

Studie
**„Thermische Klärschlammmentsorgung in Deutschland sowie
Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Asche“**

zum Forschungsvorhaben:

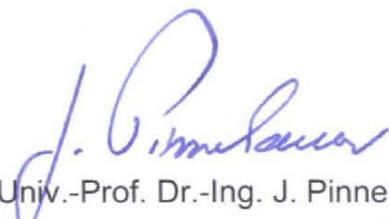
„Phosphorrecycling – Rückgewinnung von industriell bzw.
landwirtschaftlich verwertbaren Phosphorverbindungen aus
Abwasser und Klärschlamm“

AZ IV - 9 – 042 423

für das



Aachen, 31. Mai 2007



Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
(Projektleiter)

Inhalt

Verzeichnis der Tabellen	IV
Verzeichnis der Bilder.....	V
Zusammenfassung.....	1
1 Einleitung	2
2 Stand der thermischen Klärschlammensorgung in Deutschland sowie Szenarien zur Phosphorrückgewinnung	2
3 Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche	4
3.1 Allgemeines	4
3.2 BioCon-Verfahren.....	5
3.3 SEPHOS-Verfahren.....	6
3.4 Verfahren zur thermochemischen Behandlung von Klärschlammaschen im EU-Projekt SUSAN	7
3.5 Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche des Projektes PASCH	9
4 Ökologische Aspekte einer Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche ..	11
4.1 Einleitung und Datenbasis.....	11
4.2 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	15
4.3 Bewertung	16
5 Literatur	18

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 0.1:	Übersicht der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Asche	1
Tabelle 2.1:	Szenarien zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche von Monoverbrennungsanlagen für Deutschland	3

Verzeichnis der Bilder

Bild 3.1:	Verfahrensschema des BioCon-Verfahrens (nach HULTMAN et al., 2001).....	5
Bild 3.2:	SEPHOS-Verfahren (nach Cornel und Schaum, 2005).....	6
Bild 3.3:	Erweitertes SEPHOS-Verfahren (nach CORNEL und SCHAUM, 2005).....	7
Bild 3.4:	Verfahrensschema zur thermochemischen Behandlung von Klärschlamm- asche (nach ADAM et al., 2007).....	8
Bild 3.5:	Vereinfachtes Verfahrensschema zur Phosphorrückgewinnung im F+E- Projekt PASCH	10
Bild 4.1:	Schema für das Szenario L1 „Landwirtschaftliche Verwertung“, (Abbildung 5-2 aus PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006).....	12
Bild 4.2:	Schema für das Szenario MoV1 „Monoverbrennung“, (Abbildung 5-5 aus PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006).....	13
Bild 4.3:	Schema für das Szenario MoV3 „Monoverbrennung mit P-Rückgewinnung aus der Asche“, (Abbildung 5-7 aus PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)	14
Bild 4.4:	Gesamtschau der Unterschiede zwischen den Szenarien zur Klär- schlammmentsorgung, skaliert nach spezifischem Beitrag in Einwohner- durchschnittswerten (EDW) (Tabelle 5-10 aus PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006).....	17

Zusammenfassung

Derzeit werden in Deutschland jährlich ca. 0,5 Mio. Mg TS Klärschlamm in kommunalen Monoverbrennungsanlagen entsorgt. Dies entspricht etwa einem Fünftel der anfallenden 2,26 Mio. Mg TS Klärschlamm. Die maximale technische Kapazität dieser Anlagen beträgt jährlich ca. 0,6 Mio. Mg TS. Würden 85 % des gesamten Klärschlammmanfalls einer Monoverbrennung zugeführt und im Anschluss eine Phosphorrückgewinnung aus der Asche durchgeführt, könnten 55.800 Mg P/a recycelt werden. Dies sind 47 % der jährlich eingesetzten Menge an Mineraldünger.

In der Tabelle 0.1 sind die derzeit bekannten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm-Asche und ihr Entwicklungsstand zusammengestellt.

Tabelle 0.1: Übersicht der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Asche

Verfahrensbezeichnung	Endprodukt	Entwicklungsstand 2007
Bio-Con-Verfahren	Phosphorsäure	Erprobung im Labor, seit einigen Jahren keine Weiterentwicklung
Sephos-Verfahren	Aluminiumphosphat; Calciumphosphat	wird derzeit erforscht; Labor-, Technikumsmaßstab
SUSAN-Verfahren	Phosphordünger	Pilotanlage ab 2007; (jährlich 18.000 Mg Dünger)
PASCH-Verfahren	Aluminiumphosphat; Magnesium-/ Calciumphosphat	wird derzeit erforscht; Technikumsmaßstab

Es zeigt sich sehr deutlich, dass die Technik sich derzeit im Entwicklungszustand befindet. Auf gesicherte Erfahrungen aus einem großtechnischen Betrieb kann nicht zurückgegriffen werden. Eine Ökobilanz aus dem Jahr 2005 bewertet die Klärschlammverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus der Asche verglichen mit der direkten Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft als vorteilhafter, sofern der Phosphorressourcenverknappung ein hoher Stellenwert eingeräumt wird. Eine Phosphorrückgewinnung ist damit im Zuge der Neuordnung der Klärschlamm Entsorgung in Deutschland als Option für die Zukunft zu prüfen, unabhängig von der Verschärfung von Grenzwerten für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung.

1 Einleitung

In dieser Studie werden die derzeitigen Kapazitäten der Klärschlammmonoverbrennung sowie das daraus resultierende Potential für eine Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammasche aufgezeigt. Des Weiteren erfolgt eine Hochrechnung der Recyclingmengen für den Fall einer Ausweitung der Monoverbrennung. Die derzeit bekannten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche werden beschrieben und damit zusammenhängende ökologischer Aspekte dargestellt. Eine ökonomische Bewertung eines Verfahrens zur Phosphorrückgewinnung aus Asche ist in Teil F dieses Abschlussberichtes enthalten.

2 Stand der thermischen Klärschlammentsorgung in Deutschland sowie Szenarien zur Phosphorrückgewinnung

Wie in Teil A, Kapitel 1 beschrieben wurde, sind bei einer Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche die größten Recyclingpotentiale vorhanden. Im Folgenden wird daher auf Basis statistischer Daten zum Stand der thermischen Klärschlammentsorgung abgeschätzt, wie groß die derzeit rückgewinnbare Phosphormenge aus der Asche der Klärschlammmonoverbrennung ist und inwieweit sich diese Menge steigern ließe.

Im Jahr 2004 fielen in Deutschland ca. 2,26 Mio. Mg TS Klärschlamm an (DESTATIS, 2006), von denen ca. 483.500 Mg TS in kommunalen Monoverbrennungsanlagen entsorgt wurden (UBA, 2004). Die genehmigte Kapazität dieser Anlagen beträgt ca. 685.000 Mg TS/ a, jedoch ist nur eine maximale technische Kapazität von 613.000 Mg TS/ a verfügbar (HANßEN und ROTHSPRACK, 2005). Die Anlagenauslastung liegt somit bei ca. 79 %.

Klärschlamm besitzt einen durchschnittlichen Glührückstand von 52 % (LOLL und GLASENAPP, 2003), der Phosphoranteil in Klärschlammaschen aus Monoverbrennungsanlagen beträgt ca. 6,2 % (WIEBUSCH und SEYFRIED, 1998).

Bei einer angenommenen Rückgewinnungsquote von 90 % kann die rückgewinnbare Phosphormenge für die im Jahr 2004 in Monoverbrennungsanlagen entsorgten Klärschlämme mit 14.000 Mg P/ a angenommen werden (Tabelle 2.1). Bezogen auf den Inlandsabsatz von Phosphatdüngemitteln im Wirtschaftsjahr 2005/ 2006 können mit dieser rückgewonnenen Menge 12 % der Phosphatdüngemittel ersetzt werden (Tabelle 2.1). Würden die Monoverbrennungsanlagen zu 100 % ausgelastet, könnten 17.800 Mg P/a zurückgewonnen und somit 15 % substituiert werden (Tabelle 2.1). Eine Substitutionspotential von 47 % bzw. eine rückgewinnbare Phosphormenge von 55.800 Mg P/ a würden sich ergeben, wenn 85 % des Klärschlammfalls in Deutschland einer Monoverbrennung zugeführt werden (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Szenarien zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche von Monoverbrennungsanlagen für Deutschland

	Klärschlammmenge zur Monoverbrennung [Mg TS/ a]	rückgewinnbare Phosphormenge [Mg P/ a]	Substitutionspotential* [%]
Klärschlammmonoverbrennung (Stand 2004)	483.500	14.000	12
100 % Auslastung der vorhandenen Klärschlammmonoverbrennungsanlagen	613.000	17.800	15
Monoverbrennung von 85 % des Klärschlammfalls in Deutschland	1.922.000	55.800	47
* bezogen auf Inlandsabsatz von Phosphatdüngemitteln im Wirtschaftsjahr 2005/2006			

3 Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

3.1 Allgemeines

Durch den Verbrennungsprozess werden organische Schadstoffe und endokrine Substanzen in den Klärschlammaschen weitestgehend zerstört. Phosphor verbleibt vollständig als Rückstand in der Asche. Der Phosphoranteil in der Asche liegt zwischen 1,5 und 10 % Phosphor, der Mittelwert untersuchter Klärschlammaschen beträgt 6,2 % Phosphor (WIEBUSCH und SEYFRIED, 1998). Die Schwermetalle Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn und insbesondere Hg liegen in der Regel in der Asche nur als Neben- oder Spurenkomponenten vor. Eine direkte Verwendung der Klärschlammasche als Landwirtschaftsdünger kann dabei problematisch sein, da es zu Überschreitungen dieser Elemente bezüglich der in der Düngemittelverordnung festgelegten Grenzwerte kommen kann. Daher wird eine weitere Behandlung erforderlich (KLEY et al., 2005).

Klärschlammaschen müssen zur Rücklösung von Phosphorverbindungen mit Säure aufgeschlossen werden. Diese Prozesse sind verfahrenstechnisch komplex und sehr aufwendig.

Zu beachten ist, dass unter dem Aspekt einer späteren Phosphorrückgewinnung aus der Asche nur die Mono-Verbrennung von Klärschlamm eine sinnvolle Entsorgungsoption ist. Wird der Klärschlamm in bestehenden Kohlekraftwerken, Müllverbrennungsanlagen oder Zementwerken mitverbrannt, ist der P-Gehalt in der Asche so niedrig, dass eine Rückgewinnung nicht durchgeführt werden kann. (BUER und MONTAG, 2001)

3.2 BioCon-Verfahren

Im BioCon-Verfahren (Bild 3.1) werden Klärschlammaschen behandelt, die von Kläranlagen mit Eisen- oder Aluminiumsalzfällung stammen.

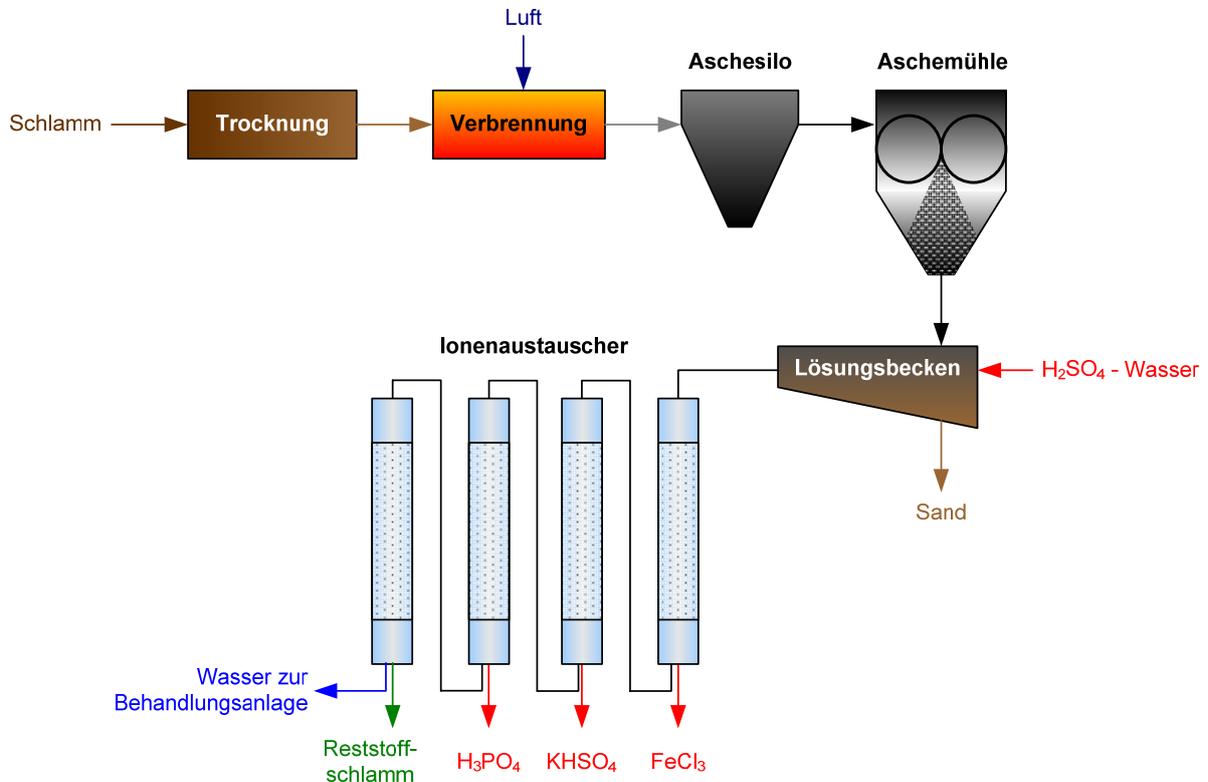


Bild 3.1: Verfahrensschema des BioCon-Verfahrens (nach HULTMAN et al., 2001)

Nach der Klärschlamm-trocknung und -verbrennung wird die aufgeschlossene Asche einem Schwefelsäurebad zugeführt. Phosphate und die meisten Metalle gehen in Lösung. Nachfolgend wird die Lösung über mehrere Ionenaustauscher geführt. Es wird zuerst Eisenchlorid, dann Kaliumhydrogensulfat und schließlich Phosphorsäure gewonnen. In der Lösung verbleiben die nichtflüchtigen Schwermetalle.

Der Einsatz des Eisen- bzw. Aluminiumfällmittels zur Phosphorelimination in der Kläranlage sollte auf das erforderliche Minimum reduziert werden, da der Chemikalienbedarf für das BioCon-Verfahren linear mit dem Fällmittelgehalt des Schlammes bzw. der Asche steigt. Die Fällmittel (FeCl₃, siehe Bild 3.1) können zurückgewonnen und dann wieder in der Abwasserreinigung eingesetzt und so im Kreislauf geführt werden (CORNEL, 2002).

Das Verfahren wurde im Technikumsmaßstab in Aalborg (Dänemark) erprobt (DWA-ARBEITSGRUPPE AK-1.1, 2003).

3.3 SEPHOS-Verfahren

Mit dem SEPHOS (Sequential Precipitation of Phosphorus)-Verfahren (Bild 3.2) erfolgt die Phosphorrückgewinnung als Aluminium- bzw. Calciumphosphat. Das Verfahren wurde im Labormaßstab erforscht und ermöglicht eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen, die von Kläranlagen mit Eisen- oder Aluminiumsalzfällung stammen.

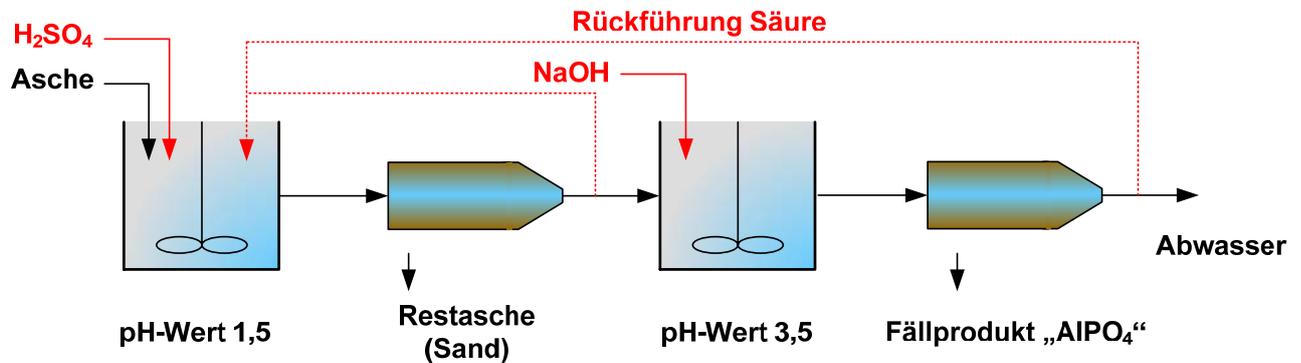


Bild 3.2: SEPHOS-Verfahren (nach CORNEL und SCHAUM, 2005)

Die Asche wird mit Schwefelsäure versetzt bis der pH-Wert auf $pH < 1,5$ abgesenkt ist. Der Phosphor wird so nahezu vollständig rückgelöst. Der Einsatz von Salzsäure oder Salpetersäure als Elutionsmittel erzielt hier geringere Rücklösegrade. Auch die in der Asche gebundenen (Schwer-) Metalle gehen zu einem großen Teil in Lösung.

In einem nächsten Schritt erfolgt die Abtrennung der flüssigen Phase. Das Filtrat wird stufenweise mit Natronlauge auf einen pH-Wert von ca. 3 bis 4 angehoben wodurch Aluminiumphosphat ausgefällt wird, das mittels Zentrifuge von der flüssigen Phase getrennt und abgezogen wird. Untersuchungen haben gezeigt, dass das Fällprodukt Bestandteile von Schwefel und Natrium aufweist. Dies ist auf die Verwendung der Schwefelsäure zur Eluierung sowie der Natronlauge zur pH-Wert-Anhebung zurückzuführen und kann bei einer Verfahrensoptimierung reduziert werden. Die Schwermetallbelastung des Fällprodukts ist um 70 bis 90 % geringer als die der Klärschlammasche (CORNEL und SCHAUM, 2005). Das Aluminiumphosphat kann als Rohstoff der phosphorverarbeitenden Industrie angedient werden.

Eine Ergänzung zusätzlicher Verfahrenstechnik für das Produkt $AlPO_4$ ermöglicht die Gewinnung von Calciumphosphat (Bild 3.3).

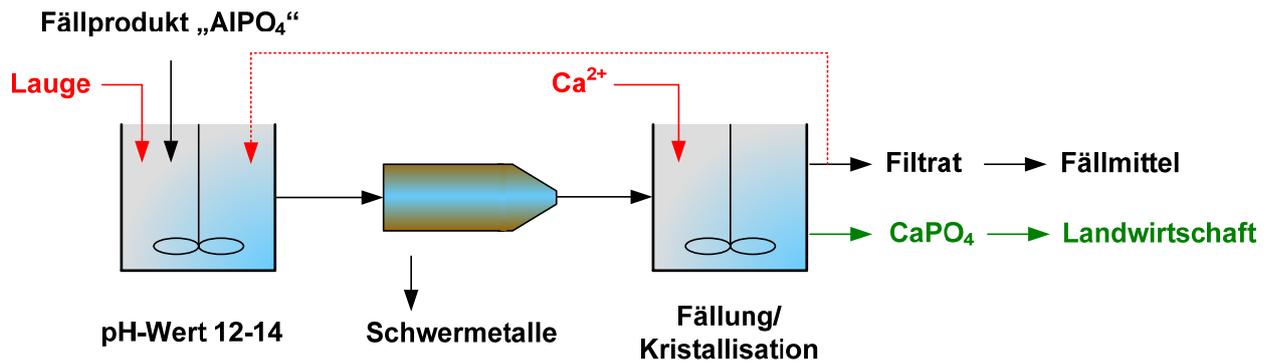


Bild 3.3: Erweitertes SEPHOS-Verfahren (nach CORNEL und SCHAUM, 2005)

Das Fällprodukt (AlPO₄) wird hierzu mit einem alkalischen Elutionsmittel bei einem pH-Wert von pH = 12 bis 14 gelaugt, so dass Aluminium und Phosphor in Lösung gehen. Die Schwermetallverunreinigungen des Aluminiumphosphates werden unter diesen Bedingungen nicht rückgelöst und verbleiben im Fällschlammrest. Das Schlammwassergemisch wird zentrifugiert und die Schwermetalle somit abgetrennt. Dem Zentrat wird Calcium zugesetzt, so dass Calciumphosphat ausfällt. Das Aluminium verbleibt in der Lösung, die als Fällmittel in der Abwasserbehandlung eingesetzt werden kann. (CORNEL und SCHAUM, 2005)

Ob das erzeugte Calciumphosphat direkt landwirtschaftlich verwertet werden kann, ist umstritten. Gefällte Calciumphosphate ähneln in ihrer ackerbaulichen Effizienz den nicht sonderlich gut pflanzenverfügbaren Rohphosphaten und nicht dem wasserlöslichen Ca(H₂PO₄)₂ (RÖMER, 2005).

3.4 Verfahren zur thermochemischen Behandlung von Klärschlammaschen im EU-Projekt SUSAN

Das Verfahren zur thermochemischen Behandlung von Klärschlammaschen zu Phosphordüngern befindet sich derzeit im Entwicklungsstadium. Erste erfolgreiche Untersuchungen wurden dazu von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in einem UFOPLAN-Projekt durchgeführt. Die Weiterentwicklung des Verfahrens erfolgt durch ein internationales Projektteam im EU-Projekt SUSAN (Sustainable and Safe Re-use of Municipal Sewage Sludge for Nutrient Recovery) von November 2005 bis Oktober 2008 (ADAM et al., 2007).

Die thermische Behandlung von Klärschlammaschen zielt darauf ab, die Schwermetalle durch Verdampfung aus der Asche zu entfernen, da erhöhte Schwermetallgehalte eine direkte Verwendung der Aschen in der Landwirtschaft verhindern, sowie die Phosphate in eine pflanzenverfügbare Form zu überführen. In Bild 3.4 ist das Prinzip der thermochemischen Behandlung dargestellt. (KLEY et al., 2005)

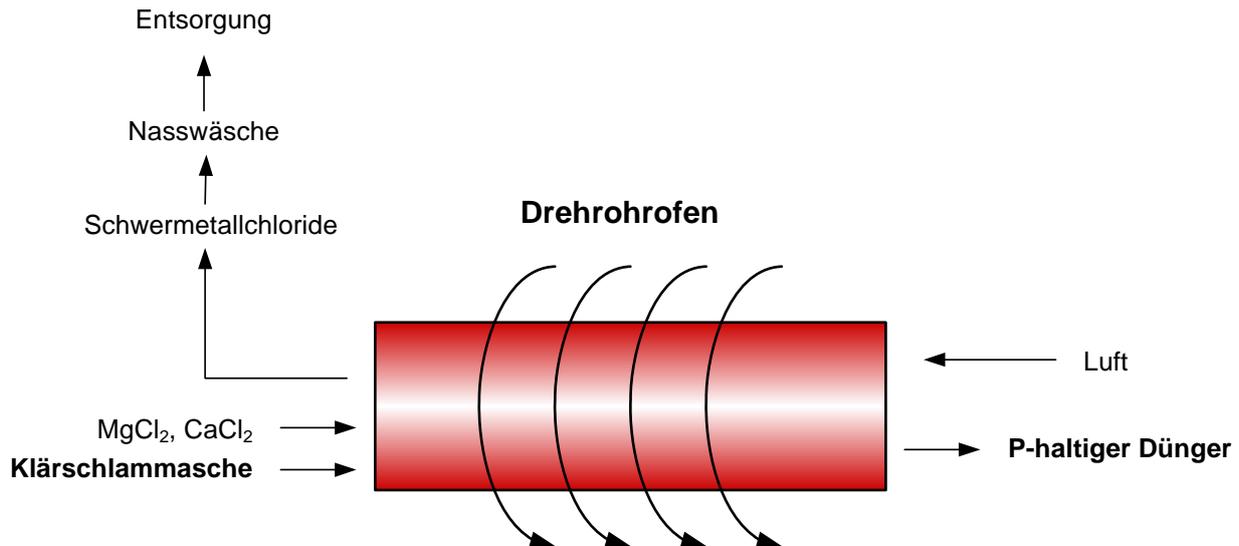


Bild 3.4: Verfahrensschema zur thermochemischen Behandlung von Klärschlamm-Asche (nach ADAM et al., 2007)

Zunächst wird die phosphathaltige Klärschlamm-Asche mit Calciumchlorid (CaCl_2) und/ oder Magnesiumchlorid (MgCl_2) versetzt. Diese werden in destilliertem Wasser gelöst, mit der Asche vermischt und so ein Wassergehalt im Ausgangsstoff von ca. 30 % eingestellt. Das Gemisch wird anschließend der thermischen Behandlung zugeführt. In geschlossenen Systemen wie z. B. Drehrohrföfen werden bei Temperaturen zwischen 850 und 1.000 °C die Schwermetalle in die entsprechenden Chloride überführt und verdampft. Das mit Schwermetallen und Chloriden angereicherte Gemisch wird über den Gaspfad ausgeschleust und die Schadstoffe über einen Nasswäscher abgeschieden und entsorgt. (ADAM et al., 2007, KLEY et al., 2005)

Eine weitgehende Entfrachtung der Asche von den Schwermetallen Cadmium, Kupfer, Blei sowie Zink von > 90 %, für Molybdän > 80 % und Zinn > 70 % ist durch das Verfahren möglich. Eine Chlorzugabe von 50 – 100 g Cl/ kg Asche ist bei ca. 1.000 °C Behandlungstemperatur notwendig, um im Produkt die Schwermetallgrenzwerte der Düngeverordnung einzuhalten. (ADAM et al., 2007)

In Gegenwart von Eisenoxiden sind As-, Cr- und Ni-Chloride nur eingeschränkt beständig und lassen sich somit nicht in nennenswerten Größenordnungen durch MgCl_2 -Donatoren entfernen. Daher muss für eine quantitative Entfernung von Arsen, Chrom und Nickel aus der Asche zunächst durch Chlorgasdosierung (statt der Zugabe von Magnesiumchlorid) eine Cl_2 -haltige Atmosphäre erzeugt werden, in der auch das Eisenoxid weitgehend in Eisenchlorid umgeformt werden kann. (KLEY et al., 2005)

Durch diesen Prozess werden die in der Klärschlamm-Asche vorliegenden Phosphate in pflanzenverfügbare Magnesiumphosphate überführt. Die Zitronensäurelöslichkeit des Phosphors wird von 30 – 50 % in der Rohasche auf bis zu 100 % im behandelten Produkt

erhöht. Der P-Gehalt der Produkte beträgt durchschnittlich etwa 9 %. Erste Topfversuche zur Pflanzenverfügbarkeit zeigten etwas geringere Erträge als konventionelle Düngemittel. (ADAM et al., 2007, SUSAN, 2007, KLEY et al., 2005)

Eine Technikumsanlage befindet sich im Betrieb. In der zweiten Hälfte des Jahres 2007 ist geplant, dass in Eferding (Österreich) eine Pilotanlage den Probetrieb aufnehmen soll, die jährlich 18.000 Mg Mehrnährstoffdünger produziert (ASHDEC, 2007). Detailfragen dieser Verfahrenstechnik können dann beantwortet werden, beispielsweise hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit der Anlagenteile und zu den ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Reaktionsgase bzw. der entstehenden schadstoffhaltigen Waschwässern.

3.5 Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche des Projektes PASCH

Im F+E-Projekt PASCH (Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm) erforscht ein Projektverbund der RWTH Aachen, der FH Aachen und der ATEMIS GmbH einen Ansatz zur Rückgewinnung aus Klärschlammverbrennungaschen im Technikumsmaßstab. Das Verfahren basiert auf den Vorarbeiten des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, die in Teil C dieses Abschlussberichtes beschrieben sind.

Da Rückgewinnungsverfahren naturgemäß umso effizienter sind, je höher der Phosphorgehalt der Ausgangssubstanz ist, wird in einem ersten Ansatz angestrebt, eine phosphorangereicherte bzw. metallabgereicherte Fraktion aus den Aschen zu generieren. Hierzu werden verschiedene aufbereitungstechnische Maßnahmen sowie ggf. eine thermische Nachbehandlung der Asche erforscht (Bild 3.5). Die in der Asche enthaltenen Schwermetalle können durch die Aschenaufbereitung jedoch nicht vollständig ausgeschleust werden.

Der nächste Schritt der Phosphorrückgewinnung ist die Lösung des Phosphors aus der Asche durch einen Säureaufschluss (Bild 3.5). Um möglichst den gesamten Phosphor aus der Asche in Lösung zu bringen, muss eine ca. 7 %-ige Salzsäurelösung bei etwa 60 Minuten Reaktionszeit und Raumtemperatur verwendet werden. Hierdurch gehen allerdings auch die in der Asche enthaltenen Metalle in Lösung. Um am Ende des Prozesses einen möglichst schwermetallarmen Sekundärrohstoff erhalten zu können, müssen diese Substanzen aus der Aufschlusslösung entfernt werden. Hierzu wird eine mehrstufige Flüssig-Flüssig-Extraktion mit Re-Extraktion sowie ggf. der Einsatz einer selektiven Fällung erprobt. Als Extraktionsmittel wird derzeit eine Mischung aus Alamine 336[®] und Tributylphosphat in einer Kerosinverdünnung eingesetzt. Zuletzt muss das gelöste Phosphat durch die Zugabe geeigneter Fällmittel in einen unlöslichen Zustand überführt und aus der Lösung abgetrennt werden. Damit der Phosphor im Produkt in pflanzenverfügbarer Form vorliegt, werden als Fällmittel Magnesiumverbindungen eingesetzt (Bild 3.5).

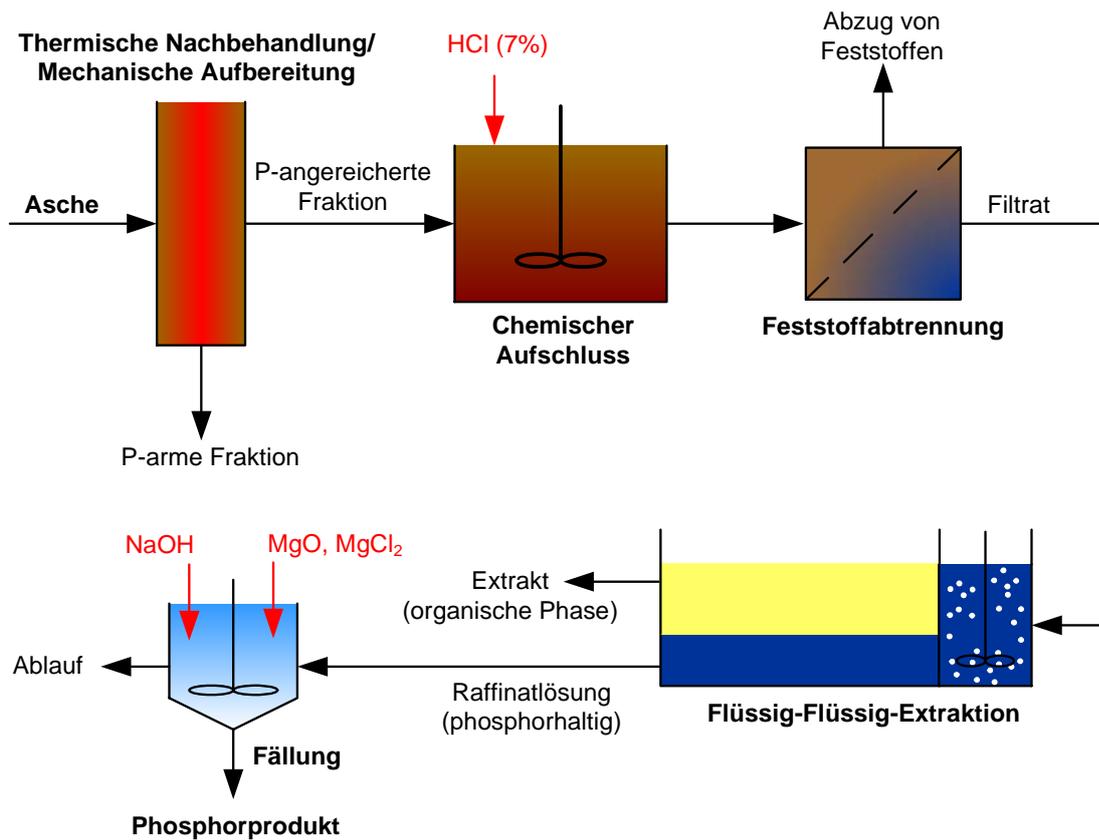


Bild 3.5: Vereinfachtes Verfahrensschema zur Phosphorrückgewinnung im F+E-Projekt PASCH

Alternativ zum nasschemischen Aufschluss der Aschen wird die Abreicherung von Schwermetallen durch fraktioniertes Bioleaching erforscht. Mit Hilfe von Mikroorganismen werden Schwermetalle aus der Asche herausgelöst und gleichzeitig in einer anderen Fraktion Phosphorsalze aus der Asche separiert, um sie der landwirtschaftlichen Nutzung zuführen zu können.

4 Ökologische Aspekte einer Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

4.1 Einleitung und Datenbasis

Vor dem Hintergrund der Neuordnung der Entsorgungspraxis für kommunale Klärschlämme im Spannungsfeld der Phosphaterzressourcenschonung ist die Frage nach der ökologischen Bewertung der Verfahrenskette Klärschlamm Entsorgung und Phosphorrückgewinnung zu beantworten. Das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu-Institut) hat bereits in den 1990er Jahren Systemanalysen im Bereich der Klärschlamm Entsorgung durchgeführt und sich seitdem kontinuierlich mit dieser Thematik beschäftigt. Zuletzt wurde im Jahr 2006 eine vergleichende Bewertung verschiedener Entsorgungsoptionen für kommunalen Klärschlamm angefertigt (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006). In diese Analyse (DIN ES ISO 14041 ff sowie in Anlehnung an die Bewertungsmethode des Umweltbundesamtes) sind ebenfalls Aspekte der Ressourcenschonung eingeflossen. Auf der Basis von Forschungsergebnissen zur Phosphorrückgewinnung konnte eine erste Abschätzung der ökologischen Auswirkungen einer Phosphorrückgewinnung im Kontext der Klärschlamm Entsorgung vorgenommen werden. Es liegen damit Orientierung gebende Vergleichsdaten u. a. zu den ökologischen Auswirkungen der noch häufig praktizierten landwirtschaftlichen Verwertung (L1, Bild 4.1) sowie einer Klärschlamm Monoverbrennung (MoV1, Bild 4.2) und einer Monoverbrennung mit nachfolgender Phosphorrückgewinnung (MoV3, Bild 4.3) aus den Verbrennungsrückständen vor. Insgesamt wurden 15 Varianten der Klärschlamm Entsorgung bewertet, beispielsweise die Verwertung in der Landwirtschaft bzw. im Landschaftsbau sowie die Entsorgung in Müllverbrennungsanlagen oder Zementwerken.

Für die Entsorgungsvariante mit Phosphorrückgewinnung wurde von einer Rückgewinnungsquote von 80 % des in der Asche enthaltenen Phosphors ausgegangen. Der Prozessaufwand an Strom und Chemikalien wurde berücksichtigt. Als relevante Schwermetalle wurde der Verbleib von Blei und Cadmium während des Recyclingprozesses betrachtet. Diese sind bezogen auf die Gehalte in der Asche zu 50 % bzw. 13 % im Sekundärphosphorprodukt enthalten, das der Substitution von P-Dünger dienen soll. (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)

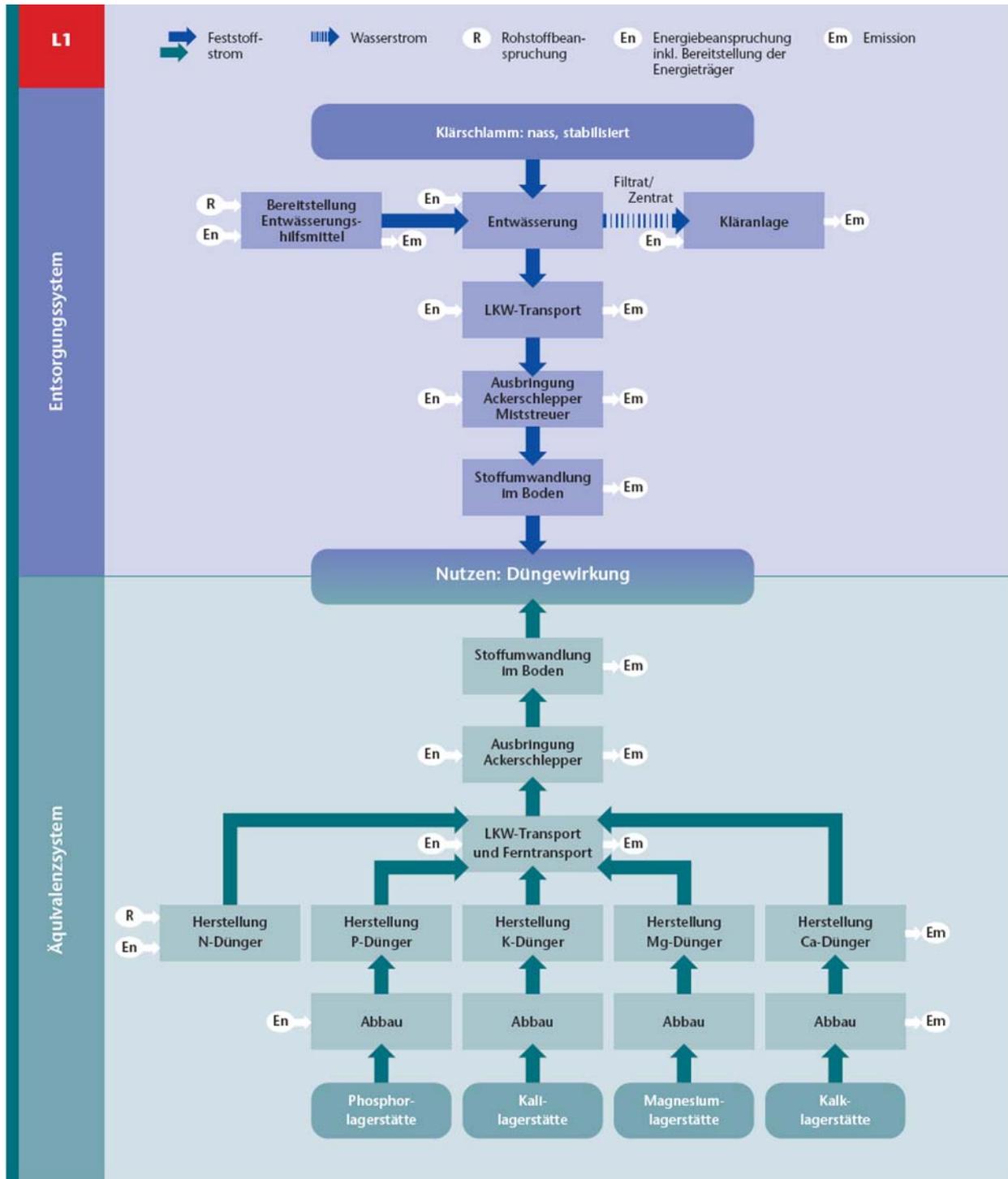


Bild 4.1: Schema für das Szenario L1 „Landwirtschaftliche Verwertung“, (Abbildung 5-2 aus PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)

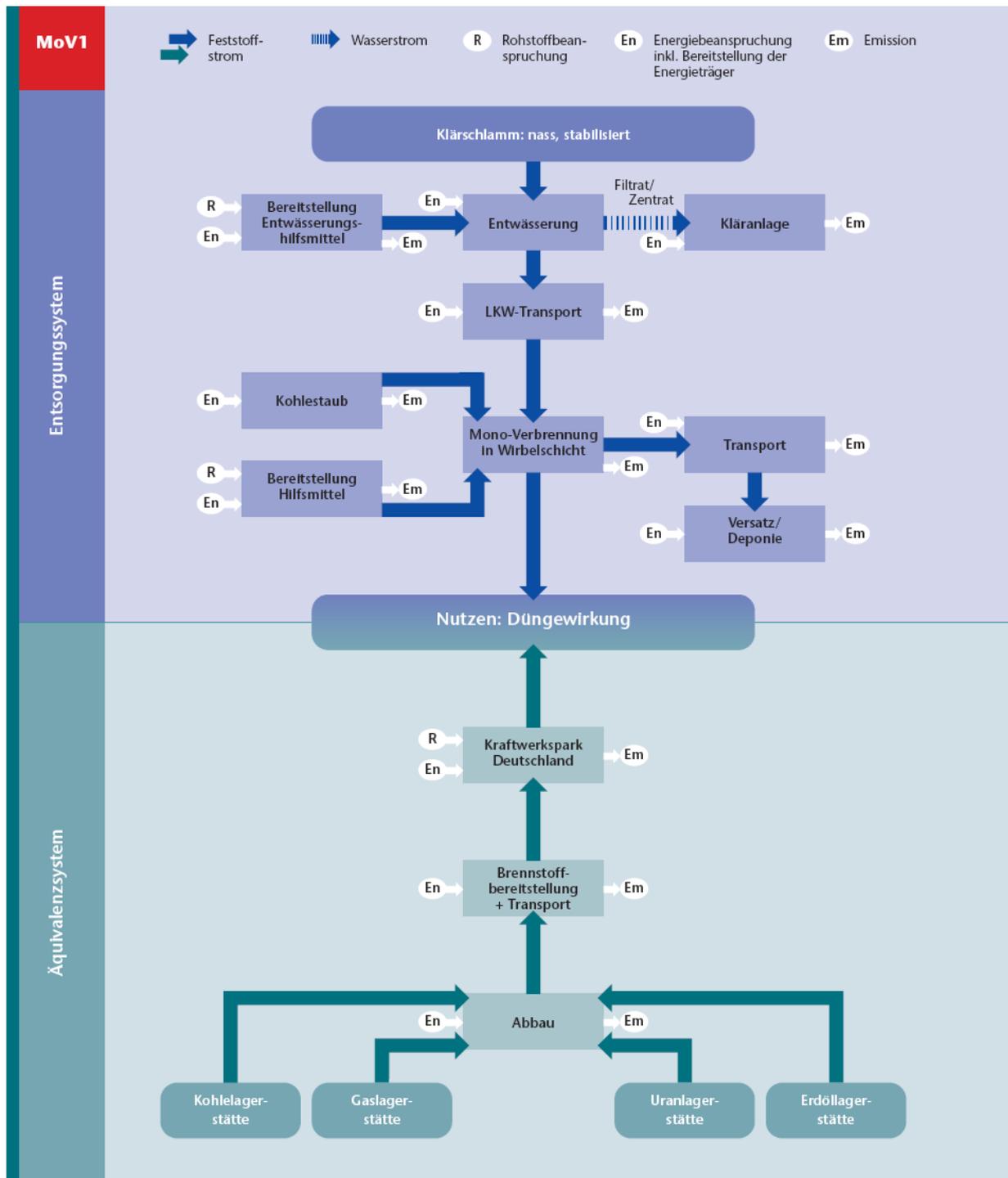


Bild 4.2: Schema für das Szenario MoV1 „Monoverbrennung“, (Abbildung 5-5 aus PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)

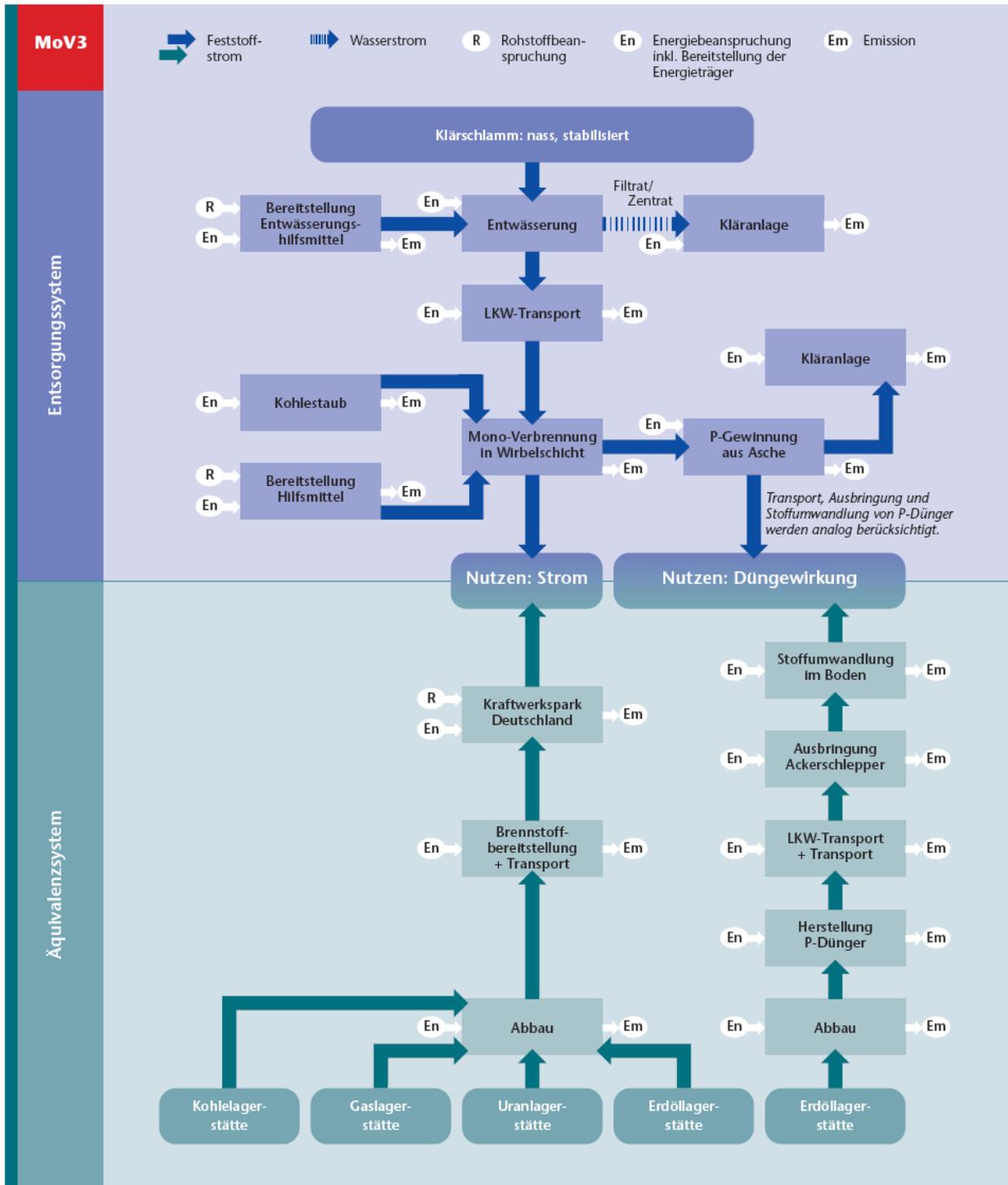


Bild 4.3: Schema für das Szenario MoV3 „Monoverbrennung mit P-Rückgewinnung aus der Asche“, (Abbildung 5-7 aus PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)

4.2 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Studie können wie folgt für die Szenarien landwirtschaftliche Verwertung (L1), Klärschlammmonoverbrennung (MoV1) und Monoverbrennung mit nachfolgender Phosphorrückgewinnung aus den Verbrennungsrückständen (MoV3) zusammengefasst werden. (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)

- Bei der Beanspruchung fossiler Ressourcen ist die Variante L1 mit 0,4 GJ/ Mg TR naturgemäß deutlich weniger energieintensiv als die Varianten der Monoverbrennung. Bei diesen wiederum ist MoV3 (8 GJ/ Mg TR) schlechter zu bewerten als das Basisszenario MoV1 (ca. 4 GJ/ Mg TR). Dies ist auf den zusätzlichen Aufwand an Energie und Betriebsmitteln zurückzuführen, der für die Phosphorrückgewinnung spezifisch höher ist als bei der primären Phosphorgewinnung aus Rohphosphat. Allerdings können 200 kg Phosphaterz je Mg Klärschlamm-trockenmasse eingespart werden, nahezu ebensoviel wie bei der landwirtschaftlichen Verwertung (208 kg/ Mg TR). Diesen Angaben liegt jeweils eine vollständige Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors zugrunde, die für das Produkt aus der Asche noch nicht nachgewiesen wurde und für den Klärschlamm umstritten ist.
- In der Kategorie Treibhauseffekt zeigt sich insgesamt, dass die Monoverbrennung schlechter abschneidet als andere Entsorgungsoptionen. Die Szenarien MoV1 und MoV3 weisen eine Belastung der Umwelt von ca. 900 bzw. 1.260 kg CO₂-Äq./ Mg TR auf. Die landwirtschaftliche Verwertung weist mit einem Saldo von 95 kg CO₂-Äq./ Mg TR einen deutlich niedrigeren Beitrag zum Treibhauseffekt auf.
- Hinsichtlich des Versauerungspotentials zeigt sich erneut eine Nachteiligkeit des Szenarios MoV3 gegenüber MoV1. Bei Integration einer Phosphorrückgewinnung aus der Asche entsteht eine Umweltbelastung von ca. 5 kg SO₂-Äq./ Mg TR, eine Monoverbrennung ohne P-Rückgewinnung verursacht nahezu keine SO₂-Emissionen (Saldo 0,423 kg SO₂-Äq./ Mg TR). Das Szenario L1 trägt mit einem Saldo von 11 kg SO₂-Äq./ Mg TR – hauptsächlich verursacht durch Ammoniakemissionen – mehr also doppelt soviel zur Versauerung bei wie die Monoverbrennung einschließlich Phosphorrückgewinnung aus der Asche.
- Bei Bewertung der aquatischen Eutrophierung ergeben sich kaum Differenzen zwischen den Szenarien.
- Beim Krebsrisikopotential als Indikator für die Humantoxizität weist das Szenario MoV3 mit Phosphorrückgewinnung eine **Umweltentlastung** von 8,3 mg As-Äq/ Mg TR auf, bei nahezu ausgeglichenem Saldo in Szenario MoV1. Das Szenario L1 entlastet die Umwelt etwas geringer als MoV3 (7,62 mg As-Äq/ Mg TR). Die Monoverbrennung belastet die Umwelt nur gering mit Quecksilber, da eine gute Rauchgasreinigung vorausgesetzt werden kann und sich Lasten und Gutschriften nahezu ausgleichen. Die diskutierten Szenarien verursachen

eine Quecksilberbelastung von 1,33 mg Hg/ Mg TR (L1), 0,3 mg Hg/ Mg TR (MoV1) bzw. 2 mg Hg/ Mg TR (MoV3).

- Mit dem Sekundärphosphorprodukt können Schadstoffe in den Boden eingetragen werden. Das als relevant bestimmte Blei wird bei Aufbringung eines Produktes aus der Phosphorrückgewinnung aus Asche (Gutschrift 0,265 g Pb/ Mg TR) deutlich weniger in die Umwelt eingebracht als bei der Klärschlammdüngung (Belastungssaldo 89,83 g Pb/ Mg TR). Hervorzuheben ist die Reduzierung der Umweltbelastung mit Cadmium infolge einer Phosphorrückgewinnung aus der Asche. Etwa 1,5 g Cd/ Mg TR werden bei Anwendung des Szenarios MoV3 weniger in den Boden eingetragen. In Szenario MoV1 ist der Cadmiumsaldo ausgeglichen (kein Eintrag und keine Einsparung). Die Variante L1 führt zu einer Entlastung von 0,4 g Cd/ Mg TR.

4.3 Bewertung

Basis der Ökobilanzen für die Szenarien mit Phosphorrückgewinnung waren labor- und halbertechnische Versuche. Die hieraus gewonnenen und in der ökologischen Bewertung verwendeten Daten sind lediglich als eine erste Abschätzung anzusehen. Naturgemäß ist eine solche Datenbasis mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, insbesondere im Vergleich zu den betrachteten großtechnischen Entsorgungsoptionen.

Im Treibhauseffekt weist die Phosphorrückgewinnung aus der Asche von allen modellierten Varianten das schlechteste Ergebnis auf (Bild 4.4). Besonders positiv gegenüber den anderen Optionen fallen die nahezu vollständige Rückgewinnung des Phosphors sowie die effizienteste Reduzierung des Schadstoffeintrages in den Boden aus. (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)

Die Nutzung des Phosphorgehaltes des Klärschlammes über eine landwirtschaftliche Klärschlammverwertung wird nur für Klärschlämme mit hohen und gut pflanzenverfügbaren Phosphatgehalten bei gleichzeitig niedrigem Schadstoffgehalt empfohlen. (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)

Insgesamt bewertet das ifeu-Institut mit seiner Ökobilanz die Phosphorrückgewinnung nach einer Monoverbrennung verglichen mit der direkten Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft als vorteilhafter, sofern der Phosphorressourcenverknappung ein hoher Stellenwert eingeräumt wird. (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)

Als Ergebnis ist damit festzuhalten, dass im Kontext der zukünftigen Strategien der Klärschlamm Entsorgung der Phosphorrückgewinnung weiterhin Beachtung zu schenken ist. Je nach Einstufung der Relevanz der Ressourcenverknappung haben die durch die Rückgewinnungsverfahren für andere Kategorien resultierenden Mehrbelastungen eine ökologisch untergeordnete Bedeutung.

5 Literatur

- ADAM, C., KLEY, G., SIMON, F.-G., LEHMANN, A. (2007): Recovery of nutrients from sewage sludge – Results of the European research-project SUSAN. In: Filibeli, A., Sanin, F. D., Ayol, A., Sanin, S. L. (Hrsg.): Proceedings of IWA Congress “Facing Sludge Diversities: Challenges, Risks and Opportunities. Antalya, 28. – 30. März 2007, ISBN 978-975-441-238-3
- ASHDEC (2007): ASHDEC Umwelt AG, Anlagen. <http://www.ashdec.com/m04.htm> (Zugriff 17.04.2007)
- BUER, T.; MONTAG, D. (2001): Gewinnung von Phosphat und anderen Nährstoffen aus Klärschlamm: Techniken und Wirtschaftlichkeit. In: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes. KTBL-Schrift 404. Darmstadt 2002.
- CORNEL, P. (2002): Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammaschen. In: WIEMER, K.; KERN, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung VI. Eigenverlag Witzenhausen-Institut.
- CORNEL, P.; SCHAUM, C. (2005): Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm. In: Rückgewinnung von Nährstoffen aus Abwasser und Klärschlamm und Reduzierung der Rückbelastung - Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 184. 80. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium 13.10.2005. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH
- DESTATIS (2006): Umwelt - Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung. Statistisches Bundesamt, Fachserie 19 Reihe 2.1, Wiesbaden 2006
- DWA-ARBEITSGRUPPE AK-1.1 (2003): Phosphorrückgewinnung. KA – Abwasser, Abfall 2003 (50) Nr. 6
- HANßEN, H., ROTHSPRACK, J. (2005): Endet eine preiswerte Versorgung für Klärschlamm Mitte 2005?. In: Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Band 198, 38. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 09.-11.03.2005 in Aachen
- HULTMANN, B.; LEVLIN, E.; MOSSAKOWSKA, A.; STARK, K.: Effects of wastewater treatment technology on phosphorous recovery from sludge and ashes. Second international conference on Recovery of Phosphates from sewage and animal wastes. Noordwijkerhout, Holland, 12.-13. März 2001.
- KLEY, G., ADAM, C., BRENNEIS, R., SIMON, F.-G. (2005): Thermochemische Aufbereitung von Klärschlammaschen zu Phosphordüngern – das EU-Projekt SUSAN. In: Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm. Konzepte, Verfahren,

- Entwicklungen. Schriftenreihe WAR 167. 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik am 12./13. November 2005. Hrsg.: Verein zu Förderung des Institutes Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V.
- LOLL, U., GLASENAPP, J. (2003): Aktuelle Schlammengen bei der Planung von Schlammbehandlungsanlagen und Entsorgungskapazitäten. DWA-Klärschlammstage, Würzburg, 05.-07.05.2003
- PINNEKAMP, J., FRIEDRICH, H. (2006): Klärschlamm Entsorgung: Eine Bestandsaufnahme. Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen, Band 3. FiW-Verlag, Aachen. ISBN 978-3-939377-02-3
- RÖMER, W. (2005): Eignung verschiedener anorganischer Phosphorverbindungen zur Ernährung von Pflanzen – Literaturbefunde. In: Rückgewinnung von Nährstoffen aus Abwasser und Klärschlamm und Reduzierung der Rückbelastung - Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 184. 80. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium 13.10.2005. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH
- SUSAN (2007): Sustainable and Safe Re-use of Municipal Sewage Sludge for Nutrient Recovery, Newsletter Februar 2007
- UBA (2004): Daten zur Anlagentechnik und zu den Standorten der thermischen Klärschlamm-entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Umweltbundesamt, 3. überarbeitete Auflage, Berlin 2004
- WIEBUSCH, B., SEYFRIED, C. F. (1998): Klärschlammaschen als Produkt der Abwasserreinigung. BMBF Statusseminar 1998 „Stoffliche Verwertung von Klärschlammaschen und Aschen aus der Klärschlammverbrennung als Baustoff“, Veröffentlichung ISAH, Heft 107, Hannover