

Susanne Malms; Dr.-Ing. David Montag

# Klärschlammmaschen: Phosphor-Ressource der Zukunft

Die Monoverbrennung von Klärschlamm mit anschließendem Phosphorrecycling ist eine Alternative zur landwirtschaftlichen Verwertung. Derzeit fehlen dafür Kapazitäten und wirtschaftliche Lösungen. Ein Schatz auf Halde.

Die statische Reichweite der Phosphorreserven beträgt ca. 300 Jahre /1/. Der Anstieg der Weltbevölkerung von derzeit 7,2 Mrd. Menschen auf prognostizierte 9,7 Mrd. Menschen bis zum Jahr 2050 /2/ wird zu einer zunehmenden Verknappung des Rohstoffs führen. Phosphat als Pflanzennährstoff kann in Düngemitteln nicht substituiert werden. Die Qualität des Rohphosphats wird durch sinkende Phosphatgehalte und zunehmende Schadstoffgehalte, wie Uran und Cadmium, zunehmend schlechter. Deutschland ist zu 100 % auf Importe angewiesen, da es über keine eigenen Phosphaterzlagerrstätten verfügt.

In Deutschland fielen im Jahr 2012 rund 1,85 Mio. Mg TR (TR = Trockenrückstand) Klärschlamm aus der kommunalen Abwasserreinigung an, die zu 55 % in Müllverbrennungsanlagen, Kraftwerken oder der Zementindustrie mitverbrannt oder in Monoverbrennungsanlagen behandelt wurden /3/. Von den im Jahr 2011 thermisch verwerteten Klärschlämmen wurden 43 % Monoverbrennungsanlagen angegliedert /4/.

Der Phosphorgehalt im jährlich anfallenden Klärschlamm beträgt ca. 69.000 Mg P. Daraus ergibt sich rechnerisch ein Phosphorgehalt von ca. 16.300 Mg P in den Klärschlammmaschen aus der Monoverbrennung kommunalen Klärschlammes. Dies entspricht 14 % des in Form von mineralischem Düngemittel jährlich importierten Phosphors von insgesamt 120.000 Mg P/a /5/.

Bislang werden Klärschlammmaschen i. d. R. mit anderen Abfällen vermischt deponiert, wodurch eine spätere wirtschaftliche Phosphorrückgewinnung erschwert wird. Auch die stoffliche Verwertung, beispielsweise

im Bergversatz, macht eine spätere Phosphorrückgewinnung praktisch unmöglich. Durch eine Novellierung der Klärschlammverordnung werden in Zukunft Maßnahmen zur Sicherung der in Klärschlämmen und Klärschlammmaschen enthaltenen Ressource Phosphor erwartet. Die Langzeitlagerung von Klärschlammmaschen stellt dabei eine Möglichkeit dar /6/.

## Rechtliche Anforderungen an die Langzeitlagerung

Klärschlammmaschen sind als Abfall einzuordnen, weshalb für deren Lagerung die Deponieverordnung (DepV) greift. Gemäß DepV ist eine, gegenüber der Deponierung genehmigungsrechtlich einfachere, Langzeitlagerung von Klärschlammmaschen aus der Monoverbrennung durch eine Ausnahme von der Nachweispflicht zeitlich auf fünf Jahre befristet möglich. Eine Ver-

längerung der Ausnahme kann maximal bis zum 30. Juni 2023 erfolgen. Die Novelle der Klärschlammverordnung sieht eine Verlängerung der Frist für solche Aschen vor /6/.

Für die Errichtung von Langzeitlagern der Langzeitlagerklassen (LK) 0-III gelten die gleichen Anforderungen wie an die entsprechenden Deponien. In der DepV sind für die einzelnen Klassen Zuordnungswerte für organische Parameter, Feststoffkriterien und Eluatkriterien definiert.

## Charakterisierung von Klärschlammmaschen

Die Hauptkomponenten von Klärschlammmaschen sind Oxide von Silizium, Aluminium, Eisen, Calcium und Phosphor (Tab. 1). Klärschlammmaschen mit rein kommunalem Abwasser-Hintergrund weisen einen Phosphorgehalt von im Mittel 9 % auf, während ausschließlich industrielle Klärschlammmaschen lediglich 2,3 % P beinhalten /8/.

Analyseergebnisse von Klärschlammmaschen zeigen, dass für die meisten Parameter die Zuordnungswerte der DepV für eine LK 0 eingehalten werden, jedoch bei jeder Asche einzelne Parameter Überschreitungen aufweisen. Die Parameter, die nahezu durchgängig die Zuordnungswerte für eine LK 0 nicht einhalten, sind Fluorid, Sulfat sowie der Gesamtgehalt an gelösten Feststoffen. Die Parameter, die häufig die Zuordnungswerte für eine LK I oder auch LK II nicht einhalten, sind Molybdän und Selen. Für die meisten Klärschlammmaschen ist eine Lagerung in Langzeitlagern der LK II möglich /7/.

Tab. 1 Hauptelementgehalte von Klärschlammmaschen /8/

Element	Spannweite (Massen%)	Mittelwert (Massen%)	Anzahl Aschen (-)
Aluminium	0,7 - 20,2	5,2	252
Calcium	6,1 - 37,8	13,8	252
Eisen	1,8 - 20,3	9,9	252
Kalium	< 0,006 - 1,7	0,9	227
Magnesium	0,3 - 3,9	1,4	252
Natrium	0,2 - 2,6	0,7	252
Phosphor	1,5 - 13,1	7,3	252
Schwefel	0,3 - 6,9	1,5	252
Silizium	2,4 - 23,7	12,1	252
Titan	0,1 - 1,5	0,4	252

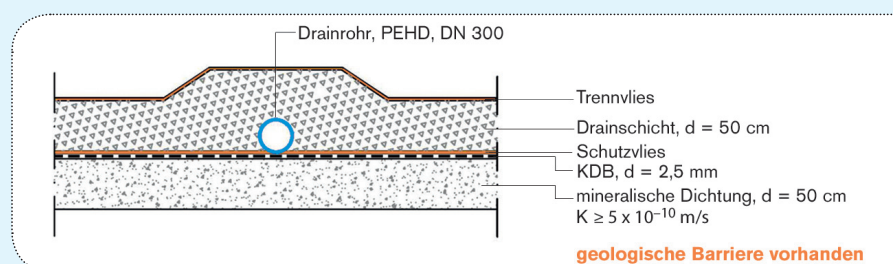


Bild 1 Systemaufbau Basisabdichtung Langzeitlager LK II, LK III /7/

Grafik: RWTH Aachen

Weitere Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp;  
Karl-Georg Schmelz; Maren van der Meer;  
Falko Lehrmann; Ute Blöthe; Ralph Eitner;  
Wolfgang Klett

**Technische und betriebliche Aspekte**

Die Mächtigkeit der geologischen Barriere muss bei der LK II mind. 1 m und bei der LK III mind. 5 m betragen. Für den Basisaufbau gelten für beide LK die gleichen technischen Anforderungen (Bild 1). Die Abdichtung kann beispielsweise durch eine mineralische Dichtung mit einer im Pressverbund aufliegenden Kunststoffdichtungsbahn (KDB) ausgeführt werden. Das darüber liegende Dränsystem muss wegen der Kornverteilung der Aschen durch ein Trennvlies vom Deponiekörper abgegrenzt werden.

Bei der LK I kann bei sonst gleichen Anforderungen wie bei der LK II die zweite Abdichtungskomponente (hier KDB) entfallen. Aufgrund der zu erwartenden geringen Schadstoffkonzentrationen aus Sicker- und Oberflächenwasser des Langzeitlagers wird für die Einleitung in ein Oberflächengewässer lediglich eine Behandlung durch ein Absetzbecken empfohlen. Jedoch muss eine abschließende Absicherung der Einhaltung der Anforderungen im praktischen Betrieb erfolgen.

Für den flächigen Einbau in schwach geneigten Deponiefeldern ist die Einstellung eines definierten Einbauwassergehalts erforderlich, so dass sich die Asche gut verdichten lässt, die Flächen sicher befahrbar sind, evtl. Oberflächenabfluss gewährleistet ist und Probleme mit Staub vermieden werden. Bei Steinkohleflugaschen hat sich ein Einbauwassergehalt von ca. 15 bis 20 % bewährt; dabei ließ sich die Asche auf eine Einbaudichte von ca. 1,4 Mg/m<sup>3</sup> verdichten. Ähnliche Größen werden auch für Klärschlammaschen erwartet.

Die einzelnen Einbauflächen in Größe von ca. 1 ha sollten durch Randwälle und Zwischenwälle zur Vermeidung ungeordneter seitlicher Wasserabflüsse mit entsprechenden Erosionsrinnen begrenzt werden. Ein Austrocknen der Einbaufelder muss durch Beregnungseinrichtungen verhindert werden. Zur Minimierung des Sicker- und Oberflächenwasserabflusses sowie der Staubbelastung von freiliegenden Böschungflächen ist eine vorübergehende Zwischenabdeckung sinnvoll /7/.

**Klärschlammmonoverbrennung – Entwicklung der Aschemengen**

Durch das Greifen der in der Düngemittelverordnung definierten schärferen gesetzlichen Anforderungen wird die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung seit Beginn des Jahres 2015 stärker eingeschränkt. Gemäß dem Entwurf der AbfKlärV-Novelle soll die Klärschlammausbringung zu Düngezwecken nach einer Übergangsfrist weitgehend eingestellt werden. Die Sicherung des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors

soll durch ein P-Rückgewinnungsgebot und ein Mitverbrennungsverbot von Klärschlamm unter bestimmten Voraussetzungen erfolgen. Phosphor soll durch geeignete Verfahren aus dem Schlammswasser, Faulschlamm sowie der Klärschlammmasche rückgewonnen werden. Kläranlagen der Größenklasse (GK) 4 und 5, deren Klärschlamm einen P-Gehalt von mind. 20 g P/kg TR aufweist, müssen voraussichtlich ab dem Jahr 2025 den P-Gehalt durch ein P-Rückgewinnungsverfahren unter diesen Wert reduzieren. Bei sehr hohen P-Konzentrationen im Klärschlamm muss mindestens eine Abreicherung um 50 % erfolgen; sie gilt als ausreichend, auch wenn die Reduktion auf einen Wert unter 20 g P/kg TR nicht erreicht wird. Die P-abgereicherten Schlämme dürfen dann einer Mitverbrennung unterzogen werden. Als Alternative zu der unmittelbaren P-Rückgewinnung aus dem Klärschlamm soll eine Monoverbrennung zulässig sein, wobei der in der Asche enthaltene Phosphor rückgewonnen oder die Asche einer stofflichen Verwertung unter Nutzung des P-Gehalts zugeführt werden muss. Geschieht dies nicht, soll eine separate Langzeitlagerung der Aschen erfolgen müssen.

Die genannten Maßnahmen werden sich auf die notwendigen (Mono-)verbrennungskapazitäten auswirken. Für die Entwicklung eines Lagerungskonzepts für Klärschlammaschen wurde davon ausgegangen, dass ab 2015 alle vorhandenen Monoverbrennungs-

anlagen durch kommunale Schlämme ausgelastet sind. Die Abschätzung der Mengen, die ab 2025 thermisch zu behandeln wären, erfolgte unter Einbeziehung der oben genannten geplanten gesetzlichen Novellierungen. Des Weiteren wurde angenommen, dass 60 % der Klärschlämme aus den Kläranlagen der GK 1 bis GK 3, in denen 9 % aller Klärschlämme anfallen, auch ab dem Jahr 2025 noch stofflich verwertet werden dürfen. Thermisch zu behandeln wären ab dem Jahr 2025 somit rund 1,75 Mio. Mg TR/a (94,6 %) /7/.

Tabelle 2 zeigt den Status quo (Jahr 2012) der Klärschlammverwertung für die unterschiedlichen Entsorgungswege sowie die abgeschätzte Entwicklung bis zum Jahr 2025, ausgehend von einem konstanten Klärschlammfall von 1,85 Mio. Mg TR/a. Es wird davon ausgegangen, dass ab 2025 70 % der thermisch zu behandelnden Schlämme monoverbrannt werden. Die in den einzelnen Bundesländern bereits vorhandenen sowie die erwarteten zusätzlich notwendigen Monoverbrennungskapazitäten zeigt Bild 2.

**Standorte von Langzeitlagern**

Als potenzielle Standorte für Langzeitlager kommen neben Standorten von Verbrennungsanlagen vor allem bestehende Deponiestandorte in Frage. Da zu erwarten ist, dass für einen Großteil der Klärschlamm-

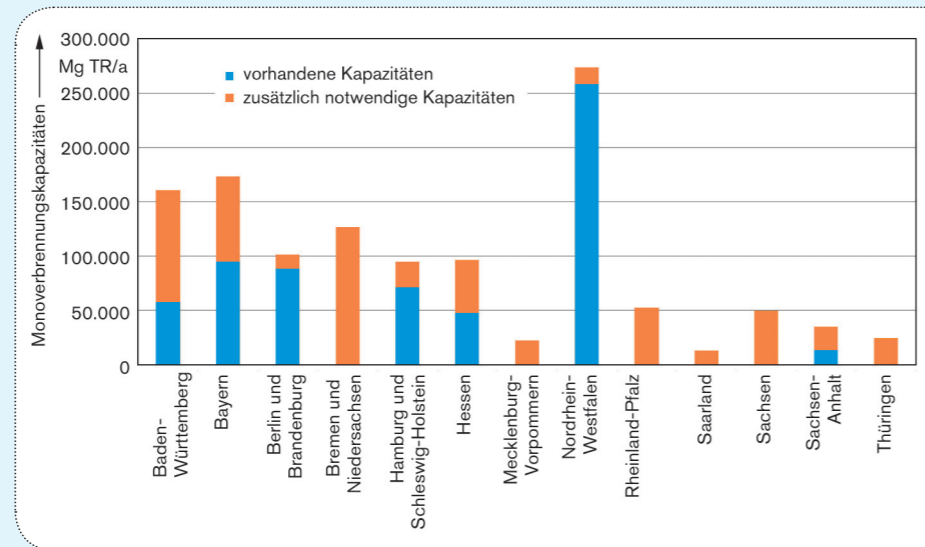


Bild 2 **Vorhandene und zusätzlich notwendige Monoverbrennungskapazitäten in den Bundesländern ab dem Jahr 2015 /7/**

Grafik: RWTH Aachen

Tab. 2 **Status quo der Klärschlammverwertung (2012) nach /3/ und Abschätzung der Entwicklung bis zum Jahr 2025**

Jahr/Szenario	Landwirtschaft [MgTR/a]	Landschaftsbau [MgTR/a]	sonstige stoffliche Verwertung [MgTR/a]	Mit- und Monoverbrennung [MgTR/a]
2012	544.065	235.439	58.107	1.008.830
2015		526.000		1.320.632
2025		99.708		1.746.733

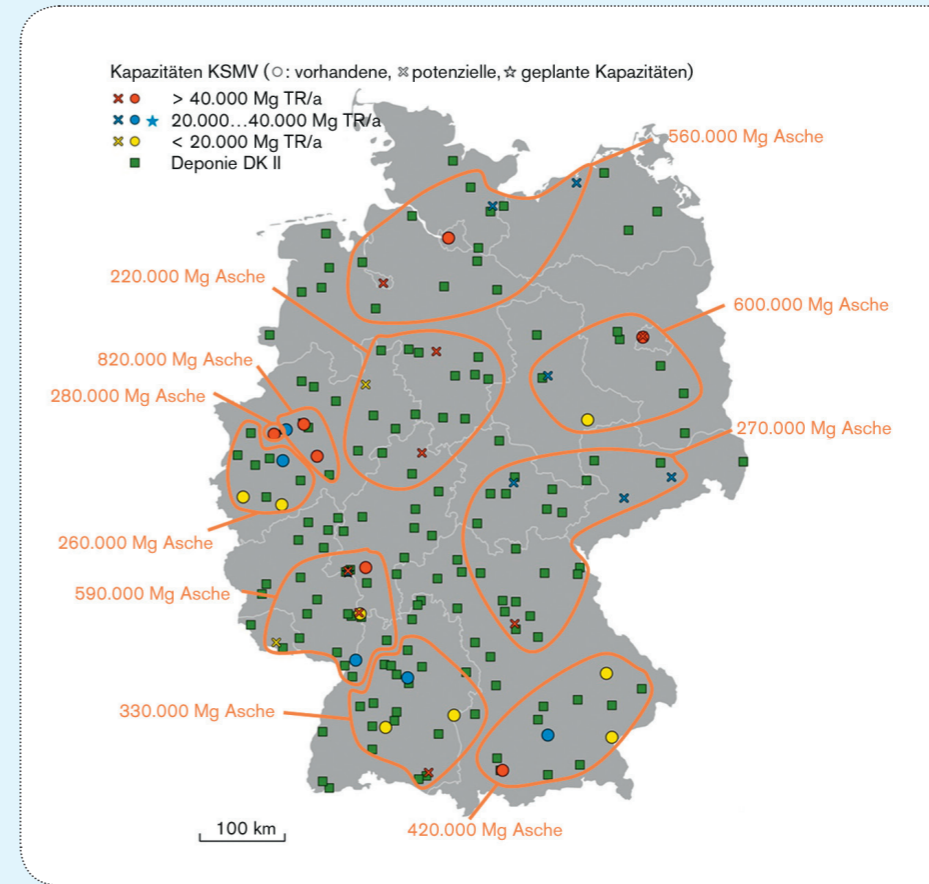


Bild 3 **Standorte der vorhandenen und potenziellen Monoverbrennungsanlagen und Deponien der DK II in Deutschland sowie Darstellung möglicher Einzugsgebiete der Aschen für die Langzeitlagerung /7/**

Grafik: stepmap.de/RWTH Aachen

aschen aus der Monoverbrennung die Langzeitlagerung in Langzeitlagern der LK II umzusetzen sein wird, wurden für das Lagerungskonzept Deponiestandorte der Klasse II betrachtet.

In Bild 3 sind die Standorte der Deponien der DK II in Deutschland, der derzeit existierenden sowie potenzieller neuer Monoverbrennungsanlagen und die möglichen Einzugsgebiete von Aschen für jeweils ein gemeinsames Langzeitlager unter Angabe der prognostizierten anfallenden Aschemengen zwischen den Jahren 2015 und 2030 bzw. der notwendigen Größen der Langzeitlager dargestellt. Die Zusammenstellung der Deponiestandorte erfolgte auf Basis der im Jahr 2013 verfügbaren Abfallwirtschaftspläne der Länder.

Aus den vorhandenen Verbrennungsanlagen sowie den potenziell zusätzlichen Verbrennungsanlagen (bei vorausgesetztem Betrieb der zusätzlichen Anlagen ab dem Jahr 2025) würden innerhalb der nächsten 15 Jahre etwa 4,35 Mio. Mg Asche anfallen. Dabei wurde angenommen, dass mit der separaten Lagerung unmittelbar (ab dem Jahr 2015) begonnen wird.

Die möglichen Einzugsgebiete der Klärschlammaschen wurden für das Lagerungskonzept so gestaltet, dass die Verbrennungsanlagen in den jeweiligen Einzugsgebieten

innerhalb der nächsten 15 Jahre so viele Aschen generieren würden, dass eine gemeinsame Lagerung zu einer Lagergröße > 200.000 Mg Asche führen würde. Für die meisten Einzugsgebiete ergibt sich nach dem erstellten Konzept eine gemeinsame Lagerung von Aschen aus Verbrennungsanlagen verschiedener Bundesländer. Dies würde voraussetzen, dass die entsprechenden Bundesländer die innerhalb der Abfallwirtschaftspläne festzulegenden Erfordernisse und Maßnahmen untereinander abstimmen.

Zur Feststellung möglicher Standorte von Langzeitlagern sollten die innerhalb der dargestellten Einzugsgebiete vorhandenen Deponiestandorte und Verbrennungsanlagenstandorte auf theoretisch verfügbare Lagerkapazitäten bzw. Flächen sowie die Möglichkeit der Schaffung von Monokompartimenten/Langzeitlagern geprüft werden.

**Kosten der Langzeitlagerung**

Die beispielhaft abgeschätzten Kosten der Errichtung und des Betriebs von Langzeitlagern für Klärschlammaschen betragen für ein Langzeitlager mit einer Basisfläche von 25.000 m<sup>2</sup> zur Einlagerung von 15.000 Mg Asche/a über einen Verfüllungszeitraum von 18 Jahren 37 €/Mg Asche (LK I) bzw.

42 €/Mg Asche (LK II). Bei einem mittleren Phosphorgehalt von 9 % betragen die spezifischen Kosten für die Lagerung 0,41 €/kg P respektive 0,47 €/kg P. Für ein größeres Lager von 45.000 m<sup>2</sup> Basisfläche zur Lagerung von 50.000 Mg Asche/a über einen Verfüllungszeitraum von 15 Jahren ergeben sich Kosten von 19 €/Mg (LK I) bzw. 22 €/Mg (LK II), entsprechend 0,21 €/kg P respektive 0,24 €/kg P. Dabei wurden Kosten für die Errichtung der Basisabdichtung, Oberflächenabdeckung sowie eines separaten Eingangsbereichs mit vorgeschalteter Aschebefeuchtung berücksichtigt und die geologische Barriere als vorhanden vorausgesetzt. Für den Einbaubetrieb wurden im Wesentlichen Kosten für Personal, Einbaugeräte und Überwachung kalkuliert /7/.

### Förderung

Die hier dargestellten Ausführungen wurden im Rahmen des Projekts „Entwicklung eines Zwischenlagerungskonzepts für Klärschlammmonoverbrennungsaschen für Deutschland mit dem Ziel einer späteren Phosphorrückgewinnung“ (ZwiPhos, FKZ: 033R101A, Laufzeit: 06/2012-04/2014) erarbeitet. Das Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Rahmen des BMBF-Forschungsschwerpunktes „r3 Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ – erstellt und mit Bundesmitteln finanziert.

### LITERATUR

- /1/ U.S. Geological Survey (2014): Mineral Commodity Summaries, February 2014. Online: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate\\_rock/mcs-2014-phosp.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2014-phosp.pdf)
- /2/ PRB (2014): 2014 World Population Data Sheet. Online: [http://www.prb.org/pdf14/2014-world-population-data-sheet\\_eng.pdf](http://www.prb.org/pdf14/2014-world-population-data-sheet_eng.pdf)
- /3/ Destatis (2014): Wasserwirtschaft: Klärschlamm Entsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- /4/ Lehrmann, F. (2013): Beitrag auf den 8. DWA-Klärschlammtagen in Fulda. Begrüßung und Einführung zum Vortragsblock „Trocknung/Thermische Behandlung“, 6. Juni 2013
- /5/ LAGA (2012): Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). Bericht „Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven“
- /6/ Bergs, C.-G. (2015): Eckpunkte zur Novellierung der Klärschlammverordnung. Vortrag und Manuskript, 9. DWA-Klärschlammtage, Potsdam, 15.-17. Juni 2015
- /7/ Pinnekamp, J.; Malm, S.; Montag, D.; Schmelz, K.-G.; van der Meer, M.; Lehrmann, F.; Blöthe, U.; Eitner, R.; Klett, W.; Schwetzel, W. (2014): „ZWIPHOS - Entwicklung eines Zwischenlagerungskonzepts für Klärschlammmonoverbrennungsaschen für Deutschland mit dem Ziel einer späteren Phosphorrückgewinnung“. Abschlussbericht zum BMBF-Projekt, FKZ 033R101
- /8/ Krüger, O.; Adam, C. (2014): Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotenziale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik. TEXTE 49/2014 Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 37 11 33 321 UBA-FB 001951, Berlin

### WEITERFÜHRENDE LINKS

#### BMBF-Projektseite

<http://www.r3-innovation.de/de/15441>

#### Abschlussbericht

<http://www.isa.rwth-aachen.de/forschungsgruppen/abwasserbehandlung/projekte/projekte/zwiphos>

### KONTAKT

#### RWTH Aachen University

Institut für Siedlungswasserwirtschaft  
Dipl.-Ing. Susanne Malm; Dr.-Ing. David Montag;  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp  
Mies-van-der-Rohe-Straße 1  
52074 Aachen  
Tel.: 0241/80-25212  
E-Mail: [malm@isa.rwth-aachen.de](mailto:malm@isa.rwth-aachen.de)  
[www.isa.rwth-aachen.de](http://www.isa.rwth-aachen.de)

### DWA-Landesverband Nord-Ost

## Kleinkläranlagen-Workshop in Neubrandenburg

Zum 10. Mal fand im September der Workshop zur Wartung von Kleinkläranlagen (KKA) statt. Zum Auftakt der Veranstaltung verwies Dipl.-Ing. Ralf Schüler, Geschäftsführer des Landesverbandes der DWA Nord-Ost, auf die seit 10 Jahren erfolgreich praktizierte Zertifizierung von Fachunternehmen zur Wartung von KKA. Aktuell haben sich im Landesverband 25 Unternehmen zertifizieren lassen und verpflichten sich damit, die hohen DWA-Standards zu erfüllen.

Kernthemen im Forum waren die 2014 in Mecklenburg-Vorpommern neu erlassene KKA-Verwaltungsvorschrift, Handlungsempfehlungen an eine bedarfsgerechte Klärschlammabfuhr sowie Untersuchungen zum Schlammabbau und die biologische P-Elimination bei KKA durch eine belüftete Vorklärung. Das Erfordernis von Auftriebssicherungen für KKA aus PE-Behältern bei hohen Grundwasserständen

sowie Praxiserfahrungen mit Nachrüstungen und der Sanierung von KKA bildeten weitere Themen.

### Biologische P-Elimination

Interessant war die Fragestellung von Dipl.-Ing. Bernd Goldberg: Biologische P-Elimination bei KKA? Ein Thema das künftig an Bedeutung gewinnen wird. Bereits vor fast 16 Jahren erhielten die Hersteller Finger-Beton, Sonneborn und ATB für ihre SBR-Kläranlagen mit aerober Schlammstabilisierung die DIBt-Zulassungen. Jedoch erst 2014 folgte die erste DIBt-Zulassung für eine KKA nach dem Belebtschlammverfahren diesem Prinzip (Aquato). Dabei unterliegen die im Klärschlamm enthaltenen Mikroorganismen während andauernder Belüftung einem ständigen Hungerzustand. Dieser versetzt sie in den Zwang alles an verwertbaren

Stoffen im Klärschlamm zu verarbeiten. Im Ergebnis führt dies zu einer Schlammreduzierung in der Vorklärung. Schnell wechselnde anaerobe/aerobe Zustände führen bei heterotrophen Bakterien zu Stresssituationen. Steht ausreichend Sauerstoff zur Verfügung, lagern sie vermehrt Polyphosphate in ihre Zellen ein und der Gesamt-Phosphatgehalt im Wasser sinkt. Bio P-Elimination ist somit grundsätzlich möglich. Der Effekt wird durch eigene Untersuchungsergebnisse des Referenten sowie durch eine aktuelle Diplomarbeit bestätigt. In welchem Maße der Phosphatgehalt gesenkt werden kann, hängt von der Dauer der Belüftung/Pausen und dem möglichst asynchronen Betriebsregime bei der Belüftung zwischen 1. und 2. Kammer ab. Hierzu sind weitere verfahrenstechnische Untersuchungen erforderlich.

Nico Andritschke

### KONTAKT

DWA-Landesverband Nord-Ost  
[www.dwa-no.de](http://www.dwa-no.de)