

www.dwa.de/KA

Partnerschaft mit
Welthungerhilfe
und WasserStiftung

Partnerschaft
München – Harare

Sanierung von
Abwasserschächten

Aktivkohleeinsatz
auf einer Kläranlage

Klärschlamm-
behandlung in
Pflanzenbeeten

Wasserversorgung
und Wasser-
schutzgebiete

Tools für die
Instandhaltung



*„Wir Auftraggeber vertrauen
der Eignungsprüfung RAL-
GZ 961, da dieses System
in einem gleichberechtigten
Miteinander von Auftrag-
nehmern und Auftraggebern
gestaltet und getragen wird.“*

Mitglied im Vorstand
der Gütegemeinschaft
Dipl.-Ing. (FH) Ingrid Hansen
Gebietsleiterin Investitionen
Stadtentwässerung Dresden GmbH

Gütesicherung RAL-GZ 961

neutral – fair – zuverlässig

Gütesicherung Kanalbau steht für eine objektive
Bewertung nach einheitlichem Maßstab



Abbau von organischen Schadstoffen bei der Klärschlammbehandlung in Pflanzenbeeten

Kai Bester (Roskilde/Dänemark), Xijuan Chen (Aalborg/Dänemark),
Udo Pauly und Stefan Rehfus (Neu-Eichenberg)

Zusammenfassung

Im Beitrag werden die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse einer Untersuchung zur Abbaubarkeit von organischen Schadstoffen, die in Klärschlämmen enthalten sind, mittels bepflanzter Beete dargestellt. Die durchgeführten Containerversuche wie auch die parallel durchgeführten Untersuchungen an den großtechnischen Klärschlammvererdungsanlagen Meppen in Niedersachsen und Kalkar-Rees in Nordrhein-Westfalen zeigen, dass bepflanzte Beete in der Lage sind, die Konzentrationen und Frachten, auch schwer abbaubare organische Schadstoffe wie den Weichmacher DEHP, das Bakterizid Triclosan sowie die Duftstoffe OTNE, HHCB, HHCB-Lacton und AHTN zu reduzieren und eine Verminderung, der über den Klärschlamm in die Umwelt gelangenden Fracht, von 50 % (HHCB, AHTN) bis 93 % (OTNE) zu erreichen.

Schlagwörter: Klärschlamm, Spurenstoff, anthropogen, Schadstoff, organisch, Abbaubarkeit, Elimination, Versuch, Pflanzenbeet, Fracht, Reduzierung

DOI: 10.3242/kae2011.11.003

Abstract

Degradation of Organic Pollutants in Sewage Sludge Treatment in Reed Beds

The paper describes the performance of a test and the results of a study on the degradability of organic pollutants, which are contained in sewage sludge, in reed beds. The container tests undertaken as well as the parallel tests in large-scale plants for the conversion of sewage sludge into humus, such as Meppen in Lower Saxony and Kalkar-Rees in North Rhine Westphalia, show that reed beds are able to reduce pollution levels and loads even of difficult to degrade organic pollutants such as DEHP, a surfactant, triclosan, a bactericide, as well as fragrances such as OTNE, HHCB, HHCB-lactone and AHTN and that the pollution loads that enter the environment via the sewage sludge can be reduced by between 50 % (HHCB, AHTN) and 91 % (OTNE).

Key words: sewage sludge, trace element, anthropogenic, pollutant, organic, degradability, removal, test, reed bed, load, reduction

1 Einleitung

Bepflanzte Beete werden seit 1988 in Europa für die Entwässerung von Klärschlämmen eingesetzt. Bei dem naturnahen Verfahren wird flüssiger Klärschlamm in schilfbepflanzten und zum Untergrund hin abgedichteten Beeten durch Schwerkraft (Filtration) und durch die Verdunstungsleistung der eingesetzten Pflanzen entwässert. Parallel zu den Entwässerungsprozessen findet ein Abbau eines Teils der organischen Trockenmasse durch Mikroorganismen statt. Das Endprodukt ist ein durchwurzeltes, humoses Substrat, auf das weiterhin die Bestimmungen der Klärschlammverordnung anzuwenden sind. Die Methode hat sich insbesondere für kleine und mittlere Kläranlagen im ländlichen Raum als kostengünstige und ökologische Alternative zur maschinellen Entwässerung bewährt.

Im Rahmen des von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke e.V.“ (AiF) geförderten zweijährigen Forschungsvorhabens „Abbau von organischen Schadstoffen im Rahmen der Klärschlammvererdung“

wurden zwei großtechnische Klärschlammvererdungsanlagen in Meppen (Niedersachsen) und Kalkar-Rees (Nordrhein-Westfalen, Abbildung 1) untersucht und mit 16 eigens angefertigten, unterschiedlich bepflanzten Modellanlagen verglichen.

Folgende Substanzen wurden untersucht:

OTNE (7-Acetyl-1,2,3,4,5,6,7,8-octahydro-1,1,6,7-tetramethyl-naphthalen; Handelsname Iso-E-super) hat derzeit eine weite Verbreitung in Verbraucherprodukten gefunden. 2500–3000 t dieses Duftstoffs werden jährlich verkauft [3]. Konzentrationen von 7000–30 000 ng OTNE je g Trockensubstanz (TS) Klärschlamm wurden in den USA gefunden [4], während in Europa die Konzentrationen zwischen 2000 und 4000 ng g⁻¹ lagen [5].

Polycyclische Moschus-Duftstoffe wie HHCB (1,3,4,6,7,8-Hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethylcyclopenta-[g]-2-benzopyran,



Abb. 1: Klärschlammvererdungsanlage Hönnepel (acht Beete, 540 t TS) (Foto: EKO-PLANT)

Handelsname zum Beispiel Galaxolid) und AHTN (7-Acetyl-1,1,3,4,4,6-hexamethyl-1,2,3,4-tetrahydronaphthalen, Handelsname zum Beispiel Tonalid) werden häufig als Duftstoffe in Shampoos, Waschmitteln, Weichspülern und anderen Consumer-Produkten benutzt [5, 6]. Beide Polycyclen haben eine geringe Wasserlöslichkeit und hohes Bioakkumulationspotenzial [7]. Die Konzentrationen dieser Substanzen in Klärschlämmen aus Nordrhein-Westfalen betragen $3100 \pm 240 \text{ ng g}^{-1}$ (HHCB) und $1500 \pm 150 \text{ ng g}^{-1}$ (AHTN) [8].

HHCB-Lacton ist der Primärmetabolit von HHCB. Während der Abwasserbehandlung werden etwa 10 % des HHCB zum HHCB-Lacton oxidiert [8]. Das Verhältnis von HHCB zu HHCB-Lacton kann im Ablauf von Kläranlagen zwischen 3 und 130 variieren. Diese Zahlen können benutzt werden, um die Oxidationseffizienz von technischen Anlagen abzuschätzen. Die Konzentrationen im Klärschlamm lagen zwischen 600 ng g^{-1} und 3500 ng g^{-1} [9].

Triclosan wird derzeit als Bakterizid in Zahnpasta, Mundspülwasser sowie in Funktionswäsche wie zum Beispiel Unterwäsche und Turnschuhen ebenso eingesetzt sowie zur Stabilisierung von Waschmitteln und Kosmetika [10]. Zusätzlich wird es als Polymerzusatz in Plastik-Schneidebrettern für den Lebensmittelbereich verwendet. Schätzungsweise 1500 t Triclosan werden jährlich weltweit produziert, etwa 350 t davon in Europa [11]. Triclosan zeigt eine geringe Wasserlöslichkeit und ein hohes Bioakkumulationspotenzial. In allen Klärschlammproben aus Nordrhein-Westfalen war Triclosan mit Konzentrationen um 3000 ng g^{-1} nachweisbar [12].

DEHP [Bis(2-ethylhexyl)phthalat] wird als Weichmacher in PVC, in Baumaterialien, aber auch in Farben und Kosmetika eingesetzt [13]. Die jährliche weltweite Produktion von DEHP liegt bei 10^6 t [14]. Die Weichmacher werden während der Lebenszeit der entsprechenden Produkte ausgewaschen und gelangen so ins Abwasser. DEHP ist eine der prioritären Substanzen der Wasserrahmenrichtlinie. Die Konzentrationen von DEHP liegen bei 1740 bis 182000 ng l^{-1} in Kläranlagenabläufen. In Klärschlämmen wurden 27900 bis 154000 ng g^{-1} Trockenmasse und in Sedimenten 210 bis 84400 ng g^{-1} gefunden [15].

Begriffsbestimmung

Die vegetative Behandlung von Klärschlämmen in bepflanzten Beeten wird häufig auch als „Klärschlammvererdung“ bezeichnet, die großtechnischen naturnahen Entwässerungsanlagen synonym als „Klärschlammvererdungsanlagen“. Diese Begrifflichkeit leitet sich aus einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt „Steigerung der Verwertung von Klärschlämmen durch verbesserte Produkte, Qualitätsnormungen und erweiterte Märkte“ [1], ab, in dem die Entwässerungsendprodukte aus schilfbepflanzten Beeten bodenkundlich charakterisiert wurden. Darin wurde festgestellt: „Der Prozess der Klärschlammbehandlung in Schilfbeeten ist bodensystematisch als ein System im Übergangsbereich zwischen Niedermoor und Mudde/Gyttja anzusprechen. Hinsichtlich der Ausgangsstoffe, Prozessbedingungen und Prozesse konnten keine systematischen Unterschiede festgestellt werden. (...)es setzen (...)Bodenbildungsprozesse ein, die das System in eine neue bodensystematische Klasse, vererdete Niedermoore, Gytjen/Mudden, überführen.“

Jordan [2] ordnet das Endprodukt der vegetativen Klärschlammbehandlung als „Anthrosol AT“ ein, also als einen unter anthropogener Beeinflussung entstandenen Boden. Da mit der Begrifflichkeit „Boden“ in der Regel die natürliche Genese des Untergrunds bezeichnet wird, wohingegen der Begriff „Erde“ zum Beispiel im landschaftsbaulichen Bereich für hergestellte Substrate steht (vgl. „Komposterde“), werden im Folgenden die Begrifflichkeiten „Vererdung“ und „Vererdungsanlagen“ beibehalten. Unabhängig von der Bezeichnung bleiben die eingesetzten Ausgangssubstanzen und Endprodukte immer Klärschlämme, die gemäß den geltenden gesetzlichen Bestimmungen zu verwerten bzw. zu entsorgen sind.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung war vorgesehen, zunächst in Versuchscontainern, deren Aufbau einem Vererdungsbeet nachempfunden ist, die Abbaubarkeit der Schadstoffe zu untersuchen. Anhand der Container sollte dabei der Einfluss unterschiedlicher Wasserregimes sowie der gewählten Pflanzenart auf die Abbaubarkeit untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden insgesamt 16 Versuchscontainer (vier Ansätze mit je vier Parallelen) auf dem Versuchsfeld der Universität Duisburg-Essen durch EKO-PLANT installiert und betreut (Abbildung 2). Die Untersuchung und Auswertung der entnommenen Proben erfolgte durch das Fachgebiet Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft der Universität Duisburg-Essen.

Die Container waren folgendermaßen ausgestattet:

Containermaße jeweils $1,0 \times 1,0 \times 0,95 \text{ m}$, unbehandeltes Stahlblech, außen mit Rostschutzlackierung versehen. An der Behältersohle wurde jeweils seitlich ein Kugelhahn aus Messing (vernickelt) zur Entnahme von Filtratproben angebracht.

In jeden Container wurden zunächst ca. 600 l maschinell entwässerter Klärschlamm mit ca. 20 % TS aus der Kläranlage Meppen eingebracht und anschließend wie folgt bepflanzt:



Abb. 2: Die 16 Versuchscontainer auf dem Testgelände (Foto: EKO-PLANT)

- Variante I: Container 1–4, bepflanzt mit Schilf (*Phragmites australis*),
- Variante II: Container 1–4, bepflanzt mit Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*),
- Variante III: Container 1–4, bepflanzt mit Rohrkolben (*Typha latifolia*),
- Variante IV: Container 1–4, ohne Bewuchs.

Um den Verbleib der im Klärschlamm enthaltenen organischen Stoffe bilanziell bewerten zu können, wurden – neben Untersuchungen des Klärschlamm – Proben aus dem Filtratwasser und dem Pflanzenmaterial entnommen und auf organische Schadstoffe untersucht.

Aufgrund von Problemen mit Entwässerungsfähigkeit und Pflanzenverträglichkeit des maschinell entwässerten Klärschlammes wurden im weiteren Projektverlauf die Container entleert, mit Klärschlamm aus der Vererdungsanlage in Meppen befüllt und erneut bepflanzt. Alle Untersuchungsergebnisse beziehen sich im Folgenden auf diesen Versuchsaufbau.

2.2 Probenahme und Aufbereitung

Die Proben wurden mithilfe eines Stahlstechrohrs in drei Tiefenprofilen (0–20 cm, 20–40 cm, 40–60 cm) genommen. Zehn Teilproben aus den jeweiligen Schichten wurden vereinigt und in einem Stahleimer homogenisiert. Von diesen Homogenaten wurden 200 g in Glasflaschen für die Analytik versendet.

2.3 Durchführung der Analysen

Die instrumentelle Analyse wurde mittels GC-MS (Gas-Chromatographie mit massenspektrometrischer Detektion) durchgeführt. Hierzu wurde ein Thermo Finnigan DSQ mit einem PTV-Injektor und einem Trace Autosampler eingesetzt.

Die gaschromatographische Trennung wurde mithilfe einer DB5-MS-Säule (J&W Scientific), L: 15 m, ID: 0,25 mm, film: 0,25 μm , und eines Temperaturprogramms durchgeführt. Die verschiedenen Verbindungen wurden über ihre massenspektrometrischen Daten und Retentionszeiten identifiziert.

2.4 Halbwertszeiten

Da die Experimente bei wechselnden Temperaturen und Feuchtgehalten durchgeführt wurden, sind die kinetischen Daten nicht so belastbar wie zum Beispiel die aus Laborversuchen unter kontrollierten Bedingungen gewonnenen Daten. Deshalb soll im Rahmen dieses Projekts nur von einer „Abschätzung“ und nicht von einer „Bestimmung“ von Halbwertszeiten berichtet werden. Es bleibt aber hinzuzufügen, dass diese Abschätzung unter realen Bedingungen natürlich realitätsnäher ist als die unter kontrollierten Bedingungen gewonnenen Daten. Im Rahmen dieser Arbeit wird von einem Abbau erster Ordnung ausgegangen:

$$K = \frac{\ln \left[\frac{c_0}{c} \right]}{t}$$

Hierbei ist c_0 die Startkonzentration zum Zeitpunkt $t = 0$ und c die Konzentration zum Zeitpunkt t . Die Formel für die Halbwertszeit wird durch Umformen gewonnen:

$$t_{1/2} = \frac{\ln \left[\frac{c_0}{\frac{c_0}{2}} \right]}{k} = \frac{\ln 2}{k}$$

3 Auswertung der Versuche

3.1 Konzentrationen der Zielsubstanzen

Die höchsten OTNE-Konzentrationen wurden zu Anfang des Experimentes mit 1600 ng g^{-1} (TS) gefunden. Nach 13 Monaten waren die Konzentrationen bei allen Experimenten um 70 % der ursprünglichen Konzentration reduziert. Hierbei wurde kein signifikanter Unterschied der verschiedenen Bewuchsformen festgestellt (Abbildung 3).

Etwa 20 % des HHCB wurden während des Versuchs eliminiert. Die Differenz zwischen Startkonzentration und Endkonzentration beträgt etwa 3000 ng g^{-1} (TS). Im Gegensatz dazu stieg die Konzentration des Metaboliten HHCB-Lacton um 35 % in dem Container mit Rohrglanzgras, während der Zuwachs bei dem Versuch mit Rohrkolben 32 % und bei dem mit Schilf 45 % und ohne Bewuchs 44 % (etwa 500 ng g^{-1} (TS)) betrug. Da die Konzentrationen des Primärmetaboliten stiegen, kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den Eliminierungsprozessen tatsächlich um oxidative Abbauprozesse durch Mikroorganismen handelt. Es muss aber ebenfalls festgehalten werden, dass wiederum auch ein Abbau des HHCB-Lactons erfolgt, da der Verlust des HHCB insgesamt größer ist als die Zunahme des Metaboliten.

Die Konzentrationen von AHTN waren erwartungsgemäß deutlich niedriger als die des HHCB, was etwa dem derzeitigen Einsatzspektrum entspricht. Sie nahmen unabhängig von der Bewuchsform ebenfalls leicht ab, leider ist für diese Substanz derzeit kein Metabolit eines Bioabbauprozesses bekannt.

Die Triclosan-Konzentrationen nahmen innerhalb des Versuches deutlich ab (Abbildung 4). Die Startkonzentrationen (800 ng g^{-1} (TS)) waren ausgesprochen niedrig, was nur dadurch zu erklären ist, dass das Material, das aus der seit April 2003 in Betrieb befindlichen Klärschlammvererdungsanlage Meppen stammte, bereits durch die vorherige Lagerungsdauer im schilfbepflanzten Beet in Meppen einem Vor-Abbau unterzogen war.

Ähnlich wie bei OTNE und Triclosan wurde auch für DEHP eine bedeutende Abnahme der Konzentrationen während der Versuche gefunden. Etwa 40 % Abnahme erfolgte bei der Bepflanzung mit Rohrglanzgras, während die Werte 44 % für Rohrkolben, 41 % für Schilf und 25 % für die Versuche ohne Bewuchs waren. In Bezug auf DEHP deuten sich also deutlich bessere Eliminierungen mit Pflanzenbewuchs an.

3.2 Massenbilanzen

Zur Sicherstellung der Messergebnisse wurde eine Massenbilanz aufgestellt (Tabelle 1), für die die Konzentrationen c_1 der Zielsubstanzen im Ablaufwasser der Container bestimmt wurden.

Den Konzentrationen wurden Wassermengen aus Niederschlag (900 mm bzw. 900 l je Container) und Bewässerung (432 l je Container) gegenübergestellt und als Ablaufmenge betrachtet. Dies ist sicherlich eine Überschätzung der Ablaufmenge (Wasser), da die Betrachtung die Verdunstung des Wassers nicht berücksichtigt.

Aus diesen Ablaufmengen (Wasser) und der Konzentration in dem Ablaufwasser kann eine eluierte Menge (M_1) der jeweiligen Substanz als die maximale Menge errechnet werden, die während des Versuchszeitraums mit dem Drainagewasser aus den Containern gespült wurde.

Aus den Konzentrationen im Schlamm c_2 kann bei Berücksichtigung der Füllhöhe und der Grundfläche der Container die Menge der im Schlamm enthaltenen Substanz (M_2) errechnet werden.

Hieraus lässt sich der relative, im Drainagewasser enthaltene Massenanteil der jeweiligen Substanz errechnen (M_1/M_2). Er beträgt im Falle von OTNE 0,52 % des Ausgangsgehalts und ist damit vernachlässigbar. Vergleichbare Aussagen gelten für alle hier untersuchten Substanzen. Der Anteil lag zwischen 0,01 und 0,63 %. Das Auswaschen spielt infolgedessen für keine der Substanzen eine signifikante Rolle bei den Massenbilanzen oder Eliminierungen.

Zusätzlich wurde auch die grüne Blattmasse im Rahmen der Massenbilanzierung qualitativ berücksichtigt. Ein Einfluss der grünen Blattmasse auf die Reduktion der Xenobiotica (durch Aufnahme derselben in die Biomasse) kann ebenfalls ausgeschlossen werden (<1 %), da sowohl die gemessenen Konzentrationen in der Blattmasse sehr gering waren als auch die Blattmasse selbst gegenüber der Masse des Klärschlammes nur eine untergeordnete Rolle spielt (wenige kg/m² gegenüber mehreren Hundert kg Klärschlamm/m²).

4 Diskussion der Ergebnisse

Die durchgeführten Containerversuche wie auch die parallel durchgeführten Untersuchungen an den großtechnischen Vererdungsanlagen Meppen in Niedersachsen und Kalkar-Rees in Nordrhein-Westfalen zeigen deutlich, dass die vegetative Klärschlammbehandlung in der Lage ist, auch schwer abbaubare organische Schadstoffe zu reduzieren. Dabei handelt es sich höchstwahrscheinlich um echte Abbauprozesse, da entsprechende Abbauprodukte (Metabolite) nachgewiesen werden konnten. Eine Bilanzierung der Stoffströme zeigte ergänzend, dass nur ein Bruchteil (<1 %) der Zielsubstanzen mit dem Filtratwasser ausgewaschen wird. Auch die Aufnahme durch die Pflanzen kann mit <1 % vernachlässigt werden. Dass die Art der Bepflanzung zudem eine untergeordnete Rolle bei den Ab-

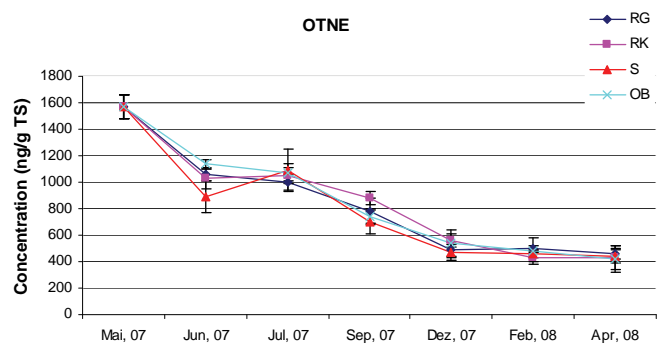


Abb. 3: Konzentrationen von OTNE im Containerversuch zur Schlammvererdung [ng g^{-1} TS]; RG: Rohrglanzgras, RK: Rohrkolben, S: Schilf, OB: ohne Bewuchs

bauprozessen gespielt hat, kann als ein weiterer Beweis gesehen werden, dass es sich maßgeblich um substratspezifische mikrobielle Abbauprozesse handelt.

Bei den ermittelten Reduktionsraten und Halbwertszeiten ist zu berücksichtigen, dass sich diese auf Prozesse beziehen, die im schilfbepflanzten Beet allein während der rund zwölfmonatigen Trockenphase vor einer Verwertung stattfinden. Wie die niedrigen Ausgangskonzentrationen des in den Containern eingesetzten Materials aus der Anlage in Meppen zeigen, findet ein Abbau der Schadstoffe offenbar schon während der normalen Betriebsphase mit periodischer Beschlämmung – vor Einleitung einer Trockenphase – statt. Setzt man eine Betriebsdauer von fünf bis zehn Jahren bis zur eigentlichen Trockenphase vor einer Beet-Räumung voraus, in der ebenfalls schon durch das periodische Beschicken und Trockenfallen der Beete Abbauprozesse stattfinden können, wird deutlich, dass bei diesen Anlagen ein unter Umständen noch erheblich höheres Abbaupotenzial für organische Schadstoffe besteht.

Für die Gesamtbilanzierung in Hinblick auf die Umweltrelevanz ist daher eine Input-Output-Betrachtung bezüglich der Frachten hilfreich. Dazu wird die ins Beet geleitete Klärschlamm-trockenmasse (in t TM) mit den in ihr enthaltenen Zielsubstanzen (in ng/g TM) im Nassschlamm ins Verhältnis zur Masse und den Konzentrationen gesetzt, die am Ende des Behandlungszyklus zur Verwertung in die Umwelt gelangen würden. Nachfolgend ist dies am Beispiel Kalkar dargestellt (Tabelle 2), da nur hier hilfsweise die Konzentration im Nassschlamm vorlag. Die Angaben stehen unter dem Vorbehalt dieser einmaligen Stichprobe, zeigen in ihrer Tendenz aber den deutlichen Einfluss der bepflanzten Beete auf die Entfrachtung der umweltrelevanten Zielsubstanzen.

Beispiel Klärschlammvererdungsanlage Kalkar-Rees

Gegenüber der Input-Trockensubstanzmenge von 489 t TM befinden sich nach Abschluss der Trockenphase nur noch rund 331 t TM im Beet. Ein Großteil dieser Massenreduktion ist auf den Abbau organischer Substanz zurückzuführen. Gleichzeitig nimmt die Konzentration von der Startkonzentration c_0 hin zur Endkonzentration c während des Behandlungsprozesses laufend ab. Unter Berücksichtigung einer Klärschlamm-trockenmasse von 489 t TM Input und 331 t TM

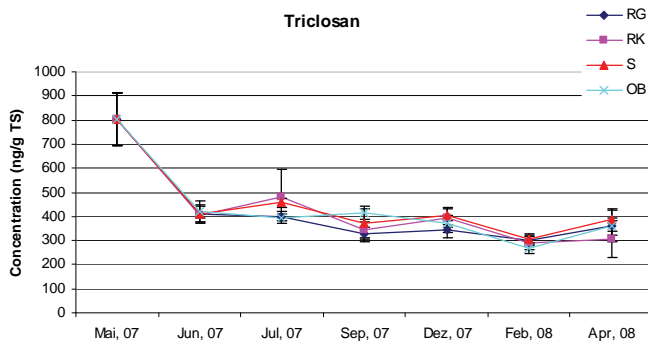


Abb. 4: Konzentrationen von Triclosan im Containerversuch zur Schlammvererdung [ng g^{-1} TS]; RG: Rohrglanzgras, RK: Rohrkolben, S: Schilf, OB: ohne Bewuchs

Output am Ende der Trockenphase ergeben sich die in Tabelle 3 genannten Frachten.

5 Fazit

In den Modellanlagen kommt es während des Versuchszeitraums zu einer deutlichen Abnahme der Konzentrationen der untersuchten Xenobiotica zwischen 20 % (HHCB) und 70 % (OTNE). Aus den gewonnenen Daten wurden näherungsweise Halbwertszeiten für die Zielsubstanzen ermittelt. Die Konzentrationsabnahmen und Halbwertszeiten aus den Modellanlagen konnten für die großtechnischen Anlagen weitgehend bestätigt oder übertroffen werden (Kalkar). Da bei großtechnischen Anlagen in der Regel Trockenphasen von zwölf Monaten eingehalten werden, können die Reduktionsraten der Zielsubstanzkonzentrationen für diesen Zeitraum bei der Anlage in Kalkar, wie in Tabelle 4 dargestellt, angenommen werden.

Betrachtet man neben den reinen Veränderungen der Konzentrationen in der Trockenphase auch die Massenveränderung, die durch Abbau von Klärschlamm trockenmasse eintritt, ergeben sich weitere Entlastungen der Umwelt. Am Beispiel Kalkar konnte eine Frachtverringering der untersuchten Xenobiotica

zwischen rund 50 und 93 % gegenüber der direkten Nassschlammausbringung abgeschätzt werden.

Bei den Containerversuchen zeigte sich ein untergeordneter Einfluss der eingesetzten Pflanzenarten auf die Versuchsergebnisse. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im Untersuchungszeitraum lediglich die Verhältnisse während Trockenphasen, ohne regelmäßige Beschlämmung, untersucht wurden. Durch ihre Verdunstungsleistung und ihre Rolle bei der Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen sind die Pflanzen allerdings eine wichtige Voraussetzung für eine optimale Entwässerungs- und Mineralisierungsleistung großtechnischer Anlagen und somit wichtiger, unverzichtbarer Systembestandteil bei der Klärschlammbehandlung in Pflanzenbeeten. Insbesondere Schilfpflanzen tragen durch ihre Durchwurzelungsfähigkeit auch tieferer Schlammschichten dazu bei, das Gesamtsystem hydraulisch durchlässig und damit funktionsfähig zu halten.

Dank

Wir danken der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung, die dieses Projekt ermöglicht hat. Dank gilt ferner den Stadtwerken Meppen und dem Abwasserbehandlungsverband Kalkar-Rees für die Erlaubnis zur Durchführung der Untersuchungen auf ihren Klärschlammvererdungsanlagen sowie der Kläranlage Duisburg-Kaßlerfeld für die Erlaubnis zur Durchführung der Containerversuche auf ihrem Grundstück.

Literatur

- [1] Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 1996–2002: *Förderschwerpunkt Bioabfallverwertung: Steigerung der Verwertung von Klärschlamm durch verbesserte Produkte, Qualitätsnormungen und erweiterte Märkte*, Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Az. 07491
- [2] Jordan, R.: *Vegetative Behandlung anaerob stabiler Klärschlämme*, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig, Heft 73, 2006
- [3] Gautschi, M., Bajgrowicz, J. A., Kraft, P.: *Fragrance Chemistry – milestones and perspectives*, *Chimia* 2001, 55, 379–387

Substanz	c_1 Ablaufwasser	Niederschlag	Bewässerung	M_1 Ablaufwasser	c_2 Schlamm	Tiefe des Schlammbeets	M_2 Schlamm	M_1/M_2 relativer Massenanteil im Ablaufwasser im Vergleich zur Menge im Schlamm
	[ng L^{-1}]	[L m^{-2}]	[L]	[mg]	[ng g^{-1}]	[m]	[mg]	[%]
OTNE	2450	900	432	3,26	1570	0,5	630	0,520
HHCB	5430	900	432	7,23	10 100	0,5	4040	0,179
AHTN	1350	900	432	1,80	2250	0,5	900	0,200
Triclosan	1240	900	432	1,65	800	0,5	320	0,516
HHCB-Lacton	2280	900	432	3,04	1200	0,5	480	0,633
DEHP	480	900	432	6,39	11 130	0,5	4450	0,014

c_1 = Konzentration im Ablaufwasser, M_1 = Masse der im Ablaufwasser enthaltenen Substanz, c_2 = Konzentration im Schlamm, M_2 = Menge der im Schlamm enthaltenen Substanz, M_1/M_2 = relativer Massenanteil der Substanzmenge im Ablaufwasser. Die Material-Dichte wird mit $0,8 \text{ t/m}^3$ angenommen, was großtechnischen Erfahrungen mit diesem Material entspricht.

Tabelle 1: Massenbilanzen bei den Containerversuchen

Substanz	Nassschlamm-Input [ng/g]	letzter Messwert im Beet [ng/g]	Konzentrationsverringerung um
OTNE	18 000	1600	91 %
HHCB	13 000	9600	26 %
AHTN	2100	1500	29 %
Triclosan	2400	650	73 %
DEHP	28 000	9100	68 %

Tabelle 2: Abbau der Zielsubstanzen in der Vererdungsanlage Kalkar während eines Behandlungszyklus

Substanz	Input-Fracht [kg]	Output-Fracht (bei Verwertung) [kg]	Entfrachtung [%]
OTNE	8,8	0,6	– 93
HHCB	6,4	3,2	– 50
AHTN	1,0	0,5	– 50
Triclosan	1,2	0,2	– 83
DEHP	14	3,0	– 79

Tabelle 3: Entfrachtung der Klärschlammerte Kalkar

- [4] Di Francesco, A. M., Chiu, P. C., Standley, L. J., Allen, H. E., Salviato, D. T.: Dissipation of fragrance materials in sludge-amended soils, *Environ. Sci. Technol.* 2004, 38, 194–201
- [5] Bester, K., Klasmeier, J., Kupper, T.: Emissions of OTNE (Iso-E-super) – Mass flows in sewage treatment plants, *Chemosphere*, 2008, 71, 2003–2010
- [6] Kannan K.: A survey of polycyclic musks in selected household commodities from the United States, *Chemosphere* 2006, 62, 867–873
- [7] Brunn, H., Rimkus, G.: Synthetic musk compounds – Application, environmental accumulation, and toxicology, *Ernährungsumschau* 1997, 44, 4–7
- [8] Bester, K.: Retention characteristics and balance assessment for two polycyclic musk fragrances (HHCB and AHTN) in a typical German sewage treatment plant, *Chemosphere* 2004, 57, 863–870
- [9] Kupper, T., Berset, J. D., Etter-Holzer, R., Furrer, R., Tarradellas, J.: Concentrations and specific loads of polycyclic musks in sewage sludge originating from a monitoring network in Switzerland, *Chemosphere* 2004, 54, 1111–1120
- [10] Adolfsen-Erici, M., Pettersson, M., Parkkonen, J., Sturve, J.: Triclosan, a commonly used bactericide found in human milk and in the aquatic environment in Sweden, *Chemosphere* 2002, 46, 1485–1489
- [11] Singer, H., Muller, S., Tixier, C., Pillonel, L.: Triclosan occurrence and fate of a widely used biocide in the aquatic environment: Field measurements in wastewater treatment plants, surface waters, and lake sediments, *Environ. Sci. Technol.* 2002, 36, 4998–5004
- [12] Coogan, M. A., Edziyie, R. E., La Point, T. W., Venables, B. J.: Algal bioaccumulation of triclocarban, triclosan and methyl-triclosan in a

Substanz	Abgeschätzte Halbwertszeit [Tage]	Konzentrationsbezogene Eliminationsrate in zwölf Monaten
OTNE	156	77 %
HHCB	924	24 %
AHTN	492	35 %
Triclosan	205	65 %
DEHP	250	55 %

Tabelle 4: Abgeschätzte Halbwertszeiten und rechnerisch ermittelte konzentrationsbezogene Eliminationsraten der untersuchten Xenobiotica in 12-monatiger Trockenphase (Kalkar)

- North Texas wastewater treatment plant receiving stream, *Chemosphere* 2007, 67, 1911–1918
- [13] Giam, C. S., Atlas, E., Powers, M. A., and Leonard, J. E.: Phthalic acid esters, in: O. Hutzinger (Hrsg.): *The handbook of environmental chemistry*, Springer, Berlin, 1984, S. 67–142
- [14] Nielsen, E., Larsen, P. B.: Toxicological evaluation and limit values for DEHP and phthalates other than DEHP, *Environmental Review Report 6/1996*, Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, Denmark, 1996
- [15] Fromme, H., Kuchler, T., Otto, T., Pilz, K., Muller, J., Wenzel, A.: Occurrence of phthalates and bisphenol A and F in the environment, *Water Res.* 2002, 36, 1429–1438

Autoren

Priv.-Doz. Dr. Kai Bester
Aarhus University
National Environmental Research Institute
Department of Environmental Chemistry and Microbiology
Frederiksborgvej 399
4000 Roskilde, Dänemark

Xijuan Chen, M. Sc.
Aalborg University
Department for Biotechnology, Chemistry and Environmental Engineering
Sohngaardsholmsvej 49
9000 Aalborg, Dänemark

Dr.-Ing. Udo Pauly
Dipl.-Ing. Stefan Rehfus
EKO-PLANT Entwicklungs- und Betriebsgesellschaft für ökotechnische Anlagen mbH
Karlsbrunnenstraße 11
37249 Neu Eichenberg

E-Mail: udo.pauly@eko-plant.de



Klärschlammvererdung

EKO-PLANT
100% erfahren

Als Spezialist für Klärschlammvererdung steht EKO-PLANT für maximale Wirtschaftlichkeit und höchste Effizienz. Denn bei allem, was wir unternehmen, haben wir die Ziele unserer Kunden fest im Blick. Reduzieren Sie deshalb mit uns Ihre Kosten im Bereich Klärschlamm - und profitieren Sie von der Kraft der Natur.

100 % erfahren ...

sind wir, wenn es darum geht, mit ökotechnischen Systemen zukunftssträchtige Wege zu beschreiten. 100 % über uns erfahren können Sie persönlich. Bei einem Besuch in unserem Unternehmen, zu dem wir Sie gerne einladen. Oder bei Ihnen vor Ort.

EKO-PLANT

Entwicklungs- und Betriebsgesellschaft für ökotechnische Anlagen mbH •
Karlsbrunnenstraße 11 • 37249 Neu-Eichenberg • Tel: +49 5542 9361-0 •
Fax: +49 5542 9361-68 • info@eko-plant.de • www.eko-plant.de