

Prof. Dr.-Ing. Jerzy MACKOWIAK; Dr. Judith SCHULZ-MENNINGMANN; Claus UHLENBRUCK

# Reinigung hochbelasteter Abwässer mit Festbett-Verfahren

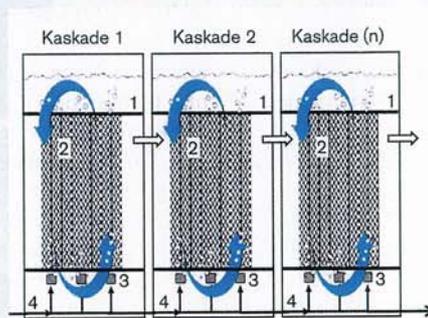
## Teer- und Altölaufbereitung: Biologische Vorreinigung von hochkonzentrierten Betriebsabwässern

Die biologisch schwer abbaubaren Abwässer eines Unternehmens entstammen der destillativen Aufbereitung von Ölen und Teererzeugnissen und enthalten BTX, PAK und andere organische Derivate in hoher Konzentration (CSB-Mittelwert bei 8.500 mg/l). Mit einem getauchten, kaskadierten Festbettreaktor in kompakter Bauweise konnte über mehrere Jahre eine effiziente biologische Vorreinigung von rund 70 % des CSB bei hoher Betriebsstabilität erreicht werden. Im Vergleich zur alternativen Entsorgung erwies sich diese Form der Abwasserreinigung als erheblich kostengünstiger.

Momentan stellt vor allem die kleinräumige und wartungsarme Entsorgung industrieller und gewerblicher Abwässer eine Herausforderung dar. Oft befinden sich die Betriebe in der Situation von Indirekteinleitern, die aus finanzieller Sicht durch die Senkung der Schadstofffrachten Kosten sparen wollen oder deren Abwässer den Betrieb der nachgeschalteten kommunalen Kläranlage stören. In solchen Fällen ist eine betriebsinterne Vorreinigung erforderlich. Dabei sind bewährte und robuste Verfahren gefragt, die einen geringen Betreuungs- und Wartungsbedarf gewährleisten. Biofilmsysteme sind hierfür besonders gut geeignet. Dabei muss der aufwachsende Schlamm gut kontrollierbar und der Träger so konzipiert sein, dass keine Verblockungen auftreten. Eine bewährte Form ist das getauchte Festbett, das in der Abwassertechnik seit Jahrzehnten erfolgreich im Einsatz ist /4, 5, 7, 10, 11, 13/.

### Kaskadierter Festbettreaktor

Für die industrielle Abwasserreinigung haben sich Anlagenkonzepte mit mehreren Festbettkammern in Kaskadenbauweise als besonders geeignet erwiesen (Bild 1). Dieses Verfahren wurde bereits 1990 mit Unterstützung des Landes Nordrhein-Westfalen entwickelt und an der Universität München umfassend geprüft /12/. Der allgemein anerkannte Stand der Technik ist in den Pu-



### PRINZIP DES FESTBETT-KASKADENVERFAHRENS:

- 1 Niederhalter
- 2 Festbett-Blöcke
- 3 Belüfter
- 4 Druckluftzuleitung  
abgewandelt nach /10/

Bild 1

blikationen der DWA Arbeitsgruppe „Tauch- und Tropfkörper“ zusammengefasst /1, 2, 3/. Interessant ist diese Anlagenkonzeption besonders wegen der kompakten Bauweise sowie dem robusten Verhalten der biologischen Stufen. Die Reaktoren können hoch belastet werden, ohne dass sich hieraus Probleme mit dem Schlammindex oder der Schlammbehandlung ergeben. Verstopfungsrisiken lassen sich durch die Auswahl einer geeigneten Träger- und Reaktor-geometrie sowie durch regelmäßige Luftspülungen vermeiden.

Die Anlagen benötigen keine Steuerung der Schlammkreisläufe und werden frei durchflossen. Die Abwasserreinigung erfolgt – im Anschluss an eine Vorklärung – ausschließlich über den sich je nach Belastung verschieden dick ausbildenden Biofilm, der auf speziellen Kunststoff-Gitterblöcken wächst. Bei korrekter Auslegung wird durch die unter dem Festbett angebrachte Belüftung genug Strömung erzeugt, um den Biofilm zu kontrollieren. Überschüssige Biomasse wird abgetragen und in der Nachklärung sedimentiert. Der Schlammanfall ist dabei deutlich geringer als bei Belebtschlammverfahren /1, 2, 12, 13/.

Eine Anordnung der Reaktoren in Kaskadenbauweise schafft hydraulisch und biologisch ein besonders robustes Anlagenkonzept (Bild 2). Es entsteht ein hydraulischer, chemischer, biologischer Puffer, der horizontale Abwasserbewegungen in vertikalen Teilabschnitten zurückhält und die Wirkung eines Fettfanges und Lamellenabscheiders hat. In jeder Kammer bildet sich eine spezifische Biocoenose, die einen Großteil der Belastung eliminiert. Die folgende Kammer erhält jeweils nur die Reststoffe der vorherigen. Dies zwingt die Mikroben sich an deren Abbau anzupassen (Diauxie). So kommt es zu einem deutlich effizienteren Abbau ansonsten inerte Stoffe.

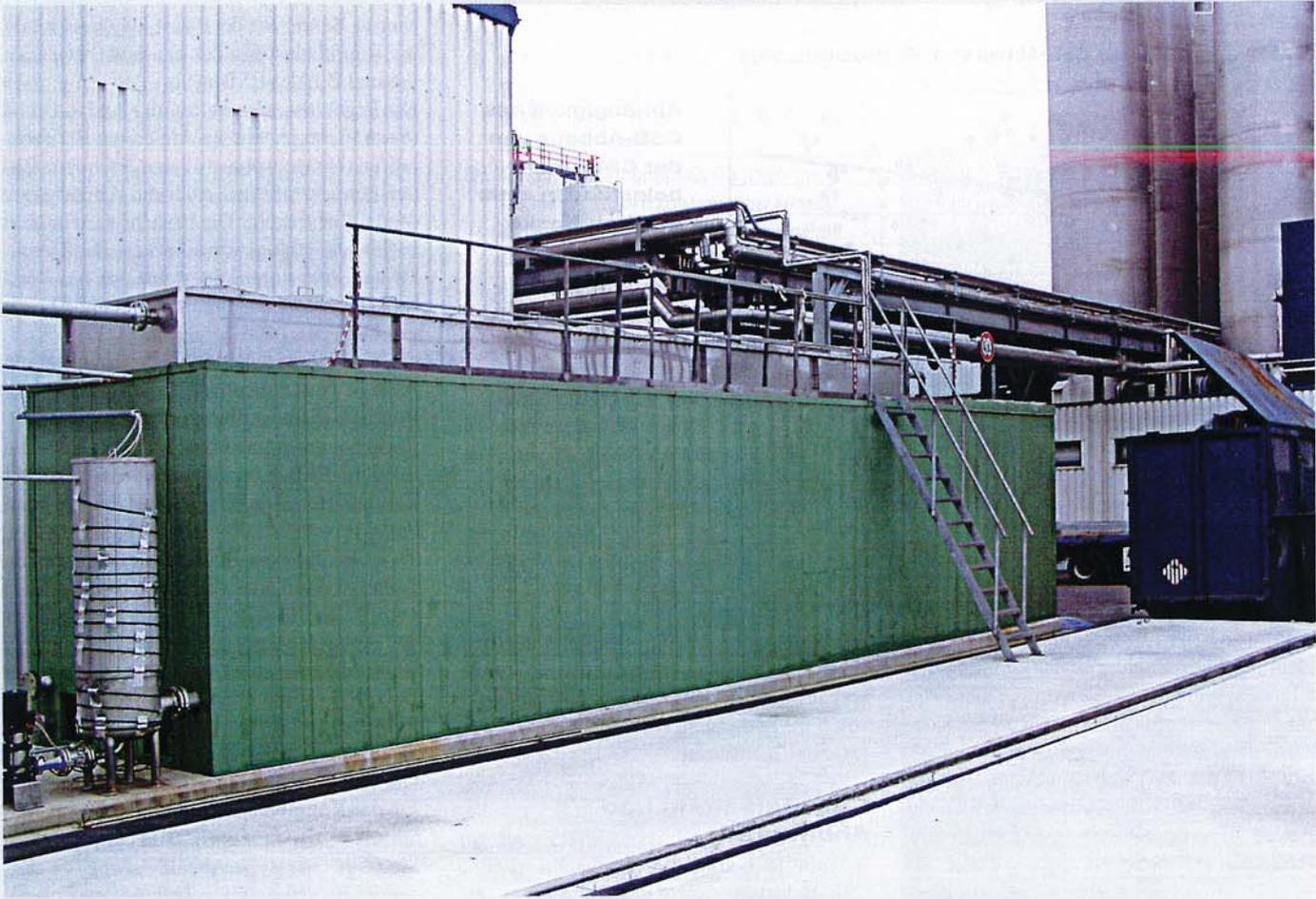
Bei geringer Substratversorgung, z. B. bei Kampagnenbetrieb, verbleiben die Bakterien auf dem Träger. Aufwändige Steuerungsprozesse oder Wiederinbetriebnahmen, wie bei Belebungs- und SBR-Verfahren nötig, entfallen. Die schnelle Funktionsfähigkeit nach Betriebsstillständen ist hier besonders hervorzuheben /1, 2/.

Aufgrund dieser Verfahrenseigenschaften ergibt sich eine spezielle Eignung für viele gewerbliche und industrielle Einsatzbereiche. Es können sowohl schwach belastete Abwässer betriebsgünstig gereinigt werden als auch solche, deren Konzentration und Zusammensetzung stark schwanken und bei



BLICK IN EINE FEST-BETT-KAMMER: Am Boden sind die Rohrbelüfter sichtbar

Bild 2



**FESTBETT-KLÄRANLAGE: Geringer Platzbedarf, aber sehr leistungsfähig**

Bild 3

denen Schlammprobleme wie Blähschlamm oder Flockenzerfall auftreten.

Bei hochkonzentrierten und schwer abbaubaren Teilströmen kann das Festbett zur Vorbehandlung und zur Elimination von Belastungsspitzen dienen, wie in der Literatur /4, 6, 10, 13, 14/ und im Folgenden dargestellt.

### Abwasser eines Recyclingbetriebs

Ein mittelständiges Entsorgungsunternehmen betreibt eine Anlage zur destillativen Aufbereitung von Teererzeugnissen. Auch Sonderabfälle aus Handwerk und Industrie wie z. B. Alt- und Rückstandsöle, Altölemulsionen, Schmierstoffe und Lösungsmittel werden recycelt. Konzentration und Zusammensetzung des anfallenden Abwassers variieren stark.

Die schwersiedenden Abwasser-Inhaltsstoffe sind oft schwer abbaubar und gehören größtenteils zu den wassergefährdenden Stoffen: u. a. aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe, wie Benzol, Toluol, Xylol.

Im dargestellten Messzeitraum war eine Abwassermenge von 20 m<sup>3</sup>/d zu behandeln. Der Kohlenwasserstoff-Index lag im Messzeitraum durchschnittlich um 80 mg/l die BTX-Konzentration um 100 µg/l. Die regelmäßige Dokumentation der Wasserbelastung erfolgte vor allem über den Summenparameter

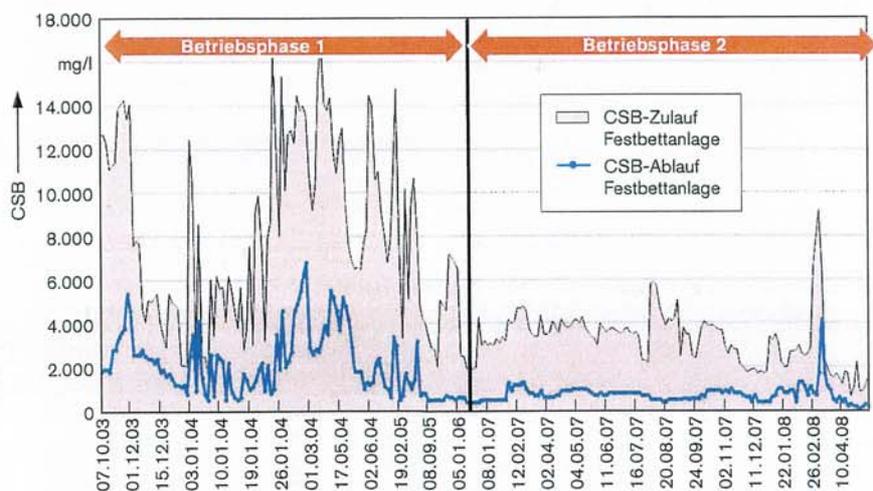
CSB. Der CSB des Wassers wies Spitzenkonzentrationen bis zu 17.000 mg/l, bei Mittelwerten um 8.500 mg/l auf.

Zunächst war die Möglichkeit einer Indirekteinleitung von sedimentiertem Abwasser erprobt worden. Die kommunale Kläranlage, die für etwa 5.000 EW bemessen ist, zeigte bereits bei der Einleitung von nur 6 m<sup>3</sup>/d dieses Abwassers deutliche Betriebs-

probleme. Eine sehr schlechte, biologische Abbaubarkeit des Abwassers war durch Abbaubersuche belegt. Deshalb forderten die Wasserbehörden vor einer Kanaleinleitung eine effektive Vorbehandlung.

Der Transport des anfallenden Abwassers mit Tankwagen zu einer entfernten, größeren Kläranlage sollte vermieden werden (Kostenaufwand rund 18 €/m<sup>2</sup>).

### CSB-Abbau in der ENVIMAC-Festbettkaskadenanlage eines Recyclingunternehmens



**CSB-Abbauleistung in der Festbetтанlage eines Recyclingunternehmens**

Bild 4

Prozentualer CSB-Abbau vs. CSB-Raumbelastung

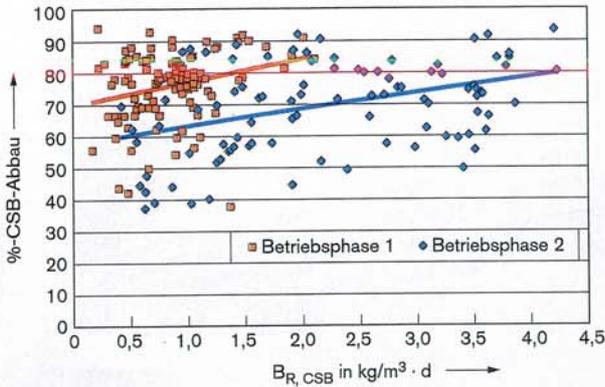


Bild 5

Abhängigkeit des CSB-Abbaus von der CSB-Raumbelastung in einer Festbett-Kaskadenanlage

Als Alternative blieb nur die Installation einer eigenen Abwasserbehandlung. Die angestrebte Reinigungslösung sollte das Wasser auf kleinem Raum und mit geringen Kosten soweit vorreinigen, dass eine problemlose Endreinigung in der kommunalen Kläranlage möglich sein würde. Dabei war zur Gebührenreduktion ein Abbau der Kohlenstoffverbindungen gewünscht.

Aufgrund der stark schwankenden Zusammensetzung und Abwassermenge schien ein Belebungsverfahren ungeeignet. Auch aufgrund des Platzmangels fiel die Entscheidung für die deutlich kleinräumigere Festbett-Lösung. Hierzu gab es bereits in der Literatur beschriebene Erfolge mit ähnlich zusammengesetzten Wässern /14, 15/.

**Anlagenaufbau**

Folgende Anlagenkonzeption wurde umgesetzt:

Die Betriebsabwässer aus den Destillationsanlagen werden zunächst in einem Misch- und Ausgleichsbehälter gesammelt und gelangen, nach Fällung und Flockung, in den aeroben Festbettreaktor einer Containerkläranlage (Stellfläche: 13,6 m x 2,5 m x 2,5 m).

Zur Vergleichmäßigung der Nährstoffkonzentration erfolgt eine Verteilung des Abwasserstroms auf die drei ersten biologischen Festbettkaskaden.

Nach der Sedimentation des Überschussschlammes in der Nachklärung wird die gereinigte Wasserphase nach einer Qualitätskontrolle in den Rückhaltebehälter gefördert. Die Schlammbehandlung erfolgt mittels ei-

nes Dekanters. Der Trockenschlamm wird gesammelt und zur weiteren Entsorgung verbracht. Alle Anlagenbereiche sind an eine Abluftsammeleinleitung angeschlossen. Die biologische Reinigung erfolgt in einem geschlossenen Biofilterreaktor in Containerbauweise, der eine aktive Anströmfläche von 6 m<sup>2</sup> und einen Volumendurchsatz von 180 Nm<sup>3</sup>/h aufweist.

**CSB-Belastung und Abbaugrad**

In Tabelle 1 sind die durchschnittlichen CSB-Belastungswerte des Rohwassers und der Abbaugrad aufgeführt. Die Analysen erfolgten im Zulauf und Ablauf der Anlage, also nach der Flockung. Man erkennt die

enorme Bandbreite der Belastung, so schwankt die Raumbelastung des Festbetts zwischen 0,4 und 2,15 kg CSB/m<sup>3</sup>·d.

Die Ergebnisse der Reinigung sind in Bild 4 (Seite 9) dargestellt. In den ersten Betriebsjahren (Betriebsphase 1) sind bei hohen Zulaufkonzentrationen auch die Ablaufwerte oft deutlich erhöht. Die Ursache hierfür liegt in der schlechten Abbaubarkeit, der Toxizität und dem hohen, inerten CSB des Wassers. Trotzdem wurde im Mittel ein Abbaugrad von rund 70 % erreicht.

Nach den ersten Betriebsjahren wurde die Anlage (Betriebsphase 2) aufgrund einer Produktionsumstellung nur noch mit geringer konzentriertem Abwasser beschickt. Die mittlere CSB-Konzentration lag in dieser Zeit noch bei 3.300 mg/l. Bild 4 zeigt deutlich, dass unterhalb eines Zulauf-CSB von ca. 4.000 mg/l ein Abbau von etwa 75 % mit Ablaufwerten um 1.000 mg/l zuverlässig eingehalten werden kann. Die Darstellung der Abbauleistung der ersten Festbettkaskade zeigt, dass bereits hier ein Großteil der Zulaufbelastung eliminiert wird. Gleichzeitig tritt eine Pufferwirkung hinsichtlich der Belastungsspitzen auf.

Die Auswertungen hinsichtlich des Einflusses der Raumbelastung auf den prozentualen CSB-Abbau sind in Bild 5 dargestellt. Sie zeigen, dass die Abbauleistung mit steigender Belastung über einen weiten Bereich leicht zunimmt. Über das untersuchte Belastungsspektrum hinaus kann mit einem ähnlichen Abbauverhalten gerechnet werden, so

Vergleich verschiedener Entsorgungsvarianten hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit

Tab. 2

Variante 1: Festbettanlage	
Anlagenkosten Leasing	36.000 €/a
Lohnkosten (ca. 0,5 h/d)	2.340 €/a
Energiekosten (0,17 €/kWh)	5.848 €/a
Verwaltung, Unterhalt, Wartung	3.400 €/a
Abwasseruntersuchungen im betriebeigenen Labor inklusive Verbrauchsmaterial	6.000 €/a
<b>Jährliche Betriebskosten</b>	<b>53.588 €/a</b>
Der Aufwand pro Kubikmeter gereinigtem Abwasser liegt bei	7,34 €/m <sup>3</sup>
Variante 2: Indirekteinleitung (ist im beschriebenen Fall nicht möglich)	
Kosten CSB-Schadeinheiten bei Indirekteinleitung gemäß Abwasserabgabegesetz /9/ (Berechnungsbasis: 62.050 kg O <sub>2</sub> als CSB/a, 50 kg O <sub>2</sub> /SE, 35,79 €/SE)	44.415 €/a
Abwasseruntersuchungen im betriebeigenen Labor inklusive Verbrauchsmaterial	6.000 €/a
<b>Gesamt</b>	<b>50.415 €/a</b>
Der Aufwand pro Kubikmeter gereinigtem Abwasser liegt bei	6,91 €/m <sup>3</sup>
Variante 3: Abtransport	
Tanklaster, 20 m <sup>3</sup> /d, täglicher Transport zu einer entsprechend großen, entfernt gelegenen Kläranlage, die das Wasser aufnehmen kann, Preis derzeit 360 €/d	131.400 €/a
Der Aufwand pro Kubikmeter gereinigtem Abwasser liegt bei	18 €/m <sup>3</sup>

Kenndaten des Abwassers des beschriebenen Recyclingunternehmens

Tab. 1

		Wassermenge Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Zulauf CSB (mg/l)	CSB-Zulaufrecht (kg/d)	CSB-Flächenbelastung BA,CSB (g/m <sup>2</sup> d)	CSB-Raumbelastung BR,CSB (kg/m <sup>3</sup> d)	CSB-Abbau (%)
Betriebsphase 1 (98 Werte)	Mittelwert	6,0	8.534	51,7	10,76	2,15	69,5
	Minimum	3,6	1.660	10,0	2,08	0,42	37,5
	Maximum	7,2	16.900	101,4	21,13	4,23	94,0
Betriebsphase 2 (134 Werte)	Mittelwert	6,3	3.303	20,6	4,29	0,86	76,1
	Minimum	3,60	3.600	3,9	0,81	0,16	26,1
	Maximum	14,40	9.200	50,4	10,50	2,10	94,1

dass die maximale Auslastung des Systems noch nicht erreicht scheint. Der erreichte Abbaugrad hängt dabei weniger von der Raumbelastung BR, als vielmehr von der Abwasserzusammensetzung ab, wodurch sich starke Schwankungen ergeben.

In der nachgeschalteten öffentlichen Kläranlage wurden seit Inbetriebnahme des Festbettreaktors keine Störungen durch die Abwässer des Recyclingunternehmens registriert.

### Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Betriebskosten sind in Tabelle 2 dargestellt und mit alternativen Entsorgungsverfahren verglichen. Es wird deutlich, dass eine dezentrale Reinigung mit einer Festbettanlage die wirtschaftlichste Lösung ist. Der tägliche Abtransport des Wassers zu einer entfernt gelegenen, ausreichend großen Kläranlage wäre etwa 2,5-mal so teuer geworden. Pro Kubikmeter gereinigtes Abwasser wird so eine Ersparnis von über 10,60 € erreicht.

### Schlussbetrachtungen

Wie an diesem Beispiel gezeigt werden kann, sind auch biologisch schwer abbaubare Stoffe ohne viel betrieblichen Aufwand und auf kleinem Raum durch Biofilm-Systeme wirtschaftlich effizient zu reinigen. Erreicht wird dies durch die Kombination submerser Biofilme mit Kaskaden. Dabei liegen die Vorteile sowohl bei den geringen Investitions- als auch bei den Betriebskosten. Die eingesetzte Anlage konnte auf einer Stellfläche von nur 34 m<sup>2</sup> rund zwei Drittel der Abwasserfracht eliminieren. Bei geringeren Konzentrationen sind höhere Eliminationsleistungen von etwa 90 % durchaus erreichbar, wie umfangreiche Messungen der Emschergenossenschaft mit einem ähnlichen, jedoch erheblich größeren Festbettreaktor zeigen konnten /14/. Durch die Konzeption als Containeranlage ist eine Parallelschaltung mehrerer Anlagen und damit eine Erweiterung z. B. bei Kampagnenbetrieb oder nachträglicher Erhöhung der Produktion problemlos möglich.

Die Ergebnisse lassen einen sinnvollen Einsatz bei Abwässern mit ähnlichen Inhaltsstoffen z. B. aus Grundwasserreinigung, Raffinerien, Teerproduktionen und chemischer Industrie annehmen.

### KONTAKT

#### ENVIMAC Engineering GmbH

Prof. Dr.-Ing. Jerzy Mackowiak, Geschäftsführer  
Dr. Judith Schulz-Meningmann (Korrespondenzautor)  
Claus Uhlenbruck  
Im Erlengrund 27 | 46149 Oberhausen  
Tel.: 0208/941044-0  
www.envimac.de  
E-Mail: j.schulz-meningmann@envimac.de

### LITERATUR

- /1/ ATV-Arbeitsgruppe 2.6.3 „Tauch- und Tropfkörper“ Anlagen mit getauchten Festbetten. In: Korrespondenz Abwasser, 1996, Vol. 43, Heft 11, S. 2013-2023
- /2/ ATV-DVWK-Arbeitsgruppe KA-6.3 „Tropf- und Tauchkörper“: neue Erkenntnisse über Anlagen mit getauchtem Festbett. In: KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, Vol. 49, Nr. 12 - 2002, S. 1703 ff
- /3/ ATV-DWA Arbeitsgruppe 2.6.3.: „Tauch- und Tropfkörper“ Leitfaden zur Erkennung und Behebung von Betriebsproblemen bei Tropfkörpern, Rotationstauchkörpern und getauchten Festbetten. In: Korrespondenz Abwasser, 2007, Bd. 5, Heft 9
- /4/ Schlegel S.: Die Vorbehandlung industrieller Abwässer in Anlagen mit getauchtem Festbett. In: KA Abwasser Abfall, 2003, 5. Bd. 50, S. 617-622
- /5/ Schulz-Meningmann, J.: Kleinkläranlagen mit getauchtem Festbett - Statistische Auswertung mehrjähriger Wartungsdaten. In: wwt wasserwirtschaft-wassertechnik, 4/2008, S. 17-22
- /6/ Bajaj, M.; Gallert, C.; Winter, J.: Biodegradation of high phenol containing synthetic wastewater by an aerobic fixed bed reactor. Bioresource Technology, November 2008, 17: Bd. 99, S. 8376-8381
- /7/ Goldberg, B.: Biologische Abwasserbehandlung. In: wwt wasserwirtschaft-wassertechnik, Januar 1994
- /8/ Bahrt, A.; Marggraff, M.; Aubert, M.; Sander, H.; Köser, H.: Kompakte Kläranlage mit Festbettreaktor: Erfahrungen mit einer Demonstrationsanlage: Wirksame Nitrifikation und Denitrifikation mit belüfteten, getauchten Festbetten und Schwebebett. In: wwt wasserwirtschaft-wassertechnik, 3/2012
- /9/ Abwasserabgabengesetz - AbwAG (in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. 1. 2005, BGBl. I S. 114) Online Information des Umweltbundesamtes 2012
- /10/ Schulz-Meningmann, J.; Gerard, I.: Industrielle Abwasserreinigung mit getauchtem Festbett. In: EntsorgungsPraxis 10, 1998, S. 51 bis 55
- /11/ Schulz-Meningmann, J.; Richard, M.; Chromik, R.: Denitrifikation mit getauchten Festbettreaktoren in der zentralen Abwasserreinigung. In: EntsorgungsPraxis 1,2 1998, S. 37 bis 41
- /12/ Lehrstuhl und Prüfamf Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen der Technischen Universität München: Abschlussbericht über Untersuchungen an Vario Kompakt Kläranlagen Januar 1991
- /13/ Pape, S.; Schulz, J. Menningmann: Grundlagen und Betriebserfahrungen getauchter, aerober Festbettreaktoren nach dem BIOSUB-Verfahren. In: Korrespondenz Abwasser, Vol 42, 1995, S. 2208 bis 2215
- /14/ Sigurd, S.: Industrieabwässer - Die Vorbehandlung industrieller Abwässer in Anlagen mit getauchten Festbetten. In: Korrespondenz Abwasser, Vol. 5, 2003
- /15/ Schlegel, S.; Stemplenski, J.: Emschergenossenschaft entwickelt biologische Abwasserreinigungsanlage für Aromatenraffinerie. In: Korrespondenz Abwasser, Vol. 4, 2001