

## Abstract

Phosphorus (P) is a finite and non-substitutable resource, essential to sustain high levels of agricultural productivity. However, too high concentrations of P in ecosystems can cause eutrophication, an important environmental issue. Europe does not have noteworthy raw phosphate deposits and is therefore dependent on imports, the geopolitical situation, and raw material markets.

The first aim of this Thesis was the development of a detailed and complete phosphorus budget for Austria based on the methodology of a material flow analysis (MFA). As a first result of an Austrian P budget assessment, the dependence on mineral P fertilizers application ( $2 \text{ kg P cap}^{-1}\text{yr}^{-1}$ ) was confirmed. In contrast to that, further analysis highlighted considerable, but often unexploited P-loads in municipal wastewater ( $\sim 1 \text{ kg P cap}^{-1}\text{yr}^{-1}$ ) and animal by-products such as meat and bone meal ( $\sim 0.5\text{--}0.6 \text{ kg P cap}^{-1}\text{yr}^{-1}$ ).

Numerous recycling technologies have been developed and partially implemented over the past years to recover P from different sources of wastewater treatment plants (secondary treated effluent, digester supernatant, and (digested) sewage sludge) as well as from sewage sludge ashes. This work describes a methodology for a comparative technical, environmental and economic assessment of P-recycling and shows its applicability for 19 selected technologies. Out of this application, useful information for a possible future implementation can be derived for decision making.

The recovery technologies have not only been assessed as stand-alone processes, but also with regard to the impact on the total process chain – from the wastewater treatment plant influent to the final disposal of all occurring liquid and solid wastes. With this methodological approach interplays on the whole process chain in respect to technological requirements, environmental impacts and costs are included into the assessment.

The results show that there is not one final indicator based on which various technologies can be sufficiently compared and the best solution identified. The overall performance of a recycling technology under specific circumstances is described by the analysis of numerous assessment criteria. This work reveals for example, that technologies to recover P from digester supernatant are ready for application from a technical point of view. Consequently, there are already many cases where these technologies have been implemented on a full-scale, and in some cases, they even pay back economically. Simultaneously a clean and very good plant-available P rich material is produced.

However, to achieve the greatest recovery of P from wastewater, sewage sludge ashes should be addressed. To enable P recovery from ashes, the co-incineration of combustibles low in P, as well as high ash and high heavy metal contents should be avoided. In this context, the necessary structures such as the mono-incineration of sewage sludge have to be increased in Austria as prerequisite of implementation of these technologies. Further advantages of a mono-incineration strategy include the potential of the combined usage of other P rich flows (e.g., meat and bone meal) and the possible temporal storage of the occurring ashes for a future P recovery (creation of an Austrian P-mine).

On a national scale, the recovery of P from sewage sludge ash (SSA) will hardly pay back economically with costs being dependent on the required removal of pollutants and/or the quality of the recovered material or product. There is a wide range of available technologies for the production of P-fertilizers: Some fertilizers have very low heavy metal contents, a good P availability at relatively high costs, and moderate recycling rates. In contrast to that, a complete recycling of P in SSA would have moderate to no extra costs, compared to a reference system with ashes being put into landfills. However, this approach would result in a low P availability and would not include heavy metal depollution. Therefore, which technologies will finally be applied to recover P from SSA will depend on (legal) requirements on product quality and economic incentives from national authorities to support their implementation.

## **Kurzfassung**

Phosphor (P) ist eine endliche und nicht substituierbare Ressource, essentiell für die hohen Erträge in der Landwirtschaft. Emissionen von Phosphor in die Gewässer können jedoch zu einer Überversorgung und erheblichen Gewässergüteproblemen durch Eutrophierung führen. Da Europa über keine nennenswerten P Rohphosphatlagerstätten verfügt, ist es folglich auf Importe angewiesen und abhängig von geopolitischen Entwicklungen sowie den aktuellen Rohstoffmärkten. Nationale P Bilanzen bestätigen auf der einen Seite die Abhängigkeit von mineralischen Düngern auf Rohphosphatbasis ( $\sim 2 \text{ kg P pro Einwohner und Jahr}$ ), verdeutlichen jedoch gleichzeitig, dass kommunales Abwasser ( $\sim 1 \text{ kg P E}^{-1}\text{a}^{-1}$ ) sowie weitere P haltige Abfälle, wie z.B. Tiermehle ( $\sim 0.5\text{--}0.6 \text{ kg P E}^{-1}\text{a}^{-1}$ ), eine potentielle aber gegenwärtig zumeist ungenutzte P Ressource sind.

Zahlreiche Technologien wurden in den letzten Jahren mit dem Ziel der P-Rückgewinnung aus verschiedenen Teilströmen einer Kläranlage (Ablauf, Schlammwasser, Faulschlamm) sowie von Klärschlammaschen entwickelt und teilweise bereits großtechnisch umgesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden 19 ausgewählte P-Rückgewinnungstechnologien nach einer eigens entwickelten Methodik zusammengefasst und nach technischen, ökologischen und ökonomischen Kriterien bewertet. Dabei wurden sowohl die P-Rückgewinnungstechnologien an sich, als auch in Bezug auf die gesamte Prozesskette – vom Kläranlagenzulauf bis hin zur fachgerechten Entsorgung sämtlicher anfallender flüssiger und fester Reststoffe – betrachtet. Dies ermöglicht die Miteinbeziehung von Wechselwirkungen mit dem bestehenden Entsorgungssystem in Hinblick auf technische Anforderungen, Umweltauswirkungen und Kosten in der Bewertung. Die Ergebnisse liefern auch Grundlagen für Gesetzgeber und politischen Entscheidungsträger, die für Entwicklungen eines Konzeptes für ein zukünftiges optimiertes P-Management genutzt werden können.

Ein wichtiger Aspekt der Ergebnisse ist, dass kein einzelner finaler Bewertungsindikator zur Bewertung der teils sehr komplexen und verschiedenen technologischen Ansätze sinnvoll ist. Vielmehr ergeben die zahlreichen ausgewählten Bewertungskriterien ein Gesamtbild, welches eine Rückgewinnungstechnologie und deren technische Ausgereiftheit, deren Umweltauswirkungen und Kosten ganzheitlich beschreibt.

Diese Arbeit zeigt zum Beispiel, dass technisch bereits ausgereifte und vielfach bereits großtechnisch umgesetzte Methoden zur Rückgewinnung von P aus Schlammwasser, unter gewissen Voraussetzungen wirtschaftlich betrieben und gleichzeitig reine, sehr gut pflanzenverfügbare Endprodukte erzeugt werden können.

Mit dem Ziel einer größtmöglichen Nutzung des abwasserbürtigen Phosphors wäre zukünftig jedoch eine Rückgewinnung aus Klärschlammaschen anzustreben. Bei der Verbrennung des Klärschlammes sollte dabei eine Vermischung mit P-armen und schadstoffhaltigen Brennstoffen vermieden werden. Die dafür notwendigen Strukturen wie z.B. Monoverbrennungsanlagen müsste dazu allerdings noch ausgebaut werden. Weitere Vorteile einer „Monoverbrennungs-Strategie“ sind zum einen die Möglichkeiten der Nutzung weiterer P-reicher Stoffströme (z.B. Tiermehl) und zum anderen die Möglichkeit einer Zwischenlagerung der Asche mit dem Ziel einer späteren Rückgewinnung (Aufbau einer österreichischen Phosphormine).

Insgesamt ist nicht davon auszugehen, dass sich eine Implementierung von P-Recycling Technologien auf volkswirtschaftlicher Ebene finanziell rentieren würde. Die Kosten der eingesetzten Technologien werden dabei stark von den Anforderungen an Recyclingraten und Produktqualitäten bestimmt. So reicht die Spanne von Technologien, mit denen ein gut pflanzenverfügbares Produkt, mit sehr geringer Schwermetallbelastung, zu vergleichsweise höheren Kosten und mit geringer P-Rückgewinnung erzeugt werden kann, bis zu Technologien, bei denen mit im Vergleich zu einer Entsorgung der Klärschlammasche auf Deponien ohne oder mit nur geringen zusätzlichen Kosten, sehr hohen P-Recyclingraten, aber keiner Entfernung von Schwermetallen und geringer Verfügbarkeit des Phosphors zu rechnen ist. Welche Technologie(n) zur Behandlung der Klärschlammasche schlussendlich zum Einsatz kommen, wird von den (rechtlichen) Anforderungen an Recyclingraten und an die Produktqualität und von ökonomischen Anreizen durch die Verwaltung abhängen.

**Publikationen:**

L. Egle, H. Rechberger, J. Krampe, M. Zessner: "Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies"; Science of the Total Environment, 571 (2016), S. 522 - 542.

L. Egle, H. Rechberger, M. Zessner: "Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater"; Resources, Conservation and Recycling, 105 (2015), Dezember; S. 325 - 346.

L. Egle, O. Zoboli, S. Thaler, H. Rechberger, M. Zessner: "The Austrian P budget as a basis for resource optimization"; Resources, Conservation and Recycling, 83 (2014), February; S. 152 - 162.