

Die Verwertung und Entsorgung von Klärschlamm in der Schweiz

Hans Peter Fahrni

Seit dem Aufbau der modernen Abwasserreinigung wurde in der Schweiz Klärschlamm in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt. Während der letzten 40 Jahre traten in Zusammenhang mit dieser Nutzung verschiedene Probleme auf. Die durch pathogene Keime ausgelösten Schwierigkeiten konnten mit einer Art „Vorpasteurisierung“ gelöst werden. Die Belastung des Klärschlammes mit Schwermetallen konnte zwar im Laufe der Jahre reduziert werden, blieb aber trotzdem ein Problem. Die Angst vor der Verbreitung des Rinderwahnsinns (bovine spongiforme Enzephalopathie) zusammen mit der Belastung des Klärschlammes durch persistente organische Verbindungen bildeten 2003 den Anlass für ein Verbot der landwirtschaftlichen Nutzung in der Schweiz. Zurzeit sucht die Schweiz nach Wegen, um den in Klärschlamm und anderen Abfällen enthaltenen Phosphor einer Nutzung zu zuführen.

1. Klärschlamm als Endprodukt der Abwasserreinigung

Die Schweiz ist ein kleines und dicht bevölkertes Land. Auf einer Fläche 41'000 km² leben 7,9 Millionen Einwohner, wobei sich die Bevölkerung und die wirtschaftlichen Aktivitäten auf einem Drittel der Fläche konzentrieren. In den 50er Jahren traten massive Probleme mit der Verschmutzung von Flüssen und Seen durch Abwässer auf. Im Jahr 1955 wurde ein erstes Gewässerschutzgesetz erlassen. Dieses Gesetz enthielt den Grundsatz, dass die Qualität der Gewässer so gut sein sollte, dass sämtliche Nutzungen, von der Trinkwassergewinnung über die Fischerei bis zur Nutzung für die landwirtschaftliche Bewässerung möglich sind. Dieses Ziel war nur über eine wirksame Abwasserreinigung zu erreichen. Leider regelt das erste Gewässerschutzgesetz die Zuständigkeit und die Pflichten der Kantone und Gemeinden bei der Abwasserreinigung nicht konkret und legte auch nicht fest, welche Qualität die gereinigten Abwässer aufweisen sollten. In der Folge erfolgte der Bau von Abwasserreinigungsanlagen nur langsam und die Wasserqualität nahm in vielen Flüssen und Seen weiter ab, weil durch neu gebaute Kanalisationen zunehmende Mengen an ungereinigtem Abwasser eingeleitet wurden.

Unter dem Druck einer Volksinitiative trat 1971 ein deutlich verschärftes Gesetz in Kraft. Dieses regelte sowohl die Aufgaben von Kantonen und Gemeinden als auch die Aufgaben der Industrie. Um einen raschen Aufbau der notwendigen Abwasserreinigungsanlagen zu erreichen, zahlten sowohl die Bundesbehörden wie auch die Kantone Subventionen an Städte und Gemeinden, wenn diese neue Abwasserreinigungsanlagen (ARA) errichteten.

Diese Politik war erfolgreich und es entstanden über 900 ARA. Heute werden die Abwässer von rund 94% der Bevölkerung durch Kanalisationen zu ARA geleitet und dort gereinigt. In den letzten Jahrzehnten wurde eine ganze Reihe kleiner Anlagen geschlossen und durch leistungsfähigere, zentrale Anlagen ersetzt. So standen 2009 noch 759 ARA in Betrieb. Deren totale Kapazität betrug 16,7 Millionen Einwohner-

gleichwerte, die mittlere Belastung betrug 10,4 Millionen Einwohnerequivalente. Im Einzugsgebiet der Seen müssen die ARA eine gezielte Phosphorelimination aufweisen, um die Überdüngung (Eutrophierung) der Seen zu bekämpfen. Dabei müssen mindestens 80% des im rohen Abwasser enthaltenen Phosphors entfernt werden und im gereinigten Abwasser darf die Phosphorkonzentration 0,8 mg P pro Liter nicht übersteigen. Unterhalb der Seen müssen ARA mit mehr als 10'000 Einwohnerequivalenten ebenfalls diese Ziele bei der Phosphorelimination erreichen. Dank dieser Regelung eliminieren 80% der ARA in der Schweiz Phosphor aus dem Abwasser. Dabei kommt meist eine sogenannte Simultanfällung zum Einsatz. Durch die Phosphorelimination der ARA werden rund 90% des im Rohabwasser enthaltenen Phosphors in den Klärschlamm transferiert. In der Schweiz fallen jährlich rund 210'000 Tonnen Klärschlamm (als Trockensubstanz) an, was rund 20 kg pro Einwohner entspricht.

Bei den meisten ARA handelt es sich um Belebtschlammanlagen. Das Abwasser fließt zuerst in ein Absetzbecken, wo Sand und ein Teil der ungelösten Stoffe sedimentieren. Das Abwasser fließt dann in ein Belüftungsbecken, wo Bakterien und Mikroorganismen die gelösten Stoffe abbauen und dabei ihre Biomasse aufbauen. In ARA mit Simultanfällung werden im Belüftungsbecken auch Eisen- oder Aluminiumsalze zur Fällung der Phosphate zugegeben. In einem Nachklärbecken setzen sich Biomasse und die ausgefällten Phosphate als Schlamm ab. Dieser Schlamm wird mechanisch entfernt; ein Teil wird in Belüftungsbecken zurückgeführt, der Überschuss bildet den so genannten Klärschlamm, der mehr als 96% Wasser enthält.

Die meisten Anlagen setzen eine anaerobe Faulung als ersten Schritt zur Klärschlammbehandlung ein. Dabei wird ein Teil der organischen Substanz zu Methan abgebaut. Dieses Methan kann in Wärmekraftkopplungen zur Produktion von Wärme und Elektrizität genutzt werden. Je nach Energiebedarf der Anlage und Schlammmenge können rund 30 bis 60% des Bedarfs an Elektrizität der ARA so gedeckt werden. Die entstehende Wärme wird insbesondere zur Erhitzung des rohen Schlammes genutzt. So kann der Schlamm zuerst auf 65 °C erhitzt werden, um Keime, wie z.B. Salmonellen oder Wurmeier, zu zerstören. Die anaerobe Faulung erfolgt bei Temperaturen um 35 °C.

2. Die Klärschlammzusammensetzung und der Gehalt an Nährstoffen

Natürlich hängt die Zusammensetzung des Klärschlammes vom behandelten Abwasser ab. In Kläranlagen, welche vorwiegend häusliches Abwasser behandeln, ist aber die Zusammensetzung des Klärschlammes, was die Hauptkomponenten betrifft, einigermaßen stabil. Tabelle 1 gibt einige typische Werte an.

Rund die Hälfte der Trockensubstanz ist organischer Natur, was sich auch im Glühverlust zeigt. Für die landwirtschaftliche Nutzung ist Klärschlamm wegen des Gehaltes an Nährstoffen, vor allem von Phosphor, von Interesse.

Wie Tabelle 2 zeigt, sind die Frachten anderer Nährstoffe, wie z.B. Stickstoff, im Vergleich zu anderen Düngern und damit auch zum Bedarf der Landwirtschaft nicht von Bedeutung. Das Gleiche gilt auch für Kalium.

	Einheit	1984	1898	1999
Trockensubstanz (TS)	%	5.7	5.9	5.9
Glühverlust	kg / t (TS)	435	460	456
Stickstoff total	kg N/ t (TS)	40	45	44
Phosphor (ARA mit P Fällung)	kg P / t (TS)	38	25	25
Phosphor (ARA (ohne P Fällung)	kg P / t (TS)	20	16	20
Kalium	kg K / t (TS)	2	2	2.5
Calcium	kg Ca/t (TS)	73	64	58
Magnesium	kg Mg/t (TS)	5.7	5.1	5.3

Tabelle 1: Typische Zusammensetzung von Klärschlamm, nach [1], verändert

Die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm wurde in der Schweiz während Jahren gefördert. Vor allem ARA ohne grosse industrielle Abwasseranteile entwickelten Strategien zum Erhöhen des Absatzes in der Landwirtschaft. Für diese Entwicklung waren vor allem zwei Gründe verantwortlich:

1. Die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm kommt die ARA günstiger zu stehen, als jede andere Art der Entsorgung.
2. Die landwirtschaftliche Nutzung erlaubt es, Nährstoffe zu rezyklieren.

Dünger	Stickstoff in t N	Phosphor in t P
Hofdünger (Gülle, Mist)	160'000	29'000
Mineraldünger	70'000	5'800
Gehalt im schweizerischen Klärschlamm total	12'000	5900
Gehalt im landwirtschaftlich genutzten Klärschlamm im Jahr 2000 (rund 38% des total anfallenden Klärschlammes)	4000	2000

Tabelle 2: Nährstoffe in Klärschlamm und in verschiedenen Düngern der Schweiz [2]

1975 wurde rund 70% des Klärschlammes in der Landwirtschaft eingesetzt. In den folgenden Jahren stieg die Menge des total anfallenden Klärschlammes, während die in der Landwirtschaft abgesetzte Menge in etwa gleich blieb. Deshalb sank der Anteil des landwirtschaftlich verwerteten Klärschlammes bis 1985 auf rund 50%. Zu-

dem traten im Lauf der Jahre verschiedene Probleme auf, welche sich negativ auf den Absatz in der Landwirtschaft auswirkten.

1. Kontamination des Klärschlammes mit pathogenen Keimen
2. Belastung des Klärschlammes mit Schwermetallen
3. Belastung des Schlammes mit persistenten organischen Verbindungen.
4. Befürchtete Belastung mit den für die Übertragung von Rinderwahnsinn verantwortlichen Prionen.

3. Das Problem mit den pathogenen Keimen

In den 70er Jahren ging eine ganze Reihe neuer ARA in Betrieb. Der Klärschlamm kam, meist nach einer Faulung bei 35 °C, in der Landwirtschaft zum Einsatz. Leider wurden dadurch nicht nur Nährstoffe auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche verteilt, sondern auch pathogene Keime, wie z.B. Salmonellen oder Eier von Spulwürmern. Diese Keime und auch die Wurmeier konnten zudem auch auf Gras nachgewiesen werden, deshalb wurde befürchtet, dass Kühe angesteckt werden könnten. Ein Risiko für die menschliche Gesundheit konnte nicht ausgeschlossen werden.

Milch und Milchprodukte sind für die schweizerische Landwirtschaft von grosser Bedeutung. Es erstaunt deshalb nicht, wenn die Verbreitung pathogener Keime durch Klärschlamm bei den Bauern und bei den Herstellern von Milchprodukten zu Besorgnis führte. Die Gewässerschutzbehörden waren alarmiert und suchten nach Möglichkeiten, um die Hygieneprobleme zu lösen. In einer ersten Phase versuchte man, den ausgefaulten Klärschlamm nachträglich zu pasteurisieren. Das Resultat war leider ein voller Misserfolg: es stellte sich heraus, dass der Hitze behandelte Klärschlamm wie ein Nährboden die Vermehrung irgendwelcher Keime begünstigte und deshalb sehr leicht wieder kontaminiert wurde. Dabei fördern die Verhältnisse auf einer Kläranlage naturgemäss eine solche Kontamination. Auf gewissen ARA wurden dieselben Rohrleitungen sowohl für den Transport von nicht pasteurisiertem als auch für pasteurisierten Schlamm genutzt. Zu weiteren Kontaminationen kam es bei der Lagerung, z.B. durch ungeeignete Belüftung der Tanks, oder dann beim Transport.

Schliesslich wurde die Lösung darin gefunden, dass der Schlamm vor der Faulung auf 65 °C erhitzt wird, was zu einem Absterben der pathogenen Keime genügt. Nach der anaeroben Faulung erwies sich der so vorbehandelte Schlamm als recht stabil und viel weniger anfällig für eine neuerliche Verkeimung.

4. Schwermetalle erregen Besorgnis

Auf Grund seines Ursprungs enthält Klärschlamm neben den erwähnten Nährstoffen und neben den Hauptbestandteilen wie Kalzium, Aluminium und Silikaten auch eine ganze Reihe von Schwermetallen. Wenn nun der Schlamm als Dünger genutzt wird, gelangen diese Schwermetalle auf den Boden, wo sie adsorbiert werden. Dies stellt bei den üblichen Konzentrationen der Schwermetalle im Klärschlamm zwar kurzfristig kein Problem dar. Wenn aber eine landwirtschaftliche Nutzfläche im Laufe der Jahre immer wieder mit Klärschlamm gedüngt wird, reichern sich die Schwermetalle im

Boden an. Im Laufe der Zeit erreichen die Schwermetallgehalte damit ein Ausmass, dass die Fruchtbarkeit des Bodens gefährdet oder, wegen der Aufnahme der Metalle durch Pflanzen, deren Verwendung zu Nahrungszwecken ausschliesst.

Um diese Gefahr zu begegnen müssen die Konzentrationen der Schwermetalle im Klärschlamm und die die jährlichen Klärschlammgaben begrenzt werden. In der Schweiz trat 1981 mit der Klärschlammverordnung eine erste Begrenzung der Schwermetallgehalte in Kraft.

Metall	Grenzwert mg pro kg (Trockensubstanz)
Blei	1000
Cadmium	30
Chrom	1000
Kobalt	100
Kupfer	1000
Molybdän	20
Nickel	200
Quecksilber	10
Zink	3000

Tabelle 3: Grenzwerte für Schwermetalle in Klärschlamm1981, [3]

Die Anwendung von Klärschlamm wurde dabei auf 0.75 kg Schlamm (Trockensubstanz) pro Quadratmeter in drei Jahren ebenfalls begrenzt. Später wurde diese Menge auf 0,5 kg gesenkt. Bei der Begrenzung der Klärschlammmenge stand eine Vermeidung der Überdüngung mit Phosphor im Vordergrund. Die Grenzwerte für Schwermetalle waren so festgelegt, dass nach einer vorschriftskonformen Düngung während 50 Jahren, die tolerierbaren Gehalte im Boden höchstens zu 50% ausgeschöpft sein sollten.

Für die Behörden bildete die befürchtete Anreicherung von Schwermetallen aus dem Klärschlamm im Boden eines der wichtigsten Motive für eine systematische und umfassende Untersuchung der Abwässer und natürlich auch für die Sanierung der Quellen der Schwermetalle. Im Bereich der Oberflächentechnik, wo zum galvanischen Aufbringen von Metallen naturgemäss mit wässrigen Lösungen von Metallen wie Zink, Nickel, Chrom, Kupfer oder Cadmium gearbeitet wird, waren effiziente aber leider auch teure Massnahmen zum Entfernen der Metalle aus dem Abwasser notwendig. Die schweizerische Gesetzgebung enthält relativ strenge Grenzwerte für die Einleitung von industriellem Abwasser in Kanalisationen oder in Gewässer. Ab 1976 durften z.B. maximal 0.5 mg Kupfer oder 2 mg Zink pro Liter im eingeleiteten Abwasser enthalten sein. Um diese Werte einzuhalten, waren auch in anderen Industriebranchen weitgehende Massnahmen notwendig. Dadurch konnten die Schwermetalleinträge aus Punktquellen deutlich gesenkt werden. Ganz generell sank die Belastung des Klärschlammes. So sanken die Konzentrationen von Cadmium und Blei im Klärschlamm zwischen 1980 und 1999 um rund 85%. Dies ist auf das generelle Verbot von Cadmium in den meisten Anwendungen und auf das Verbot von verbleitem Benzin in den 1990er Jahren zurückzuführen.

Bei Zink betrug die Reduktion im Klärschlamm 60% und bei Kupfer nur 30%. Die Erklärung liegt in der breiten Anwendung dieser Metalle. So führen verzinkte Rohrleitungen beziehungsweise Dachrinnen und Rohre aus Kupfer zu diffusen Einträgen dieser Metalle. Gerade die Reduktion dieser diffusen Einträge erweist sich als weit schwieriger als die Senkung der Frachten aus Punktquellen.

	Grenzwerte Klärschlamm 1998 [4]	Mittelwert 1980	Mittelwert 1989	Mittelwert 1994	Mittelwert 1999
	mg/kg TS (TS = Trocken- substanz)	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS
Blei	500	610	232	133	94
Cadmium	5	16.9	4	2.4	1.7
Chrom	500	311	129	84	74
Kobalt	60	15.6	10	7.9	9.8
Kupfer	600	510	388	380	341
Molybdän	20	10	7	5	5
Nickel	80	96	42	40	31
Quecksilber	5	*)	3.6	1.9	1.7
Zink	2000	2273	1389	1110	929

*) keine Messung

Tabelle 4: Grenzwerte für Klärschlamm zur landwirtschaftlichen Düngung und mittlere Konzentrationen im schweizerischen Klärschlamm [4], [5].

5. Organisch chemische Verunreinigungen und schliesslich Rinderwahnsinn

Der Anteil des in der Landwirtschaft verwerteten Klärschlammes sank im Laufe der Jahre. Dies war nicht zuletzt auf den Nachweis immer neuer Verunreinigungen zurückzuführen. Neue analytische Methoden erlauben es, fast alle persistenten Verunreinigungen im Klärschlamm nachzuweisen. Wir finden Hormone und andere endokrine aktive Substanzen aus Medikamenten und Kosmetika. Wir finden PCB (polychlorierte Biphenyle) und natürlich polyzyklische Aromaten. Wobei die letzteren zwei Verbindungsklassen aus der Atmosphäre ausgewaschen werden oder aus alten Deponien stammen. Weil die ganze Palette der in Haushalten und Industrie eingesetzten Stoffe, soweit diese irgendwie ins Abwasser gelangen können, sich im Klärschlamm findet, ergab sich im Lauf der Jahre ein zunehmendes Misstrauen gegen die Nutzung von Klärschlamm in der Landwirtschaft.

In einer Untersuchung des schweizerischen Klärschlammes aus dem Jahr 1993 fanden sich z.B. Gehalte an adsorbierbaren, organischen Halogenverbindungen (AOX) um 275 mg Cl/kg Trockensubstanz (Medianwert) [6]. Das bedeutet, dass pro Kilogramm Trockensubstanz gegen ein Gramm an xenobiotischen, halogenorganischen Verbindungen im Klärschlamm enthalten ist. Dabei machen die berüchtigtsten Verbindungen wie PCB, DDT und DDT-Metaboliten nur einen kleinen Teil dieser Fracht erklären.

Der Gehalt an polyzyklischen Aromaten PAK (Summe von 6 PAK) schwankte um 350 Mikrogramm pro kg TS. Nachdem sich in Gewässern unterhalb von Kläranlageneinleitungen pathologische Veränderungen der Geschlechtsorgane von Fischen und anderen Lebewesen zeigten, erstaunt es nicht, wenn die dafür verantwortlich gemachten synthetischen Stoffe mit hormonähnlicher Wirkung auch im Klärschlamm nachgewiesen werden können.

Das Ende der landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm kam, als der Rinderwahnsinn, d.h. die bovine spongiforme Enzephalopathie (BSE) ausbrach. Im Jahr 1997 wurden 38 Kühe aufgrund dieser Krankheit getötet. Verschlimmert wurde die Beurteilung der Klärschlammverwertung durch Resultate wissenschaftlicher Experimente, in denen sich zeigte, dass die normale Sterilisation von Gewebe mit Dampf bei Temperaturen von 143 °C nicht genügte, um die für die Krankheit verantwortlichen Prionen (komplexe Eiweissverbindungen) unschädlich zu machen. Damit genügt die Vor-Pasteurisierung von Klärschlamm bei 65 °C sicher nicht, um allfällige Prionen im Klärschlamm zu zerstören. Weil auch aus Schlachthäusern Abwasser in die ARA fliesst, und weil nicht bei jedem erkrankten Tier die Seuche vor dem Schlachten entdeckt wurde, könnten von einer an BSE erkrankten Kuh Prionen über das Schlachthaus und die ARA in Klärschlamm gelangen. Wenn dieser Klärschlamm auf landwirtschaftliches genutztes Land, im schlimmsten Fall auf einer Weide, ausgebracht wird, könnte es auf diesem Weg zur Ansteckung weiterer Kühe kommen.

Zur Furcht vor der Ausbreitung von BSE bei Rindern kam die Befürchtung, dass nicht nur Schafe, Rinder und Katzen mit BSE angesteckt werden könnten. Einzelne Forscher vermuteten einen Zusammenhang zwischen BSE und einer neuen Art des Creutzfeldt Jacob Syndroms. Dabei führt diese Krankheit über Zerstörung des Gehirns bei Menschen innerhalb relativ kurzer Zeit zum Tod. Es wurde vermutet, diese Ansteckung könnte über die Nahrungsaufnahme, d.h. über das Fleisch von erkrankten Tieren verlaufen. Ausgelöst durch die Diskussionen über BSE wurde die landwirtschaftliche Nutzung von Klärschlamm in der Schweiz immer kontroverser diskutiert. Viele Bauern, der Milchwirtschaftsverband aber auch Lebensmittelhersteller fürchteten um den Ruf ihrer Produkte, nachdem Zusammenhänge zwischen BSE und einer seltenen aber tödlichen Krankheit des Menschen vermutet wurden. Der Anteil des in der Landwirtschaft verwerteten Klärschlammes sank von 38% im Jahr 2000 auf 21 % im Jahr 2002. Gleichzeitig verlangten nun Bauern über ihre Verbände, die Nahrungsmittelindustrie und auch Grossverteiler mit Nachdruck ein Verbot der landwirtschaftlichen Nutzung.

Der schweizerische Bundesrat schlug einen stufenweisen Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung vor. Ab Mai 2003 trat ein Verbot der Klärschlammdüngung auf Futter- und Gemüseflächen in Kraft. Für alle übrigen düngbaren Flächen wurde der Klärschlamm ab Oktober 2006 verboten.

6. Die Klärschlammentsorgung nach dem Düngeverbot

Während der 70er Jahre wurden noch bis zu 70% des Klärschlammes in der Landwirtschaft verwertet. Die erwähnten Probleme mit der Klärschlammqualität führten schrittweise zu einer Reduktion auf rund 45% im Jahr 1990 und auf 38% im Jahr 2000. Schon vor dem Verbot der Klärschlammdüngung mussten somit andere Entsorgungswege gesucht werden. Im Wesentlichen standen zwei Wege offen: die Deponierung des entwässerten Schlammes oder die Verbrennung. Dabei ist die Deponierung von Klärschlamm wegen dessen mechanischen Eigenschaften nicht unproblematisch. Meist wurde der Klärschlamm bei der Ablagerung deshalb mit Siedlungsabfällen gemischt. Für die Verbrennung wurde der ausgefaulte und damit besser entwässerbare Schlamm bis auf einen Trockensubstanzgehalt von 30 -35% entwässert und dann in Schlammverbrennungsanlagen oder auch in Müllverbrennungsanlagen verbrannt. Für die Verbrennung in Zementwerken muss der Schlamm nach der Entwässerung weiter getrocknet werden.

Als 2003 das Verbot für die Klärschlammdüngung in Kraft trat, genügte die Verbrennungskapazität für rund 80% des Schlammes. Spezielle Schlammverbrennungsanlagen konnten rund 19% des Anfalls übernehmen, Müllverbrennungsanlagen 13% und die Zementwerke verbrannten 19%. Zusätzlich wurden etwa 6% des Schlammes getrocknet und in ausländische Kohlekraftwerke exportiert und dort zusammen mit Kohle oder Braunkohle verbrannt. [7]. Nicht zuletzt wegen den möglichen Exporten zu ausländischen Anlagen ergaben sich 2003 keine grösseren Engpässe. Zudem war die Anwendung von Klärschlamm auf Ackerflächen während einer Übergangszeit noch möglich.

Die grossen Kläranlagen waren auf den Wegfall der landwirtschaftlichen Nutzung vorbereitet. Schon in der Vergangenheit hatten sich die Landwirte von Zeit zu Zeit geweigert, Klärschlamm zu übernehmen. Deshalb verpflichteten die Behörden die grösseren ARA in den neunziger Jahren, alternativen Entsorgungswege für Klärschlamm zu suchen. Die nach dem Klärschlammdüngungsverbot vorhandene Auslandsabhängigkeit bei der Klärschlammentsorgung war allerdings störend. Die Umweltschutzgesetzgebung enthält die Zielsetzung, wonach Massenabfälle wie Siedlungsabfälle oder eben Klärschlamm, in der Schweiz zu entsorgen sind. Die für eine Entsorgung im Inland noch erforderliche Kapazität bei Trocknungs- und Verbrennungsanlagen wurde aber rasch aufgebaut, weil absehbar war, dass die Behörden nach Bestehen von genügend Entsorgungskapazität keine weiteren Exporte von Klärschlamm mehr genehmigen würden.

Das Verbot der landwirtschaftlichen Nutzung brachte auch zusätzliche Kosten mit sich. In einer ersten Umfrage stellte das Bundesamt für Umwelt Entsorgungskosten von durchschnittlich CHF 600 pro Tonne Trockensubstanz in Zementwerken, CHF 750 in speziellen Schlammverbrennungsanlagen und CHF 800 in Müllverbrennungsanlagen fest. Die Kosten der einzelnen ARA variieren stark, wobei die Wirksamkeit der Entwässerung eine wichtige Rolle spielt. Es muss ein Trockensubstanzgehalt von mehr als 30% erreicht werden, weil sonst hohe Transport und Trocknungskosten anfallen.

7. Die Bedeutung von Phosphor

Phosphor ist in der Form von Phosphaten ein essentielles Element für alles pflanzliche und tierische Leben. Häufig begrenzen die verfügbaren Nährstoffe Phosphor und Stickstoff das pflanzliche Wachstum. Die Pflanzen entnehmen diese Nährstoffe dem Boden. Nun benötigen wir weltweit gute landwirtschaftliche Ernten, um die Nahrungsmittelversorgung einer wachsenden Bevölkerung sicherzustellen. Diese hohen Ernteerträge sind aber nur dank dem Einsatz von Dünger möglich. Hofdünger und Mineraldünger ersetzen dabei im Boden die vorher von den Pflanzen aufgenommenen Nährstoffe. Für die Ernährung der Weltbevölkerung sind somit Dünger von grosser Bedeutung.

Durch die natürliche Erosion der Böden und durch die Auswaschung landwirtschaftlicher Flächen gelangen Phosphor- und Stickstoffverbindungen in die Flüsse und Seen und gehen so für die weitere Nutzung verloren. Während Stickstoffdünger durch die Umwandlung von Stickstoff aus der Luft künstlich hergestellt werden kann, hängt die Versorgung mit Phosphor von geologischen Lagerstätten ab. Der US Geological Survey schätzt, dass jährlich rund 176 Millionen Tonnen Phosphatgestein abgebaut werden. Die totalen Reserven werden auf 65'000 Millionen Tonnen geschätzt. Bei gleich bleibendem Verbrauch wären also die Reserven in 350 Jahren aufgebraucht. (Der Geological Survey hat kürzlich die Reserven nach oben korrigiert, nachdem offenbar die Vorräte in gewissen Lagerstätten höher eingeschätzt wurden).

Leider kommen Lagerstätten mit Phosphaten guter Qualität nur vereinzelt vor. In vielen Lagerstätten sind die Phosphaterze mit Cadmium und Uran belastet. Mit dem heutigen Abbau der Lagerstätten guter Qualität verschiebt sich in Zukunft die Phosphatgewinnung auf Minen mit schlechter Qualität. Wegen der grossen Bedeutung des Phosphors und wegen der sich am Horizont abzeichnenden Verknappung guter Phosphaterze muss eine nachhaltige Abfallwirtschaft die Verwertung von phosphorreichen Abfällen anstreben. In verschiedenen europäischen Staaten laufen Projekte zum Recycling von Phosphor aus Abfällen und aus Abwasser. (Vergl. <http://www.phosphorrecycling.eu/>).

8. Möglichkeiten zur Rückgewinnung

Abwasser enthält Phosphate aus menschlichen Ausscheidungen und aus Reinigungsmitteln. Während der letzten Jahre wurden deshalb eine ganze Reihe von Prozessen entwickelt, um Phosphate entweder direkt aus dem Abwasser oder dann aus der Asche der Klärschlammverbrennung zurück zu gewinnen. Eine generelle Übersicht findet sich in einer Publikation des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt [8]. Eine interessante Möglichkeit zur Rückgewinnung aus Abwasser bildet die Kristallisation von unlöslichen Phosphorverbindungen entweder im Hauptstrom einer Kläranlage oder dann in einem Nebenstrom, z.B. im Wasser aus der Eindickung des Klärschlammes. Eine andere Möglichkeit ist die gezielte Fällung von Struvit, einem unlöslichen Magnesium-Ammoniumphosphat ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), beispielsweise im Ablauf aus der biologischen Behandlungsstufe.

Die Fällung verlangt eine zuverlässige Kontrolle des pH-Wertes im Abwasser und eine sorgfältige Dosierung von Chemikalien (z.B. Magnesiumverbindungen). Gute Resultate werden vor allem dann erreicht, wenn die Abwässer hohe Phosphorkonzentrationen aufweisen, wie es bei Abwässern aus der Nahrungsmittelindustrie der Fall sein kann. Eine Fällung ist ebenfalls möglich bei Wasser aus der Schlamm-

eindickung, der Wirkungsgrad bei der Gewinnung aus einem Nebenstrom ist aber naturgemäss stark begrenzt.

Wie erwähnt sind die meisten schweizerischen ARA mit einer Simultanfällung zur Eliminierung der Phosphate ausgerüstet. Dabei werden im Schnitt 90% des im Rohabwasser enthaltenen Phosphors in den Klärschlamm transferiert. Wenn getrockneter oder entwässerter Schlamm in geeigneten Anlagen verbrannt wird, geht Phosphor als chemisches Element nicht verloren, sondern bleibt in der Asche zurück. Die Asche enthält somit 90% des im Rohabwasser ursprünglich enthaltenen Phosphors. Flüchtige Schwermetalle wie Quecksilber und Cadmium gelangen beim Verbrennungsvorgang in die Abgase und werden bei der Rauchgasreinigung entfernt. Auch ein Teil des Zinks und des Bleis kann so aus der Asche entfernt werden.

Abfall	jährliche Menge in t	Phosphorkonzentration in g P/kg	Phosphorfracht pro Jahr in t
Siedlungsabfälle	2'500'000	0.6	1'500
Klärschlamm (Trockensubstanz)	210'000	27.9	5'860
Knochenmehl	20'000	80	1'600
Fleischmehl	45'000	30	1'350
Kompost	208'000	3.5	728*
Total			10'750

Tabelle 5: Jährliche Phosphorflüsse in gewissen Abfällen in der Schweiz [9]

Die bei der Klärschlammverbrennung anfallende Asche enthält hohe Gehalte an Pyrophosphaten. Weil diese Kalziumverbindungen nicht sehr gut löslich sind, haben sie keine unmittelbare Düngewirkung auf Pflanzen. Die Asche muss deshalb für den Einsatz als Dünger behandelt werden. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, um zu einem besser pflanzenverfügbaren Produkt zu kommen. Gut bekannt ist beispielsweise der AshDec Prozess. In Österreich wurden in einer Pilotanlage Versuchsreihen durchgeführt. Die Klärschlamm-Asche wird mit Alkalichloriden gemischt und dann in einem Reaktor erhitzt. Schwermetalle wie Kupfer und Zink können so zumindest teilweise als Chloride entfernt werden. Die verbleibende Asche enthält die Phosphate in einer gut pflanzenverfügbaren Form. Es wurden denn auch schon kommerziell Dünger hergestellt. Ein anderes Verfahren zur Erhöhung der Löslichkeit ist das RecoPhos-Verfahren. Hier wird die Asche aus der Klärschlammverbrennung mit einer starken Säure behandelt, um lösliche Phosphorverbindungen zu erhalten. Weil bei diesem Schritt keine Entfernung der Schwermetalle erfolgt, muss die Qualität der verbrannten Klärschlämme überwacht werden. Wird Phosphorsäure als Säure eingesetzt, weist der resultierende Dünger ähnliche

Phosphatgehalte auf wie ein kommerzielles Tripel-Superphosphat. In Deutschland stellt eine nach dem RecoPhos-Verfahren funktionierende Anlage kommerziell Dünger her.

9. Schlussfolgerungen

Phosphor ist ein essentielles Element für die Fruchtbarkeit von Böden. Die aktuelle Praxis der Abfallbehandlung führt zu grossen Verlusten von Phosphor, wenn Klärschlamm, Knochenmehl oder Fleischmehl in Anlagen verbrannt werden, welche keine Rückgewinnung des Phosphors erlauben.

1. Abfälle wie Knochen- und Fleischmehl sind so reich an Phosphaten, dass sich eine Rückgewinnung des Phosphors aufdrängt, soweit diese Abfälle nicht direkt sinnvoll verwertet werden können. Die Verbrennung in speziellen Anlagen erlaubt einerseits, pathogene Keime und Prionen sicher zu zerstören und ermöglicht andererseits eine Rückgewinnung des Phosphors aus der Asche. Weil die Asche dieser Abfälle bis zu 50% Kalziumphosphat enthält, ist die Verwertung von Phosphor hier von erster Priorität. Für die Umwandlung zu kommerziellem Dünger stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung.
2. Klärschlamm ist relativ phosphorreich. In der Schweiz verfügen heute 80% der ARA über eine Phosphorfällung. In diesen Anlagen werden mehr als 90% des im Rohabwasser enthaltenen Phosphors in den Klärschlamm transferiert. Wegen der Verschmutzung mit persistenten organischen Verbindungen und wegen der Gefahr der Verbreitung von Krankheiten (z.B. BSE) wird in der Schweiz schon heute aller Klärschlamm verbrannt. Phosphor kann nur zurückgewonnen werden, wenn der Klärschlamm in Anlagen verbrannt wird, bei denen Phosphor mit vernünftigem Aufwand aus der Asche zurückgewonnen werden kann. Die Verbrennung von Klärschlamm oder Knochenmehl in Müllverbrennungsanlagen verhindert eine Rückgewinnung und sollte deshalb eingestellt werden, Das gleiche gilt für die Verbrennung von getrocknetem Klärschlamm in den Drehrohröfen der Zementindustrie.
3. Es bestehen verschiedene technische Prozesse, um die Asche aus der Klärschlammverbrennung in einen Dünger mit löslichen Phosphaten umzuwandeln. Allerdings wird die Kapazität dieser Anlagen wohl noch einige Jahre nicht genügen, um sämtliche Klärschlammmasche zu behandeln. Die Lagerung von Asche aus der Verbrennung von Klärschlamm oder Knochenmehl verursacht keine Probleme. Es ist absehbar, dass die schweizerischen Behörden eine separate Lagerung dieser Asche verlangen werden, damit später daraus Phosphordünger gewonnen werden kann.
4. Die Entfernung von Schwermetallen aus dem Klärschlamm ist eher schwierig. Nur bei leichtflüchtigen Metallen wie Cadmium oder Quecksilber sind – neben der Verbrennung - keine speziellen Prozessschritte dafür notwendig. Um das Phosphorrecycling zu ermöglichen, müssen die Anstrengungen zum Senken der Schwermetallfrachten im Abwasser fortgesetzt werden.

Literatur

- [1] W. Gujer, Siedlungswasserwirtschaft, Springer Verlag, Berlin, Heideberg, 2007, verändert
- [2] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Faktenblatt zum Klärschlammverbot, Bern, März 2003,
- [3] Schweizerischer Bundesrat, Klärschlammverordnung vom 8. April 1981, (diese wurde später durch ähnliche Regelungen in der „Stoffverordnung“ und dann durch [4] ersetzt
- [4] Schweizerischer Bundesrat, Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (vgl. Anhang 2.6), SR814.81, vom 18. Mai 2005
- [5] Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, FAL, Risikoanalyse zur Abfalldüngerverwertung in der Landwirtschaft, Teil 1: Grob beurteilung, Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft, und unterstützt durch das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Reckenholz, Zürich, 2001
- [6] P. Frost, R. Camenzind, A. Mägert, R. Bonjour, G. Karlaganis: Organic micropollutants in Swiss sewage sludge; J. Chromatography, 643, 379-388, 1993
- [7] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Klärschlamm entsorgung in der Schweiz , Mengen und Kapazitätserhebung, Umwelt Materialien 181, Bern, 2004
- [8] Bundesamt für Umwelt, Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung, Eine Bestandesaufnahme, Bern, 2009
- [9] Bundesamt für Umwelt, Phosphorflüsse in der Schweiz, Stand, Risiken und Handlungsoptionen, Bern, 2009

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

WASTE MANAGEMENT, Volume 2

Waste Management, Recycling, Composting, Fermentation,
Mechanical-Biological Treatment, Energy Recovery from Waste,
Sewage Sludge Treatment

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Luciano Pelloni.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011

ISBN 978-3-935317-69-6

ISBN 978-3-935317-69-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2011

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M. Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Janin Burbott

Erfassung und Layout: Janin Burbott, Petra Dittmann, Sandra Peters,

Martina Ringgenberg, Ginette Teske

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.