

Klärschlammverwertung
Region Nürnberg GmbH



Klärschlammverwertung Region Nürnberg

Klärschlamm zu Energie und Dünger



Januar 2014

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Problemstellung	1
3. Ziele	2
4. Projektiertes Verfahren	2
4.1. Verhüttung von Klärschlamm	3
4.2. Leistungsdaten	4
4.3. Produktdaten	4
4.4. Ökobilanzierung	6
4.5. Kosten Großvorhaben	7
5. Pilotanlage	7
5.1. Organisation	7
5.2. Programm und Zeitplanung	8
6. Aussichten	9
6.1. Potenzial	9
6.2. Weitere Entwicklung	10
6.3. Beitrag der Politik	10
7. Fazit	11

Städtepartner zukunftsgerichtete Klärschlammverwertung



Projektpartner Pilotanlage Metallurgisches Phosphorrecycling



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Impressum:

Autoren: B. Hagspiel, Dr. P. Pluschke

Redaktion, Grafik: B. Hagspiel, Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg (SUN)

Adolf-Braun-Straße 33, 90492 Nürnberg · sun@stadt.nuernberg.de · www.sun.nuernberg.de

Erscheinungsdatum: Januar 2014

Klärschlammverwertung Region Nürnberg

Klärschlamm zu Energie und Dünger

Zusammenfassung

Im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) maßgebend unterstützten Projekts entsteht im Klärwerk der Stadt Nürnberg eine Pilotanlage im halbtechnischen Maßstab zum Zweck der Verhüttung von Klärschlamm im einstufigen Prozess. Bei Erfolg kann ein technisch – wirtschaftlicher und politisch wichtiger Meilenstein zum Thema Klärschlammverwertung erreicht werden. Das Ergebnis des Versuchs entscheidet, ob zukünftig eine technische Alternative zur Klärschlammmonoverbrennung angeboten werden kann und gleichzeitig die Rückgewinnung des im Klärschlamm vorhandenen Phosphors unter wirtschaftlich relevanten Bedingungen möglich ist. Wenn ja, dann erschließt sich auf internationaler Ebene ein bedeutendes Aufkommen schadstoffarmen Düngers für die Landwirtschaft. Es würde der Beweis erbracht, dass Klärschlamm mit hohem Wirkungsgrad zu sauberem Dünger verarbeitet werden kann und dass die Reinigung des kommunalen Abwassers nahezu abfallfrei und ohne überregionale Klärschlammtransporte möglich ist.

1. Einleitung

Bei der Abwasserreinigung der Stadt Nürnberg fallen jährlich ca. 40000 Tonnen entwässerter Klärschlamm an, der zu einem hohen Preis aufwändig entsorgt wird. Zusammen mit den Städtepartnern Erlangen, Fürth und Schwabach summiert sich das Aufkommen auf ca. 70000 Tonnen Schlamm pro Jahr. Er wird überwiegend in Braunkohlekraftwerken mitverbrannt, ein kleiner Anteil wird in die Landwirtschaft und in den Landschaftsbau gebracht.

Deutschlandweit wird intensiv nach nachhaltigen, ökologisch verträglichen und zugleich wirtschaftlich vertretbaren Alternativen im Umgang mit Klärschlamm geforscht. Hierbei geht es im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes um die energetische wie stoffliche Nutzung des Schlammes als Rohstoff zur Deckung des Eigenbedarfs an Strom und Wärme, sowie die Rückgewinnung des Phosphors zur Verwendung als wichtiger Pflanzendünger.

Die Städtepartner wollen im Rahmen der interkommunalen Zusammenarbeit ein zukunftsweisendes Konzept der Verwertung des Klärschlammes für die Metropolregion Nürnberg entwickeln und umsetzen. In einem internationalen Ideenwettbewerb wurden 13 Verfahren untersucht. Die Technologie des metallurgischen Phosphorrecyclings im thermischen, reduktiven Schmelzvergasungsprozess eines Schachtofens (Mephrec®[20]) wurde als evident und zugleich wirtschaftlich valide eingestuft.

Nach erfolgreicher Akquisition von Fördermitteln des Bundes startet das Vorhaben mit der Genehmigungsplanung für das Pilotprojekt im halbtechnischen Maßstab, um die Technik zu erproben ¹⁾.

2. Problemstellung

Bei der Herstellung von Waren werden regelmäßig und selbstverständlich die Energie und die eingesetzten Rohstoffe maximal genutzt. Die Entsorgung und Verwertung der Waren und Nahrungsmittel sind durch Gesetze reguliert. Neben der thermischen Nutzung der Abfallstoffe setzen sich alternative Konzepte der stofflichen Verwertung aber nur schwer durch, weil der Aufwand für Sammlung, Sortierung

¹⁾ Projektrealisierung vorbehaltlich in Aussicht gestellter Förderzusage und Genehmigung der Anlage nach Bundesimmissionsschutzgesetz.

und Rückgewinnung im Verhältnis zum Nutzen und Preis der Recyclingprodukte oft unverhältnismäßig hoch ist.

Das Kanalisationsnetz ist ein perfektes Sammelssystem flüssigen Abfalls. Dessen Verwertung beschränkt sich hingegen regelmäßig auf die energetische Nutzung des Faulgases bei der Klärschlammstabilisierung. In Deutschland werden 1,07 Mio Mg/a Klärschlamm TS anschließend (mit)verbrannt und die Asche deponiert. 0,88 Mio Mg/a erfahren eine kontrovers diskutierte stoffliche Verwertung in Landwirtschaft und Landschaftsbau.

Im ersten Fall steht die Energie regelmäßig nicht dann zur Verfügung, wenn sie auf der Kläranlage gebraucht wird und die Verbrennungsprodukte verursachen weitere Entsorgungskosten statt Erträge. Im zweiten Fall werden mit hohem Aufwand die Schadstoffe über den Klärschlamm aus dem Abwasser entfernt, um sie anschließend großflächig und gegen Entgelt auf dem Boden der Landwirtschaft wieder zu verteilen. Beide Entsorgungsmodelle gelten als nicht nachhaltig.

Bayern, Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg [21] und Niedersachsen [17] favorisieren die Einstellung der Schlammausbringung auf Ackerflächen. Die Länder begrüßen über den Bundesrat die Initiativen zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Phosphor aus Abwasser, fordern entsprechende Initiativen seitens der Europäischen Kommission und erwarten von der Bundesregierung, dass Deutschland die Vorreiterrolle für die Bereitstellung von P-Dünger aus Klärschlamm übernimmt [3]. Die Bundesregierung hat angekündigt, die Klärschlammausbringung zu Düngezwecken zu beenden und Phosphor und andere Nährstoffe zurückzugewinnen [7]. Dieses Vorhaben ist konsequent, die Umsetzung aber ökologisch wie wirtschaftlich nicht gelöst. Der Energie- und Betriebsmittelbedarf bedeutet zusätzlichen Ressourcenverbrauch und verursacht Kosten um ein vielfaches höher als der Ertrag aus Verkaufserlösen der Recyclingprodukte [11].

3. Ziele

Die genannten Städtepartner der Metropolregion bündeln die Interessen der Klärwerksbetreiber im Sinne der

1. optimierten energetischen und stofflichen Bilanz der Abwasserreinigung,

2. Eliminierung der Schadstoffe des Abwassers über den Klärschlamm,
3. Nutzung der Abwasserinhaltsstoffe unter Minimierung der Treibhausgasemissionen,
4. umweltgerechten Verwertung der Klärschlamm-inhaltsstoffe (Metalle + P-Dünger) und der
5. Minimierung sowie regionalen Allokation des Abfallrests mit weniger Transportkilometern.

Die Stadt Nürnberg gründete eine GmbH, um die damit zusammenhängenden Fragestellungen zu bearbeiten:

- Gestaltung eines regionalen Klärschlammmanagements.
- Integrierte Aufbereitung des Klärschlamms (Trocknung und Brikettierung) mit Eigenenergie.
- Energetische Verwertung der Trockensubstanz mit einem einstufigen Prozess zur thermischen Inertisierung und zur Abtrennung der Wertstoffe von den Schwermetallen.
- Vermarktung der phosphorhaltigen Schlacke.

4. Projektiertes Verfahren

Mit dem Schachtofen werden in langer Tradition Metalle geschmolzen. 1794 erfand John Wilkinson den Kupolofen, um auch in kleinem Maßstab Gusseisen zu erzeugen. Der japanische Großkonzern Nippon Steel Engineering entwickelte 1979 das Verfahren des Direct-Melting [18]. Nach dem Verfahrensmuster (siehe Abb. 1) werden weltweit 42 Anlagen zur thermischen Abfallverwertung betrieben. Unter Zumischung von Koks und gegebenenfalls Kalkstein wird der Abfall ohne Druck vorerhitzt und getrocknet. In der nächsten Zone kommt es zur thermischen Zersetzung und Ausgasung. Dann beginnt der Schmelzvorgang an den Grenzflächen der Stoffe. In der Reaktorkernzone des Vergasers zerfallen bei hohen Temperaturen die organischen Bestandteile. Das Eisen einschließlich der Schwermetalle geht unter reduzierenden Bedingungen in die flüssige Phase über und wird über einen Siphon abgeleitet und durch Löschen im Wasserbad granuliert. Die flüssige Schlacke wird über die gleiche Weise abgeleitet. Erfolgt der Abstich gemeinsam, trennt ein nachgeschalteter Magnetseparator das Eisen- vom Schlackegranulat.

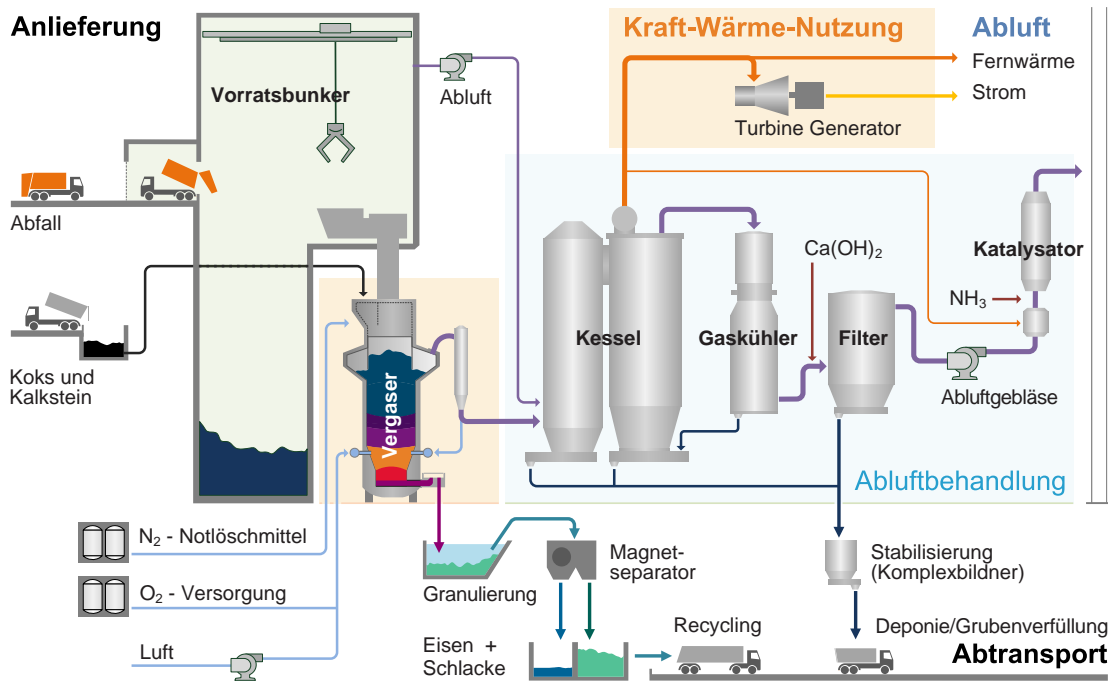


Abb. 1: Verfahrensschritte Direct-Melting (in Anlehnung an [18]) – Vorbild für das Mephrec-Verfahren.

Als besondere Vorteile des Direct-Melting werden hervorgehoben:

- Hohe Prozessstabilität durch mit Sauerstoff steuerbare Hochtemperaturvergasung.
- Reinheit der Produkte (Synthesegas, geringe Emissionen, homogene Metall- und Schlackezusammensetzung, sichere Zerstörung aller organischen Verbindungen).
- Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit durch günstige Energie- und Stoffrückgewinnung.
- Nachgewiesene Zuverlässigkeit durch Betrieb zahlreicher Anlagen.

Der Eisenabstich ist Senke für Schwermetalle und wird wie anderer Schrott in die Industrie zurückgeführt. Die granulierten Schlacke geht in die Baustoffindustrie.

In Japan hat sich das Schmelzen der Siedlungs- und Industrieabfälle gegenüber der Verbrennung mit Rostfeuerung vor allem wegen der Sortenreinheit der Produkte (Eisen, Schlacke, Synthesegas) und der geringen Emissionsbelastung (HCl und SO₂) etabliert.

4.1. Verhüttung von Klärschlamm

An der TU Bergakademie Freiberg führte das Ingenieurbüro für Gießereitechnik Leipzig seit 1992 Versuche zur Schmelzvergasung von Abfällen durch. Zwischen 1997 und 2001 wurden auf dieser Basis zwei Pilotanlagen zur Verga-

sung von Altholz und Kommunalabfall errichtet und mit Erfolg betrieben. Für die Mitteldeutsche Feuerungs- und Umwelttechnik GmbH Leipzig wurde die Schmelzvergasung von Abfällen beispielhaft entwickelt. Auf dieser Basis konzipierten die Ingenieure Ende 2002 das Verfahren zum metallurgischen Phosphor-Recycling (Mephrec) und entwickelten es unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten für die Klärschlammbehandlung fort [20]. Unter Zugabe von Koks und Sauerstoff wird dabei getrockneter und brikettierter Klärschlamm verarbeitet [15]. Der Koksanteil liegt bei ca. 15% der mineralischen Anteile im Klärschlamm und liefert die erforderliche Energie für den Schmelzprozess. In der Kernzone des Mephrec-Reaktors werden bei Temperaturen bis über 2000°C sämtliche organische Strukturen im Klärschlamm zerstört. Die mineralischen Anteile schmelzen zu einer phosphorhaltigen Schlacke, wobei die darin enthaltenen Schwermetalle reduziert werden und sich in einer eisenmetallischen Phase sammeln. Die leichtere, flüssige Schlacke schwimmt auf und wird über einen Siphon vom flüssigen Eisen getrennt. Die Schlacke wird im Wasserbad granuliert.

Das Verfahren ist flexibel auch für andere phosphorhaltige Stoffe wie Klärschlammmasche oder Tiermehl geeignet, sofern diese unter Bindemittelzugabe in geeigneter Weise in eine stabile, stückige Form verfestigt werden können.

Auf der Grundlage von Konformitätsuntersuchungen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft war es möglich, die erzeugte Mephrec-Schlacke als Ausgangsmaterial für den mineralischen P-Dünger aus Schmelzvergasung in der aktuellen Düngemittelverordnung neben dem Thomasphosphat aus der Stahl-

industrie zu verankern [6]. Mephrec wird inzwischen auch in der deutschen Fachwelt als eigenständiges Verfahren neben dem thermochemischen Aufschluss von Verbrennungaschen anerkannt [9].

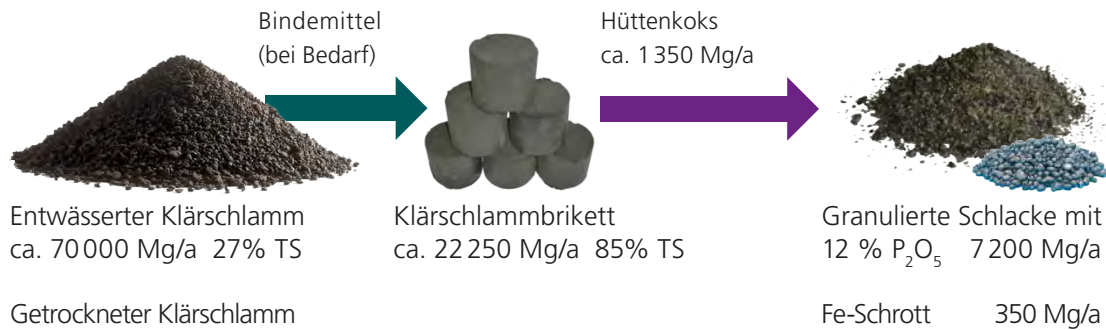


Abb. 2: Verfahrensschritte des metallurgischen Phosphorrecyclings im Produktionsmodell Nürnberg

Input		Output	
Klärschlamm 27%TS	70.000 Mg/a	Synthesegas	51,00 GW/a
Betriebszeit	7.500 h/a	Rohgasmenge	1,96 Nm ³ /h
Klärschlamm 100%TS	2,50 Mg/h	(mit 16,4% H ₂ ; 3,0% CH ₄ ; 0,3% C ₂ H ₄ ; 32% CO)	
KS-Briketts 85%TS	3,00 Mg/h	Feuerleistung	5,88 MW
Hüttenkoks	0,18 Mg/h		(2,20 MW _{EL})
Technischer. Sauerstoff	0,86 Mg/h	P ₂ O ₅ -Schlacke-Granulat	960 kg/h
		Fe-Schrott	46 kg/h
		Staub	8 g/h
Betriebsbeschäftigte	15 Personen	Abwasser	840 l/h

Tabelle 1: Berechnete Leistung bei Anlagenvollausbau für Klärschlammaufkommen Nürnberg, Erlangen, Fürth, Schwabach

4.2. Leistungsdaten

Die Kernkomponenten der Systeme Direct Melting und Mephrec sind vergleichbar, aber unterschiedlich optimiert. Die Logistik für die Klärschlammannahme und die Gesamtdimensionen sind bei Mephrec deutlich reduziert. Als vorbereitende Stufen kommen die Klärschlamm-trocknung und die Brikettierung mit Standardkomponenten hinzu. Das Prozesswasser der Klärschlamm-trocknung und Abluftbehandlung soll direkt im Klärwerk verarbeitet werden. Der Brennwert des Klärschlammes, vergleichbar mit Braunkohle, ist zu niedrig, um die gewünschte Gasqualität zur motorischen Nutzung zu erzielen. Der Vergasungsprozess soll deshalb durch Zugabe von Sauerstoff höherwertiges Synthesegas erzeugen. Die Überschusswärme wird für die Klärschlamm-trocknung verbraucht (Vergleiche Abb. 3).

Durch die geplante Verlängerung der Wertschöpfungskette kann der Deckungsgrad an selbst erzeugtem Strom für den Stadtentwässerungsbetrieb auf über 90% gesteigert werden.

4.3. Produktdaten

Die Phosphorausbeute des Verfahrens ist im Vergleich zu anderen nahe an der Grenze des technisch möglichen. Hierzu folgende Annahmen auf Grundlage durchgeführter Experimente:

- >95% Gesamt-P aus Abwasserstrom im Klärschlamm (bei P-Fällung mit Eisen III).
- >80% Gesamt-P in metallurgischer Schlacke (ca. 4% in Eisenschmelze, Rest in Flugstaub).
- 12 bis 20% liegen als P₂O₅ vor, der Rest in unbedenklichen sonstigen Verbindungen.
- >82% der erzeugten P-Schlacke sind pflanzenverfügbar.

Schlackenart	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe-Oxide	P ₂ O ₅	Citratlöslichkeit
Mephrec-Schlacke*	32,3	3,6	27,0	20,6	3,9	11,6	> 81,9
Thomas-Schlacke**	47 - 50	3	6 - 8	1 - 2	12 - 16	16 - 19	85 - 95

* Beprobte Schlacke aus Klärschlammischung mit 60% Nürnberg, 40% München

(Analyse Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft)

** Literaturangabe

Tabelle 2: Komponenten Mephrec-Schlacke im Vergleich mit Thomas-Schlacke [Angaben in % TM]

Das Produkt enthält insgesamt wesentlich weniger problematische Schadstoffe als handelsübliche Düngemittel (vgl. Tabelle 4). Organische Bestandteile kommen verfahrensbedingt nicht mehr vor. Aufgrund der geringen Schwer-

metallfrachten könnte der Dünger im ökologisch orientierten Landbaus eingeführt werden.

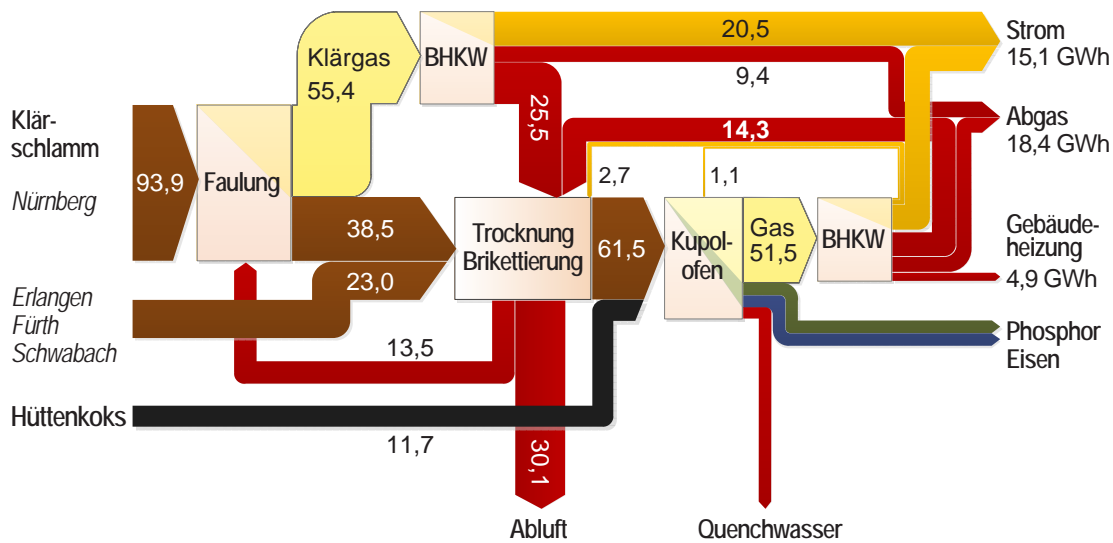


Abb. 3: Prognostizierte Energiebilanz bei Vollausbau der Verwertungsanlage [Angaben in GWh/a]

Gesetzliche Bestimmung	As	Pb	Cd	Cd/kg P ₂ O ₅	Cr ^{VI}	Ni	Hg	Tl	Cu	Zn	U
Bioabfallverordnung (BioAbfV)	-	150	1,5	-	-	50	1	-	100	400	-
Düngemittelverordnung (DüMV)	40	150	1,5	50	2	80	1	1	-	-	-
Klärschlammverordnung (AbfKlärV) < 5% P ₂ O ₅ in der TM	-	120	2,5	-	-	80	1,6	-	700	1500	-
Klärschlammverordnung (AbfKlärV) > 5% P ₂ O ₅ in der TM	-	150	3,0	-	-	100	2	-	850	1800	-
Schlacke aus Schmelzvergasung (11,6% P ₂ O ₅ in TM)	0,59	<20	0,02	0,14	<1	<15	0,01	0,01	74	85	10
Teilaufgeschlossenes Rohphosphat (39,8% P ₂ O ₅ in der TM) Mittelwert aus 21 untersuchten Düngern	24,6	10,1	64,0		382	92,7	0,08	1,3	79,6	1126	445
Triple Superphosphat (45,5% P ₂ O ₅ in der TM) Mittelwert aus 11 untersuchten Düngern	13,7	32,3	62,1		503	45,9	0,04	0,8	33,6	778	229
Rohphosphat mit kohlen saurem Kalk aus Meeresalgen mit Magnesium (17,8% P ₂ O ₅ in TM) Mittelwert aus 5 untersuchten Düngern	22,2	21,5	65,7		663	21,4	0,11	6,7	30,2	865	126

Tabelle 4: Nachgewiesene Produktqualität der P-haltigen Schlacke im Verhältnis zu rechtlichen Bestimmungen und Vergleichsdüngern [Angaben in mg/kg TM] [8] (rot = Grenzwertüberschreitung)

4.4. Ökobilanzierung

Das Verfahren Mephrec wurde mit dem bisherigen Entsorgungsweg der Mitverbrennung im Braunkohlekraftwerk verglichen [13]. Die Systemgrenze umfasst die Stoffstrom- und Energiebilanzen für die beiden alternativen Entsorgungssysteme, beginnend mit der Erzeugung von Schlamm und dessen weitere Behandlung bis zur Entsorgung der Reststoffe, einschließlich der Verfahren zur P-Rückgewinnung.

Mephrec ist gegenüber einer Mit- und Monoverbrennung ohne Ascheverwertung ökologisch betrachtet bei den entscheidenden Umweltwirkungen Phosphorressource, Versauerung, Eutrophierung, Humantoxizität und Bodenschutz teilweise mit großem Abstand im Vorteil.

Aufgrund der maximalen Ausbeute und den zugleich geringsten Schadstoffkonzentrationen in der Phosphorschlacke, schneidet das Verfahren auch im Vergleich zu den anderen begutachteten Recyclingsystemen besonders gut ab. Es ist günstiger zu beurteilen als die landwirtschaftliche Direktverwertung, weil die Faktoren Versauerung und Bodenschädigung, die sehr mäßige Pflanzenverfügbarkeit des mit Eisensalz gefällten Phosphors und besonders die hohen organischen und metallischen Belastungen mit humantoxikologischem Potenzial deren Ökobilanz nachhaltig belasten [12].

Die Bewertung von Luftemissionen und Ressourcenverbrauch ist zu differenzieren: Der Verbrauch fossiler Brennstoffe und die Erzeugung von Treibhausgasen sind im Vergleich zu den anderen Faktoren von untergeordneter Bedeutung. (Diese sind selbst bei der landwirtschaftlichen Verrottung des Klärschlammes nicht wesentlich kleiner als bei Mono-/Mitverbrennung.)

Die stoffliche Schlammverwertung erzeugt in Folge des zusätzlichen Energiebedarfs etwas höhere Treibhausgasemissionen; je nach Art des Ressourceneinsatzes einmal weniger, einmal mehr. Die Logistik (im Fall Nürnberg Transport von ca. 1,1 Mio km) ist standortabhängig. Eine eigene Anlage ist hier grundsätzlich vorteilhaft.

Ca. 68% des gesamten Energiegehalts von Klärschlamm wird durch Vergärung und Kraft-Wärme-Kopplung genutzt. Die Optimierung dieser Prozessschritte erzielt die höchsten ökologischen Effekt der Klärschlammverwertung. Auch die übrigen 32% der im stabilisierten

Klärschlamm enthaltenen Restenergie müssen genutzt werden. Im Gegensatz zur Mit- oder Monoverbrennung bietet Mephrec die Option der Synthesegaserzeugung mit daran anschließender Eigenstromerzeugung. Der Wärmeüberschuss wird im Klärschlamm-trocknungsprozess aufgebraucht.

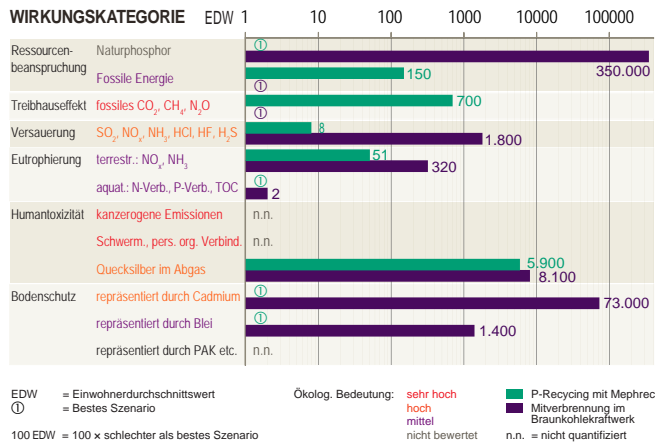


Abb. 4: Ökologische Bilanzierung der Emissionen im Vergleich zum bisherigen Entsorgungsweg der Klärschlammmitverbrennung im Braunkohlekraftwerk. (Systematik und Bewertungsmodalitäten siehe [14])

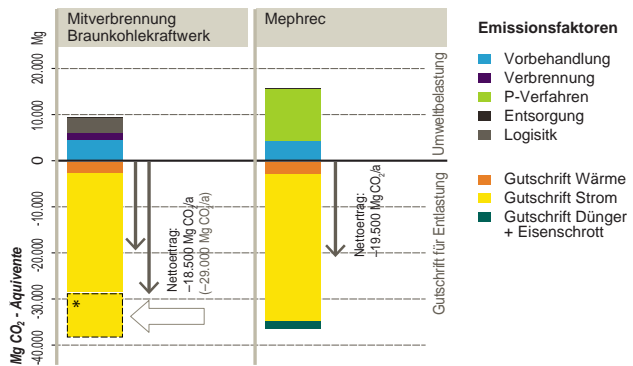


Abb. 5: Ökologische Bilanzierung Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Entsorgungsweg der Klärschlammmitverbrennung im Braunkohlekraftwerk. (* Gutschrift, wenn statt Klärschlamm Braunkohle verheizt wird.)

Bei der Mitverbrennung im Braunkohlekraftwerk kann man den Klärschlamm als positives Substitut für die emissionslastige Braunkohle ansetzen. Man muss es aber nicht: Wird der Strom im Klärwerk durch die Synthesegasverwertung selbst erzeugt und verbraucht, entfällt der Bezug von Fremdstrom in gleicher Höhe. In der Folge fällt die Nachfrage nach in Braunkohlekraftwerken erzeugtem Strom. Mittelfristig kann auf die Vorhaltung des Kohlekraftwerkanteils verzichtet werden.

4.5. Kosten Großvorhaben

Die Verfahrenstechnik Mephrec ist kapitalkosten- und betriebsmittelintensiv. Auf Grundlage einer Machbarkeitsstudie werden die Investitionskosten dafür auf 25,6 Mio EUR (incl. MwSt) veranschlagt. Die laufenden Kosten für Betrieb und Unterhalt summieren sich auf 5,7 Mio. EUR/a, ein Vollkostenanteil von rund 80% der Gesamtkosten.

In einer Studie [10] wurde die Kostenstruktur der P-Erzeugung vergleichbar zu den anderen in der „PHOBE“-Förderinitiative P-Recycling [11] berücksichtigten Verfahren kalkuliert. Danach würde der Erzeugungspreis mit 10,50 EUR/kg P etwa das 8-fache des Marktpreises von Naturphosphat betragen (entspricht circa 5 EUR/E-a). Der Preis ist fast 4-fach so hoch wie das preisgünstigste Recyclingverfahren mit einem wesentlichen Unterschied: Es wird durch Eigenerzeugung der Stromeinkauf in Höhe von ca. 2,5 Mio EUR eingespart und der Klärschlamm ist nahezu abfallfrei am Standort verwertet.

Aus Sicht der Stadt als Abwasserentsorger ist der Barwertvergleich der Vollkosten für die Klärschlamm Entsorgung maßgeblich.

Pro 100 EUR/Mg P Verkaufserlös vermindern sich die Vollkosten der Klärschlammverwertung um ca. 1 EUR/Mg entwässerter Klärschlamm. Der Markt für Recyclingphosphor ist noch sehr gering entwickelt. Bei einem realistischen Erlös von ca. 1.000 EUR/Mg P verkürzt sich der Zeitraum des primären Return of Investment nur um wenige Zeit.

Ein niedriger Kapitalzins öffnet die Schere zwischen Fremd- und Eigenverwertungskosten.

Die Vorhaltung der anspruchsvollen Technik, der Logistik und des Betriebspersonals ist Ursache dafür, dass ein Downscaling der Anlage nicht sinnvoll ist.

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung reagiert aufgrund des überproportionalen Betriebsmittelbedarfs sensitiv auf Preisentwicklungen des Rohstoffmarkts für Sauerstoff und Koks. Es kann nicht damit gerechnet werden, dass der Erzeugerpreis des Recyclingphosphors gegenüber Rohphosphat rasch abnimmt. Auch überproportional wachsende Erlöse aus P-Verkauf verbessern deshalb die Bilanz nicht entscheidend. Durch die hohe energetische Eigenbedarfsdeckung entkoppelt sich jedoch die Preisentwicklung der Gesamtkläranlage besonders von den Stromlieferbedingungen des Marktes.

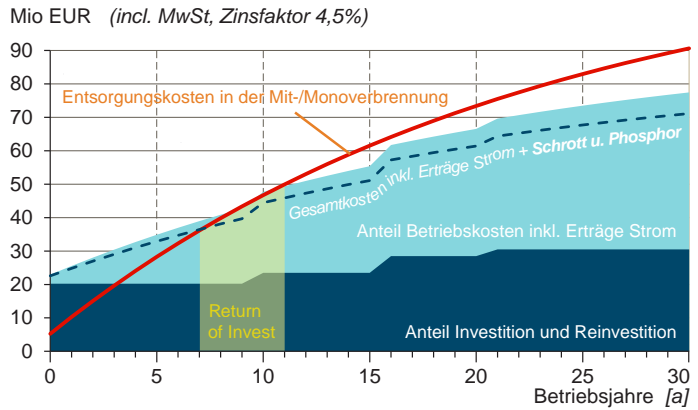


Abb. 6: Barwertvergleich von energetischer Fremdverwertung (rote Linie) und energetisch/stofflicher Eigenverwertung mit Mephrec (blaue Fläche). (Zinsfuß gemäß gebührenrechtlicher Kalkulation)

5. Pilotanlage

Die prinzipielle Eignung des Verfahrens und die Qualität der Produkte wurden experimentell am Gießerei-Institut der Technischen Universität Bergakademie Freiberg im Kleinkupolofen nachgewiesen. Die Technologie ist evident, aber in den notwendigen Dimensionen unerprobt. Die Risiken hinsichtlich Investitionsentscheidung, Realisierungs- und Betriebserfolg einer technischen Großlösung sind besonders im Verhältnis zum erwarteten Erlös noch zu hoch, um allein durch den Betreiber einerseits, oder einen potenziellen Generalübernehmer der Anlage (Wirtschaftspartner/Privatinvestor) andererseits übernommen werden zu können.

Eine Pilotanlage im halbtechnischen Maßstab soll im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts klären, ob die Technik zur Erreichung der genannten Ziele eine betriebssichere und wirtschaftliche Lösung ist.

5.1. Organisation

Im Rahmen der Projektentwicklung wurde nach Lösungen gesucht, um die hohen Risiken des Vorhabens zu begrenzen, beziehungsweise den Erfolg zu sichern. Das Forschungsvorhaben wird seitens der Bundesregierung gemäß vorläufiger Ergebnisse zu günstigen Förderquoten des Programms ERWAS [2] unterstützt. Die Kooperationspartner sind die Stadt Nürnberg als projektierende Gesellschaft und Standortsgeber, ein privater Wirtschaftspartner und Verfahrensgeber, der Betreiber einer

Klärschlammmonoverbrennungsanlage und vier renommierte Forschungsinstitute. Die Partner bleiben wirtschaftlich eigenständig und selbstverantwortlich; die Projektkoordination wird über einen Kooperationsvertrag geregelt. Nürnberg stellt die Infrastruktur und die laufenden Betriebsmittel einschließlich Betriebspersonal. Die Kosten dafür entstehen überwiegend proportional zur tatsächlichen Laufzeit des Projekts.

Das verfahrenstechnische und wirtschaftliche Hauptrisiko trägt der private Investor. Zusammen mit dem Verfahrensgeber entscheidet er maßgebend über die (wirtschaftliche) Zukunft des Verfahrens. Der größte Monoverbrennungsanlagenbetreiber Deutschlands bringt seine Erfahrungen besonders bei den Schmelzversuchen von Klärschlammasche ein. Die Zusammenarbeit mit den wissenschaftlichen Fachinstituten gewährleistet die transparente Überprüfung der Technologie unter technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Das Projekt wird seitens der Stadt durch eine GmbH abgewickelt. Die Umsatzsteuer auf Investition und Betriebsmittel stellt einen signifikanten Anteil an den potenziellen Verwertungskosten dar. Bei einer umsatzsteuerpflichtigen Gesellschaft ergibt sich deshalb ein Entsorgungskostenvorteil zwischen 5 % – 7 % gegenüber einer umsatzsteuerbefreiten Körperschaft. Langfristig werden zudem Vorteile hinsichtlich Betriebsverwaltung und Geschäftsabwicklung zusammen mit Kooperationspartnern erwartet.

5.2. Programm und Zeitplanung

Die Pilotanlage hat eine Anlagenleistung von ca. einem Fünftel der geplanten Großanlage. Die technische Ausstattung reduziert sich auf die wesentlichen Komponenten des Verfahrens (vergleiche Abb. 7). Das Projekt gilt als erfolgreich, wenn die Anlage die geplanten Produkte mit der Mindestqualität und -menge verlässlich erzeugt und eine Dauerleistung von 1000 Betriebsstunden erreicht. Es entstehen Betriebskosten von 2,2 Mio EUR. Der Gesamtaufwand einschließlich Abriss der Anlage beträgt bis zu 5,7 Millionen EUR (incl. MwSt). Die technischen Schwierigkeiten liegen im Bereich der Ofentechnik, der zuverlässigen und kontinuierlichen Betriebsweise und besonders in der erforderlichen Aufbereitung der Eingangsstoffe. Es ist unklar, mit welchem Aufwand die notwendige Stabilität und

Stückigkeit des Klärschlammbricketts erfolgen muss, damit der Schmelzvorgang sicher und kontinuierlich funktioniert. Die zweite Herausforderung liegt in der (preis)optimierten Gestaltung der Abluftreinigung.

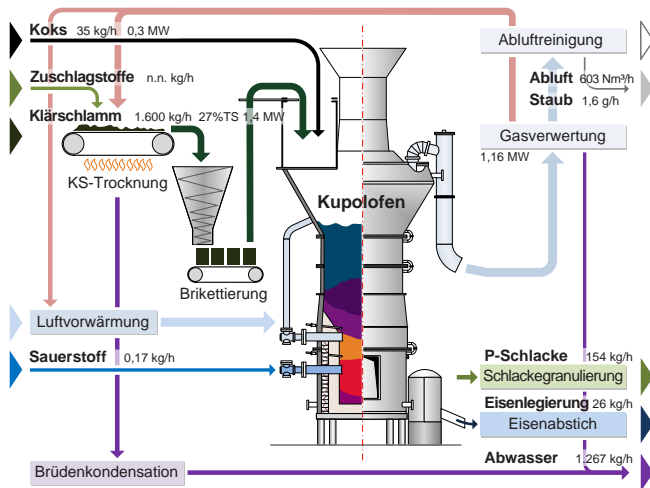


Abb. 7: Anlagenkomponenten des Mephrecversuchs der Pilotanlage Nürnberg im technischen Halbmaßstab

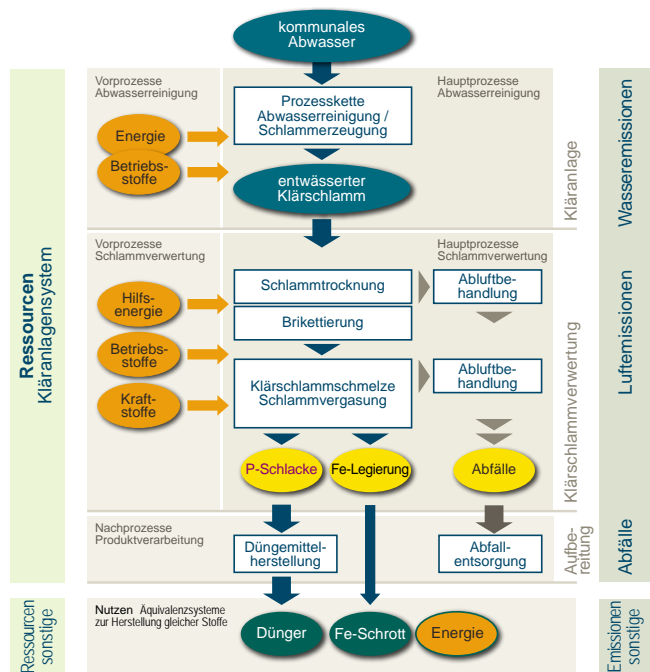


Abb. 8: Untersuchungsprogramm zur Bewertung der ökologischen Validität [16]

In einer Versuchsreihe wird die Variabilität des Verfahrens durch Einsatz verschiedener Ausgangsprodukte wie Klärschlammasche aus der Monoverbrennung untersucht. Die P-Verteilung in der Abluft, der Schlacke und dem geschmolzenen Eisen wird quantifiziert. Der Umgang mit Flugstaub und die ef-

fiziente Verarbeitung der Kondensate sowie der Abluft sind zu klären. Das gilt auch für die Trennung von Schlacke und Eisen.

Die hergestellten Klärschlammbricketts sind lagerfähig und könnten als Energiespeicher für eine antizyklische Nutzung überschüssiger Energie über die Sommermonate hinweg den Gesamtwirkungsgrad der Kläranlage optimieren.

Das Verfahren wird ökologisch bilanziert (siehe Abb. 8). Für eine Vermarktung des Recyclingphosphats sind die Nachweise für die REACH-Konformität mit umfänglicher Prüfung der Umwelt- und Gesundheitsrelevanz zu erarbeiten. Die Vermarktung der Technik und der Produkte wird studiert.

6. Aussichten

Die anhaltende Diskussion um die Klärschlamm Entsorgung, die Verstärkung der Integrationsbemühungen in Folge des Vorrangs der stofflichen Verwertung im Kreislaufwirtschaftsgesetz [5] und nicht zuletzt die international zunehmend an Bedeutung gewinnende Abhängigkeit vom Rohstoffmarkt für Phosphor [4] haben das Interesse der Bundesregierung an realen technischen Lösungen zur nachhaltigen Verwertung der Abwasserreststoffe verstärkt.

Rohstoffausbeutung widerspricht per se dem ökologischen Nachhaltigkeitsgebot. Der nachfragedominierte Preis der Klärschlamm Entsorgung spiegelt nicht die volkswirtschaftliche Situation der Kosten wieder.

Generell ist der Rohstoffmarkt stark von politischen Interessen und Spekulation geprägt. Die teilweise sehr hohen Umweltkosten für Gewinnung, Aufbereitung und Transport von natürlichem Rohphosphat aus Marokko, der Sowjetunion und anderen Nationen sind im Marktpreis des hergestellten Düngers nicht vollständig internalisiert.

Immerhin regelt der Preis für handelsüblichen NPK-Dünger indirekt dessen vernünftigen Verbrauch. Die Entsorgung von Klärschlamm in der Landwirtschaft dagegen wird durch das Entgelt der Klärwerksbetreiber gefördert und muss durch Gesetze begrenzt werden. Wie aber sollen zukünftig die bezahlten Entgelte überhaupt verwendet werden, um negative Langzeitwirkungen damit auch auszugleichen? Das Ergebnis der Förderinitiative der Bundesregierung zu „Kreislaufwirtschaft für Pflanzen-

nährstoffe, insbesondere Phosphor“ [1] macht offensichtlich, dass

- die meisten neuartigen Verfahren des Phosphorrecyclings noch sehr fern von einer industriellen Anwendung sind,
- der Investitions- und Betriebsmittelaufwand zur Rückgewinnung von Phosphor im Verhältnis zum Nutzen in der Regel unverhältnismäßig hoch sind und dass
- eine Refinanzierung des Aufwands durch Verkaufserlöse aus recyceltem Phosphor bis auf weite Zukunft nicht absehbar ist.

Das Problem ist volkswirtschaftlich nur dadurch lösbar, dass ein geeignetes Verfahren integraler Bestandteil der am Standort vorhandenen Anlagen- und Marktfaktoren wird durch

- Mitbenutzung vorhandener Infrastruktur wie Abwasser- und Abluftreinigung,
- einfache, möglichst einstufige Prozessketten mit Eigenverwertung der erzeugten Energie (Wärme und Strom) und
- Substitution von Aufwand für Logistik und Fremdentorgung durch Vermeidung von Abfall (Klärschlamm/Rechengut) bei gleichzeitiger Wertschöpfung (leicht verfügbares Phosphorsubstrat).

Der wasser- und gebührenrechtliche Auftrag der Gemeinden endet mit der Abwasserreinigung und Entsorgung der Abfallstoffe. Um einen finanziellen Deckungsbeitrag zu erzielen und eine ökologisch wie volkswirtschaftlich positive Wirkung zu entfalten, muss des Weiteren ein alternativer Markt für den Recyclingstoff entwickelt werden. Unter marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten könnte sich dieser im Umfeld der öffentlichen Siedlungswasserwirtschaft günstig entwickeln, wenn folgende Faktoren eingehalten werden:

- im Vergleich zu natürlichen, marktüblichen Rohphosphaten geringere Schadstoffgehalte,
- spekulationsfreie, weltmarktunabhängige und gesicherte Mindestliefermengen, sowie
- verlässliche Margen durch niedrige Abgabepreise.

6.1. Potenzial

Eine im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums erstellte Untersuchung [14] kommt zum Ergebnis, dass das Vorhaben zur Verhüttung des Klärschlammes nicht nur für die Metropolregion Nürnberg, sondern generell das aussichtsreichste Modell für eine Umsetzung einer landesweiten Phosphorrückgewinnung darstellt, da gleichzeitig das

stoffliche als auch das energetische Potenzial des Ausgangsstoffs genutzt wird, das Recycling eine Quote erzielt, die derzeit konkurrenzlos ist und die hergestellte P-Schlacke besonders geringe Mengen schädlicher Stoffe enthält.

Prinzipiell weist das Verfahren hohe Flexibilität hinsichtlich der Annahme weiterer P-haltiger Reststoffe aus Biovergärung oder aus der Tiermehlverwertung auf.

Die Klärschlammbricketts sind ein potenzieller Energiespeicher, der hinsichtlich des Ausgleichs von Nachfrage und Angebot von Wärmeenergie zur Optimierung der energetischen Bilanz der Kläranlage und gegebenenfalls auch eines Fernwärmeverbands beitragen kann.

6.2. Weitere Entwicklung

Wenn Entsorgung von Klärschlamm in der Landwirtschaft gesetzlich beendet werden sollte, stehen derzeit die Wege der Monoverbrennung und die der Mitverbrennung als wirtschaftlich vertretbare Alternativen zur Verfügung. Um neben der energetischen auch die stoffliche Verwertung zu gewährleisten, gibt es nur die Möglichkeit, entweder vor der Mitverbrennung einen Mindestanteil von ca. 30 bis 40% düngemittelfähiger P-Verbindungen aus Abwasser oder Faulschlamm zu extrahieren, oder im Falle der Monoverbrennung in einem zusätzlichen Verfahrensschritt die Asche thermochemisch oder nasschemisch aufzuschließen. Der Zwischenschritt einer Depositionierung von Monoverbrennungsasche ist ein denkbarer politischer Kompromiss, volkswirtschaftlich aber vermutlich nur das geringere Übel, da finanzieller und ökologisch wirkender Ressourcenaufwand die Vorteile des Verfahrens aufzehren. Der dritte Weg ist die Verwertung in einem gemeinsamen Prozess. Dieser Weg scheint aktuell sowohl energetisch als auch ökologisch die sinnvollste Lösung.

Die Behandlung von Abfall mit Schmelzvergasung zum Beispiel im Verfahren des Direct Melting ist bewährte Praxis. Es ist naheliegend, die Technik auch auf Klärschlamm anzuwenden und im Verhüttungsprozess die phosphorhaltige Schlacke vergleichbar zum Thomas-mehl weiter zu verwerten.

Gemäß den vorliegenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen hat Mephrec als integrierte Lösung das höchste Potenzial, zum gleichen Preis wie die Klärschlamm-Monoverbrennung die Ziele zu erreichen. (Einschätzung siehe Tabelle 3.)

6.3. Beitrag der Politik

„Die Entscheidung, ein Rückgewinnungsgebot für Phosphor aus relevanten Stoffströmen einzuführen, hängt nach Auffassung der Bundesregierung und der Bundesländer von verschiedenen Faktoren, wie z.B. Pflanzenverfügbarkeit der Recyclingdünger sowie technische Durchführbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnungsverfahren ab. Hier bedarf es nach Auffassung der Bundesregierung weiterer Erkenntnisse, so dass die Einführung eines Rückgewinnungsgebots derzeit als verfrüht eingeschätzt wird.“[4]

Diese Feststellung benennt das Kernproblem der Regierung: Sie will Weichen für eine sinnvolle Umweltpolitik stellen, kennt aber noch nicht die Handlungsoptionen, die auch wirtschaftlich überzeugend sind.

Unabhängig davon stehen an mehreren Orten Ersatzinvestitionen von Altanlagen zur Klärschlamm Entsorgung an. Kohlekraftwerke zur Mitverbrennung sollen mittelfristig abgestellt werden. Die Kontroverse um die Verwertung in der Landwirtschaft wird nicht kleiner werden.

Eine Subventionierung der Düngemittelproduktion ist über Abwassergebühren nicht möglich. Neben indirekten Fördermaßnahmen werden demnach Grenzwerte für die Qualität des abgegebenen Klärschlammes oder der Asche als Teil der Abwasserreinigung die zukünftige Recyclingquote definieren.

Es bedarf der Unterstützung geeigneter, finanziell leistungsfähiger Verbandsstrukturen, um in geeignete Technik zu investieren. Der Vorteil des Betreibers bei Eigenstromerzeugung und -nutzung muss zumindest im Rahmen des selbst erzeugten Synthesegases erhalten bleiben. Eine von der Regierung angekündigte, indirekte Steuer auf die Wiederverwertung des Abwassers ist ökologisch und wirtschaftlich kontraproduktiv. Zur Einführung des Verwertungsgebots sind Übergangsfristen in Höhe von mindestens einer Anlagengeneration (15 Jahre) notwendig, um Markt und Strukturen anzupassen.

Die Ziele lassen sich nur gemeinsam lösen und Umweltschutz hat seinen Preis. Eine effiziente und wirtschaftliche Verwertungsstrategie erfordert nicht zuletzt die Verständigung der Kommunen auf eine gemeinsame Strategie und Finanzierung über Lokalinteressen hinweg. Den Erfolg und die Erträge dürfen sich die Partner im Gegenzug auf das eigene Konto anrechnen.

System der Klärschlamm-nutzung:		P aus Abwasser / Klärschlamm + Mitverbrennung	KS- und Ascheverhüttung + P - Schlacke	Monoverbrennung + P aus Asche
Kriterium / Gewichtung		1. P - Extraktion 2. Energetische Nutzung	Stofftrennung mit energetischer Nutzung	1. Energetische Nutzung 2. P - Extraktion
Energetische Nutzung	15%	-	++	-- (+)*
Eigenbedarfsdeckung				
P-Verwertung (Effekt.+ Verfügbarkeit)	15%	○ (Fällung) + (chem. Aufschl.)	++	++
Qualität Produkte	10%	+ (MAP-Fällung)	++	+
Abfall	10%	○ (Emissionen Braunkohle)	+	○
Emissionen /sonstige Faktoren Ökobilanz	10%	○	+ (bei Eigenbedarfsdeckung)	○
Regionale Allokation und Wertschöpfung	5%	- (Handel) (+ kurze Entfern.)	+ (nur Großanlage)	+ (nur Großanlage)
Gesamtkosten der Verwertung	25%	+ (MAP-Fällung)	++	- (○)*
Investitionsbindung	5%	+	--	--
Erfahrung	5%	+	○	+
Gesamtwertung		○	++	○ (+)*

Tabelle 3: Einschätzung des Potenzials der alternativen Klärschlammverwertungskonzepte für die Metropolregion Nürnberg (* Ohne Zwischendeponierung mit späterer Aufbereitung im zweiten Schritt)

7. Fazit

Die Siedlungswasserwirtschaft der Zukunft muss neben den Fragen der Erhaltung der bestehenden Infrastruktur und der Vervollständigung der Abwasserreinigung auch die verfahrenstechnische Herausforderung der möglichst weitgehenden Verwertung des Abwassers und seiner Inhaltsstoffe lösen. Rechengut und Klärschlamm sind zunächst Rohstoff für die Eigenbedarfsdeckung an Wärme und Strom. Sie sollen aber zugleich den Dünger für die Nahrungsketten wieder zur Verfügung stellen, um das Potenzial von bis zu 40% des zukünftigen P-Bedarfs der Landwirtschaft und Nahrungsmittelindustrie zu decken. Obwohl einige Recyclingtechniken bessere Qualitäten als der Rohstoffmarkt liefern, bleibt die Herstellung von Düngemitteln ein Nebeneffekt. Der Preis für die Verwertung ist weiterhin der Entsorgungspreis für Klärschlamm. In diesem Sinne spielt die Optimierung der Verfahren hinsichtlich Energieausbeute und Eigenbedarfsdeckung weiterhin die bestimmende Rolle.

Unter der Prämisse „Sludge to energy and food“ hat das integrierte Verfahren der Klärschlammverhüttung mittelfristig das größte Potenzial. Die Abwasserwirtschaft kann auf diese Weise langfristig ihre volkswirtschaftliche Bedeutung durch Erschließung neuer, zusätzlicher organischer Abfallquellen für die Zukunft nicht nur behaupten, sondern ggf. vergrößern.

Literatur

- [1] **Bundesministerium für Bildung und Forschung 2001:** Schlusspräsentation Förderinitiative Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor.
- [2] **Bundesministerium für Bildung und Forschung 2012:** Bekanntmachung von Richtlinien zur Förderung von Forschungsvorhaben auf dem Gebiet „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft“ (ERWAS) des Förderschwerpunktes „Nachhaltiges Wassermanagement NaWaM“ im Rahmen des Förderprogramms „Forschung für nachhaltige Entwicklungen FONa“ vom 21. Februar 2012.
- [3] **Bundesrat 2013:** Beschluss Drucksache Nummer 576/13 vom 20.09.13.
- [4] **Bundesregierung 2012:** Antwort auf Anfrage Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN zum Thema Phosphatversorgung der Landwirtschaft sowie Strategien und Maßnahmen zur Förderung des Phosphatrecyclings Drucksache 17/11486.
- [5] **Bundestag 2012:** Novellierung Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24.02.2012 § 5 und § 6: Recycling vor sonstiger Verwertung, insbesondere energetische Verwertung.
- [6] **Bundestag 2012:** Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung DüMV) vom 05.12.2012: Düngemittel aus besonderen Ausgangsstoffen Tabelle 6 Nr. 6.2.5.
- [7] **CDU/CSU und SPD 2013:** Koalitionsvertrag Bundesregierung zur 18. Legislaturperiode 2013: Deutschlands Zukunft gestalten.
- [8] **Dittrich, B., Klose, R. 2008:** Schwermetalle in Düngemitteln. Schriftenreihe Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft 3/2008.
Leiterer, M., Riedel, R. 2011: Konformitätsbescheinigungen zur düngemittelrechtlichen Bewertung des phosphathaltigen Düngemittels aus Hochtemperatur Schmelzbehandlung von Klärschlamm nach dem Mephrec®-Verfahren). Thüringer Landesanstalt in Jena.
- [9] **DWA-Arbeitsgruppe KEK1.1 2013:** Stand und Perspektiven der Phosphorgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. Korrespondenz Abwasser, Abfall Nr. 10, S. 837-844.
- [10] **Everding, W. 2011:** Kostenabschätzung für das Mephrec-Verfahren, Aachen (unveröffentlicht).
- [11] **Everding, W. und Pinnekamp, J. 2011:** Kostenabschätzung von ausgewählten Phosphorrückgewinnungsverfahren. In: Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor, Schlusspräsentation der Förderinitiative am 14.09.2011 in Berlin. Schriftenreihe Gewässerschutz-Wasser-Abwasser Band 228, Aachen.
- [12] **Fehrenbach H., Reinhardt J. 2011:** Ökobilanzielle Bewertung der in der Förderinitiative entwickelten Verfahren. In: Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor, Schlusspräsentation der Förderinitiative am 14.09.2011 in Berlin. Schriftenreihe Gewässerschutz-Wasser-Abwasser Band 228, Aachen.
- [13] **Fehrenbach H., Reinhardt J. 2011:** Ökobilanzielle Bewertung des P-Rückgewinnungsverfahrens Mephrec® im Vergleich mit alternativen Verfahren für die Stadtentwässerung Nürnberg, Heidelberg. (Unveröffentlicht)
- [14] **Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT 2012:** Phosphorstrategie für Bayern (Abschlussbericht).
- [15] **Ingenieurbüro für Gießereitechnik GmbH (Ingitec) 2009:** DBU-Abschlussbericht AZ24557 „Metallurgisches Phosphor-Recycling aus Klärschlämmen und Filterstäuben als Voraussetzung für die wirtschaftliche Erzeugung eines hochwertigen Phosphor-Düngemittels aus Abfällen, Leipzig, 70 S.
- [16] **Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH 2013:** Beitrag zum Förderantrag Klärschlammverwertung Region Nürnberg, Antrag ERWAS4122044022.
- [17] **Kottwitz, A. 2013:** Erklärung zum mittelfristigen Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung. EUWID Nr. 39.2013.
- [18] **Nobuhiro Tanigaki NIPPON STEEL & SUMIKIN ENGINEERING CO., LTD. 2013:** Technical Introduction of the Direct-Melting-System (Summit Convergence Waste to Energy City 2013).
- [19] **Scheidig K., Mallon J., Schaaf M. 2013. P-Recycling-Dünger aus der Schmelzvergasung von Klärschlamm und Klärschlammmasche. Korrespondenz Abwasser, Abfall Nr. 10, S. 845-850.**
- [20] **Scheidig, K., Mallon, J., Schaaf, M. 2010:** Zukunftsfähige Klärschlammverwertung. Korrespondenz Abwasser, Abfall 57 (2010) Nr. 9, S. 902-915.
- [21] **Spitznagel M. 2011:** Bund/Länderstrategie zur nachhaltigen Phosphornutzung. 44. GWA Band 223, Aachen.



Arbeitsgemeinschaft Gewässerschutz obere Regnitz

Klärschlammverwertung Region Nürnberg GmbH

Adolf-Braun-Straße 33, 90492 Nürnberg · sun@stadt.nuernberg.de · www.sun.nuernberg.de