

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"  
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

## KRN-MEPHREC IN NÜRNBERG

### **Burkard Hagspiel, Nürnberg**

Bei der Abwasserreinigung der Stadt Nürnberg fallen zusammen mit den Städtepartnern Erlangen, Fürth und Schwabach rund 70.000 Tonnen Klärschlamm pro Jahr an. Er wird überwiegend in Braunkohlekraftwerken mitverbrannt, ein kleiner Anteil wird in die Landwirtschaft und in den Landschaftsbau verbracht.

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.

In der Schweiz ist die Schlammausbringung auf Ackerflächen seit langem schon verboten. Bayern, Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Niedersachsen favorisieren die Einstellung in absehbarer Zeit. 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 (6). Dieses Vorhaben ist konsequent, die Umsetzung aber ökologisch wie wirtschaftlich nicht gelöst.

In einem internationalen Ideenwettbewerb wurden durch den Eigenbetrieb Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg 13 Verfahren der Klärschlammverwertung mit Phosphorrückgewinnung untersucht. Die Technologie des metallurgischen Phosphorrecyclings im thermischen, reduktiven Schmelzvergasungsprozess eines Schachtofens (15) wurde als evident und zugleich wirtschaftlich valide eingestuft.

Nach erfolgreicher Akquisition von Fördermitteln des Bundes startete das Vorhaben als Pilot-Projekt im technischen Halbmaßstab zum 1. November 2014. Die Anlage wurde nach den strengen Auflagen 17. BImSchV im Mai 2015 genehmigt.

## 1 ZIELE

Die genannten Städtepartner der Metropolregion Nürnberg 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 Klärschlamminhaltsstoffe (Metalle + P-Dünger).
5. Minimierung sowie regionalen Allokation des Abfallrests.

Das Verfahren soll sich auf internationaler Ebene bewähren und wirtschaftlich sein. Die Wirtschaftlichkeit ist definiert als Preis der Monoverbrennung zuzüglich Monodeponierung der Asche für eine spätere Wiederverwendung des enthaltenen Phosphors oder alternativ als Preis für Verbrennung zuzüglich vorheriger Rückgewinnung wesentlicher Anteile des Phosphors im Klärschlamm.

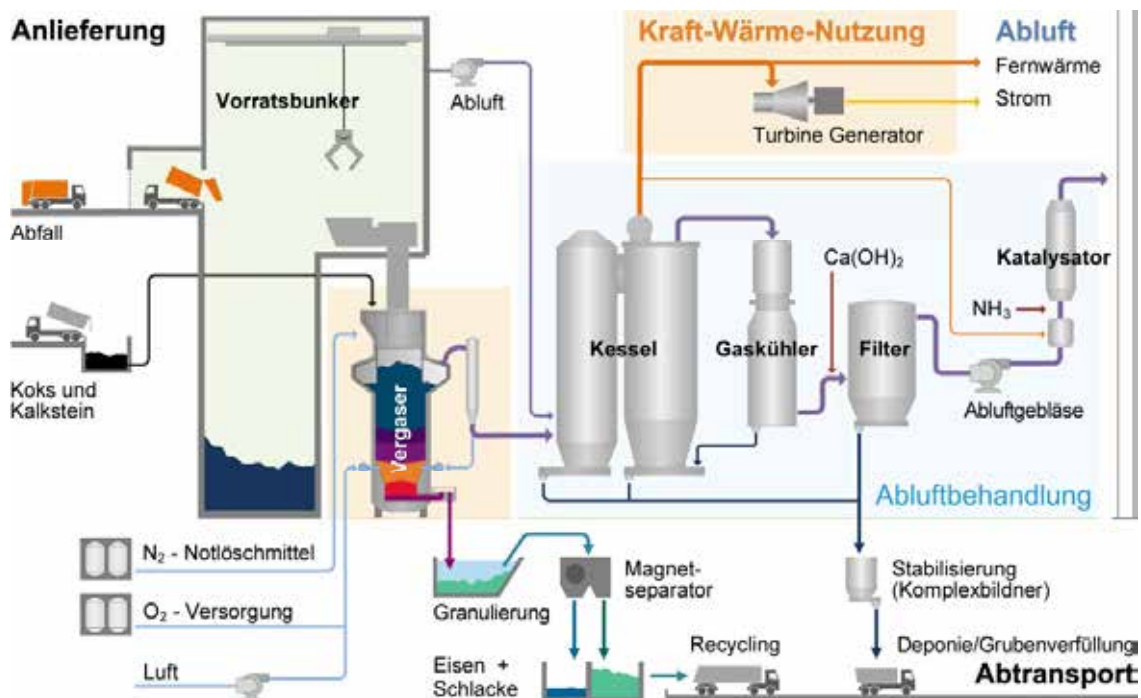
Die Stadt Nürnberg bearbeitet die damit zusammenhängenden Fragestellungen:

- Gestaltung eines regionalen Klärschlammmanagements.
- Integrierte Aufbereitung des Klärschlammes (Trocknung und Brikettierung) mit Eigenenergie.
- Energetische Verwertung der Trockensubstanz mit einem einstufigen Prozess zur thermischen Inertisierung und zur Abtrennung der Wertstoffe von Schwermetallen.
- Vermarktung der phosphathaltigen Schlacke.
- Optimierung der Verfahrenskomponenten und Betriebsweise zur Kostenminimierung.

## 2 PROJEKT

Seit mindestens 3.000 Jahren werden Metalle im Schachtofen geschmolzen. 1794 erfand John Wilkinson den Kupolofen, um auch im kleinen Maßstab Gusseisen zu erzeugen. Der japanische Konzern Nippon Steel Engineering entwickelte 1979 das Verfahren des Direct-Melting, bei dem nicht das Schmelzen von Metall, sondern von Abfällen im Vordergrund steht. Unter Zumischung von ca. 8 bis 10% Hüttenkoks und Kalkstein wird der Abfall ohne Druck vorerhitzt und getrocknet. In der nächsten Zone kommt es zur thermischen Zersetzung und Ausgasung. 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.

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik" am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt



**Abb. 1:** Vorbild für das Mephrec-Verfahren: Verfahrensschritte Direct-Melting (in Anlehnung an (16))

Als besondere Vorteile des Direct-Melting werden hervorgehoben (16)

- 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 SO<sub>2</sub>) etabliert.

## 2.1 Verhüttung von Klärschlamm

An der TU Bergakademie Freiberg wurden seit 1992 Versuche zur Schmelzvergasung von Abfällen durchgeführt. Auf dieser Basis konzipierten die Ingenieure der Firma ingitec GmbH, Leipzig, Ende 2002 das Verfahren zum metallurgischen Phosphor-Recycling (Mephrec®) und entwickelten es unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten für die Klärschlammbehandlung fort. Unter Zugabe von Koks, Kalk und Sauerstoff wird dabei getrockneter und brikettierter Klärschlamm verarbeitet (17).

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"  
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

- Gießerei- oder Hüttenkoks: ca. 10% der mineralischen Anteile im Klärschlamm  
Reduktionsmittel für die Metalle im Klärschlamm liefert zugleich die erforderliche Energie für den Schmelzprozess.  
Sichert aufgrund der hohen Stabilität (Temperaturbeständigkeit bis über 4000°C) die Standfestigkeit der Schachtofenfüllung und deren Durchlässigkeit.
- Der Kalk erniedrigt den Schmelzpunkt der Klärschlammbricketts (Kryoskopie) und trägt dazu bei, dass gleichzeitig höhere Temperaturen in der Verflüssigungszone herrschen, der Temperaturpunkt der Erweichung und vollständigen Verflüssigung also schneller überschritten wird.
- Der Sauerstoff ist das Reaktionsmittel für den Kohlenstoff. Mit ihm wird der Schmelzprozess durch Steuerung der Temperatur in der Kernzone des Reaktors gesteuert. Während mit der kontinuierlichen Heißwindzufuhr der Ofen warm gehalten wird, erzeugt die Injektion von Reinsauerstoff in Minutenschnelle Temperaturen bis über 2.000°C. Die Metalle im Klärschlamm und dessen silikatischen Verbindungen tropfen in der Schmelzzone aus der Schüttung ab.
- Die Eisenverbindungen im Klärschlamm sind sowohl für den beschriebenen Verhüttungsprozess maßgeblich, als auch für den Austrag aller unerwünschten Schwermetalle. Die reduzierten Eisenoxide nehmen sämtliche metallischen Komponenten als Legierung auf. Durch Steuerung des Kohlenstoffgehalts wird der eutektische Punkt definiert, bei dem die Mischphase des Klärschlammes und der Zuschlagstoffe vom festen, direkt in den flüssigen Zustand übergeht.

In der Kernzone des Mephrec-Reaktors werden 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 am Boden des Schachtofens sammeln. Die leichtere, flüssige Schlacke schwimmt auf und wird über einen Siphon vom flüssigen Eisen getrennt. Die Schlacke wird im Wasserbad granuliert und als Dünger mechanisch weiter aufbereitet.

Das Verfahren ist flexibel auch für andere phosphorhaltige Stoffe wie Klärschlammmasche, Tiermehl und andere tierische Abfälle 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 Stahlindustrie zu verankern (5). Mephrec wird inzwischen auch in der deutschen Fachwelt als eigenständiges Verfahren neben dem thermochemischen Aufschluss von Verbrennungaschen anerkannt (8).

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"  
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

**Tabelle 1:** Berechnete Leistungsdaten Verhüttung bei Anlagenvollausbau für  
Gesamtklärschlammaufkommen Nürnberg, Erlangen, Fürth und Schwabach

Input		Output	
Klärschlamm 27%TS	70.000 Mg/a	Synthesegas	51,00 GW/a
Betriebszeit	7.500 h/a	Rohgasmenge	6.435 Nm <sup>3</sup> /h
Klärschlamm 100%TS	2,50 Mg/h	(mit 6,2% H <sub>2</sub> ; 1,4% CH <sub>4</sub> ; 0,2% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ; 17,6% CO)	
KS-Briketts 85%TS	3,00 Mg/h	Feuerleistung	8,15 MW
Gießerei-/Hüttenkoks	0,18 Mg/h		(3,20 MWEL)
Techn. Sauerstoff	0,75 Mg/h	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Schlacke-Granulat	1.275 kg/h
		davon P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	196 kg/h
		Fe-Schrott	65 kg/h
Betriebsbeschäftigte	10 - 15 Pers.	Staub (vor Abluftreinigung)	36 g/h
		Abwasser (Brüden/Quensch)	840 l/h

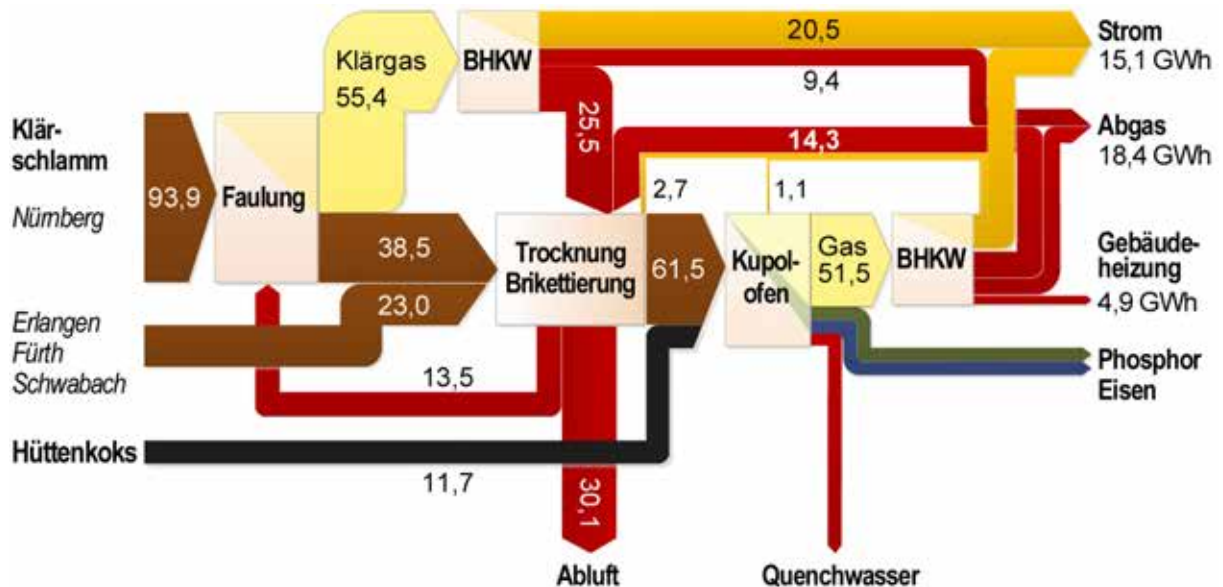


**Abb. 2:** Eisenabstich und Ablauf der flüssigen Schlacke beim Kupolofenbetrieb  
(Beispiel Luitpoldhütte AG Amberg 2015)

Die Schmelzvergassungsverfahren direct-melting, surface-melting-furnace und Mephrec sind vergleichbar, aber verschieden gebaut und prozesstechnisch 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.

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"  
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Der Brennwert des Klärschlammes, vergleichbar mit Braunkohle, ist zu niedrig, um die gewünschte Gasqualität zur motorischen Nutzung zu erzielen. Der Vergasungsprozess wird deshalb durch unterstöchiometrische Zugabe von Sauerstoff höherwertiges Synthesegas (Wassergas und CO) erzeugen. Die Überschusswärme wird für die Klärschlamm-trocknung verbraucht. Durch die geplante Verlängerung der Wertschöpfungskette kann der Deckungsgrad an selbst erzeugtem Strom für den Stadtentwässerungsbetrieb auf über 90% gesteigert werden.



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

## 2.2 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 der Schlacke (Rest in Eisenschmelze und Flugstaub).
- 12 bis 20% liegen als  $P_2O_5$  vor, der Rest in sonstigen P-Verbindungen.
- > 80% der erzeugten P-Schlacke sind pflanzenverfügbar.

Nach aktuellen Düngeversuchen bewährt sich die Mephrec Kupolofenschlacke als Dünger für schwere, lehmige Böden. Er entwickelt hier wie der traditionelle Einsatz von Thomasmehl eine besondere Langzeitdüngewirkung und trägt aufgrund der hohen silikatischen und kalkhaltigen Komponenten zu einer Lockerung und Aggregation des Bodengefüges bei. Aufgrund seiner Langzeitstabilität ist der Dünger unter Gesichtspunkten des Boden- und Grundwasserschutzes vorteilhaft. Der Phosphor wird





### **2.3 Ökobilanz**

Das Verfahren Mephrec wurde mit dem bisherigen Entsorgungsweg der Mitverbrennung im Braunkohlekraftwerk verglichen (12). Die Systemgrenze der Untersuchung 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 (11).

Ca. 68% des gesamten Energiegehalts von Klärschlamm wird im Klärwerk durch Vergärung und Kraft-Wärme-Kopplung genutzt. Die Optimierung dieser Prozessschritte erzielt die höchsten ökologischen Effekte 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.

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 so auf die Vorhaltung des Kohlekraftwerkanteils verzichtet werden. Die Ökobilanz der Treibhausgasemissionen wird auch in diesem Punkt positiv.

### **2.4 Kosten Großvorhaben**

Die Verfahrenstechnik Mephrec ist kapitalkosten- und besonders betriebsmittelintensiv. Auf Grundlage einer Machbarkeitsstudie werden die Investitionskosten dafür auf über 25 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 berücksichtigten Verfahren kalkuliert. Danach würde der theoretische Erzeugungspreis mit 10,50 EUR/kg P etwa das 8-fache des Marktpreises von

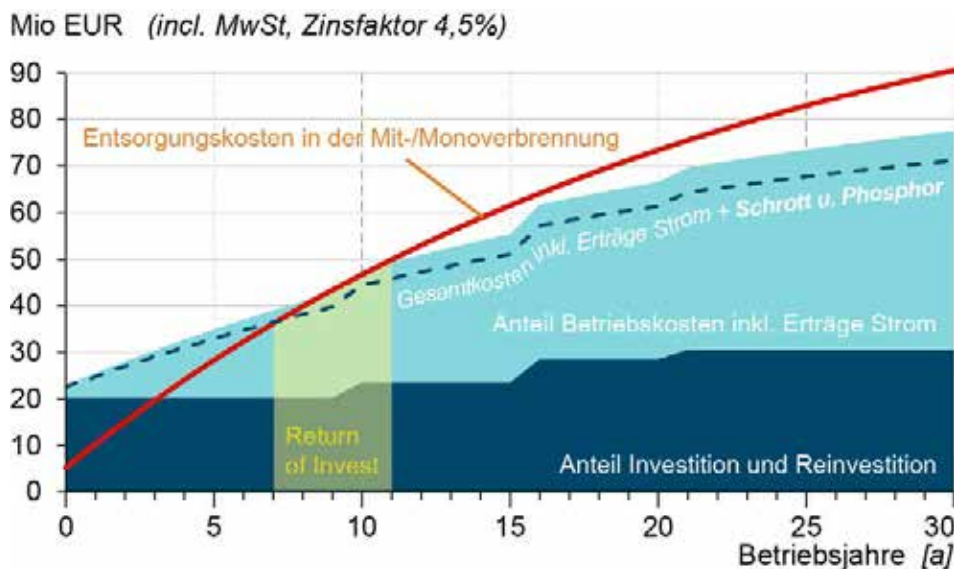


Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"  
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Naturphosphat betragen (entspricht circa 5 EUR/E-a). Der Preis ist fast 4-fach so hoch wie das preisgünstigste Recyclingverfahren (9) 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.

Die Vorhaltung der anspruchsvollen Technik, der Logistik und des Betriebspersonals ist Ursache dafür, dass ein Downscaling der Anlage nicht sinnvoll ist. Die Gemeinden müssen also bei der Klärschlammverarbeitung zusammenarbeiten.

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

### 3 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,

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"  
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

oder einen potenziellen Generalübernehmer der Anlage (Wirtschaftspartner/Privatinvestor) andererseits übernommen werden zu können.

Eine Pilotanlage im halbtechnischen Maßstab soll im Rahmen des ERWAS Forschungs- und Entwicklungsverbundprojekts KRN-Mephrec klären, ob die Technik zur Erreichung der genannten Ziele eine betriebssichere und wirtschaftliche Lösung ist.

### 3.1 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 unterstützt (2). Die Kooperationspartner sind die Stadt Nürnberg als projektierende Gesellschaft und Standortsgeber, der private Wirtschaftspartner Baumgarte Boiler Systems GmbH, der Betreiber der Klärschlammmonoverbrennungsanlage Inovatherm GmbH, Lünen und vier renommierte Forschungsinstitute RWTH-Aachen, Universität der Bundeswehr München, Fraunhofer Umsicht Sulzbach-Rosenberg und IFEU Heidelberg.

Nürnberg stellt die Infrastruktur und die laufenden Betriebsmittel einschließlich Betriebspersonal. Das verfahrenstechnische und wirtschaftliche Hauptrisiko trägt der private Investor. Zusammen mit dem Verfahrensgeber Ingitec Engineering GmbH entscheidet er maßgebend über die (wirtschaftliche) Zukunft des Verfahrens. Die Zusammenarbeit mit den wissenschaftlichen Fachinstituten gewährleistet die transparente Überprüfung der Technologie unter technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten.



Abb. 5: Fördervorhaben des BMBF [[www.bmbf.nawam-erwas.de](http://www.bmbf.nawam-erwas.de)]

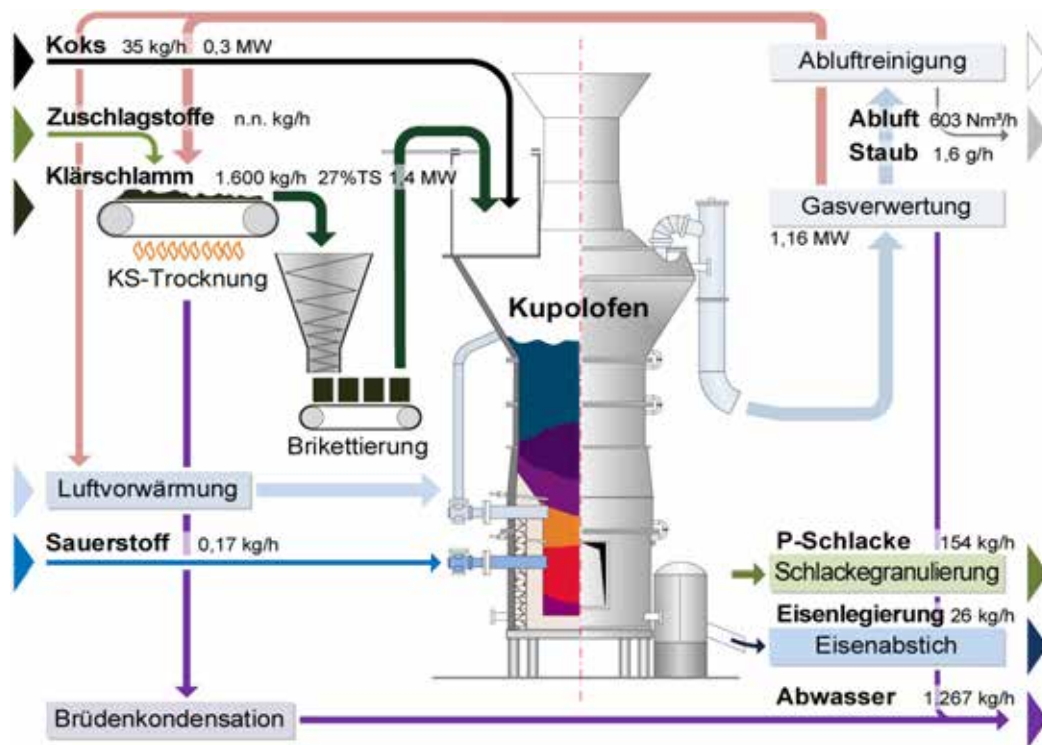
### 3.2 Programm und Zeitplanung

Die Pilotanlage hat eine Anlagenleistung von cirka einem Fünftel der geplanten Großanlage. Die technische Ausstattung reduziert sich auf die wesentlichen Komponenten des Verfahrens. Das Projekt gilt als erfolgreich, wenn die Anlage die geplanten Produkte mit der Mindestqualität und -menge verlässlich erzeugt und eine Dauerleistung von mindestens 1.000 Betriebsstunden erreicht. Es entstehen Betriebskosten von 2,2 Mio EUR. Der Gesamtaufwand einschließlich Abriss der Anlage beträgt 5,7 Mio. EUR (incl. MwSt).

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik" am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Die technischen Schwierigkeiten liegen im Bereich der Ofentechnik (Form und Material), der zuverlässigen und kontinuierlichen Betriebsweise und in der erforderlichen Aufbereitung der Eingangsstoffe. Die notwendige mechanische Festigkeit und Langzeitstabilität der Klärschlammbricketts wurde in Versuchen bereits ermittelt. Die Klärschlammbricketts können wie Braunkohle über Jahre hinweg trocken und geruchsarm gelagert werden.

Damit der Schmelzvorgang sicher und kontinuierlich funktioniert, ist im nächsten Schritt das Schmelzverhalten bei gleichzeitig stabiler Prozessgasführung im Ofenschacht durch praktische Versuche und Variation der Mischungsverhältnisse zu erforschen und die Reaktionsergebnisse zu quantifizieren. Eine weitere Herausforderung ist die (preis)optimierte Gestaltung der Abluftreinigung.



**Abb. 6:** Anlagenkomponenten Mephrecversuch Pilotanlage Nürnberg im technischen Halbmaßstab, Baujahr 2015

In einer Versuchsreihe wird die Variabilität des Verfahrens durch Einsatz weiterer Ausgangsprodukte wie Klärschlammmasche aus der Monoverbrennung untersucht.

Die P-Verteilung in der Abluft, der Schlacke und dem geschmolzenen Eisen wird quantifiziert. Der Umgang mit Flugstaub (Rückführung in den Schmelzprozess) und die effiziente Verarbeitung der Kondensate sowie der Abluft sind zu klären. Das gilt auch für die exakte Trennung von Schlacke und Eisen. Das Verfahren wird ökologisch bilanziert. 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.

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"  
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Um die Jahreswende 2015/2016 soll die Pilotanlage in Betrieb gehen und die Entscheidungen für die Realisation einer großtechnischen Anlage bis Ende 2017 fallen.

#### **4 AUSSICHTEN**

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

Während bei handelsüblichen NPK-Dünger indirekt der steigende Preis dessen vernünftigen Gebrauch regelt, wird die Entsorgung von Klärschlamm in der Landwirtschaft durch das Entgelt der Klärwerksbetreiber gefördert statt gebremst. Nur durch Gesetze wird die Anreicherung der Schadstoffe im Boden wirksam und umweltbezogen begrenzt.

Das Ergebnis der Förderinitiative der Bundesregierung zu „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ (1) macht offensichtlich, dass

- die meisten neuartigen Verfahren des Phosphorrecyclings nach wie vor fern von einer industriellen, praxistauglichen 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 rezykliertem Phosphor bis auf weite Zukunft nicht absehbar ist.

Das Problem ist volkswirtschaftlich 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 Verbesserung der Wertschöpfung.

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 ein alternativer Markt für den Recyclingstoff entwickelt werden. Unter marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten könnte sich dieser im Umfeld der öffentlichen Siedlungswasserwirtschaft günstig entwickeln, wenn der Dünger aus Klärschlamm mit

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"  
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

besonders geringen Schadstoffgehalten in größeren, verlässlichen Mengen zu garantierten konkurrenzfähigen Abgabepreisen produziert wird.

#### 4.1 Potenzial

Aktuelle Untersuchungen (13) und (14) kommen 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. Der Preis pro erzieltm Kilo P wird mittelfristig mit unter 5 EUR berechnet und es wird zusätzlich ein Energieplus erwirtschaftet.

In der aktuellen P-Rex-Studie (14) wurde für die Schweiz als preisgünstigste Variante mit 0,28 EUR/EW·a die überwiegende Monoverbrennung und das anschließende Leaching der Asche mit anschließender Deponierung kalkuliert. Als ökologisch-ökonomische Bestvariante wurde hingegen die metallurgische Schmelzvergasung des Klärschlammes festgestellt. Bei konsequenter Umsetzung des Verfahrens würden für die Schweiz insgesamt ca. 5.100 Mg P (12.600 Mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) zu einem Preis von 1,61 EUR/EW·a und einem laufenden Energiebedarf von lediglich 0,14 W/EW erzeugt. Gesamtenergiebilanztechnisch wird ein Plus erwirtschaftet.

Die Schweizer Studie kommt zusätzlich zum Ergebnis, dass das Verfahren wirtschaftlich vertretbar ist und stellt hierzu folgende Addition auf.

Abwasserreinigung	130 EUR/EW·a
Elimination Mikroverunreinigungen	17 EUR/EW·a
Metallurgische KS-Verwertung	5 EUR/EW·a
<hr/>	
Gesamtkosten	152 EUR/EW·a

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 Fernwärmeverbunds beitragen kann.

Im Klärschlammbricketts landet auch die Pulveraktivkohle der Eliminationsstufe von Mikroverunreinigungen der Kläranlage. Um den gleichen Kohlenstoffgehalt reduziert sich dadurch der Aufwand an Koks für den Schmelzofen.

Die energetische und zugleich stofflich vollständige Verwertung des Klärschlammes ist aus Sicht Nürnbergs der dritte Weg. Er 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

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"  
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

und im Verhüttungsprozess die phosphorhaltige Schlacke, vergleichbar zum Thomasmehl, weiter zu verwerten.

Gemäß den vorliegenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen hat Mephrec als integrierte Lösung das höchste Potenzial, zum gleichen Preis wie die Klärschlamm-Monoverbrennung zuzüglich Monodeponierung die Ziele zu erreichen.

## **4.2 Weiterentwicklung**

„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 ist nachvollziehbar: Die Weichen für eine sinnvolle Umweltpolitik setzt die Kenntnis der Handlungsoptionen voraus, die auch wirtschaftlich überzeugend sind.

Rechengut und Klärschlamm sind zunächst Rohstoff für die Eigenbedarfsdeckung der Kläranlagen 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 prinzipiell noch vergrößern.

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"  
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

## 5 QUELLENVERZEICHNIS

- Bundesministerium für Bildung und Forschung 2001: Schlusspräsentation Förderinitiative Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor.
- 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.
- Bundesrat 2013: Beschluss Drucksache Nummer 576/13 vom 20.09.13.
- Bundesregierung 2012: Antwort auf Anfrage Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN zum Thema Phosphatversorgung der Landwirtschaft sowie Strategien und Maßnahmen zur Förderung des Phosphatreyclings Drucksache 17/11486.
- 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.
- CDU/CSU und SPD 2013: Koalitionsvertrag Bundesregierung zur 18. Legislaturperiode 2013: Deutschlands Zukunft gestalten.
- 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.
- DWA-Arbeitsgruppe KEK1.1 2013: Stand und Perspektiven der Phosphorgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. Korrespondenz Abwasser, Abfall Nr. 10, S. 837-844.
- 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.
- Everding, W. 2011: Kostenabschätzung für das Mephrec-Verfahren, Aachen (unveröffentlicht).
- 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.



Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"  
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Fehrenbach H., Reinhardt J. 2011: Ökobilanzielle Bewertung des P-Rückgewinnungsverfahrens Mephrec® im Vergleich mit alternativen Verfahren für die Stadtentwässerung Nürnberg, Heidelberg. (Unveröffentlicht)

Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT 2012: Phosphorstrategie für Bayern (Abschlussbericht).

Nätörp, A., Hukari, S.: Eine Strategie für Rückgewinnung von 80% des Phosphors in Schweizer Klärschlämmen. Offenburg 2015

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.

Nobuhiro Tanigaki NIPPON STEEL & SUMIKIN ENGINEERING CO., LTD. 2013: Technical Introduction of the Direct-Melting-System (Summit Convergence Waste to Energy City 2013).

Scheidig, K., Mallon, J., Schaaf, M. 2010: Zukunftsfähige Klärschlammverwertung. Korrespondenz Abwasser, Abfall 57 (2010) Nr. 9, S. 902-915.