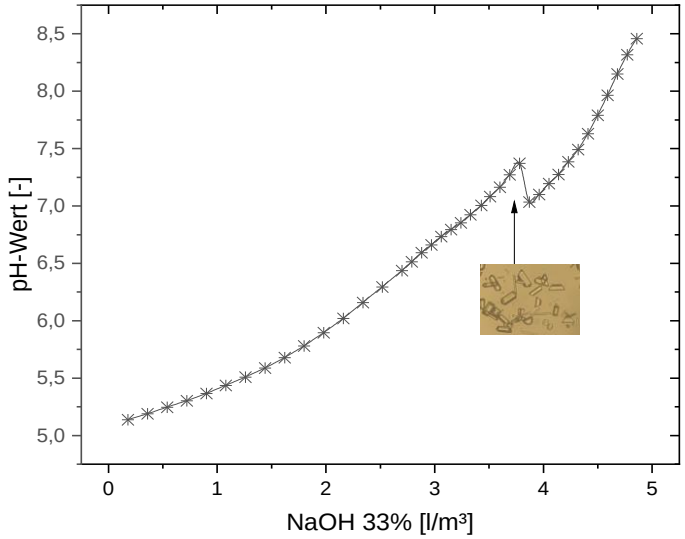

Abb. 4: Titrationskurve Filtrat$_{REM}$

Die zweite Besonderheit ist der durch die Remobilisierung vorliegende pH-Wert von 5 bis 5,5, welcher nicht geeignet ist, Struvit auszufällen. Es handelt sich jedoch um ein schwach gepuffertes System. In Abb. 4 ist die Titrationskurve für das Filtrat$_{REM}$ aus Tabelle 1 dargestellt. Der Versatz ab pH 7 ist mit der einsetzenden Struvit-Fällung zu erklären. Um den Laugenbedarf weiter zu reduzieren, bietet sich z.B. ein Verschnitt von Filtrat$_{REM}$ mit Faulschlamm-Zentrat an. Dennoch kann in dem niedrigen pH-Wert bis vor die Struvit-Fällung ein Vorteil gesehen werden, da so Rohrleitungen und Pumpen vor spontanen Struvit-Ausfällungen geschützt werden. Bisherige Fällungsversuche haben gezeigt, dass eine pH-Anhebung auf 7,9 ausreicht, um 95% des gelösten P auszufällen.

3. Produkte und Märkte

3.1 Struvit Hub

In dem Struvit-Hub werden eingehende Struvitchargen einzeln klassifiziert und bis nach der Qualitätsüberprüfung zwischengelagert. Dort findet dann auch die Produktion eines Düngemittels in Form von Pellets oder Granulaten statt. Die produzierten Struvit-Dünger sollen eine konstante Nährstoffkonzentration aufweisen.

Das bisher angelieferte Struvit aus verschiedenen Anlagen wies deutliche Qualitätsunterschiede auf. Es unterschied sich nicht nur von Anlage zu Anlage, sondern es waren auch Unterschiede im Struvit einer Anlage im zeitlichen Verlauf zu beobachten. Die Unterschiede waren im Wesentlichen im Wassergehalt, in der Textur und in der Farbe feststellbar. Das Material war -unabhängig von der Körnung- schlammig bis

stichfest. Das Struvit selbst war sandig kristallin (Durchmesser 2-0,63mm) bis „amorph“ (bis zu 0,1mm). Die Farbe variierte von schwarz bis hell, wobei die schwarze Farbe in den meisten Fällen eher auf geringste Mengen an Eisensulfid (FeS) als auf organischen Kohlenstoff zurückzuführen ist. Eine durchgehend konstante Struvitqualität wies bisher keine Anlage auf. Darüber hinaus waren die Mengen an erzeugtem Struvit (Tonne/Monat) je Kläranlage sehr variabel.

Die Qualitätsüberprüfung umfasst u.a. Störstoff-, Nährstoff- und Schadstoffanalysen. Für die Analyse der Inhaltsstoffe wird im Rahmen von P-Net eine vor-Ort-Qualitätsüberwachung mittels Röntgenfluoreszenzanalyse sowie eine volumetrische Ammonium-N-Analyse entwickelt.

Nach Freigabe des Materials erfolgt eine Mischung verschiedener Chargen und eine Konditionierung. Nun können auch andere Nährstoffe zudosiert werden. In P-Net liegt der Fokus auf der Produktion von reinen Struvitdüngern.

Struvit ist ein thixotropes Material, dessen Viskosität sich bei Bewegung und Temperaturschwankungen deutlich verändert. Deshalb ist es notwendig, die verschiedenen Chargen so vorzubereiten, dass eine Mischung ein geeignetes Ausgangsmaterial für die Granulierung und Pelletierung darstellt. Die Granulierung erfolgt in einem Granulierteller mit einem Durchmesser von ca. 2 m. Die Pelletierung erfolgt in einem Pelletierer mit vertikaler Ringmatrize. Bei der Pelletierung ist darauf zu achten, dass sich die Matrize nicht durch das pastös werdende Struvit dauerhaft zusetzt.

3.2 Produktbeschreibung

Struvit ist speziell für die Unterfußdüngung geeignet, da es nicht wasserlöslich ist und sich erst bei etwas niedrigeren pH-Werten auflöst und seine Nährstoffe freisetzt. Struvit kann auch direkt am Saatgut platziert werden, da es aufgrund seiner geringen Wasserlöslichkeit im Gegensatz zu konventionellen Mineraldüngern keine Salzschäden verursacht. Die P_2O_5-Konzentration in den hergestellten Düngemitteln betrug etwas mehr als 20% (Tabelle 2). Der neutralcitratlösliche P-Anteil entsprach der Gesamt-P Konzentration, der wasserlösliche P-Anteil war immer < 1% P_2O_5. Die Struvitdünger sind arm an Schwermetallen (Tabelle 2). Neben reinen Struvit-Pellets wurde durch Zugabe einer zweiten Komponente ein Pellet mit zusätzlicher Kaliumwirkung erzeugt.

Aus Struvit wurden bisher Pellets und Granulate hergestellt. Die Pellets wurden mit 4, 5 und 6 mm Durchmesser produziert. Die Stabilität der Pellets nahm mit zunehmender Größe ab. Die zu Beginn im Rahmen von P-Net hergestellten 6 mm Pellets wiesen einen relativ großen Produktabrieb auf, der auch bei der Ausbringung bemerkbar war. Die kleineren Pellets waren stabiler. Einzelne Versuchschargen, insbesondere bei den 4 mm Pellets, waren sogar „betonartig“ und zersetzten sich in einer Vegetationsperiode kaum. Geeignet scheinen die 5 mm Pellets zu sein, wobei durch entsprechende Konditionierung ein stabiles Produkt erzeugt werden kann, das sich im Boden durch Wurzeleinwirkung zersetzt. Es wurden zwei Granulate hergestellt. Dabei handelte es sich um ein Granulat mit einem Durchmesser von 1,7-4 mm und ein Mikrogranulat von

0,6-1,7 mm. Die Zusammensetzungen der Dünger, die in einem größeren Maßstab hergestellt wurden, sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 2: Konzentration von Schwermetallen in einem Struvitpellet

Parameter	Einheit	Struvit	DüMV
Cd	mg/kg P2O5	<0,5	50
Ni	mg/kg TM	4,5	80
Pb	mg/kg TM	4,8	150
As	mg/kg TM	0,3	40
Hg	mg/kg TM	0,15	1
Tl	mg/kg TM	< 0,01	1

Tabelle 3: Dünger, die in einem größeren Maßstab hergestellt wurden

Form	Material	Durchmesser (mm)	Länge (cm)	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	MgO (%)
Pellet	Struvit	4/5/6	1 -2	4,7	21	-	11,7
Mischpellet		5	1-2	-	-	3,7	6,5
Granulat	Struvit	1,7 - 4	-	3,7	22	-	11,7
Mikrogranulat	Struvit	0,6 – 1,7	-	3,7	22	-	11,7

3.3 Vermarktung

In der Vergangenheit ist es nicht gelungen, eine durchgängige und stabile Vermarktung von Struvitdüngern zu erreichen. Dies liegt u.a. an den bereits beschriebenen stark variierenden Qualitäten von Struvit und den geringen anfallenden Struvitmengen. Deshalb war es für Unternehmen nicht zielführend, für Struvitdünger eine konsistente Marketingstrategie aufzubauen. Hieran wird in P-Net gearbeitet.

In einem ersten Schritt wurden im Rahmen einer Zielgruppen- und Marktanalyse sowohl der potenzielle Markt als auch die Abnehmer und damit Zielgruppen eines entsprechend konfektionierten Struvitdüngers untersucht (Pillen et al. 2023). Die Analyse zeigt, dass es neben vereinzelten Ausnahmen eines Akteurs (z.B. ein Düngemittelhersteller) bedarf, der die Struvitchargen der Kläranlagen aufkauft und zu einem einheitlichen P-Dünger konfektioniert. Dieser Struvitdünger eignet sich insbesondere für die Unterfußdüngung von Sommerungen (Kulturen, die im Frühjahr ausgebracht werden) wie Mais und Kartoffeln. Engste Konkurrenzprodukte sind in der konventionellen Landwirtschaft voll wasserlösliche mineralische P-Mischdünger (z.B. DAP). In der ökologischen Landwirtschaft konkurriert es gegen das nur schwer lösliche Rohphosphat. Wichtige Produkteigenschaften sind hohe Reinheit, Ausbringbarkeit, Wirksamkeit sowie ein akzeptabler Preis. Zudem braucht es für eine erfolgreiche Vermarktung eine stabile Grundabsatzmenge, die aktuell nur in Ansätzen gegeben ist. Abnehmer*innen in der prioritären Zielgruppe sind überwiegend ökologische Landwirte, die bereits von dem Dünger überzeugt sind und denen es an Alternativen fehlt. Zu dieser Gruppe

kommen auch Landwirte hinzu, die bisher Klärschlamm eingesetzt und darüber einen engen Bezug zur regionalen Kläranlage und den damit verbundenen Nährstoffkreisläufen haben. Gefolgt von dieser Gruppe sind die „innovativen Optimierer“ zu nennen, die eher konventionell wirtschaften und dabei stark an neuen Entwicklungen sowie der Kosten-Nutzen-Maximierung ihrer Betriebe interessiert sind. Darauf aufbauend wurde ein Markenkonzept mit der Agentur „Agrarmarketing Detailreich“ erarbeitet und seit Sommer 2023 in Form eines Flyers und Roll-ups im Vertrieb von Soepenberg erprobt sowie in Fokusgruppen getestet.

4. Agronomische Bewertung

Die agronomische Wirksamkeit eines Düngers wird durch dessen Pflanzenverfügbarkeit bestimmt. Damit eine Pflanze Phosphor aufnehmen kann, muss dieser in der wässrigen Bodenphase gelöst sein. Labormethoden zur Abschätzung der Pflanzenverfügbarkeit zielen daher auf die Ermittlung der chemischen Löslichkeit von Phosphordüngern in unterschiedlichen Standardextrakten ab. Diese Standardextraktionsverfahren werden im Düngemittelrecht festgelegt. Solche statischen Labormethoden sind jedoch nicht in der Lage, die kontinuierlichen Lösungsprozesse von P-Düngern im Boden im Zusammenspiel mit der Pflanzenwurzel abzubilden. Dafür ist die Durchführung von Vegetationsversuchen notwendig.

4.1 Chemische Löslichkeit

Zu den gängigsten chemischen Extraktionsmitteln zur Abschätzung der P-Löslichkeit gehören Wasser (W), Neutral-Ammoncitrat (NAC), 2 % Zitronensäure (ZS), 2 % Ameisensäure (AS) und Mineralsäure (Gemisch aus Salpeter- und Schwefelsäure, MS). Für rohphosphatbasierte mineralische Düngemittel wird eine gute Wasserlöslichkeit als gleichbedeutend mit einer guten/schnellen Pflanzenverfügbarkeit angesehen, während fehlende Wasserlöslichkeit mit einer geringeren/langfristigen Pflanzenverfügbarkeit gleichgesetzt wird. Diese Annahme hat sich allerdings für Phosphorrecyclingdüngemittel, die oft andere P-Verbindungen enthalten als herkömmliche mineralische P-Dünger, als nicht haltbar erwiesen (Kratz et al. 2019). So ist insbesondere die Pflanzenverfügbarkeit von Struvit (STR) trotz fehlender Wasserlöslichkeit mit der herkömmlicher vollständig wasserlöslicher P-Dünger wie Diammoniumphosphat (DAP) oder Triple-Superphosphat (TSP) vergleichbar, wie zahlreiche Vegetationsversuche gezeigt haben (Hall et al. 2020; Hertzberger et al. 2020). STR ist (fast) vollständig in NAC, ZS oder AS löslich (Tabelle 4) und wird im Boden von Wurzelexsudaten der Pflanze gelöst. Aus diesem Grund muss STR in den Boden eingearbeitet oder am besten wurzelnah platziert werden, damit es von der Pflanze aufgenommen werden kann.

4.2 Vegetationsversuche

Vegetationsversuche können sowohl im Gefäß unter Gewächshausbedingungen als auch im Feld unter Freilandbedingungen durchgeführt werden. Dabei werden der Biomasseertrag und die P-Aufnahme der Pflanze zur agronomischen Bewertung eines Düngemittels herangezogen.

Tabelle 4: Relative chemische Löslichkeit von RP, DAP, TSP und STR in den Standardextrakten Wasser (W), Neutral-Ammoncitrat (NAC), Zitronen- (ZS) und Ameisensäure (AS) im Vergleich zu deren Mineralsäurelöslichkeit [%] (Kratz et al. 2010 und eigene Analysen aus dem JKI-PB)

Dünger/ Extraktionsmittel	W	NAC	ZS	AS
Weicherdiges Rohphosphat (RP)	0,2	14	28	58
Diammoniumphosphat (DAP)	87	102	101	115
Triple-Superphosphat (TSP)	91	89	91	94
Struvit (STR)	0,7	92	100	97

4.2.1 Gefäßversuch 2021

In einem Gefäßversuch wurde die P-Düngewirkung von STR im Vergleich zu einem kaum wasserlöslichen, weicherdigen RP und einem voll wasserlöslichen TSP untersucht. Aufgrund der geringen Substratmasse von 2 kg je Gefäß mussten alle Dünger in vermahlener Form in das Substrat eingemischt werden, um eine homogene Verteilung und bedarfsgerechte Düngung sicherzustellen. Um den Einfluss bodenbürtigen Phosphors möglichst gering zu halten, wurde ein leicht reproduzierbares, „bodengleiches“ und nährstoffarmes Substrat aus Quarzsand, Bentonit und Schwarztorf verwendet („JKI-Standardsubstrat 2021“). Alle Nährstoffe außer P wurden über eine Nährlösung im Überschuss bereitgestellt und eine gleichbleibende Wasserversorgung sichergestellt. Während der 98-tägigen Versuchsdauer wurde die Versuchskultur Weidelgras (*Lolium multiflorum*) dreimal oberhalb von 3,5 cm sowie zu Versuchsende zusätzlich oberhalb von 0,5 cm über der Substratoberfläche geschnitten und der P-Gehalt in der Trockenmasse analysiert.

Im Versuch konnte im Einklang mit früheren Ergebnissen gezeigt werden, dass die P-Düngewirkung von STR unabhängig vom pH-Wert des Substrates mit der von voll wasserlöslichem TSP vergleichbar ist (Abb. 5).

Die Problematik von Gefäßversuchen liegt u.a. darin, dass die Gefäßwände das Wurzelwachstum begrenzen, wodurch unnatürlich hohe Wurzeldichten im Gefäß auftreten. Daher ist ein Anbau der Versuchskultur bis zur Ertragsreife meist nicht möglich. Eine Ausbringung der Dünger ist zudem nur in vermahlener Form möglich, um eine homogene Verteilung im Gefäß zu erlauben, da bereits ein einzelnes Düngergranulatkorn aufgrund seiner Größe zu Überdüngung im Gefäß führen würde. Um den Einsatz von Struvit unter realen Anbaubedingungen im Feld zu untersuchen, wurden daher mehrere On-Farm-Versuche durchgeführt.

4.2.2 On-Farm-Feldversuche 2022 und 2023

In elf On-Farm-Feldversuchen wurde die Düngewirkung der im Projekt konfektionierten struvitbasierten Düngemittel (siehe Kap. 3) unter realen Feldbedingungen untersucht. Die Ausbringung der Struvitdünger auf betriebsüblich bewirtschafteten Flächen

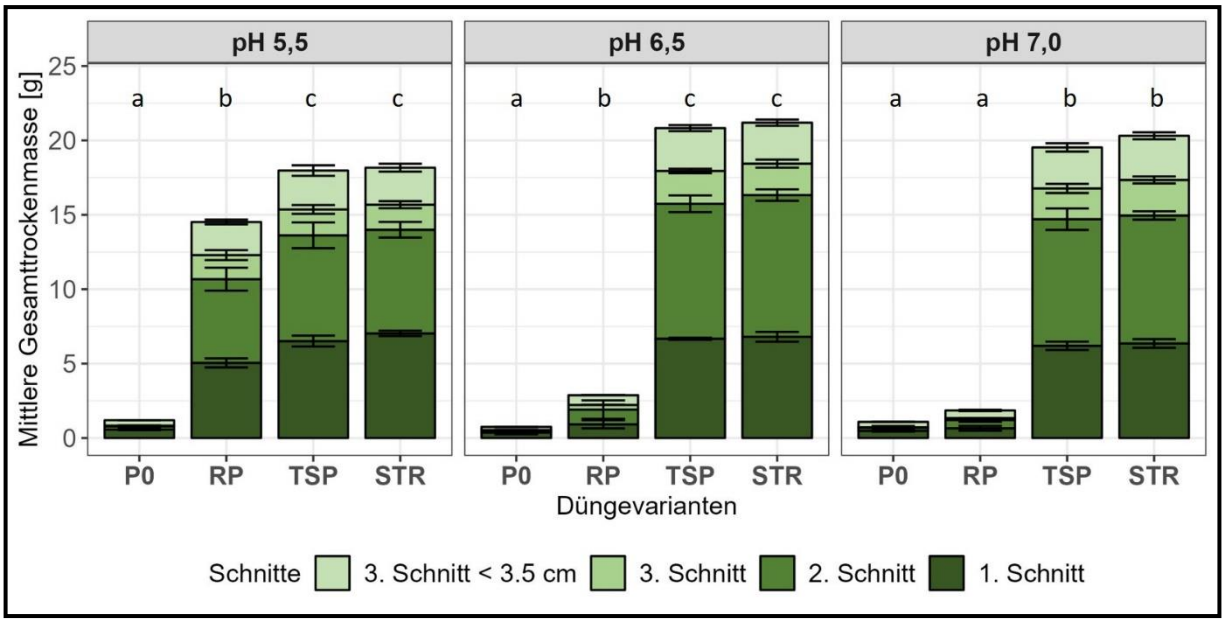

Abb. 5: Gesamtertrag (3 Schnitte) der oberirdischen Biomasse von Weidelgras mit verschiedenen P-Düngern (P0: ohne P, RP, TSP, STR) in einem nährstoffarmen Substrat bei unterschiedlichen pH-Werten im Gefäßversuch. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten bei p < 0,05 nach einfaktorieller ANOVA mit Tukey post hoc Test (separater Test für jedes Versuchsdesign, bezogen auf den Gesamttrockenmasseertrag aller Schnitte); Fehlerbalken geben die Standardabweichung des jeweiligen Schnitts an.

erfolgte mit der betriebseigenen Technik der jeweiligen Landwirte. Der Fokus lag dabei auf der Unterfußdüngung bei der Aussaat. In einem Betrieb wurde aber auch eine breitflächige Ausbringung mit einem Schleuderstreuer mit anschließender Einarbeitung in den Boden erprobt.

Die Unterfußdüngung mit Struvit-Pellets erwies sich in der Praxis vor allem mit pneumatischen Sämaschinen als gut durchführbar, sofern die Ausbringungsmenge nicht über 3,1 dt/ha (≙ ca. 65 kg P_2O_5/ha) lag, was für die P-Düngung unterfuß meist ausreichen dürfte. Höhere Ausbringungsmengen führten zu verstärktem Abrieb der Pellets und teilweise zum Verstopfen der Schläuche an den Sämaschinen. Die breitflächige Ausbringung von Struvit-Pellets (3,9 dt/ha) mit einem Schleuderstreuer auf 36 m Breite führte zu einem zufriedenstellenden Streubild (Streumattentest), auch wenn die Pellets beim Auftreffen auf die Schleuderscheiben teilweise zerbrachen.

Für die Versuche wurden P-bedürftige Kulturen gewählt. Neben konventionellem Silo- und Körnermais sowie Stärkekartoffeln wurden auch ökologisch angebauter Körnermais und Speisekartoffeln betrachtet. Dem regionalen Ansatz des Projektes entsprechend wurden die Versuche mit Landwirten aus der Region zwischen „Harz und Heide“ durchgeführt. Die Flächen in dieser Region weisen häufig einen guten bis sehr guten P-Versorgungszustand (P-Gehaltsklasse C nach VDLUFA oder höher) auf. Durch den hohen Anteil bodenbürtigen Phosphors war lediglich eine Erhaltungsdüngung in Höhe des erwarteten P-Entzugs über das Erntegut notwendig. Die Flächen zeichnen sich

zudem oft durch eine kleinräumige Heterogenität hinsichtlich Bodenart, Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit aus, was sich in großen Streuungen innerhalb der Varianten widerspiegelte.

Wie unter diesen Versuchsbedingungen zu erwarten gewesen war, konnten auf keiner Versuchsfläche signifikante Unterschiede zwischen einer Düngung mit Struvit und der betriebsüblichen P-Düngung festgestellt werden. Damit zeigten die Versuche jedoch, dass eine Düngung mit Struvit unter den gegebenen Bedingungen die Pflanze genauso gut in die Lage versetzt, sich ausreichend P anzueignen wie eine Düngung mit einem mineralischen, voll wasserlöslichen P-Mischdünger.

4.2.3 Containerversuch 2023-2025

Die Anlage eines mehrjährigen Containerversuchs in 1.000 L IBCs im Herbst 2023 stellt einen Kompromiss zwischen Gefäß- und Feldversuch dar. Ermöglicht werden soll die klare Isolation des P- (und Mg-)Düngeeffekts von Struvit unter kontrollierten und reproduzierbaren Versuchsbedingungen, wobei der Pflanze ausreichend Raum zur vollständigen Wurzelentwicklung zur Verfügung gestellt wird. Die Größe der Container ermöglicht den Einsatz von STR, RP und DAP in granulierter Form sowie den Anbau mehrerer Versuchskulturen (Fruchtfolge: Welsches Weidelgras [Zwischenfrucht] – Mais – [Zwischenfrucht] – Kartoffeln) bis zur Ertragsreife. Durch die Verwendung eines definierten, nährstoffarmen Substrats („JKI-Standardsubstrat 2023“) werden P-Mangelbedingungen geschaffen, die eine umfassendere Bewertung der Düngewirkung erlauben, als es in den On-Farm-Feldversuchen möglich war. Alle Makro- und Mikronährstoffe (außer P und ggf. Mg) werden durch Düngerlösungen im Überschuss bereitgestellt und eine gleichbleibende Wasserversorgung sichergestellt (Kapitel 4.2.1).

4.3 Bewertung

Im Gefäßversuch konnte gezeigt werden, dass STR eine vergleichbare Düngewirkung wie herkömmliches, voll wasserlösliches TSP besitzt. Aufgrund der guten P-Versorgung der On-Farm-Versuchsböden erlaubten die Feldversuche nur eingeschränkte Aussagen zur P-Düngewirkung (s.o.). Sie zeigten aber, dass sich STR zur Erhaltungsdüngung eignet und dass eine großflächige Ausbringung sowohl unterfuß als auch breit gestreut mit bereits vorhandener Technik möglich ist. Der mehrjährige Containerversuch mit einem nährstoffarmen, standardisierten Versuchssubstrat soll dabei helfen, die in Gefäßversuchen erzielten Erkenntnisse in einem größeren Maßstab zu bestätigen.

Im Vergleich zu rohphosphatbasierten Düngemitteln enthält STR zudem kaum Schwermetalle (Cadmium und Uran) (Zeggel et al. 2015) und ist verglichen mit Klärschlamm weitgehend antibiotikafrei (Bloem et al. 2023), was ihn zu einem vielversprechenden P-Recyclingdünger macht.

5. Rechtlicher Rahmen von Struvit

Von der Erzeugung auf der Kläranlage bis zur Ausbringung auf dem Feld fällt Struvit unter verschiedene Rechtsbereiche. Hierzu zählen das Wasserrecht, das Abfallrecht,

das Chemikalien- und das Düngemittelrecht und je nach Organisation der Landwirte bzw. ihrer Produktion sind auch das Wasserverbands- und das Ökolandbaurecht zu beachten. Ergänzend gilt es die nationale und europäische Rechtsprechung zu berücksichtigen. Daher wurde ein Rechtsgutachten in Auftrag gegeben, um die für Struvit relevanten rechtlichen Regelungen im Detail darzustellen und juristisch zu bewerten (Douhaire, 2023)[1].

Es ist wichtig zu wissen, dass sich der nationale Rechtsrahmen für Struvit im Umbruch befindet, insbesondere steht in diesem Jahr eine Änderung der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) an. In der folgenden Aufzählung werden holzschnittartig die zentralen Eckpfeiler des geltenden rechtlichen Rahmens, wie er sich aktuell darstellt, aufgezeigt:

- Anlagenkomponenten zur Struvitfällung (siehe Kap. 2) sind als integraler Bestandteil der Anlagen zur Abwasserbehandlung zu sehen und unterliegen als solche dem Wasserrecht.
- Mit der Entnahme des gefällten Struvits aus der Wasser- bzw. Schlammphase ist die Abwasserbehandlung abgeschlossen. Die weiteren Prozessschritte zur Aufbereitung des Struvits bis zum Struvitdünger unterliegen dem Abfallrecht, bis das Abfallende eindeutig bestimmt ist.
- Das Abfallende kann nach nationalem Recht erreicht werden, wenn die allgemeinen Abfallendkriterien des Art. 6 Abs. 1 der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL), die durch § 5 Abs. 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrwG) ins nationale Recht umgesetzt wurden, erfüllt sind. Im Fall der Inverkehrbringung als Dünger gehört dazu insbesondere, dass die Anforderungen der DüMV erfüllt sind und eine düngemittelrechtliche Kennzeichnung möglich ist. Nach aktuellem Stand kann Struvitdünger aufgrund eines gemeinsamen Beschlusses der Düngemittelverkehrskontrollstellen trotz fehlender Wasserlöslichkeit als mineralischer NP-Dünger deklariert werden.
- Das Abfallende nach europäischem Recht ist erreicht, wenn das einschlägige Konformitätsbewertungsverfahren nach VO (EU) 2019/1009 („FPR“), hier: Modul D1, erfolgreich durchlaufen und eine CE-Kennzeichnung erfolgt ist. Voraussetzung dafür ist, dass das aus Struvit hergestellte EU-Düngeprodukt die Anforderungen der FPR erfüllt.
- Ergänzend gilt es zu wissen, dass Struvit durch die Aufnahme in Anhang II der VO (EU) 2021/1165 (Positivliste zur EU-Ökoverordnung 2018/848) im Ökolandbau eingesetzt werden darf, sofern die entsprechenden Dünger das Konformitätsbewertungsverfahren erfolgreich durchlaufen haben (siehe VO (EU) 2023/121).

---

[1] Dieses Gutachten wird aktuell erweitert und ergänzt. In Kürze wird eine aktualisierte Publikation mit erweitertem Autorenkollektiv erfolgen.

- Eine direkte Abgabe von Struvit durch Wasser- und Bodenverbände an ihre Verbandslandwirte ist ebenfalls möglich, sofern die Vorgaben des nationalen oder des europäischen Düngemittelrechts eingehalten sind.

6. Institutionen und Akteure

Ein wesentliches Ziel von P-Net neben der Stärkung der Struvit-Schiene ist auch die Regionalität. Hier stellt sich die übergeordnete Frage, wie diese Veränderung in der Abwasserbehandlung hin zur Struvitherstellung und -nutzung mit Blick auf die dafür notwendigen Akteursnetze gelingen kann (Rauchecker et al. 2024). Dafür wurden neben der Analyse des rechtlichen Rahmens (siehe Kap. 5) über Experteninterviews Schlüsselakteure und mögliche Struvitnetzwerke identifiziert.

6.1. Schlüsselakteure

Um diese kreislauforientierte Verwertung und Nutzung von Phosphor, welches auf Kläranlagen als Struvit anfällt, zu etablieren, ist eine Vielzahl von Akteuren zu berücksichtigen. Hierzu zählen Kläranlagenbetreiber, Düngemittelproduzenten/-mischer, Groß-/Landhandel, landwirtschaftliche Berater und Lohnunternehmer, Landwirte, ebenso wie die Lebensmittelindustrie und -handel, staatliche Regulierungs- und Kontrollinstanzen, Forschungseinrichtungen, aber auch Verbände für Phosphorrecycling. Als Schlüsselakteure im Kern des Akteursnetzes sind hier sicherlich die Kläranlagenbetreiber, Düngemittelproduzenten bzw. -mischer als auch die Landwirte selbst zu nennen. Wenn Struvit/Struvitdünger regional berücksichtigt werden soll, müssen sie ihre Prozesse verändern und alltägliche Routinen anpassen. Im Folgenden wird lediglich auf die drei Schlüsselakteure in detaillierter Form eingegangen.

Kläranlagenbetreiber. Aufgrund der rechtlichen Anforderungen müssen sich ein Großteil der Kläranlagenbetreiber mit Phosphorrückgewinnung auseinandersetzen und sind an der Thematik interessiert. Die Struvitfällung ist insbesondere zur Betriebssicherung schon bekannt und bei den bereits bestehenden Anlagen zur Phosphorrückgewinnung sind Struvitfällungsverfahren in der Mehrheit. Allerdings zeigt der Trend beim Neubau und der Umrüstung von bestehenden Anlagen eindeutig in Richtung der Monoverbrennung.

Düngemittelproduzenten und -mischer. Düngemittelhersteller, die mit Ausgangsstoffen aus dem Abfallbereich arbeiten, haben großes Interesse an Rohstruvit und arbeiten mit dem Material (siehe Kap. 3). Laut Interviewpartnern werden im Bereich der Phosphorrecyclingdünger übergreifend jedoch Aschen bevorzugt, da diese technisch ausgereifter seien als Rohstruvit und leichter in bestehende Düngerproduktionsprozesse integriert werden könnten. Allerdings gibt es aktuell keine Dünger aus Asche auf dem Markt.

Landwirte. Hier gilt es klar zwischen konventionell und ökologisch wirtschaftenden Landwirten zu unterscheiden. Bei konventionellen Landwirten und ihren Verbänden besteht an Struvitdünger wenig Interesse, allerdings ist dies nicht in einer grundsätzlichen Ablehnung begründet und es gibt Unterschiede, wie die

Zielgruppensegmentierung der Zielgruppen- und Marktanalyse gezeigt hat (siehe Kap. 3.3). Im Ökolandbau werden auf Struvitdünger teilweise große Hoffnung gesetzt, da er als umweltfreundlicher, gut wirksamer Dünger, der den Nährstoffkreislauf schließt und das problematische Rohphosphat ersetzt, wirklich gebraucht wird. Nach der Aufnahme in die Positivliste der EU-Ökoverordnung (siehe Kap. 5) beginnen interessierte Ökolandbauverbände ihrer bestehenden Regularien bezüglich Struvitdünger zu prüfen.

6.2. Mögliche Struvitnetzwerke

Ausgehend von den oben beschriebenen Schlüsselakteuren könnte durch entsprechende institutionelle Arrangements eine regionale Kreislaufschließung durch Struvitdünger vorangetrieben werden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wer innerhalb eines solchen Struvitnetzwerks zum Initiator wird bzw. wie diese sich ausbilden könnten. Seitens der Kläranlagenbetreiber wären hier zwei verschiedene Konstellationen vorstellbar. Einerseits könnten Kläranlagenbetreiber in die Direktvermarktung gehen. Die zweite Möglichkeit eines solchen wasserseitig initiierten regionalen Struvitnetzwerks und Direktvertriebs wäre ein Zusammenschluss von Kläranlagenbetreibern. Diese Möglichkeit steht Kläranlagen offen, die z.B. die Rechtsform des Eigenbetriebes haben (für Verbände wird eine formale Zusammenarbeit hingegen schwierig). Weiterhin könnten Düngemittelhersteller, die mit Ausgangsstoffen aus dem Abfallbereich arbeiten, oder evtl. auch Düngermischer eine initiierende Schlüsselfunktion in einem regionalen Struvitnetzwerk übernehmen. Wichtig für Düngemittelhersteller wären verbindliche Abgabemengen von den Anlagenbetreibern, die über Lieferverträge abgesichert werden könnten.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen von P-Net erzeugten Ergebnisse haben gezeigt, dass eine Kombination aus anaerob-biologischer P-Remobilisierung und Struvit-Fällung eine betriebsmittelarme und attraktive Verfahrensalternative zur P-Rückgewinnung für die Kläranlagenbetreiber darstellen kann. Hierdurch kann einerseits eine hohe Recyclingquote erreicht und die P-Rückgewinnungspflicht der Klärschlammverordnung erfüllt werden. Andererseits schafft die gezielte Struvit-Fällung neben der Möglichkeit zur regionalen P-Kreislaufschließung synergetische Anreize durch den Schutz der Anlagenkomponenten vor Bildung unkontrollierter Inkrustationen. Als nächster Schritt soll anhand der großtechnischen Implementierung dieses Verfahrens die Untersuchung seiner Auswirkung auf das Gesamtsystem der Abwasserreinigung sowie auf die P-Ströme auf der Kläranlage ermöglicht werden.

Struvite aus verschiedenen Anlagen werden im Struvit-Hub, welcher im Rahmen von P-Net etabliert wurde, klassifiziert und zwischengelagert. Nach einer Qualitätsprüfung durch Störstoff-, Nährstoff- und Schadstoffanalysen werden Düngemittel in Form von Pellets oder Granulaten produziert. Die Kunst der Herstellung eines für die Applikation geeigneten Produktes besteht vor allem in der gleichbleibenden Qualität des Endproduktes. Eine weitere Herausforderung bei der Herstellung besteht in den physikalischen Eigenschaften des Endproduktes. Ein zu wenig scherstabiler Dünger kann z.B.

bei der Aufbringung problematisch werden und eine zu hohe Stabilität die Verfügbarkeit der Nährstoffe für die Pflanzen beeinträchtigen.

Die erfolgreiche Vermarktung des Struvitdüngers erfordert eine stabile Grundabsatzmenge. Dies erfolgt durch die Aktivität von Soepenberg als P-Net-Projektpartner mittels Sammlung verschiedener Struvite und Konfektionierung von Düngemitteln in dem Stuvit-Hub. Die ökologische Landwirtschaft wurde als prioritäre Zielgruppe des Struvits identifiziert, gefolgt von Landwirten, die bisher z.B. Klärschlamm eingesetzt haben. Basierend auf diesen Analysen wurde ein Markenkonzept erarbeitet.

Darüber hinaus haben zahlreiche Untersuchungen zur agronomischen Bewertung bestätigt, das Struvit gleichwertig mit konventionellen P-Düngern ist. Als weiterer Vorteil des Struvits ist seine geringe Schadstoffbelastung zu nennen, da es im Vergleich zu mineralischen P-Düngern kaum schwermetallbelastet und im Gegensatz zu Klärschlamm nahezu antibiotikafrei ist. Die Applikationsversuche zur praktischen Aufbringung des erzeugtem Struvits sind vielversprechend, da sich die hergestellten Dünger sowohl für Unterfußdüngung, als auch für Streuung eignen. Die laufenden agronomischen Untersuchungen zielen darauf ab, die im Kleinmaßstab (Gefäßversuche) erzielten Ergebnisse in größerem Maßstab (Containerversuche) zu validieren, um die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf reale Bedingungen zu prüfen.

Zu einer detaillierten Darstellung der für die Struvit-Fällung relevanten rechtlichen Aspekte wurde ein Rechtsgutachten in Auftrag gegeben (Douhaire, 2023). Dieses hat herausgearbeitet, wie Struvitdünger gemäß nationalem als auch europäischem Rechtsrahmen in den Verkehr gebracht werden kann. Dieses Gutachten wird aktuell erweitert und ergänzt. In Kürze wird eine aktualisierte Publikation mit erweitertem Autorenkollektiv erfolgen.

Wichtig darüber hinaus war es, für die Etablierung der regionalen Netze die Schlüsselakteure sowie grundsätzlich mögliche Struvitnetzwerkkonstellationen zu identifizieren. So wurde herausgearbeitet, wie eine weitere Verbreitung der Struvit-Schiene von der Gewinnung des Rohstruvits bis zur landwirtschaftlichen Nutzung im Zusammenhang mit den notwendigen Akteursnetzen erfolgen kann. Als Schlüsselakteure sind die Kläranlagenbetreiber, Düngemittelproduzenten bzw. -mischer sowie die Landwirte zu nennen.

Insgesamt haben die bisherigen Ergebnisse aus P-Net-Aktivitäten gezeigt, dass die Struvitschiene ein funktionierendes Verfahren zur P-Rückgewinnung und zur Einhaltung der Anforderungen der AbfKlärV bzgl. P-Recycling anbietet. Zudem weist der erzeugte Struvitdünger sehr gute Düngeeigenschaften hinsichtlich der Zusammensetzung und Pflanzenverfügbarkeit sowie bei der praktischen landwirtschaftlichen Applikation auf. Somit ist es möglich, durch die Struvit-Schiene den P-Kreislauf im Sinne der „circular economy“ zu schließen.

Danksagung: Das Vorhaben *P-Net* „Aufbau eines Netzwerks zum ressourceneffizienten Phosphor-Recycling und -Management in der Region Harz und Heide“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung in der Fördermaßnahme

RePhoR unter dem Förderkennzeichen O2WPR1542A-H gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Literatur

Bloem, E.; Albert, S.; Thiel, M.; Keßeler, P.; Clemens, J; Kolb, A.; Dockhorn, T. (2023): Process factors affecting the contamination of struvite by selected antibiotics. Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=4610776 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4610776

Dockhorn, T. (2005): Offenlegungsschrift DE 10 2005 040 018 A1

Dockhorn, T. (2007): Rückgewinnung von Phosphat aus Abwasser und Klärschlamm mit dem Peco-Verfahren. Müll und Abfall, Nr. 8, 2007, S. 380-386

Douhaire, C. (2023): Herstellung und Inverkehrbringung von Struvitdünger rechtssicher gestalten. Gutachten zu aktuellen rechtlichen Fragen. Mit einem Vorwort von Markus Rauchecker, Engelbert Schramm und Martina Winker. ISOE-Materialien Soziale Ökologie 70. Frankfurt am Main: ISOE - Institut für sozial-ökologische Forschung

Esemen, T. (2012): Untersuchungen zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung der Nährstoffrückgewinnung aus Klärschlamm. Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig, Heft 83, Braunschweig

Hall, R. L.; Staal, L. B.; Macintosh, K. A.; McGrath, J. W.; Bailey, L. et al. (2020): Phosphorus speciation and fertiliser performance characteristics: A comparison of waste recovered struvites from global sources. In: Geoderma 362, S. 114096.

Hertzberger, A. J.; Cusick, R. D.; Margenot, A. J. (2020): A review and meta-analysis of the agricultural potential of struvite as a phosphorus fertilizer. In: Soil Sci. Soc. Am. J. 84(3), S. 653-671.

Kratz, S.; Haneklaus, S.; Schnug, E. (2010): Chemical solubility and agricultural performance of P-containing recycling fertilizers. In: Landbauforschung - vTI Agriculture and Forestry Research 60 (4), S. 227-240.

Kratz, S.; Vogel, C.; Adam, C. (2019): Agronomic performance of P recycling fertilizers and methods to predict it: a review. In: Nutr Cycl Agroecosyst 115, S 1-39. DOI: 10.1007/s10705-019-10010-7

Le Corre, KS; Valsami-Jones, E; Hobbs, P; Parsons, SA. (2009): Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization: A Review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2009;39:433–77. doi:10.1080/10643380701640573

Mohammadi, H; Kolb, A.; Dockhorn, T. (2023): Optimierte P-Rücklösung und Struvit-Fällung zum nachhaltigen P-Recycling. DWA-Klärschlammtage am 23.-25.05.2023, Würzburg

Pillen, J.; Götz, K; Winker, M; (2023): Struvitdünger und seine Möglichkeiten für den Markteintritt. Zielgruppen- und Marktanalyse für die Region "zwischen Harz und Heide". ISOE-Materialien Soziale Ökologie 71. Frankfurt am Main: ISOE - Institut für sozial-ökologische Forschung

Rauchecker, M. et al. (2024): Transformation zu einer nachhaltigen regionalen Phosphor-Kreislaufwirtschaft durch den Aufbau von Struvit-Netzwerken. ISOE-Materialien Soziale Ökologie. Frankfurt am Main: ISOE - Institut für sozial-ökologische Forschung. In Vorbereitung.

Zeggel, L.; Riedel, H.; Marb, C. (2015): Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen – Abschlussbericht. Bayrisches Landesamt für Umwelt (LfU). Augsburg

<u>Kontakt:</u>

Prof. Dr.-Ing. Thomas Dockhorn
Institut für Siedlungswasserwirtschaft
Technische Universität Braunschweig
Pockelsstraße 2a, 38106 Braunschweig
E-Mail: t.dockhorn@tu-bs.de
https://p-net.tech/

P-Net
GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
RePhoR
REGIONALES PHOSPHOR-RECYCLING