

Klärschlamm – Nährstoffquelle und Schadstoffsenke

**BUND-Forderungen für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft
im Einklang mit Gesundheits-und Umweltschutz**

Inhalt

Zusammenfassung	3
Summary	5
1. Einführung und Anlass	7
2. Geschichte der Abwasserreinigung	8
3. Abwasserreinigung in Kläranlagen	9
4. Verwertung des kommunalen Klärschlamm	11
4.1 Verwertung (quantitativ)	12
4.2 Verwertung (qualitativ)	12
5. Die Nationale Wasserstrategie von 2023	14
6. Anforderungen der nachhaltigen Stoffpolitik und des Ressourcenschutzes an die Klärschlammverwertung	15
7. Inhaltsstoffe von Abwasser und Klärschlamm	17
7.1 Schadstoffe	17
7.2 Nährstoffe	20
7.2.1 Rohstoff Phosphor	22
7.2.2 Umweltwirkungen von Phosphor	24
8. Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor	26
8.1 Stoffliche Gesichtspunkte bei der Phosphorrückgewinnung	26
8.2 Energie und Klimabilanz der Verfahren zur Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung	29
9. Bestimmungen der Klärschlammverordnung	31
9.1 Vorschriften und Grenzwerte zu Schadstoffen	31
9.2 Bestimmungen zur Rückgewinnung von Phosphor	31
10. Bewertung der Verfahren	33
11. Forderungen und Empfehlungen	39
Anhang: Beispielhafte Verfahren zur Phosphorrückgewinnung	43
Literaturverzeichnis	55
Die politische Position des BUND/Friends of the Earth Germany	66

Zusammenfassung

Klärschlamm entsteht bei der Reinigung von Abwasser in Kläranlagen. In Kläranlagen werden organische Verunreinigungen, Chemikalien und Nährstoffe in mehreren Reinigungsstufen im Abwasser reduziert, mit dem Ziel, dass das gereinigte Abwasser die Qualität des Oberflächengewässers nicht negativ beeinflusst. Klärschlamm spielt dabei eine wesentliche Rolle, da sich in ihm sowohl nicht vollständig abgebaute organische Schadstoffe und Schwermetalle als auch insbesondere Phosphor als Nährstoff anreichern. In Deutschland fielen 2021 1,717 Mio.t Trockenmasse (TM) Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen an.

Noch in den 1990er Jahren wurde Klärschlamm überwiegend in Deponien abgelagert, aber auch bereits große Anteile landwirtschaftlich verwertet. Von Anfang an war die landwirtschaftliche Ausbringung umstritten, da sie zwar die Nährstoffe auf die Felder zurückführte, aber auch eine Belastung der Böden (und der Kulturpflanzen) mit schädlichen Stoffen zur Folge hatte. Die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) 1992 enthielt Grenzwerte für die maximale Belastung des landwirtschaftlich genutzten Klärschlammes mit schädlichen Stoffen; aber mit jeder Novellierung wurden diese die Grenzwerte verschärft und es kamen neue hinzu. Gleichwohl wurde die landwirtschaftliche Verwertung nach dem Deponieverbot 2005 zwischenzeitlich dominant. Bereits 2010 wurden dann bereits 53 % des Klärschlammes verbrannt, das meiste davon in Kohlekraftwerken, Zementwerken und in Abfallverbrennungsanlagen. Die Nährstoffe im Klärschlamm werden dabei nicht genutzt. Damit wird ein wichtiges Ziel der zirkulären Ökonomie, Kohlenstoff und Nährstoffe im Kreislauf zu führen, verfehlt.

Ziele einer ökologisch verträglichen Klärschlammverwertung sind:

- Der Klärschlamm soll möglichst schadstofffrei sein.
- Die Nährstoffe im Klärschlamm sollen in möglichst großem Umfang wieder genutzt werden.

Diese Anforderungen ergeben sich auch aus der Nationalen Wasserstrategie, die zum Ziel hat, dass die Oberflächengewässer mindestens einen guten ökologischen Zustand gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie haben. Auch eine nachhaltige Stoff- und Ressourcenpolitik fordert, die Schadstofffrachten im Abwasser zu verringern und nur noch abbaubare, nachhaltige Stoffe zu verwenden, die in Kläranlagen keine Probleme verursachen und vollständig eliminiert werden. Viel wurde in der Vergangenheit versäumt, um diese Ziele zu erreichen.

Es bleibt ein Fernziel, dass Klärschlamm so schadstoffarm wird, dass er ohne Bedenken bodenbezogen verwendet werden kann und der Nährstoffkreislauf auf diese Weise geschlossen wird.

Ein erster wichtiger Schritt in die richtige Richtung sind die Bestimmungen der AbfKlärV von 2017, wonach Klärschlamm insbesondere bei großen Kläranlagen künftig nicht mehr bodenbezogen (landwirtschaftlich oder landschaftsbaulich) verwertet, und der im Klärschlamm enthaltene Phosphor zurückgewonnen werden soll. Wesentliche Anteile des importierten Phosphats ließen sich durch Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm ersetzen.

Phosphor ist ein essentielles Element für das Pflanzenwachstum. Phosphat für Düngezwecke wird vor allem aus Nordafrika in die EU importiert. Die Phosphatvorkommen weltweit sind jedoch begrenzt, weshalb die EU Phosphor zu den kritischen Rohstoffen zählt. So erwünscht Phosphor für den Pflanzenbau ist, so unerwünscht ist er in Gewässern. Viele Binnengewässer sind überdüngt und die Qualitätsziele werden deutlich verfehlt (Eutrophierung).

Das Ziel, Phosphor aus Klärschlamm wiederzugewinnen, lässt sich auf zwei Arten erreichen. Entweder Phosphate werden aus Klärschlamm oder Zentratwasser ausgefällt und z. B. als Struvit (Magnesiumammoniumphosphat) abgetrennt; oder der Klärschlamm

wird thermisch behandelt und Phosphor aus den Rückständen gewonnen. Die Abtrennung durch Ausfällung ist in mehreren Verfahren großtechnisch umgesetzt, ist allerdings wenig effektiv (Rückgewinnung meist < 50%). Die meisten thermischen Verfahren setzen bei der Monoverbrennung des Klärschlammes an und isolieren die Phosphate aus der Klärschlamm-Asche. Monoverbrennungen lassen sich bei kleineren Kläranlagen nicht dezentral betreiben, sondern der Klärschlamm mehrerer Anlagen muss zur Verbrennung transportiert werden. Die Rückgewinnungsverfahren aus Asche sind deutlich effektiver (> 80% Rückgewinnung), allerdings meist noch nicht großtechnisch im Einsatz. Monoverbrennungen führen zu relativ hohen Emissionen von Treibhausgasen. Daneben befinden sich einige integrierte Verfahren in Erprobung wie hydrothermale Karbonisierung oder Pyrolyse, deren Energie- und Klimabilanz zwar günstiger ist, aber deren Vor- und Nachteile nicht ausreichend evaluiert sind. Gleichwohl ist anzustreben, dass diese Lösungsansätze eine Chance erhalten. Insgesamt sind bisher nur wenige Rückgewinnungsverfahren großtechnisch erprobt.

Aus Sicht des BUND

- sind entschlossene stoffpolitische Maßnahmen notwendig, um das Ziel einer schadstofffreien Umwelt („non toxic environment“) im Rahmen des Green Deal der EU zu erreichen und damit die Schadstoffbelastung des Abwassers deutlich zu senken.
 - ist die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm kurzfristig vollständig zu beenden.
 - falls gleichwohl Klärschlämme noch bodenbezogen verwertet werden dürfen, sind die Anforderungen von QLA/VDLUFA (Qualitätssicherung landbauliche Abfallverwertung) einzuhalten und einige Grenzwerte in der Klärschlamm- und in der Düngemittelverordnung zu verschärfen.
 - sind Klärschlämme mit erhöhten PFAS-Gehalten (> 100 µg/kg TM für die Summe von mindestens 23 Einzelverbindungen) einer Hochtemperaturverbrennung zuzuführen.
- sind bei der Verfahrensauswahl für die Phosphorrückgewinnung Effizienz der Verfahren, niedrige Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen, sichere Abtrennung von Schadstoffen und Pflanzenverfügbarkeit der Recyclate wichtige Kriterien.
 - sollten die Kläranlagenbetreiber bis Jahresende 2026 Zeit erhalten, sich für ein konkretes Verfahren auf der Grundlage einer vergleichenden Ökobilanz, die von unabhängiger Seite erstellt wird, zu entscheiden.
 - sind weitere Anforderungen und Forschungsinitiativen notwendig, um die Belastung von Oberflächengewässern mit Nährstoffen zu reduzieren.
 - sollten ein Abbau gesetzlicher Hürden und wirtschaftliche Anreize dazu beitragen, dass Recyclingphosphate mineralischen Primärphosphaten vorgezogen werden.

Summary

Sewage sludge emerges during the purification of wastewater in sewage treatment plants. In sewage treatment plants, organic contaminants, chemicals and nutrients are reduced in the wastewater in several treatment stages with the aim of ensuring that the treated wastewater does not negatively affect the quality of surface water. Sewage sludge plays an essential role in this process, as it accumulates both organic pollutants and heavy metals that have not been completely degraded and, in particular, phosphorus as a nutrient. In Germany, municipal sewage treatment plants generated 1.717 million tons of dry mass (dm) of sewage sludge in 2021.

As recently as the 1990s, sewage sludge was predominantly disposed of in landfills, but large proportions were also already being utilized for agricultural purposes. From the beginning, agricultural application was controversial. It returns nutrients to the fields, but also contaminates soils (and crops) with harmful substances. The 1992 Sewage Sludge Ordinance (AbfKlärV) contained limits for the maximum load of harmful substances in agricultural sewage sludge. With each amendment, these limits were tightened and new ones were added. Nevertheless, agricultural utilization became dominant in the meantime after the landfill ban in 2005. By 2010, 53% of sewage sludge was already being incinerated, most of it in coal-fired power plants, cement kilns and waste incineration plants. The nutrients in the sewage sludge are not recovered in such plants. This fails to achieve an important goal of circular economy, namely to keep carbon and nutrients in a cycle.

The goals of ecologically compatible sewage sludge utilization are:

- Sewage sludge should be as free of pollutants as possible.
- The nutrients in the sewage sludge should be reused to the greatest extent possible.

These requirements are also derived from the National Water Strategy, which aims to ensure that surface waters have at least a good ecological status in accordance with the EU Water Framework Directive. A sustainable materials and resources policy also demands that pollutant loads in wastewater are being reduced and that only degradable, sustainable substances are used that do not cause problems in sewage treatment plants and are completely mineralized. In the past, many opportunities have been missed to achieve these goals.

It remains a long-term goal that the pollutant content in sewage sludge becomes low enough to apply it without restriction to soil closing the nutrient cycle. A first important step in the right direction are the provisions of the Sewage Sludge Ordinance (AbfKlärV) of 2017, according to which sewage sludge, especially from large sewage treatment plants, should in future no longer be applied to the soil (for agricultural or landscaping purposes), and the phosphorus contained in the sewage sludge should be recovered. Substantial proportions of the imported phosphate could be replaced by phosphorus recovery from sewage sludge.

Phosphorus is an essential element for plant growth. Phosphate for fertilization is imported into the EU mainly from North Africa. However, phosphate reserves worldwide are limited, which is why the EU considers phosphorus to be a critical raw material. As desirable as phosphorus is for crop production, it is undesirable in water bodies. Many inland waters are overfertilized and quality targets are clearly missed (eutrophication).

The goal of recovering phosphorus from sewage sludge can be achieved in two ways. Either phosphates are precipitated from sewage sludge or centrate water and then separated, e.g. as struvite (magnesium ammonium phosphate); or the sewage sludge is thermally treated and phosphorus is recovered from the residues. Separation by precipitation has been

implemented on a large scale in several processes, but is not very effective (recovery usually < 50%). Most thermal processes start with mono-incineration of the sewage sludge followed by isolation of phosphorus from the sewage sludge ash. Mono-incineration cannot be decentralized for smaller sewage treatment plants, but the sewage sludge from several plants must be transported to an incineration plant. Ash recovery processes are much more effective (> 80% recovery), but most of them are not yet in large-scale use. Mono-incineration leads to relatively high emissions of greenhouse gases. In addition, some integrated processes are being developed, such as hydrothermal carbonization (HTC) or pyrolysis, whose energy and climate balance is more favorable, but whose advantages and disadvantages have not been sufficiently evaluated. Nevertheless, it is desirable to give these approaches a chance. Overall, only a few recovery processes have been tested on a large scale to date.

From the point of view of Friends of the Earth Germany (BUND) the following demands and recommendations are put forward:

- Determined chemicals and materials policy measures are necessary to achieve the goal of a non-toxic environment within the framework of the EU's Green Deal and thus to significantly reduce the pollutant load of wastewater.
- The application of sewage sludge to soil must be completely stopped in the short term.
- In cases where sewage sludge is still allowed to be applied to soil, compliance with the requirements of QLA/VDLUFA (Quality Assurance of Agricultural Waste Utilization) must be guaranteed. Some limit values in the Sewage Sludge and the Fertilizer Ordinances must be tightened.
- Sewage sludge with elevated PFAS contents (> 100 µg/kg dm for the sum of at least 23 individual compounds) are to be treated in a high-temperature incineration process.

- For the selection of processes for phosphorus recovery the following criteria are important: Efficiency of the processes, low emissions of greenhouse gases and air pollutants, safe separation of pollutants and plant availability of the recyclates are important criteria in the selection of processes for phosphorus recovery.
- Wastewater treatment plant operators should be given until the end of 2026 to decide on a specific process on the basis of a comparative life cycle assessment prepared by an independent party.
- Further requirements and research initiatives are necessary to reduce the nutrient load of surface waters.
- A reduction of legal hurdles and economic incentives should contribute to the preference of recycled phosphates over mineral primary phosphates.

1. Einführung und Anlass

Mit „Klärschlamm – Nährstoffquelle und Schadstoffsenke“ äußert sich der BUND nach 2005 erneut zu Klärschlämmen aus kommunalen Kläranlagen. Das damalige Positionspapier „BUNDposition Klärschlamm – BUNDForderungen für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Einklang mit Gesundheits- und Bodenschutz“ [BUND 2005] berücksichtigte noch nicht die aktuellen gesetzlichen und technischen Entwicklungen.

Die Herausforderungen sind geblieben: Wie lassen sich vor- und nachsorgender Umweltschutz so miteinander kombinieren, dass der Klärschlamm, insbesondere seine wertvollen Inhaltsstoffe, genutzt wird, ohne dass seine umweltgefährdenden Bestandteile verbreitet werden? Wie kann man die Schadstoffbelastung des Abwassers und damit des Klärschlammes reduzieren? Wie lassen sich die Wertstoffe im Kreislauf führen?

Der Rohstoff Klärschlamm ist einerseits eine Schadstoffsenke, d.h. die Abwasserreinigung ist so konzipiert, dass möglichst alle für Gewässer schädlichen Stoffe, die nicht vorher vermieden wurden, herausgefiltert werden. Sie werden entweder durch den Klärvorgang abgebaut oder an Klärschlamm adsorbiert. Dieser enthält dann ein komplexes, analytisch kaum erfassbares Substanzgemisch, darunter auch gefährliche Stoffe und Krankheitserreger, die nicht in die Umwelt gelangen sollten. Andererseits enthält Klärschlamm wertvolle Nährstoffe, insbesondere Phosphor. Diese gilt es in möglichst bioverfügbarer Form im Sinne der Kreislaufwirtschaft, vorrangig für Düngezwecke, wieder zu nutzen. Vorsorglich gilt: Je weniger Schadstoffe das Abwasser und der daraus entstehende Klärschlamm enthalten, desto einfacher ist er aufzuarbeiten und wieder zu verwenden.

Der rechtliche Rahmen hat sich gegenüber 2005 verändert: Die Bundesregierung hat 2017 die „Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost“ (AbfKlärV) novel-

liert [Bundesregierung 2017]. Diese Verordnung verfolgt unter anderem die folgenden Ziele (siehe Abschnitt 9):

- die bisher geltenden Anforderungen an die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung werden verschärft und der Anwendungsbereich der Verordnung auch auf Maßnahmen des Landschaftsbaus ausgedehnt. Klärschlamm soll künftig in der Regel nicht mehr direkt auf Äcker und Felder ausgebracht werden.
- Als zentrales Element sieht die Verordnung erstmals umfassende Vorgaben zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen und Klärschlammverbrennungsrückständen vor. Phosphor soll zurückgewonnen werden, um entweder für Düngezwecke oder zur Herstellung chemischer Produkte eingesetzt zu werden. Die Abhängigkeit von Phosphatimporten soll dadurch gesenkt werden.

2. Geschichte der Abwasserentsorgung

Schon vor dem 19. Jahrhundert wurde mit dem Einbau erster Abwasserkanäle in den Städten begonnen, um das Abwasser direkt in die Flüsse zu entwässern. Bei einer Schwemmkanalisation wird der Schmutz vom Wasser weggespült. Fäkalien wurden früher in Gruben gesammelt und nach Entleerung an die Landwirtschaft weitergegeben. Ab der Erlaubnis, auch Fäkalien in die Abwasserkanäle einzuleiten, wurden erste einfache Kläranlagen mit mechanischen Becken zur Schlammabsetzung errichtet. Der Anschluss für Gewerbe und Industrie und der Zubau von Spültoiletten folgten dann Schritt für Schritt im 20. Jahrhundert. Parallel erfolgte der Ausbau der Kläranlagen zur Reinigung eines Gemisches aus Haus- und Gewerbeabwässern.

Das System Spültoilette-Kanalisation-Kläranlage hat das Ziel, die Fäkalien und belastetes Abwasser hygienisch zu entsorgen und damit Flüsse und Seen vor Verunreinigungen zu schützen. Mit der Einleitung gewerblicher und industrieller Abwässer und der Verwendung zahlreicher Chemikalien in Haushalten hat sich die Zusammensetzung des Abwassers stark verändert. Seit der Industrialisierung und dann ab Mitte des 20. Jahrhunderts ist die Chemie praktisch in alle Lebensbereiche vorgedrungen. So wurde ein anfangs begehrter Dünger aus menschlichen Fäkalien ein mit Schadstoffen belasteter Klärschlamm, der nicht mehr schadlos in der Landwirtschaft eingesetzt werden kann.

Industrielles Abwasser, (hier nicht weiter behandelt) soweit es nicht in die öffentliche Kanalisation geleitet wird, muss in eigenen Kläranlagen nach dem Stand der Technik gereinigt werden. Der dabei entstehende Klärschlamm wird (mit)verbrannt.

Dieses Positionspapier beschränkt sich auf die Behandlung und Verwertung von Klärschlamm und betrachtet nicht weitergehende Aspekte eines alternativen Abwassermanagements.

3. Abwasserreinigung in Kläranlagen

Abwasser wird in Kläranlagen gereinigt (Abbildung 1). Zunächst werden grobe Bestandteile und Sand abgetrennt (Rechengut und Sandfanggut). Der enthaltene Schlamm hat in einem Vorklärbecken (1. Stufe) Gelegenheit, sich abzusetzen (Primärschlamm). Das Abwasser gelangt danach in die biologische Reinigungsstufe (2. Stufe). Unter Zuführung von Luftsauerstoff in Belebungsbecken oder Tropfkörpern oxidieren Bakterien und andere Mikroorganismen organische Abwasserinhaltsstoffe zu CO₂ und Wasser. Es entsteht Belebtschlamm, der in der Nachklärung sich absetzt und überwiegend in die Belebung zurückgeführt wird (Rücklaufschlamm). Überschüsse werden als Sekundärschlamm abgetrennt. Schwer abbaubare Stoffe werden nicht oxidiert oder nur teilweise umgewandelt. Viele von ihnen lagern sich an den Schlamm an. Bei der biologischen Reinigung in der 2. Stufe findet auch die Oxidation von Ammonium-Stickstoff zu Nitrat durch nitrifizierende Bakterien statt.

Im Anschluss (3. Stufe) wird gelöstes Phosphat entweder durch Eisen- oder Aluminiumsalze ausgefällt oder durch phosphatakkumulierende Bakterien entfernt (Bio-P-Verfahren). In der dritten Stufe wird auch Nitrat-N in Luftstickstoff umgewandelt (Denitrifikation). Schlamm aus der 3. Stufe wird Tertiärschlamm genannt.

Die vereinigten Schlämme werden als Rohschlamm abgeführt, der meist nur zwei bis fünf Prozent Feststoffe enthält. Er wird eingedickt und gelangt dann in größeren Kläranlagen meist in Faulbehälter, in denen unter Entstehung von methanhaltigem Klärgas weitere organische Substanz abgebaut wird. Der Faulschlamm wird unter Zugabe von Flockungshilfsmitteln in Zentrifugen oder Pressen auf einen Feststoffgehalt von 30–35% konzentriert (stabilisierter Schlamm).

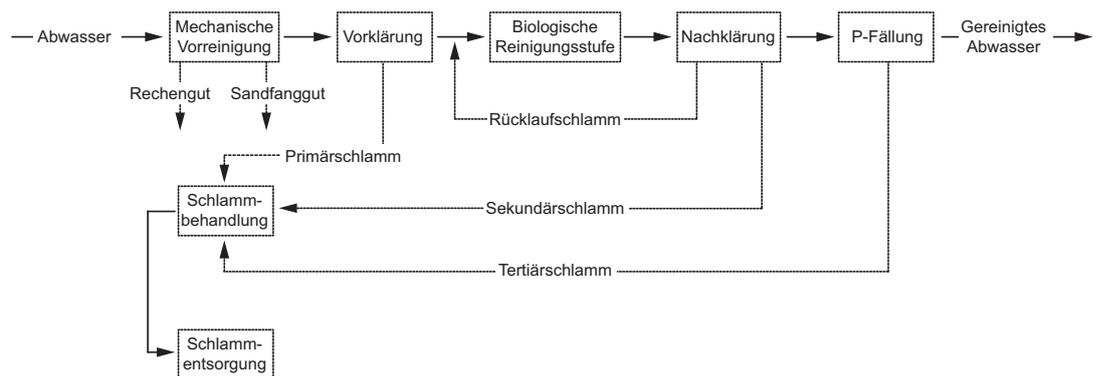


Abbildung 1: Funktionsweise einer Kläranlage (erste bis dritte Reinigungsstufe) mit Anfall von Klärschlamm (Quelle: UBA)

Kläranlagen werden nach Größenklassen eingeteilt. Diese beziehen sich auf den „Einwohnerwert“(EW), einem Vergleichswert für die in Abwässern enthaltenen Schmutzfrachten. Dieser Wert ist die übliche Maßeinheit für die durchschnittlich pro Tag erzeugte Schmutzfracht pro Einwohner. Für Gewerbebetriebe gilt ein Umrechnungsschlüssel.

Größenklasse 1	≤ 1.000 EW
Größenklasse 2	1.001 – 5.000 EW
Größenklasse 3	5.001 – 10.000 EW
Größenklasse 4a	10.001 – 50.000 EW
Größenklasse 4b	50.001 – 100.000 EW
Größenklasse 5	> 100.000 EW

Bei den meisten Kläranlagen wird das gereinigte Abwasser nach der dritten Stufe in ein Oberflächen-gewässer eingeleitet. Dieses Abwasser enthält allerdings immer noch Mikroschadstoffe (z. B. Industrie- und Haushaltschemikalien, Arzneimittel) in geringen, aber potenziell schädlichen Konzentrationen [BUND 2017]. Deshalb wird für große Kläranlagen gefordert und erprobt, in einer vierten Reinigungsstufe diese Chemikalien weitgehend aus dem Abwasser zu entfernen. Der BUND fordert den Ausbau großer Kläranlagen mit Aktivkohlefiltern oder einer Behandlung mit UV-Licht und Ozon, um die Qualitätsziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie zu erreichen [BUND 2021a]. Die EU-Kommission legte im Oktober 2022 einen Entwurf für eine Neufassung der kommunalen Abwasser-richtlinie vor. Darin ist vorgesehen, dass bis 2035 alle Kläranlagen der Größenklasse 5 mit einer vierten Reinigungsstufe auszustatten sind. Sofern höhere Konzentrationen an Mikroschadstoffen vorliegen, sind bis 2040 auch Kläranlagen der Größenordnung 4a und 4b entsprechend nachzurüsten [EU-Kommission 2022a].

4. Verwertung des kommunalen Klärschlamm

In Deutschland sank in den letzten Jahrzehnten die Menge an Klärschlamm, die auf Äcker und Felder verbracht wurde, stetig. Gleichzeitig stieg der Anteil der energetischen Verwertung.

- 1991: 51 % wurden deponiert, 35 % landwirtschaftlich und 3 % für den Landschaftsbau genutzt, 11 % verbrannt.
- 2005: Seitdem darf kein Klärschlamm deponiert werden.
- 2010: 30 % wurden in der Landwirtschaft und 16 % im Landschaftsbau eingesetzt, 54 % wurde verbrannt.
- 2020: 15 % wurden in der Landwirtschaft verwendet und 7 % im Landschaftsbau. 77 % wurden verbrannt. Bei der Verbrennung, also der thermischen Entsorgung oder Verwertung, wurde gut ein Drittel des Klärschlamm in Monoverbrennungsanlagen verbrannt. Knapp zwei Drittel wurden in Zementwerken oder Kohle- und Müllverbrennungsanlagen mitverbrannt.

Vision: Schadstofffreiheit als Voraussetzung für geschlossene natürliche Kreisläufe

Es ist ein wichtiges Ziel verantwortlichen ökologischen Handelns, natürliche Kreisläufe so weit wie möglich zu schließen. Dies gilt für Kohlenstoff ebenso wie für Nährstoffe wie Phosphor und Stickstoff. Mit den derzeit verfügbaren Verfahren zur Behandlung von Klärschlamm gelingt dies nur zum geringen Teil. Grund dafür ist die immer noch zu hohe Belastung mit Schadstoffen.

Jahrzehntelanges nicht nachhaltiges Handeln hat dazu geführt, dass Klärschlamm mit zahlreichen umweltgefährlichen Stoffen belastet ist, die es vor der Industrialisierung noch nicht gab. Diese Stoffe kontaminieren nicht nur den Klärschlamm, sondern auch Böden, Gewässer und die Luft. Viele dieser Stoffe sind so langlebig, dass sie über Jahrzehnte in der Umwelt stabil sind. PFAS, Plastik und Arzneimittel sind nur einige Beispiele davon. Ziel muss es daher sein, diese Umweltbelastungen zu stoppen und wieder zu einer Umwelt ohne schädliche Belastungen zu gelangen. Dieses Ziel hat der BUND in seiner Position „Herausforderungen einer nachhaltigen Stoffpolitik“ beschrieben und mit konkreten Forderungen hinterlegt [BUND 2023a]. Unter anderem wird dort eine globale Rahmenkonvention zum nachhaltigen Umgang mit Stoffen und Ressourcen gefordert. Im Hintergrundpapier „Fluorchemikalien: Langlebig, gefährlich, vermeidbar“ wird das Verbot der gesamten Stoffgruppe der PFAS gefordert – ein derzeit in der EU kontrovers diskutiertes Thema [BUND 2021b]. Die BUND-Position „Arzneimittel in der Umwelt“ zeigt auf, wie ein nachhaltiger Umgang mit Arzneimitteln gestaltet werden kann [BUND 2020]. Umsetzungsschritte für die dort formulierten Forderungen seitens der Politik sind leider noch nicht zu sehen. Maßnahmen zur Reduktion der Plastikeinträge werden aktuell auf UN-Ebene beraten. Doch wie beim Klimaschutz erfolgt die Umsetzung all dieser konkret formulierten BUND-Forderungen viel zu langsam und zu halbherzig. Die Umsetzung all dieser Maßnahmen wäre erforderlich, damit die stofflichen Umweltbelastungen so weit reduziert werden, dass eine direkte Verwertung von Klärschlamm wieder möglich würde.

Es bleibt daher ein Fernziel, dass Abwasser und Klärschlamm weitgehend schadstofffrei werden, um die wertvollen Inhaltsstoffe möglichst direkt in die Natur, der sie entnommen wurden, zurückzuführen. In naher Zukunft wird dies allerdings nicht erreicht werden können. In Streusiedlungen und Kleingärten können Trocken-/Komposttoiletten oder die getrennte Sammlung von Urin eine Möglichkeit darstellen, ohne Kanalanschluss menschliche Ausscheidungen getrennt zu sammeln und zu verwerten. So enthält

menschlicher Urin 0,4–3,3 g/L Phosphor und darüber hinaus Stickstoff (als Harnstoff) sowie Kalium, Magnesium und Calcium. Urin ist grundsätzlich ein wertvoller, schadstoffarmer Dünger [GDCh 2022, Spektrum.de 2014, Lüthi und Bühler 2022]. Allerdings sind die von Menschen ausgeschiedenen Arzneimittel(metaboliten) in Urin in vergleichsweise hoher Konzentration vorhanden. Generell ist bei der unmittelbaren Verwendung menschlicher Ausscheidungen auf die hygienischen Risiken zu achten.

Arbeitsgruppen bei der schweizerischen EAWAG haben ein Verfahren mit Trenntoiletten entwickelt und in Pilotprojekten u. a. in Südafrika erprobt, das Urin zu einem verwertbaren Düngemittel verarbeitet, die Fäkalien durch hydrothermale Oxidation zu phosphathaltigen Mineralien umwandelt und das Spül- und Waschwasser effektiv reinigt und zur Wiederverwendung im Kreislauf führt. Die dabei entstehenden Produkte sind frei von mikrobiellen Belastungen [EAWAG 2021].

Der Ansatz des Getrenntsammlens menschlicher Ausscheidungen ist aber nicht allgemein übertragbar. Einige realisierte oder geplante Modellprojekte zeigen, dass mittels Trenntoiletten eine hygienische Sammlung und Verwertung menschlicher Ausscheidungen auch für ganze Wohnquartiere möglich ist [Hamburg Wasser 2023, Ecovillage Hannover 2023]. Allerdings können solche Ansätze konventionelle Klärtechnik kurz- und mittelfristig nicht ersetzen. Eine grundsätzlich andere Logistik wäre erforderlich.

4.1 Verwertung (quantitativ)

2021 fielen in Deutschland 1,717 Mio. t TM Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen an. [DESTATIS 2022]. 1998 waren es noch 2,2 Mio. t TM. Dieser Rückgang ist im Wesentlichen auf den Ausbau und die Effizienzsteigerung der anaeroben Schlammbehandlung zurückzuführen und nicht auf signifikante Änderungen im Abwasserzulauf. Nahezu unabhängig von der Größenklasse sind dies 15–16 kg TM Klärschlamm je Einwohner und Jahr [DWA 2020].

Im Mittel wird in Deutschland mit jährlich 1,75 Mio. t TM an Klärschlamm gerechnet (Tabelle 1):

Größenklasse	t (TM)
5	750.000
4b	200.000
4a	400.000
1–3	400.000

Tabelle:1: Klärschlammfall in den Größenklassen [Stark et al. 2022]

4.2 Verwertung (qualitativ)

Von den 2021 in der öffentlichen Klärschlammversorgung angefallenen 1,717 Mio. t TM Klärschlamm wurden 335.641 Tonnen TM (19,5%) stofflich und 1.364.890 Tonnen TM (79,5%) thermisch verwertet. Der Verbleib von rund 17.000 Tonnen TM (1%) ist unklar. Die stoffliche Verwertung in der Landwirtschaft und bei landschaftsbaulichen Maßnahmen ist seit Jahren rückläufig. Im Jahr 2012 wurden noch 45% stofflich verwertet und nur 54% thermisch behandelt [DESTATIS 2022].

4.2.1 Stoffliche Verwertung

Von den ca. 335.000 Tonnen wurden 2021 226.747 Tonnen TM (67%) in der Landwirtschaft ausgebracht, 17.576 Tonnen TM (5%) bei landschaftsbaulichen Maßnahmen wie Rekultivierungen und die übrigen 91.318 Tonnen TM (27%) etwa zur Vererdung oder Kompostierung. Diese Form der Verwertung des Klärschlammes zielt ebenfalls auf eine landwirtschaftliche Nutzung, weshalb die Bestimmungen der AbfKlärV entsprechend gelten. Die aerobe Kompostierung und die Verwertung in Vererdungsbeeten z. B. mit Schilfpflanzen können zu einer Reduktion organischer Schadstoffe führen, sind aber zeitaufwändig und haben einen großen Flächenbedarf. Sie sind damit

eher für kleinere Kläranlagen geeignet. [Wikipedia 2023]

4.2.2 Thermische Entsorgung oder Verwertung

Klärschlamm wird entweder in Monoverbrennungsanlagen verbrannt oder in Abfallverbrennungsanlagen, Kohlekraft- oder Zementwerken mitverbrannt. 2020 wurden 39,5% der thermisch entsorgten Klärschlamm-trockenmasse Monoverbrennungsanlagen zugeführt – das waren 508.000 Tonnen. Dabei fielen 203.000 Tonnen Klärschlamm-Asche jährlich an [Stark et al. 2022]. Ein geringer Anteil des Klärschlammes wurde alternativen thermischen Verfahren wie der Vergasung oder der hydrothermalen Karbonisierung zugeführt.

• Mitverbrennung

Die Mehrheit des Klärschlammes wurde 2021 in Kohlekraft- oder Zementwerken sowie in Abfallverbrennungsanlagen mitverbrannt (810.977 Tonnen TM). Dieser Anteil wird künftig aus mehreren Gründen abnehmen:

- Die Verbrennung von Kohle in Kraftwerken wird aus Gründen der Klimaschutzpolitik nicht mehr stattfinden.
- Auch wird im Rahmen des Klimaschutzes angestrebt, die Zahl der Zementwerke zu reduzieren.
- Die Klärschlammverordnung sieht die Phosphorrückgewinnung ab 2029 bzw. 2032 vor, wenn die Klärschlämme mehr als 2% Phosphor in der Trockenmasse enthalten. Eine Phosphorrückgewinnung ist bei der Mitverbrennung nicht möglich oder nicht lohnend.

Damit wird sich die Mitverbrennung auf phosphorarmer Klärschlämme und Klärschlämme, denen in Fällungsverfahren vorher der Phosphor entzogen wurde, beschränken.

Einstweilen allerdings erwartet das Bremer Abfallmarktforschungsinstitut waste:research in den nächsten Jahren gemäß der Studie „Klärschlammverwertung: Mit- und Monoverbrennung in Deutschland“ von November 2022 ein Wettrennen um Klärschlamm-mengen zwischen der Mit- und der Monoverbrennung [waste:research 2022]. Zwischen 2015

und 2019 stieg die Kapazität für die Monoverbrennung zwar um knapp 20 Prozent von 432.500 auf 515.000 Tonnen Trockenmasse pro Jahr. Im gleichen Zeitraum stieg die Menge an Klärschlamm-trockenmasse, die mitverbrannt wurde, von 446.000 auf 787.000 Tonnen. Davon landeten 2019 rund 354.000 Tonnen in Kohlekraftwerken, 300.000 Tonnen in Zementwerken und etwa 76.700 Tonnen in Müllverbrennungsanlagen.

• Monoverbrennung

2022 gab es in Deutschland 29 Monoverbrennungsanlagen für Klärschlämme (incl. Anlagen zur Verbrennung industrieller Klärschlämme). Diese hatten eine Kapazität von 1.124.000 Tonnen Trockenmasse jährlich [Stark et al. 2022], also deutlich mehr, als aktuell in solchen Anlagen verbrannt wird. Der vorherrschende Feuerungstyp ist die stationäre Wirbelschichtverbrennung. Daneben gibt es auch andere Feuerungstypen wie Drehrohröfen oder Rostfeuerung.

2024 sollen drei Monoverbrennungsanlagen mit einer Jahreskapazität von 100.000 Tonnen hinzukommen und bis 2028 weitere sechs Anlagen mit einer Jahreskapazität bis zu 200.000 Tonnen. 2028 könnten danach 1,5 Mio. Tonnen Klärschlamm-trockenmasse in Monoverbrennungsanlagen thermisch behandelt werden mit dem Ziel einer Phosphorrückgewinnung aus der Asche [Stark et al. 2022]. Auch das Umweltbundesamt erwartet, dass 2029 von den erwarteten 1,7 Mio. t TM Klärschlamm 1,36 Mio. t TM den Monoverbrennungsanlagen zugeführt werden können. Ein Kapazitätsproblem wird somit nicht erwartet. Regional könnte es allerdings zu Unter- und Überkapazitäten kommen [EUWID 2021].

• Sonstige thermische Verfahren

Derzeit gibt es in Deutschland drei Pyrolyse- und vier Vergasungsanlagen mit einer Kapazität von insgesamt 10.800 t Trockenmasse [Stark et al. 2022]. Diese alternativen Verfahren haben teilweise auch die Rückgewinnung von Phosphor zum Ziel.

5. Die Nationale Wasserstrategie von 2023

Die Umsetzung der am 15. März 2023 von der Bundesregierung verabschiedeten Nationalen Wasserstrategie soll dazu beitragen [BMUV 2023a], die Ziele des Wasserhaushaltsgesetzes für die Gewässerbewirtschaftung in Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie zu erreichen. Der gute ökologische Zustand in den Binnen-, Übergangs- und Küstengewässern soll erreicht bzw. erhalten werden. Es werden 10 strategische Themen genannt, darunter „Risiken durch Stoffeinträge begrenzen“ und „Wasser-, Energie- und Stoffkreisläufe verbinden“. Es wird festgestellt, dass mit der Rückgewinnung des im Abwasser enthaltenen Phosphors etwa die Hälfte der jährlichen Phosphatdünger-Importe eingespart werden können. Im zugehörigen „Aktionsprogramm Wasser“ wird die Rückgewinnung von Nährstoffen aus Abwasser und Klärschlamm als vorrangige Maßnahme genannt. Die Belastung des Abwassers mit Schadstoffen soll deutlich gesenkt werden, wobei auf die stoffpolitischen Pläne der EU verwiesen wird. Die 4. Reinigungsstufe soll ausgebaut und die Herstellerverantwortung gestärkt werden.

6. Anforderungen der nachhaltigen Stoffpolitik und des Ressourcenschutzes an die Klärschlammverwertung

Eine nachhaltige Stoffpolitik orientiert sich an den Leitbildern Vorsorge und Nachhaltigkeit. Nach dem Vorsorgeprinzip muss gehandelt werden, wenn triftige Gründe zur Besorgnis vorliegen [OSPAR 1992]. Nachhaltigkeit bedeutet, die Bedürfnisse der heutigen Generation sozial gerecht zu befriedigen, ohne die künftiger Generationen zu beeinträchtigen [United Nations 1992].

Der BUND hat in seinem Positionspapier „Herausforderungen für eine nachhaltige Stoffpolitik“ [BUND 2023a] gezeigt, wie sich Stoffpolitik an diesen Leitbildern orientieren muss. Über Jahrzehnte wurden ständig neue Stoffe auf den Markt gebracht und eingesetzt, ohne die Risiken zu bedenken, die diese für Menschen und die Umwelt bedeuten. Schätzungen zufolge sind heute bis zu 350.000 Chemikalien in Umlauf [Persson et al. 2022]. In der EU sind 26.859 Chemikalien mit einem Produktions- oder Importvolumen größer als eine Tonne pro Jahr registriert (Stand: Mai 2023). Die REACH-Verordnung fordert seit 2006 von diesen Stoffen, dass sie mit Daten zu ihren Eigenschaften registriert werden [EU 2006]. Viele Stoffe finden sich in Haushalten bei Verbraucher*innen und geraten auf diese Weise ins Abwasser. Auch leiten oft Industrie- und Gewerbebetriebe ihr Abwasser als Indirekteinleiter in das öffentliche Kanalnetz ein. Abwasser ist also eine Vielstoffmatrix, dessen chemische Zusammensetzung analytisch mit einem realisierbaren Aufwand nur zu einem sehr begrenzten Teil erfasst werden kann. Hinzu kommt, dass viele organische Stoffe in Abwasser und in der Kläranlage durch chemische oder biologische Prozesse umgewandelt werden. Es entstehen Stoffe, deren Identität und Eigenschaften in der Regel nicht bekannt sind.

Ziel der Abwasserreinigung in Kläranlagen ist es, diese Vielzahl an Chemikalien daran zu hindern, in Gewässer zu gelangen. Kläranlagen sind „end of pipe“-Techniken (nachsorgender Umweltschutz). Ihre Reinigungsleistung hat Grenzen, und viele Schadstoffe

passieren die Kläranlagen oder werden an Klärschlamm adsorbiert. Besser wäre es, solche Stoffe gar nicht ins Abwasser gelangen zu lassen. Aus Vorsorgegründen sollten Chemikalien deshalb in möglichst geringer Menge und nur dann verwendet werden, wenn sie für die gewünschte Funktion unerlässlich sind (effiziente Nutzung). Die Nachhaltigkeitsanforderung richtet sich aber auch an die Eigenschaften der verwendeten Chemikalien. Insbesondere sollten die Chemikalien abbaubar, d.h. nicht persistent, sein. Persistenz (Langlebigkeit in der Umwelt) ist die wichtigste Eigenschaft bei der Chemikalienbewertung. Persistente Chemikalien können nicht nachhaltig sein, da sie in der Umwelt verbleiben und nicht rückholbar sind. Viele Schadstoffe haben auch andere gefährliche Eigenschaften: Sie reichern sich in Lebewesen an, sind toxisch für Menschen und/oder Umweltorganismen, hormonell wirksam oder haben eine krebserzeugende Wirkung. In sehr vielen Fällen sind diese Eigenschaften nicht bekannt und lassen sich mit angemessenem Aufwand auch nicht bestimmen. Weiterhin ist zu bedenken, dass Chemikalien ihre Wirkung nicht unabhängig von anderen Inhaltsstoffen entfalten; die gemessenen Wirkungen in einer Abwasser- oder Klärschlammatrix sind Kombinationswirkungen und prinzipiell nur ungenau vorhersagbar.

Daraus folgt: Vorsorgende Stoffpolitik bedeutet, den Chemikalieneintrag ins Abwasser möglichst zu vermeiden und auf persistente Stoffe möglichst gänzlich zu verzichten. Dies muss auch bestimmend sein für die Auswahl von Betriebsstoffen im Klärprozess. Hier von sind wir leider noch weit entfernt. Und bei einigen Stoffen, z. B. Arzneimittelausscheidungen von Mensch und Tier, lassen sich Einträge ins Abwasser nicht vermeiden [BUND 2020].

Manche Abwasserinhaltsstoffe überstehen auch eine vierstufige Behandlung in der Kläranlage und gelangen als Mikroschadstoffe in Gewässer; andere Stoffe, die nicht abgebaut werden, werden an Klärschlamm adsorbiert. Ein schadstofffreier Klärschlamm ist des-

halb bis auf Weiteres eine Vision. Aber: je weniger Schadstoffe Klärschlamm enthält, desto leichter lässt er sich wieder verwerten.

Abwasser und Klärschlamm enthalten nicht nur Schadstoffe sondern auch Stoffe, deren Rückführung in den Wirtschaftskreislauf anzustreben ist. Im Sinne eines Ressourcenschutzes wäre es deshalb ideal, Klärschlamm mit seinen wertvollen Inhaltsstoffen (Nährstoffe wie Phosphor und Stickstoff, ggf. auch humusbildende organische Substanz) direkt landwirtschaftlich zu verwerten, wie es in vorindustrieller Zeit üblich war. Dies bleibt ein Fernziel, das auf absehbare Zeit nicht erreichbar ist.

Nur in seltenen Einzelfällen gelingt die Rückgewinnung einzelner Stoffe aus Klärschlamm. Zu hoch sind die Entropie und der Energieaufwand, zu gering in den meisten Fällen die Konzentrationen zur Isolierung einzelner Inhaltsstoffe (z. B. Metalle) aus der Vielstoffmatrix. Drei Ausnahmen sind jedoch hervorzuheben:

- Methan, das bei der Schlammfäulung entsteht und energetisch genutzt werden kann.
- Phosphor, der meist in einer Konzentration größer 20 g/kg TM in Klärschlamm enthalten ist. Wiedergewonnener Phosphor lässt sich in Form von Phosphorsäure oder Phosphaten für chemische Synthesen oder als Düngemittel nutzen. Der Phosphor, der den landwirtschaftlichen Flächen bei der Lebensmittelherzeugung entzogen wird, wird auf diese Weise wieder genutzt.
- Stickstoff, der zu großen Teilen im Klärprozess durch Denitrifikation als Luftstickstoff freigesetzt aber bei einigen Phosphorrückgewinnungsverfahren in geringen Anteilen mit anfällt .

Die Wiederverwendung oder das Recycling wertvoller Rohstoffe ist ein Kennzeichen einer zirkulären Ökonomie und einer nachhaltigen Stoffpolitik. Dabei sind regionale Stoffströme deutlich zu bevorzugen.

7. Inhaltsstoffe von Abwasser und Klärschlamm

7.1 Schadstoffe

Das Ziel der Behandlung von Abwasser in einer Kläranlage ist die Reinigung des Wassers, damit schädliche Stoffe und pathogene Keime nicht in die Gewässer gelangen. Klärschlamm ist damit eine Schadstoffsenske für viele Chemikalien. Dies trifft insbesondere auf die nicht überschaubare Vielfalt an organischen Schadstoffen zu, die aus Haushalten, Krankenhäusern, Gewerbe und Industrie ins Abwasser gelangen. Darunter sind Arzneimittel, Biozide und Pflanzenschutzmittel, Additive aus Plastik, Lösemittel, per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) und Mikroplastik ebenso wie pathogene oder Antibiotika-resistente Bakterien. Wird Klärschlamm landwirtschaftlich genutzt, werden die angesammelten Schadstoffe großflächig ausgebracht. Sie können sich in (Kultur-)Pflanzen anreichern, Bodenorganismen und das Bodenmikrobiom schädigen oder wegen ihrer hormonellen Wirksamkeit oder anderer Wirkungen Umweltschäden hervorrufen.

• Schwermetalle

Die Schwermetallbelastung im Klärschlamm hat sich seit 1977 deutlich verringert und seit 2000 auf relativ niedrigem Niveau eingependelt [UBA 2018]. Beispiele: 1 kg Trockenmasse enthielten 1977 im Durchschnitt 220 mg Blei (Pb), 21 mg Cadmium (Cd) und 4,8 mg Quecksilber¹ (Hg). 2015 waren es noch 30,6 mg Pb, 0,74 mg Cd und 0,39 mg Hg.

Die Gehalte an Kupfer, Nickel und Zink hingegen gingen weniger stark zurück: bei Nickel von 131 mg (1977) auf 24,7 (2015), bei Kupfer von 378 mg (1977) auf 294 mg (2015), bei Zink von 2140 mg (1977) auf 773 mg (2015). Die Grenzwerte der Düngemittelverordnung (DüMV) bzw. AbfKlärV werden somit in der Regel unterschritten (siehe Abschnitt 9).

• Arzneimittel

In Deutschland sind rund 2.300 Arzneimittelwirkstoffe für die Anwendung beim Menschen zugelassen. Rund die Hälfte gilt davon als relevant für die Umwelt

(UBA, 2018). Arzneimittel enthalten biologisch hochwirksame Wirkstoffe, die auch Lebensgemeinschaften in Gewässern und Böden schädigen können. Von den rund 1.200 umweltrelevanten Wirkstoffen wurden 2012 in Deutschland 8.120 Tonnen verbraucht (das ist ein Anstieg um 20% gegenüber 6.200 Tonnen im Jahr 2002). Dabei entfielen zwei Drittel auf 16 Wirkstoffe, von denen jeweils mehr als 80 t jährlich verbraucht wurden. Dazu zählen Entzündungshemmer und Schmerzmittel wie Diclofenac und Ibuprofen, Antidiabetika wie Metformin, Antibiotika wie Clarithromycin sowie Asthmamittel und Psychopharmaka [UBA 2014].

Daten zu Arzneimittelrückständen in Einleitungen von Kläranlagen und in Oberflächengewässern sind inzwischen zahlreich; weniger ist bekannt zu Medikamentenresten in Klärschlämmen und Böden² [BUND 2020]. Die zunehmende Belastung von Abwasser durch Wirkstoffe aus Medikamenten veranlasste die EU-Kommission, in ihrem Vorschlag für eine Neufassung der Kommunalabwasser-Richtlinie festzulegen, dass die Hersteller von Arzneimitteln und Kosmetika sich an den Kosten der Abwasserreinigung beteiligen sollen (erweiterte Herstellerverantwortung in Umsetzung des Verursacherprinzips) [EU Kommission 2020].

Das UBA berichtet über Untersuchungen von Recyclaten verschiedener Phosphorrückgewinnungsverfahren: In drei thermischen Verfahren mit Temperaturen von mindestens 400 bis 500 Grad Celsius konnten keine Rückstände der 11 untersuchten Arzneimittel nachgewiesen werden. Anders sieht es bei Verfahren ohne thermische Komponente aus. Hier wurden zwar deutliche Abreicherungen in den Recyclaten festgestellt; aber Rückstände waren in unterschiedlicher Konzentration noch vorhanden. [Stenzel et al. 2019]

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) wies bereits 2007 in seiner Stellungnahme „Arznei-

¹ Trotz erreichter Reduktionen sind Quecksilberemissionen in die Umwelt nach wie vor ein Problem. Die Umweltqualitätsnorm (UQN) für Quecksilber (Richtwert 20 µg/kg Frischmasse (FM) in Fischen) wird noch mehrfach übertroffen. Quecksilber ist auch ein Problem für die Rauchgasreinigung von Kohlekraftwerken [EEB 2020]. Bei der Verbrennung von 1.000 Tonnen TM Klärschlamm werden durchschnittlich 390 g Hg freigesetzt, falls in der Rauchgasreinigung nichts zurückgehalten wird.

² Eine Studie des Umweltbundesamtes nennt folgende Gehalte von Arzneimittel-Wirkstoffen in Klärschlamm: 3 bis 21 mg/kg Trockenmasse (TM) Ciprofloxacin, 0,75 bis 8,9 mg/kg TM Levofloxacin, 0,054 bis 1,1 mg/kg TM Carbamazepin, 0,023 bis 0,16 mg/kg TM Clarithromycin, 0,0056 bis 1,1 mg/kg TM, 17 α-Ethinylöstradiol, 0,074 bis 2,1 mg/kg TM Diclofenac und 0,044 bis 1,1 mg/kg TM Metoprolol [Stenzel et al. 2019].

mittel in der Umwelt“ darauf hin, dass sich die Mehrzahl der Arzneimittel zwar kaum im Klärschlamm anreichern, aber dieser dennoch vorsorglich möglichst wenig in der Landschaft ausgebracht werden soll [SRU 2007]. Auch der BUND fordert in seinem Positionspapier, die Belastung der Böden durch Arzneimittel zu minimieren [BUND 2020]

• Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)

PFAS – eine Stoffgruppe mit mehreren 1000 Verbindungen – sind extrem persistent. Sie werden deshalb „Ewigkeitschemikalien“ („forever chemicals“) genannt. Viele Vertreter sind in niedrigen Konzentrationen toxisch, können sich in der Umwelt rasch ausbreiten und reichern sich in Lebewesen an. Selbst in entfernten Regionen wie Polargebieten werden sie inzwischen nachgewiesen. PFAS finden in zahllosen Produkten und technischen Prozessen Anwendung und gelangen daher unvermeidlich auch in das Abwasser [BUND 2021b, Brunn et al. 2023]. Allein das Waschen von PFAS-behandelten Kleidungsstücken führt zu einem Eintrag in das häusliche Abwasser. Eine Diplomarbeit an der TU Wien zeigt, dass in den Haushalten der Haupteintragspfad von Perfluoralkylsulfonsäuren Textilien sind, während Perfluoralkylcarbonsäuren vor allem durch Körperpflege-Produkte ins Abwasser gelangen [Steinginger 2022].

Da PFAS in Kläranlagen nicht abgebaut werden, landen sie teilweise im Kläranlagenablauf und teilweise im Klärschlamm. Es gibt sogar Daten, dass die bekanntesten Vertreter Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) und Perfluoroktansäure (PFOA) während der biologischen Behandlung aus polyfluorierten Vorläuferverbindungen (sog. Precursern) entstehen. Wird eine vierte Reinigungsstufe mit Aktivkohlefiltern betrieben, werden einige PFAS daran adsorbiert. Eine vollständige Entfernung dieser Stoffe gelingt jedoch nicht [EUREAU 2021]. Messungen der PFAS-Konzentrationen in Klärschlamm zeigen in den USA Durchschnittswerte von 31 µg/kg TM [Seay et al. 2023], in Europa 114 µg/kg TM [ECHA 2023]. Untersuchungen von Klärschlamm-

men in Bayern zeigen häufig Konzentrationen > 100 µg/kg TM. Bei Überschreitungen waren meist industrielle Einflüsse nachweisbar [Ulrich et al. 2016]. Die EU beabsichtigt, wegen der hohen und dauerhaften Risiken die gesamte Stoffgruppe der PFAS schrittweise vollständig zu verbieten [ECHA 2023], was der Forderung des BUND entspricht [BUND 2021b].

• Mikroplastik

Mikroplastik sind Plastikpartikel von kleiner 0,5 cm Durchmesser [EU-Kommission 2022b]. Man unterscheidet zwischen primärem Mikroplastik, das als solches zum Beispiel in Kosmetika verwendet wird, und sekundärem Mikroplastik, das durch Abrieb größerer Plastikteile entsteht. Wichtige Quellen für Mikroplastik in Abwasser sind Haushalte, Gewerbe und Industrie, das achtlose Entsorgen von Kunststoffmüll in die Umwelt sowie der Abrieb von Reifen und Kunstrasenplätzen.

Gelangt Mikroplastik über Haushaltsabwasser oder Niederschlagswasser (im Falle von Mischkanalisationen – Reifenabrieb!) in Kläranlagen, wird dort mehr als 90% des Mikroplastiks zurückgehalten, das meiste davon in Klärschlamm. Relevante Anteile können auch im Sieb- und Rechengut (mechanische Vorreinigung) zurückgehalten werden. Damit ist Klärschlamm eine Senke für Mikroplastik [BMBF 2022a, Barjenbruch 2023].

In Primär-, Überschuss- und Faulschlamm werden Konzentrationen im Bereich von 1 bis 10 Gramm Mikroplastik je Kilogramm Trockenmasse [BMBF 2022b], MicBin 2021] beziehungsweise Partikelanzahlen von 100.000 bis zu einer Million Mikroplastikartikel je Kilogramm Trockenmasse [Schaum et al. 2021] ermittelt. Bei der Klärschlammfäulung lassen sich keine statistisch eindeutigen Effekte auf den Abbauprozess und die Faulgasproduktion ermitteln. Bei der anschließenden Faulschlammwässerung mit Zentrifugen und Kammerfilterpressen hängt die Verfrachtung von Mikroplastikpartikeln maßgeblich

von der Art der Behandlung ab. Bis zu 30% der Mikroplastikmasse im Schlamm findet sich im Schlammwasser wieder. [BMBF 2022b]

Düngen Landwirte mit dem Klärschlamm Äcker und Felder, gelangt demnach ein Großteil dieser Partikel in Böden – teilweise auch in Kulturpflanzen – und durch Abschwemmungen oder Windverdriftung in Gewässer. In Deutschland wurden 2016 mit Klärschlämmen rund 9.700 t Mikroplastik auf Feldern verteilt [Chemnitz und Rehmer 2019]. Werden Klärschlämme verbrannt, verbrennen auch die Mikroplastik-Partikel.

Bei einem Testfeld der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) Speyer, das seit den 1980er Jahren regelmäßig mit Klärschlamm beaufschlagt wurde, wurde die Mikroplastikbelastung im Pflugbereich, in dem darunterliegenden Boden und in einem benachbarten, unbehandelten Feld untersucht. Es zeigte sich, dass Mikroplastik in benachbarte, unbehandelte Felder verfrachtet werden kann und Mikroplastik im Boden bis in einer Tiefe von 60 bis 90 cm nachgewiesen wurde. Mikroplastikpartikel können demnach tief genug eindringen, um auch Dränagen zu erreichen [Tagg et al. 2022]. Ähnliche Befunde berichten Weber et al. von zwei Testfeldern 34 Jahre nach der letzten Applikation von Klärschlamm [Weber et al. 2022].

• **Nanomaterialien**

Nanomaterialien sind Stoffe mit einem Durchmesser von < 100 nm in mindestens einer Dimension [EU-Kommission 2022c]. Aufgrund ihrer Kleinheit und großen Oberfläche verhalten sich Nanomaterialien anders als grobkörniges Material gleicher chemischer Zusammensetzung. Sie werden deshalb gemäß REACH-Verordnung gesondert bewertet. Nanomaterialien haben wachsende wirtschaftliche Bedeutung und werden deshalb zunehmend in vielen Bereichen eingesetzt. Ein Großteil der Nanomaterialien sind anorganische Verbindungen (z. B. nanoskaliges Titan-

dioxid). In Untersuchungen wurde gezeigt, dass 90% der im Zulauf der Kläranlage enthaltenen Nanomaterialien im Klärschlamm landen. Inwieweit diese in die Umwelt getragen werden, hängt von der Klärschlammverwertung ab [Börner et al. 2016, UBA 2018, UBA 2020].

Nanoskalige Titandioxid-Partikel werden nach einer Klärschlammverbrennung überwiegend fest in der Aschematrix eingebunden, Emissionen über das Abgas sind vernachlässigbar gering [Börner et al. 2016]. Inwieweit Nanomaterialien während der folgenden Aschebehandlung, also Bruch, Mahlung, Klassierung und Sortierung freigesetzt werden, wird zurzeit untersucht.

• **Abwasserbehandlungschemikalien**

Zur Sicherstellung eines effektiven Klärprozesses und einer Abwasserreinigung nach dem Stand der Technik werden Chemikalien eingesetzt, die dann entweder im Abwasser oder im Klärschlamm verbleiben. Hierzu zählen Säuren und Laugen zur Einstellung des pH-Wertes, Kalk und im Laufe der dritten Reinigungsstufe Eisen- und Aluminiumsalze zur Ausfällung der Phosphate. Die dadurch im Klärschlamm vorhandene Speziation des Phosphats als Eisen- oder Aluminiumsalz beeinflusst die Bioverfügbarkeit des rückgewonnenen Phosphats (siehe Abschnitt 10). Außerdem finden in der dritten Reinigungsstufe leicht abbaubare organische Substrate Verwendung, die bei Sauerstoffarmut für die Denitrifikation und/oder die Bio-P-Elimination zugesetzt werden. Diese Chemikalien beeinflussen ansonsten die Qualität des Klärschlammes für die bodenbezogene Verwertung nicht negativ. Problematischer sind organische Stoffe, die sich an Klärschlamm anlagern und eine hohe Persistenz aufweisen. Hierzu zählen Silikonöle als Entschäumer und vor allem Polyacrylamide als Flockungshilfsmittel. Kationische Polyquaternium-Verbindungen besitzen in wässriger Lösung eine sehr hohe Ökotoxizität. Bei Anwesenheit von Schwebstoffen und negativ geladenen organischen Verbindungen wird ihre Biover-

fügbarekeit und damit ihre Ökotoxizität jedoch um Größenordnungen verringert [Schramm et al. 2022]. Unbekannt sind angesichts ihrer sehr hohen Persistenz die Langzeitwirkungen in Böden. Die von VDLUFA und DWA getragene „Qualitätssicherung Landbauliche Abfallverwertung“ (QLA) nennt Qualitätskriterien für Abwasserbehandlungskemikalien (z. B. Grenzwerte für Schwermetalle) und empfiehlt, den Einsatz kationischer Flockungshilfsmittel auf das notwendige Maß zu beschränken [QLA 2017].

• Biologische Kontaminanten

Kommunales Abwasser enthält zahlreiche Mikroorganismen. In der zweiten (biologischen) Klärstufe übernehmen Mikroorganismen den aeroben Abbau der organischen Abwasserinhaltsstoffe. In Faulschlamm schließlich wandeln Bakterien und Archäen³ organische Substanz in Methan und Kohlendioxid um. In dieser komplexen Biologie finden sich auch schädliche Organismen wie Krankheitserreger oder Wurmeier. Diese führen zu Belastungen sowohl des gereinigten Abwassers als auch des Klärschlammes. Die Verhinderung einer Übertragung von Krankheitserregern ist ein Grund, weshalb Klärschlamm nicht auf Dauergrünland, im Forst, im Obst- und Gemüsebau und generell nicht im ökologischen Landbau ausgebracht werden darf. Die potenziell hohe Belastung mit Krankheitserregern wird auch durch § 41 Abs. 1 des Infektionsschutzgesetzes (IfSG) deutlich: „Die Abwasserbeseitigungspflichtigen haben darauf hinzuwirken, dass Abwasser so beseitigt wird, dass Gefahren für die menschliche Gesundheit durch Krankheitserreger nicht entstehen“ [BMJ 2022]. Untersuchungen zeigen, dass in Fließgewässern unterhalb kommunaler Kläranlagen erhöhte Belastungen mit pathogenen Keimen auftreten können [LANUV 2001]. Bisher wird Abwasser nur in Einzelfällen auf mikrobiologische Parameter überwacht. Nach dem Willen der EU-Kommission soll sich dies künftig ändern [EU-Kommission 2022a].

Bei der derzeit üblichen Abwasser- und Schlammbehandlung werden die Krankheitserreger in gewissem

Umfang dezimiert. Eine gezielte Abtötung der Keime (Hygienisierung) findet auf den Kläranlagen in der Regel allerdings nicht statt. Die Überwachung des Abwassers und des Klärschlammes beschränkt sich derzeit auf die Prüfung des Vorkommens von Salmonellen im landwirtschaftlich genutzten Klärschlamm.

Expert*innen des Julius-Kühn-Instituts untersuchten im Auftrag des Umweltbundesamtes die mikrobiologischen Risiken einer mittelfristigen Fortführung der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlämmen aus Kleinkläranlagen, wie sie auch künftig erlaubt sein wird. Sie stellten fest, dass Kläranlagen ein ‚Hotspot‘ des horizontalen Gentransfers⁴ von Resistenzgenen und mobilen genetischen Elementen sind, Klärschlamm stellt deshalb eine Haupteintragsroute von Antibiotikaresistenzen in den Boden dar. Bei Klärschlämmen lassen sich für die Antibiotika Fluorochinolone, Doxycyclin und Trimethoprim, das Biozid Triclosan sowie für Kupfer und Zink signifikante und positive Korrelationen zur Verbreitung von Resistenzgenen und mobilen genetischen Elementen erkennen. Die Schlammfäulung bewirkt eine gewisse Reduktion der mikrobiologischen Belastung [Wolters et al. 2022].

Es ist darauf hinzuweisen, dass auch die Beaufschlagung von Böden mit Wirtschaftsdünger (Gülle, Mist) zu erheblichen mikrobiellen Belastungen des Bodens führen kann, auch von Resistenzgenen, da die Antibiotikabehandlung in der Massentierhaltung sehr verbreitet ist [BUND 2020].

7.2 Nährstoffe

Der Zulauf zu Klärwerken enthält im Durchschnitt 7 bis 8 mg Phosphor⁵ und 50 bis 54 mg Stickstoff pro Liter [Sichler et al. 2022], wobei regional große Unterschiede auftreten [DWA 2022a]. Diese Angaben basieren auf Daten von mehr als 5.000 Abwasserbehandlungsanlagen, die 85% der kommunalen Abwässer reinigen. Daraus ergibt sich, dass pro Jahr 9.631 Mio. m³ Abwässer 70.000 bis 80.000 t Phosphor enthalten sowie 483.000 bis 517.000 t Stickstoff (Abbildung 2).

³ Archäen sind ebenso wie Bakterien Organismen ohne Zellkern, deren genetische Ausstattung und Stoffwechsel sich jedoch grundlegend von den Bakterien unterscheidet. Meist leben sie unter sauerstofffreien (anaeroben) Bedingungen.

⁴ Horizontaler Gentransfer bezeichnet die Übertragung von genetischen Elementen eines Organismus auf einen anderen, ohne dass dieser z. B. durch Plasmide oder Bakteriophagen induzierte Vorgang mit einer Fortpflanzung verbunden ist.

⁵ Die Mengenangaben für Phosphor und seine Verbindungen unterscheiden sich häufig. Während die AbfklärV Mengenangaben zu Phosphor (P) macht, ist es in der DüMV verbreitet, Mengen von P₂O₅ anzugeben. Häufig sind weiterhin Mengenangaben als ortho-Phosphat (PO₄). 1 Gramm P entspricht 3,06 Gramm PO₄ und 2,35 Gramm P₂O₅.

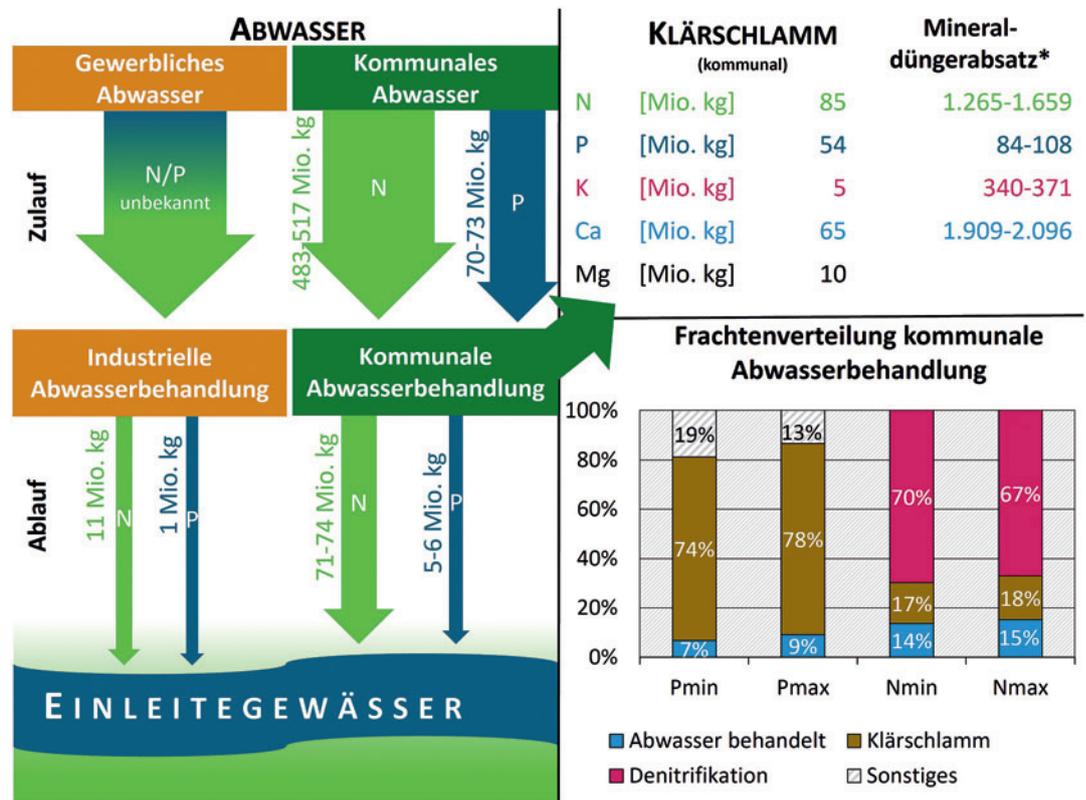


Abbildung 2: Nährstofffrachten aus industriellen und kommunalen Quellen (Quelle: Sichler et al. 2022)

Könnte man die gesamten Phosphor- und Stickstofffrachten aus dem Kläranlagenzulauf als Dünger einsetzen, könnten damit 65 bis 87 % des mineralischen Phosphordüngers ersetzt werden und 29 bis 41 % des Stickstoffdüngers (bezogen auf den 5-Jahreszeitraum von 2016/17 bis 2020/21). Rund 70 % des Phosphors im Zulauf findet sich im Klärschlamm wieder, also rund 50.000 t. Anders beim Stickstoff: Nur 15–20 % der Gesamtfracht im Zulauf landen im Klärschlamm. Der im Wasser verbleibende Teil liegt vorwiegend als Nitrat-Stickstoff vor und wird großenteils über die Denitrifikation, also die Umwandlung zu elementarem Stickstoff (N₂) durch Bakterien, in die Atmosphäre abgeleitet. Bis zu 15 % der Stickstofffracht werden in das Gewässer eingeleitet [Sichler et al. 2022].

Es ist grundsätzlich anzustreben, auch Stickstoff aus Abwasser effektiv zurückzugewinnen, wobei der relativ stickstoffarme Klärschlamm nicht das Medium ist, um Stickstoff aus dem Abwasser effektiv zurückzuführen. Dünger-Stickstoff wird synthetisch als Ammoniak mit dem Haber-Bosch-Prozess produziert – einem der energieintensivsten chemischen Prozesse. Weltweit werden jährlich 150 Mt Ammoniak produziert, was mit einer Emission von ca. 300 Mt CO₂eq⁶ einhergeht [Deutscher Bundestag 2018]. Die Produktionsmenge in Deutschland beträgt 3,3 Mt/a Ammoniak, wofür 7,3 TWh Endenergiebedarf aufgewendet werden [BUND 2023c].

Vor allem aufgrund des hohen Phosphorgehalts wurde Klärschlamm lange Zeit auf landwirtschaftlichen Flächen aufgebracht. Dies hat den Bedarf an Phos-

⁶ CO₂eq: CO₂-Äquivalente, d. h. Summe der Treibhausgase unter Berücksichtigung der spezifischen Potenz im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid.

phateinführen gesenkt. Falls künftig Phosphor aus Klärschlamm mit einer Rückgewinnungsrate von 80% zurückgewonnen wird, ergibt sich eine mögliche Nettorückgewinnung von 56% der Gesamtmenge an Phosphor, also von rund 40.000 t.

Wenige P-Rückgewinnungsverfahren gewinnen auch Stickstoff aus Klärschlamm zurück, z. B. wenn Ammonium-Stickstoff gemeinsam mit Phosphor als Magnesiumammoniumphosphat (Struvit) ausgefällt wird. Allerdings ist dies nur ein geringer Anteil der Stickstofffracht des Abwassers, das pro Liter im Durchschnitt 2,2 mmol Stickstoff und 0,26 mmol Phosphor enthält.⁷

Abwasser enthält auch Kalium, das als Düngemittel wichtig ist. Auch Kalium reichert sich nicht in Klärschlamm an und lässt sich deshalb bei einer landwirtschaftlichen Nutzung des Klärschlammes nur zu wenigen Prozent zurückführen.

Klärschlamm enthält auch organische Stoffe, die zur Humusbildung beitragen können. Der potenzielle Beitrag ist jedoch vergleichsweise gering. Wirtschaftsdünger (Mist, Gülle), Komposte, Zwischenfruchtanbau und eine effektive Fruchtfolgegestaltung tragen stärker zur Humusbildung bei [Montag et.al. 2015, BUND 2015].

7.2.1 Rohstoff Phosphor

Phosphorverbindungen sind für alle Organismen lebenswichtig. Die Trockenmasse von Säugetieren wie auch des Menschen besteht zu etwa 4% aus Phosphor. So besteht die Gerüstsubstanz von Knochen und Zähnen hauptsächlich aus Hydroxylapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$). Der Körper eines Menschen von 70 kg Gewicht enthält etwa 700 g Phosphor.

Die Trockenmasse terrestrischer Pflanzen enthält nur rund 0,2% an Phosphor. Die Verfügbarkeit von Phosphor gilt für Pflanzen als limitierender Wachstumsfaktor. Landwirte bringen daher phosphathaltigen Dünger auf ihre Felder. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes waren es in den Jahren 2019 bis

2021 160.000 bis 230.000 t P_2O_5 in Phosphatdünger [DESTATIS 2023]. Das Umweltbundesamt rechnet im Schnitt mit 190.000 t P_2O_5 in Phosphatdüngern jährlich [Roskosch & Heidecke 2022]. Demgegenüber steht eine potenziell rückgewinnbare Menge aus dem Abwasserpfad von etwa 66.000 t, also einem Anteil von rund 35% (bezogen auf 190.000 t). Weitere wichtige Phosphorquellen sind Gärückstände und Wirtschaftsdünger (z. B. Gülle).⁸

• Kritischer Rohstoff

Die EU-Kommission hat 2011 im Rahmen der EU-Rohstoffinitiative erstmals eine Liste kritischer Rohstoffe veröffentlicht. Diese Liste enthält für die Wirtschaft bedeutende Rohstoffe, für die ein hohes Versorgungsrisiko besteht. Die EU-Kommission aktualisiert diese Liste alle drei Jahre. Seit der letzten Aktualisierung von September 2020 gelten 30 Materialien als kritisch, darunter seit 2014 Phosphor [EU-Kommission 2014]. Ein neuer erweiterter Verordnungsvorschlag der Kommission liegt vor [EU-Kommission 2023]. Mit Blick auf die Bedeutung des Rohstoffs Phosphor hebt auch das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) das Erfordernis einer nachhaltigen Bewirtschaftung dieses ressourcenschutzrelevanten Stoffstroms hervor [BMUV 2020].

• Vorkommen

Die weltweiten Vorräte an Phosphor sind begrenzt. Weltweit sind 2020 nach Angaben des US Geological Survey rund 223 Mio. Tonnen Phosphatgestein gefördert worden. Setzt man dies in Beziehung zu den 71 Mrd. Tonnen an erkundeten und wirtschaftlich gewinnbaren Vorräten an Phosphaten, ergibt sich, dass die Vorräte noch 318 Jahre reichen [U.S. Geological Survey 2023]. Auch die Bundesregierung geht – gestützt auf Zahlen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) von einer Reichweite von mehr als 300 Jahren aus [Bundesregierung 2019]. Auch wenn man – wie der U.S. Geological Survey – von einem jährlichen Anstieg des globalen Phosphatdüngerbedarfes von ca. 2% ausgeht [UBA 2018, Federal Ministry 2022], ist eine globale Verknappung (Förderrate geringer als Bedarf) in absehbarer Zeit

⁷ Die Molarität (mmol/L) verknüpft die Konzentration (mg/L) mit der Molmasse/Atommasse. Es gilt: 1 mmol/L N entspricht 14 mg/L N und 1 mmol P entspricht 31 mg/L P.

⁸ Auch Gülle ist insbesondere mit Arzneimitteln, Schwermetallen (Kupfer) und pathogenen Organismen/Antibiotika-Resistenzen belastet. Mit der angestrebten Abnahme der industriellen Tierhaltung sinkt auch die Verfügbarkeit von Gülle als Phosphorquelle.

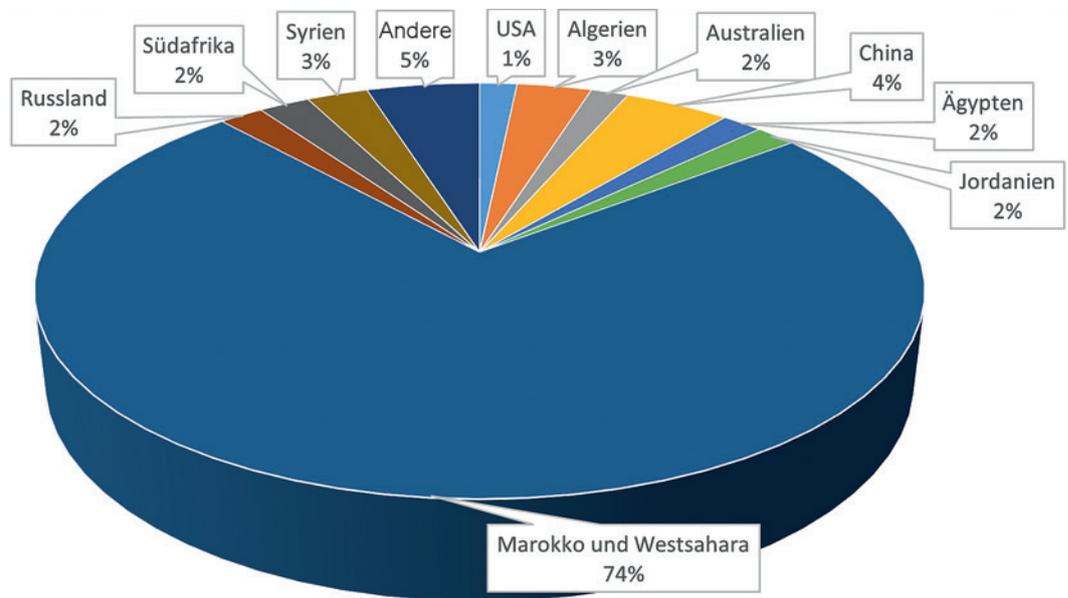


Abbildung 3: Globale Verteilung der erkundeten Reserven von Rohphosphat (Quelle: UBA 2018)

nicht zu erwarten. Etwa 90% des gewonnenen Phosphats werden zur Herstellung von Düngemitteln verwendet. Das Phosphatgestein enthält meist ca. 10–20% Phosphat (als P_2O_5) und wird durch mechanische Bearbeitung auf 30–40% P_2O_5 angereichert.

Die sechs Länder Ägypten, Algerien, Brasilien, China, Marokko und Südafrika verfügen weltweit über mehr als 87% der bekannten Phosphatreserven (siehe Abbildung 3). Die größten Reserven befinden sich im nordafrikanischen Phosphatgürtel insbesondere in Marokko und dem von Marokko besetzten Gebiet Westsahara [Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2023]. Diese Lagerstätten sind sedimentären Ursprungs (Phosphorite) und häufig stark mit Schwermetallen wie Cadmium (bis zu 147 mg/kg P) und Uran (bis zu 687 mg/kg P) belastet [Kraus et al. 2019]. Die Bedingungen des Abbaus des Rohphosphats führen zu großflächigen Zerstörungen der Landschaft. Außerdem führt der Aufschluss zu Phosphorsäure zu umfangreichen Ablagerungen von Phosphorgips [Egle et al. 2016].

• Einfuhren

Als Förderländer spielten 2020 weltweit neben Marokko (15%), China (48%) und die USA (10%) eine führende Rolle, verbrauchten aber das meiste davon selbst. Deutschland verfügt über keine relevanten Phosphatvorkommen. Wie die EU importiert es deshalb Phosphatgestein. Die EU hat 2020 ihren Bedarf an Phosphaten zu 24% aus Marokko, und zu 20% aus Russland gedeckt [EU-Kommission 2020]. Die russischen Importe waren willkommen, weil sie magmatischen Ursprungs (Apatite) und damit nur gering mit Schwermetallen belastet sind [Egle et al. 2016]. Sie werden nun aber wegen des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine nur in geringem Maße importiert. Die Abhängigkeit Deutschlands und der EU von nur wenigen Förderländern wird deutlich. Europas einzige Phosphatmine befindet sich in Finnland, dessen Reserven mit 2.300 Mio. t aber weniger als 1% der globalen Vorkommen ausmachen [Kraus et al. 2019]. Die politische Instabilität wichtiger Förderländer führte im Jahr 2022 sogar zu einer Verknappung der Importe in die EU, weshalb die EU-Kommission eine stärkere

Diversifizierung der Importe anstrebt [EU-Kommission 2022d]. Das Ziel ist daher, möglichst viel Primärphosphat durch Sekundärphosphat zu ersetzen.

7.2.2 Umweltwirkungen von Phosphor

Phosphate tragen zu der vom Menschen verursachten Überdüngung von Binnengewässern, Meeren und Böden bei. Sie sind eine wesentliche Ursache für den Verlust der Artenvielfalt. Phosphate gelangen nicht nur aus Abwässern und Klärschlamm in die Umwelt, sondern insbesondere auch durch Düngung und Abschwemmung von landwirtschaftlichen Flächen, insbesondere in Flüsse und Seen. Das erhöht primär die pflanzliche Produktion (Eutrophierung). Massentwicklungen von Algen verändern die Lebensgemeinschaften in den Gewässern. Ihr Absterben führt zur Sauerstoffzehrung bis hin zu sauerstofffreien Zonen am Gewässergrund mit der möglichen Bildung giftiger Schlämme.

Das Algenwachstum in Binnengewässern wird durch die verfügbare Menge an ortho-Phosphat (PO_4^{3-}) begrenzt, wohingegen in der Nord- und Teilen der Ostsee Stickstoff der limitierende Faktor ist. Aus der Landwirtschaft gelangen etwa ein Drittel bis zur Hälfte der Einträge von Gesamtphosphor in die Oberflächengewässer [BMUV-UBA 2022]. Die Anteile sind regional unterschiedlich. Aus Hessen, dem Saarland und Tschechien belegen Studien mit Messungen über viele Jahre an mehr als 300 regelmäßig beprobten Bächen und Flüssen, dass Kläranlagen einen bedeutsamen Beitrag zur Belastung mit gelöstem ortho-Phosphat liefern [DWA 2023]. Im Mittelgebirgsraum waren die Einträge aus der Landwirtschaft mit gelöstem ortho-Phosphat vergleichsweise gering. Abschwemmungen von Boden bei Starkregen enthielten bis zu zehnmal mehr mineralisch fest gebundenes und damit kaum pflanzenverfügbares Phosphat, das sich im Sediment ablagert und nur in geringem Maße remobilisiert werden kann. Im norddeutschen Tiefland wird in trockengelegten ehemaligen Moorböden fortlaufend ortho-Phosphat aus

Torf freigesetzt und über Drainagen und Gräben größeren Fließgewässern zugeführt. Der Anteil der Landwirtschaft an der Phosphatbelastung ist hier höher.

Die Oberflächengewässerverordnung (Anlage 7) fordert für den guten ökologischen Zustand gemäß Wasserrahmenrichtlinie in den meisten Fließgewässertypen Konzentrationen $< 0,1$ mg/l Gesamt-P und $< 0,07$ mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$ [BMJ 2016]. Diese Werte werden häufig überschritten, insbesondere in Gewässern mit einem hohen Anteil von Abwasser aus kommunalen Kläranlagen. Besonders kleine Kläranlagen leiten Phosphor in zu hohen Konzentrationen ein. Es ist Aufgabe der Wasserbehörde, im Einleitungsbescheid für das geklärte Abwasser die einzuhaltende Konzentration von $\text{PO}_4\text{-P}$ so festzulegen, dass im aufnehmenden Gewässer die für den guten ökologischen Zustand erforderliche Konzentration eingehalten wird.

Eine Reduktion der Einträge von gelöstem ortho-Phosphat lässt sich durch technische Verbesserungen bei der Abwasserbehandlung erreichen, z. B. durch genaue Dosierung der Fällmittel und bessere Durchmischung beim Eintrag der Fällmittel [DWA 2023]. Mehr Phosphat würde dann am Klärschlamm gebunden und ließe sich zurückgewinnen.

Im Jahr 2009 haben Wissenschaftler*innen mit der Publikation „A safe operating space for humanity“ weltweit Aufmerksamkeit erregt [Rockström et al. 2009]. Sie stellten einen Ansatz vor, der dazu dienen soll, die Stabilität unseres Planeten Erde zu beschreiben und die Leitplanken der Belastbarkeit (planetary boundaries) zu definieren. Dabei hoben sie neun Prozesse hervor, welche die Stabilität des Erdsystems maßgeblich bestimmen. Diese beeinflussen die globalen Wechselwirkungen zwischen Land, Ozeanen, Atmosphäre und Lebewesen. Zu diesen Prozessen zählen die biogeochemischen Kreisläufe von Phosphor und Stickstoff. In Bezug auf Phosphor setzten sie die natürliche Witterungsrate aus Phosphormineralien von ca. 1,1 Mio. Tonnen Phosphor pro Jahr in Bezie-

hung zum geschätzten Eintrag in die Weltmeere von ca. 22 Mio. Tonnen P pro Jahr [Steffen et al. 2015]. Modellrechnungen zeigen, dass nicht mehr als das 10fache des natürlichen Eintrags (11 Mio. Tonnen) eingeleitet werden darf, um Sauerstoffverarmung in den Ozeanen zu verhindern. Die planetare Leitplanke wird somit um 100% überschritten. Zu hohe Phosphoreinträge sind allerdings nicht nur ein globales Problem für die Ozeane sondern auch regional für die Süßwassersysteme insbesondere in agrarisch genutzten Gebieten. Die Grenze für den Eintrag in Süßwasserökosysteme bestimmten Steffen et al. auf jährlich nur 6,2 Mio. t Phosphor, was durch den jährlichen Gewässereintrag von 14,2 Mio. Tonnen P durch Dünger um mehr als 100% überschritten wird [Carpenter and Bennett 2011]. Dies bedeutet: Landwirtschaftliche Flächen sind deutlich mit Phosphor überdüngt. Die Einträge in Gewässer müssen erheblich reduziert werden und durch Kreislaufführung von Phosphor ist der Abbau mineralischen Phosphats deutlich zu reduzieren.

Reduktion der landwirtschaftlichen Düngung bedeutet auch geringere Importe von mineralischem Rohphosphat, führt zu weniger klima- und umweltschädlicher Intensivtierhaltung und einem effizienteren, bedarfsgerechten Einsatz von Düngemitteln.

8. Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor

8.1 Stoffliche Gesichtspunkte bei der Phosphorrückgewinnung

Drei Ansätze für die großtechnische Umsetzung der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm haben sich herauskristallisiert:

- aus Abwasser,
- aus Klärschlamm,
- aus Klärschlamm-Asche oder den Produkten alternativer thermischer Verfahren.

Wie viel Phosphor sich zurückgewinnen lässt, hängt vom behandelten Stoffstrom ab: Die Phosphorkonzentration im Abwasser ist mit $< 0,001\%$ (durchschnittlich $6,9 \text{ mg/L}$ [DWA 2022]) meist sehr gering. In der Klärschlamm-Trockenmasse beträgt sie meist über 2% und in Klärschlamm-Asche liegt sie überwiegend zwischen 6 bis 8% [Sichler et al. 2022].

Die Konzentration des Phosphors ist in Klärschlamm-Aschen also etwa dreimal so hoch wie in der Trockenmasse des Klärschlammes. Das macht es prinzipiell lohnender, Phosphor aus der Asche als aus dem Klärschlamm zurückzugewinnen, weshalb auch die Anforderungen an die Rückgewinnung in der AbfKlärV höher sind (siehe Abschnitt 9).

Bei nasschemischen Verfahren werden die Phosphate aus dem Abwasser, dem Schlamm oder der aufbereiteten Klärschlamm-Asche ausgefällt und abgetrennt. Meist wird in einem ersten Schritt biologisch oder chemisch gebundener Phosphor durch Absenken des pH-Werts mittels Säurezugabe aus dem Klärschlamm oder der Verbrennungsasche in die Flüssigphase überführt. Anschließend werden die ungelösten Feststoffe abgetrennt und die verbleibende Lösung neutralisiert. Die Gewinnung des Phosphors erfolgt über Fällung durch Erhöhung des pH-Wertes durch Zugabe von Natronlauge (NaOH), Magnesiumhydroxid (Mg(OH)_2) oder Calciumhydroxid (Ca(OH)_2). Als Produkte fallen dabei das Mineral Struvit (Magnesiumammoniumphosphat) oder Calciumphosphate an. In einigen Fällen wird die Lösung zu Phosphorsäure weiterver-

arbeitet, die vielfältig genutzt werden kann. Es ist zu beachten, dass auch die in der Verbrennung angereicherten Schwermetalle mit in Lösung gehen können. In vielen Verfahren findet daher eine zusätzliche Abtrennung der Schwermetalle statt.

Bei thermochemischen Verfahren werden die Klärschlämme erhitzt. Dabei werden Schwermetalle ausgetrieben und die phosphathaltigen Rückstände können ggf. unmittelbar als Dünger eingesetzt werden, soweit sie die Schadstoffgrenzwerte der Düngemittelverordnung einhalten.

Alle derzeit in der Erprobung befindlichen Verfahren haben Vor- und Nachteile [UBA 2018]. Verfahren zur Rückgewinnung des Phosphors aus Abwasser, Zentrat⁹ oder Faulschlamm lassen sich recht kostengünstig in bestehende Kläranlagen integrieren. Sie sind relativ einfach zu betreiben und die Recyclate sind meist gut pflanzenverfügbar. Allerdings beträgt die Rückgewinnungsquote aus Klärschlamm oft unter 50% Prozent.

Wird Klärschlamm thermisch behandelt, ist der Rückgewinnungsgrad teilweise höher als 90% . Organische Stoffe werden zerstört und der Klärschlamm wird gleichzeitig stofflich und thermisch genutzt. Negativ schlagen die relativ hohen Investitionskosten und eine aufwändige Verfahrensführung zu Buche. Zur Verbrennung und zur nachfolgenden Aufbereitung muss Klärschlamm oft zu zentralen Anlagen transportiert werden.

Eine Voraussetzung für die Akzeptanz der Phosphorrecyclate am Markt ist der Nachweis, dass sie kontinuierlich in ausreichender Menge und in guter Qualität erzeugt werden können. Die Eigenschaften und damit die Absatzmöglichkeiten der Recyclate können sich je nach Produktart, Herstellungsverfahren und Ausgangsprodukt deutlich unterscheiden.

⁹Zentrat ist die Flüssigkeit, die beim Abtrennen von Feststoffen (hier: Klärschlamm) durch Zentrifugation oder Filterung (z. B. Kammerfilterpressen) gewonnen wird.

Pflanzenverfügbarkeit der Recyclate

Ein entscheidendes Beurteilungskriterium für die Nutzung des Phosphors aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammasche als Dünger ist die Pflanzenverfügbarkeit. Die Pflanzen müssen das recycelte Phosphat über ihre Wurzeln auch aufnehmen können. Um die Eignung als Düngemittel zu belegen, greifen Unternehmen und Forschungseinrichtungen auf Pflanzversuche mit Topfpflanzen zurück, die empirisch zeigen, ob recyceltes Phosphat als Düngemittel wirkt. Im Laborversuch gilt die Löslichkeit des recycelten Phosphats in „Neutral Ammonicitrat“ (NAC), dem Ammoniumsalz der Zitronensäure, als Messverfahren zur Feststellung der Pflanzenverfügbarkeit. Die erforderliche Düngewirkung ist bei den meisten Rückgewinnungsverfahren gegeben [Kratz & Schnug 2009]. Folgende Feststellungen lassen sich treffen:

- Hohe Eisengehalte, verursacht durch den Einsatz von Eisensalzen als Fällmittel in der dritten Reinigungsstufe, wirken sich negativ auf die Pflanzenverfügbarkeit aus. Dasselbe gilt für die chemische Fällung mit Aluminiumsalzen.
- Demgegenüber sind Recyclate aus Kläranlagen, die mit der biologischen Phosphorelimination, kurz „Bio-P“-Verfahren, arbeiten, meist gut pflanzenverfügbar. Dabei werden Polyphosphat-akkumulierende Organismen in einem anaeroben Becken in eine Stresssituation gebracht. Fehlt den Mikroorganismen Sauerstoff, greifen sie auf in ihren Zellen eingelagerte Polyphosphate zurück. Um diesen Prozess zu unterstützen, muss den Mikroorganismen leicht abbaubares organisches Substrat zur Verfügung gestellt werden. Wenn die Mikroorganismen danach in einen aeroben Lebensbereich gelangen, nehmen sie das zuvor gelöste Phosphat wieder auf und lagern noch weitere Phosphate aus dem Abwasser in ihre Zellen ein, wodurch dann der Gesamt-Phosphatgehalt im Wasser sinkt.
- Recyclate aus Fällungsverfahren (mit Bio-P-Verfahren) verfügen häufig über eine bessere Pflanzenverfügbarkeit als die aus Klärschlammaschen, wobei sich bei letzteren die Verfahren sehr stark unterscheiden.
- Recyclate aus Klärschlammasche sind frei von organischen Verunreinigungen (außer PFAS, siehe Abschnitte 10 und 11).
- Recyclate aus Klärschlammasche enthalten oft zu hohe Konzentrationen an Schwermetallen, die abzutrennen sind.

Die zur Phosphorrückgewinnung im Jahr 2023 diskutierten Verfahren werden bisher überwiegend in Demonstrations- oder Pilotanlagen erprobt. Nur wenige werden bereits großtechnisch umgesetzt. Einige, beispielhafte Verfahren werden im Anhang vorgestellt.

Bei den Rückgewinnungsverfahren aus Abwasser (Zentrat) oder Klärschlamm wird der Phosphor durch Zugabe von Mineralsalzen als Magnesiumammoniumphosphat (Struvit) oder als Calciumphosphat ausgefällt und abgetrennt. Das Produkt ist meist pflan-

zenverfügbar und erfüllt die Vorgaben der DüMV. Allerdings kann die bakterielle Kontamination des Phosphats dessen Verwendbarkeit einschränken [Natz 2022]. Meist wird die angestrebte Rückgewinnungsquote von 50% in der Klärschlamm-trockenmasse nicht erreicht. Es kann aber gelingen, den Phosphorgehalt des Klärschlammes auf weniger als 2% zu senken, womit die Vorgaben der AbfKlärV erfüllt werden. Voraussetzung ist, dass in der Kläranlage Phosphor über das Bio-P-Verfahren und nicht durch Eisen- oder Aluminiumfällung abgetrennt wird. Der abgereicherte Klärschlamm wird in der Regel in Mitverbrennungs-

anlagen entsorgt. Das Verfahren der hydrothermalen Karbonisierung (HTC) nimmt eine Sonderstellung ein. Es verspricht, die 50%-Rückgewinnungsquote einzuhalten und liefert ein hygienisch unbedenkliches Produkt. Allerdings liegen keine Erfahrungen in größeren Anlagen vor: Nach Erfahrungen in Pilotanlagen könnte das Filtrat, das nach Abtrennung des Phosphats in die Schlammfäulung zurückgeführt wird, sich hemmend auf die Schlammfäulung auswirken und schwer abbaubare Stoffe in hoher Konzentration enthalten [Björnsen Beratende Ingenieure GmbH 2023, Remy und Stüber 2015].

Viele Verfahren gewinnen den Phosphor aus den Aschen von Monoverbrennungsanlagen zurück. In der Regel wird die Asche mit Säuren aufgeschlossen. Schwermetalle werden abgetrennt und Phosphor durch Fällung als Phosphorsalze oder in Form von Phosphorsäure wiedergewonnen. Einige Verfahren trennen den Phosphor durch thermische Behandlung aus der Asche ab oder sie isolieren ein marktfähiges Produkt aus der schwermetallarmen Asche. Bei diesen Verfahren lässt sich mehr als 80% des Phosphors aus der Klärschlamm-asche zurückgewinnen.

Alternativ zur Verbrennung des Klärschlammes werden in Pilotanlagen Verfahren erprobt, den Klärschlamm unter Sauerstoffausschluss zu erhitzen. Es entstehen Pyrolysegas (Syngas) und kohlehaltige Rückstände. Die Schwermetalle werden meist über die Gasphase abgetrennt. Das Syngas und teilweise die kohlehaltigen Rückstände werden verbrannt, womit die notwendige Energie gewonnen wird. Je nach Verfahrensvariante reichert sich der Phosphor in der Gasphase an und kann als Phosphorsäure gewonnen werden oder er verbleibt in einem mineralischen Rückstand, der sich als Dünger eignet. Bleibt Kohle als Rückstand, kann deren weitere Verwendung ebenso wie bei evtl. Pyrolyseölen zweifelhaft sein. Der BUND hat sich grundsätzlich gegen jede umweltoffene Verwendung von Pyrolysekohle ausgesprochen, da beim radikalischen Prozess der Pyrolyse immer polycyclische aro-

matische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen [BUND 2015, BUND 2019]. Diese persistenten Schadstoffe stellen ein erhebliches Umwelt- und Gesundheitsrisiko dar [CHEMIE.DE, BfGA, UBA 2016, Überschär 2006], auch wenn sie teilweise zunächst fest an Kohle gebunden sind, langfristig aber freigesetzt werden könnten. Der BUND bekräftigte 2023 seine ablehnende Haltung zur Verwertung von Pyrolysekohle [BUND 2023b]. Außerdem ist zu bedenken, dass nach einem Urteil des Verwaltungsgerichts Koblenz von Januar 2022 die entstehende Pyrolysekohle in Deutschland nicht direkt als Düngemittel verwendet werden darf [Zettl et al. 2023]. In Schweden, Dänemark und Tschechien können Klärschlamm-pyrolysate als Düngemittel verwendet werden [Björnsen Beratende Ingenieure 2023].

Bei begrenzter Sauerstoffzufuhr lässt sich Klärschlamm vergasen. In einer Pilotanlage in Balingen mit einer Kapazität von 2.400 t/a entstehen bei ca. 850 °C thermisch nutzbare Gase. Im festen Rückstand und dem bei der Gasreinigung abgeschiedenen Staub ist Phosphor angereichert und lässt sich zu Düngemitteln weiterverarbeiten [Schnell und Quicker 2020]. Bei diesen Verfahren gilt die 50%-Rückgewinnungsquote bezogen auf den Phosphorgehalt in der Klärschlamm-trockenmasse. Diese Anforderung wird in der Regel eingehalten. Derartige Anlagen unterliegen – ebenso wie Monoverbrennungsanlagen – der 17. BImSchV [BMJ 2021].

Sechs Jahre nach Inkrafttreten der novellierten Abf-KlärV gibt es somit wenige großtechnische Verfahren, viele Verfahrensvorschläge mit Pilot- oder Demonstrationsanlagen, aber noch kein Rückgewinnungsverfahren, das als „Stand der Technik“ bezeichnet werden könnte. Vorgaben für die einzusetzenden Verfahren zur Phosphorrückgewinnung trifft die Abf-KlärV nicht.

Generell benötigt man vom Beginn des Aufbaus einer Anlage im industriellen Maßstab bis zur Serienreife acht bis zehn Jahre. Viel Zeit wurde verloren. Viele

Kläranlagenbetreiber, die Ende 2023 über geplante und eingeleitete Maßnahmen berichten müssen, sehen sich in einem Dilemma, weil sie nicht sicher sein können, dass das Verfahren, das sie favorisieren, wirklich funktioniert und die Produktqualität der Recyclate für die Verwendung als Düngemittel oder für andere Anwendungen geeignet ist.

8.2 Energie- und Klimabilanz der Verfahren zur Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung

Klärschlamm ist kein guter Brennstoff. Er wird vor einer Verbrennung mittels Zentrifugen oder Pressen entwässert und besitzt danach einen Wassergehalt von ca. 75%. Um Klärschlamm verbrennen zu können, muss er getrocknet werden, um danach einen Wassergehalt von 20 bis 30% zu haben. Für die notwendige Trocknung kann die Abwärme der Verbrennung von Faulgas und ggf. der Verbrennung von Klärschlamm genutzt werden. Es ist insbesondere bei größeren Kläranlagen, bei denen die Verbrennung des Klärschlammes auf dem Betriebsgelände stattfindet, anzustreben, dass die Energie durch Kraft-Wärme-Kopplung in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) genutzt wird [Frankfurter Rundschau 2023]. Nach Angaben der DWA ist der Stromverbrauch von Kläranlagen 27,8–33,8 kWh je Einwohner und Jahr, was ca. 2% des Stromverbrauchs von Haushalten entspricht. Insgesamt verbrauchen Kläranlagen in Deutschland jährlich 3.148 GWh. Dem steht eine Eigenstromerzeugung von 1.118 GWh gegenüber, insbesondere bei großen Kläranlagen mit Schlammfau- lung [DWA 2021].

Bei der Erstellung der Bilanzen stützen sich alle Autor*innen im Wesentlichen auf die Angaben der Hersteller von Anlagen zur Phosphorrückgewinnung, die sich meist nicht überprüfen lassen. Kraus et al. verglichen Energie- und Klimabilanz der Herstellung von Düngemitteln aus mineralischem Primärphosphat mit der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm [Kraus et al. 2019]. Der kumulierte Ener-

gieaufwand bei Primärphosphaten beträgt demnach ca. 27 MJ/kg P₂O₅ (entspr. 61,8 MJ/kg P) und die Treibhausgas (THG)-Emissionen 2,75 kg CO₂eq/kg. P. Im Vergleich dazu sind Energieaufwand und Treibhausgasemissionen bei den meisten Fällungsverfahren niedriger; bei den Verfahren zur Gewinnung der Phosphate aus der Asche von Monoverbrennungsanlagen sind sie ähnlich hoch wie bei den Primärphosphaten.

Der BUND Naturschutz in Bayern hat 2022 das Ingenieurbüro Björnsen beauftragt, eine Klimabilanz von vier unterschiedlichen thermischen Phosphorrückgewinnungsverfahren für Kläranlagen mit einem Einwohnerwert von 50.000 (Größenklasse 4a) zu erstellen und zu vergleichen [Björnsen Beratende Ingenieure GmbH 2023]. Die vier Verfahren (siehe Anhang) sind:

- die Monoverbrennung von Klärschlamm nach dem AshDec-Verfahren, bei dem die Klärschlamm- asche nach Aufreinigung direkt verwendet wird;
- die Monoverbrennung von Klärschlamm nach dem TetraPhos-Verfahren, bei dem aus der Klärschlamm- asche technische Phosphorsäure gewonnen wird;
- die Pyrolyse von Klärschlamm nach dem Verfahren der Firma Pyreg, bei dem die Phosphate im Kohle- rückstand enthalten sind;
- die hydrothermale Karbonisierung (HTC) von Klärschlamm nach dem Verfahren der Firma Terra Nova, bei dem die Phosphate aus der nach hydrothermalen Behandlung erhaltenen Lösung ausgefällt werden.

Bei diesem Vergleich sind die THG-Emissionen der beiden Verfahren zur Monoverbrennung deutlich größer als bei der Pyrolyse und dem HTC-Verfahren (siehe Tabelle 2). Dies erstaunt nicht, da der im Klärschlamm enthaltene Kohlenstoff vollständig zu CO₂ oxidiert wird. Allerdings geschieht dies unter der Annahme, dass die Pyrolysekohle eine direkt als Dünger verwendbare Kohlenstoffsänke darstellt und somit gutgeschrieben werden kann. Insgesamt ermitteln die Gutachter für den Betrieb der Aufbereitungsverfah-

ren Emissionen von 31,33 bis 137,83 kg CO₂eq/kg P (siehe Tabelle 2) – ein Ergebnis, das sich gravierend von den Ergebnissen von Kraus et al. unterscheidet [Kraus et al. 2019]. Der Grund liegt in unterschiedlichen Systemgrenzen¹⁰: Kraus et al. betrachteten nur die zusätzlichen Aufwendungen für das Phosphor-

Recycling, während Björnsen die Emissionen für Entwässerung und Trocknung sowie für den Kläranlagenbetrieb und den Abwassertransport berücksichtigte, die zumeist auch ohne P-Recycling bei der Klärschlammverwertung anfallen.

Name		Monoverbrennung + AshDec	Monoverbrennung + TetraPhos	Pyreg	HTC
Bezugsgröße	P-Rückgewinnung in kg/a	28.858	26.800	33.500	33.503
THG/kg P	kg CO ₂ eq/kg P	92,35	137,87	31,33	47,82

Tabelle 2: THG-Emissionen bei vier Rückgewinnungsverfahren (bei 50.000 EW) [Björnsen Beratende Ingenieure GmbH 2023]

¹⁰ Mit Systemgrenzen bezeichnet man die Entscheidung, welche Prozesse man in die vergleichende Betrachtung einbezieht. Da man (aus Datenmangel) nicht den gesamten Lebensweg betrachten kann, beschränkt man sich auf bestimmte Ausschnitte. Unterschiedliche Systemgrenzen erschweren den Vergleich zwischen Studien.

9. Bestimmungen der Klärschlammverordnung

9.1 Vorschriften und Grenzwerte für die bodenbezogene Verwertung

Die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) regelt, wie Klärschlamm zu behandeln und zu verwerten ist [Bundesregierung 2017]. Die Klärschlammverordnung von 1992 wurde 2017 novelliert. Mit der neuen Verordnung wurden mehrere Grenzwerte für die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm neu gefasst und mit der Düngemittelverordnung (DüMV) [BMJ 2012] verknüpft.

Der Gesetzgeber hat für die bodenbezogene Verwertung die Grenzwerte einiger Schadstoffe verschärft (z.B. Cadmium, polychlorierte Biphenyle – PCB), andere abgeschwächt (z.B. Kupfer und Zink) und zusätzliche festgelegt. Dabei bezieht sich die AbfKlärV (Anlage 1) auf die Düngemittelverordnung (DüMV, Anlage 1, Abschnitt 4.1 und Anlage 2, Tabelle 1,4) und nennt nur wenige Grenzwerte zusätzlich (z.B. AOX und Benzo[a]pyren) (siehe Tabelle 3).

Die von VDLUFA und DWA getragene „Qualitätssicherung Landbauliche Abfallverwertung“ (QLA) nennt über die gesetzlichen Anforderungen hinaus weitere Parameter (z.B. DEHP, pharmakologische Wirkstoffe, Triclosan, Organozinn), die optional untersucht werden können. Es besteht ein Zertifizierungssystem mit Qualitäts- und Prüfbestimmungen für die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen, womit eine hochwertige, gesicherte landwirtschaftliche Nutzung von Klärschlämmen ermöglicht werden soll [QLA 2017].

9.2 Bestimmungen zur Rückgewinnung von Phosphor

• Rückgewinnungspflichten

Die Phosphorrückgewinnungspflicht nach § 3 AbfKlärV gilt grundsätzlich für alle Abwasserbehandlungsanlagen unabhängig von der Ausbaugröße, die kommunales Abwasser oder Abwasser aus Betrieben (z.B. Lebensmittelindustrie), das in seiner stofflichen Zusammensetzung dem kommunalen Abwasser

Substanz	AbfKlärV 2017/ DüMV 2012
Arsen	40 mg/kg TM
Blei	150 mg/kg TM
Cadmium	1,5 mg/kg TM
Chrom VI	2,0 mg/kg TM
Kupfer	900 mg/kg TM
Nickel	80 mg/kg TM
Quecksilber	1,0 mg/kg TM
Thallium	1,0 mg/kg TM
Zink	4.000 mg/kg TM
AOX	400 mg/kg TM
Benzo[a]pyren	1,0 mg/kg TM
6 einzelne PCB	je 0,1 mg/kg TM
Chlorierte Dioxine + Furane (PCDD/F) Et dioxin- ähnliche PCB (dl-PCB).	30 ng/kg TM
PFAS (PFOA + PFOS)	0,1 mg/kg TM

Tabelle 3: Grenzwerte für die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm

gleich, behandeln. Die Verordnung unterscheidet zwischen Größenklassen:

- Für Klärwerke der Größenklasse 5, also jene mit einer genehmigten Ausbaugröße von mehr als 100.000 Einwohnerwerten (EW), gilt die Recyclingpflicht von 2029 an. Von dann an dürfen sie Klärschlamm nicht mehr bodenbezogen verwerten (AbfKlärV Art. 5, § 3).
- Für Abwasserbehandlungsanlagen der Größenklasse 4b mit einer genehmigten Ausbaugröße mit mehr als 50.000 EW gilt diese Pflicht von 2032 an. Von dann an dürfen sie Klärschlamm nicht mehr bodenbezogen verwerten. (AbfKlärV Art. 6)
- Für kleine und mittelgroße Anlagen (Größenklassen 1 bis 4a) gilt die Rückgewinnungspflicht grundsätzlich ebenso. Sie können im Einzelfall von der zuständigen Behörde unter Einhaltung der Grenzwerte die Genehmigung erhalten, Klärschlämme weiterhin bodenbezogen zu verwenden oder zu vermarkten (AbfKlärV Art. 5).

Alle Klärwerksbetreiber haben bis 31.12.2023 der jeweils zuständigen Behörde über ihre geplanten und bereits eingeleiteten Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung und zur Klärschlammmentsorgung vorzulegen (AbfKlärV Art. 4, § 3a i.d.F. vom 01.01.2023). Dabei sind auch Analysen des Phosphorgehalts und des Gehalts an basisch wirksamen Stoffen vorzulegen. Von den zuständigen Länderbehörden wurde klar gestellt, dass eine Festlegung auf ein konkretes Verfahren zu diesem Zeitpunkt noch nicht erforderlich ist [LAGA 2020, Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2023].

• Phosphorrückgewinnungsquoten

Phosphor ist gemäß § 3a AbfKlärV grundsätzlich dann zurückzugewinnen, wenn sein Gehalt in der Trockenmasse des Klärschlammes mindestens 2%, also mindestens 20 g/kg TM, beträgt. Ist der Phosphorgehalt niedriger, entfällt die Rückgewinnungspflicht. Solche Klärschlämme dürfen nicht mit Klärschlämmen mit höherem P-Gehalt vermischt werden (Art. 5, § 3a, Abs. 2).

Für die Betreiber gibt es zwei Vorgaben für die zurückzuholende Menge:

- Sie müssen mindestens 50% des Phosphors aus dem Klärschlamm zurückgewinnen – oder zumindest so viel, dass der Phosphorgehalt pro Kilogramm TM auf unter 2% verringert wird (AbfKlärV § 3a). Der Klärschlamm, der übrig bleibt, soll thermisch verwertet werden. Eine bodenbezogene Ausbringung des restlichen Klärschlammes wird verboten.
- Sie müssen, wenn sie Phosphor aus Klärschlamm-Asche oder anderen Rückständen einer thermischen Behandlung zurückgewinnen, eine Ausbeute von mindestens 80% des enthaltenen Phosphors erzielen (AbfKlärV § 3b).

Neben der Verbrennung gibt es weitere Phosphorrückgewinnungsverfahren, die Klärschlamm thermisch behandeln und dabei Phosphor im Rückstand anreichern. Dazu zählen u. a. die hydrothermale Karbonisierung, sowie die Vergasung und die Pyrolyse, bei denen ebenfalls mindestens 80% des Phosphors aus den Rückständen gewonnen werden muss.

Klärschlämme, die in der Trockenmasse weniger als 2% Phosphor enthalten, dürfen mit anderen Abfällen mitverbrannt oder auch in Zement- sowie Kohlekraftwerken eingesetzt werden.

10. Bewertung der Verfahren

Die Behandlung und Verwertung von Klärschlamm hat sich in den vergangenen Jahrzehnten deutlich verändert. Waren in den 1990er Jahren noch die Deponierung und die landwirtschaftliche Verwertung dominierend, ist seit dem Jahr 2005 die Deponierung verboten und seit 2017 die bodenbezogene Verwertung ein Auslaufmodell. Die Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft ist aus Sicht der Nutzung der darin enthaltenen Nährstoffe grundsätzlich sinnvoll. Insbesondere Phosphor reichert sich im Klärschlamm an und wird auf diese Weise in den Boden zurückgeführt. Außerdem ist die bodenbezogene Verwertung des Klärschlammes die preiswerteste Methode mit hoher Energieeffizienz im Vergleich zu allen technischen Behandlungsverfahren. Jedoch haben in der Diskussion immer die Bedenken wegen des Schadstoffgehaltes des Klärschlammes überwogen. In der Konzeption der Abwasserreinigung ist Klärschlamm eine Stoffsenke für Schwermetalle und alle organischen Stoffe, die schwer biologisch abbaubar sind und eine mäßige bis geringe Wasserlöslichkeit besitzen. Sie adsorbieren an den Schlamm und werden bei der bodenbezogenen Verwertung des Schlammes in Böden eingearbeitet und in der Umwelt verteilt. Hinzu kommen Bedenken wegen des Vorhandenseins pathogener und Antibiotika-resistenter Organismen, insbesondere Bakterien. Die aktuellen Grenzwerte der Klärschlamm- und Düngemittelverordnung haben zwar das Umweltrisiko reduziert, aber Zweifel an der Tauglichkeit von Klärschlamm für bodenbezogene Zwecke nicht zerstreut. Zu vielfältig ist die Stoffmatrix im Klärschlamm, als dass sich das Risiko des Eintrags von Schadstoffen in die Umwelt und ggf. auch in Kulturpflanzen sicher bestimmen ließe. Der Klärschlamm kleiner Kläranlagen, der bei begründeten Ausnahmen auch künftig landwirtschaftlich verwertet werden kann, sollte aber mindestens den Qualitäts- und Prüfanforderungen der QLA[QLA 2017] genügen.

Es ist weiterhin anzustreben, den Eintrag von Schadstoffen ins Abwasser zu reduzieren und künftig an

der Quelle möglichst nachhaltige Chemikalien (das sind Chemikalien, die sich leicht und vollständig abbauen lassen) einzusetzen [BUND 2023a]. Aber allein das Beispiel Arzneimittel zeigt [BUND 2020]: Ein annähernd schadstofffreier Klärschlamm ist aktuell nicht erreichbar.

Die Akzeptanz der Landwirte, Klärschlamm zu nutzen, schwindet immer stärker. Klärschlamm weist keine Vorteile gegenüber anderen organischen Düngern wie Wirtschaftsdünger und Komposten aus [Kraus et al. 2019]. Künftig werden es deshalb nur wenige kleine Kläranlagen sein, die Abnehmer für ihren Schlamm finden. Häufig erhalten bisher die Landwirte einen Preis für die Abnahme von Klärschlamm, z. B. 350 € je Tonne TM in Mittelhessen [ZfK 2021]. Die Untersuchungen zeigen, dass Klärschlämme aus kleinen Abwasserbehandlungsanlagen ähnlich stark mit schädlichen Stoffen, Resistenzgenen und mobilen genetischen Elementen kontaminiert sind wie Klärschlämme aus großen Anlagen [Wolters et al. 2022].

Die Mehrheit der Klärschlämme wurde deshalb im Jahr 2021 thermisch behandelt, zumeist als Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, Abfallverbrennungsanlagen und Zementwerken. Was manche als energetische Nutzung bezeichnen, erfüllt diesen Anspruch nur bedingt: Thermische Verfahren, insbesondere die Verbrennung, sind eine end-of pipe Maßnahme, bei der auch Wertstoffe vernichtet werden. Treibhausgase und Luftschadstoffe werden emittiert. Aufwändige Filtertechniken sind erforderlich. Toxische Rückstände sind zu entsorgen. Klärschlamm hat auch nach Filtration und Trocknung einen so hohen Wassergehalt, so dass sein Brennwert gering ist. Auch wenn die Anforderungen der 17. BImSchV eingehalten werden, bestehen Bedenken im Hinblick auf evtl. Schadstoffe, die aus der komplexen Stoffmatrix Klärschlamm entstehen könnten (s.u. unter „Emissionen“). Nachteilig ist aber in jedem Fall, dass bei der Mitverbrennung die Phosphorgehalte in den Verbrennungsrückständen so niedrig sind, dass sich eine Rückgewinnung

nicht lohnt. Außerdem wird es in naher Zukunft keine Kohlekraftwerke mehr geben und auch Zementwerke werden zunehmend decarbonisiert, so dass im Wesentlichen nur Abfallverbrennungsanlagen für die Mitverbrennung in Betracht kommen. Gemäß den Bestimmungen der AbfKlärV wird sich somit die Mitverbrennung auf kommunale Klärschlämme mit einem P-Gehalt kleiner 2% und Klärschlämme, denen nasschemisch Phosphat entzogen wurde, sowie auf industrielle Klärschlämme beschränken.

Die AbfKlärV fordert seit 2017, dass kommunale Klärschlämme aus Kläranlagen der Größenordnung 4b und 5 künftig nicht mehr bodenbezogen verwertet werden dürfen, und der enthaltene Phosphor (> 2% in der TM) bis 2029 bzw. 2032 zurückzugewinnen ist. Bis 31.12.2023 sollen die Kläranlagenbetreiber Auskunft geben, wie sie diese Anforderungen erfüllen wollen. Diverse Verfahrensvorschläge liegen vor, sind aber nur zu einem geringen Teil großtechnisch erprobt. Folgende Verfahrenstypen sind zu betrachten:

- Fällung des Phosphors und anschließende Verbrennung des abgereicherten Schlamms,
- Monoverbrennung des Schlamms und Rückgewinnung des Phosphors aus der Verbrennungasche,
- Alternative thermische Verfahren, die überwiegend unter Sauerstoffausschluss arbeiten.

Grundsätzlich haben diese Verfahren gegenüber der bodenbezogenen Verwertung den Vorteil, dass auch Klärschlämme, die die Grenzwerte der AbfKlärV nicht einhalten, aufbereitet werden können, falls die Schadstoffe dabei abgetrennt werden. Bei der Beurteilung der Verfahren sind die folgenden Bewertungskriterien zu beachten. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass unterschiedliche örtliche Verhältnisse (Kläranlagengröße, Transportaufwand, Platzbedarf, Möglichkeit regionaler Zusammenschlüsse etc.) zu unterschiedlichen Entscheidungen bei der Verfahrensauswahl führen werden:

- Transportaufwand (zentral vs. dezentral)
- Emissionen
- Reststoffe

- Energie- und Klimabilanz
- Eingesetzte Chemikalien
- Pflanzenverfügbarkeit des Recyclats
- Entwicklungsstand
- Kosten

Grundsätzlich sind zur Vermeidung eines größeren **Transportaufwandes** Verfahren zu bevorzugen, die sich auf dem Gelände der Kläranlage, ggf. auch durch das Kläranlagenpersonal, oder in deren Nähe realisieren lassen. In Bezug auf nasschemische Fällungen von Phosphorsalzen aus Klärschlamm oder Abwasser trifft dies zu. Der verbleibende phosphatarmer Klärschlamm muss dann allerdings zu einer (Mit-) Verbrennungsanlage befördert werden. Monoverbrennungsanlagen lassen sich demgegenüber nur mit größerem Einzugsgebiet betreiben. Hier unterscheidet sich die bisher vorherrschende Wirbelschichtfeuerung, die sich erst ab ca. 20.000 t TM/a stabil betreiben lässt, von anderen Feuerungstypen wie der Staubfeuerung, die für die Region Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen in mehreren kleineren Anlagen vorgesehen ist [Lincke und Eder 2023]. Sehr kleine Verbrennungsanlagen an Kläranlagen mit weniger als 50.000 EW sind jedoch nicht empfehlenswert, weil solche Anlagen eine kontinuierliche, stabile Anlieferung von Klärschlamm benötigen, und der spezifische Aufwand z. B. für die Abgasreinigung zu hoch wäre. Unklar ist, welche Mindestgröße bei den alternativen Verfahren erforderlich ist, um einen flexiblen, stabilen Betrieb zu gewährleisten. Immerhin befinden sich die Pilot- und Demonstrationsanlagen einiger Verfahren wie EuPhoRe und Pyreg an eher kleineren Kläranlagen, was für deren dezentrale Einsetzbarkeit spricht.

Die **Emissionen** aller Verbrennungsanlagen – ob Mitverbrennung oder Monoverbrennung – unterliegen den Anforderungen der 17. BImSchV. Die Anforderungen an die Rauchgasreinigung sind deshalb relativ streng, obgleich nicht ausgeschlossen werden kann, dass es angesichts der Vielfalt der Schadstoffe in Klärschlamm zur Mobilisierung unerwünschter Stoffe

kommt. Flüchtige Schwermetalle wie Quecksilber, Blei, Cadmium müssen aus dem Rauchgas gefiltert werden; andere Schwermetalle wie Nickel, Chrom oder Zink finden sich in den Verbrennungsrückständen wieder. Besonders unsicher ist die Verbrennung von Fluorchemikalien (PFAS). Eine Verbrennungstemperatur von 850 °C reicht vermutlich nicht aus, diese extrem stabilen Verbindungen zu zersetzen. Vieles spricht für eine notwendige Temperatur der Verbrennungsgase von wenigstens 1.100 °C mit einer Mindestaufenthaltszeit der Verbrennungsgase von 2 Sekunden [BUND 2021b, Brunn et al. 2023]. Nach Angaben der ECHA enthält häuslicher Klärschlamm in Europa im Durchschnitt 114 µg PFAS (Summe) je kg Trockenmasse (ECHA 2023). Ein Problem bei der Monoverbrennung ist auch die Entstehung von Lachgas (N₂O), das ein erhebliches Treibhausgaspotenzial besitzt [Svoboda et al. 2005]. Zur Minderung der Lachgas-Emissionen wären ebenfalls höhere Temperaturen (> 900 °C) erforderlich¹¹ [Stöcklein et al. 2018]. Auch die meisten alternativen Verfahren verbrennen letztlich alle organischen Bestandteile, entweder als SynGas und/oder als Koks, so dass eine entsprechende Abgasreinigung vorzusehen ist. Einige Verfahren (z. B. EuPhoRe, Grenzebach) überführen die Schwermetalle z. B. durch Zugabe von Alkali- oder Erdalkalichloriden in flüchtige Chlorokomplexe, die aus der Gasphase abgetrennt werden müssen. Ob die erhöhten Schwermetallkonzentrationen im Abgas zu erhöhten Emissionen nach der Rauchgasreinigung führen, ist unklar. Hinzuweisen ist auf die Entstehung des giftigen Kohlenstoffmonoxid (CO) während der Klärschlammbehandlung nach dem Grenzebach-Verfahren. Die Anlage benötigt Sicherheitseinrichtungen, um den Austritt dieses Gases zu verhindern.

Nach Abtrennung des Düngerphosphats fallen in praktisch allen Verfahren **Reststoffe** an. Bei den Fällungsverfahren aus Klärschlamm oder Abwasser ist es phosphorarmer Klärschlamm, der einer (Mit-)Verbrennung zuzuführen ist. Bei der Monoverbrennung ist es nach Abtrennung des Phosphors meist die

unlösliche Restasche, die wegen ihres manchmal hohen Schwermetallgehaltes zu deponieren ist. Grundsätzlich ist es vorteilhaft, den Phosphor von den übrigen Aschebestandteilen zu trennen, um Kontaminationen des Düngemittels zu vermeiden. Die Anbieter des PExtract-Verfahrens verwenden allerdings ebenso wie beim EuPhoRe-Verfahren den Rückstand direkt als Düngemittel, da eine Schwermetallabtrennung bereits während der thermischen Behandlung stattfindet. Beim Grenzebach-Verfahren ist der Rückstand nach Angaben des Herstellers eine schadstoffarme „Mineralik“, die z. B. für bauliche Zwecke verwendet werden kann.

Ein Vergleich des **Energiebedarfs** und der Emission von Treibhausgasen (**Klimabilanz**) ist auf der Basis der oft nicht nachprüfbaren Herstellerangaben nur bedingt möglich. Grundsätzlich ist festzustellen, dass bei allen Verfahren, bei denen die organische Substanz des Klärschlammes vollständig oxidiert wird, diese entsprechend als CO₂ emittiert wird. Nur bei den Verfahrensvarianten, bei denen z. B. kohlehaltige Rückstände entstehen (Beispiele: HTC-Verfahren und Pyreg-Verfahren), sind die verfahrensbedingten CO₂-Emissionen geringer. Verschlechternd für die Bilanz an Treibhausgasen sind Verfahren, bei denen eine Stützfeuerung mit Gas benötigt wird. Günstiger schneiden die dezentralen Verfahren ab, bei denen die freigewordene Wärmeenergie der Faulgasverbrennung und der Klärschlammverbrennung z. B. zur Klärschlamm-trocknung oder für Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genutzt wird.

Einige Verfahren benötigen im Laufe des Prozesses **Chemikalienzusätze**. Nicht immer ist transparent, welche Stoffe dafür verwendet werden. Meist handelt es sich um anorganische Verbindungen wie Magnesium- oder Calciumsalze für die Fällung der Phosphate, Alkali- oder Erdalkalichloride für die Austreibung von Schwermetallen und/oder Säuren wie Schwefel-, Salz- oder Salpetersäure zum Aufschluss der Aschen. Nachfolgend werden dann Laugen zur Neutralisation

¹¹ Lachgas zählt zu den Klimagasen. Gegenüber CO₂ beträgt der Äquivalenzfaktor (Globales Erwärmungspotenzial) 298. 2022 wurden in Deutschland 91.000 t emittiert, davon 70.000 t in der Landwirtschaft. Im Bereich Abfall/Abwasser wurden 2.000 t, im Bereich Energieerzeugung 7.000 t emittiert [UBA 2023]. Je höher der Stickstoffgehalt des Brennstoffs, desto höher die Konzentration im Abgas. Bei Klärschlammverbrennungsanlagen wurden mehrere hundert mg/m³ gemessen, was Jahresfrachten von 11–123 t entspricht [Stöcklein et al. 2018]. Auch in Kläranlagen entsteht N₂O, insbesondere bei der Denitrifikation, allerdings in geringen Konzentrationen (Emissionsfaktor lt. IPCC 1,6%) [Ministry of Environment of Denmark 2022].

zugefügt. Von den genannten Zusätzen geht kein wesentliches Umweltrisiko aus. Für eine Beurteilung des Einsatzes von Dinatriumsulfid zur Fällung von Eisen und Schwermetallen im Verfahren von SF Soepenberg fehlen genauere Angaben. Aus Dinatriumsulfid bildet sich bei niedrigen pH-Werten giftiger Schwefelwasserstoff.

Wesentlich ist, dass der Phosphor in den Rückgewinnungsverfahren **pflanzenverfügbar** gewonnen wird. Dies ist immer dann der Fall, wenn er in Form von Magnesium- oder Calciumsalzen abgetrennt wird. Dementsprechend geben die Hersteller in den meisten Fällen an, dass das Produkt in Neutralammonicitrat (NAC) gut löslich ist. Auch bei Verfahren, bei denen der Phosphor nicht ausgefällt wird, sondern der Rückstand direkt verwendet wird (z. B. EuPhoRe, PXtract) liegt nach Herstellerangaben eine gute Pflanzenverfügbarkeit vor. Wird Phosphorsäure gewonnen, lässt sich diese nicht nur zur Herstellung von Düngemitteln sondern auch für chemische Synthesen nutzen. Besonders hervorzuheben ist, dass Verfahren, in denen Phosphor als Magnesiumammoniumphosphat (Struvit) gewonnen wird, auch im Klärschlamm enthaltener Stickstoff genutzt wird. Dieser Vorteil trifft auch auf das HTC-Verfahren zu, bei dem der Stickstoff bei höheren pH-Werten als Ammoniak aus der Lösung ausgetrieben und nachfolgend genutzt werden kann.

Für die Entscheidung eines Kläranlagenbetreibers, welches Verfahren für ihn geeignet ist, sind der **Entwicklungsstand** und die **Effektivität** entscheidende Kriterien. Die Vorteile der nasschemischen Fällungsverfahren (z. B. Berliner Pflanze) [Heinzmann & Lengemann 2022], dass sie an einigen großen Kläranlagen bereits erfolgreich eingesetzt werden, werden dadurch aufgewogen, dass nicht sichergestellt ist, dass sie im Dauerbetrieb den Anforderungen der AbfklärV an die Phosphorrückgewinnungsquoten genügen. Außerdem führen sie nur dann zu guten Ergebnissen, wenn eine Bio-P Eliminierung vorschaltet ist. Bei einer chemischen Fällung mit Eisen-

oder Aluminiumsalzen in der 3. Reinigungsstufe entstehen gering pflanzenverfügbare Phosphate. Die Klärschlammmonoverbrennung ist sowohl in Form der Wirbelschichtverbrennung als auch als Staubverbrennung bewährt und eingeführt. Demgegenüber stehen für den Aufschluss der Aschen zur Gewinnung der als Düngemittel verwendbaren Phosphate mehrere Verfahrensvorschläge zur Verfügung. Am weitesten gediehen ist offensichtlich das Tetraphos-Verfahren, das in Hamburg großtechnisch zum Einsatz kommt. Besonders interessant sind die Verfahren, bei denen Phosphorsäure gewonnen wird, die sich vielfältig verwenden lässt. Die alternativen Verfahren der Klärschlammbehandlung (HTC-Verfahren, thermische Verfahren unter Sauerstoffausschluss) befinden sich größtenteils noch im Pilotmaßstab oder in der Entwicklung. Dies ist bedauerlich, zeigen doch einige dieser Verfahren durchaus Vorteile gegenüber der Monoverbrennung mit anschließendem Säureaufschluss. Deshalb hat z. B. der Bund Naturschutz Bayern ein Moratorium gefordert, um diesen Verfahren eine echte Chance zu geben. Es wäre gut, wenn Kläranlagenbetreibern, die sich für ein Verfahren entscheiden, das sich bisher nur in der in der Pilotphase befindet, Aufschub gewährt würde.

Zur Beurteilung der **Kosten** der Verwertungs- und Phosphorrückgewinnungsverfahren liegen keine gesicherten Zahlen vor. Die Höhe der Kosten für die Abwasserbehandlung hängt u. a. von Größe und Ausbaugrad der Kläranlage, Art der Klärschlammbehandlung, Transportkosten und Einwohnerdichte pro Kanalmeter ab [UBA 2018]. Das Umweltbundesamt veranschlagt für die Kosten der landwirtschaftlichen Klärschlammausbringung zwischen 160 und 320 €/t TM, günstiger als die Mitverbrennung (280 bis 400 €/t TM) und die Monoverbrennung (280 und 480 €/t TM). In einer Studie für Mittelhessen stellten Experten der TH Mittelhessen und der Universität Gießen einen ähnlichen Kostenrahmen fest [ZfK 2021]. Zu den Kosten der P-Rückgewinnungsverfahren liegen keine gesicherten Zahlen vor, da Herstellerangaben meist

nicht verlässlich sind. Aus den wenigen Anlagen, die bereits in Betrieb sind, werden erste Schätzungen abgeleitet, die sich zwischen 3 und 11 € pro Einwohner und Jahr belaufen. Insgesamt ist somit keine erhebliche Erhöhung der Abwassergebühren durch den Wegfall der bodenbezogenen Verwertung und die Phosphorrückgewinnung zu erwarten. Ideal wäre, wenn die Kosten für die P-Rückgewinnung durch den Erlös des Verkaufs von Sekundärphosphat kompensiert würden. Ein Kostenvergleich zeigt jedoch, dass die Herstellungskosten in € je kg Phosphor für Primärphosphat deutlich niedriger sein werden als für Sekundärphosphat [Montag et al. 2015]. Generell sind die Fällungsverfahren verbunden mit einer Bio-P Abscheidung kostendeckend zu betreiben, außer es werden größere Chemikalienmengen wie beim Stuttgarter Verfahren benötigt. Dies trifft grundsätzlich auch auf die Aufbereitung der Aschen zu. Am günstigsten stellen sich größere Anlagen dar, die Aschen mit hohem P-Gehalt (> 90 g P/kg Asche) aufbereiten [Kraus et al. 2019].

Im Auftrag des Umweltbundesamts führten Kraus et al. einen „**Ökobilanziellen Vergleich** der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung“ durch [Kraus et al. 2019]. Demnach beträgt der kumulierte Energieaufwand bei der Herstellung primärer Düngephosphate 12 bis 32 MJ/kg P_2O_5 und Treibhausgasemissionen von ca. 1,2 kg $CO_2eq/kg P_2O_5$. Phosphate aus den Fällungsverfahren (außer Stuttgarter Verfahren) haben demgegenüber einen niedrigeren Energiebedarf, soweit die Phosphateliminiierung in der Kläranlage nach dem Bio-P-Verfahren installiert ist. Bei der Gewinnung aus den Aschen ist ein ähnlicher Energieaufwand erforderlich wie bei den Primärphosphaten. In Bezug auf toxische Beimengungen sind die Rohphosphate wegen ihres Cadmium- und Urangelhaltes kritischer zu bewerten als die Sekundärphosphate. Soweit allerdings die Verbrennungsaschen oder die Rückstände

anderer thermischer Verwertungen direkt verwendet werden, können erhöhte Kupfer- und Zinkgehalte zu Problemen führen. Auch wirken sich die Lachgas (N_2O)-Emissionen bei der Monoverbrennung von Klärschlamm negativ auf die Ökobilanz aus.

Für eine erfolgreiche Rückführung des Phosphors aus Klärschlamm in den Wertstoffkreislauf ist eine Fülle **gesetzlicher Bestimmungen** zu beachten, die nicht widerspruchsfrei sind und zurzeit das P-Recycling eher erschweren. Einschlägig sind das Wasserrecht und das Abfallrecht; aber auch das Düngerecht (Entspricht das Düngemittel einem registrierten Düngemitteltyp?) und das Stoffrecht (Ist das Produkt ein nach REACH-Verordnung zu registrierender Stoff?) sind zu beachten [Ehbrecht et al. 2023]. Zur Erleichterung des P-Recycling und auch zur Planungssicherheit der Betreiber ist hier mehr rechtliche Klarheit wünschenswert. Douhaire legte in ihrem Gutachten „Herstellung und Inverkehrbringung von Struvit-Dünger rechtssicher gestalten“ dar, dass ausgefälltes Magnesiumammoniumphosphat als Abfall zu betrachten ist, ein vorzeitiges Abfallende aber in Betracht kommt, wenn es die Bedingungen der Düngemittelverordnung erfüllt und als Dünger vermarktet werden soll [Douhaire 2023]. Die EU-Düngemittelverordnung setzt einen Rechtsrahmen für Düngemittel, die EU-weit gehandelt und verwendet werden dürfen. Hierunter können auch Recycling-Düngemittel fallen, soweit sie unter eine der Produktfunktionskategorien fallen. Allerdings muss sich für den Hersteller lohnen, eine EU-Konformität zu erlangen [EU 2019]. Auch die Frage, ob die thermische Behandlung von Klärschlamm Teil der Abfallbehandlung ist oder Teil des Produktionsverfahrens für P-Recyclate, zählt zu den noch nicht eindeutig geklärten Rechtsfragen [Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen 2020]. Diese unterschiedlich beantwortete Frage ist u. a. relevant für die Entscheidung, ob aus Klärschlämmen, die die Grenzwerte der AbfKlärV nicht einhalten, auch P-Recyclate hergestellt werden dürfen.

Die Frage der **Akzeptanz** der P-Recyclate auf dem Düngemittelmarkt lässt sich nicht durch Gesetze regeln. Wie bei vielen anderen Recyclingprodukten auch tendieren Kunden dazu, Sekundärprodukte als minderwertig zu betrachten. Strengere EU-weite Schwermetall-Grenzwerte und steigende Preise für primäre Mineralphosphate könnten einen Anreiz schaffen, auf Recyclingdünger umzusteigen. Auch durch Aufklärungskampagnen könnte die Akzeptanz für die qualitativ hochwertigen Sekundärprodukte (kein Cadmium, kein Uran!) erhöht werden.

11. Forderungen und Empfehlungen

In kommunalem Abwasser finden sich alle Stoffe, derer sich die Menschen auf dem Wasserpfad entledigen: Stoffe, die Sauerstoff verbrauchen, Schadstoffe, die den ökologischen Zustand der Gewässer beeinträchtigen, pathogene Organismen und Nährstoffe. Kläranlagen haben die Funktion, diese Stoffe herauszufiltern. Dabei entsteht Klärschlamm, dessen wertvolle Stoffe möglichst zurückgewonnen und vor dessen schädlichen Stoffen Mensch und Umwelt zu schützen sind. Je weniger Schadstoffe ins Abwasser gelangen, desto geringer ist die Belastung des Klärschlammes und desto leichter ist dieser zu verwerten.

Primäres Ziel ist es, die Gewässer vor Einträgen von Schad- und Nährstoffen zu schützen, Belastungen des Bodens durch Schadstoffe im Klärschlamm zu vermeiden und schädliche Luftemissionen bei der thermischen Behandlung des Klärschlammes so weit wie möglich zu verhindern.

Eine wichtige Voraussetzung für eine aus ökologischer Sicht vertretbare Verwertung von Klärschlamm muss die Minimierung des Eintrages gefährlicher Substanzen in das Abwasser und damit auch in den Klärschlamm sein. Dabei ist bei der Herstellung, dem Inverkehrbringen und der Zulassung von Chemikalien anzusetzen. Dies gilt insbesondere für die Vermeidung von Stoffen, die schwer oder nicht abbaubar sind, sich in Wasserorganismen anreichern sowie für giftige, hormonaktive oder anderweitig gesundheitsgefährdende Stoffe. Dazu bedarf es einer entschlossenen **Stoffpolitik** mit der Anforderung, möglichst nur noch nachhaltige Chemikalien zu verwenden, die sich rasch abbauen lassen und keine langfristigen, irreversiblen Probleme verursachen können. Nur so lassen sich die Ziele des ‚Green Deal‘ der EU – ‚non toxic environment‘ und ‚zero pollution ambition‘ – verwirklichen [EU-Kommission 2021]. Dies betrifft auch die Mengen der verwendeten Stoffe und ihre Wiederverwendung in einer zirkulären Ökonomie.

Dies gilt auch für die Belastung des Abwassers durch Arzneimittel-Wirkstoffe. Aufgrund der demografischen Entwicklung ist zwar eher eine Zunahme des Arzneimittelverbrauchs zu erwarten. Trotzdem sind Maßnahmen zur Senkung der Arzneimittelbelastung möglich und notwendig. Der BUND hat dazu in einem Positionspapier „Arzneimittel in der Umwelt“ [BUND 2020] zahlreiche Vorschläge gemacht: von der Entwicklung abbaubarer Wirkstoffe („Green Pharmacy“), der Rezeptpflicht für umweltgefährliche Pharmaka wie Diclofenac, der Stärkung der Umweltrisikobewertung im Rahmen der Zulassung bis zu Urinbeutel bei Röntgenkontrastmitteln und der gesonderten Abwasserbehandlung bei ‚Hotspots‘ wie Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen.

Auch aus den Verpflichtungen der Wasserrahmen-Richtlinie und der Meeresschutzabkommen OSPAR [OSPAR 1992] und HELCOM [HELCOM 2004] sowie der EU-Meeressstrategie-Richtlinie [EU 2008] ergibt sich die Verpflichtung der Vertragsstaaten, die Schadstofffrachten weitergehend deutlich zu reduzieren.

Für den öffentlichen Aufwand einer weitgehenden Abwasserreinigung sind auch die Hersteller und Inverkehrbringer finanziell zu beteiligen (Verursacherprinzip). Dies gilt z. B. für Arzneimittel und andere Mikro-schadstoffe, wie Fluorchemikalien (PFAS).

Die nach internationalen Rechtsvorschriften mögliche Beendigung oder Minimierung der Einleitung bestimmter gefährlicher Stoffe in Gewässer muss endlich umgesetzt werden. Anzustreben ist die Absenkung der Konzentrationen gefährlicher Stoffe unter die Nachweisgrenze (zero pollution).

Zahlreiche Forschungsergebnisse der vergangenen Jahre stellen die ökologische Vertretbarkeit der bodenbezogenen Verwertung infrage, z. B. die Aufnahme von Antibiotika in Pflanzen und die Belastungen des Klärschlammes mit mobilen genetischen Elementen und Resistenzgenen. **Die bodenbezogene**

Verwertung aller Klärschlämme ist deshalb spätestens 2034, d. h. 3 Jahre nach der Frist für Klärschlämme von Kläranlagen der Größenordnung 4b, vollständig zu beenden. Dies entspricht auch den Empfehlungen des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU), der in seinen Gutachten mehrfach gefordert hat, aufgrund der Schadstoffbelastungen Klärschlämme nicht zur Düngung zu verwenden [SRU 2015]. Die novellierte Klärschlammverordnung (AbfKlärV) von 2017 fordert bisher nur ein Ende der bodenbezogenen Klärschlammverwertung und eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bei großen Kläranlagen (Größenklassen 4b und 5).

Sollten Klärschlämme auch künftig ausnahmsweise noch **bodenbezogen verwertet** werden dürfen, ist zu fordern:

- Sie sollen spätestens ab 01.01.2025 über die Grenzwerte der AbfKlärV hinaus die Anforderungen der QLA/VDLUFA-Gesellschaft für Qualitätssicherung im Landbau erfüllen.
- Der bisherige Grenzwert für die Summe der perfluorierten Chemikalien PFOS und PFOA (100 µg/kg TM) entspricht nicht mehr dem Stand der Erkenntnis zu PFAS und ist spätestens ab 01.01.2025 zu verschärfen: 20 µg/kg TM zumindest für die Summe von 23 PFAS¹².
- Sie sind – wie in der AbfKlärV vorgesehen – nur dann auszubringen, wenn die Nährstoffkonzentrationen im Boden kontrolliert werden, um eine Überdüngung, insbesondere mit Phosphaten, zu vermeiden.
- Wie generell bei der Ausbringung von Düngemitteln sind Gewässerrandstreifen einzuhalten, um eine Abschwemmung ins Gewässer zu vermeiden. Ebenso sind Bestimmungen der Düngeverordnung bezüglich Sperrzeiten und Verbot der Ausbringung auf gefrorene und wassergesättigte Böden einzuhalten.

Die Kompostierung und Vererdung von Klärschlämmen kleiner Kläranlagen (GK 1, ohne industrielle Indi-

rekteinleiter) kann im Einzelfall fortgeführt werden. Diese Verfahren können dazu beitragen, die hygienischen Eigenschaften zu verbessern und organische Schadstoffe abzubauen.

Die Klärschlammbehandlung zur **Rückgewinnung von Phosphor** ist weiter zu entwickeln und flächendeckend einzuführen. Hierzu sind verschiedene Verfahren entwickelt worden, die jedoch überwiegend noch nicht im großtechnischen Einsatz erprobt sind. Es gibt mehrere aus ökologischer Sicht vielversprechende Ansätze, die zurzeit noch im Pilotmaßstab getestet und optimiert werden. **Deshalb sollten die Kläranlagenbetreiber, die bis zum 31.12.2023 über den Stand ihrer Planungen berichten sollen, wenigstens drei Jahre Zeit erhalten, um sich für ein konkretes Verfahren zur Phosphorrückgewinnung zu entscheiden.** Kläranlagenbetreiber sind aktuell noch auf Informationsmaterial der Anbieter mit Werbecharakter angewiesen und in ihrer Entscheidung überfordert. In der Übergangszeit sollen ökologisch sinnvolle Verfahren mit Unterstützung durch staatliche Finanzierungsmittel zur Anwendungsreife im großtechnischen Maßstab weiterentwickelt werden. Dieser Prozess soll von einer vergleichenden ökologischen Bilanzierung der entwickelten marktreifen Verfahren begleitet werden. Die dabei ermittelten Daten sollten öffentlich zugänglich sein.

Beim großtechnischen Einsatz verschiedener Verfahren wird es auf die örtlichen Verhältnisse bei den Kläranlagenbetreibern ankommen, welches Verfahren unter ökologischen Gesichtspunkten bevorzugt wird (siehe Anhang). Problematisch ist, dass oft nur Firmenangaben vorliegen, die nicht unabhängig überprüft worden sind. Eindeutige Empfehlungen sind deshalb zurzeit nicht möglich. Bei der Verfahrensauswahl ist vor allem zu beachten:

Allgemeine Grundsätze:

- Die Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphaten müssen sicherstellen, dass im Abwasser bzw. im

¹² 20 PFAS gemäß TrinkwV zzgl. ADONA und HFPO-DA (Ersatzstoffe für PFOA) und H4PFOS (Ersatzstoff für PFOS)

Klärschlamm enthaltene Schadstoffe sicher abgetrennt und nicht in die Böden oder andere Umweltmedien eingetragen werden.

- Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor sollten sich durch eine hohe Effizienz der Rückgewinnung, einen möglichst geringen Energieverbrauch auszeichnen und möglichst erneuerbare Energien einsetzen.
- Die Pflanzenverfügbarkeit der gewonnenen P-Recyclate ist sicherzustellen.
- Über die Anforderungen der DüMV hinaus müssen die Recyclate Grenzwerte für zusätzliche Schadstoffe einhalten. Insbesondere sind Begrenzungen für die in der AbfKlärV genannten Schadstoffe Zink, PCB und Benzo[a]pyren in der DüMV bzw. der EU-DüngeproduktVO zu verankern sowie dem Stand der Analysetechnik entsprechende Grenzwerte für halogen- und fluororganische Verbindungen (EOX¹³ und EOF¹⁴).

Nasschemische Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser oder Klärschlamm:

- Diese Verfahren haben den Vorteil auf Kläranlagen mit dem dort tätigen Personal realisiert werden zu können. Sie haben aber oft Probleme, die von der AbfKlärV geforderten Rückgewinnungsquoten zu erfüllen und können noch mit organischen Schadstoffen und Krankheitserregern belastet sein.
- Verfahren mit höheren Rückgewinnungsquoten erfordern einen größeren Chemikalieneinsatz.
- Wenn in der Kläranlage der Phosphor chemisch durch Eisen- oder Aluminiumsalze gefällt wird, führen die meisten nasschemischen Verfahren nicht zu befriedigenden Ergebnissen.

Es muss deshalb im Einzelfall geprüft werden, mit welcher Verfahrenskombination die nasschemische Phosphorrückgewinnung optimiert werden kann. Zusätzliche Forschungen und Entwicklungen sind notwendig.

¹³ EOX: Extrahierbares organisch gebundenes Halogen, X = Cl, Br, I

¹⁴ EOF: Extrahierbares organisch gebundenes Fluor

¹⁵ Dies gilt ebenso für andere umweltoffene Anwendungen.

Thermische Verfahren:

Hier ist darauf zu achten:

- Entstehende Schadstoffe müssen durch effektive Reinigungsverfahren zurückgehalten und/oder als Festsubstanz unbedenklich entsorgt werden.
- Entstehende phosphathaltige Feststoffe müssen als Dünger verwendbar sein. Oder der Phosphor wird als Phosphorsäure isoliert, die ein breites Einsatzspektrum hat.
- Verfahren, bei denen Phosphor durch Säuren aus Klärschlammasche herausgelöst wird, haben den Vorteil, dass bei ihnen die Schwermetalle effektiv abgetrennt werden. Bei Verfahren, die die Schwermetalle thermisch entfernen, sind die Effektivität der Abtrennung und die Verwendbarkeit des phosphathaltigen, mineralischen Rückstands zu prüfen.
- Einige Verfahren gewinnen auch (teilweise) den im Klärschlamm enthaltenen Stickstoff für Düngezwecke zurück.
- Bei Pyrolyse-Verfahren können krebserregende polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen. Die damit belasteten Gase, Öle oder Kohlen müssen durch Verbrennung bei ausreichend hoher Temperatur unschädlich gemacht werden. Eine direkte Verwendung kohlehaltiger Rückstände als Dünger ist abzulehnen.¹⁵

Für Klärschlämme, die nicht ausnahmsweise direkt bodenbezogen genutzt werden, kommt nur eine **thermische Behandlung in Betracht**. Hierzu ist zu fordern:

- Klärschlämme, die mehr als 2% Phosphor in der Trockenmasse enthalten und bei denen der Phosphor nicht durch nasschemische Fällungsverfahren abgetrennt wurde, sind thermischen Behandlungsverfahren zuzuführen, die eine Phosphorrückgewinnung ermöglichen. Eine Mitverbrennung in Kraftwerken, Zementwerken oder Abfallverbrennungsanlagen kommt nicht mehr in Betracht. Dezentralen Feuerungsanlagen (z. B. Staubfeuerung) ist der Vorzug zu geben. Bei Monoverbrennungsanlagen sind mindestens die künftigen Anforder-

derungen der 17. BImSchV¹⁶ einzuhalten. Für Quecksilber soll darüber hinaus ein Grenzwert von 1 µg/Nm³ (Jahresmittelwert) eingehalten werden. Dafür sind ggf. Aktivkohlefilter imprägniert mit Schwefelsäure oder einem Bromidsalz einzusetzen [Ahrens 2014].

- Die Mitverbrennung ist auf phosphorarme Klärschlämme und Klärschlämme, deren Phosphorgehalt durch Fällungsverfahren auf weniger als 2% TM reduziert wurde, zu beschränken.
- Die thermische Behandlung von Klärschlämmen ist mit einer Kraft-Wärme-Kopplung zu verbinden, um die gewonnene Energie möglichst effizient zu nutzen.
- Klärschlämme, die mehr als 100 µg/kg TM PFAS (Summe aus 23 Einzelverbindungen) enthalten, dürfen nicht mit anderen Schlämmen vermischt werden. Sie sollen nicht in Monoverbrennungsanlagen sondern in Anlagen mit einer Verbrennungstemperatur von mindestens 1.100 °C behandelt werden.¹⁷
- Der BUND fordert eine übergreifende Planung, um regionale Über- oder Unterkapazitäten zu vermeiden.
- Für andere thermische Verfahren (z. B. Vergasung, hydrothermale Karbonisierung) gelten entsprechende Anforderungen. Sie sind zu bevorzugen, wenn sich mit ihnen geringere Emissionen, ein niedriger Energiebedarf, eine hohe Rückgewinnungsquote und weniger umweltbelastende Reststoffe, die unproblematisch entsorgt werden können, erreichen lassen.

Zurzeit fehlen gemäß der Nationalen Wasserstrategie der Bundesregierung weitere **Initiativen zur effektiveren Rückgewinnung von Phosphor und Stickstoff aus der Wasserphase**. Noch immer sind die Einträge von Phosphor in die Gewässer zu hoch. So kommen 24% der abwasserbürtigen Phosphorfracht aus Kläranlagen < 10.000 EW, die aber nur 8% des (kommunalen) Abwasservolumens beitragen [DWA 2022a]. Hier sind sowohl strenge Regeln als auch Forschungen und erhebliche Investitionen in ihre weitere Entwicklung erforderlich.

- Die Einleitung von Phosphat aus den Abläufen von Kläranlagen in Oberflächengewässer ist deshalb so zu begrenzen, dass dort der gute ökologische Zustand erreicht bzw. beibehalten werden kann. Die damit verbundene Erhöhung des Phosphatgehalts im Klärschlamm soll zu einer verstärkten Rückführung in den Stoffkreislauf führen.
- Angesichts der Tatsache, dass die Nährstoffbelastung von Gewässern wesentlich auch durch Abschwemmung und Dränage landwirtschaftlicher Flächen verursacht wird, sind die Regeln für eine bedarfsgerechte, aber ökologisch verträgliche Düngung weiter zu entwickeln und zu verschärfen.

Phosphor-Recyclate haben zwar häufig eine höhere Qualität als mineralische Düngemittel aus Primärphosphaten. Gleichwohl sind Vorbehalte zu überwinden. Zur **Erhöhung der Akzeptanz** ist erforderlich:

- Schaffung von Anreizen (z. B. steuerliche Vorteile für Sekundärphosphate und steuerliche Nachteile für mineralische Phosphate, die mit Schwermetallen belastet sind) und Durchführung von Informationskampagnen zur Förderung der Nutzung von Sekundärphosphaten.
- Aufhebung gesetzlicher Hürden und Harmonisierung zwischen Abfall-, Wasser- und Düngerecht sowie stoffrechtlichen Bestimmungen, um die Anerkennung marktfähiger Produkte zu erleichtern.

Insgesamt bedarf es weiterer kritischer Beobachtung der dynamischen Entwicklungsprozesse zur Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung. Ziele sind die effektive Rückführung von Phosphor, die Minimierung der Nährstoffeinträge in Gewässer, die Vernichtung und Ausschleusung von Schadstoffen und die Identifizierung von Verfahren, die zur Erreichung dieser Ziele einen wirksamen Beitrag leisten.

¹⁶ Novelle Referentenentwurf, die im Dezember 2023 in Kraft treten soll [BMUV 2023b].

¹⁷ Begründung: Die PFAS werden bei Temperaturen von ca. 850 °C nur unvollständig zerstört. Die Konzentration an PFAS ist durch Analyse mindestens der 20 PFAS gemäß TrinkwV zzgl. ADONA, HFPO-DA und H4PFOS zu bestimmen (siehe Fußnote 12). Der Grenzwert gilt als eingehalten, wenn vier von fünf Analysen unterhalb des Grenzwertes liegen.

Anhang: Beispielhafte Verfahren zur Phosphorrückgewinnung

1. Phosphorrückgewinnung aus Roh- oder Klärschlamm

Die Fällungsverfahren beruhen darauf, den im Klärschlamm enthaltenen Phosphor zu mobilisieren und als Magnesiumammoniumphosphat (Struvit) oder Calciumphosphat auszufällen. Diese Phosphatsalze sind meist gut pflanzenverfügbar. Fällungen mit Magnesiumsalzen führen darüber hinaus zur Rückgewinnung eines Teils des Stickstoffs. Ein weiterer Vorteil der Verfahren ist, dass sie auf Kläranlagen verschiedener Größe integrierbar sind und keine Transporte zu zentralen Anlagen erforderlich sind. Nachteilig ist, dass sie sich meist auf Klärschlämme beschränken, bei denen der Phosphor über das Bio-P-Verfahren eliminiert wurde. Oft erreichen sie nicht die von der AbfKlärV geforderte 50%ige Rückgewinnung aus dem Klärschlamm. Die Verfahren, die dieser Anforderung genügen, schaffen dies nur durch einen umfangreichen Chemikalieneinsatz. Der verbleibende phosphatarme Schlamm wird abschließend (mit)verbrannt.

(1) „Berliner Pflanze“: Struvit aus Faulschlamm

[Heinzmann & Lengemann 2022, Montag et al. 2016]

Die Berliner Wasserbetriebe (BWB) gewinnen seit 2011 im Klärwerk Waßmannsdorf Phosphat aus Faulschlamm in Form von Struvit (Magnesiumammoniumphosphat – MAP) und haben es unter dem Namen „Berliner Pflanze“ als Dünger verkauft. Das Verfahren befindet sich als AirPrex-Verfahren auch an anderen Kläranlagen (z. B. Mönchengladbach, Amsterdam) im Einsatz.

Prozess

Die Phosphorabtrennung in der Kläranlage erfolgt über das Bio-P-Verfahren. Der ausgefaulte Schlamm wird durch Belüftung einer CO₂-Strippung unterzogen, wodurch sich der pH-Wert auf ca. 8 anhebt. Durch Zugabe von Magnesiumchlorid (MgCl₂) fällt bei ausreichender Konzentration von gelöstem Phosphat und Ammonium mineralisches Struvit aus.

Eingesetzte Chemikalien

Magnesiumchlorid als Fällmittel, Natronlauge zur Erhöhung des pH-Wertes, Antiinkrustationsmittel

Pflanzenverfügbarkeit

Struvit ist pflanzenverfügbar.

Menge

Die Phosphorbelastung des Faulschlammes wird um bis zu 90% reduziert. Allerdings beträgt die Elimination gegenüber dem Abwasserzulauf nur ca. 25%.

Betriebserfahrungen

Das Verfahren ist in Berlin und an anderen Standorten großtechnisch realisiert.

Sonstiges

Die Phosphorrückgewinnung stand 2011 ursprünglich nicht im Fokus der BWB. Diese wollten die Phosphatkonzentration verringern, um spontane MAP-Kristallisation in den Rohrleitungen zu verhindern, die zu Ablagerungen führte. Das gewonnene Struvit (jährlich ca. 1.500 t) wurde bis 2022 an Agrarbetriebe verkauft. Dieser Verkauf wurde eingestellt, da das Produkt wegen einer bakteriellen Belastung die Anforderungen der DüMV nicht mehr erfüllte und außerdem Fremdbestandteile wie Holz und Mikroplastik enthielt [Natz 2022].

(2) ePhosR: Elektrochemische Phosphorelimination aus Zentratwasser [Fraunhofer IGB]

Das Fraunhofer IGB entwickelte ein Verfahren, Phosphor aus Zentratwasser elektrochemisch als Struvit abzuscheiden.

Prozess

Das Zentratwasser wird durch eine Elektrolysezelle geleitet. An der Kathode entsteht Wasserstoff, wodurch sich der pH-Wert erhöht. Magnesium wird aus einer Magnesium-Opferanode gelöst und reagiert mit Phosphat und Ammonium zu Magnesiumammoniumphosphat (Struvit).

Pflanzenverfügbarkeit

Struvit ist pflanzenverfügbar.

Menge

Ca. 80% des Phosphats im Zentratwasser wird abgetrennt.

Betriebserfahrungen

In Norddeutschland wurden Demonstrationsanlagen mit einem Durchsatz von 1 bis 3 m³/h betrieben. US-Firma vertreibt das Verfahren in den USA.

Sonstiges

Geeignet für biologische Phosphorelimination durch das Bio-P-Verfahren. Energieverbrauch 0,5–0,78 kWh/m³. Der an Faulschlamm gebundene Phosphor wird nicht erfasst.

(3) iPhos: Phosphor aus dem Überschussschlamm

[Oeppert & Clemens 2023]

Die Firma SF-SoepenberGmbH hat das iPhos-Verfahren entwickelt. Es soll viele Kläranlagen dazu befähigen, vor Ort den Phosphorgehalt in der Klärschlammrockenmasse auf unter 2% zu verringern. Das Verfahren beruht auf einer Schwermetallabtrennung durch Sulfide vor Ausfällung des Magnesiumammoniumphosphats.

Prozess

Dem Überschussschlamm, der Phosphat aus einer Fällung mit Eisen enthält, wird in einem Reduktionstank Dinatriumsulfid als Reduktionsmittel hinzugegeben. Eisen und andere Schwermetalle werden als Sulfide ausgefällt. Dann wird mit Schwefelsäure angesäuert (pH-Wert < 4). Dabei löst sich das Phosphat. Eisen wird gemeinsam mit anderen Schwermetallen als Sulfid abgetrennt. Durch Zugabe von Magnesiumhydroxid steigt der pH-Wert auf einen Wert über 8 und Struvit fällt aus.

Pflanzenverfügbarkeit

Struvit ist pflanzenverfügbar.

Menge

Nach Angaben der Firma lösen sich mit diesem Verfahren bis zu 85% des Phosphors im Überschussschlamm als Phosphat. Im Pilotbetrieb werden bis zu 65% des Phosphors im Überschussschlamm als Struvit gewonnen:

Betriebserfahrungen

Die Firma betreibt seit November 2021 eine Pilotanlage in der Kläranlage Gifhorn mit einem Durchsatz von 4 bis 10 m³ Abwasser stündlich.

Weitere Details

Das iPhos-Verfahren ist bisher nur erprobt, wenn in der dritten Reinigungsstufe Phosphor mit Eisensalzen ausgefällt wird, da die Reduktion von Eisen (III) zu Eisen (II) durch Sulfid ein zentraler Bestandteil des Verfahrens ist. Nach Angaben der Firma können auch Schlämme aus dem Bio-P-Verfahren behandelt werden, nicht jedoch Schlämme mit Aluminiumfällung.

Sonstiges

Ziel des Verfahrens ist, den Phosphorgehalt des Klärschlammes auf < 2% zu drücken. Zur Ausfällung des Schlammes werden ggf. Flockungshilfsmittel zugesetzt.

(4) Stuttgarter Verfahren: Struvitgewinnung aus Faulschlamm [Montag et al. 2016, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg 2022]

Das Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) der Universität Stuttgart entwickelte ein Verfahren, Faulschlamm aufzuschließen und Phosphor als Struvit rückzugewinnen.

Prozess

Der Betrieb erfolgt chargenweise. Zunächst wird der Faulschlamm mit Schwefelsäure versetzt und der pH-Wert dadurch auf 2–5 erniedrigt. Phosphate gehen in Lösung; der Rückstand wird abfiltriert. Das Filtrat wird mit Zitronensäure zur Metallkomplexierung und Magnesiumoxid als Fällmittel versetzt. Nach Anhebung des pH-Wertes auf 8 durch Zugabe von Natronlauge fällt

Struvit aus und wird in Absetzbecken oder Kammerfilterpressen abgetrennt. Der Überstand/das Filtrat wird in die Belebungsstufe zurückgeführt.

Pflanzenverfügbarkeit

Struvit ist pflanzenverfügbar.

Menge

Das Verfahren erreicht eine Phosphorelimination im Abwasserstrom von ca. 50%. Es ist auch für Schlämme geeignet, bei denen der Phosphor chemisch durch Eisen- oder Aluminiumfällung ausgefällt wurde.

Betriebserfahrungen

Das Verfahren wird seit 2011 an der Kläranlage Offenburg in einem Teilstrom von 5.000 EW erprobt. Allerdings plant der dortige Abwasserzweckverband nicht, die Phosphorrückgewinnung auf diese Weise fortzuführen und zu erweitern sondern den Klärschlamm künftig in einer nahegelegenen Monoverbrennungsanlage thermisch zu verwerten und den Phosphor aus der Asche rückzugewinnen.

Sonstiges

Das Verfahren ist unter den Fällungsverfahren zwar eines der effektivsten, hat aber insbesondere wegen des hohen Betriebsmitteleinsatzes eine schlechte Ökobilanz [Kraus et al. 2019]

(5) Budenheim-Verfahren (ExtraPhos): Phosphat aus Klärschlamm durch Fällung mit Kalkmilch

[Schnee 2021, Montag et al. 2016, Kotzbauer & Poganski 2019]

Die chemische Fabrik Budenheim entwickelte ein Verfahren, durch Zugabe von CO₂ den Klärschlamm anzusäuern und das Phosphat aus der Flüssigphase mit Kalkmilch auszufällen.

Prozess

Der Klärschlamm wird durch Zugabe von Kohlendioxid unter Druck (10 bar) auf einen pH-Wert von ca. 5 angesäuert. Phosphor wird dadurch größtenteils

herausgelöst. Nach Entspannung entweicht CO₂, das unter Verdichtung zurückgeführt wird. Der Klärschlamm wird abgetrennt und durch Zugabe von Kalkmilch zum Filtrat der pH-Wert auf ca. 6 angehoben. Phosphor wird als Dicalciumphosphat ausgefällt.

Pflanzenverfügbarkeit

Dicalciumphosphat ist pflanzenverfügbar.

Menge

Es wird eine Elimination von 50% angestrebt. Die Pilotanlage arbeitet an einer Kläranlage mit Eisenfällung.

Betriebserfahrungen

An der Kläranlage Mainz-Mombach wurde 2017 eine Pilotanlage mit einem Durchsatz von 2 m³ Faulschlamm pro Stunde betrieben. Die Anlage wurde 2018 nach Itzehoe verlagert, wo eine Bio-P-Abtrennung des Phosphors stattfindet.

Sonstiges

Erfahrungen mit Schlämmen, bei denen Phosphor mit Aluminiumfällung abgetrennt wurde, liegen noch nicht vor. Bei höheren pH-Werten fällt gering pflanzenverfügbares Tricalciumphosphat aus. Nach Angaben der Firma können bei einer Zweitbehandlung des Klärschlammes mit CO₂ unter Druck die Quoten des gelösten Phosphors deutlich erhöht werden. Es ist unklar, ob zur Abtrennung des Klärschlammes Flokkungshilfsmittel benötigt werden.

2. Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

Dieses Rückgewinnungsverfahren ist eine Monoverbrennung des Klärschlammes vorgeschaltet. Da eine solche Anlage eine Mindestmenge an Klärschlamm benötigt, um effektiv und wirtschaftlich arbeiten zu können, findet die Verbrennung und die damit verbundene P-Rückgewinnung nur bei großen Klärwerken auf dem Betriebsgelände statt. Meist wird die Klärschlammasche in Säure gelöst und nach Abtrennung der Schwermetalle Phosphatsalze oder Phosphorsäure nasschemisch gewonnen. Bei wenigen Verfahren erfolgt die Trennung von Phosphor und Schwermetallen thermochemisch.

(1) TetraPhos: Phosphorsäure aus Asche – Metallabtrennung durch Ionenaustauscher [Rak

2018, Montag et al. 2016]

Das Verfahren wird von der Fa. Remondis vertrieben. Es beruht auf der Gewinnung von Phosphorsäure aus der Asche von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen.

Prozess

Der Asche wird verdünnte Phosphorsäure hinzugefügt. Die Phosphate lösen sich dabei fast vollständig. Der unlösliche Rückstand wird abfiltriert und deponiert. Das Filtrat ist eine Roh-Phosphorsäure. Diese wird in mehreren Schritten gereinigt:

- Durch Zugabe von Schwefelsäure kristallisiert Calciumsulfat (CaSO_4) aus und wird als Gips abfiltriert.
- Weitere Metalle wie Magnesium, Aluminium und Eisen werden mit Hilfe eines Ionenaustauscherharzes entfernt. Dieses wird mit einer Säure regeneriert, wobei eine Metallsalzlösung entsteht, die zur Phosphatfällung in der 3. Reinigungsstufe von Kläranlagen eingesetzt werden kann.
- Die metallarme Roh-Phosphorsäure wird im Vakuum auf eine handelsübliche Konzentration von etwa 75 % aufkonzentriert.

Pflanzenverfügbarkeit

Phosphorsäure ist vielfältig verwendbar, nicht nur für pflanzenverfügbare Düngemittel sondern auch z. B. in der Chemieindustrie.

Menge

Aus rund 20.000 Tonnen Klärschlammasche jährlich sollen in Hamburg etwa 7.000 Tonnen Phosphorsäure zurückgewonnen werden. Das entspricht rund 86% des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors.

Betriebserfahrungen

Das Verfahren ist das bislang einzige, das in Deutschland 2023 zur großtechnischen Umsetzung gelangt ist (Kläranlage Hamburg). Es hat sich im August 2023 noch in der Einführungsphase befunden.

(2) PARFORCE: Phosphorsäure aus Asche – Metallabtrennung durch Elektrodialyse [Bertau & Fröhlich 2023]

Die Parforce Engineering & Consulting GmbH (PEC) ist eine Ausgründung aus dem Institut für Technische Chemie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

Prozess

Der Klärschlammasche wird verdünnte Salz- oder Salpetersäure zugegeben. Die Phosphate und Schwermetalle lösen sich weitgehend. Der unlösliche Anteil, der vor allem aus Mineralien wie Silikaten besteht, wird abfiltriert. Durch Elektrodialyse wird die Rohphosphorsäure von den Metallsalzen (Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium, Eisen und Schwermetalle wie Blei, Cadmium und Nickel) getrennt. Die Salzlösung wird neutralisiert und die ausgefällten Schwermetalle abfiltriert [Bertau 2023]. Die gewonnene Roh-Phosphorsäure wird auf etwa 75 % eingengt.

Pflanzenverfügbarkeit

Phosphorsäure ist vielfältig verwendbar, nicht nur für pflanzenverfügbare Düngemittel sondern auch z. B. in der Chemieindustrie.

Menge

Bei dem PARFORCE-Ansatz wird mehr als 80% des in der Asche enthaltenen Phosphors zurückgewonnen.

Betriebserfahrungen

Seit Anfang 2018 läuft eine Demonstrationsanlage. Eine Pilotanlage soll in Kürze in Betrieb gehen.

Sonstiges

Außer aus Klärschlammasche kann das Verfahren auch für Ausgangsstoffe wie Fällungsprodukte aus Klärschlamm (Struvit), Gülle und Abwasser (Tertiärschlamm mit Eisen- oder Aluminiumphosphat) eingesetzt werden. Magnesium-, Calcium-, Aluminium- und Eisensalze fallen als Nebenprodukte an und können im Prozess rückgeführt werden.

Der unlösliche Anteil nach Aufschluss, bestehend vor allem aus Aluminosilikaten, kann nach Auskunft der Firma als Baustoff genutzt werden. Die bei der Elektrodialyse abgetrennten Metallsalze sind Abfall.

(3) Phos4Life: Phosphorsäure aus Asche – Metallabtrennung durch Solventextraktion [ZAR

2023, LANUV 2022, Europäisches Patentamt 2023]

Die Firma Técnicas Reunidas (Spanien) hat ein Verfahren entwickelt, das aus Klärschlammasche nach Säureaufschluss und Abtrennung der Schwermetalle die Phosphorsäure durch Solventextraktion zurückgewinnt.

Prozess

Klärschlammasche wird durch Schwefelsäure aufgeschlossen. Der unlösliche Rückstand aus Gips und Aluminosilikaten wird abgetrennt und kann als Baumaterial oder in der Zementindustrie verwendet werden. Die Lösung wird durch Zugabe von Salzsäure und eines organischen Lösungsmittels (z. B. Phosphorsäureester) einer Solventextraktion unterzogen, wodurch die Schwermetalle und Eisen (gegebenenfalls zweistufig) abgetrennt werden. Die Phosphorsäure wird aus der organischen Phase mit warmem Wasser extrahiert, durch Zugabe von NaHS und BaCO₃ gereinigt

und aufkonzentriert. Durch Aktivkohlereinigung werden restliche Spuren des organischen Lösungsmittels adsorbiert. Das Lösungsmittel wird im Kreislauf geführt. Die Eisen(III)-chlorid-Lösung wird konzentriert und z. B. als Fällmittel wiederverwendet.

Pflanzenverfügbarkeit

Phosphorsäure ist vielfältig verwendbar, nicht nur für pflanzenverfügbare Düngemittel sondern auch z. B. in der Chemieindustrie.

Menge

Bei dem Phos4Life-Verfahren werden nach Firmenangaben > 95% des in der Asche enthaltenen Phosphors zurückgewonnen.

Betriebserfahrungen

Nach Pilotversuchen ist im Kanton Zürich, Kläranlage Emmenspitz, eine großtechnische Anlage für 40.000 t/a Klärschlammasche geplant. Sie sollte ursprünglich 2025 in Betrieb gehen. Die Realisierung verschiebt sich aber vermutlich auf ca. 2030.

Sonstiges

Es ist geplant, am Standort auch Zinkmetall aus der Schwermetalllösung zurückzugewinnen. Die Wiederverwendung der Eisen(III)-chlorid-Lösung wird durch Anreicherung von Titan(IV) gestört, weshalb sie vermutlich entsorgt werden muss. Die Schwefelsäure wird durch Calciumcarbonat neutralisiert, wodurch Gips entsteht, der verwertet werden soll. In einem ökobilanziellen Vergleich weist das Verfahren deutliche Vorteile gegenüber der Gewinnung von Phosphorsäure aus Rohphosphat auf [Mehr & Hellweg 2018].

(4) Ash2Phos: Calciumphosphat aus Klärschlammasche [Theuring & Kabbe 2023, Kabbe 2023]

Die schwedische Firma EasyMining hat das Ash2Phos-Verfahren entwickelt. Das Wasser- und Abwasserunternehmen Gelsenwasser hat sich das Verfahren für den deutschen Markt gesichert. Das Verfahren

beruht auf dem Säureaufschluss von Klärschlamm- asche und der Rückgewinnung des Phosphats als Calciumphosphat.

Prozess

Die Asche wird mit Salzsäure aufgeschlossen. Unge- löste Bestandteile werden abgetrennt. Durch Zugabe von Kalklauge (Calciumhydroxid) fällt Calciumphos- phat in Form von amorphem Apatit aus. Danach wer- den die Schwermetalle ausgefällt und aus dem Filtrat Eisen(III)-chlorid und Natriumaluminat (NaAlO_2) in Lösung zurückgewonnen. Sie können wieder als Fäll- mittel in der Kläranlage eingesetzt werden.

Pflanzenverfügbarkeit

Das amorphe Apatit ist nach Firmenangabe in Neutralammoniumcitrat (NAC) löslich und als Lang- zeitdünger geeignet.

Menge

Mehr als 90% des Phosphors in der Asche werden zurückgewonnen.

Betriebserfahrungen

Das Verfahren wurde im Pilotmaßstab erfolgreich erprobt. Die geplante Klärschlamm-Monoverbren- nungsanlage von EnBW in Walheim (Baden-Würt- temberg) soll einer der ersten Standorte in Europa sein. In Schkopau, Sachsen-Anhalt, wird eine Geneh- migung zur Errichtung einer großtechnischen Anlage noch 2023 erwartet.

Sonstiges

Eisen(III)-chlorid und Natriumaluminat werden in marktgängiger Qualität gewonnen, auch für Verwen- dungen in der chemischen Industrie. Die Vorgehens- weise bei der fraktionierten Fällung von Calcium- phosphat und Schwermetallen und der Isolierung der Fe/Al-Salze werden von der Firma nicht erklärt.

(5) Pontes Pabuli: Düngere extraktion aus Asche

[Hoger M. & Heidolph H. 2023, Pontes Pabuli 2022, Hager 2020]

Das Pontes Pabuli-Verfahren wurde im Rahmen des BMBF-Förderprojekts „Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureauf- schlussgranulierung mit integrierter Schwermetall- abscheidung für das regionale Phosphorrecycling aus Klärschlämmen im Mitteldeutschen Dreiländereck“ entwickelt. Es beruht auf einem Säureaufschluss der Asche mit mehrfacher Extraktion des Phosphats.

Prozess

Das Phosphat in Klärschlammaschen wird durch Mineralsäuren wie Schwefel- oder Salpetersäure auf- geschlossen. Die feste Phase wird abgetrennt, das phosphatreiche Filtrat wiederum mit Asche und Säure versetzt und dieser Kreislauf so oft wiederholt, bis sich ein stabiles Gleichgewicht der chemischen Zusammensetzung des feuchten Feststoffes und des Filtrates einstellt. Vor der Rückführung des Filtrats kann jeweils eine Abtrennung des Schwermetalle durch Sulfidfällung stattfinden. Diese Mischung, die auch noch die festen Bestandteile der Klärschlamm- asche enthält, wird abschließend getrocknet granu- liert. Das Ergebnis ist ein gebrauchsfertiger Mineral- dünger.

Pflanzenverfügbarkeit

Das resultierende Granulat ist, wie Untersuchungen mit Neutralammoniumcitrat (NAC) und Pflanzversu- che zeigen, gut pflanzenverfügbar

Menge

Rückgewinnungsquote aus der Asche größer 80%.

Betriebserfahrungen

Im März 2022 wurde eine Versuchsanlage am Standort der Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH in Markranstädt (Sachsen) in Betrieb benommen.

Sonstiges

Durch Zugabe anderer Nährstoffkomponenten vor der Granulierung können verschiedene Düngertypen eingestellt werden. Das Verfahren wurde für Aschen aus der Staubfeuerung entwickelt. Für Aschen aus der verbreiteten Wirbelschichtverbrennung müssen Anpassungen erfolgen.

(6) AshDec: Direktverwendung von Asche als

Dünger [Montag et al. 2016, Kraus et al. 2019, Björnsen Beratende Ingenieure GmbH 2023, Ulbrich et al. 2021]

Die Fa. Metso:Outotec hat die Rechte und den Vertrieb für das AshDec-Verfahren übernommen. Dieses Verfahren behandelt Klärschlammasche thermisch, schließt damit die Phosphate auf und reduziert die Konzentration der Schwermetalle.

Prozess

Klärschlammasche wird mit Natriumcarbonat und etwas (unverbranntem) Klärschlamm (als Reduktionsmittel) versetzt und in einem Drehrohrofen bei 850–1.000 °C erhitzt. Dadurch werden die flüchtigen Schwermetalle (Hg, Cd, Pb, As) ausgetrieben und in die Abgasreinigung abgeschieden. Das Phosphat wird dabei (vermutlich durch Reduktion von Eisen) in eine bioverfügbare Form umgewandelt. Die gereinigte Klärschlammasche, die vor allem noch Silikate und Aluminate enthält, soll direkt als Dünger verwendet werden.

Pflanzenverfügbarkeit

Gemäß Untersuchungen der Firma ist der Phosphor im fertigen Produkt pflanzenverfügbar. Allerdings ist dies noch an an Klärschlammaschen unterschiedlicher Herkunft zu bestätigen.

Menge

85–95% des Phosphors werden rückgewonnen.

Betriebserfahrungen

In Leoben (Österreich) wurde eine Anlage mit einem

Durchsatz von 7 t/ d Klärschlamm TM von der dann insolventen Fa. AshDec betrieben. Nach Übernahme der Rechte durch die Fa. Metso:Outotec wird eine Anlage in Altenstadt (Bayern) für 30.000 t/a Klärschlamm TM errichtet, die in Betrieb gehen soll.

Sonstiges

Gemäß Björnsen et al. ist die Klima- und Energiebilanz günstiger als bei anderen Verfahren mit Monoverbrennung. Allerdings wird nicht klar, ob berücksichtigt wurde, dass die Asche nach der Verbrennung ein zweites Mal auf Temperaturen > 850 °C erhitzt werden muss. Nichtflüchtige Schwermetalle (z. B. Cu, Zn) verbleiben in der Asche. Unklar ist, ob auch Phosphate nach Aluminiumfällung aufgeschlossen werden. Die düngerechtliche Zulassung ist noch zu klären. Die BAM begleitet 2020–2025 in einem Forschungsvorhaben „R-Rhenania – Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern“ den Betrieb der Pilotanlage in Altenstadt [BAM 2020].

3. Alternative Verfahren

Diese sehr unterschiedlichen Verfahren behandeln den Klärschlamm thermisch, verbrennen ihn aber nicht mit Luftsauerstoff. Häufig wird der Klärschlamm in reduzierender Atmosphäre erhitzt, wodurch brennbare Gase und Pyrolysekohle entstehen. Eine Sonderstellung nehmen die metallurgischen Verfahren ein, bei denen Klärschlamm mit evtl. Zuschlagstoffen bis zur Schmelze erhitzt wird und Phosphor sich in der Schlacke anreichert. Einige Anbieter streben eine Realisierung auch auf dem Gelände kleinerer Kläranlagen an. Eine großtechnische Umsetzung hat bisher noch nicht stattgefunden.

(1) HTC-Verfahren: Phosphat aus Klärschlamm mit hydrothormaler Behandlung [Buttmann 2023, Björnsen Beratende Ingenieure GmbH 2023, Remy & Stüber 2015]

Die Düsseldorfer Firma TerraNova Energy GmbH bietet ein Verfahren an, Klärschlamm in Suspension bei

erhöhter Temperatur unter Druck zu behandeln, um aus der erhaltenen Lösung Phosphat zu gewinnen.

Prozess

Der Klärschlamm wird mechanisch bis zu einem Trockensubstanzgehalt von etwa 30 % entwässert. Diese Suspension wird bei etwa 170–180 °C und 28 bar thermisch aufgeschlossen. Organisches Material wie Cellulosen und Hemicellulosen wird hydrolysiert. Es entsteht eine kohlehaltige Suspension bei einem pH-Wert von ca. 5. Durch Absenken des pH-Wertes auf 1–3 mittels der Zugabe von Schwefelsäure oder einer organischen Säure (Citronensäure) geht das Phosphat in Lösung, auch wenn es durch Fe oder Al gefällt wurde. Die Feststoffe werden in einer Kammerfilterpresse abfiltriert. Mehr als 90 % der flüssigen Phase finden sich im Filtrat wieder. Dem Filtrat wird Calcium-Silicat-Hydrat (CSH) zudosiert, der pH-Wert angehoben und der Phosphor auf diese Weise ausgefällt und als Produkt gewonnen. Das verbleibende Filtrat wird in die Schlammfäulung zurückgeführt; die Kohle dient als Brennstoff.

Pflanzenverfügbarkeit

Untersuchungen des Hessischen Landeslabors ergaben eine hohe Pflanzenverfügbarkeit des erhaltenen Fällungsprodukts mit CSH.

Mengen

Die Rückgewinnung von Phosphor beträgt nach Firmenangaben 60–80 % des im eingesetzten Klärschlamm enthaltenen Phosphors.

Betriebserfahrungen

Das Unternehmen hat das Verfahren zur Phosphorrückgewinnung in einer eigenen Pilotanlage an zwei Standorten erprobt: in der Kläranlage Duisburg und der Kläranlage Düsseldorf. In der Kläranlage Mailand (Italien) wurde 2021 ein erfolgreicher Pilotversuch durchgeführt.

Sonstiges

In der flüssigen Phase liegen zudem etwa 1/4 des im

Klärschlamm enthaltenen Stickstoffs in Form von Ammonium-Stickstoff vor. Dieser kann nach der Phosphatfällung bei erhöhten Temperaturen durch weitere Anhebung des pH Werts als Ammoniak ausgetrieben und in verdünnter Schwefelsäure als Ammonium-Sulfat auskristallisiert werden. Dieses Verfahren zur Stickstoffrückgewinnung wurde in die Pilotanlage integriert. Da der Klärschlamm nicht getrocknet werden muss und durch Rückführung des verbleibenden Filtrats in die Fäulung, ist der Energiebedarf des Verfahrens relativ gering. Problematisch könnte sein, dass das Prozesswasser eine hohe organische Belastung aufweist (CSB > 90 g/L), mit einem hohen schwer abbaubaren Anteil und evtl. Hemmwirkung auf die anaerobe Fäulung. Auch Fettig et al. berichten, dass HTC-Prozesswasser hemmend auf die anaerobe Fäulung wirken kann [Fettig et al. 2017]. Rekate et al. verglichen den Karbonisierungsgrad hydrothormaler Kohle mit Pyrolysekohle im Hinblick auf landwirtschaftliche Nutzung und stellten eine deutlich geringere Karbonisierung und damit C-Sequestrierung fest [Rekate et al. 2017].

(2) EuPhoRe: Dünger aus Klärschlamm [Zepke 2022, Zepke 2023, EuPhoRe 2023]

Die Firma EuPhoRe GmbH aus Meppen (Niedersachsen) bietet das gleichnamige Verfahren an, um Phosphor aus phosphathaltiger Biomasse wie Klärschlamm zurückzugewinnen. Das Produkt ist eine gereinigte Verbrennungsasche.

Prozess

Dem Klärschlamm werden Alkali- oder Erdalkalichloride wie Magnesiumchlorid ($MgCl_2$) hinzugegeben, um die Flüchtigkeit der Schwermetalle zu erhöhen. Der Schlamm wird in einem Drehrohrreaktor bei 350 °C getrocknet und in der sauerstoffarmen „Reduktionszone“ bei 650 bis 750 Grad entgast. Das Pyrolysegas und flüchtige Schwermetalle gehen in die Gasphase. Am Boden des Drehrohrofens bleibt eine Pyrolysekohle zurück, die in der folgenden Oxidationszone bei 900 bis 1.000 Grad Celsius verbrennt. Wei-

tere Schwermetalle gehen dabei in die Gasphase. Die verdampften Schwermetalle und andere Schadstoffe werden in einer Rauchgasreinigung abgeschieden. Das Produkt ist eine phosphathaltige Asche, die direkt als Düngemittel verwendet werden kann.

Pflanzenverfügbarkeit

Das Unternehmen gibt für das Produkt einen Phosphorgehalt von bis zu 8,7% (20% P_2O_5) mit einer Löslichkeit von 50 bis 60% in Neutral-Ammoniumcitrat (NAC) an (Untersuchungen der Universitäten Gießen und Bonn).

Betriebserfahrungen

Das Verfahren ist im Pilotmaßstab sowie in großtechnischen Versuchskampagnen in Deutschland (Dinslaken) und in der Schweiz (Oftringen) erprobt. Drei Anlagen mit einer Kapazität von 15.000 bis 80.000 t/a Klärschlamm TM sind in Betrieb; eine Anlage mit einer Kapazität bis 135.000 t/a ist in Mannheim im Bau.

Sonstiges

Unklar ist, wie sich Eisen und Aluminium auf die Pflanzenverfügbarkeit des Produkts auswirken. Das Produkt entspricht nach Angaben der Firma den Anforderungen der DüMV. Die Firma empfiehlt zur Steigerung der Energieeffizienz eine Kopplung z. B. mit einem Müllheizkraftwerk, dessen heiße Rauchgase den Klärschlamm trocknen und dessen Rauchgasreinigung auch die Reinigung der Abgase aus der thermischen Klärschlammbehandlung übernehmen kann. Ist ein solcher Koppelbetrieb nicht möglich, könnte ein zusätzlicher Primärbrennstoffaufwand entstehen. Außerdem muss ggf. das Abgas von NO_x gereinigt werden.

(3) Grenzebach: Phosphorsäure aus Klärschlamm

[Meyer 2023, Grenzebach 2022, Grenzebach 2023]

Die Fa. Grenzebach hat ein Verfahren entwickelt, Phosphor als Phosphorsäure direkt aus Klärschlamm zu isolieren. Sie stützt sich dabei auf Erfahrungen mit der Gewinnung von elementarem Phosphor aus Phosphaterzen.

Prozess

Der Klärschlamm wird entwässert und getrocknet bis zu einem Trockenmasse-Gehalt von 75%. Die dafür notwendige Energie kommt weitgehend aus der Prozesswärme des Verfahrens. Ggf. ist eine Stützfeuerung erforderlich. Die Klärschlamm pellets werden in einen Drehrohrofen geschüttet und auf 1.200 Grad Celsius erhitzt. Die Verweilzeit beträgt etwa 20 Minuten. Das Material durchläuft dabei drei Zonen: die Trocknungszone, eine sauerstoffarme Reduktionszone und eine Oxidationszone. In der Reduktionszone reagiert Kohlendioxid bei hohen Temperaturen mit Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid (Boudouard-Gleichgewicht). Kohlenmonoxid reduziert die Phosphate im Klärschlamm zu elementarem Phosphor, der verdampft und in der Oxidationszone zu Phosphorpentoxid oxidiert wird. Dieses reagiert in einem Wäscher mit Wasser zu einer 54%igen Phosphorsäure. Auch der Rest des Schüttungsmaterials gelangt in die Re-Oxidationszone und wird zu einem mineralischen Granulat abgekühlt, das Basalt-ähnlichen Charakter haben soll.

Pflanzenverfügbarkeit

Phosphorsäure ist vielfältig verwendbar, nicht nur für pflanzenverfügbare Düngemittel sondern auch z. B. in der Chemieindustrie.

Menge

Bei dem Verfahren wird mehr als 80% des in der Asche enthaltenen Phosphors zurückgewonnen.

Betriebserfahrungen

Eine Pilotanlage für 90.000 EW wird an der Außenstelle des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (Umsicht) in Sulzbach-Rosenberg aufgebaut. Sie soll Anfang 2024 nach Rodgau (Hessen) umgesiedelt werden.

Sonstiges

Die Firma kooperiert mit der TU Clausthal und dem Fraunhofer-Institut Umsicht. Die Anlage ist skalierbar und soll geeignet sein, direkt auf Kläranlagen unter-

schiedlicher Größe errichtet zu werden. Die hohen Temperaturen gewährleisten auch eine Zersetzung der PFAS. Offene Fragen sind die Abluftreinigung (NO_x und flüchtige Schwermetalle wie Hg, Cd und Pb) sowie die Schwermetallverunreinigungen des mineralischen Rückstands.

(4) P-Xtract: Thermische Gewinnung von Phosphat aus Klärschlamm [Wehrle-Werk AG

2019, AZV Staufener Bucht 2020, umweltwirtschaft.com 2020, Kurz 2022]

Das Verfahren zeichnet sich durch eine Monoverbrennung von Klärschlamm aus, bei der integriert Phosphat abgeschieden und rückgewonnen wird.

Prozess

Der vorgetrocknete Klärschlamm wird mit (Erd-)Alkali-Chloriden versetzt, um die Flüchtigkeit der Schwermetalle und die Pflanzenverfügbarkeit zu erhöhen. Diese Mischung wird in einem Wirbelschichtofen zweistufig bei ca. 900 °C verbrannt – erst in einer reduzierenden, dann in einer oxidierenden Atmosphäre. Flüchtige Schwermetalle verdampfen und Phosphate werden mit der Flugasche mitgerissen. In einem Heißgaszyklon wird danach die phosphathaltige Flugasche bei Temperaturen von mindestens 700 °C aus dem Rauchgas abgeschieden. Schwermetalle verbleiben in der Gasphase und werden bei niedrigeren Temperaturen in der nachfolgenden Rauchgasreinigung abgeschieden. Die Bettasche wird deponiert. Die Flugasche soll direkt als Düngemittel verwendet werden.

Pflanzenverfügbarkeit

Nach Angaben der Firma ist die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors in der Flugasche gegeben. Durch die Zugabe von Na- und Kaliumsalzen werde Phosphat auch in eine pflanzenverfügbare Form überführt. Es entsteht Buchwaldit (Natrium-Calciumphosphat), eine pflanzenverfügbare Form.

Menge

Die Rückgewinnungsquote beträgt > 80%.

Betriebserfahrungen

Es ist geplant, in der Staufener Bucht in Südbaden eine Verbrennungs- und Rückgewinnungsanlage für 346.000 EW zu errichten. Die Anlage für 11.000 t/a KlärschlammTM von sieben Kläranlagen soll noch 2023 in Betrieb gehen.

Sonstiges

Das Projekt wird vom Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg (ZSW) wissenschaftlich begleitet und von der EU gefördert. Unklar ist, ob die Flugasche eine düngerechtliche Zulassung erhält. Der Verbleib nichtflüchtiger Schwermetalle und die Eignung für Klärschlämme aus Aluminiumfällungen sind noch zu klären.

(5) KSMF (Kubota Surface Melting Furnace): Phosphorreiche Schlacke aus einem Schmelzofen

[Scholz & Bilbao 2018, Kubota / Küttner 2023, Mostbauer et al. 2017]

Die japanische Firma Kubota behandelt Klärschlamm in einem Schmelzofen und erhält dadurch phosphathaltige Schlacke, die direkt als Dünger eingesetzt werden kann. Die Firma Küttner GmbH (Essen) vertreibt das System in Deutschland.

Prozess

Das System besteht aus einem Doppelzylinder, bei dem der innere Zylinder ein Schmelzofen ist, in dem Klärschlamm verbrennt. Der auf 85–90% Trockensubstanz vorgetrocknete Klärschlamm wird mit geringen Mengen von Natrium- und Calciumsalzen versetzt und gelangt in einen rotierenden Außenzylinder, der das Brenngut durchmischt und gleichmäßig der Schmelzkammer im Innenzylinder zuführt. Bei Luftzufuhr verbrennt dort der Klärschlamm und schmilzt bei 1.250–1.350 °C zu einer Schlacke, die in ein Wasserbad tropft und über ein Förderband abtransportiert wird. Die Schlacke wird granuliert. Durch geeignete Prozessführung entweichen in einer schwach reduzierenden Atmosphäre Schwermetalle (Cd, Pb, Zn) – nicht jedoch Phosphor – gemeinsam mit dem Rauchgas, das nachverbrannt wird. In der Rauchgasreinigung werden die Schwermetalle im Flugstaub abgeschieden. Die gra-

nulierte Schlacke enthält ca. 25% P_2O_5 . Nach Angaben der Firma benötigt das Verfahren keine externe Energiezufuhr. Trotz Wärmerückführung (z. B. zur Klärschlamm-trocknung) ist aber anscheinend eine Zusatzfeuerung (Kerosin) vorgesehen.

Pflanzenverfügbarkeit

Nach Angaben der Firma besitzt die Schlacke eine ähnliche Düngewirkung wie Tripelsuperphosphat (TSP): Löslichkeit in Citronensäure wurde bestimmt und Pflanzversuche wurden durchgeführt.

Menge

Die Rückgewinnungsquote beträgt ca. 90%.

Betriebserfahrungen

Die Fa. Kubota betreibt in Japan 11 großtechnische Schmelzöfen für Klärschlamm (60–160 t/d). Anscheinend wird die Schlacke dort überwiegend als Baumaterial eingesetzt. Europäische Referenzanlagen sind nicht bekannt.

Sonstiges

Die Firma Kubota bietet die Technologie auch zur Abfallbehandlung und zur Sanierung von Deponien an. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass die Verbrennung des Klärschlammes und die Phosphorrückgewinnung in einem Verfahrensschritt stattfinden. Einige Schwermetalle entweichen vermutlich nicht mit dem Rauchgas (Cu, Cr, Ni). Keine Angaben liegen vor, wie sich hohe Eisen- oder Aluminiumanteile aus der Phosphorfällung auf die Pflanzenverfügbarkeit der Schlacke auswirken. Die im Arbeitsblatt der DWA angeführte Abtrennung von Metallen aus der granulierten Schlacke ist unklar [DWA 2022].

(6) MePhrec: Phosphoranreicherung in einem Schmelzofen mit Metallabscheidung [Montag et al. 2016, Deutsche Phosphor Plattform 2023, Klärschlammverwertung Region Nürnberg GmbH 2018 a und b]

Das Verfahren der Fa. Ingitec GmbH verbrennt Klär-

schlammbricketts gemeinsam mit Koks in einem Schachtofen. Phosphor reichert sich in der Schlacke und im Flugstaub an. Eisen und andere Metalle werden als Metallschmelze abgestochen.

Prozess

Der brikettierte Klärschlamm wird gemeinsam mit 15% Koks in einen Schachtofen gegeben. Durch die entstehende Wärmeenergie in einer reduzierenden Atmosphäre entstehen Temperaturen von 1.400–1.450 °C. Die Kohle wird vergast und soll nach Reinigung als Synthesegas genutzt werden. Sauerstoff wird zur Verbrennung der Kohle und organischer Bestandteile zugeführt. Flüchtige Schwermetalle und Teile des enthaltenen Phosphors werden mit dem Flugstaub im Gegenstrom ausgetragen und getrennt abgeschieden. Der Phosphor im Flugstaub kann zu Phosphorsäure verarbeitet werden. Nichtflüchtige Schwermetalle (Cr, Cu, Ni) sind in der vor allem aus Eisen bestehenden Metallschmelze enthalten, die periodisch abgestochen und an die Metallindustrie gegeben wird. Die Schlacke fließt kontinuierlich ab und enthält keine organischen Bestandteile, nur wenig Schwermetalle und kann für Düngezwecke verwendet werden (P_2O_5 -Gehalt ca. 6%).

Pflanzenverfügbarkeit

Nach Angaben der Firma ist die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors in der Schlacke gegeben (Löslichkeit in Citronensäure). Allerdings liegen hierzu auch widersprüchliche Ergebnisse vor [Kratz & Schnug 2009]. Phosphor in der Flugasche kann zu handelsüblicher Phosphorsäure verarbeitet werden, die vielfältig, z. B. auch in der Chemieindustrie, verwendbar ist.

Menge

Die Rückgewinnungsquote beträgt insgesamt ca. 80%.

Betriebserfahrungen

Seit 2016 ist an der Kläranlage Nürnberg eine wissenschaftlich begleitete Pilotanlage mit einem Durchsatz von 600 kg/h Klärschlamm TM in Betrieb. Der

Versuchsbetrieb bis 2018 wurde durch ein Forschungsvorhaben begleitet.

Sonstiges

Die Schlacke kann auch als Bauzuschlagsstoff genutzt werden. Eine düngerechtliche Zulassung steht noch aus. Zusätzlich kann Zink elektrolytisch aus dem Flugstaub zurückgewonnen werden. Bei der Rauchgasreinigung müssen die hohen NO_x - und SO_2 -Gehalte reduziert werden. Im diskontinuierlichen Versuchsbetrieb waren hohe Staub- und Teerfrachten im Synthesegas ein Problem. Die P-Anreicherung in der Schmelzschlacke war geringer als erwartet, im Flugstaub deutlich höher. Die Verwendung von Koks als Brennstoff verschlechtert die Treibhausgas-Bilanz. Die Metallgewinnung ist abhängig von Eisen als Fällmittel in der 3. Reinigungsstufe. Erfahrungen mit Aluminiumfällung und Bio-P-Verfahren liegen noch nicht vor.

Der Projektbericht resümiert: „Das Projekt konnte die Vorhersagen des Lizenzgebers nicht bestätigen. Prinzipiell bietet der Schachtofen jedoch eine interessante Lösung für die Klärschlammbehandlung, die allerdings in weiteren Versuchen erprobt werden muss“ [Klärschlammverwertung Region Nürnberg GmbH 2018a].

(7) Pyreg: Phosphorrückgewinnung in Pyrolyse-Kohle [Gerber 2023, Montag et al. 2016, Björnßen Beratende Ingenieure 2023]

Die Fa. Pyreg GmbH aus Dörth in Rheinland-Pfalz vertreibt ein Verfahren, Klärschlamm zu pyrolysieren und Phosphat in der Pyrolysekohle (Karbonisat) zu binden.

Prozess

Der Klärschlamm wird entwässert, getrocknet und in einem Pyrolysereaktor auf 500–700 °C unter Sauerstoffausschluss erhitzt. Dabei wird der Schlamm entgast und anschließend unter gezielter Luftzugabe fast vollständig pyrolytisch karbonisiert. Es entsteht Synthesegas, das von mitgeführten Partikeln per Heißgasfiltration gereinigt und flammenlos in einer Brennkammer bei > 1.000 °C verbrannt wird. Es entstehen keine Öle und Teere. Mit der Abwärme kann

Rohmaterial getrocknet werden. Als Produkt entsteht Pyrolysekohle (Karbonisat), die Phosphat enthält.

Pflanzenverfügbarkeit

Die Pflanzenverfügbarkeit von P in Pyrolysekohle ist zunächst gering, wird aber durch Zugabe von 2–5% Kaliumacetat zum Klärschlamm vor der Pyrolyse deutlich verbessert [Buss et al. 2020]. Pflanzversuche des Landesbetriebs Hessisches Landeslabor (HLH), Gießen, zeigten, dass das Karbonisat 90% der Düngewirkung von Triplesuperphosphat erreicht.

Menge

Die Phosphorrückgewinnungsquote liegt bei mehr als 98%.

Betriebserfahrungen

In der Kläranlage Linz-Unkel, Rheinland-Pfalz, (30.000 EW) wird dieses Verfahren praktiziert. Mehrere Pyrolyse-Anlagen werden in anderen Ländern, u. a. in den USA, betrieben.

Sonstiges

Bei Untersuchungen der US EPA wurden keine PFAS im Karbonisat festgestellt. Weitere Untersuchungen seien notwendig [Gullett 2021]. Untersuchungen zum PAK-Gehalt des Karbonisats sind nicht bekannt. Es ist unklar, ob flüchtige Schwermetalle bei der Abgasfiltration abgeschieden werden und wie viele nichtflüchtige Schwermetalle im Karbonisat verbleiben. Das Produkt ist in Deutschland als Düngemittel nicht zugelassen [Zettl et al. 2023]. Allerdings kann es in Dänemark, Schweden und Tschechien als Dünger vertrieben werden.

Da der organische Anteil des Klärschlammes nicht oxidiert wird, haben nach Angaben der Firma, die vom Ingenieurbüro Björnßen übernommen wurden, Pyreg-Karbonisate ein negatives Treibhausgaspotential. Diese Angabe trifft jedoch nur zu, wenn das Karbonisat unmittelbar als Düngemittel eingesetzt werden kann und nicht weiter aufbereitet oder als Brennstoff genutzt werden muss.

Literaturverzeichnis

Ahrens R. (2014): Chemisorption fängt das Quecksilber ab, VDI-Nachrichten 20. Juni 2014 Chemisorption fängt das Quecksilber ab – VDI nachrichten (vdi-nachrichten.com)

AZV Staufener Bucht (2020): Das P-XTRACT-Projekt, <https://azv-staufener-bucht.de/p-xtract/> (abgerufen am 19. August 2023)

BAM (2020): R-Rhenania – Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern, <https://www.bam.de/Content/DE/Projekte/laufend/R-Rhenania/r-rhenania.html> (abgerufen am 19. August 2023)

Barjenbruch F. (2023): persönliche Mitteilung am 17. August 2023

Bertau M. & Fröhlich P. (2023): Düngemittel – wertvolles Abwasser, Spektrum SPEZIAL 2.23, 58-65 <https://www.spektrum.de/magazin/phosphor-recycling-wertvolles-abwasser/2008762>

Bertau M. (2023): pers. Mitteilung 12.09.2023

BfGA: Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) – Definition <https://www.bfga.de/arbeitschutz-lexikon-von-a-bis-z/fachbegriffe-j-r/pak-fachbegriff/> (abgerufen 15. August 2023)

Björnsen Beratende Ingenieure GmbH (2023): Untersuchung der Klimawirkung unterschiedlicher Klärschlammbehandlungsverfahren mit dem Ziel eines Phosphor-Recyclings aus kommunalem Klärschlamm (BUND Naturschutz in Bayern e.V.) https://www.bund-naturschutz.de/fileadmin/Bilder_und_Dokumente/Presse_und_Aktuelles/2023/Abfall/PM-115-23_Klaerschlamm_Studie.pdf

BMBF (2022a): Plastik in der Umwelt – eine Forschungsinitiative des BMBF, Webinar #13: Mikroplastik in Abwasser – Eintragspfade, Regulierung und Handlungsempfehlungen <https://bmbf-plastik.de/de/veranstaltung/mikroplastik-in-abwasser-2> (abgerufen am 09.08.2023)

BMBF (2022b): Verbundprojekt REPLAWA: Reduktion des Eintrags von Plastik über das Abwasser in die aquatische Umwelt https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2022-09/REPLAWA_Schlussbericht_Mikroplastik-Eintr%C3%A4ge%20%C3%BCber%20Abwasser_02WPL1445A%20ff_220828.pdf

BMJ (2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/D%C3%BCMV.pdf

BMJ (2016): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer – (Oberflächengewässerverordnung – OGewV) https://www.gesetze-im-internet.de/ogewv_2016/OGewV.pdf

BMJ (2021): Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV) https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_17_2013/17_BImSchV.pdf

BMJ (2022): Gesetz zur Verhütung und Bekämpfung von Infektionskrankheiten beim Menschen (Infektionsschutzgesetz – IfSG) <https://www.gesetze-im-internet.de/ifsg/ifsg.pdf>

BMUV (2020): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023 – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/ressourceneffizienz_programm_2020_2023.pdf

BMUV (2023a): Nationale Wasserstrategie (15.März 2023) https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/nationale_wasserstrategie_2023_bf.pdf

BMUV (2023b): Referentenentwurf des Bundesumweltministeriums: Verordnung zur Änderung der Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen und zur Änderung der Chemikalien-Verbotsverordnung
https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/20_Lp/17_bimschv_aend_vo/Entwurf/17_bimschv_aend_vo_refe_bf.pdf

BMUV-UBA (2022): Die Wasserrahmenrichtlinie – Gewässer in Deutschland 2021, Fortschritte und Herausforderungen
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/221010_uba_fb_wasser-richtlinie_bf.pdf

Börner et al. (2016): Untersuchung möglicher Umweltauswirkungen bei der Entsorgung nanomaterialhaltiger Abfälle in Abfallbehandlungsanlagen. Abschlussbericht, UBA-Texte 37/2016, UBA-Umweltbundesamt (Hrsg.) Dessau-Roßlau
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_37_2016_untersuchung_moeglicher_umweltauswirkungen_bei_der_entsorgung_nanomaterialhaltiger_abfaelle.pdf

Brunn H. et al. (2023): PFAS: forever chemicals – persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase-out and remediation of contaminated sites, *Environmental Sciences Europe* 2023, 35(1):20
<https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>

BUND (2005): BUNDposition Klärschlamm – BUNDForderungen für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Einklang mit Gesundheitsschutz und Bodenschutz, Eigenverlag, Berlin

BUND (2015): Terra Preta / Pyrolysekohle – BUND Einschätzung ihrer Umweltrelevanz
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/_migrated/publications/150504_bund_sonstiges_bodenschutz_terra_preta_einschaetzung.pdf

BUND (2017): BUND-Standpunkt 11 – Mikroschadstoffstrategie, Berlin
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/fluesse/fluesse_mikroschadstoffe_standpunkt.pdf

BUND (2019): Ergänzende Einschätzung zur BUNDEinschätzung der Umweltrelevanz von Terra Preta/Pyrolysekohle, Wissenschaftlicher Beirat des BUND

BUND (2020): Position 70: Arzneimittel in der Umwelt
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/position/position_arzneimittel.pdf

BUND (2021a): Umwelteintrag von Mikroschadstoffen umfassend verhindern – Fragen und Antworten zu Mikroschadstoffen
<https://www.bund.net/fluesse-gewaesser/mikroschadstoffe/>

BUND (2021b): Fluorchemikalien: Langlebig, gefährlich, vermeidbar, Hintergrundpapier
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/chemie_fluorchemikalien_hintergrund.pdf

BUND (2023a): Position 69: Herausforderungen für eine nachhaltige Stoffpolitik – Notwendigkeit einer Transformation im globalen Kontext
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/ressourcen_und_technik/Herausforderungen_fuer_eine_nachhaltige_Stoffpolitik_Positionspapier_BUND_2023.pdf

BUND (2023b): Position 75: Geoengineering – Klima-Engineering als Technik gewordene menschliche Hybris, im Druck

BUND (2023c): Blackbox Chemie – Die energieintensivste Industrie Deutschlands
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/blackbox-chemieindustrie-die-energieintensivste-industrie-deutschlands-studie-bund.pdf

Bundesinformationszentrum Landwirtschaft

(2023): Phosphor – Was tun, wenn ein Rohstoff knapp wird?
<https://www.landwirtschaft.de/diskussion-und-dialog/umwelt/phosphor-was-tun-wenn-ein-pflanzenaehrstoff-knapp-wird> (abgerufen 12. August 2023)

Bundesregierung (2017): Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 65, 3465–3512
https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBL&jumpTo=bgbl117s3465.pdf#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl117s3465.pdf%27%5D__1691571493455

Bundesregierung (2019): Antwort der Bundesregierung auf eine Kleine Anfrage der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen, Phosphatversorgung der Landwirtschaft sowie Strategien und Maßnahmen zur Förderung des Phosphatrecycling,
<https://dserver.bundestag.de/btd/17/114/1711486.pdf>

Buss W. et al. (2020): Unlocking the Fertilizer Potential of Waste-Derived Biochar, ACS Sustainable Chem. Eng. 8, 12295–12303
<https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acssuschemeng.0c04336> (abgerufen 10. September 2023)

Buttmann M. (2023): Gut Klärschlamm pressen, gibt viel Phosphor, Umweltmagazin 53, Nr. 3–4
<https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/special-phosphor-aus-klarschlamm-zurueckholen/gut-klarschlamm-pressen-gibt-viel-phosphor/>

Carpenter S.R. & Bennett E.M. (2011): Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus, Environ. Res. Lett. 6 (2011) 014009,
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/6/1/014009/pdf>

CHEMIE.DE: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe,
https://www.chemie.de/lexikon/Polyzyklische_aromatische_Kohlenwasserstoffe.html (abgerufen 14. August 2023)

Chemnitz, C. & Rehmer, C. (2019): Ernährung – ein unappetitlicher Kreislauf, in: Heinrich-Böll-Stiftung, BUND (Hrsg): Plastikatlas, Berlin: 20–21
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/chemie_plastikatlas_2019.pdf

DESTATIS (2022): Wasserwirtschaft: Entsorgungsweg des Klärschlammes aus der biologischen Abwasserbehandlung 2021,
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/liste-klarschlammverwertungsart.html#633398>

DESTATIS (2023): Inlandsabsatz von Düngemitteln
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Grafiken/Newsroom/2022/_Interaktiv/20220926-duengemittel.html

Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste (2018): Energieverbrauch bei der Herstellung von mineralischem Stickstoffdünger
<https://www.bundestag.de/resource/blob/567976/bb4895f14291074b0a342d4c714b47f8/wd-8-088-18-pdf-data.pdf>

Deutsche Phosphor-Plattform: Verfahrenskennblatt KRN-Mephrec
<https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/verfahrenskennblatt-mephrec/> (abgerufen am 03.10.2023)

Douhaire C. (2023): Herstellung und Inverkehrbringung von Struvitdünger rechtssicher gestalten, ISOE Materialien Soziale Ökologie No. 70,
<https://isoe-publikationen.de/fileadmin/redaktion/ISOE-Reihen/msoe/msoe-70-isoe-2023.pdf>

DWA (2020): 32. Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen – Klärschlammmanfall
https://www.dwa-bw.de/files/_media/content/PDFs/LV_Baden-Wuerttemberg/Homepage/BW-Dokumente/Homepage%202013/Nachbarschaften/32.LN_2019_Endfassung_klein.pdf

DWA (2021): 33. Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen – Entwicklung des Stromverbrauches
https://de.dwa.de/files/_media/content/06_SERVICE/Zahlen%20%7C%20Fakten%20%7C%20Umfragen/Leistungsvergleich_2020_final.pdf

DWA (2022a): 34. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen – Nährstoffe im Abwasser
https://de.dwa.de/files/_media/content/06_SERVICE/Zahlen%20%7C%20Fakten%20%7C%20Umfragen/Leistungsvergleich_2022_8seiter_A4_web.pdf

DWA (2022b): KUBOTA-Oberflächen-Schmelzverbrennungsverfahren (KSMF-Verfahren), Verfahrensinformation der DWA-Arbeitsgruppe KEK-2.6 „Neue Technologien“

DWA (2023): DWA Themen T1/2023 – Handlungsempfehlung zur integrativen Bewertung der weitergehenden Abwasserbehandlung von kommunalen Kläranlagen

<https://shop.dwa.de/DWA-Themen-Integrative-Bewertung-Abwasser/TH-KA-8.1-PDF-23>

EAWAG (2021): Blue Diversion Autarky – Abwasserbehandlung ohne Netzanschluss

<https://www.eawag.ch/de/forschung/menschen/abwasser/projekte/autarky/>

ECHA (2023): Registry of restriction intentions until outcome – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)

<https://echa.europa.eu/de/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>

Ecovillage Hannover (2023): (Ab-)Wasserkonzept

<https://www.ecovillage-hannover.de/standort-kronsborg/ab-wasserkonzept> (abgerufen am 09.10.2023)

EEB (2020): Stellungnahme zum Referentenentwurf: Verordnung zur Neufassung der Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen und zur Änderung der Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen (13./17. BImSchV)

https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/bimschv_13_17/Stellungnahmen/Stellungnahmen_Verbaende/bimschv_13_17_stn_eeb_bf.pdf

Egle L. et al. (2016): Phosphor: Eine kritische und zugleich unzureichend genutzte Ressource der Abwasser- und Abfallwirtschaft – Stand des Wissens und Ausblick für Österreich und Europa, Österr Wasser- und Abfallw, 68, 118–133 DOI 10.1007/s00506-016-0295-6

Ehbrecht A. et al. (2023): Nachhaltige Nutzung von Phosphor-Rezyklaten, KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall 70 (4), 275–281

EU (2006): Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur,

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006R1907-20221217&tid=1677942073398&from=DE>

EU (2008): Richtlinie 2008/56/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie)

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0056>

EU (2019): Verordnung (EU) Nr. 2019/1009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1009&tid=1692103921468>

EU-Kommission (2014): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Überprüfung der Liste kritischer Rohstoffe für die EU und die Umsetzung der Rohstoffinitiative, COM(2014)297 final

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0297>

EU-Kommission (2020): Mitteilung der EU-Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen – Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken (COM(2020) 474)

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474>

EU-Kommission (2021): Auf dem Weg zu einem gesunden Planeten für alle – EU-Aktionsplan: „Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen vom 12.05.2021, COM (2021) 400 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0400&tid=1682505237401>

EU-Kommission (2022a): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Neufassung), COM(2022) 541 final <https://environment.ec.europa.eu/system/files/2022-10/Proposal%20for%20a%20Directive%20concerning%20urban%20wastewater%20treatment%20%28recast%29.pdf>

EU-Kommission (2022b): Commission Regulation (EU) .../... of XXX amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards synthetic polymer microparticles, D083921/01 (Draft Implementing Act) <https://ec.europa.eu/transparency/comitology-register/screen/documents/083921/1/consult?lang=en>

EU-Kommission (2022c): Empfehlung der Kommission vom 10. Juni 2022 zur Definition von Nanomaterialien (2022/C 229/01) [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614(01))

EU-Kommission (2022d): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, – Ensuring availability and affordability of fertilizers, COM(2022)590 final https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:6882c821-60e2-11ed-92ed-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF

EU-Kommission (2023): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, A secure and sustainable supply of critical raw materials in support of the twin transition, COM(2023)165 final <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023DC0165>

EuPhoRe (2023): Vorteile des EuPhoRe-Verfahrens <https://www.euphore.de/vorteile.htm> (abgerufen am 25. August 2023)

EUREAU (2021): Briefing note PFAS and wastewater <https://www.eureau.org/resources/briefing-notes/5612-briefing-note-on-pfas-and-wastewater/file>

Europäisches Patentamt (2023): Verfahren zur Herstellung von Phosphorsäure in technischer Qualität aus Klärschlammasche, Técnicas Reunidas, Madrid, EP 3 770 113 B1, 29.03.2023

EUWID (2021): EUWID – Recycling und Entsorgung 25.2021, Klärschlamm Entsorgung: UBA rechnet mit ausgeglichenem Markt im Jahr 2029

Federal Ministry (2022): World Mining Data, Federal Ministry on Agriculture, Regions and Tourism (Republic of Austria), International Organizing Committee for the World Mining Congresses (Eds.), <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf>

Fettig J. et al. (2017): Entwicklung eines technischen Verwertungs- und Entsorgungskonzeptes für HTC-Prozesswasser, Abschlussbericht DBU Az.: 32122/01 <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32122.pdf>

Frankfurter Rundschau (2023): Frankfurt stellt Klärschlamm-Entsorgung neu auf, Meldung vom 07.02.2023, <https://www.fr.de/frankfurt/frankfurt-stellt-klaerschlamm-entsorgung-neu-auf-92074437.html> (abgerufen am 09.08.2023)

Fraunhofer IGB: ePhos® – Elektrochemisches Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor
<https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/wertstoffrueckgewinnung-naehrstoffe-metalle-biogas/rueckgewinnung-von-phosphor.html> (abgerufen am 17. August 2023)

GDCh (2022): Wertvoller Abfall – Klärschlamm und Urin als Phosphorquellen
<https://faszinationchemie.de/artikel/news/wertvoller-abfall-klarschlamm-und-urin-als-phosphorquellen/> (abgerufen am 15. August 2023)

Gerber H. (2023): Phosphat recyceln & Kohlenstoff binden, UmweltMagazin 53, Nr. 3–4, 12–14
<https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/special-phosphor-aus-klarschlamm-zurueckholen/phosphor-recyceln-kohlenstoff-binden/>

Grenzebach (2022): Whitepaper – Phosphor-Recycling aus Klärschlamm: Was Kommunen jetzt wissen müssen
<https://www.grenzebach.com/de/produkte/phosphor-recycling-anlagen/whitepaper/>

Grenzebach (2023): Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm
<https://www.grenzebach.com/de/produkte/phosphor-recycling-anlagen/> (abgerufen am 17. August 2023)

Gullett B. (2021): EPA PFAS innovative treatment team (PITT) findings on PFAS destruction technologies
https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-02/documents/pitt_findings_toolsresources_webinar_02172021_final.pdf

Hager F.-T. (2020): Entwicklung eines effizienten P-Recyclingverfahrens mit Schwermetallabtrennung, DBU-Bericht Az.:34867/01
https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-34867_01-Hauptbericht.pdf

Hamburg Wasser (2023): Abwasser neu denken – Hamburg Water Cycle
<https://www.hamburgwasser.de/umwelt/vorsorge/hamburg-water-cycle> (abgerufen am 09.10.2023)

Heinzmann B. & Lengemann A. (2022): Stand der Phosphorrückgewinnung in Berlin, Internationales Symposium RE-WATER, Braunschweig,
https://re-water-braunschweig.com/wp-content/uploads/heinzmann_lengemann_p-rueckgewinnung_berlin.pdf

HELCOM (2004): Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Gesetze/helcom_01_facts.pdf

Hoger M. & Heidolph H. (2023): Düngergranulate aus Asche, UmweltMagazin 53, Nr. 3–4, 35–37
<https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/special-phosphor-aus-klarschlamm-zurueckholen/duengergranulate-aus-asche/>

Kabbe Ch. (2023): pers. Mitteilung 22. August 2023

Klärschlammverwertung Region Nürnberg GmbH (2018a): Klärschlamm zu Energie, Dünger und Eisen mit metallurgischem Phosphorrecycling in einem Verfahrensschritt (KRN-Mephrec), Abschlussbericht,
https://bmbf.nawam-erwas.de/sites/default/files/20180425_krn-mephrec-abschlussbericht_online.pdf

Klärschlammverwertung Region Nürnberg GmbH (2018b): KRN Mephrec – Information über das Projekt Klärschlammverwertung Region Nürnberg
https://www.nuernberg.de/imperia/md/krn_mephrec/dokumente/bericht_krn_kurz.pdf

Kotzbauer U. & Poganski M. (2019): Technologische Weiterentwicklung des Verfahrens zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm mittels CO₂-Extraktion (Budenheim ExtraPhos®-Verfahren), DBU-Abschlussbericht 33559/01
https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-33559_01-Hauptbericht.pdf

Kratz S. & Schnug E. (2009): Zur Frage der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor, Journal für Kulturpflanzen 61 (1), 2–8

Kraus F. et.al. (2019): Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung, UBA Texte 13/2019, Umweltbundesamt (Hrsg), Dessau-Roßlau
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19_texte_13-2019_phorwaerts.pdf

Kubota|/Küttner (2023): Kubota Oberflächenschmelzsystem – Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm,
https://vb.nweurope.eu/media/2515/11_m-mann.pdf (abgerufen am 03.10.2023)

Kurz P. (2022): P-XTRACT: Regionales Phosphor-Recycling aus Klärschlämmen – Erkenntnisse der wissenschaftlichen Begleitung, 8. P-RÜCK-Kongress, Stuttgart – November 2022

LAGA (2020): LAGA M39 – Vollzugshinweise zur Umsetzung der Klärschlammverordnung – zu Artikel 4 (Änderungen der Klärschlammverordnung zum 01.01.2023)
<https://www.umwelt-online.de/regelwerk/cgi-bin/suchausgabe.cgi?pfad=/abfall/laga/m39.htm&such=Boden%20pH> (abgerufen am 10.08.2023)

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2023): Erhebungsbogen für die Berichtspflichten zum P-Recycling für Klärschlammherzeuger für das Jahr 2023
https://www.duengebehoerde-niedersachsen.de/duengebehoerde/news/40391_Erhebungsbogen_fuer_die_Berichtspflichten_zum_P-Recycling_fuer_Klaerschlammerzeuger_fuer_das_Jahr_2023

LANUV NRW (2001): Untersuchungen zur mikrobiellen Fließgewässerbelastung durch Kläranlagen, Abschlussbericht
https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/wasser/gewaesser/Abschlussbericht_Swistl.pdf

LANUV (2022): Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammmasche – Eigenschaften verschiedener Verfahren
https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/uploads/R%C3%BCckgewinnung-von-Phosphor_Steckbriefe.pdf

Lincke M. und Eder E. (2023): Dezentrale thermische Klärschlammverwertung mit Aschemodifikation für ein regionales P-Recycling, Wasser und Abfall 3/2023, 44–52
<https://www.springerprofessional.de/dezentrale-thermische-klärschlammverwertung-mit-aschemodifikation/24620658>

Lüthi L. und Bühler D. (2022): Urin als Dünger?, Kreishaus (Hrsg.)
<https://www.zhaw.ch/storage/lfsm/institute-zentren/iunr/oekotechnologie/kreishaus/2022-urin-als-duenger.pdf>

Mehr J. & Hellweg S. (2018): Studie zum ökologischen Vergleich der Produktion von Phosphorsäure aus Klärschlammmasche mittels Phos4life-Verfahren mit der Primärproduktion von P-Säure aus Rohphosphat, ETH Zürich, Institut für Umweltingenieurwissenschaften
https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/abfall-rohstoffe/abfallwirtschaft/publikationen/phosphor-mining/oekobilanz_bericht_phos4life_2018.pdf

Meyer M. (2023): Klärschlamm in den Ofen – Phosphor gewonnen, Umweltmagazin 53 Nr. 1–2, 15–17
<https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/special-phosphor-aus-klärschlamm-zurueckholen/klärschlamm-in-den-ofen-phosphor-gewonnen/>

MicBin (2021): Plastik in der Umwelt – Quellen · Senken · Lösungsansätze, Mikroplastik in Binnengewässern Untersuchung und Modellierung des Eintrags und Verbleibs im Donaugebiet als Grundlage für Maßnahmenplanung
https://www.micbin.de/download/Abschluss_MicBin_02-11-2021-Final.pdf

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg (2022): Phosphor-Rückgewinnung
<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/abfall-und-kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaft/recycling-und-abfalltechnik/phosphor-rueckgewinnung/>

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

(2020): Die Umsetzung der Anforderungen der Klärschlamm-Verordnung zur Phosphorrückgewinnung in Nordrhein-Westfalen, Schlussbericht, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.)
https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/umwelt/Ressourcenschutz/umsetzung_der_anforderung_der_klaerschlammmvo.pdf

Ministry of Environment of Denmark (2022):

Nitrous Oxide Emissions from Ornum Waste Water Treatment Plant – Kalundborg Utility, MUDP Report
<https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2022/09/Nitrous-Oxide-Emissions-from-Ornum-Waste-Water-Treatment-Plant.pdf>

Montag D. et al. (2015): Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz, UBA-Texte 98/2015, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau,
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_98_2015_bewertung_konkreter_massnahmen_einer_weitergehenden_phosphorrueckgewinnung.pdf

Montag D. et al. (2016): Gutachten zur Umsetzung einer Phosphor-Rückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Klärschlamm-Asche. Gerichtet an das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, HAD-Referenznummer 4824/8
https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/abfall/ressourcenschutz/phosphor/UmPhos_Hessen_ISA_Abschlussbericht_v2.pdf

Mostbauer P. et al. (2017): Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlamm-Asche, Endbericht im Auftrag der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol, Landesagentur für Umwelt, Universität für Bodenkultur Wien
https://umwelt.provinz.bz.it/downloads/Phosphorrueckgewinnung_aus_Klaerschlammmund_Klaerschlammasche_Studie_Boku_2017.pdf

Natz, S. (Berliner Wasserbetriebe – BWB) (2022): persönliche Kommunikation

Oepfert, Chr. & Clemens J. (2023): Phosphor aus dem Überschussschlamm, UmweltMagazin 53, Nr.3–4,
<https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/special-phosphor-aus-klaerschlammm-zurueckholen/phosphor-aus-ueberschussschlamm/>

OSPAR (1992): Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks,
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Gesetze/ospar_convention_2014_bf.pdf

Persson L. et al. (2022): Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities, Environ. Sci. Technol., 2022, Vol. 56, S. 1510–1521,
<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.1c04>

Pontes Pabuli (2022): P-Rückgewinnung. Wirtschaftlich und nachhaltig,
<https://www.pontes-pabuli.de/phosphor.html> (aufgerufen 10. August 2023)

QLA – Qualitätssicherung Landbauliche Abfallverwertung (2017): Qualitäts- und Prüfbestimmungen für Klärschlämme,
https://www.qla.de/sites/default/files/Dokumente/QP_Klaerschlammm_November_2017.pdf

Rak A. (2018): Das Remondis Tetraphos-Verfahren, in: Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker, Stefan Kopp-Assenmacher (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm, ISBN 978-3-944310-43-5, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH S.491–494
https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2022/12/2018_VvK_491-494_Rak.pdf

Rekate F. et al. (2017): Optimierte HTC-Biokohlen zur Verbesserung des Wasser- und Nährstoffhaushaltes landwirtschaftlicher Böden, Abschlussbericht DBU Förderkennzeichen 29875-35/0
<https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-29875.pdf>

Remy C. und Stüber J. (2015): Weiterentwicklung des Klima- und Ressourceneffizienzpotentials durch HTC-Behandlung ausgewählter Berliner Klärschlämme – HTC-Berlin,
<https://publications.kompetenz-wasser.de/de/publication/845/>

Rockström J. et al. (2009): A safe operating space for humanity, *Nature*, Vol. 461, S. 472–475, <https://www.nature.com/articles/461472a>

Roskosch A. & Heidecke P. (2022): Phosphatdünger aus Klärschlamm, *UmweltMagazin*, Nr. 5–6

Schaum C. A. et al. (2021): Lösungsstrategien zur Verminderung von Einträgen von urbanem Plastik in limnische Systeme – PLASTRAT: Synthesebericht. <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/synthesebericht-plastrat>

Schnee R. (2022): Das Extraphos-Verfahren zur optimalen Klärschlammverwertung, in: Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker, Stefan Kopp-Assenmacher (Hrsg.): *Verwertung von Klärschlamm*, ISBN 978-3-944310-43-5, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH S. 445–450 https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2022/12/2018_VvK_445-450_Schnee.pdf

Schnell M. und Quicker P. (2020): Klärschlammverbrennung in einer stationären Wirbelschicht mit integrierter Phosphor-Rückgewinnung, *Chemie Ingenieur Technik*, 92 (4), <https://doi.org/10.1002/cite.201900148>

Scholz R.W. & Bilbao J. (2018): Verwertbarer Phosphor aus Klärschlämmen – Leistungen des erprobten Kubota-KFSM-Verschmelzungsprozesses, *Korrespondenz Abwasser Abfall* 65(6), 539–544

Schramm B. et al. (2022): Datenerhebung zu Verwendungen, Zusammensetzung und Umwelteigenschaften von Polyquaternium-Verbindungen, *Umweltbundesamt (Hrsg.) UBA-Texte 143/2022*, Dessau-Roßlau https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_143-2022_datenerhebung_zu_verwendungen_zusammensetzung_und_umwelteigenschaften_von_polyquaternium-verbindungen.pdf

Seay B.A. et al. (2023): Per- and polyfluoroalkyl substances fate and transport at a wastewater treatment plant with a collocated sewage sludge incinerator, *Sci Total. Environ.* 874, 162357 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162357>

Sichler T. et al. (2022): Abschätzung zusätzlich aus Abwasser und Klärschlämmen kommunaler und gewerblicher Herkunft extrahierbarer Wertstoffe, *Umweltbundesamt (Hrsg.), UBA-Texte 156/2022 Dessau-Roßlau* https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_156-2022_abschaetzung_zusaetzlich_aus_abwasser_und_klaerschlaemen_kommunaler_und_gewerblicher_herkunft_extrahierbarer_wertstoffe.pdf

Spektrum.de (2014): Recycling: Urin – der Dünger der Zukunft? <https://www.spektrum.de/news/urin-der-duenger-der-zukunft/1319808>

SRU (2007): Sachverständigenrat für Umweltfragen (2007): *Arzneimittel in der Umwelt*, Stellungnahme Nr. 12, Berlin, https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2004_2008/2007_Stellung_Arzneimittel_in_der_Umwelt.pdf

SRU (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem – Sondergutachten https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2012_2016/2015_01_SG_Stickstoff_HD.pdf?__blob=publicationFile&tv=2

Stark K. et al. (2022): Status Quo der thermischen Klärschlammbehandlung und Phosphorrückgewinnung in Deutschland, in: Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker, Stefan Kopp-Assenmacher (Hrsg.): *Verwertung von Klärschlamm*, ISBN 978-3-944310-43-5, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 9–24

Steffen W. et al. (2015): Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, *Science*, Vol. 347, Nr. 6223, <https://science.sciencemag.org/content/347/6223/1259855>

Steininger A. (2022): Eintrag ausgewählter per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen in häusliches Schmutzwasser, Technische Universität Wien, <https://doi.org/10.34726/hss.2022.89341>

Stenzel F. et al. (2019): Arzneimittelrückstände in Rezyklaten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen, Abschlussbericht, UBA-Umweltbundesamt (Hrsg.) Texte 31/2019, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-29_texte_31-2019_arzneimittelrueckstaende-klarschlamm_v2.pdf

Stöcklein F. et al. (2018): Evaluation und Minderung klimarelevanter Gase aus Abfallverbrennungsanlagen, UBA-Texte 102/2018, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-12-03_texte_102-2018_gase-abfallverbrennungsanlage.pdf

Svoboda K. et al. (2005): Nitrous Oxide Emissions from Waste Incineration, Chem. Pap. 60(1), 78–90, DOI: 10.2478/s11696-006-0016-x

Tagg, A.S., Brandes E., Fischer F., Fischer D., Brandt J. and Labrenz M. (2022): Agricultural application of microplastic-rich sewage sludge leads to further uncontrolled contamination, Sci. Total Environ. Volume 806, Part 4, 150611 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150611

Theuring P. & Kabbe Ch. (2023): Sauberes Phosphat aus Klärschlammasche, Umweltmagazin Nr. 3–4, 29–31 <https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/special-phosphor-aus-klarschlamm-zurueckholen/sauberes-phosphat-aus-klarschlammasche/>

UBA (2014): Arzneimittel in der Umwelt – vermeiden, reduzieren, überwachen, Umweltbundesamt, Hintergrund, Dessau-Roßlau https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/01.08.2014_hintergrundpapier_arzneimittel_final_.pdf

UBA (2016): Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar?, Hintergrund https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/polyzyklische_aromatische_kohlenwasserstoffe.pdf

UBA (2018): Klärschlammensorgung in der Bundesrepublik Deutschland, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_uba_fb_klaerschlam_bf_low.pdf

UBA (2020): Nanomaterialien in der Umwelt Aktueller Stand der Wissenschaft und Regulierungen zur Chemikaliensicherheit, Empfehlungen des Umweltbundesamtes, Hintergrund, November 2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/hgp_nanomaterialien_in_der_umwelt_final_bf_deutsch.pdf

UBA (2023): Distickstoffoxid-Emissionen <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/distickstoffoxid-emissionen> (abgerufen 15. August 2023)

Überschär K.H. (2006): Möglichkeiten der Dekontamination: Organische Stoffe/Kontaminanten; 2.5, Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Landbauforsch Völknerode SH 294:101–109 https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/bitv/zi040841.pdf

Ulbrich J. et al. (2021): AshDec: Thermochemische P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche, Nutriman Webinar, 01.03.2021 https://nutriman.net/sites/default/files/2021-03/Presentation%20Webinar-26-2-21-ID%20398_397%20AshDec.pdf

Ulrich H. et al. (2016): Entwicklung der PFC-Belastung in kommunalen Klärschlämmen in Bayern, Korrespondenz Abwasser, Abfall 63 Nr. 9, 788–796 https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/pfc/pfc_belastung_abwasser_klaerschlam/doc/entwicklung_pfc_belastung_ks.pdf

umweltwirtschaft.com (2020): Wehrle und ZSW erproben neues Verfahren in Pilotprojekt <https://www.umweltwirtschaft.com/news/wasser-und-abwasserbehandlung/schlammverwertung/Phosphorwirtschaftlicher-aus-Klaerschlam-zurueckgewinnen-Wehrle-und-ZSW-erproben-neues-Verfahren-in-Pilotprojekt-22708>

United Nations (1992): Agenda 21, Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung, vom 3. bis 14 Juni 1992, Rio de Janeiro, Brasilien, http://www.un.org/Depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf

U.S. Geological Survey (2023): Mineral Commodity Summaries 2023
<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>

waste:research (2022): Klärschlammverwertung: Mit- und Monoverbrennung in Deutschland (7. Auflage)
<https://trendresearch.de/studie.php?s=707> (abgerufen 11. August 2023)

Weber C. J. et al. (2022): Investigating the dispersal of macro and microplastics on agricultural fields 30 years after sewage sludge application, Scientific Reports 12: 6401,
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-10294-w>

Wehrle-Werk AG (2019): P-EXTRACT: Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm mit P-XTRACT®
<https://www.wehrle-werk.de/de/energie/technologie/phosphorr%C3%BCckgewinnung> (abgerufen 19. August 2023)

WIKIPEDIA (2023): Klärschlammvererdung
<https://de.wikipedia.org/wiki/Kl%C3%A4rschlammvererdung> (abgerufen am 08.08.2023)

Wolters B. et al. (2022): Erarbeitung anspruchsvoller Standards für die mittelfristige Fortführung der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlämmen aus Abwasserbehandlungsanlagen mit kleiner Ausbaugröße, Umweltbundesamt (Hrsg.) Umwelt & Gesundheit 3/2022, Dessau-Roßlau
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uug_03-2022_erarbeitung_anspruchsvoller_standards.pdf

ZAR (2023): Prozessentwicklung und Prüfung der Machbarkeit des Phos4life-Verfahrens am Standort Emmenspitz – Statusbericht zur Veröffentlichung
[\[spitz_Aktueller_Statusbericht_April_2023.pdf\]\(#\)](https://zar-ch.ch/fileadmin/user_upload/Contentdokumente/Phos4Life2023/20230425_P4L_Emmen-</p></div><div data-bbox=)

Zepke F. (2022): EuPhoRe®-Verfahren – Vom Klärschlamm direkt zum Düngemittel, 8. P-RÜCK-Kongress, Stuttgart – November 2022

Zepke F. (2023): Dünger aus dem Drehrohrofen, Umweltmagazin Nr. 5–6,
<https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/special-phosphor-aus-klarschlamm-zurueckholen/duenger-aus-dem-drehrohrofen/>

Zettl E. et al. (2023): Überprüfung des nationalen Standes der Technik (SdT): Teilvorhaben 3: Untersuchungen zu Emissionen und Energieaufwand bei der Trocknung und Kompostierung von Klärschlamm zur Optimierung einer weiteren umweltverträglichen Verwertung, UBA-Texte 87/2023, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/87_2023_texte_ueberpruefung_des_nationalen_standes_der_technik_.pdf

ZfK – Zeitung für kommunale Wirtschaft (2021): Kasselwasser: Detaillierte Machbarkeitsstudie zur Klärschlammverwertung,
<https://www.zfk.de/entsorgung/abfallwirtschaft/kasselwasser-detaillierte-machbarkeitsstudie-zu-klarschlammverwertung>

Die politische Position des BUND/Friends of the Earth Germany in den BUND Positionen

Die Welt steht vor immensen ökologischen, gesellschaftlichen und sozialen Herausforderungen. Der BUND/Friends of the Earth sucht und gestaltet dafür Lösungen, die ökologischen und sozialen Kriterien gerecht werden. Als Umwelt- und Naturschutzverband kämpft er insbesondere für die Einhaltung der 1,5 Grad-Obergrenze in der Klimakrise und für Klimagerechtigkeit, für die Beendigung des Artensterbens, und den Schutz und die Wertschätzung von Natur und biologischer Vielfalt. Wir fordern eine tatsächlich nachhaltige Landwirtschaft ohne Gentechnik, den sofortigen Atomausstieg und eine Minderung des Ressourcenverbrauchs. Kampagnen des BUND zielen auf ein Ende der Vermüllung und Vergiftung unserer Umwelt, unter anderem mit Pestiziden, zahllosen Schadstoffen und Mikroplastik. Als Nachhaltigkeitsverband setzt sich der BUND für soziale wie ökologische Gerechtigkeit, Armutsbekämpfung, Menschenrechte und Demokratie ein. Das eine ist ohne das andere nicht zu haben, das haben uns unsere Erfahrungen gelehrt.

Diese Ziele sind nur zu erreichen, wenn nicht nur alle umwelt- und sozialverträglichen Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz bei der Ressourcennutzung ausgeschöpft werden. Zur absoluten Reduzierung unserer Ressourcenentnahme aus der Umwelt brauchen wir außerdem Suffizienz: Wir müssen nicht nur anders, sondern auch weniger konsumieren. Eine nachhaltige Änderung der Lebensweise aller Bürger*innen ist aber keine individuelle Verantwortung, sondern eine gemeinsame und gesellschaftliche. Zur Förderung des Gemeinwohls brauchen wir mehr Mitwirkungsrechte der Zivilgesellschaft, vor allem aber förderliche politische Rahmenbedingungen. So fordert der BUND seit langem, durch Energiesparen den Endenergieverbrauch mindestens um die Hälfte zu senken, damit der Rest aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden kann – Studien des Umweltbundesamtes geben diesen Forderungen Recht.

Sollen die Ausrottung von immer mehr Arten beendet und unsere Naturräume geschützt werden, dann muss endlich der Flächenverbrauch für immer mehr Straßen-, Gewerbe- und Siedlungsflächen beendet und die Landwirtschaft natur- und tierwohlverträglich werden. Der Rohstoffverbrauch muss im Laufe dieses Jahrhunderts drastisch, z. B. um einen Faktor 10 oder mehr, reduziert werden – eine schnelle und massive Absenkung würde helfen die Klimakrise zu bewältigen, den Biodiversitätsverlust zu stoppen und den kommenden Generationen in allen Ländern gleiche Entwicklungschancen zu ermöglichen.

Stofflich und energetisch muss unser Wirtschaftssystem schlanker werden. Das ist eine große Herausforderung, aber es ist machbar. Jedoch wird die Bewältigung dieser Aufgabe unmöglich, wenn die Politik weiterhin dem Wirtschaftswachstum Vorrang vor der Bewahrung unserer Lebensgrundlagen gibt. Wachstumspolitik, ob erfolgreich oder nicht, ist der Treiber für Schäden an Natur und Umwelt – beispielsweise durch den Ausbau von Infrastruktur mit exzessivem Flächenverbrauch (Flughäfen, Straßen, Flussausbau), die Förderung einer exportorientierten Landwirtschaft mit viel zu hohem Tierbestand. Sie fordert und fördert Niedriglohnsektoren, Einkommenspolarisierung und eine globale Raubwirtschaft. Demokratische Entscheidungen und Bürger*innenmitsprache werden durch Beschleunigungsgesetze und die Schwächung von Bürger*innenbeteiligung eingeschränkt, um die Wachstumsziele nicht zu gefährden.

Die notwendige sozial-ökologische Transformation bietet die Chance zu einem gerechten und weniger durch Egoismen, Konkurrenz und Ausbeutung bestimmten Leben im Einklang mit den planetaren Systemen. Wie notwendig eine solche Wende zum guten Leben ist, haben viele Mitbürger*innen erkannt, nicht zuletzt in der Pandemiekrise seit 2020. Viele Arbeitsverhältnisse und Lebensweisen werden sich

ändern und ändern müssen, durch neue Technologien ebenso wie durch eine neue, nachhaltige Gestaltung für gute Erwerbs- wie Nichterwerbsarbeit. Das erfordert nicht nur neue Berufsbilder und Qualifikationen, sondern auch, dass Status, Bezahlung und soziale Sicherung in vielen Bereichen von Wirtschaft und Verwaltung verbessert werden.

Der BUND steht nicht nur für die ökologische, sondern auch für soziale, institutionelle und ökonomische Nachhaltigkeit – deshalb enthalten unsere Positionen immer auch Ansätze, die zu sozialer Gerechtigkeit, zu guter Arbeit und zu zukunftsfähigem Wirtschaften beitragen. Dabei blickt der BUND stets über den Tellerrand und entwickelt Perspektiven zusammen mit den Partnerorganisationen in unserem internationalen Netzwerk, Friends of the Earth Europe und Friends of the Earth International und anderen Organisationen der Zivilgesellschaft.

Es gibt Alternativen zu einer Politik, die mit immer höherer Geschwindigkeit in die Sackgasse fährt! Solche Alternativen zeigt der BUND in den BUND-Positionen, die von den Bundesarbeitskreisen und vom Wissenschaftlichen Beirat des BUND erarbeitet sowie vom Bundesvorstand beschlossen werden. In den Bundesarbeitskreisen wird akademische und nicht-akademische Expertise zusammengeführt, im wissenschaftlichen Beirat werden die Positionen von Expert*innen aus 20 Themenbereichen gemeinsam geprüft – der BUND praktiziert seit Jahrzehnten das Prinzip der transdisziplinären Wissenschaft. So basieren alle BUND-Positionen auf mehrfach und interdisziplinär geprüften aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen und zeigen politische und gesellschaftliche Lösungswege auf. Jede dieser Positionen, auch die hier vorliegende, ist ein wichtiger Baustein im Gesamtbild des sozial-ökologischen Umbaus hin zu einer nachhaltigen Wirtschafts- und Lebensweise.

Eine Kurzfassung des
Positionspapiers „Klärschlamm –
Nährstoffquelle und
Schadstoffsenke“ kann
heruntergeladen werden unter:
<https://www.bund.net/www.bund.net/klaerschlamm-kurz>

Impressum

Herausgeber:

*Bund für Umwelt
und Naturschutz
Deutschland e. V. (BUND),
Kaiserin-Augusta-Allee 5
10553 Berlin*

Telefon: 0 30/2 75 86-40

Telefax: 0 30/2 75 86-440

mail: info@bund.net
www.bund.net

Autoren:

*Ralph Ahrens, Hans-Joachim
Grommelt, Markus Große Ophoff,
Klaus Günter Steinhäuser*

*Die Bundesarbeitskreise Wasser,
Umweltchemikalien und Toxikologie,
Bodenschutz und Altlasten, Abfall
und Rohstoffe sowie Landwirtschaft
haben zu diesem Bericht beigetragen.*

V. i. S. d. P.: Petra Kirberger

Produktion: Natur & Umwelt
GmbH

Oktober 2023