



Vom Abfall zur Ressource – Recycling von Klärschlamm- Asche zu phosphatreichem Pflanzendünger

Wie kann der im Klärschlamm enthaltene Phosphor genutzt werden, um den Phosphorkreislauf besser zu schließen.



Motivation

Phosphor ist ein essenzieller Dünger in der Landwirtschaft, kommt aber nur begrenzt und regional konzentriert vor und wird unter umweltschädlichen Bedingungen abgebaut. Aufgrund seiner Bedeutung und der hohen Importabhängigkeit steht er seit 2014 auf der Liste der kritischen Rohstoffe der EU. Rund 90 % des Phosphors im Abwasser verbleiben im Klärschlamm – fast 7.000 Tonnen jährlich in Österreich und 8.000 Tonnen in der Tschechischen Republik.

Die Klärschlammverwertung unterscheidet sich in den beiden Ländern: Während in der Tschechischen Republik die landwirtschaftliche Nutzung dominiert, wird in Österreich der größte Teil des Klärschlammes verbrannt, wobei Wien die Monoverbrennung einsetzt. In Österreich wird ab 2033, abseits von Vorortlösungen, die Klärschlammverbrennung für größere Kläranlagen verpflichtend, wobei 80 % des Phosphors aus der Asche zurückgewonnen werden muss. Die Tschechische Republik plant strengere Gesetze zur Begrenzung der landwirtschaftlichen Nutzung und fördert alternative Entsorgungsmethoden für Klärschlamm, wobei die thermische Verwertung die Hauptoption darstellt.

Die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm-Asche ist aufgrund der gleichzeitigen Belastung mit Schwermetallen herausfordernd. Darüber hinaus macht die Verwendung von kommerziellen Säuren zur Laugung und anschließenden Fällung den Prozess wirtschaftlich und ökologisch anspruchsvoll. PHOS4PLANT erforscht alternative Verfahren zur Verbrennung von Klärschlamm, zur Laugung und Fällung von Phosphor, die eine umweltfreundliche Alternative zur Gewinnung von hochwertigem Dünger auf Basis biologischer Prozesse darstellen könnten.

Aktueller Stand der Forschungsarbeiten in Arbeitspaket 3 *Bioelektrochemische Phosphorrückgewinnung in Form von Struvit*

Nach der Laugung von Phosphor aus Klärschlamm-Asche mittels biogener Schwefelsäure wird der gelöste Phosphor im nächsten Schritt als Struvit ausgefällt. Struvit (Ammonium-Magnesium-Phosphat) ist ein wertvoller Recyclingdünger und leistet einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Rückgewinnung von Phosphor.

Die Fällung erfolgt im alkalischen Bereich bei einem pH-Wert von etwa 8 bis 10 und wird üblicherweise durch die Zugabe von Basen wie Natriumhydroxid erreicht. Im Projekt wird als Alternative zur konventionellen chemischen Fällung ein bioelektrochemisches System zur Struvitbildung untersucht (siehe Abbildung 1). Dieses besteht aus einer Bioanode und einer Kathode, die durch eine Membran voneinander getrennt sind. An der Bioanode wird eine aus Klärschlamm gewonnene Mischkultur eingesetzt, die von der Masaryk-Universität (MU) molekularbiologisch analysiert und charakterisiert wurde. Die Mikroorganismen werden regelmäßig mit synthetischem Abwasser als Substrat versorgt und bauen die darin enthaltenen organischen Verbindungen zu CO_2 ab. Dabei werden Elektronen freigesetzt, die über einen externen Stromkreis zur Kathode transportiert werden. An der Kathode wird Wasser zu Wasserstoff (H_2) und Hydroxidionen (OH^-) reduziert. Die Bildung von Hydroxidionen führt zu einem Anstieg des pH-Wertes im Kathodenraum und schafft damit die notwendigen alkalischen Bedingungen für die Struvitfällung. Unter diesen Bedingungen reagieren die im Elektrolyten gelösten Ionen Ammonium (NH_4^+), Magnesium (Mg^{2+}) und Phosphat (PO_4^{3-}) zu Struvit, das sich entweder auf der Kathodenoberfläche (siehe Abbildung 1) abscheidet oder in der Lösung auskristallisiert.

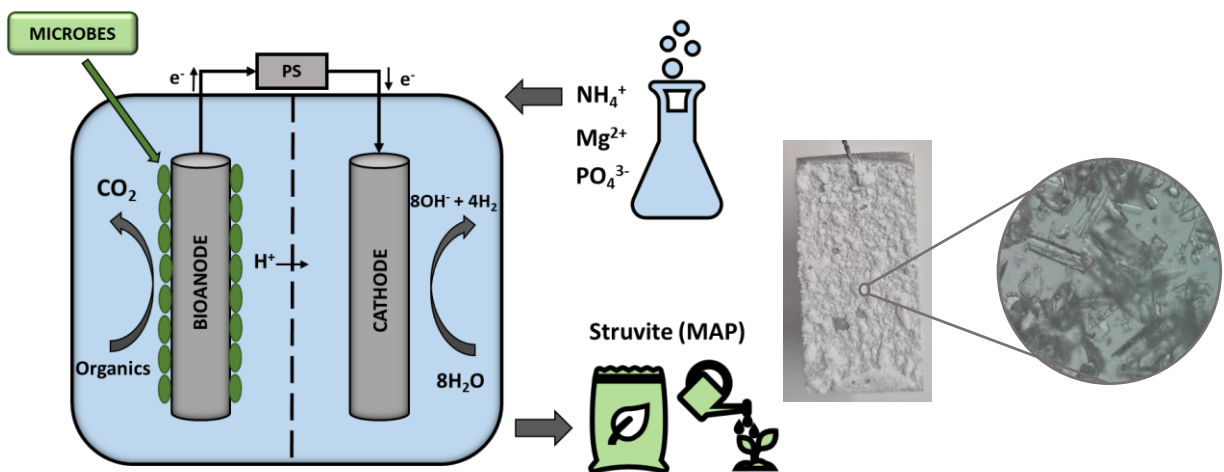


Abbildung 1: Schematische Darstellung des bioelektrochemischen Systems und Struvitbildung an der Kathode inklusive mikroskopischer Aufnahme des Niederschlags.

Das ausgefällte Struvit wird abfiltriert, und die analytische Charakterisierung des gebildeten Produkts erfolgt mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) durch die MU. Zur Bestimmung der Rückgewinnungsraten von Phosphor, Magnesium und Ammonium wird der Katholyt nach der Struvitabtrennung mittels photometrischer Messungen auf nicht umgesetzte Ionen untersucht. Ergänzend werden ICP-MS Messungen von der MU durchgeführt, um die Rückgewinnungsrate von Phosphor zu bestimmen.

Durch den Einsatz des bioelektrochemischen Systems kann die erforderliche pH-Anhebung ohne externe Basenzugabe erreicht werden, was den Prozess besonders ressourceneffizient und nachhaltig macht.

Erste Versuche wurden mit einer synthetischen Laugungslösung durchgeführt, die die für die Struvitbildung notwendigen Ionen enthielt. Dabei wurden die molaren Verhältnisse von Phosphor, Magnesium und Ammonium variiert, um die Phosphorrückgewinnung zu optimieren. Zusätzlich wurden unterschiedliche Membrantypen getestet, um deren Einfluss auf den Prozess zu untersuchen.

Mit dem synthetischen Leachate konnten bereits Phosphorrückgewinnungseffizienzen von über 90 % erzielt werden. Erste XRD-Analysen bestätigen bereits die Bildung von Struvit neben weiteren Phosphatderivaten.

In den nächsten Arbeitsschritten wird das reale Leachate aus der Phosphorlaugung mittels biogener Schwefelsäure im bioelektrochemischen System getestet.

Grundlagen schaffen: Datenanforderungen für die Ökobilanzierung und die Lebenszykluskostenrechnung

Eine weitere Aktivität des PHOS4PLANT-Projekts zielt darauf ab, die Umweltauswirkungen und die wirtschaftliche Tragfähigkeit der innovativen Technologien zur Phosphorrückgewinnung des Projekts gründlich zu bewerten. Was ist eine Ökobilanz – und warum ist sie hier von Bedeutung? Eine Ökobilanz (LCA) ist eine standardisierte Methode (ISO 14044) zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen eines Produkts oder Prozesses von der Wiege bis zur Bahre – von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Entsorgung. Anstatt nur einzelne Emissionen oder den Energieeinsatz zu betrachten, zeichnet die Ökobilanz ein vollständiges Bild. Neben der Ökobilanz erfasst eine Lebenszykluskostenrechnung (LCC) die gesamten wirtschaftlichen Kosten innerhalb derselben Systemgrenze.

Zusammen ermöglichen diese Instrumente die Beantwortung einer zentralen Frage: Ist der neue biobasierte Phosphordünger – ökologisch und ökonomisch – wirklich besser als herkömmliche Alternativen? Es werden drei Prozessketten verglichen:

- V1 – PHOS4PLANT-Dünger: Klärschlammverbrennung (Drehrohrofen) → Karbonatisierung → biobasierte Laugung (plus herkömmliche Laugung als Benchmark) → Fällung
- V2 – Herkömmlicher Dünger auf Abfallbasis: Verbrennung (Wirbelschicht) → chemische Laugung (HCl oder H₂SO₄) → Fällung
- V3 – Dünger auf fossiler Basis: herkömmliche Herstellung aus primären mineralischen Rohstoffen

Das Projektteam entwickelte ein umfassendes Rahmenwerk zur Datenerfassung – bestehend aus einer Reihe strukturierter, benutzerfreundlicher Excel-Fragebögen und einem begleitenden Leitfaden –, das es allen Projektbeteiligten ermöglicht, die Stoff- und Energieflüsse ihrer Prozesse in einem einheitlichen, LCA-kompatiblen Format zu erfassen. Die Formulare erfassen Inputs (Energiequellen wie Strom, Wärme, Erdgas und Betriebsstoffe einschließlich Reagenzien wie Na₂CO₃, CaO, HCl und H₂SO₄), direkte Luft- und Wasseremissionen (z. B. Blei, Cadmium, Arsen), Düngemittelausbeute sowie die damit verbundenen Kosten pro Einheit.

Wie werden die Umweltauswirkungen gemessen? Das LCA-Berechnungsrahmenwerk, das bereits im vorläufigen Tabellenkalkulationsmodell entwickelt wird, orientiert sich an den etablierten Wirkungskategorien der CML-Methodik. Die beiden wichtigsten sind Klimawandel (gemessen in kg CO₂-Äquivalent, das die Treibhausgasbeiträge erfasst) und Versauerungspotenzial (kg SO₂-Äquivalent, relevant für Säureauslaugungsschritte). Weitere Wirkungskategorien sind Eutrophierung, Ökotoxizität, Toxizität und kumulativer Energiebedarf. Ergänzend zu den Umweltindikatoren werden für jede Prozessgruppe parallel dazu die Produktionskosten erfasst – einschließlich Energie, Betriebsmaterialien, Emissionsbehandlung und Düngemittelgutschriften –, was einen direkten Kostenvergleich zwischen den Varianten ermöglicht. In den nächsten Schritten wird die Datenerhebung parallel zur laufenden Prozessoptimierung im Labor erfolgen und in die für das dritte Projektjahr geplante vollständige Ökobilanz- und Lebenszykluskostenanalyse einfließen.

Disseminationsaktivitäten

Rebeka Frühholz (K1-MET) und Jiri Kucera (Masaryk-Universität) präsentieren ihre neuesten Forschungsergebnisse auf dem Internationalen Biohydrometallurgie-Symposium in Orléans (28. – 30. September 2026), einer bedeutenden internationalen Konferenz auf dem Gebiet der Biohydrometallurgie. Rebeka Frühholz konzentriert sich auf die Optimierung der bakteriellen Schwefeloxidation, einem Prozess, der letztendlich zur Schwefelsäureproduktion führt, während Jiri Kucera aktuelle Erkenntnisse zur Rolle einer neuartigen Rhodanese beim Schwefeltransport während dieses Prozesses vorstellt.

Die Technische Universität Brunn (BUT) veranstaltete am 26. November 2025 einen Workshop zum Thema „Phosphor und darüber hinaus: Kreislaufwirtschaftliche Ansätze in der Abfallwirtschaft“. Die Veranstaltung fand vor Ort an der Fakultät für Maschinenbau statt. Um eine breitere Beteiligung zu ermöglichen, wurde ein hybrides Format gewählt. Die Verbreitung der Projektergebnisse wurde durch die Einrichtung einer eigenen Projektwebseite auf der Webseite des Instituts für Verfahrenstechnik unterstützt. Dort wurden bisher drei Newsletter und weitere Aktualisierungen veröffentlicht, die umfassende Informationen zum Projekt bieten.

Die Kernideen des Projekts wurden außerdem in einem Artikel der tschechischen Fachzeitschrift „Technický týdeník“ vorgestellt. Der Artikel mit dem Titel „Vom Abfall zur Ressource: Phosphor aus Klärschlamm als Weg zu einer Kreislaufwirtschaft“ erschien am 10. März 2026 in der Ausgabe 03/2026. Parallel dazu hat die BUT in Zusammenarbeit mit den Projektbeteiligten mit der Erstellung eines Manuskripts begonnen, das zur Veröffentlichung in einer renommierten Fachzeitschrift vorgesehen ist. Der Arbeitstitel „Eine Pilotanlage zur Herstellung von vorbehandelter Klärschlammasche für die Phosphorrückgewinnung“ spiegelt den Schwerpunkt auf der thermischen Behandlung der Klärschlammasche wider, einschließlich der Bewertung der Schwermetallmobilität und Emissionsmessungen.

Die Universität für Bodenkultur nahm an einem von der BUT organisierten Stakeholder-Workshop teil. Darüber hinaus wurde das Projekt zweimal auf Universitätsebene vor Studierenden und Interessierten vorgestellt. Im April dieses Jahres organisiert die BOKU einen Workshop, um die Projektaktivitäten mit weiteren Stakeholdern zu besprechen. Das Projekt wird zudem im Rahmen der „Langen Nacht der Forschung“ vorgestellt, der größten Veranstaltung zur Wissenschaftskommunikation in Österreich.

Beteiligte Forschungsinstitutionen



Die K1-MET GmbH verfügt über eine ausgewiesene Expertise in der Entwicklung von Verfahren zur Behandlung von Reststoffen und Recyclingmaterialien mit dem Ziel der Wertstoffrückgewinnung und der Schließung von Stoffkreisläufen. Die Aufgaben von K1-MET sind die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammaschen durch indirektes Bioleaching bzw. mit Säuren und die anschließende Herstellung eines phosphatreichen Pflanzendüngers. Damit verbunden ist die Abtrennung von Störstoffen wie Metallen. K1-MET hat die Konsortialführung des Projekts.



Die Masaryk-Universität (MU) ist die zweitgrößte Universität in der Tschechischen Republik. An dem Projekt sind das Department für Biochemie, das Department für Chemie und das Department für Geologische Wissenschaften beteiligt. Das Team verfügt über langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der acidophilen Mikroorganismen, der molekularen Mechanismen der Pflanzen-Mikroorganismen-Interaktionen, der Struktur-Funktionsanalyse mikrobieller Gemeinschaften, der Metallanalytik und der Analyse von Biomolekülen.



Ein Team des Departments „Thermische Prozesse und Gasreinigung“ des Instituts für Verfahrenstechnik ist am Projekt beteiligt. Das Team verfügt über umfangreiche Erfahrungen auf dem Gebiet thermischen Prozesse und Emissionsbehandlung. Sie sind im Projekt für die Herstellung der Klärschlammasche verantwortlich. Das Institut verfügt unter anderem über einen Trommeltrockner und einen Drehrohrofen. Zudem steht eine analytische Infrastruktur zur Verfügung, die die Messung von Brennstoff- und Abfalleigenschaften sowie die Abgasanalytik ermöglicht.



Das Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft (ABF-BOKU) beschäftigt sich mit der sicheren Entsorgung und der Rückführung von Abfällen in den Wirtschaftskreislauf, um das Abfallaufkommen zu reduzieren und Ressourcen in der Primärproduktion einzusparen. Ihre Aufgaben im Projekt sind die Vorbehandlung der stark basischen Aschen, welche die biologische Laugung des Materials behindern, das Bioleaching der Klärschlammaschen und die Identifizierung von acidophilen Bakterien aus Klärschlämmen. Zusätzlich wird die gesamte Prozesskette mittels LCA bewertet.



Kofinanziert von der Europäischen Union



PHOS4PLANT



Das Projekt PHOS4PLANT (ATCZ00043) wird aus den Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) im Programm Interreg Österreich – Tschechien 2021 – 2027 kofinanziert.

Für den Inhalt verantwortlich: Nadine Kleinbruckner (K1-MET), Peter Beigl (ABFK-BOKU)