

11. Ökobilanzielle Bewertung der in der Förderinitiative entwickelten Verfahren

Horst Fehrenbach, Joachim Reinhardt, Heidelberg

1 Einleitung

Phosphor ist ein essenzielles Element für jegliche Lebensform. Eine ertragreiche Landwirtschaft ist auf die Verfügbarkeit von Phosphor im Boden angewiesen. Durch den Abbau von natürlichen Phosphatlagerstätten und die Herstellung und den Einsatz von mineralischen P-Düngern nimmt die wirtschaftliche Verfügbarkeit von P-Ressourcen ab. Bezüglich der Reichweite werden sehr unterschiedliche Zahlen gehandelt, je nach Annahmen und Interpretation von „Verfügbarkeit“.

Ein grundlegender Weg zum schonenden Umgang mit der Ressource Phosphor ist die geschlossene Kreislaufführung. Mit diesem Ziel wird seit längerer Zeit die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm (einem der bedeutendsten Sekundärstoffe was den P-Gehalt betrifft) begründet. Aus gesamtökologischer Sicht wird die direkte Ausbringung dieses Abfallstoffs, der gleichsam die Schadstoffsenke der Abwasserreinigung darstellt, zunehmend kritisch hinterfragt, ja abgelehnt. Eine Verbrennung wird heute vielfach als die insgesamt nachhaltigere Lösung gewertet – verbunden jedoch mit dem Pferdefuß des Verlustes des Phosphors.

Als möglicher Königsweg stellt sich somit die Separierung des Phosphors, weitgehend von Schadstoffen befreit, dar. Dies setzt voraus, dass die ökologische Bilanz insgesamt günstig ist im Vergleich zu den „konventionellen“ Alternativen.

Im Rahmen der Förderinitiative des BMBF und BMU zu „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ wurden verschiedene Verfahren der Phosphorrückgewinnung untersucht. Der vorliegende Beitrag fasst die Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertung im Projekt *PHOBE (Phosphorrecycling - Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland, Leitung ISA/RWTH Aachen)* zusammen.

2 Ziele, Untersuchungsrahmen und Methode

2.1 Ziele

Die **Ziele** der ökologischen Bewertung sind folgendermaßen formuliert:

- Die im Rahmen der Förderinitiative des BMBF und BMU zu „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ beteiligten Verfahren des P-Recycling sollen über den gesamten Lebensweg bewertet werden.

- Daraus soll eine Antwort auf die Frage gegeben werden: Ist der Weg des P-Recyclings insgesamt eine ökologisch optimierte Alternative zum Weg des direkten Einsatzes sekundärer P-Quellen in der Landwirtschaft (mit dem Nachteil des Schadstoffeintrags in den Boden) bzw. zur Verbrennung dieser Quellen (mit dem Nachteil der erhöhten Beanspruchung der Ressource Phosphorerz)?
- Welche Anforderungen sind an die Verfahren oder die damit verknüpften Systeme zu stellen, um einen aus ökologischer Sicht optimalen Nutzen zu erzielen?
- Welche Stellgrößen sind von entscheidendem Einfluss auf das Ergebnis und
- welche Handlungsempfehlungen an eine nachhaltige Stoffstromwirtschaft lassen sich daraus ableiten?

2.2 Untersuchungsrahmen

Der **Untersuchungsrahmen** umfasst die Stoffstrom- und Energiebilanzen für die in der oben genannten Förderinitiative einbezogenen Verfahrenstechniken. Diese umfassen neuere, noch nicht im Betrieb befindliche Techniken, die sich alle auf die Rückgewinnung von Phosphor aus dem kommunalen Abwasser bzw. dem bei dessen Reinigung erzeugten Klärschlamm beziehen. Es sind dies:

- P-RoC: Kristallisation an CSH aus Haupt- oder Nebenströmen kommunaler Abwasserbehandlung (Universität Karlsruhe)
- FIX-Phos: Kristallisation an CSH aus Überschussschlamm (Universität Darmstadt)
- PHOXNAN (Rückgewinnung aus Klärschlamm durch Niederdruck-Nassoxidation und Nanofiltration, Bayer Technology Services mit IVT und ISA von der RWTH Aachen)
- PASCH (Rückgewinnung aus Asche, ISA)
- SESAL-Phos (Rückgewinnung aus Asche, Universität Darmstadt)

Die Festlegung des Untersuchungsrahmens muss mit der Zieldefinition (siehe oben) kongruent sein. Da fünf Verfahren bewertet werden, die in der Prozesskette „*Abwasserreinigung* → *Klärschlammherzeugung/-behandlung* → *Klärschlammverbrennung* → *Aschebehandlung*“ jeweils an einer anderen Stelle ansetzen, muss für alle drei Verfahren eine die ganze Kette umfassende, einheitliche Systemgrenze gesetzt werden.

Des Weiteren werden zwei verschiedene Referenz-Szenarien entwickelt, um den Unterschied der betrachteten Verfahren (Systeme) gegenüber den üblichen Status-quo-Verfahren darstellen zu können. Dies sind bezüglich des Klärschlamms in erster Linie die Monoverbrennung (keinerlei Rückgewinnung von P) und die landwirtschaftliche Verwertung (vollständige und direkte Rückführung des P auf den Acker).

Als **Bezugsgröße** liegt dieser Arbeit jährlich eine zu entsorgende Masse an kommunalem Klärschlamm einer Kläranlage mit 100.000 Einwohnergleichheitswerten zugrunde. Daraus ergibt sich eine **Trockenmasse** an **Rohschlamm** (ungefaut, als Summe von Primär- und Überschussschlamm) von 2.920 t.

Die **funktionale Einheit** der Ökobilanz lautet: Die Entsorgung einer jährlichen Schlammmenge aus einer Kläranlage mit 100.000 Einwohnergleichheitswerten mit der entsprechend definierten Zusammensetzung unter Rückgewinnung des darin enthaltenen Phosphors. Der (weiter unten genauer beschriebene) Bilanzraum umfasst alle damit direkt und mittelbar verbundenen Wirkungen auf die Umwelt, negativ durch Verbräuche und Emissionen, positiv durch Einsparungen und Substitution primärer Ressourcen.

Der **Bilanzraum** der vergleichenden ökologischen Bilanzierung beginnt mit der Erzeugung von Primärschlamm und Überschussschlamm und dessen weiterer Behandlung und Entsorgung inklusive der Verfahren zur Rückgewinnung des Phosphors. Dabei entstehendes und in die Kläranlage rückzuführendes Abwasser (z.B. Zentrat der Entwässerung) wird mit einbezogen, so dass auf diesem Weg auch der Verfahrensablauf der kommunalen Abwasserreinigung in den Bilanzraum einbezogen ist. Dadurch werden die Wechselwirkungen der Klärschlammbehandlung mit der Klärschlammherzeugung berücksichtigt.

2.3 Methodik

Ökobilanz als Basisansatz

Als Basisansatz zur ökologischen Bewertung umfassender Systeme steht im Wesentlichen allein die Ökobilanz (LCA) zur Verfügung. Sie wurde im Rahmen des Normenwerks der DIN ISO 14040ff. standardisiert. Diese Bewertungsmethode hat sich in zahlreichen Arbeiten als geeignetes Verfahren zur Unterstützung von Entscheidungen zu der Umweltverträglichkeit bzw. ökologischen Vorteilhaftigkeit von Vorhaben bewährt. Die Ökobilanz ist das einzige Umweltbewertungsinstrument, das geeignet ist, große zusammenhängende Systeme raum- und medienübergreifend mit klar definierten Wirkungskriterien zu bewerten.

Für die oben genannten Verfahren werden **Sachbilanzen** in Form von Szenarien erstellt. Angesichts der umfangreichen Systemgrenze wird auf eine übersichtliche Gliederung des Untersuchungsraums geachtet. Dies ermöglicht die Analyse der jeweils ergebnisbestimmenden Prozesse und Teilsysteme. Es wird eine so genannte Sektoranalyse erstellt. Dadurch sind Umweltwirkungen dezidiert zuordenbar; Schwachstellen sowie Optimierungspotenziale lassen sich deutlich herausarbeiten.

Die Vielzahl der in der Sachbilanz bilanzierten Stoffparameter (z.B. CO₂, NO_x, Erdölverbrauch etc.) werden in der **Wirkungsabschätzung** auf die wesentlichen negativen Umweltwirkungen aggregiert. Aus den Erfahrungen vergangener und aktueller Arbeiten ist folgende Liste mit Wirkungskategorien als geeignet anzusehen. Sie deckt sich weitgehend mit den in Deutschland wie auch Europa gängigen Standardlisten. Wichtig ist, dass alle in relevanter Weise betroffenen Umweltschutzgüter bei der Bewertung berücksichtigt werden (Tabelle 1).

Bei der Auswahl wird Bezug auf die vergleichbaren Ökobilanzstudien zur Klärschlamm Entsorgung genommen. Zusätzlich zu den grundsätzlichen Themen wie

Ressourcen, Treibhauseffekt, Versauerung und Eutrophierung, wird auch die Kategorie "Humantoxizität" betrachtet. Diese wird in der vorliegenden Arbeit durch den Indikator Quecksilber und Krebsrisikopotenzial repräsentiert.

Von den „Ressourcen“ werden in dieser Studie die *fossilen Ressourcen* und natürlich die „Phosphor-Ressourcen“ quantifizierend einbezogen. Letztere sind der Untersuchungsgegenstand des Projektes.

Die Kategorie Ökotoxizität durch Schadstoffeinträge in Gewässer wird aufgrund von schlechter Datengrundlage nicht ausgewertet.

Tabelle 1: Betrachtete Wirkungskategorien und dazu zugeordnete Sachbilanzgrößen

Wirkungskategorie	Datenkategorien der Sachbilanz
Ressourcenbeanspruchung	<i>fossile Energieträger:</i> Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle <i>mineralische Ressourcen:</i> Phosphorerz
Treibhauseffekt	fossiles Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄), Lachgas (N ₂ O)
Versauerung	Schwefeldioxid (SO ₂), Stickstoffoxide, Ammoniak (NH ₃), Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF), Schwefelwasserstoff (H ₂ S)
Eutrophierung	<ul style="list-style-type: none">• <i>terrestrisch:</i> Stickstoffoxide, Ammoniak• <i>aquatisch:</i> N-Verbindungen, P-Verbindungen, CSB
Humantoxizität	<ul style="list-style-type: none">• <i>Krebsrisikopotenzial:</i> luftseitige Emission kanzerogener Schwermetalle und persistente organische Verbindungen (POP)• Quecksilber, luftseitige Emission
Bodenschutz	<ul style="list-style-type: none">• <i>Stoffeinträge in den Boden, repräsentiert durch Einzelparameter (z.B. Blei, Cadmium, PAK)</i>

a) PM₁₀: Staubpartikel <10 µm Durchmesser

Das Ziel am Ende der **Bewertung** lautet, die Optionen zu identifizieren, die sich aus ökologischer Sicht als besser geeignet erweisen. Dazu bedarf es einer Analyse der signifikanten Parameter. Erfahrungsgemäß stehen am Ende einer Sachbilanz und einer Wirkungsabschätzung häufig gegenläufige uneindeutige Ergebnisse (z. B. Vorteile der einen Option in Punkten A und C, Nachteile in Punkt B). Es bedarf somit einer Auswertung mit Blick auf die „Gewichtigkeit“ der Vor- oder Nachteile. Hierzu wird eine verbal-argumentative Bewertungsweise angesetzt, die vom Umweltbundesamt ursprünglich entwickelt wurde und deren Anwendung transparent einsetzbar ist (UBA, 1999). Die zwei Grundelemente der Bewertung lauten:

1. Sind die Unterschiede relevant?

Als Hilfsgröße wird dazu der „spezifische Beitrag“ errechnet, den die eine Option mehr als eine andere zu einer Gesamtumweltlast beiträgt. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Optionen werden auf die Gesamtemissionen in Deutschland bezogen und auf einen Einwohner normiert (Einwohnerdurchschnittswerten, EDW).

2. Ist die Wirkung eher mehr gravierend oder eher weniger gravierend?

Dazu werden die einzelnen Wirkungskategorien in „sehr bedeutend“ bis „wenig bedeutend“ eingeteilt. Grundlage dazu ist die ökologische Gefahr, die von Experten-/Politiker-/Bevölkerungssicht als besonders bedrohend angesehen werden (z.B. Treibhauseffekt, Freisetzung Krebs erzeugender Stoffe) und/oder wie viel Aufwand die Gesellschaft noch zu leisten hat, um die Belastung zu senken und die Schutzziele zu erreichen (Bsp.: Rio-Ziel für Treibhauseffekt).

Diese Methodik wurde bereits mehrfach zur ökobilanziellen Bewertung von Klärschlammabfuhrwegen verwendet (z.B. MUNLV/IFEU, 2001; MUNLV/ISA/IFEU, 2006; Born-Ermel, 2010).

Im Projektkontext wird hier zusätzlich eine Aggregation der untersuchten Umweltindikatoren auf eine dimensionslose Größe (Einindikator) vorgenommen. Dazu werden die normierten Einwohnerwerte den Wirkungskategorien entsprechend gewichtet. Eine detailliertere Beschreibung findet sich in Tabelle 3 am Ende des Berichts. Eine Aggregation ist nach DIN ISO 14040ff. nicht zulässig. Diese wird hier aber angewendet, um die verschiedenen Verfahren direkt miteinander vergleichen zu können.

3 Betrachtete Systeme

In Abschnitt 2.2 wurden die untersuchten Systeme aufgezählt, im Folgenden auch als Szenarien bezeichnet. Die fünf Phosphorrückgewinnungsverfahren setzen dabei an jeweils unterschiedlichen Stellen in der Prozesskette „Abwasserreinigung/ Klärschlammbehandlung“ an und haben jeweils einen anderen Inputstrom: Prozesswasser, Klärschlamm, Klärschlammmasche. Die Bewertung kann sich nicht auf die Verfahren in isolierter Weise beschränken. Vielmehr müssen die Systeme, in welchen die Verfahren eingebettet sind, in ihren abhängigen Stoffströmen modelliert und bewertet werden und allesamt die gleiche Systemgrenze umfassen.

In Abb. 1 ist beispielhaft das PASCH-Verfahrenssystem zur Phosphor-Rückgewinnung mit der zur Grunde gelegten Systemgrenze abgebildet. Dabei ist zu beachten, dass das Fließschema bereits starke Vereinfachungen darstellt. So sind weder Transporte noch Vorprozesse (Energiebereitstellung, Hilfs-/Betriebsstoffe) abgebildet, die in der Bilanzierung jedoch berücksichtigt werden. Im Fließbild sind rechterhand die aus dem System hervorgehenden Nutzen skizziert. Neben den Aufwendungen und Lasten der Systeme selbst werden diese Nutzen eine entscheidende Größe für das Ergebnis bilden.

Die dem jeweiligen System entsprechend äquivalente Phosphormenge wird in Form einer Gutschrift angerechnet, die neben den Herstellungsaufwendungen auch die Schwermetallgehalte in den Mineraldüngern umfasst.

Ebenso werden Gutschriften für erzeugte Energie (z.B. aus der Klärschlammverbrennung und Faulung) erteilt. Auf diese Weise wird zum Ersten der ökologische Nutzen der Verfahren berücksichtigt und andererseits die Nutzengleichheit aller betrachteten Systeme hergestellt.

3.1 Referenzszenario Landwirtschaft

Dieses Referenzszenario dient dazu, die ökobilanziellen Auswirkungen eines direkten Ausbringens des Klärschlammes im Vergleich zu den hier behandelten Verfahren darzustellen. Die Standardroute der Klärschlammbehandlung wird nach der Entwässerung verlassen. Der entwässerte Klärschlamm wird direkt zu Feldern gefahren und dort ausgebracht.

3.2 Referenzszenario Monoverbrennung

Dieses Szenario stellt die Standardroute für die Klärschlammbehandlung dar. Der Überschussschlamm wird auf 3% Trockensubstanz eingedickt, dann zusammen mit dem Primärschlamm gefault, im Nacheindicker auf 5% Trockensubstanz eingedickt, um dann auf 30% Trockensubstanz entwässert zu werden. Im Trockner wird der Trockensubstanz-Gehalt weiter auf 37,7% erhöht. Anschließend erfolgt die Verbrennung im Wirbelschichtofen. Die Aschereste werden deponiert.

3.3 Szenario P-RoC

Das Prinzip folgt einer Phosphor-Abtrennung aus kommunalem Abwasser mittels Kristallisation. Dabei werden Calciumphosphate als wieder verwertbares Produkt generiert. Die Einbindung in ein Modellszenario erfolgt in dieser Weise:

- Innerhalb eines Stoffstrommodells für die Klärschlammbearbeitung wird der Nebenstrom aus den Eindickern und der Entwässerung dem P-Roc-Verfahren zugeführt.
- Außer dem separat abgezweigten Stoffstrom und der durch das Verfahren bedingten Verringerung von Stoffkonzentrationen im Nebenstrom ergibt sich in diesem Szenario keinerlei Veränderung gegenüber dem Standardverbrennungsszenario (Entwässerung, Trocknung, Wirbelschichtverbrennung, Entsorgung der Asche).

3.4 Szenario FIX-Phos

Dieses Verfahren wurde ähnelt dem Vorgegangen, da es Phosphor mittels Kristallisation zu Calciumphosphaten rückgewinnt. Es setzt aber nicht am Neben-

strom an, sondern am eingedickten Überschussschlamm. Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist, dass in der Anlage zuvor eine biologische Phosphor-Elimination eingesetzt wurde.

3.5 Szenario PHOXNAN

Es handelt sich dabei um eine Verfahrenskombination mehrerer Einzelprozesse zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm, die da wären:

- Niederdrucknassoxidation unter saueren Reaktionsbedingungen (LOPROX)
- Eine Filtration mit Nanofiltrationsmembranen
- MAP-Fällung

Input in das Verfahren ist ein auf ca. 10% TS eingedickter (bzw. entwässerter) Klärschlamm. Im Vergleich zur Standardroute entfällt hier ein Eindickungsschritt, die Trocknung und Verbrennung im Wirbelschichtofen. Das LOPROX-Verfahren benötigt Sauerstoff und Schwefelsäure. Der Klärschlamm wird dabei mineralisiert auf ca. 95 % Asche bezogen auf die Trockensubstanz. Von entscheidender Bedeutung ist die bei der Trennung in drei Fraktionen gelenkte Stoffverteilung von Phosphor und Schwermetalle. Nach der MAP-Fällung wird das Filtrat wieder der Kläranlage zugeführt.

Für die Loprox-Asche wird eine Deponierung angerechnet. Aufgrund der Schwermetallentrachtung könnte auch eine stoffliche Nutzung als Mineralstoff in Erwägung gezogen werden. Das Schwermetallkonzentrat wird als Sonderabfall deponiert.

3.6 Szenario PASCH

Dieses Verfahren schließt das Phosphat in der Klärschlammasche durch Salzsäurelaugung auf und gewinnt es durch Extraktion und Fällung. Das System kann hinter jeder Art der Monoverbrennung geschaltet werden und unterscheidet sich vom Referenzszenario der Monoverbrennung nur durch diesen letzten Schritt und den zusätzlichen Nutzen an P-Produkt in Form von CaHPO_4 mit einer Rückgewinnungsrate von über 80 % gegenüber dem Kläranlagenzulauf (Abb. 1).

3.7 Szenario SESAL-Phos

Das SESAL-Phos-Verfahren dockt wie das PASCH-Verfahren an die Klärschlammasche an (Abb. 1). Das Phosphat wird in mehreren Schritten mit Säure und Base eluiert, dabei von den Schwermetallen getrennt und schließlich mit Calciumchlorid-Lösung gefällt.

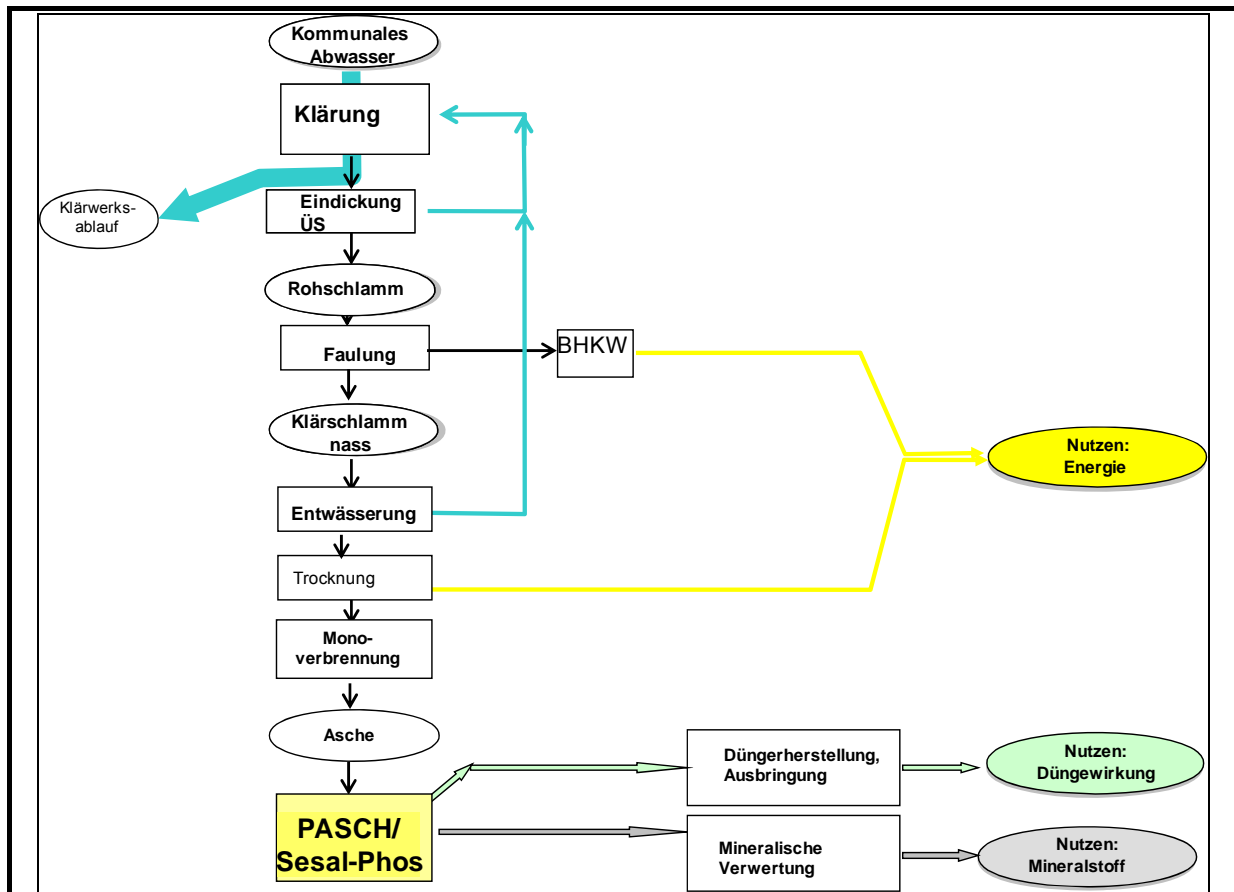


Abb. 1: System und Systemgrenze für die Szenarien PASCH und SESAL-Phos

4 Datenherkunft, Datenqualität und Annahmen

Daten zu den im Zentrum stehenden Verfahren wurden bei den betreffenden Entwicklern abgefragt. Hierbei ist zu erwähnen, dass die aus den Versuchen hervorgehenden Prozessdaten aufgrund des überwiegenden Labormaßstabs mit erheblichen Unsicherheiten verbunden sein können. Es ist zu vermuten, dass Energieaufwand und Einsatz von Betriebsmitteln (z.B. Säuren) in einer späteren Praxisanwendung effizienter ausfallen werden müssen als bei den hier zu Grunde liegenden Versuchsaufbauten.

Für die Modellierung der Gesamtsysteme werden überwiegend aus weiteren Studien des IFEU zur Klärschlamm Entsorgung herangezogen (IFEU/MUNLV, 2001; MUNLV/ISA/IFEU, 2006), z.B. für die Monoverbrennung, wie auch für Vorketten von Strom, Betriebsmittel und Transport.

Die Zusammensetzung des zu behandelnden Klärschlammes hat Auswirkungen auf die Emissionen und Bodeneinträge durch die verschiedenen Szenarien. Tabelle 2 gibt Aufschluss über die Inhaltsstoffe im Rohschlamm (Primärschlamm + Überschussschlamm vor Faulung und Entwässerung).

Tabelle 2: Angenommene Zusammensetzung des Klärschlamm

Inhaltsstoffe	Einheit	Konzentration
Organische Substanz	% (TS)	62,5
Phosphor als P	% (TS)	2,4
Stickstoff als N	% (TS)	5,6
Kalzium als CaO	% (TS)	1,5
Kalium als KCl	% (TS)	3
Magnesium als MgO	% (TS)	0,27
Arsen (As)	mg/kg TS	5
Cadmium (Cd)	mg/kg TS	1,3
Chrom (Cr)	mg/kg TS	25
Blei (Pb)	mg/kg TS	50
Quecksilber (Hg)	mg/kg TS	1,3
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	mg/kg TS	0,5

Im Referenzszenario Landwirtschaft (direktes Ausbringen des Klärschlamm auf den Acker) werden alle Klärschlamm-inhaltsstoffe als Düngeräquivalente berücksichtigt und dem System gutgeschrieben. In den Szenarien mit Phosphorrückgewinnungsverfahren hingegen wird nur der Phosphor aus den Produkten den Systemen gutgeschrieben.

P-Roc-Verfahren

Mit dem P-Roc-Verfahren kann eine höhere Phosphorausbeute erzielt werden, wenn es auf einer Kläranlage mit Bio-P-Elimination betrieben wird. Unter herkömmlicher Fällung gelangen nur 5% des im Phosphor enthaltenen Klärschlamm in den Nebenstrom aus Eindickung und Entwässerung. Mit Bio-P erhöht sich dieser Prozentsatz auf 40%. Dies wird in einer Sensitivitätsberechnung betrachtet. Es wird angenommen, dass alle weiteren Inhaltsstoffe des Klärschlamm dabei nicht verstärkt in den Nebenstrom rückgelöst werden. Weiterhin wird angenommen, dass ökobilanziell gesehen kein Unterschied zwischen einer herkömmlichen Kläranlage und einer mit Bio-P-Elimination besteht. Beim P-Roc-Verfahren bestehen Unsicherheiten bezüglich der Bewertung von Bleieintrag in Boden mit dem Phosphor-Produkt, da Blei im Produkt und Nebenstrom in Labormessungen nicht quantifizierbar war. Für Cadmium wurde die Menge im Produkt durch die Menge im Nebenstrom dividiert und daraus eine Wiederfindungsrate für das Produkt bestimmt. Dieser Wert wurde dann auch auf Blei angewendet. Auch im Falle der Wiederfindungsrate für Cadmium ist aber unklar, wie viel des Cadmiums aus der zur Fällung zugegebenen CSH-Phase und damit nicht aus dem Nebenstrom stammt.

PHOXNAN-Verfahren

Beim PHOXNAN-Verfahren wurde angesetzt, dass 3% des Quecksilbers aus dem Klärschlamm im Zuge des Loprox-Verfahrens in die Abluft gelangt. Es wurde weiterhin angenommen, dass bei der Verbrennung Lachgas in einer Konzentration von 5 mg/m^3 Abluft entsteht im Gegensatz zu 250 mg/m^3 Abluft bei der Wirbelschichtverbrennung. Im Zuge des Loprox-Schrittes wird Wärmeenergie frei. Es ist unklar, ob diese genutzt werden kann. Deshalb werden hier zwei Fälle mit 100%iger Nutzung der Wärme und keiner Nutzung derselben betrachtet. Das spiegelt Anlagen wieder, die auf eine Wärmenutzung optimiert sind bzw. nicht. Beim PHOXNAN-Verfahren ist eine Unsicherheit bezüglich der Bewertung von Blei- und Cadmium-einträge in den Boden gegeben, da für den Neutralisations- und Fällungsschritt keine Daten verfügbar sind. Es wurde angenommen, dass das Blei und Cadmium in diesem Schritt vollständig in die feste Phase übergeht.

PASCH/SESAL-Phos-Verfahren

Beim PASCH- und SESAL-Phos-Verfahren ist eine Trocknung des Produktes nicht mit inbegriffen. Daher wurde angenommen, dass das Produkt in der nassen Form zum Acker transportiert wird. Dies bedeutet eine höhere Aufwendung für diesen Transportschritt.

5 Ergebnisse

5.1 Wirkungsabschätzung

Beispielhaft wird im Folgenden von den ausgewerteten 6 Wirkungskategorien bzw. 11 Indikatoren die Kategorien Treibhauseffekt und Versauerungspotenzial mithilfe von Abb. 2 und Abb. 3 dargestellt.

5.1.1 Treibhauseffekt (Abb. 2):

Die Vorbehandlung des Klärschlammes führt bei allen Verfahren zu einer nahezu gleich hohen Last. Die Monoverbrennung liefert nochmals einen vergleichbaren Beitrag, der aus Lachgasemissionen (N_2O) resultiert. Daher haben Szenarien, die ohne Monoverbrennung auskommen wie das Referenzszenario Landwirtschaft und PHOXNAN, zunächst einen Vorteil. Im ersteren wird das durch Lachgasemissionen vom Acker aus dem Klärschlamm (P-Nutzung) zum Teil wieder konterkariert. Im letzteren hat das Rückgewinnungsverfahren selber einen großen Anteil aufgrund des Stroms, der zur Sauerstoffbereitstellung im Loprox-Verfahren benötigt wird. Weiterhin ist unbekannt, wie hoch die Lachgasemissionen beim Loprox-Verfahren sind. Die hohen Beiträge der Rückgewinnungsverfahren PASCH und SESAL-Phos erklären sich aus den Vorketten für die benötigten Chemikalien. Beim P-Roc-Verfahren ist relativ viel Strom nötig, um den großen Abwasser-Nebenstrom behandeln zu können. Bei den Gutschriften dominieren diejenigen für Strom aus dem BHKW im Zuge des Faulprozesses. Beim PHOXNAN-Verfahren ist aber im Falle von voller Nutzung der entstehenden Wärmeenergie auch die Gutschrift für selbige dominant. Diese fällt

dann weit stärker ins Gewicht als die Einsparung der Herstellung von Phosphordünger.

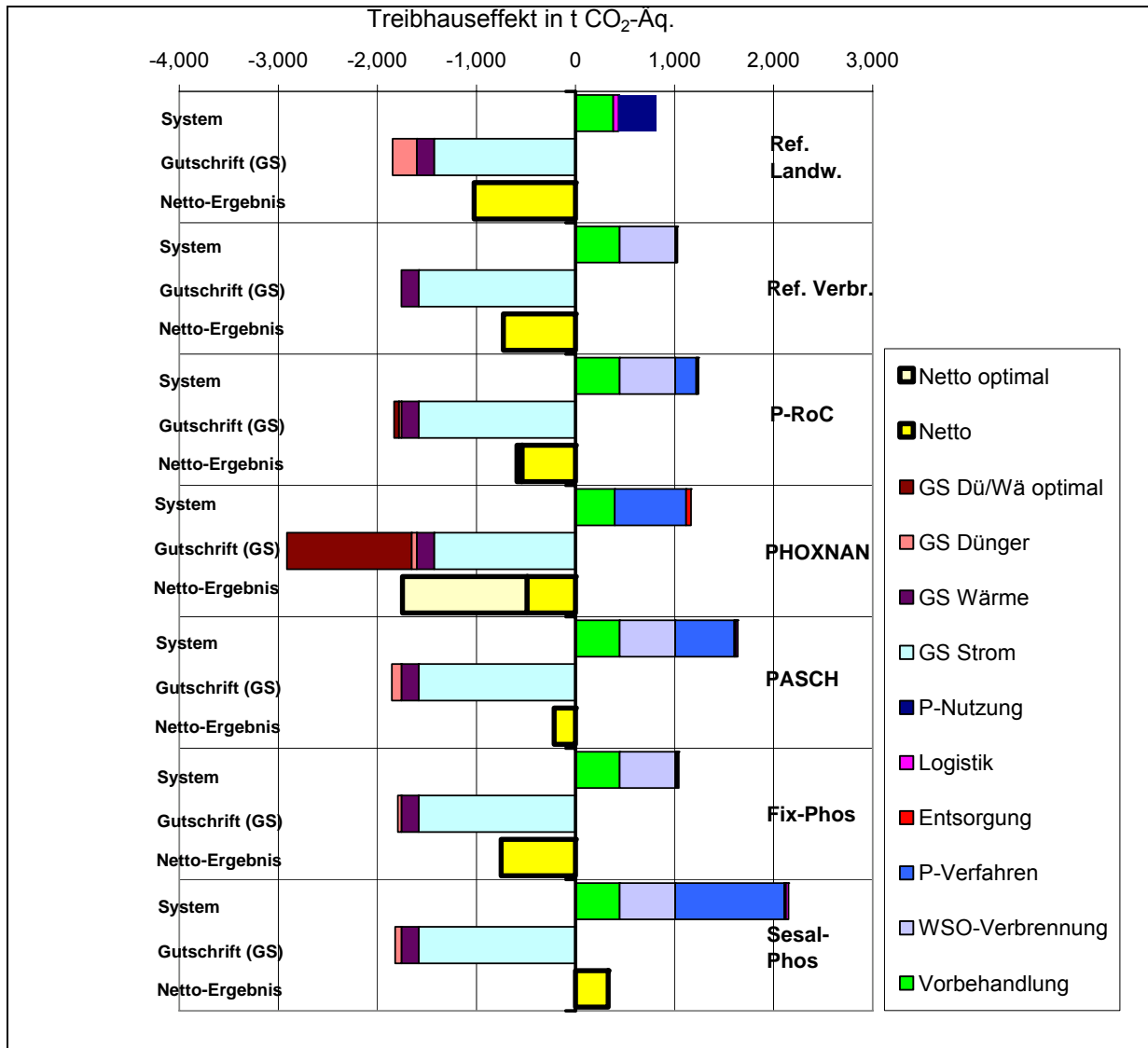


Abb. 2: Wirkungsabschätzung für das Treibhauspotenzial

Lesehilfe zu den Grafiken in Abb. 2 und Abb. 3

Pro Verfahren werden 3 Balken dargestellt. Der oberste Balken zeigt jeweils die Lasten, die durch das Szenario verursacht werden - unterteilt in die Einzelprozessschritte des Szenarios:

- Vorbehandlung: Aufwendungen für die Behandlung des Klärschlammes (Eindickung des Überschussschlammes, Faulung, Entwässerung, ggf. Trocknung, Dekantierung bei PHOXNAN).
- WSO-Verbrennung: Mono-Verbrennung in Wirbelschichtofen für die Varianten, in denen eine solche erfolgt.

- P-Verfahren: Lasten, die durch das eigentliche Phosphorrückgewinnungsverfahren verursacht werden.
- Entsorgung: Behandlung der Rückstände.
- Logistik: Umladen des Klärschlammes, Transport des Klärschlammes oder Produkts zum Acker.
- P-Nutzung: Lasten, die Klärschlamm oder P-Produkt auf dem Acker bewirken.

Der mittlere Balken beziffert die Gutschriften (GS), aufgeteilt nach:

- GS Strom: Gutschrift für Strom, der im Zuge der Faulung über ein BHKW oder bei der Monoverbrennung gewonnen wird.
- GS Wärme: Gutschrift für Wärme, die im Zuge der Faulung über ein BHKW gewonnen wird; diese wird nur zu 20% angerechnet.
- GS Dünger: Gutschrift für Lasten, die mit der Herstellung und Anwendung des substituierten Mineraldüngers einhergehen.
- GS Dü/Wä optimal: Sensitivitäten für den optimalen Fall des P-Roc- und PHOXNAN-Verfahrens. Bei P-Roc kann die Phosphorausbeute durch Bio-P-Fällung in der Kläranlage und damit der substituierte Düngerertrag optimiert werden. Bei PHOXNAN kann die im Verfahren anfallende Wärme genutzt werden anstatt sie wie im Standard abzuführen.

Der dritte Balken stellt die Summe aus den Lasten und den Gutschriften dar (Netto-Wert). Im Falle des optimierten P-Roc- und PHOXNAN-Verfahrens ergibt sich auch ein optimaler Netto-Wert (Netto optimal).

5.1.2 Versauerungspotenzial (Abb. 3)

Es fällt zuerst der große Beitrag des Klärschlammes auf dem Acker im Referenzszenario Landwirtschaft auf. Der Grund dafür sind Ammoniakemissionen aus dem Klärschlamm. Die Phosphorrecyclingsprodukte hingegen verursachen keine solchen Emissionen. Bei den P-Rückgewinnungsverfahren an sich sind im Falle von PASCH und SESAL-Phos wiederum die Vorketten der benötigten Chemikalien die Treiber für den Beitrag zum Versauerungspotenzial. Bei PHOXNAN resultiert der Beitrag zum einen aus der Erzeugung des Stroms, der zur Sauerstoffbereitstellung benötigt wird, und zum anderen aus der Vorkette der benötigten Schwefelsäure. Dies kann durch die Gutschriften (Wärme, Phosphor) nicht wettgemacht werden. Im Loprox-Schritt des PHOXNAN-Verfahrens könnten weitere Schwefeldioxidemissionen auftreten, die vom Abreinigungsgrad abhängen und bislang nicht berücksichtigt werden. Dank der guten Abreinigung ist der Beitrag der Wirbelschichtverbrennung relativ gering. Der Phosphor-Rückgewinnungsrate entsprechend ändert sich die Gutschrift für substituierten Dünger, dessen Herstellung seinerseits mit Beiträgen zum Versauerungspotenzial verbunden ist, mit den Verfahren.

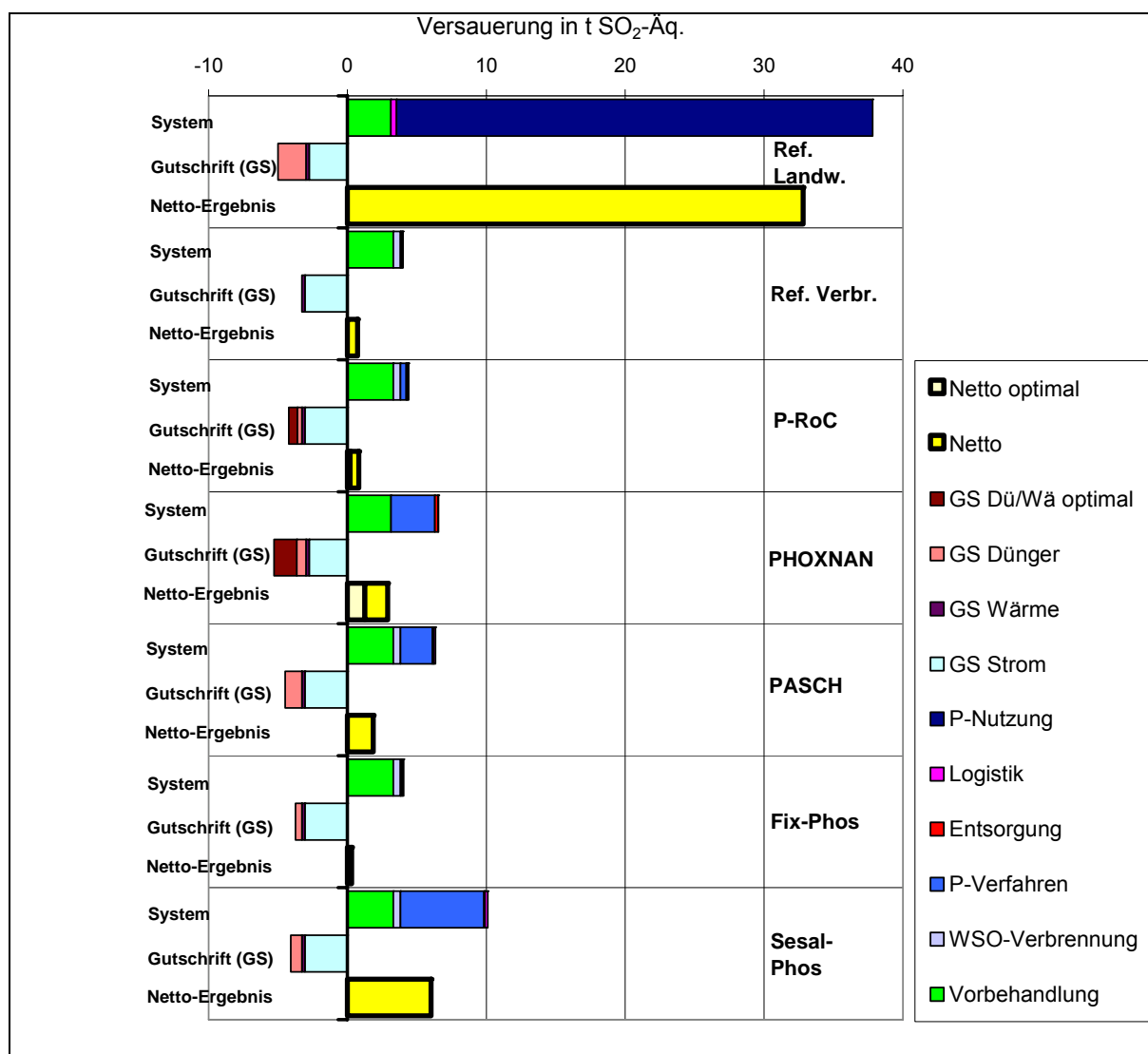


Abb. 3: Wirkungsabschätzung für das Versauerungspotenzial

5.2 Auswertung

5.2.1 Normierung der Wirkungen

Um herauszufinden, ob die Unterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien in bestimmten Wirkungskategorien relevant sind, werden im Folgenden die Wirkungen auf die Umweltlasten normiert, die ein Einwohner bezogen auf die gesamte Volkswirtschaft in Deutschland jährlich verursacht. Das Ergebnis ist eine entsprechende Anzahl an Einwohnerdurchschnittswerten, das heißt die Last des Verfahrens entspricht der Last, die durch die ermittelte Anzahl an Einwohnern verursacht würde.

Die Einwohnerdurchschnittswerte der verschiedenen Szenarien wurden dann miteinander verrechnet, um den Unterschied zwischen den Szenarien herauszubekommen. Das Ergebnis ist in Form eines so genannten „Kacheldiagramms“ dargestellt (Abb. 4). Das jeweils beste Szenario in der jeweiligen Wirkungskategorie

erhält keine Kachel. Eine Kachel entspricht gerundeten 1.000 Einwohnerdurchschnittswerten. Ein Punkt sind <100 und 2 Punkte zwischen 100 und 500 Einwohnerdurchschnittswerten. Je mehr Kacheln ein Szenario hat, desto schlechter ist es in der jeweiligen Wirkungskategorie im Vergleich zum besten Szenario. Für die Wirkungskategorie PAK-Einträge in Boden liegen keine Normierungswerte vor. Relevant sind die Unterschiede nur im Falle von mehreren Kacheln.

Die Farbcodierung spiegelt die ökologische Priorisierung verschiedener Indikatoren, wie sie durch das UBA vorgenommen wurde, wider. Phosphor-Ressourcen werden hier nicht nach diesem Verfahren gewichtet (siehe Erläuterung unter Abb. 4)

5.2.2 Rückschlüsse aus der Normierung/Rangbildung

Folgende Schlüsse können aus diesen Ergebnissen gezogen werden:

Die Unterschiede zwischen den Szenarien sind vor allem für die Kategorien Phosphor-Ressourcen und Bleieinträge in den Boden relevant, gefolgt mit Abstand von Cadmium-Einträgen in den Boden und Quecksilberemissionen in die Luft sowie aquatischer Eutrophierung und Versauerung. Bleieinträge in den Boden haben nach der ökologischen Bewertung des UBA wie die aquatische Eutrophierung eine mittlere Bedeutung, wohingegen allen übrigen oben genannten Kategorien mit Ausnahme der Phosphor-Ressourcen eine hohe Bedeutung zukommt. Phosphor-Ressourcen werden hier nicht gewichtet. Für alle weiteren Kategorien wie Treibhauseffekt, fossile Ressourcen und Krebsrisikopotenzial liegen die Unterschiede zwischen den Szenarien bei weniger als 200 Einwohnerdurchschnittswerten. Diese Unterschiede sind irrelevant, da in den Szenarien Klärschlämme von 100.000 Einwohnergleichheitswerten behandelt werden.

Mit den Phosphorrückgewinnungs-Szenarien kann die Phosphor-Ressource nicht ganz so quantitativ wie über direkte Klärschlammasbringung genutzt werden, aber in relevant besserer Menge als mit der Monoverbrennung ohne Phosphorrückgewinnung. Gleichzeitig können die relevanten Schadstoffeinträge in den Boden bzw. die Abgabe von versauerndem Ammoniak in die Luft, wie sie im Falle der direkten Klärschlammasbringung auftreten, deutlich vermindert bzw. verhindert werden. Im Vergleich zur Monoverbrennung ohne Phosphorrückgewinnung treten in den Phosphorrückgewinnungsszenarien keine relevanten Zusatzbelastungen auf. Ausnahme hiervon sind Quecksilberemissionen in Luft beim PASCH- und SESAL-Phos-Verfahren und aquatische Eutrophierung beim PHOXNAN-Verfahren.

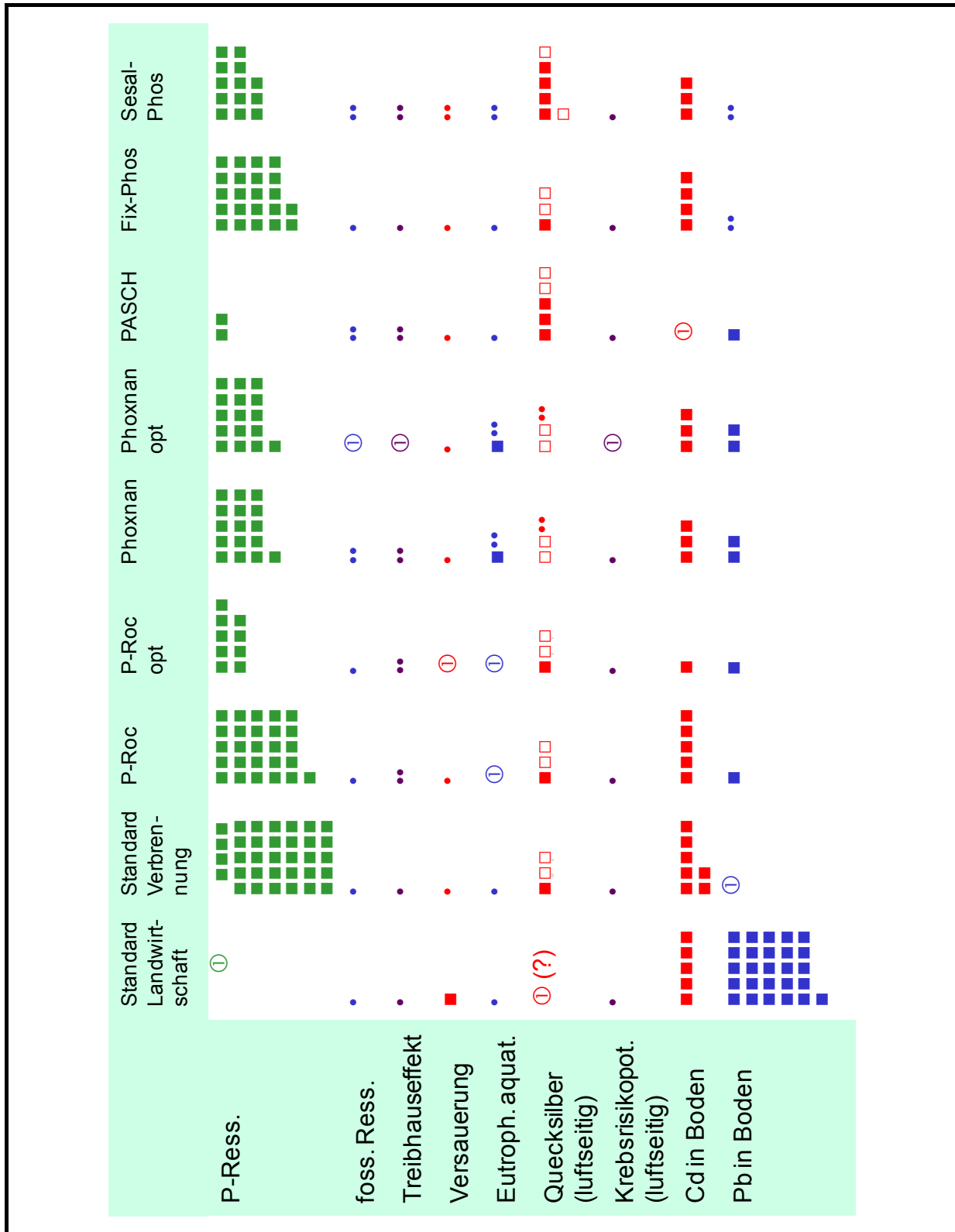


Abb. 4: Ergebnisse für normierte Unterschiede zwischen den Verfahren in Einwohnerdurchschnittswerten.

Erläuterung: ① = bestes Szenario; ■ = 1.000 Einwohnerdurchschnittswerte schlechter als beste Option; • = < 100 Einwohnerdurchschnittswerte schlechter als beste Option; •• = 100-500 Einwohnerdurchschnittswerte schlechter als beste Option. Ökologische Bedeutung der Indikatoren nach UBA: Blau = mittel; rot = hoch; violett = sehr hoch; grün = nicht gewichtet.

Ein Vergleich zwischen den Szenarien P-Roc, FIX-Phos, PHOXNAN, PASCH und SESAL-Phos führt zu differenzierten Ergebnissen:

Die Phosphor-Ausbeuten sind mit den Szenarien, die Asche aufschließen (PASCH und SESAL-Phos) am größten und damit ist auch die Einsparung von Cadmumeintrag in den Boden, der mit den Mineraldüngern eingetragen würde, am größten. Im Gegenzug ist bei diesen Verfahren der Einsatz von Chemikalien nötig, deren Vorkette sich erhöhend auf fossilen Ressourcenbedarf, Treibhauspotenzial, Versauerungspotenzial und Emissionen von Quecksilber in die Luft auswirkt. Beim Krebsrisikopotenzial ist das PASCH-Szenario dank der höheren Düngergutschrift besser als die anderen Szenarien, wohingegen im SESAL-Phos-Szenario eine Chemikalienvorkette dem entgegen wirkt. Das PASCH-Szenario liegt in allen Kategorien vor dem SESAL-Phos-Szenario.

Das PHOXNAN-Szenario schneidet in der aquatischen Eutrophierung und bedingt in der Versauerung und fossilem Ressourcenverbrauch nicht so gut ab. Hier macht sich im Falle der aquatischen Eutrophierung die Rückführung des Filtrats inklusive Stickstoff in die Kläranlage bemerkbar und im Falle von Versauerung und fossilem Ressourcenverbrauch der hohe Strombedarf für die Sauerstoffbereitstellung im Loprox-Schritt. Bei den weiteren Kategorien liegt PHOXNAN im Bereich des FIX-Phos- und P-Roc-Szenarios und hat im Falle der Nutzung der im Loprox-Schritt erzeugten Wärme insbesondere in den Kategorien fossiler Ressourcenverbrauch, Treibhauspotenzial und Krebsrisikopotenzial Verbesserungsmöglichkeiten.

Die Verfahren mit dem geringsten Materialeinsatz sind P-Roc und FIX-Phos. Das P-Roc-Verfahren bedingt einen höheren Stromeinsatz, weil die zu behandelnde Abwassermenge größer als die im FIX-Phos-Verfahren behandelte Überschussschlammmenge ist. Deshalb schneidet das P-Roc-Szenario in den meisten Kategorien etwas schlechter ab als das FIX-Phos-Szenario. Im P-Roc-Szenario kann aber im Betrieb nach einer Bio-P-Fällung potenziell mehr Phosphor rückgewonnen werden. Die Anwendung des FIX-Phos-Verfahrens setzt hingegen eine Bio-P-Fällung voraus.

5.2.3 Bildung eines Ein-Indikators

Das Bilden eines Ein-Indikators ist nach DIN ISO 14040ff. nicht zulässig. Hierfür ist eine Gewichtung verschiedener Indikatoren nötig, die subjektiv ist und vom jeweiligen Kontext der Studie abhängt. Um die verschiedenen Klärschlammbehandlungsverfahren mit und ohne Phosphorrückgewinnung direkt vergleichen zu können, wird hier aber ein Vorschlag für einen Einindikator angewendet.

Die Methodik basiert auf der Gewichtung des UBA. Indikatoren mit sehr geringer Bedeutung erhalten die Zahl 1 zugewiesen, die mit geringer Bedeutung den doppelten Wert 2, die mit mittlerer Bedeutung wieder den doppelten Wert 4. Indikatoren mit hoher Bedeutung bekommen konsequenterweise die Zahl 8 und solche mit sehr großer Bedeutung 16. Über die Zahlen der betrachteten Indikatoren wird die Summe gebildet. Der Quotient aus der Zahl eines einzelnen Indikators und der Summe aller Zahlen liefert den Wichtungsfaktor für den jeweiligen Indikator.

Auf diese Weise werden die normierten Werte (aus Abb. 4) der betrachteten Indikatoren aufsummiert (Tabelle 3). Nicht mit eingehen können die PAK-Einträge in den Boden und die Phosphor-Ressourcen.

Tabelle 3: Methodik zur Bestimmung des Ein-Indikators

Indikator	UBA Ranking	Zahlen	Wichtung
Fossile Energieressourcen	C	4	5%
Treibhauseffekt	A	16	21%
Versauerung	B	8	11%
Eutrophierung, aquatisch	C	4	5%
Eutrophierung, terrestrisch	B	8	11%
Krebsrisikopotenzial (luftseitige Emissionen)	A	16	21
Quecksilberemissionen	B	8	11%
Cadmiumeintrag in Böden	B	8	11%
Bleieintrag in Böden	C	4	5%
Summe		76	100%

Die Ergebnisse sind in Abb. 5 anteilig für die verschiedenen Indikatoren (ohne Phosphor) dargestellt. Eine Einbeziehung der Phosphorressourcen würde gleichfalls eine Wichtung dieses Indikators erfordern, dies ist jedoch aufgrund der generellen Schwierigkeit der Einstufung von mineralischen Ressourcen problematisch¹. Als Lösung für die hier erforderliche Auswertung werden die Ergebnisse aus Abb. 5 (oben) auch auf den Grad der Phosphatressourcenschonung bezogen. Dies wird in Abb. 5 (unten) dargestellt. Hierbei kann das Referenzsystem der Monoverbrennung ohne P-Rückgewinnung jedoch nicht bewertet werden, weil es mit einer Phosphatressourcenschonung von Null zu einer Null-Division führen würde.

In dieser Darstellung liegt das Verfahren PASCH vor den anderen. Dagegen weist das nicht-optimierte P-Roc-Verfahren bei dieser Bewertungsweise das vergleichsweise schlechteste Ergebnis auf.

In der Studie wurden die Gewichtungsfaktoren in Tabelle 3 variiert. Statt einer Verdopplung mit jeder höheren Bedeutungsstufe, wurde einmal um den Wert eins erhöht (1 bis 5) und einmal verzehnfacht (1, 10, 100, 1.000, 10.000), wodurch sich die Wichtung entsprechend verändert. Die Reihenfolge bleibt in beiden Fällen nahezu unverändert. Das Referenzszenario mit direktem Ausbringen des Klärschlammes ist von dieser Variation am stärksten betroffen: im ersten Fall verschlechtert es sich deutlich, weil der Bleieintrag in den Boden dann stärker ins Gewicht fällt, im zweiten Fall verbessert es seine Position.

¹ Das UBA (1999) hatte mineralische Ressourcen wegen der Unzerstörbarkeit der Elemente stets als gering bedeutsam eingestuft, was gerade bei Phosphor zu paradoxen Einstufungen führen kann.

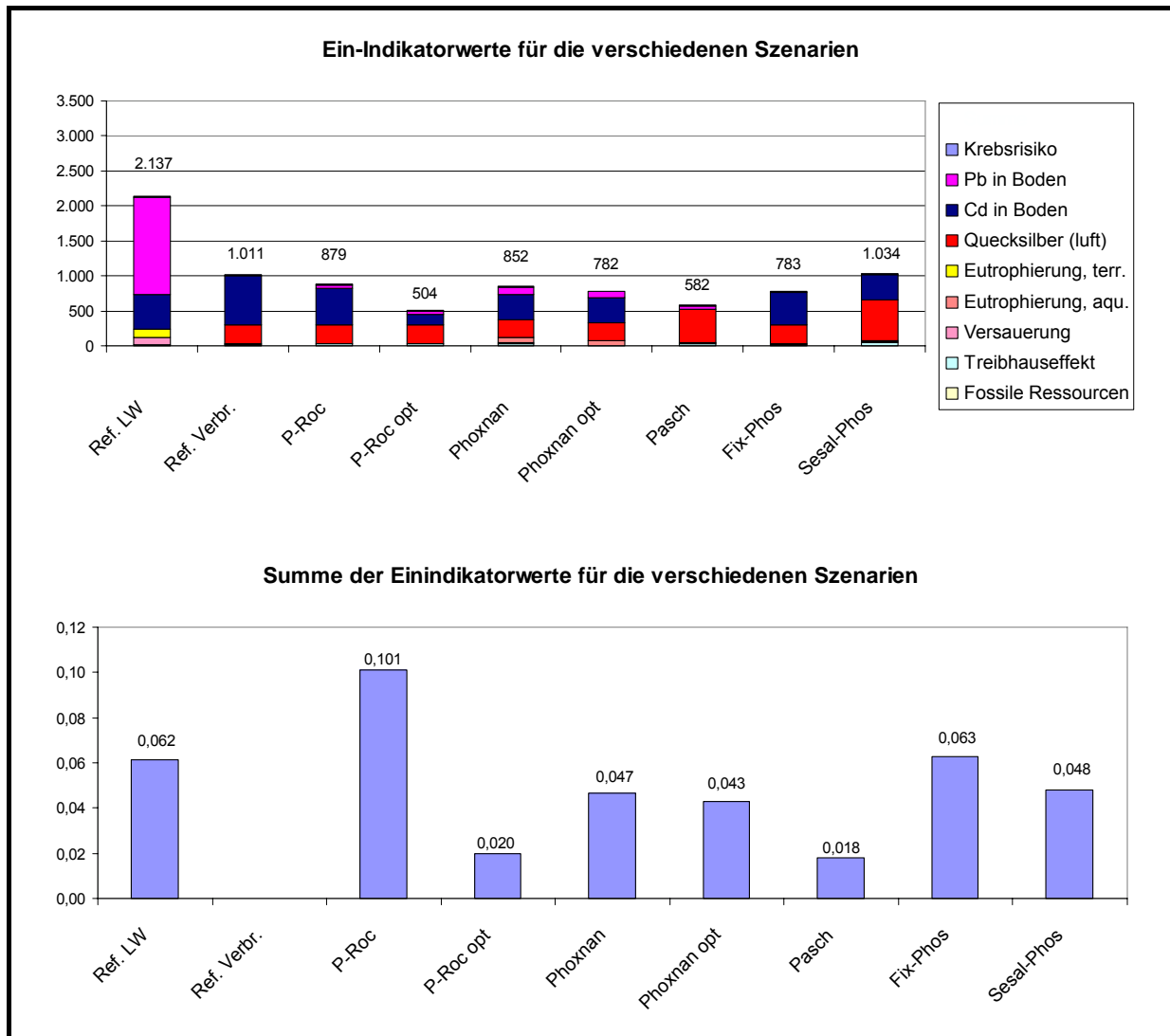


Abb. 5: Einindikatorwerte, aufgeteilt nach den beitragenden Indikatoren (oben) und Summenergebnisse aggregiert auf einen Ein-Indikator (unten)

5.3 Diskussion zu Sensitivität und Sensibilität der Daten

In der vorliegenden Untersuchung mussten aufgrund der oft unzureichend durch Praxiserfahrungen belastbaren Daten vielfach Annahmen getroffen werden, bzw. Daten verwendet werden, die nicht unbedingt mit den späteren großtechnischen Praxisbetrieb adäquat abbilden. Solche Daten sind z.B.:

- die genauen Abreinigungswerte der Schwermetalle
- Quecksilberemissionen (auch aus Sekundärquellen wie z.B. Salzsäure-Produktion)
- Energieeffizienzen
- die effektive Verfügbarkeit des Phosphors in den erzeugten Produkten

All diese Faktoren haben einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf das Ergebnis, weswegen dieses in seiner Genauigkeit durchaus zu hinterfragen ist. Was die Richtungssicherheit betrifft, so ist jedoch festzustellen, dass Verfahren, die bereits günstig abschneiden wie PASCH durch den vermutlich eher konservativ angesetzten Bedarf an Säure, die Möglichkeit, das Verfahren hier zu optimieren, eher zu einer Trendverbesserung führen würde.

Die Energieeffizienzen lassen sicher noch einige Spielräume erwarten. Anhand der hier verwendeten Daten sind grobe Fehleinschätzungen jedoch eher nicht zu erwarten. Insgesamt beruhen die Hauptparameter der Bewertung auf vergleichsweise stabilen Werten, sodass eine weitgehende Richtungssicherheit unterstellt werden kann.

6 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Wie die Studie zeigt, ist mit einer Phosphorrückgewinnung die Nutzung einer relevanten Phosphormenge möglich, die die relevanten Nachteile der direkten Ausbringung des Klärschlammes auf den Acker ausschließt (insbesondere Schadstoffeinträge in den Boden und Versauerung). Gleichzeitig führen diese Verfahren aber zu keinen erheblichen zusätzlichen Umweltbelastungen. Eine Ausnahme hiervon bilden in zwei Fällen die Quecksilberemissionen, in einem Fall die aquatische Eutrophierung. In beiden Fälle lassen sich die Nachteile jedoch durch Verfahrensoptimierung abschwächen.

Die Verfahren, die Klärschlammaschen bearbeiten, bringen tendenziell etwas größere Lasten mit, liefern jedoch auch höhere Phosphorrückgewinnungsraten. Für Verfahren auf der Ebene der Abwasserreinigung (P-RoC) liegen diese Potenziale niedriger, halten für die nachgelagerte Schlammbehandlung jedoch alle Möglichkeiten offen (Mitverbrennung, stoffliche Nutzung). Ein Verfahren wie PASCH ist dagegen an eine Monoverbrennung gebunden. Um flexibel zu sein, ist es wichtig, alle untersuchten Verfahren zu berücksichtigen.

Setzt man unter den verschiedenen Umweltwirkungskategorien die Schonung der Ressource Phosphor ganz in den Vordergrund, dann werden Verfahren und Verfahrenskombinationen wie die Beschriebenen insgesamt ökologisch verträgliche Standards für die zukünftige Bewirtschaftung von Phosphatquellen wie Klärschlamm setzen.

Literatur

Born-Ermel: Grundsatzstudie zum Stand der Technik bei der Klärschlammbehandlung; in Kooperation mit IFEU und der TU Darmstadt; im Auftrag der Stadtentwässerungen der Städte Augsburg Frankfurt, Karlsruhe Mannheim, München, Stuttgart, Zürich; 2010.

MUNLV/IFEU: „Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen. Bestandsaufnahme der Abfallströme der Kläranlagenabfälle in NRW 1998. Ökobilanz der Entsorgungsverfahren für Kläranlagenabfälle in NRW. Umweltrelevanz der Klärschlamm Entsorgung in NRW, Studie des ifeu-Institutes Heidelberg für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, Düsseldorf 2001 (= Berichte zur Umwelt, Bereich Abfall, Band 5).

MUNLV/ISA/IFEU: Klärschlamm Entsorgung: Eine Bestandsaufnahme; Hg.: Pinnekamp, J., Friedrich, H.; FIW-Verlag; Aachen 2006

UBA - Umweltbundesamt: Bewertung in Ökobilanzen. Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043, Berlin (= UBA Texte 92/99).

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Biologe Horst Fehrenbach
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg
E-Mail: horst.fehrenbach@ifeu.de