

# Entsorgungskonzept für Abfälle aus der Kläranlage des Kreis- krankenhauses Waldbröl

## (Eko-Waldbröl)



für das



Ministerium für Umwelt und  
Naturschutz, Landwirtschaft und  
Verbraucherschutz des Landes  
Nordrhein-Westfalen

AZ IV – 7 – 042 1B4 0030

### Projektpartner:

- Aggerverband

In Kooperation mit:

- Kreiskrankenhaus Waldbröl GmbH
- Pöyry GWK GmbH

Aachen, im Juli 2009



Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen

Direktor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp

Mies-van-der-Rohe-Str. 1 • 52074 Aachen

Tel: 0241 80 25207 • Fax: 0241 80 22285 • [isa@isa.rwth-aachen.de](mailto:isa@isa.rwth-aachen.de)

**Abschlussbericht**  
zum Forschungsvorhaben:

**„Entsorgungskonzept für Abfälle aus der Kläranlage des  
Kreiskrankenhauses Waldbröl (Eko-Waldbröl)“**

AZ: IV - 7 - 042 1B4 0030

für das



Aachen, im Juli 2009

gez.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp  
(Institutsdirektor)

# Zusammenfassung

## Hintergrund und Zielsetzung

Das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) förderte mit dem Pilotprojekt am Kreis-krankenhaus (KKH) Waldbröl die Errichtung einer Kläranlage zur Behandlung von Krankenhausabwasser. In einem ergänzenden Vorhaben wurden Untersuchungen zur Erstellung eines Entsorgungskonzeptes für an der Kläranlage des Krankenhauses anfallende Abfallströme durchgeführt. Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse dieses Vorhabens zusammen. Das herausgearbeitete Entsorgungskonzept wird dem KKH Waldbröl als Handlungsempfehlung für die ordnungsgemäße Entsorgung der Kläranlagenabfälle unterbreitet.

## Vorgehensweise

Die Untersuchungen umfassten eine quantitative und qualitative Charakterisierung der anfallenden Abfallströme an der Kläranlage des Krankenhauses. Diese Abfallströme wurden denen kommunaler Kläranlagen vergleichend gegenübergestellt. Nach der Erfassung und Bewertung der verschiedenen Abfallströme wurden Entsorgungsoptionen für diese Abfallströme eruiert. Hierbei wurden bestehende Entsorgungspfade im Krankenhaus ebenso berücksichtigt, wie das Abfallentsorgungskonzept des Aggerverbandes, der die Kläranlage am Krankenhaus betreibt. In einem nächsten Schritt wurden verschiedene Szenarien für die Abfallentsorgung der krankenhauseigenen Kläranlage betrachtet: Neben einer Entsorgung über das Krankenhaus wurden auch verschiedene Möglichkeiten der Entsorgung über kommunale Kläranlagen des Aggerverbandes eruiert.

## Ergebnisse

Am KKH Waldbröl wird derzeit eine Abwasserreinigungsanlage bestehend aus einem Membranbioreaktor und einer nachgeschalteten Ozonung, die in Kürze im großtechnischen Maßstab errichtet wird, betrieben. Als relevante Abfallströme dieser Kläranlage wurden die Abfallströme des Membranbioreaktors (Rechengut und Klärschlamm) betrachtet. Bei der Ozonung fallen keine zu entsorgenden Abfälle an.

Eine stoffliche Verwertung des an der krankenhauseigenen Kläranlage anfallenden Siebgutes und Klärschlammes ist auch rechtlichen Gründen derzeit grundsätzlich nicht ausgeschlossen. Der Klärschlamm und das Siebgut der Abwasserreinigungsanlage am Kreis-krankenhaus Waldbröl weisen jedoch höhere Belastungen mit Antibiotika, insbesondere aus der Gruppe der Floxacine wie z.B. Ciprofloxacin auf, als Klärschlämme aus kommunalen Anlagen. Es gibt keine verbindlichen Grenz- oder Leitwerte für Arzneimittel-

rückstände im Siebgut oder in Klärschlämmen Aus Gründen des vorbeugenden Umwelt- und Gesundheitsschutzes ist der Wiedereintrag von Arzneimittelrückständen in die Umwelt jedoch zu minimieren.

Als Vorzugsvariante für die Entsorgung des Siebgutes wird eine Entsorgung über das krankenhauseigenen Entsorgungskonzept vorgeschlagen. Das Siebgut sollte mit Abfallfraktionen des Krankenhauses, die einer thermischen Entsorgung zugeführt werden, beseitigt werden. Die Klärschlamm Entsorgung sollte thermisch erfolgen. Eine Entsorgung mit den Krankenhausabfällen in Analogie zur Entsorgung des Rechengutes ist aufgrund der vergleichsweise hohen Mengen an anfallendem Klärschlamm und den mangelnden Entsorgungskapazitäten am Krankenhaus nicht praktikabel. Die Kläranlage Lehmbach ist die einzige Kläranlage des Aggerverbandes, bei der eine thermische Entsorgung des Klärschlammes erfolgt. Da das KKH Waldbröl den Betrieb der Kläranlage an die Aggerwasser GmbH /Aggerverband übertragen hat, ist dieses Modell für die praktische Umsetzung problemlos zu empfehlen und auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten vertretbar.

### **Fazit**

Die Nutzung bereits bestehender Entsorgungspfade sowohl im Bereich des Krankenhauses als auch im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung hat sich im Rahmen des Projektes als praktikabel und vorteilhaft erwiesen. Bei der Entsorgung von Abfällen aus krankenhauseigenen Kläranlagen sind jedoch krankenhausspezifische Belastungen der Abfallströme zu berücksichtigen. Im Rahmen der Untersuchungen am Kreiskrankenhaus Waldbröl haben sich insbesondere Belastungen mit Antibiotika als relevant erwiesen. Vor diesem Hintergrund empfiehlt sich eine thermische Entsorgung der Abfälle aus krankenhauseigenen Kläranlagen.

## Projektbearbeitung

Wissenschaftliche Bearbeitung und Leitung	Bearbeiter
 <p>Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA)            Direktor:            Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp            Mies-van-der-Rohe-Str. 1            52074 Aachen            Telefon: 0241 - 80 25207            Telefax: 0241 - 80 22285            E-Mail: <a href="mailto:isa@isa.rwth-aachen.de">isa@isa.rwth-aachen.de</a>  <a href="http://www.isa.rwth-aachen.de">http://www.isa.rwth-aachen.de</a></p>	<p>Dipl.-Ing. S. Beier            Dipl.-Biol. C. Cramer            Dipl.-Ing. M. Reiss            Prof. Dr. rer. nat.            H. Fr. Schröder</p>
<p><b>Projektpartner</b></p>	
 <p>Aggerverband            Sonnenstraße 40            51645 Gummersbach            Telefon: 02261 - 36 226            Telefax: 02261 - 36 8226            E-Mail:  <a href="mailto:martin.weber@aggerverband.de">martin.weber@aggerverband.de</a>  <a href="http://www.aggerverband.de">http://www.aggerverband.de</a></p>	<p>Dipl.-Wirt.-Ing. M. Weber            Dipl.-Ing. C. Haller</p>
<p>in Kooperation mit</p>	
 <p>Kreiskrankenhaus Waldbröl GmbH            Dr.-Goldenbogen-Straße 10            51545 Waldbröl            Telefon: 02291 - 82 0            Telefax: 02291 - 82 16 00            E-Mail: <a href="mailto:friedhelm.courth@kkh-waldbroel.de">friedhelm.courth@kkh-waldbroel.de</a>  <a href="http://www.kkh-waldbroel.de">http://www.kkh-waldbroel.de</a></p>	<p>Wirtschaftsleiter F. Courth            Dipl.-Ing. K. Steinel            Dipl.-Ing. N. Suma            Stellv. techn. Ltg. H. Baeck</p>
 <p>Pöyry GWK GmbH            Kruppstraße 82            45145 Essen            Telefon: 0201 - 82054 24            Telefax: 0201 - 82054 22            E-Mail: <a href="mailto:christian.mauer@poyry.com">christian.mauer@poyry.com</a>  <a href="http://www.poyry.com">http://www.poyry.com</a></p>	<p>Dipl.-Ing. C. Mauer</p>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>X</b>
<b>1 Veranlassung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Zielsetzung und Vorgehensweise.....</b>	<b>2</b>
<b>3 Darstellung der Ausgangssituation.....</b>	<b>3</b>
<b>4 Rechtliche Rahmenbedingungen und sonstige Regelungen für die Entsorgung von Abfällen.....</b>	<b>5</b>
4.1 Europäische Rahmengesetzgebung .....	5
4.2 Nationale Rechtsvorgaben .....	6
4.3 Bestrebungen zur Novellierung des Rechtsrahmens .....	8
4.4 Abfälle aus kommunalen Kläranlagen.....	10
4.5 Abfälle aus Krankenhäusern .....	10
4.6 Rechtliche Einordnung von Abfällen aus krankenhauseigenen Kläranlagen .....	11
<b>5 Abfallströme der krankenhauseigenen Kläranlage.....</b>	<b>14</b>
5.1 Membranbioreaktor des KKH Waldbröl.....	14
5.1.1 Quantitative Charakterisierung der Abfallströme.....	15
5.1.2 Qualitative Charakterisierung der Abfallströme .....	17
5.1.3 Monetäre Rahmenbedingungen .....	21
5.2 Abfallströme der Pilotanlagen im Pilotprojekt KKH Waldbröl .....	22
5.2.1 Ozonung.....	22
5.2.2 Nanofiltration/Umkehrosmose .....	22
5.2.3 Aktivkohleadsorption .....	23
<b>6 Entsorgungsoptionen für Abfälle der krankenhauseigenen Kläranlage .....</b>	<b>25</b>
6.1 Abfallströme im Kreiskrankenhaus Waldbröl.....	25
6.2 Entsorgung von Abfällen kommunaler Kläranlagen im Aggerverbandsgebiet ...	27
6.3 Alternative Klärschlammentsorgungsoptionen .....	29

6.3.1	Mechanisch-biologische Behandlungsanlagen (MBA) mit anschließender Deponierung .....	29
6.3.2	Thermische Behandlungsanlagen .....	30
6.3.2.1	Monoverbrennung .....	30
6.3.2.2	Mitverbrennung in Kohlekraftwerken .....	31
6.3.2.3	Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen .....	32
6.3.2.4	Mitverbrennung in Zementwerken .....	32
6.4	Bewertung der Klärschlamm Entsorgungsverfahren .....	32
6.4.1	Landwirtschaftliche Verwertung .....	33
6.4.2	Behandlung in MBA's mit anschließender Deponierung .....	34
6.4.3	Thermische Verfahren .....	35
6.4.3.1	Monoverbrennungsanlagen .....	35
6.4.3.2	Mitverbrennung in Kohlekraftwerken .....	35
6.4.3.3	Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen .....	36
6.4.3.4	Mitverbrennung in Zementwerken .....	36
6.4.4	Zusammenfassende Bewertung der Klärschlamm Entsorgungspfade .....	37
<b>7</b>	<b>Szenarienbetrachtungen für die Entsorgung von Abfällen der krankenhauseigenen Kläranlage .....</b>	<b>38</b>
7.1	Szenario 1: Entsorgung über das KKH Waldbröl .....	39
7.1.1	Siebgutentsorgung .....	39
7.1.2	Klärschlamm Entsorgung .....	39
7.2	Szenario 2: Entsorgung via KA Brenzingen .....	40
7.2.1	Siebgutentsorgung .....	40
7.2.2	Klärschlamm Entsorgung .....	40
7.3	Szenario 3: Klärschlamm Entsorgung via KA Lehmbach .....	41
7.3.1	Siebgutentsorgung .....	41
7.3.2	Klärschlamm Entsorgung .....	41
7.4	Vergleichende Bewertung der Szenarien und Ableitung eines Entsorgungskonzeptes .....	42

---

<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen .....</b>	<b>46</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>48</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Projektstruktur Eko-Waldbröl .....	2
Abbildung 3-1:	Entwässerungssituation an Standort Waldbröl .....	3
Abbildung 4-1:	Abfallarten in Krankenhäusern und Entsorgungswege nach LAGA-Richtlinie .....	11
Abbildung 5-1:	Verfahrensschema des MBR Waldbröl.....	14
Abbildung 5-2:	Schwermetallkonzentrationen im Klärschlamm.....	20
Abbildung 6-1:	Kategorisierung der Abfallströme des KKH Waldbröl.....	26
Abbildung 6-2:	Verteilung der Abfallfraktionen des KKH Waldbröl.....	27

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Rechtskräftige und diskutierte Konzentrationsgrenzwerte für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Deutschland .....	9
Tabelle 4-2:	Übersicht zu wichtigen Reststoffen aus der Abwasserreinigung mit ihrem jeweiligen Abfallschlüssel gemäß Abfallverzeichnisverordnung...	10
Tabelle 5-1:	Abfallströme am MBR Waldbröl .....	15
Tabelle 5-2:	Konzentrationen ausgewählter Pharmaka im Rechengut der kommunalen KA Brenzingen und der KA am KKH Waldbröl .....	17
Tabelle 5-3:	Konzentrationen von den als Leitsubstanzen ausgewählten Pharmaka in Klärschlämmen aus konventionellen Anlagen und MBR-Anlagen.....	19
Tabelle 6-2:	MBA's in Nordrhein-Westfalen .....	29
Tabelle 6-3:	Monoverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen .....	30
Tabelle 6-4:	Kraftwerke in Nordrhein-Westfalen mit Einsatz von Klärschlamm als Ersatzbrennstoff .....	31
Tabelle 6-5:	Mittlere spezifische Jahreskosten der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung .....	33
Tabelle 6-6:	Mittlere spezifische Kosten Gesamtkosten einer Monoverbrennung von Klärschlamm .....	35
Tabelle 6-7:	Mittlere spezifische Kosten Gesamtkosten einer Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken .....	36
Tabelle 6-8:	Mittlere spezifische Kosten Gesamtkosten einer Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllverbrennungsanlagen.....	36
Tabelle 6-9:	Mittlere spezifische Kosten Gesamtkosten einer Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken .....	37
Tabelle 7-1:	Vergleich der untersuchten Szenarien für die Siebgutentsorgung .....	43
Tabelle 7-2:	Vergleich der untersuchten Szenarien für die Klärschlammentsorgung.	44

## Abkürzungsverzeichnis

AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AbwV	Abwasserverordnung
BSB <sub>n</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf (in n Tagen)
DepV	Deponieverordnung
FuE	Forschung und Entwicklung
KA	Kläranlage
KKH	Kreiskrankenhaus
KrW/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage
MBR	Membranbioreaktor
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
MVA	Müllverbrennungsanlage
PS	Primärschlamm
TAAbfall	Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung (Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz)
TASi	Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz)
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanzgehalt
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
ÜSS	Überschussschlamm

# 1 Veranlassung

Die möglichst umweltverträgliche Entsorgung von Klärschlamm ist seit langem Gegenstand intensiv geführter Diskussionen. Insbesondere die Nutzen-Risiko Abwägung der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung fällt nicht einheitlich aus. Anlass, die Klärschlamm Entsorgung in der Landwirtschaft und im Landbau zu hinterfragen, gibt es, da Klärschlämme nicht nur humusbildende Eigenschaften besitzen und Pflanzennährstoffe enthalten, sondern in ihrer Funktion als Schadstoffsенke der Abwasserreinigungsprozesse auch schädliche Inhaltstoffe aufweisen. Erst seit wenigen Jahren erfährt die organische Schadstoffbelastung von Klärschlämmen erhöhte Aufmerksamkeit. In diesem Zusammenhang ist auch eine potenzielle Belastung des Klärschlammes mit Arzneimittelrückständen zu sehen. Vordringlich wird diese Frage, wenn über die Entsorgung von Klärschlämmen zu befinden ist, die aus Kläranlagen zur separaten Behandlung von Krankenhäusern entstammen.

Im Rahmen des vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen geförderten Pilotprojektes „Kreiskrankenhaus Waldbröl (KKH Waldbröl)“ haben sich Fragen zur Entsorgung der Abfallströme und insbesondere des Klärschlammes aus der Membranbelebungsanlage des Kreiskrankenhauses Waldbröl ergeben. Zielsetzung des Forschungsvorhabens Eko-Waldbröl ist die Entwicklung eines umweltverträglichen Entsorgungskonzeptes für die Abfallströme aus der krankenhauseigenen Kläranlage. Es werden neben den Abfällen aus der Membranbelebungsanlage auch die Rückstände aus den pilotierten Techniken zur Nachbehandlung des MBR-Filtrats einbezogen. Das zentrale Ziel des Forschungsvorhabens Eko-Waldbröl ist die Einstufung des Klärschlammes und weiterer Abfallströme potentieller Nachbehandlungsverfahren hinsichtlich des Gefährdungspotentials und möglicher Entsorgungsoptionen. Von besonderem Interesse ist, inwieweit sich die Belastung des Krankenhaus-Klärschlammes von der Belastung der Klärschlämme aus konventionellen Kläranlagen unterscheidet. Die Bewertung und Entwicklung eines Entsorgungskonzeptes erfolgt anhand maßgeblicher rechtlicher, politischer, ökologischer und ökonomischer Rahmenbedingungen.

## 2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel des Projektes ist die Erarbeitung eines Konzeptes zur langfristig gesicherten, umweltschonenden und kosteneffizienten Entsorgung von Abfallströmen aus einer krankenhaus-eigenen Kläranlage. Als Referenzobjekt diente die erste europäische Krankenhauskläranlage am Kreiskrankenhaus Waldbröl (vgl. FuE-Vorhaben „Eliminierung von Spurenstoffen aus Krankenhausabwasser mit Membrantechnik und weitergehenden Verfahren (AZ IV - 9 - 042 1B4 0020, Pilotprojekt Waldbröl)“. Die Projektbearbeitung erfolgte mit drei Arbeitspaketen, deren Inhalte nachfolgend zusammengefasst sind:

Arbeitspaket	Arbeitsinhalt
<p><b>Arbeitspaket 1</b> Diskussion rechtlicher Rahmenbedingungen und sonstiger Regelungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfassung bestehender gesetzlicher Rahmenbedingungen auf dem Gebiet der Klärschlamm-entsorgung und -behandlung</li> <li>• Darstellung sich abzeichnender zukünftiger Entwicklungen</li> </ul>
<p><b>Arbeitspaket 2</b> Darstellung und Bewertung derzeitiger Verfahren zur Klärschlamm-entsorgung</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusammenstellung aktueller Klärschlamm-entsorgungspfade des Aggerverbandes</li> <li>• Darstellung alternativer Entsorgungsoptionen</li> <li>• Bewertung der Entsorgungsverfahren</li> </ul>
<p><b>Arbeitspaket 3</b> Entwicklung eines Entsorgungskonzeptes</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Darstellung von Menge und Qualität der anfallenden Klärschlämme am MBR Waldbröl</li> <li>• Erstellung von Prognosen für die im Rahmen des Pilotprojektes KKH Waldbröl eingesetzten weitergehenden Verfahrenstechniken</li> <li>• Darstellung der Entsorgungskosten</li> <li>• Ableitung von Handlungsempfehlungen und Erstellung eines Entsorgungskonzeptes für das KKH Waldbröl</li> </ul>

**Abbildung 2-1: Projektstruktur Eko-Waldbröl**

Die Projektbearbeitung erfolgte in enger Interaktion mit dem FuE-Vorhaben „Pilotprojekt Waldbröl“. Dadurch konnten bereits ermittelte verfahrenstechnische und analytische Projektergebnisse für die Konzepterstellung herangezogen und optimal genutzt werden.

### 3 Darstellung der Ausgangssituation

Im Rahmen eines Pilotprojektes des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) wurde am Kreiskrankenhaus Waldbröl (KKH Waldbröl) erstmals eine Anlage zur separaten Behandlung von Krankenhausabwasser errichtet und als Membranbioreaktor (MBR) ausgebildet. Da das KKH Waldbröl im Ist-Zustand im Mischsystem entwässerte, kam es bei Regenereignissen zu sehr hohen Mischwassermengen und durch die damit einhergehende Verdünnung auch zu sehr niedrigen Konzentrationen der relevanten Spurenstoffe im Ablauf des Krankenhauses. Daher wurde in einer ersten Projektphase das anfallende Regenwasser von den abflusswirksamen Flächen, wie z.B. den Dach- und Parkplatzflächen, soweit wie möglich vom Kanalnetz abgekoppelt und über neu erstellte Rohrleitungen und Regenrückhaltebecken mit Abflussdrosselung direkt dem Waldbrölbach zugeführt. Zugleich wurde ein Membranbioreaktor zur Vorreinigung des Krankenhausabwassers errichtet. Die aktuelle Entwässerungssituation am Standort Waldbröl ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

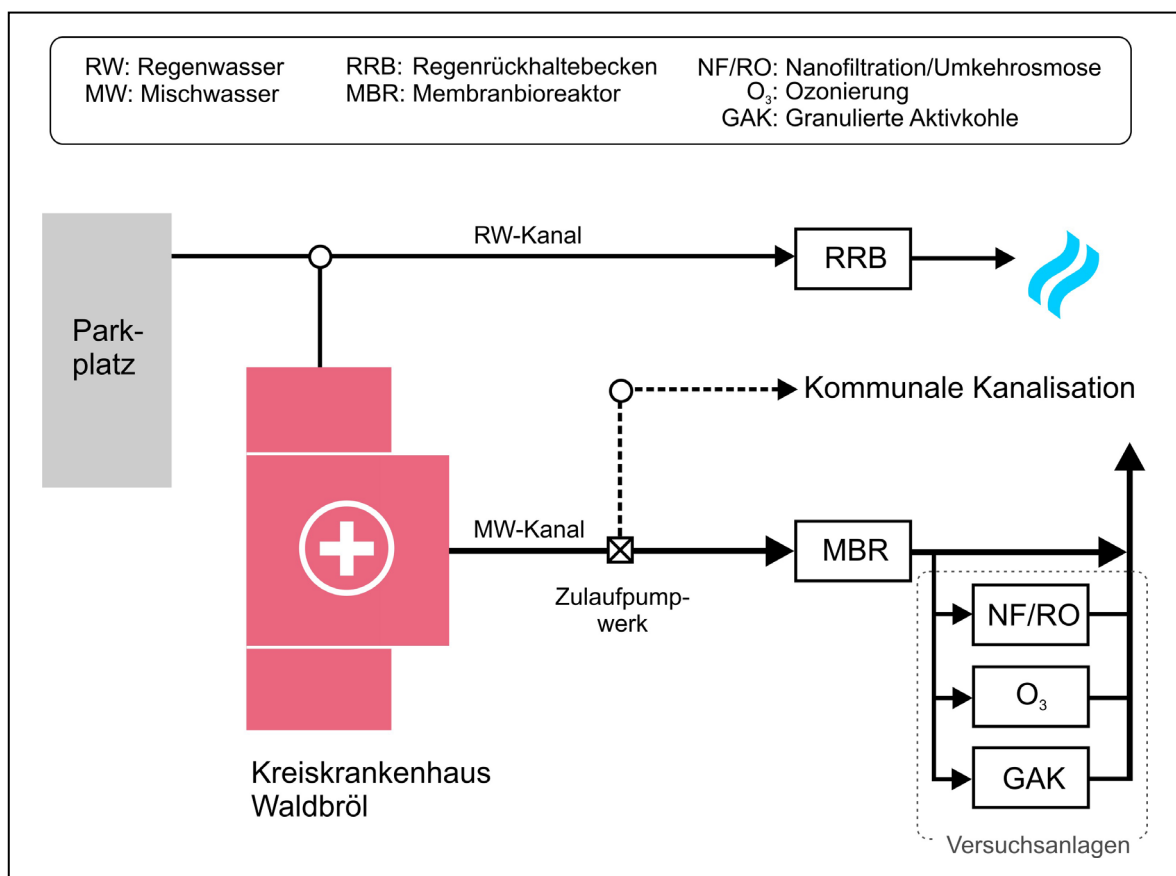


Abbildung 3-1: Entwässerungssituation an Standort Waldbröl

In einer zweiten Projektphase des Pilotprojektes wird der Ablauf des MBR einer weitergehenden Behandlung zur Entfernung von Arzneimittelrückständen unterzogen. Hierzu untersucht das ISA der RWTH Aachen sowohl adsorptive als auch oxidative Verfahren sowie weitergehende Membranverfahren im halbtechnischen Maßstab zum Zweck der verbesserten Elimination persistenter Pharmaka und Diagnostika. Zur Bewertung der Reinigungsleistung des MBR und der pilotierten Technologien zur weitergehenden Elimination ausgewählter Inhaltsstoffe werden sowohl konventionelle chemische, substanzspezifische, chemisch-physikalische als auch wirkungsbezogene biochemische und biologische Analysemethoden eingesetzt.

Das Ziel des Pilotprojektes „KKH Waldbröl“ ist die Entwicklung und Etablierung geeigneter Methoden zur Bewertung ökotoxikologischer, endokriner und gentoxischer Wirkungen von Inhaltsstoffen aus originären Krankenhausabwässern in Abhängigkeit des Abwasserreinigungsprozesses. Untersuchungen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener pilotierter Verfahren sollen in Kombination mit konventioneller chemischer, substanzspezifischer, chemisch-physikalischer als auch wirkungsbezogenen biochemischen und biologischen Analyseverfahren die Auswahl einer effizienten Reinigungstechnologie ermöglichen, die nach Abschluss des Forschungsvorhabens großtechnisch als weitergehende Behandlungsstufe dem Membranbioreaktor nachgeschaltet wird.

Im Rahmen des vorliegenden FuE-Vorhabens werden Abfallströme des großtechnisch realisierten MBR Waldbröl sowie Abfälle der pilotierten Versuchsanlagen der weitergehenden Behandlung (Nanofiltration/Umkehrosmose, Ozonung und Aktivkohleadsorption) qualitativ bewertet und ein Entsorgungskonzept für Abfälle der Kläranlage des KKH Waldbröl erstellt. Auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse wird in enger Interaktion mit dem Betreiber der Kläranlage eine ordnungsgemäße und kostenoptimierte Abfallentsorgung abgeleitet.

## 4 Rechtliche Rahmenbedingungen und sonstige Regelungen für die Entsorgung von Abfällen

Die Entsorgung von Abfällen im Allgemeinen und damit auch die Entsorgung von Abfällen aus Krankenhäusern und deren Kläranlagen unterliegen in Deutschland strengen rechtlichen Vorgaben, deren inhaltliche Ausgestaltung in großen Anteilen durch die Europäische Union vorgegeben wird. So setzt die Europäische Union im Zuge der Schaffung eines einheitlichen europäischen Rechtsraums Richtlinien für die Mitgliedsstaaten fest, die dann auch in Deutschland auf Bundesebene übernommen und als Gesetz erlassen werden müssen (Subsidiaritätsprinzip). Anschließend erlässt die Bundesregierung dem Föderalismusprinzip entsprechend weitere Gesetze, die sich dann wiederum auch in den einzelnen Landesgesetzen niederschlagen müssen.

### 4.1 Europäische Rahmengesetzgebung

Auf europäischer Ebene gibt es bislang kein spezielles Regelwerk für die Entsorgung von Abfällen aus Krankenhäusern. Mit der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis ist allerdings sicher gestellt, dass EU-weit allen Abfällen und somit auch Abfällen aus Krankenhäusern entsprechende Abfallschlüssel zugeordnet werden. Über die Abfallschlüssel werden die Abfallgruppen bestimmten Gefahrenklassen zugeordnet und der erforderliche Überwachungsgrad wird festgelegt.

Die Grundlage für den Umgang mit Abfällen innerhalb der Europäischen Gemeinschaft stellte bis zum 12. Dezember 2008 die Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle – kurz Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL) – vom 05. April 2006 (2006/12/EG) dar.<sup>1</sup> Diese wurde durch die Richtlinie 2008/98/EG novelliert, allerdings bisher noch nicht in bundesdeutsches Recht übernommen, sodass derzeit noch die Vorgaben der alten Abfallrahmenrichtlinie verbindlich sind. Diese definiert unter Artikel 1 den Begriff Abfall als „alle Stoffe oder Gegenstände [...], deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss“. Auch wenn diese Definition für Abwasser grundsätzlich zutreffend wäre, so sind flüssige Abfälle aus dem Gültigkeitsbereich der AbfRRL explizit ausgeschlossen worden (2006/12/EG, Art. 2 I b iv). Ebenso werden die Begriffe „Beseitigung“ und „Verwertung“ über die angewandten Behandlungsverfahren definiert. Somit handelt es sich bei der Aufbringung auf den Boden zum Nutzen der Landwirtschaft oder der Ökologie oder bei der Hauptverwendung als Brennstoff oder andere Mittel der

---

<sup>1</sup> Die bis dahin geltende Abfallrahmenrichtlinie (75/442/EWG) wurde durch diese außer Kraft gesetzt.



Energieerzeugung um eine Verwertungsmaßnahme. Dagegen handelt es sich bei der Deponierung oder Verbrennung in einer Müllverbrennungsanlage um Beseitigung.

Aufbauend auf der Abfallrahmenrichtlinie hat der Europäische Rat die Verwertung und Beseitigung von Abfällen durch die Richtlinie über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft (86/278/EWG), die Richtlinie über Abfalldponien (1999/31/EG) sowie EG-Abfallverbringungsverordnung (2006/1013/EG) weiter konkretisiert. So ist in der Richtlinie 86/278/EWG vorgeschrieben, welche Zusammensetzung Schlämme aufweisen dürfen, die auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht werden. In der Richtlinie (1999/31/EG) wird eine Einteilung in verschiedene Deponieklassen vorgenommen und das zulässige Inventar für die jeweilige Deponie definiert. Die Verordnung über die Verbringung von Abfällen der Europäischen Gemeinschaft regelt unter anderem, dass Abfälle grundsätzlich im Inland zu beseitigen sind. Abwasserseitig regelt die Richtlinie des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser (91/271/EWG), dass Klärschlamm aus der Abwasserbehandlung möglichst wiederzuverwenden ist. Allerdings sind dabei die Belastungen für die Umwelt auf ein Minimum zu reduzieren. Außerdem ist das Einbringen von Klärschlamm in Oberflächengewässer nicht gestattet.

## 4.2 Nationale Rechtsvorgaben

Die Rahmengesetzgebung der Europäischen Gemeinschaft hat für den deutschen Rechtsraum primär Umsetzung im Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW/AbfG) gefunden.<sup>2</sup> Mit Inkrafttreten dieses Gesetzes und der Einführung des Europäischen Abfallverzeichnisses (vgl. Kapitel 4.1.1) wurde auch die Entsorgung von Abfällen aus Krankenhäusern europarechtskonform geregelt.

Der Geltungsbereich des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes erstreckt sich auf die Vermeidung, die Verwertung und die Beseitigung von Abfällen. Ausgenommen sind hier aber unter anderem Stoffe, sobald diese in Gewässer oder Abwasseranlagen eingeleitet oder eingebracht werden (§2 II 6). Den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft entsprechend schreibt das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz in § 4 vor, dass Abfälle primär zu vermeiden, in zweiter Linie zu verwerten und erst in letzter Konsequenz zu beseitigen sind. Der Vorrang der Verwertung von Abfällen vor deren Beseitigung entfällt lediglich dann, wenn die Beseitigung die umweltverträglichere Lösung darstellt. Gleichzeitig ist die stoffliche Verwertung der energetischen Verwertung vorzuziehen, wenn diese die umweltver-

---

<sup>2</sup> Derzeit gültige Fassung vom 27.09.1994 (BGBl. I S. 2705), zuletzt geändert am 22.12.2008 (BGBl. I S. 2986).

träglichere Verwertungsart darstellt, wobei die stoffliche Verwertung die Substitution von Rohstoffen durch das Gewinnen von Stoffen aus Abfällen und die energetische Verwertung den Einsatz von Abfällen als Ersatzbrennstoff beinhaltet. Die Zulässigkeit der energetischen Verwertung und damit auch die Abgrenzung zur thermischen Beseitigung sind darüber hinaus an weitere gesetzliche Vorgaben wie beispielsweise das Erreichen eines bestimmten Heizwertes oder eines Feuerungswirkungsgrades gebunden. Unmittelbar aus dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz ergeben sich auch die Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft im Bereich der landwirtschaftlichen Düngung (§ 8), die in der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) unter Einbeziehung der Düngemittelverordnung konkretisiert werden.

Die europäischen Vorgaben für die Abfallbeseitigung mittels Deponien finden im Bundesrecht ebenfalls ihre Umsetzung im KrW/AbfG und werden konkretisiert in der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27.04.2009<sup>3</sup>, der Technischen Anleitung Abfall [TAA 1992] und der Technischen Anleitung Siedlungsabfall [TASi 1993]. Gemäß den Anforderungen der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts dürfen in Deutschland keine biologisch abbaubaren Abfälle mehr unbehandelt abgelagert werden. Insbesondere durch thermische Behandlung sollen die organischen Bestandteile und Schadstoffe in den Abfällen zerstört und die anorganischen Schadstoffe abgetrennt oder immobilisiert werden. Als Behandlungsverfahren können auch geeignete mechanisch-biologische Verfahren eingesetzt werden. Die nach der Behandlung zur Ablagerung gelangenden Abfälle müssen die in der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts festgelegten jeweiligen Deponiezuordnungskriterien einhalten, die in Verbindung mit den Anforderungen an den Standort (Geologie) und die technische Ausstattung (Abdichtungssysteme, Deponiegas- und Sickerwasserfassungssysteme) sowie den Deponiebetrieb eine weitestgehend nachsorgefreie Deponierung gewährleisten.

Ferner sind bei allen Verwertungs- und Beseitigungswegen die Vorschriften des Gesetzes zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) und des Gesetzes zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) zu beachten.

---

<sup>3</sup> Mit Inkrafttreten der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts am 16.07.2009 sind die Deponieverordnung vom 24. Juli 2002, die Abfallablagerungsverordnung vom 20.02.2001 und die Deponieverwertungsverordnung vom 25.07.2005 außer Kraft getreten.

### 4.3 Bestrebungen zur Novellierung des Rechtsrahmens

Mit dem In-Kraft-Treten der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien wurde die bis dahin gültige Abfallrahmenrichtlinie novelliert. Die Umsetzung dieser Novellierung in deutsches Recht wird zwangsläufig eine Änderung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes bzw. Nachfolgegesetze (Umweltgesetzbuch) nach sich ziehen [WENDENBURG 2009]. Die neue EU-Abfallrahmenrichtlinie hält nicht an der in Deutschland praktizierten dreistufigen Abfallhierarchie (Vermeidung – Verwertung – Beseitigung) fest, sondern legt in Artikel 4 eine fünfstufige Abfallhierarchie aus Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung (z.B. energetische Verwertung) und Beseitigung fest.

Ebenso wird in der Novelle festgeschrieben, dass neben der vorzuziehenden Vermeidung von Abfällen die Wiederverwendung und das stoffliche Recycling den Vorzug vor der energetischen Verwertung von Abfällen haben soll, sofern dies unter Umweltschutzgesichtspunkten zu vertreten ist. Dem Anhang zur Novelle ist dabei zu entnehmen, dass es sich bei der energetischen Behandlung in Verbrennungsanlagen zukünftig nur noch dann um eine Verwertung handelt, wenn die Ausnutzung des Energiegehaltes 65 % beträgt (bei alten Anlagen 60%). Dies würde voraussetzen, dass bei der Verbrennung von Abfällen nicht nur elektrische Energie erzeugt, sondern auch die anfallende Wärmeenergie genutzt werden muss, was wiederum eine Aufrüstung der entsprechenden Anlagen bedingen würde [WENDENBURG 2009].

Bei der Verwertung und Entsorgung von Klärschlämmen ist die laufende Novellierung der Klärschlammverordnung zu berücksichtigen. Seit November 2007 liegt ein entsprechender Arbeitsentwurf des Bundesumweltministeriums vor. Auch wenn sich im Zuge des Gesetzgebungsverfahrens noch Modifikationen zum Arbeitsentwurf ergeben werden, so ist davon auszugehen, dass es deutlich schwieriger werden wird, Klärschlämme in der Landwirtschaft zu verwerten. Diese Tendenz ist nicht zuletzt daran erkennbar (vgl. Tabelle 4-1), dass der Entwurf eine deutliche Herabsetzung der zulässigen Grenzwerte an Schwermetallen im Klärschlamm und in den zur Verwertung genutzten Böden vorsieht.

Bei den Verbotskriterien für die Aufbringung von Klärschlamm/-komposten kommt der Stoff Benz(a)pyren hinzu und es wird der zuständigen Genehmigungsbehörde freigestellt, noch weitere Klärschlamm-inhaltsstoffe als Ausschlusskriterien für die Aufbringung von Klärschlamm festzusetzen. Der Arbeitsentwurf des Bundesumweltministeriums sieht darüber hinaus zum einen eine verpflichtende Hygienisierung des Klärschlammes vor der landwirtschaftlichen Verwertung vor. Zum anderen werden die zulässigen Aufbringungs-

mengen für Klärschlammkomposte halbiert und die Vermischung von Klärschlämmen aus Abwasserbehandlungsanlagen unterschiedlicher Betreiber verboten.

Bei der Verwertung kommunaler Klärschlämme sind auch die Anforderungen der Düngemittelverordnung (DüMV) zu berücksichtigen. Die Düngemittelverordnung wurde 2008 novelliert und beinhaltet ergänzende Regelungen für Klärschlämme (u. a. Hygieneanforderungen, Abgabe von Klärschlamm nur zu direkter Verwendung im unvermischten Zustand). Da die Klärschlammverwertung derzeit im Spannungsfeld zwischen Düngemittel- und Abfallrecht steht, wird diesbezüglich eine tragfähige Neuabgrenzung erarbeitet. In der Zwischenzeit (bis zum 31.12.2016) gelten für die stoffliche Zusammensetzung und Behandlung von Klärschlämmen für eine Verwertung in der Landwirtschaft die Anforderungen der Klärschlammverordnung. Sofern ab 01.01.2017 keine rechtlich verbindliche Neuabgrenzung zwischen Abfall- und Düngerecht in Kraft getreten ist, gelten für Klärschlämme ab diesem Zeitpunkt automatisch die Anforderungen der Düngemittelverordnung [BERGS, 2009].

**Tabelle 4-1: Rechtskräftige und diskutierte Konzentrationsgrenzwerte für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Deutschland**

Schwermetalle in mg/kg TR	AbfKlärV 1992	Vorschlag BMU Novelle 2007	Grenzwertabsenkung in %
Cadmium	10	2,5	75
Kupfer	800	700	12,5
Quecksilber	8	1,6	80
Nickel	200	60	70
Blei	900	120	87
Zink	2.500	1.500	40
Chrom	900	100	89
<b>Organische Schadstoffe in mg/kg TR</b>			
PCB	0,2	0,1	50
AOX	500	400	20
PAK (Benz-a-Pyren)	-	1	
PFT	-	0,2/0,1*	
<b>Dioxine in ng TE/kg TR</b>			
PCDD/F	100	30	70

\*) Außerhalb des Novellierungstextes vorgeschlagene zweistufige Grenzwertregelung

#### 4.4 Abfälle aus kommunalen Kläranlagen

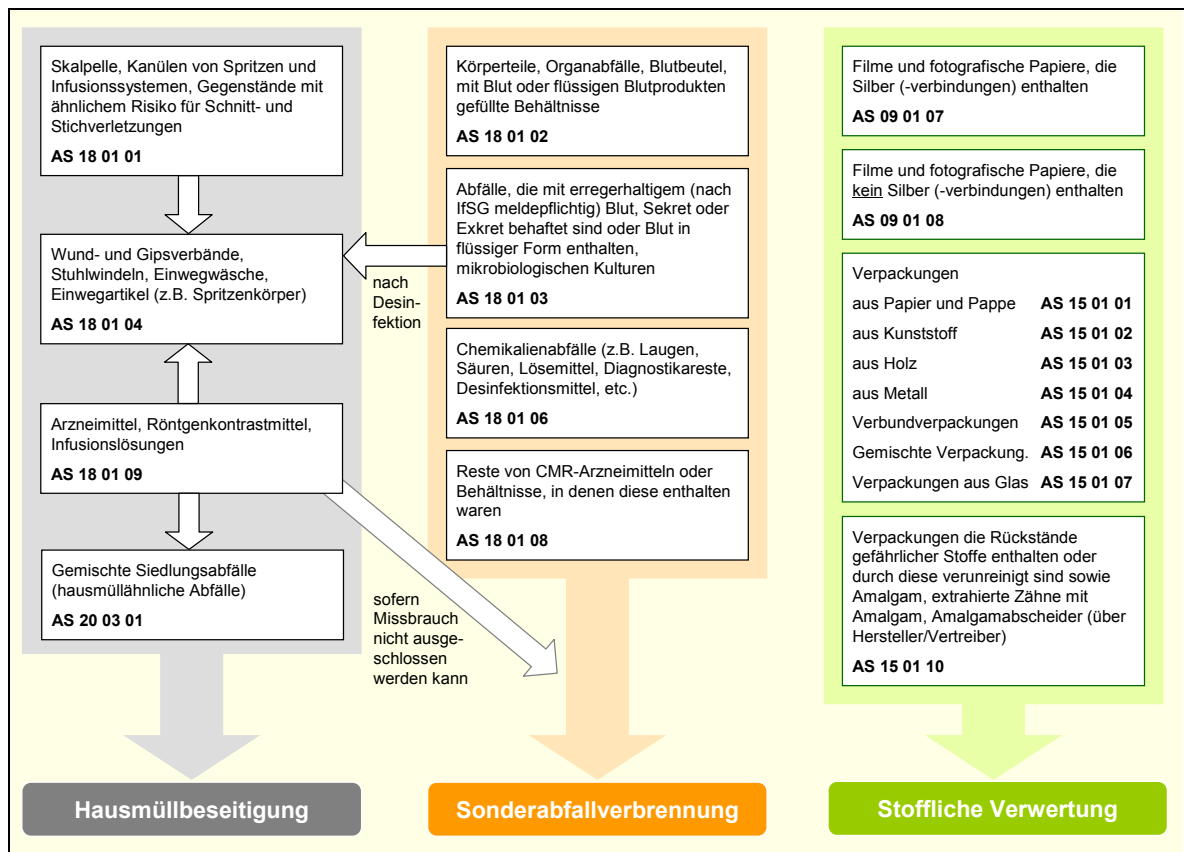
Bei der Abwasserreinigung in kommunalen Kläranlagen anfallende Abfälle müssen schadlos entsorgt werden. In Tabelle 4-2 sind in Anlehnung an die Abfallverzeichnisverordnung die wesentlichen Abfallarten aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen mit ihrem jeweiligen Abfallschlüssel aufgelistet. Als wesentliche rechtliche Grundlagen auf nationaler Ebene sind die Technische Anleitung Siedlungsabfall [TASi, 1993] und im Hinblick auf eine landwirtschaftliche Verwertung der Klärschlämme die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) zu beachten. Wie bereits unter Kapitel Kapitel 4.2 ausgeführt, dürfen keine biologisch abbaubaren Abfälle mehr unbehandelt abgelagert werden. Diese Regelung betrifft auch Rechengut aus Kläranlagen (Abfallschlüsselnummer 190801), welches demnach der thermischen Abfallbeseitigung oder einer geeigneten Vorbehandlung zugeführt werden muss.

**Tabelle 4-2: Übersicht zu wichtigen Reststoffen aus der Abwasserreinigung mit ihrem jeweiligen Abfallschlüssel gemäß Abfallverzeichnisverordnung**

Abfallschlüssel	Abfallbezeichnung
19 08 01	Sieb- und Rechenrückstände
19 08 02	Sandfangrückstände
19 08 05	Schlämme aus der Behandlung von kommunalem Abwasser

#### 4.5 Abfälle aus Krankenhäusern

Der wesentliche Leitfaden für die Abfallwirtschaft in Krankenhäusern ist die „Richtlinie über die ordnungsgemäße Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes“ [LAGA, 2002]. Die Einteilung der Abfallarten aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes erfolgt analog der Einteilung nach der unter Kapitel 4.1.1 bereits genannten europäischen Abfallverzeichnisverordnung. Abbildung 4-1 gibt einen Überblick die Abfallströme und Entsorgungswege nach LAGA-Richtlinie.



**Abbildung 4-1: Abfallarten in Krankenhäusern und Entsorgungswege nach LAGA-Richtlinie [LAGA, 2002]**

#### 4.6 Rechtliche Einordnung von Abfällen aus krankenhauseigenen Kläranlagen

Grundsätzlich fallen Abfälle aus krankenhauseigenen Kläranlagen in den Geltungsbereich der europäischen Abfallrahmenrichtlinie respektive des deutschen Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes. Im derzeit gültigen europäischen und nationalen Rechtsrahmen finden sich keine gesonderten Vorgaben für die Entsorgung von Abfällen aus krankenhauseigenen Kläranlagen. Somit wäre aus formalen Gesichtspunkten vorzugsweise eine Verwertung der Abfälle anzustreben. Der Vorrang der Verwertung von Abfällen vor deren Beseitigung entfällt jedoch dann, wenn die Beseitigung die umweltverträglichere Lösung darstellt.

Um Abfälle aus krankenhauseigenen Kläranlagen hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit einordnen zu können, sollte zunächst das in den Anlagen zu behandelnde Abwasser näher betrachtet werden. Krankenhausabwasser ist, bezogen auf den sanitären Bereich und dem Abwasseranfall aus Küchen und Kantinen, dem Anwendungsbereich der Abwasserverordnung (AbwV) zuzuordnen (vgl. Anhang 1 AbwV: Häusliches und kommu-

nales Abwasser). Für ausgewählte Abwasserteilströme definiert die AbwV explizite Anforderungen [DWA 2009]:

- Anhang 31: Wasseraufbereitung, Kühlsysteme, Dampferzeugung
- Anhang 47: Rauchgaswäsche (falls Betrieb eines eigenen Kraftwerkes)
- Anhang 49: Mineralöhlhaltige Abwässer
- Anhang 50: Zahnbehandlung
- Anhang 53: Fotografische Prozesse
- Anhang 55: Wäschereien

Darüber hinaus bedürfen Abwässer aus Krankenhäusern einer gesonderten Betrachtung, da sie eine Reihe spezieller Inhaltsstoffe darunter auch besonders umweltrelevante Arzneimittel in höheren Konzentrationen enthalten, als sie üblicherweise im kommunalen Abwasser zu finden sind [BEIER ET AL., 2008; BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2005; FELDMANN, 2005]. Neben hohen Konzentrationen an Desinfektions- und Reinigungsmitteln finden sich im Krankenhausabwasser deutlich höhere Konzentrationen an Röntgenkontrastmitteln, an verschiedenen hochwirksamen Analgetika, an Zytostatika und an bestimmten Antibiotikagruppen insbesondere sogenannte Reserve-Antibiotika, die fast ausschließlich in Krankenhäusern eingesetzt werden.

Insbesondere vor dem Hintergrund erhöhter Konzentrationen an pharmazeutischen Spurenstoffen und Keimen sollten Überlegungen zu einer umweltverträglichen Entsorgung von Abfällen aus krankenhauseigenen Kläranlagen nicht von einer dem vorsorgenden Gesundheitsschutz losgelösten Entsorgungspraxis gekennzeichnet sein [PINNEKAMP, 2009; SCHRÖDER ET AL., 2009]. In Anbetracht dessen, dass bis heute noch nicht vollständig geklärt ist, inwieweit Arzneimittelrückstände in Abfällen aus Abwasserreinigungsanlagen als bedenklich für die Umwelt und die Gesundheit einzustufen sind, gebietet es das Vorsorgeprinzip, diese Abfälle zu beseitigen. Eine entsprechende Tendenz findet sich seit längerem in den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg, die ein Verbot der landwirtschaftlichen Verwertung auch für kommunale Klärschlämme anstreben [BMU, 2007; BERGS, 2008].

Überlegungen zur Einordnung von Abfällen aus krankenhauseigenen Kläranlagen sollten zum jetzigen Zeitpunkt auch die Novellierungen der EU-Abfallrahmenrichtlinie sowie der Klärschlammverordnung und der Düngemittelverordnung berücksichtigen. Die novellierte EU-Abfallrahmenrichtlinie schreibt neben der Vermeidung von Abfällen vorzugsweise ein stoffliches Recycling vor. Allerdings muss ein Recycling aus Umweltgesichtspunkten vertretbar sein. Sollte sich daher aufgrund aktueller Forschungsergebnisse abzeichnen,

dass die Belastung von Arzneimittelrückständen im Abwasser und damit auch in den Abfällen aus krankenhauseigenen Kläranlagen aus Umwelt- oder Gesundheitsgesichtspunkten bedenklich ist, so ist davon auszugehen, dass auch für diese Inhaltsstoffe Grenzwerte festgesetzt werden und damit im weitestgehenden Fall zu einem Verbot der stofflichen Verwertung dieser Abfälle führen. Es ist ferner davon auszugehen, dass zukünftige Novellierungen der Klärschlammverordnung höhere Anforderung hinsichtlich des Schwermetallgehalts und hygienischer Aspekte von Klärschlämmen für eine landwirtschaftliche Verwertung gestellt werden. Diese strengeren Anforderungen sollten daher bei der Entwicklung eines nachhaltigen Entsorgungskonzeptes nicht unberücksichtigt bleiben.



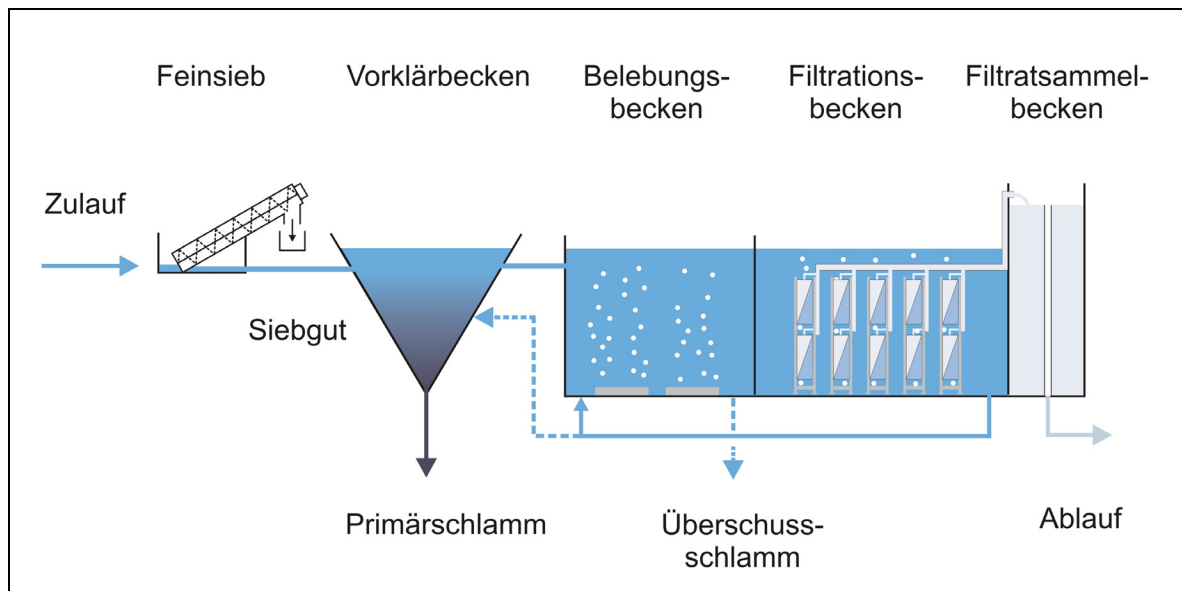
## 5 Abfallströme der krankenhauseigenen Kläranlage

In Nordrhein-Westfalen wurde mit dem Pilotprojekt am Kreiskrankenhaus Waldbröl eine Kläranlage für die Reinigung des gesamten Abwasserstromes eines Krankenhauses errichtet. Die Kläranlage wird vom Aggerverband im Auftrag des Kreiskrankenhauses Waldbröl betrieben. Das realisierte Abwasserreinigungskonzept setzt sich aus einer mechanisch-biologischen Belebungsstufe (Membranbioreaktor) und einer nachgeschalteten Stufe zur Spurenstoffelimination zusammen.

Um die Entsorgung der bei der Reinigung von Krankenhausabwasser anfallenden Abfallströme zu beurteilen und bei der Erstellung eines Entsorgungskonzeptes zu berücksichtigen, werden nachfolgend die am MBR des Krankenhauses entstehenden Abfallströme und die Abfallströme verschiedener nach geschalteter Stufen zur Spurenstoffelimination dargestellt.

### 5.1 Membranbioreaktor des KKH Waldbröl

Die Abwasserbehandlungsanlage am KKH Waldbröl wurde als Membranbioreaktor mit intermittierender Denitrifikation und vorgeschalteter mechanischer Vorreinigung konzipiert. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht den Aufbau des MBR Waldbröl.



**Abbildung 5-1: Verfahrensschema des MBR Waldbröl**

Zur Beschickung des MBR Waldbröl stehen 2 frequenzgeregelte Tauchmotorpumpen mit einer Förderleistung von jeweils 8 - 16 m<sup>3</sup>/h zur Verfügung. Die Regelung erfolgt in Abhängigkeit des Höhenstandes im Pumpenschacht. Die maximale Gesamtförderleistung von 32 m<sup>3</sup>/h gewährleistet, dass bei Regenwetter ein Großteil des anfallenden Nieder-

schlagswassers in die Anlage gefördert werden kann. Über ein Pumpwerk wird die mechanische Vorreinigung bestehend aus Siebanlage und Vorklärung beschickt. Die Siebanlage ist als Siebschnecke mit integrierter Rechengutwaschpresse ausgebildet und hat eine Maschenweite von 1 x 10 mm. Aus hygienischen Gründen erfolgt der Abwurf über eine Absackanlage in Müllbehälter mit einem Volumen von 120 l. Der Ablauf der Siebanlage läuft dem Vorklärbecken zu. Das Vorklärbecken ist als Trichterbecken ausgebildet und hat ein Volumen von 21 m<sup>3</sup>. Der anfallende Primärschlamm kann über eine bis in die Trichterspitze verlegte Rohrleitung, die aus dem Becken heraus geführt wird, mit einem Saugwagen entsorgt werden. Alternativ kann das Becken als Schlammstapelbehälter genutzt werden. Der Ablauf der Rechenanlage wird in diesem Fall direkt in die Belebung geleitet. Der Überschussschlamm kann über die Rezirkulationspumpe in das Becken gepumpt und von dort abgezogen werden. Im tatsächlichen Anlagenbetrieb wurde ein kombinierter Betrieb als Vorklärung und Schlammstapelbehälter gefahren.

### 5.1.1 Quantitative Charakterisierung der Abfallströme

Maßgebend für die Reststoffentsorgung der Abwasserbehandlungsanlage sind die Abfallströme des MBR. Dies sind im vorliegenden Fall das Siebgut- und der Klärschlamm. Sandfang fällt in dieser Anlage nicht an. In Tabelle 5-1 sind die Mengen der anfallenden Abfallströme dargestellt.

**Tabelle 5-1: Abfallströme am MBR Waldbröl**

Abfallstrom	Menge	Einheit	Charakteristik	Ist-Situation (Entsorgung während des Pilotprojektes)
Siebgut	120	l/Monat	Entwässertes Siebgut	Thermische Verwertung
Mischschlamm (PS+ÜSS)	43	kg TS/d	TR ≈ 36 g/l	Zugabe in den Zulauf der kommunalen KA Waldbröl-Brenzingen mit anschließender anaerober Stabilisierung und landwirt. Verwertung
Überschussschlamm (enthalten im Mischschlamm)	13,2	kg TS/d	TR = 12 - 20 g/l	Vermischung mit PS des MBR am KKH und gemeinsame Eindickung/Stapelung im VKB

Mit der Siebschnecke wird das Volumen des anfallenden Siebguts um ca. 60 – 70% reduziert und anschließend in einen Müllbehälter mit einem Volumen von 120 l abgeworfen. Die Abfuhr des Siebguts erfolgt mit der Entsorgung des übrigen Krankenhausabfalls durch den Abfall- Sammel- und Transportverband Oberberg (ASTO). Diese überlässt die eingesammelten Abfälle zur weiteren Verwertung und Beseitigung dem Bergischen Abfallwirtschaftsverband (BAV) [www.asto.de, 2009]. Über diesen bzw. seine 50%-ige Tochter, die AVEA GmbH & Co. KG, wird das Siebgut im Müllheizkraftwerk Leverkusen beseitigt. Die Abfuhr erfolgt im 4-Wochen-Intervall. Insgesamt stehen der Kläranlage des KKH Waldbröl drei Müllbehälter zur Verfügung. Nachdem ein Müllbehälter gefüllt wurde, wird er gegen einen leeren ausgetauscht. An den Abfuhrterminen werden die bis dahin gefüllten Müllbehälter entleert. Das mittlere Austauschintervall für die Siebgutbehälter betrug in den Jahren 2007 und 2008 etwa 28 Tage. Dieser Zeitraum verlängerte sich mit Schließung der Wäscherei auf derzeit 61 Tage. Daraus resultiert ein mittlerer Siebgutanfall (entwässert) von 4,2 l/d bis zur Außerbetriebnahme der Wäscherei. Der aktuelle Siebgutanfall liegt derzeit bei 2 l/d.

Zur Auswertung des Klärschlammanfalls wurde Daten aus dem Betriebszeitraum von Juni 2008 bis Mai 2009 zugrunde gelegt. In dieser Zeit wurde das Vorklärbecken in einem kombinierten Betrieb als Vorklärbecken und Schlammstapelbehälter gefahren. Der Mischschlamm wurde aus der Trichterspitze abgezogen und der kommunalen Kläranlage Brenzingen zur weiteren Behandlung und Entsorgung zugeführt. Die Ermittlung des abgezogenen Mischschlammes erfolgte über das abgezogene Volumen und einzelne Messungen zum Feststoffgehalt. Dementsprechend fallen am MBR Waldbröl ca. 1,2 m<sup>3</sup>/d mit einem Feststoffgehalt von 36 g/l und einem Glühverlust von ca. 86% an. Dies entspricht einem Mischschlammanfall von ca. 47 kg TS/d [PINNEKAMP ET AL. 2009]. Auch der Anteil des Überschussschlammes am Mischschlamm kann beziffert werden. Zur Ermittlung des abgezogenen Überschussschlammes konnten Messwerte aus der Online-Messung des TS-Gehaltes herangezogen werden. Bei der Reinigung des Krankenhausabwassers am MBR Waldbröl fallen etwa 13,2 kg TS/d bzw. 6 m<sup>3</sup> Überschussschlamm je Woche mit einer durchschnittlichen Feststoffkonzentration von 15 g/l an. Die Schlammbelastung der Anlage liegt zwischen 0,015 und 0,022 kg BSB<sub>5</sub>/(kg TS·d) und der tägliche Feststoffanfall zwischen 0,25 und 0,37 kg TS/kg BSB<sub>5</sub> [PINNEKAMP ET AL., 2009].

In regelmäßigen Abständen ist eine chemische Reinigung der Membranmodule zur Entkeimung der Ablaufleitungen bzw. zur Säuberung der Membranplatten von organischen (Fouling) und anorganischen (Scaling) Verschmutzungen erforderlich. In vielen Membranbelebungsanlagen hat sich der Einsatz von Natriumhypochlorit zur Membranreinigung als besonders effektiv bewährt. Bei Kontakt mit der Abwassermatrix reagiert Natriumhypochlorit jedoch mit den organischen Abwasserinhaltsstoffen und es werden AOX

gebildet. Alternativ zu Natriumhypochlorit besteht auch die Möglichkeit mit anderen Chemikalien zu reinigen. Für anorganische Verunreinigungen können Säuren, wie z. B. Zitronensäure (Essigsäure, Oxalsäure) eingesetzt werden. Für organische Verunreinigungen kommen anionische Tenside, andere Oxidationsmittel als Natriumhypochlorid (z. B. Natronlauge, Wasserstoffperoxid) und Desinfektionsmittel in Frage. Am MBR des KKH Waldbröl ist nach den bisherigen Betriebserfahrungen eine jährliche Reinigung zunächst mit Zitronensäure und anschließend mit Wasserstoffperoxid unter pH-Wert-Anhebung mit Natronlauge ausreichend. In jedem Reinigungsdurchgang werden pro Membranmodul 1,2 m<sup>3</sup> also insgesamt 6,0 m<sup>3</sup> der Reinigungslösung benötigt.

### 5.1.2 Qualitative Charakterisierung der Abfallströme

Im Rahmen des Vorhabens wurden orientierende Untersuchungen zur Belastung des Rechengutes mit pharmazeutischen Spurenstoffen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-2 für das Rechengut der kommunalen Kläranlage Brenzingen und der Kläranlage am Kreiskrankenhaus Waldbröl vergleichend gegenüber gestellt.

**Tabelle 5-2: Konzentrationen (angegeben als Minimum und Maximum) ausgewählter Pharmaka im Rechengut der kommunalen KA Brenzingen und der KA am KKH Waldbröl**

Pharmaka/ Diagnostika	Minimum und Maximum der gemessenen Konzentrationen [N=3] in mg/kg TS	
	Rechengut KA Brenzingen	Rechengut KA am KKH Waldbröl
Bezafibrat	< LOD	< LOD
Bisoprolol	<LOD - 0,17	< LOD
Carbamazepin	0,32-0,45	0,10-0,93
Ciprofloxacin	0,32-0,36	5,00-8,93
Clarithromycin	0,01-0,01	0,15-0,31
Diclofenac	0,037	0,29-0,60
Ibuprofen	0,02-0,12	0,02-0,02
Metronidazol	< LOD	< LOD
Moxifloxacin	0,05 - 0,12	2,97-5,14
Telmisartan	0,14 – 0,23	0,09-0,24
Tramadol	0,02-0,07	0,01-0,03

Insbesondere die Konzentrationen der Antibiotika (Clarithromycin, Ciprofloxacin und Moxifloxacin) liegen im Rechengut der krankenhauseigenen Kläranlage deutlich über den Konzentrationen im Rechengut der kommunalen Kläranlage. Für die anderen Wirkstoffe unterscheidet sich die Belastung des Rechengutes in beiden Fällen nur unwesentlich.

Neben dem Rechengut wurden auch die Klärschlämme aus beiden Anlagen untersucht. Bei den Analysen auf die Nährstoffparameter Kalium, Magnesium und Phosphor zeigten sich für den Klärschlamm des MBR am KKH Waldbröl und den Klärschlamm der kommunalen Kläranlage keine signifikanten Unterschiede. In der Tabelle 5-3 sind die Belastungen der Klärschlämme mit Pharmaka dargestellt. Aufgelistet sind die gemessenen Konzentrationen im Klärschlamm des MBR am KKH Waldbröl und im Klärschlamm der kommunalen Kläranlage. Die im Rahmen des Vorhabens ermittelten Konzentrationen sind den in der Literatur verfügbaren Daten anderer Autoren vergleichend gegenüber gestellt. Die Antibiotikagruppe der Floxacine (Ciprofloxacin und Moxifloxacin) konnte im Klärschlamm des MBR am Krankenhaus Waldbröl in deutlich höheren Konzentrationen nachgewiesen werden, als im Klärschlamm der Kläranlage Brenzingen. Auch die Literaturangaben zu Konzentrationen von Ciprofloxacin im Klärschlamm konventioneller Anlagen sind deutlich niedriger. Für alle anderen untersuchten Pharmaka zeigten sich bei den Untersuchungen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Daten des MBR Waldbröl und der kommunalen Kläranlage.

Das ehemalige Landesumweltamt NRW hat im Rahmen einer sehr umfassenden und repräsentativen Erhebung Klärschlämme aus nordrhein-westfälischen Kläranlagen auf ein breites Spektrum organischer überwiegend derzeit nicht geregelter Schadstoffe hin untersucht. Nach den Untersuchungsergebnissen war eine Vielzahl organischer Schadstoffe weit verbreitet und überwiegend flächendeckend festzustellen [MUNLV, 2004]. Untersuchungen auf pharmazeutische Spurenstoffen waren nicht Gegenstand dieser Studie. Daten zu Arzneimittelkonzentrationen im Klärschlamm sind derzeit nur in sehr eingeschränktem Maße verfügbar. In einem aktuell in Schleswig-Holstein durchgeführten Untersuchungsprogramm wurden in vier kommunalen Kläranlagen unter anderem auch verschiedene Pharmaka im Klärschlamm untersucht und teilweise in auffälligen Konzentrationen festgestellt [EUROFINS-AUA GMBH UND PROWA GMBH, 2007]. Die Konzentrationen 51 untersuchter Pharmaka lagen größtenteils unterhalb der Bestimmungsgrenzen. Deutlich erhöhte Gehalte wurden jedoch unter anderem bei den Chinolon-Antibiotika (u. a. Ciprofloxacin) festgestellt. Das Maximum lag in diesen Untersuchungen bei 0,347 mg/kg TS. Dieser Wert liegt jedoch nochmals deutlich unter dem für Ciprofloxacin gemessenen Maximalwert im Schlamm des MBR am KKH Waldbröl.

**Tabelle 5-3: Konzentrationen (angegeben als Mediane und Konzentrationsbereiche) von den als Leitsubstanzen ausgewählten Pharmaka in Klärschlämmen aus konventionellen Anlagen und MBR-Anlagen [PINNEKAMP ET AL. 2009]**

Pharmaka/ Diagnostika	Konzentration gemessen in mg/kg TS [N=28]		Referenzkonzentration in mg/kg TS		Literatur- angabe
	Schlamm aus KA Brenzingen	Schlamm aus dem MBR KKH Waldbröl	Schlamm aus konventioneller Behandlung	Schlamm aus MBR- Behandlung	
Bezafibrat	0,02-0,04	< LOD	./.	./.	./.
Bisoprolol	0,03-0,08	0,05-0,11	./.	./.	./.
Carbamazepin	0,01-0,06	0,02-0,14	0,05-0,3	./.	WU ET AL. [2008]; CARBALLA ET AL. [2008]; KINNEY ET AL. [2006]
Ciprofloxacin	0,04-0,10	0,78-4,05	0,1-0,8	./.	WU ET AL. [2008]; LINDBERG ET AL. [2005]; GOLET ET AL. [2002]; JONES-LEPP ET AL. [2007]; JONES ET AL. [2007]
Clarithromycin	0,01-0,04	0,03-0,16	0,003-0,063	./.	WU ET AL. [2008]; JONES ET AL. [2007]; GÖBEL ET AL. [2002]; LÖFFLER ET AL. [2003]
Diclofenac	0,02-0,18	0,04-0,29	0,2-0,4	0,13-0,4	CARBALLA ET AL. [2008]; KIMURA ET AL. [2007]; TERNES ET AL. [2005]
Ibuprofen	0,01-0,06	0,01-0,04	0,2-0,5	0,3	CARBALLA ET AL. [2008]; KIMURA ET AL. [2007]
Metronidazol	< LOD	< LOD	./.	./.	./.
Moxifloxacin	0,04-0,11	1,44-3,19	./.	./.	./.
Telmisartan	0,14-0,24	0,14-0,27	./.	./.	./.
Tramadol	0,01-0,06	0,02-0,08	./.	./.	./.

In Abbildung 5-2 sind die analysierten Schwermetallkonzentrationen in den Klärschlämmen der Krankenhauskläranlage und der kommunalen Kläranlage Brenzingen vergleichend dargestellt. Die Mediane der gemessenen Schwermetallkonzentrationen sind den Grenzwertvorschläge aus dem Arbeitsentwurf des BMU zur Novellierung der Klärschlammverordnung vom 19.11.2007 gegenübergestellt.

Der Klärschlamm aus der Krankenhauskläranlage weist insbesondere für das Schwermetall Quecksilber höhere Konzentrationen im Vergleich zum kommunalen Klärschlamm der Kläranlage Brenzingen auf. Die im Klärschlamm des Krankenhauses gemessene Konzentration liegt um etwa den Faktor 5 höher, als die im kommunalen Klärschlamm gemessene Konzentration. Damit ist die zulässige Konzentration für eine landwirtschaftliche Verwertung gemäß dem Arbeitsentwurf des BMU zur Novellierung der Klärschlammverordnung erreicht.

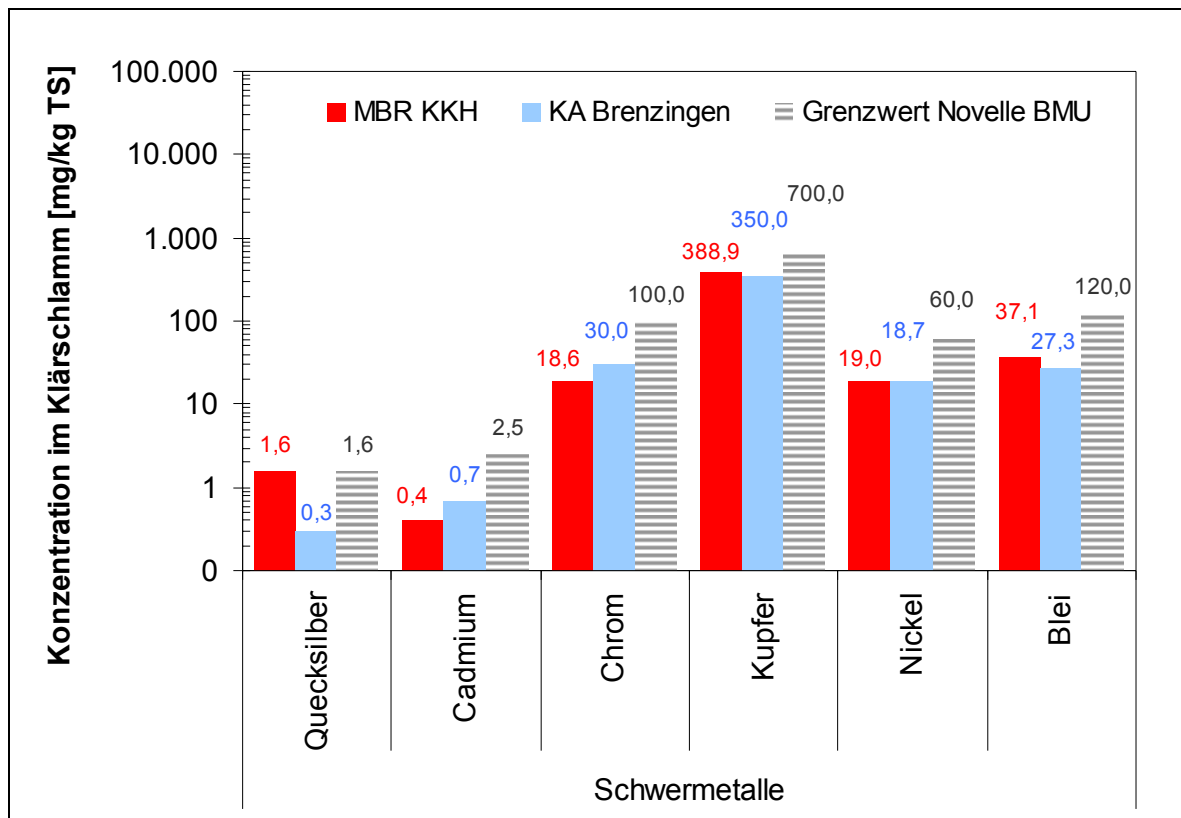


Abbildung 5-2: Schwermetallkonzentrationen im Klärschlamm [N=8]

Wie bereits in Kapitel 5.1.1 dargestellt erfolgte die Reinigung der Membranen bislang ausschließlich mittels Zitronensäure und anschließend mit Wasserstoffperoxid unter pH-Wert-Anhebung mit Natronlauge. Die Chemikalien stellen sich im Hinblick auf die biologische Abwasserreinigung unkritisch dar, da sie entweder biologisch abbaubar sind (Zitronensäure) bzw. weitestgehend abreagieren (Wasserstoffperoxid). Die verbrauchte Reinigungslösung wird daher nach Abschluss der Reinigung zurück in die Belebung gepumpt.

Da die Anlage in Waldbröl nicht in ein Gewässer einleitet, kann theoretisch auch im Falle einer Reinigung mit Natriumhypochlorit eine Rückleitung der Reinigungslösung in die Anlage erfolgen. Technisch wurde jedoch auch die Möglichkeit geschaffen, die verbrauchte Lösung in diesem Fall in den Permeatspeicher zu fördern und von dort zur Entsorgung abzufahren.

### 5.1.3 Monetäre Rahmenbedingungen

Die Betriebsführung des MBR Waldbröl wurde vom Kreiskrankenhaus im Rahmen eines Betriebsführungsvertrages der Aggerwasser bzw. dem Aggerverband übertragen. Die Vergütung wird in Form einer Pauschale fällig; Einzelkosten, wie bspw. für die Reststoffentsorgung, sind nicht separat ausgewiesen. Sofern zugänglich werden daher im Folgenden die Entsorgungskosten angesetzt, die üblicherweise beim Aggerverband anfallen. Erfolgt die Entsorgung über das Krankenhaus, wurden die vom Krankenhaus angesetzten Kosten übernommen.

Für die Entsorgung des Siebguts der Anlage fielen im Jahr 2008 Kosten in Höhe von 638,28 € an. Die Kosten werden analog zum Hausmüll des Krankenhauses über die Anzahl und Größe der zur Verfügung gestellten Mülltonnen unabhängig vom tatsächlichen Anfall erhoben. Bezogen auf einen Siebgutanfall von 2 l/d bzw. 0,73 m<sup>3</sup>/a ergeben sich spezifische Entsorgungskosten von rd. 874 €/m<sup>3</sup> entsorgtes Siebgut.

Für die derzeitige Schlamm Entsorgung in Form der Mitbehandlung in der kommunalen Kläranlage Brenzingen liegen keine Zahlen vor. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese mit den Kosten für die Entsorgung von Fäkalschlamm vergleichbar sind. Hierfür wird üblicherweise ein Kostenrahmen von 20 – 50 €/m<sup>3</sup> genannt. Aufgrund der am MBR anfallenden Menge, welche deutlich höher ist als Mengen, die üblicherweise bei Kleinkläranlagen anfallen, ist davon auszugehen, dass sich die Kosten an der unteren Grenze des genannten Bereichs oder ggf. noch darunter bewegen werden.

Bei der jährlich erforderlichen Reinigung der Membranen mittels Zitronensäure und Wasserstoffperoxid fallen keine Entsorgungskosten an.



## 5.2 Abfallströme der Pilotanlagen im Pilotprojekt KKH Waldbröl

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Eliminierung von Spurenstoffen aus Krankenhausabwässern mit Membrantechnik und weitergehenden Behandlungsverfahren – Pilotprojekt Kreiskrankenhaus Waldbröl“ wurden die folgenden, dem MBR nachgeschalteten Verfahrenstechniken zur weitergehenden Reinigung untersucht:

- Ozonung,
- Nanofiltration/Umkehrosmose und
- Aktivkohleadsorption.

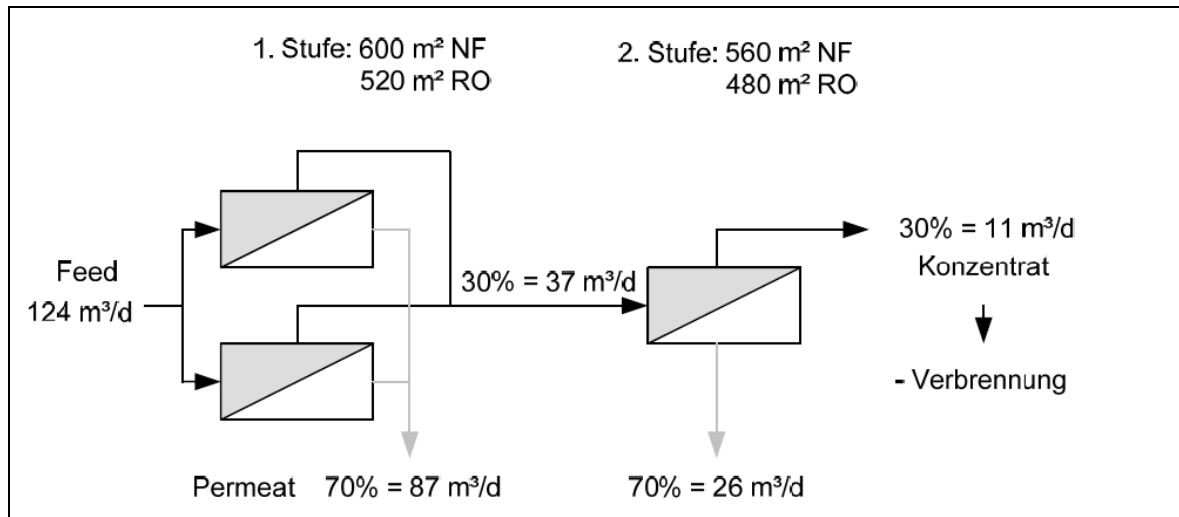
Nach Abschluss des Forschungsvorhabens ist zwischenzeitlich die Entscheidung für den Bau einer großtechnischen Ozonung am Standort Waldbröl getroffen worden. Somit sind für das Kreiskrankenhaus Waldbröl neben den Abfallströmen aus dem MBR (Kapitel 5.1) nur die Abfallströme der Ozonung von Relevanz. Im Folgenden werden jedoch ergänzend auch die Abfallströme der beiden anderen im halbertechnischen Maßstab untersuchten Reinigungstechniken dargestellt, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse dieses Projektes auf andere Krankenhäuser mit ggf. anderen Randbedingungen zu gewährleisten.

### 5.2.1 Ozonung

Bei der Ozonung fallen keine Abfallprodukte an. Das Ozon reagiert mit den Arzneimittelrückständen im Filtrat des MBR und führt zu einer Oxidationsreaktion, die vorhandene Arzneimittelrückstände eliminiert bzw. transformiert. Das nach der Oxidation im Offgas verbleibende Ozon wird mit Hilfe von Restozonvernichtern zerstört, so dass auch keine gasförmigen Abfallströme entstehen. Für die Umsetzung der Ozonung als weitergehende Behandlungsstufe müssen daher keine Kosten für die Entsorgung von Abfallprodukten berücksichtigt werden.

### 5.2.2 Nanofiltration/Umkehrosmose

Die großtechnische Auslegung der Nanofiltration (NF) bzw. Umkehrosmose (RO) zur Reinigung des Filtrats des MBR Waldbröl ergab ein zu entsorgendes Konzentratvolumen von 11 m<sup>3</sup>/d. Dieses würde aus einer zweistufigen Verfahrenskonfiguration bei 70%-iger Permeatausbeute resultieren, die im Rahmen praktischer Versuche bestimmt wurde. Das Verfahrensbild für die großtechnische Anwendung ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Da mit der NF allein kein ausreichender Rückhalt an Mikroschadstoffen erzielt werden kann [PINNEKAMP ET AL., 2009 und VELTMANN, 2008], wäre entweder eine RO oder eine NF in Kombination mit einer Aktivkohleadsorption für eine effiziente Elimination von Arzneimittelrückständen erforderlich. Diese Verfahren gehen jedoch mit sehr hohen Kosten einher, die im vorliegenden Fall nicht vertretbar erscheinen.



**Abbildung 5-3: Großtechnisches Verfahrensfliessbild für die Umsetzung einer NF/RO [VELTMANN, 2008]**

Untersuchungen von PINNEKAMP ET AL. [2009] ergaben für die alleinige Realisierung einer NF am MBR Waldbröl, spezifischen Behandlungskosten in Höhe von 19,71 €/m<sup>3</sup>. Den bedeutendsten Kostenfaktor stellt dabei die Entsorgung hochkonzentrierter Retentatvolumenströme dar, die vorzugsweise thermisch erfolgen sollte. Die Entsorgung derartiger flüssiger Abfälle ist z.B. nicht in jeder Müllverbrennungsanlage möglich. Auf Grundlage einer Kostenanfrage würde z.B. die Firma Currenta am Standort Dormagen die Retentatentsorgung inkl. Transportkosten für ca. 200 €/Mg übernehmen. Dies allein entspricht Jahreskosten in einer Höhe von 720.000 €. Somit wäre die großtechnische Realisierung der NF aus rein wirtschaftlicher Sicht auszuschließen. Die Kosten für den Betrieb einer RO würden die spezifischen Behandlungskosten um circa 20 € zusätzlich erhöhen, da bei dieser Verfahrenstechnik höhere Energieaufwendungen zur Gewährleistung des Filtrationsdruckes erforderlich sind als bei einer Realisierung mit NF. Der zu entsorgende Retentatvolumenstrom wäre mengenmäßig mit dem der NF identisch. Die zusätzlichen Kosten, die durch die Einbindung einer Aktivkohledosierung resultieren, können mit etwa 0,60 €/m<sup>3</sup> abgeschätzt werden.

### 5.2.3 Aktivkohleadsorption

Bei der Realisierung einer Aktivkohleadsorption wird in Abhängigkeit der Standzeit die beladene Aktivkohle vollständig ersetzt, direkt entsorgt oder im Einzelfall einer thermischen Reaktivierung zugeführt. Inwieweit die beladene Kohle am KKH Waldbröl reaktiviert werden kann, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen. Nach Herstellerangaben soll die Kohle max. zu 70 % reaktivierbar sein, wobei entsprechende Referenzuntersuchungen noch ausstehen [CSC, 2009].

Aus einer kalkulierten Adsorberstandzeit am KKH Waldbröl von 120 Tagen resultiert eine zu entsorgende Aktivkohlemenge von 5,4 t. Dies entspricht einer Menge von 18,4 t/a. Unter Berücksichtigung lokaler Randbedingungen und Richtpreisangeboten ermittelten PINNEKAMP ET AL. [2009] spezifische Behandlungskosten von 0,95 €/m<sup>3</sup>. Die Kosten für die Entsorgung der beladenen Kohle sind dabei im Lieferpreis für den Austausch der Aktivkohle enthalten.

## 6 Entsorgungsoptionen für Abfälle der krankenhaus-eigenen Kläranlage

Das Ziel des vorliegenden Projektes ist die Erarbeitung eines Konzeptes zur langfristig gesicherten, umwelt- und kostenschonenden Entsorgung von Abfallströmen aus der krankenhaus-eigenen Kläranlage am Standort Waldbröl.

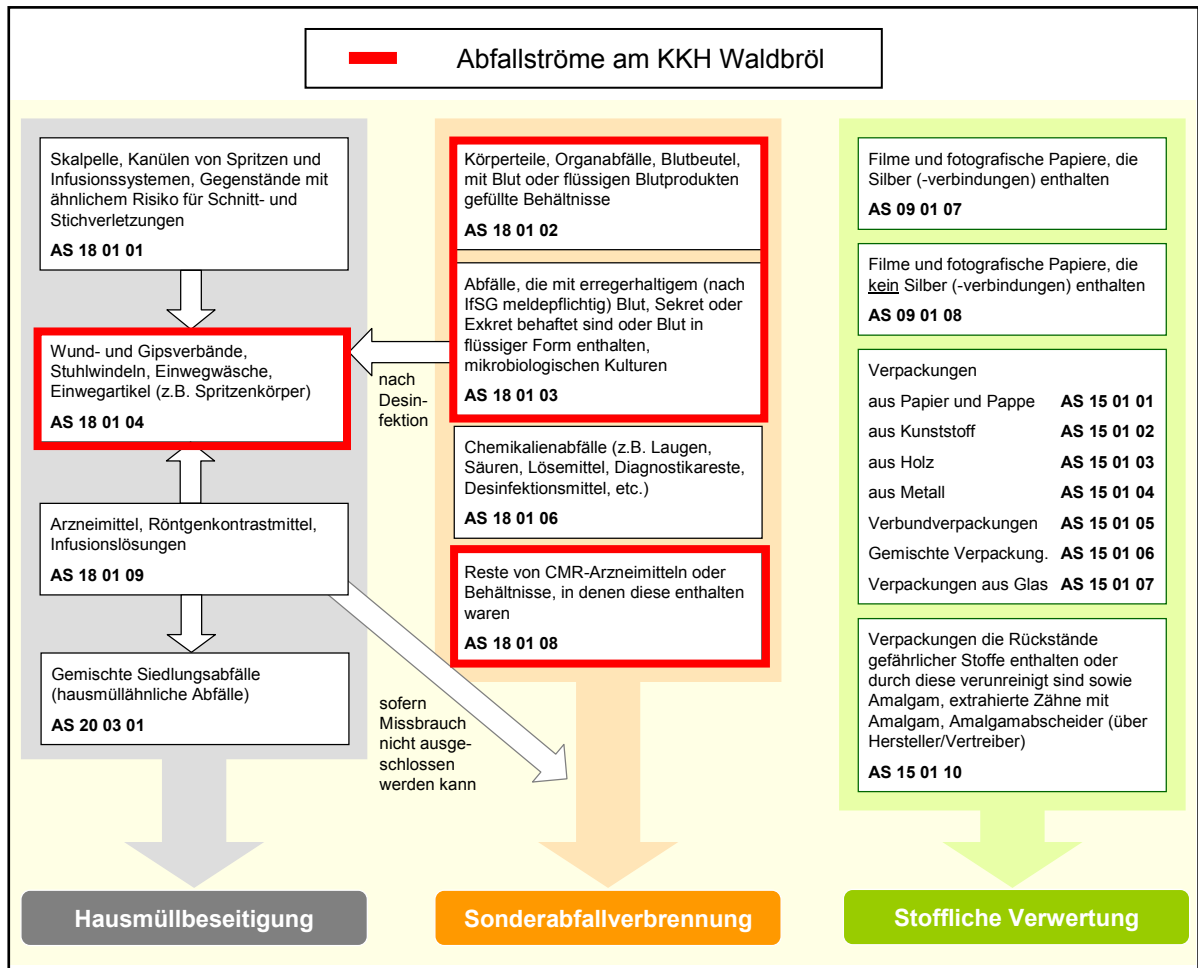
Da eine separate Entsorgung der Abfallströme aus der Kläranlage am KKH Waldbröl zu einem erheblichen Kostenmehraufwand für das Krankenhaus führen würde, werden im Folgenden mögliche Optionen einer Einbindung der Entsorgung der Abfallströme aus der krankenhaus-eigenen Kläranlage in bestehende Entsorgungspfade am Krankenhaus und an den kommunalen Kläranlagen des Aggerverbandes geprüft.

In Kapitel 6.1 erfolgt die Darstellung der Ist-Situation für die Entsorgung der am Krankenhaus anfallenden Abfallströme. In Kapitel 6.2 werden die Entsorgungspfade im Bereich der kommunalen Kläranlagen im Aggerverbandsgebiet dargestellt. Wie in Tabelle 5-1 aufgeführt, ist der mengenmäßig bedeutsamste Abfallstrom an der krankenhaus-eigenen Kläranlage der anfallende Klärschlamm. Daher bildet die Klärschlamm Entsorgung einen besonderen Schwerpunkt dieses Kapitels. Mögliche alternative Klärschlamm Entsorgungswege mit regionaler Bedeutung für das Verbandsgebiet werden aufgezeigt und nach allgemein gültigen Kriterien analysiert und bewertet.

### 6.1 Abfallströme im Kreiskrankenhaus Waldbröl

Auf Grundlage der Erhebung des KKH Waldbröl zum Abfall-Benchmarking für Krankenhäuser aus dem Jahr 2008 und unter Einbeziehung der Abfallarten und Entsorgungswege nach LAGA, wurden vier maßgebliche Abfallströme am KKH Waldbröl ermittelt. Diese sind gemäß AVV durch die Abfallschlüssel 18 01 02 - 18 01 04 und 18 01 08 kategorisiert und in der nachstehenden Abbildung farblich hervorgehoben und erläutert.

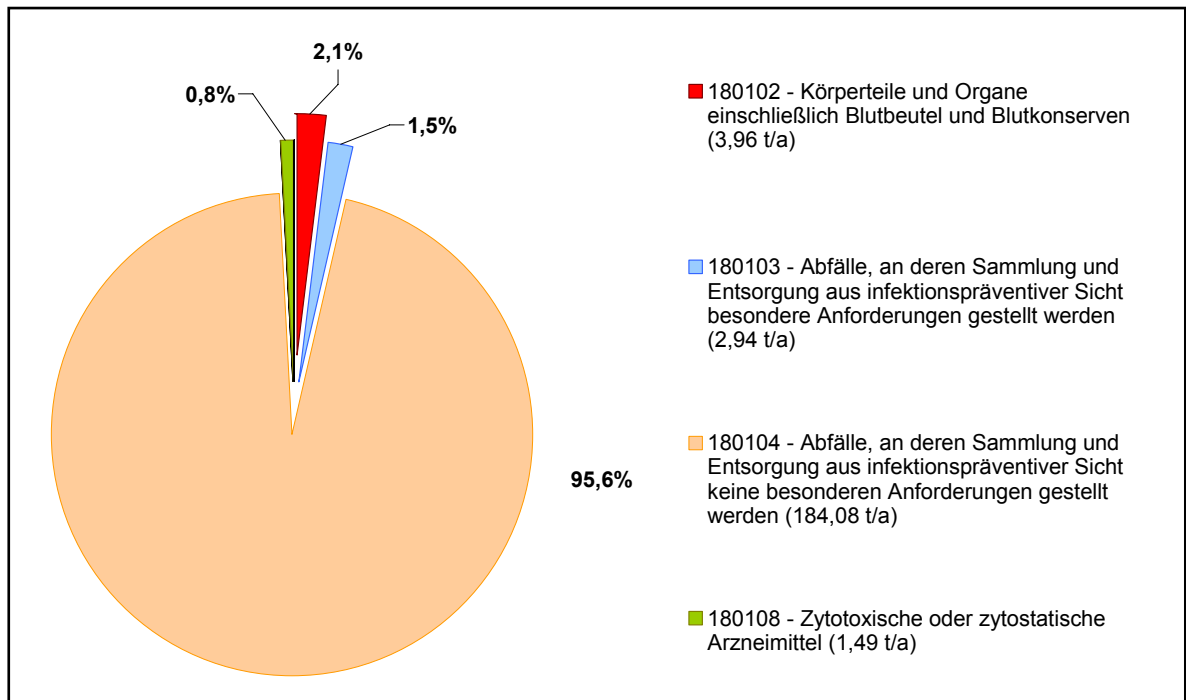
Die Entsorgung von Krankenhausabfällen erfolgt je nach Stoffklassifikation über den Hausmüll, die Sonderabfallverbrennung und/ oder eine stoffliche Verwertung. Für das KKH Waldbröl ist die stoffliche Verwertung von Abfällen kein relevanter Entsorgungspfad, da die entstehenden Abfälle entweder über den Hausmüll beseitigt oder einer Sonderabfallverbrennung zugeführt werden (vgl. Abbildung 6-1).



**Abbildung 6-1: Kategorisierung der Abfallströme des KKH Waldbröl**

In Abbildung 6-2 ist die mengenmäßige Verteilung der vier verschiedenen Abfallfraktionen aus dem KKH Waldbröl graphisch dargestellt. Der weitaus größte Anteil mit 95,6 % fällt in die Abfallfraktion AS 18 01 04 (Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektiopräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden). Die Entsorgung von Abfällen des AS 18 01 04 fällt in den Geltungsbereich der Hausmüllbeseitigung, und umfasst am KKH Waldbröl jährlich etwa 184 Mg. Hierzu zählen Wund- und Gipsverbände sowie diverse Einwegartikel. Die Abfälle werden zur MVA Leverkusen verbracht und dort thermisch entsorgt. Die drei weiteren lokalisierten Abfallfraktionen stellen insgesamt nur 4,4 % des gesamten Abfallaufkommens dar, deren Entsorgung über eine Sonderabfallverbrennung erfolgt.

Die Daten korrespondieren mit den Daten weiterer Krankenhäuser entsprechender Größe [BENCHMARK, 2008].



**Abbildung 6-2: Verteilung der Abfallfraktionen des KKH Waldbröl  
(Gesamtaufkommen: 192,5 t/a)**

## 6.2 Entsorgung von Abfällen kommunaler Kläranlagen im Aggerverbandsgebiet

Das KKH Waldbröl liegt im Verbandsgebiet des Aggerverbandes. Dieser ist als sondergesetzlicher Wasserverband mit allen Maßnahmen zur Sicherung der wasserwirtschaftlichen Belange in seinem Gebiet betraut. Zu diesem Zwecke unterhält der Aggerverband 33 Kläranlagen verschiedener Anschlussgrößen. Der Aggerverband ist u. a. für die Entsorgung von Abfällen zuständig, die im Prozess der Abwasserreinigung anfallen. Hierzu zählen Rechen- und Sandfanggut sowie Klärschlamm.

Im Jahr 2008 fielen 7.641,91 Mg TS Klärschlamm, 1.240,78 Mg Sandfanggut und 1.955,67 Mg Rechengut an. Das Sandfanggut geht zur Aufbereitung für eine weitere Verwendung zu 99,7 % in eine Sandfangwaschanlage auf der Kläranlage Engelskirchen-Bickenbach. Ledig 0,3 % des anfallenden Sandfanggutes werden einer Kompostierung zugeführt. Das Rechengut der 33 Kläranlagen im Aggerverbandsgebiet wird zunächst vor Ort in Absetzcontainern gesammelt und zur zentralen Rechengutbehandlungsanlage (RBA) an der Kläranlage Engelskirchen-Bickenbach transportiert. Dort wird das Rechengut gewaschen und gepresst. Das behandelte Rechengut wird zu 68 % einer thermischen Entsorgung und 32 % einer Kompostierung zugeführt. Der Aggerverband

verfügt derzeit nur über eine Genehmigung das Rechengut der eigenen Kläranlagen in der Behandlungsanlage aufzubereiten.

Der an den Kläranlagen des Aggerverbands anfallende Klärschlamm wird überwiegend direkt landwirtschaftlich verwertet oder einer Kompostierung mit anschließender stofflicher Verwertung zugeführt. Lediglich die Kläranlage Leimbach entsorgt ihren Klärschlamm thermisch. Von den 33 Kläranlagen im Verbandsgebiet verfügen 20 Kläranlagen über einen Faulturm. In den 13 weiteren Anlagen wird der Rohschlamm zu Faultürmen anderer Anlagen transportiert. 8 Kläranlagen verfügen über Kammfilterpressen, mit denen der Faulschlamm entwässert wird.

Von den kommunalen Kläranlagen werden auch Fremdschlämme, im Wesentlichen sind dies Fäkalschlämme von Kleinkläranlagen, kostenpflichtig angenommen und entsorgt. Die Preisspannen für die Schlammentsorgung liegen bei Kleinkläranlagen in der Regel zwischen 20 und 50 €/m<sup>3</sup>. Der Aggerverband veranschlagt für die Annahme derartiger Schlämme eine Gebühr von 17,49 €/m<sup>3</sup> [Haller, 2009].

### 6.3 Alternative Klärschlamm Entsorgungsoptionen

Neben einer stofflichen Verwertung in der Landwirtschaft bestehen grundsätzlich folgende Entsorgungsmöglichkeiten für Klärschlämme aus kommunalen Anlagen die mechanisch-biologische Vorbehandlung mit anschließender Deponierung oder aber eine thermische Behandlung. Hier kommen grundsätzlich neben der Monoverbrennung, die Mitverbrennung in MVAs, in Kohlefeuerungsanlagen und in Zementwerken in Frage.

#### 6.3.1 Mechanisch-biologische Behandlungsanlagen (MBA) mit anschließender Deponierung

In MBA's werden Siedlungsabfälle und im begrenzten Umfang auch Klärschlämme durch eine Kombination mechanischer und biologischer Verfahren behandelt. Abfälle die zuvor einer MBA zugeführt wurden, können auch nach 2005 mittels Deponierung entsorgt werden. Aufgrund der Emissionsbegrenzungen nach 30. BImSchV müssen Anlagen für die mechanisch-biologische Abfallbehandlung weitestgehend eingehaust werden und über eine Abgasreinigungseinrichtung verfügen. In NRW existieren derzeit fünf MBA's. Tabelle 6-1 gibt einen Überblick über die genehmigten Kapazitäten der Anlage.

**Tabelle 6-1: MBAs in Nordrhein-Westfalen [verändert nach ASA, 2007; LANUV, 2007]**

Bezeichnung	Input	Genehmigte Kapazität in Mg/a
MBRA Münster	Siedlungsabfälle, Gewerbeabfälle	100.000
MBA Gescher	Siedlungsabfälle, Gewerbeabfälle, Sperrmüll	115.000
MBA Ennigerloh	Siedlungsabfälle, Gewerbeabfälle, Klärschlamm	100.000 (k. A. Mg/a Klärschlamm)
MBA Pohlsche Heide	Siedlungsabfälle, Gewerbeabfälle, Klärschlamm	115.000 (15.000 Mg/a Klärschlamm)
MBA Neuss	Siedlungsabfälle, Gewerbeabfälle	120.000

Derzeit werden in NRW nur in den Anlagen Ennigerloh und Pohlsche Heide Klärschlämme mit behandelt. Neben der nur begrenzten Aufnahmekapazität ist die Entfernung zu be-



stehenden Klärschlamm mitbehandelnden Anlagen vom Aggerverbandsgebiet entscheidungsrelevant.

### 6.3.2 Thermische Behandlungsanlagen

Für die thermische Entsorgung von Abfällen stehen in NRW Anlagen zur Monoverbrennung, Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, Müllverbrennungsanlagen und Zementwerken zur Verfügung.

#### 6.4.3.1 Monoverbrennung

Anlagen zu Klärschlamm-Monoverbrennung bedürfen einer Genehmigung gemäß § 17 BImSchV und lassen langfristig eine Entsorgung ohne Einschränkungen erwarten. In Nordrhein-Westfalen werden sechs Monoverbrennungsanlagen betrieben, die auf die thermische Behandlung von kommunalen Klärschlämmen und Schlämmen aus der industriellen Abwasserreinigung ausgerichtet sind [LANUV, 2007]. Tabelle 6-2 stellt u.a. die genehmigten und freien Kapazitäten der Monoverbrennungsanlagen gegenüber.

**Tabelle 6-2: Monoverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen [verändert nach LÜCK, 2008; HANßEN, 2007; LANUV, 2007]**

Standort	Genehmigte Kapazität in Mg TR/a	Technischer Durchsatz in Mg TR/a	Jahresdurchsatz in Mg TR/a	freie Kapazität (ohne Erweiterung) in Mg TR/a
Bonn	14.114	8.000	6.600	2.400
Bottrop	52.000	52.000	52.000	0
Düren	14.000	10.000	11.000	0
Elverlingsen	56.000	56.000	50.000	6.000
Lünen	85.000	110.000	82.500	2.500
Wuppertal	40.296	32.000	30.400	1.600
<b>∑ freie Kap.</b>				<b>12.500</b>

### 6.4.3.2 Mitverbrennung in Kohlekraftwerken

Über die Mitverbrennung von Klärschlämmen in Kohlekraftwerken stehen theoretisch erhebliche Verbrennungskapazitäten zur Verfügung. In NRW existieren derzeit 12 Kraftwerke und Feuerungsanlagen, in denen Klärschlämme energetisch genutzt werden können. Tabelle 6-3 gibt einen Überblick über den Standort und die theoretisch zur Verfügung stehenden Kapazitäten dieser Anlagen.

**Tabelle 6-3: Kraftwerke in Nordrhein-Westfalen mit Einsatz von Klärschlamm als Ersatzbrennstoff [verändert nach LANUV 2007]**

<b>Standort</b>	<b>genehmigte Kapazität</b>	<b>Einsatz Klärschlamm [Mg TR/a]</b>	<b>freie Kapazität (ohne Erweiterung) [Mg TR/a]</b>
Heizkraftwerk Stadtwerke Duisburg	k. A.	18.000	k. A.
Kraftwerk Weisweiler	140.000 Mg/a	60.000	24.000
Kraftwerk Berrenrath	52 Mg/h	84.000	3.000
Kraftwerk Frechen-Wachtberg	50 Mg/h	63.000	0
Kraftwerk Ibbenbüren	k. A.	40.000	12.000
Gemeinschaftskraftwerk Veltheim	50 Mg/h	k. A.	k. A.
Kraftwerk Westfalen, Hamm	k. A.	10.000	9.000
Heizkraftwerk Herne	33,5 Mg/h	30.000	25.000
Lippewerk-Kraftwerk	46,2 Mg/h	k. A.	k. A.
Kraftwerk Lünen	k. A.	k. A.	k. A.
Energiegewinnung Lünen	265.000 Mg/a	30.000	25.000
Kraftwerk Wehrdöl-Elverlingsen	k. A.	k. A.	k. A.
Kraftwerk Gersteinwerk	k. A.	k. A.	k. A.
<b>∑ freie Kapazität</b>			<b>98.000</b>

In der Praxis ist zu berücksichtigen, dass die Anlieferung des Klärschlammes in entwässertem oder vollgetrocknetem Zustand erfolgt und logistische Probleme wie Klärschlammmanlieferung, -lagerung und –zumischung gelöst werden müssen. Darüber hinaus kann eine Mitverbrennung von Klärschlämmen zu technischen Problemen führen [HANßEN., 2007]. Sind die Klärschlämme hoch mit Quecksilber belastet, sollte auch berücksichtigt werden, dass bei fehlender Rauchgasreinigung ein Austrag des leichtflüchtigen Quecksilbers in die Umwelt erfolgen kann.

#### 6.4.3.3 Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen

Aufgrund hochwertiger Abgasreinigungsanlagen scheint eine Mitverbrennung von Klärschlämmen, insbesondere von hoch belasteten Klärschlämmen, aus Gesichtspunkten des vorbeugenden Umweltschutzes besonders geeignet. Allerdings können aufgrund von verfahrenstechnischen Gegebenheiten wie das Annahmesystem und die Art der Feuerung [SCHMITT ET AL., 2007] nur begrenzte Mengen an mit zu verbrennendem Klärschlamm angenommen werden. Darüber hinaus werden für die Mitverbrennung vielfach andere Abfallstoffe den Klärschlämmen vorgezogen, da diese zu höheren Preisen angenommen werden können. In NRW existieren 16 Hausmüllverbrennungsanlagen. Nach Angaben des LANUV [2007] sind die Anlagen derzeit jedoch voll ausgelastet.

#### 6.4.3.4 Mitverbrennung in Zementwerken

Während in anderen europäischen Ländern die Mitverbrennung von Klärschlämmen in Zementwerken durchaus verbreitet ist, spielt sie in Deutschland bislang eine untergeordnete Rolle. In NRW gibt es 12 Zementwerke, von denen jedoch nur in einem Werk in Paderborn Klärschlämme mitverbrannt werden. Da die Klärschlämme in Zementwerken in der Regel nur in getrocknetem Zustand als Sekundärbrennstoff eingesetzt werden können, sind die zur Verfügung stehenden Trocknungskapazitäten von entscheidender Bedeutung und vielfach der limitierende Faktor. In NRW werden derzeit nur 4.300 Mg TR/a Klärschlamm von insgesamt 545.000 Mg TR/a anfallendem Klärschlamm in Zementwerken eingesetzt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass Zementwerke nicht über eine Abscheidetechnik für Quecksilber in der Rauchgasreinigung verfügen. Die Quecksilberbelastung des Klärschlammes sollte daher nicht über 1,5 mg Hg/kg TR liegen [HANßEN, 2007].

### 6.4 Bewertung der Klärschlamm Entsorgungsverfahren

Nachfolgend werden die verschiedenen zuvor dargelegten Entsorgungsverfahren unter Berücksichtigung folgender Kriterien bewerten:

- Realisierungschance für regionale Bedingungen,
- Verfügbare Kapazitäten,
- Entsorgungssicherheit,
- Umweltbezogene Gesichtspunkte sowie
- Ökonomische Gesichtspunkte.

### 6.4.1 Landwirtschaftliche Verwertung

Die Klärschlämme aus den Kläranlagen im Aggerverbandsgebiet werden derzeit überwiegend landwirtschaftlich verwertet (vgl. Kapitel 5.1). Auch der Klärschlamm der kommunalen Kläranlage in Brenzingen geht einer landwirtschaftlichen Verwertung zu. Im Hinblick auf die Kriterien Entsorgungssicherheit, verfügbare Kapazitäten und ökonomische Gesichtspunkte spricht vieles für eine landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen. Darüber hinaus ist die Nutzung des im Klärschlamm vorhandenen Phosphors über eine landwirtschaftliche Verwertung unter Aspekten der Kreislaufwirtschaft und des Ressourcenschutzes zu befürworten [BERGS, 2009].

Im Hinblick auf mögliche Schadstoffeinträge in die Umwelt ist dieser Entsorgungspfad jedoch kritisch zu hinterfragen. Nach einer vom MUNLV NRW durchgeführten Ökobilanzierung aller in NRW zum Einsatz kommenden Behandlungsverfahren für Klärschlämme schneiden landwirtschaftliche und landbauliche Verwertungsverfahren gegenüber thermischen Verfahren schlechter ab [MUNLV, 2001]. BOTH ET AL. [2001] sehen die Zukunft der landwirtschaftlichen Verwertung daher nur für niedrig belastete Schlämme aus Kläranlagen mit ländlichem Einzugsgebiet.

Darüber hinaus ist aufgrund der in Kapitel 4.3 dargestellten Gesetzesnovellierungen davon auszugehen, dass die stoffliche Verwertung der Klärschlamm im Aggerverbandsgebiet künftig aufgrund gestiegener Qualitätsanforderungen rückläufig sein wird.

Tabelle 6-4 liefert einen orientierenden Überblick zu den im Mittel zu veranschlagenden Kosten einer landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung [PINNEKAMP UND FRIEDRICH, 2006].

**Tabelle 6-4: Mittlere spezifische Jahreskosten der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung [PINNEKAMP UND FRIEDRICH, 2006]**

Entsorgungs- verfahren	Spezifische Kosten [€/Mg TR]				
	Entwässerung	Transport	Trocknung	Entsorgung	Gesamt
Landwirtschaft- liche Verwertung	195	45	-	168	408

#### **6.4.2 Behandlung in MBA's mit anschließender Deponierung**

Grundsätzlich ist eine mechanisch-biologische Behandlung von Klärschlämmen mit nachfolgender Deponierung in NRW möglich. Der Anteil der über diesen Weg entsorgten Schlämme spielt jedoch in NRW wie in Abbildung 5-1 bereits dargestellt quasi keine Rolle. Derzeit werden in NRW nur in den Anlagen Ennigerloh und Pohlsche Heide Klärschlämme mit behandelt. Dies liegt zum einen an den nur sehr begrenzt zur Verfügung stehenden Aufnahmekapazität der bestehenden Anlagen und den im Vergleich zu den anderen Entsorgungswegen relativ hohen Kosten aufgrund der hohen Anforderungen an diese Anlagen. In einer Studie zur Bewertung der technischen und logistischen Rahmenbedingungen bei der zukünftigen Klärschlamm Entsorgung in Schleswig-Holstein werden die Kosten eine mechanisch biologischen Klärschlammbehandlung auf 300 bis 400 €/t TS geschätzt [PFI UND IPP 2005]. Transportkosten und Kosten für die Entwässerung sind in dieser Angabe noch nicht enthalten. Diese werden im vorliegenden Fall analog zur Klärschlammmonoverbrennung auf im Mittel 75 €/t TS Transportkosten und 195 €/t TS Entwässerungskosten geschätzt. Damit ergeben sich spezifische Gesamtkosten von 570 bis 670 €/t TS.

.

### 6.4.3 Thermische Verfahren

#### 6.4.3.5 Monoverbrennungsanlagen

Unter Berücksichtigung der derzeitigen Auslastung der Klärschlammmonoverbrennungsanlagen und dem technisch möglichen Mengendurchsatz liegt die freie Kapazität, welche kurz bis mittelfristig zur Verfügung gestellt werden könnte, bei 12.500 Mg TR/a. Zur Reduzierung entsprechender Transportkosten wären zur Entsorgung von Klärschlämmen aus dem Verbandsgebiet des Aggerverbandes die Anlagen in Bonn, Wuppertal oder Bottrop vorzuziehen. Die Anlagen in Bonn und Wuppertal verfügen gemeinsam über eine freie Kapazität von 4000 Mg TR/a. Die Anlage in Bottrop weist keine freien Kapazitäten auf. Die im Mittel zu veranschlagenden Kosten einer Monoverbrennung von Klärschlamm sind nachfolgend dargestellt [PINNEKAMP UND FRIEDRICH, 2006].

**Tabelle 6-5: Mittlere spezifische Kosten Gesamtkosten einer Monoverbrennung von Klärschlamm [PINNEKAMP UND FRIEDRICH, 2006]**

Entsorgungsverfahren	Spezifische Kosten [€/Mg TR]				
	Entwässerung	Transport	Trocknung	Entsorgung	Gesamt
Monoverbrennung	195	75	-	275	545

Die Entsorgungskosten bei einer Monoverbrennung werden von PFT UND IPP [2005] mit 160 bis 200 €/t TS etwas niedriger geschätzt. Demnach ergeben sich Gesamtkosten von 430 bis 475 €/t TS.

#### 6.4.3.6 Mitverbrennung in Kohlekraftwerken

Die theoretisch zur Verfügung stehenden Kapazitäten stehen einer vermehrten Mitverbrennung kommunaler Klärschlämme grundsätzlich nicht entgegen. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Mitverbrennung durch stromwirtschaftliche und technische Rahmenbedingungen deutlich begrenzt ist. Einige Energieversorger verzichten auf zudem auf die Beantragung der Klärschlamm-Mitverbrennung, um das Genehmigungsverfahren nicht zu Gefährden [SCHMITZ, 2009]. Auch die Aspekte einer möglichst regionalen Entsorgung und einer Minimierung der Transportkosten stehen diesem Entsorgungspfad teilweise entgegen. Im Falle des Aggerverbandes sind die nächst gelegenen Energiegewinnungsanlagen mit einer Klärschlamm-Mitverbrennung in Berrenrath, Frechen-Wachtberg und Werdohl gelegen; wobei in Frechen-Wachtberg keine freien Kapazitäten zur Verfügung stehen.

**Tabelle 6-6: Mittlere spezifische Kosten Gesamtkosten einer Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken [PINNEKAMP UND FRIEDRICH, 2006]**

Entsorgungs- verfahren	Spezifische Kosten [€/Mg TR]				
	Entwässerung	Transport	Trocknung	Entsorgung	Gesamt
Mitverbrennung Kohlekraftwerk	195	140	-	248	583

Die Entsorgungskosten bei einer Mitverbrennung in Kohlekraftwerken werden von PFT UND IPP [2005] mit 160 bis 200 €/t TS etwas niedriger geschätzt. Demnach ergeben sich Gesamtkosten von 495 bis 535 €/t TS.

#### 6.4.3.7 Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen

Aufgrund mangelnder freier Kapazitäten wird das Potenzial der Mitbehandlung von kommunalen Klärschlämmen des Aggerverbandes in Müllverbrennungsanlagen als gering eingeschätzt.

**Tabelle 6-7: Mittlere spezifische Kosten Gesamtkosten einer Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllverbrennungsanlagen [PINNEKAMP UND FRIEDRICH, 2006]**

Entsorgungs- verfahren	Spezifische Kosten [€/Mg TR]				
	Entwässerung	Transport	Trocknung	Entsorgung	Gesamt
Mitverbrennung Müllverbrennungsanlage	195	75	300	105	675

Die Entsorgungskosten bei einer Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen werden von PFT UND IPP [2005] mit 160 bis 200 €/t TS etwas höher geschätzt. Demnach ergeben sich Gesamtkosten von 730 bis 760 €/t TS.

#### 6.4.3.8 Mitverbrennung in Zementwerken

Das Potential für die Mitverbrennung von Klärschlämmen aus dem Aggerverbandsgebiet in Zementwerken kann aufgrund der derzeit begrenzten Kapazitäten in NRW als gering bewertet werden. Zudem liegen die Kosten bei einer Mitverbrennung in Zementwerken aufgrund der erforderlichen Trocknung (vgl. Kapitel 6.3.2.4) in einer mit anderen thermischen Verfahren vergleichbaren Größenordnung. Tabelle 6-8 stellt die Zusammensetz-

ung mittleren spezifischen Kosten für die Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken zusammen.

**Tabelle 6-8: Mittlere spezifische Kosten Gesamtkosten einer Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken [PINNEKAMP UND FRIEDRICH, 2006]**

Entsorgungsverfahren	Spezifische Kosten [€/Mg TR]				
	Entwässerung	Transport	Trocknung	Entsorgung	Gesamt
Mitverbrennung Zementwerk	195	140	300	115	750

Allerdings liegen die aktuellen Entsorgungskosten für Zementwerke um nach PFT und IPP [2005] um etwa 50 % und damit bei 44 bis 55 €/t TS. Damit ergeben sich mittlere spezifische Gesamtkosten von 679 bis 690 €/t TS.

#### 6.4.4 Zusammenfassende Bewertung der Klärschlamm Entsorgungspfade

Für die Entsorgung der im Aggerverbandsgebiet anfallenden Klärschlämme aus kommunalen Anlagen kann festgehalten werden, dass eine landwirtschaftliche Verwertung im Einklang mit den derzeit geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen steht und auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten derzeit zu befürworten ist. Im Hinblick auf die in Kapitel 4.3 dargestellten Gesetzesnovellierungen und die Bestrebungen der Landesregierung Nordrhein-Westfalen ist jedoch davon auszugehen, dass die Anforderungen an die Qualität der zu verwertenden Klärschlämme zukünftig weiter steigen werden, so dass ein immer geringerer Anteil stofflich verwertet werden wird und Klärschlämme primär thermisch entsorgt werden sollen. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Tendenz auch künftig in den Klärschlamm Entsorgungsstrukturen des Aggerverbandes widerspiegeln wird.

Die in Kapitel 6.3 dargestellten alternativen Entsorgungsoptionen für Klärschlämme sind im Vergleich zur landwirtschaftlichen Verwertung deutlich teurer. Eine Ökobilanzierung aller in NRW zum Einsatz kommenden Behandlungsverfahren für Klärschlämme hat jedoch gezeigt, dass landwirtschaftliche und landbauliche Verwertungsverfahren gegenüber thermischen Verfahren schlechter abschneiden [MUNLV, 2001]. Unter Berücksichtigung rein ökonomischer Kriterien schneiden die Klärschlamm-Monoverbrennung und eine Mitverbrennung des Klärschlammes in Kohlekraftwerken am besten ab. Welcher Entsorgungspfad für den Klärschlamm der krankenhauseigenen Kläranlage der umwelt- und kostenschonendste ist, wird in Kapitel 7 dargelegt.



## 7 Szenarienbetrachtungen für die Entsorgung von Abfällen der krankenhauseigenen Kläranlage

Im Folgenden werden verschiedene Szenarien für die relevanten Abfallströme der krankenhauseigenen Kläranlage am Standort Waldbröl betrachtet. Die großtechnische Umsetzung der Kläranlage sieht eine mechanisch-biologische Vorreinigung über einen MBR und eine nachgeschaltete Ozonung vor. Da bei der Ozonung, wie bereits in Kapitel 5.2.1 dargestellt, keine zu entsorgenden Abfallströme entstehen, beschränkt sich die nachfolgende Betrachtung auf die am MBR entstehenden Abfallströme. Hierbei handelt es sich um das Siebgut und den Klärschlamm. Diese beiden Entsorgungsströme werden für alle Szenarien separat betrachtet.

Bei der Betrachtung der Kosten innerhalb der einzelnen Szenarien werden, sofern zugänglich, die vom Aggerverband angesetzten Entsorgungskosten zugrunde gelegt. Alternativ wird auf Literaturwerte zurückgegriffen.

Bei dem zu entwickelnden Entsorgungskonzept ist den lokalen Randbedingungen Rechnung zu tragen. Im Folgenden werden verschiedene Szenarien betrachtet, bei denen insbesondere die bereits bestehenden Entsorgungskonzepte am Krankenhaus und an den Kläranlagen des Aggerverbands berücksichtigt werden.

In den Kapiteln 7.1 bis 7.3 werden drei verschiedene Szenarien betrachtet:

- Szenario 1: Entsorgung das KKH Waldbröl
- Szenario 2: Entsorgung über die KA Brenzingen (nächst gelegene kommunale Kläranlage des Aggerverbandes)
- Szenario 3: Entsorgung über die KA Leimbach (einzige Kläranlage des Aggerverbandes mit thermischer Klärschlammentsorgung)

In Kapitel 7.4 erfolgt eine vergleichende Bewertung der Szenarien. Basierend hierauf wird ein Entsorgungskonzept für die Kläranlage am KKH Waldbröl entwickelt.

## 7.1 Szenario 1: Entsorgung über das KKH Waldbröl

### 7.1.1 Siebgutentsorgung

Das hier für die Siebgutentsorgung dargestellte Szenario entspricht der derzeitigen Entsorgungspraxis an der Pilotanlage. Die Siebgutentsorgung erfolgt durch den Abfall-Sammel- und Transportverband Oberberg (ASTO), bzw. den Bergischen Abfallwirtschaftsverband (BAV) durch Verbrennung im Müllheizkraftwerk Leverkusen. Für die Entsorgung des Siebguts der Anlage fielen im Jahr 2008 Kosten in Höhe von 638,28 € an. Die Kosten werden analog zum Hausmüll über die Anzahl und Größe der zur Verfügung gestellten Müllbehälter unabhängig vom tatsächlichen Anfall erhoben. Bezogen auf einen Siebgutanfall von 2 l/d bzw. 0,73 m<sup>3</sup>/a ergeben sich spezifische Entsorgungskosten von rd. 874 €/m<sup>3</sup> entsorgtes Siebgut. Die Übernahme des Siebguts im Rahmen des bestehenden Restmüll-Entsorgungsweges des KKH stellte sich durch die Nutzung von Standardmüllbehältern für den Siebgutabwurf problemlos dar.

### 7.1.2 Klärschlamm Entsorgung

Aufgrund der in Kapitel 5.1.1 dargestellten Mengen des am MBR anfallenden Klärschlammes (1,2 m<sup>3</sup>/d bzw. 43 kg TS/d) ist eine Nutzung des bereits bestehenden Entsorgungspfades für die Hausmüllbeseitigung am Kreiskrankenhaus nicht möglich. Darüber hinaus wäre bei einer separaten Entsorgung des Klärschlammes aus dem MBR zunächst zu beachten, ob der anfallende Klärschlamm nass oder entwässert von der Anlage abgefahren werden soll. Eine direkte Verbrennung ohne vorherige Entwässerung ist nicht möglich, da Verbrennungsanlagen üblicherweise ausschließlich entwässerte Klärschlämme mit einem TR-Gehalt > 20 – 25% annehmen. Um den anfallenden Schlamm einer Entwässerung zuführen zu können, ist jedoch zunächst seine Stabilisierung erforderlich. Theoretisch ist eine Entwässerung auch mit dem Anteil des nicht stabilisierten Rohschlammes denkbar [IMHOFF, 2006; RÖDIGER ET AL., 1990]. Der erreichbare Entwässerungsgrad ist aber stark vom Stabilisierungsgrad des zu entwässernden Schlammes abhängig und nimmt mit steigendem Stabilisierungsgrad zu [ATV, 1996]. Die Entwässerung des Mischschlammes, der einen maßgeblichen Anteil an nicht stabilisiertem Primärschlamm enthält, ist somit als problematisch zu beurteilen. Sollte diese Option angestrebt werden, ist die Vorklärung zu umfahren, um sicher zu stellen, dass ausschließlich stabilisierter Schlamm auf der Anlage anfällt. Diese Verfahrensweise geht mit einem erhöhten Energiebedarf des MBR einher, da die nicht mehr über das Vorklärbecken abgeschiedene organische Fracht durch eine verstärkte Belüftung aerob stabilisiert werden muss.

Bei einer Entwässerung wäre die Anschaffung oder Bereitstellung eines geeigneten Entwässerungsaggregates erforderlich. Hierbei sind die nur in vergleichsweise geringem Umfang anfallenden Schlammengen an der krankenhauseigenen Kläranlage zu berücksichtigen. In der Literatur werden für die kleinsten zu findenden Entwässerungsaggregate Durchsatzmengen von 2 bis 2,5 m<sup>3</sup>/h genannt [ATV 1996]. Mit Blick auf den Mischschlammanfall von ca. 1,2 m<sup>3</sup>/d zeigt sich, dass ein solches Aggregat nur eine Betriebszeit von ca. 0,5 h/d aufweisen würde. Die feste Installation einer Schlamm-entwässerung kann vor diesem Hintergrund nicht als sinnvoll erachtet werden. Eine Alternative stellt eine mobile Lohnentwässerung dar. Im Pilotbetrieb des MBR zeigte sich, dass circa die Hälfte des Vorklärbeckenvolumens zur Schlammstapelung genutzt werden kann. Dies entspricht einem Stapelvolumen von ca. 11 m<sup>3</sup> und somit der Stapelung des Schlammanfalls von ca. 9 Tagen. Der Einsatz einer mobilen Lohnentwässerung alle 9 Tage für wenige Stunden wäre ebenfalls mit hohen Kosten verbunden. Die Schaffung von zusätzlichem Stapelvolumen oder einer statischen Eindickung scheitert an den nicht verfügbaren Platzreserven und den Investitionskosten.

## 7.2 Szenario 2: Entsorgung via KA Brenzingen

### 7.2.1 Siebgutentsorgung

Dieses Szenario sieht eine Entsorgung des am MBR anfallenden Siebgutes über die kommunale Kläranlage Brenzingen vor. An der KA Brenzingen fielen 2007 44,57 t Rechengut an. Das Rechengut wird nach Waschung und Pressung überwiegend über die Abfallentsorgungs- und Verwertungsgesellschaft (AVG), Köln thermisch entsorgt. Teilweise erfolgt auch eine Kompostierung des vorbehandelten Rechengutes. Das am MBR anfallende Siebgut sollte möglichst thermisch entsorgt werden, da eine Kompostierung unter dem Gesichtspunkt der hohen Konzentrationen an Antibiotika nicht zu empfehlen ist. Aus logistischen und praktischen Gründen ist eine Trennung des Siebgutes an der kommunalen Kläranlage derzeit nicht möglich. Darüber hinaus verfügt der Aggerverband derzeit nicht über eine Genehmigung zur Annahme von Fremdmaterial.

### 7.2.2 Klärschlamm Entsorgung

Das hier für die Klärschlamm Entsorgung dargestellte Szenario entspricht der derzeitigen Entsorgungspraxis an der Pilotanlage. Die Ableitung des Überschussschlammes aus dem MBR erfolgt über eine Tauchmotorpumpe in das öffentliche Kanalnetz. Der Klärschlamm des MBR wird in der kommunalen Kläranlage Brenzingen mitbehandelt und mit dem dort anfallenden Klärschlamm entsorgt. Der Klärschlamm der KA Brenzingen wird überwiegend landwirtschaftlich verwertet; nur ein geringer Anteil geht einer biologischen Behandlung zu. Diese Entsorgungsvariante bietet den Vorteil, dass die Schlamm-

entsorgung weitestgehend automatisiert oder per Fernüberwachung gesteuert werden kann. Für die Schlamm Entsorgung über KA Brenzingen liegen keine konkreten Kosten vor, da diese in einer Betriebsführungspauschale enthalten sind, deren Einzelkosten nicht weiter aufgeschlüsselt wurden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die für das Krankenhaus entstehenden Kosten mit den Kosten für die Annahme von Rohschlamm aus Kleinkläranlagen vergleichbar sind. Für die Annahme solcher Schlämme veranschlagt der Aggerverband Kosten in Höhe von 17,49 €/ m<sup>3</sup> [HALLER, 2009]. Bezogen auf den TR von 3,6% entspricht dies Kosten von 486 €/t TR. Beim gewählten Ableitungskonzept wird der Schlamm des MBR am KKH der Abwasserreinigung und nicht der Schlammbehandlung der KA Brenzingen zugegeben.

### 7.3 Szenario 3: Klärschlammentsorgung via KA Lehmbach

#### 7.3.1 Siebgutentsorgung

Da die Behandlung und Entsorgung des Rechengutes aller Kläranlagen im Aggerverbandsgebiet zentral erfolgt, gleicht dieses Szenario der Entsorgung des Siebgutes über die KA Brenzingen (vgl. Kapitel 7.2.1).

#### 7.3.2 Klärschlammentsorgung

Bei einer Entsorgung des an der krankenhauseigenen Kläranlage anfallenden Klärschlammes über die KA Lehmbach wäre sicher gestellt, dass der Klärschlamm thermisch entsorgt wird. Die KA Lehmbach ist derzeit die einzige Kläranlage des Aggerverbandes, die ihren Klärschlamm (367,8 t TS/a) thermisch entsorgt.

Die Annahme des Klärschlammes vom MBR auf der KA Lehmbach sollte in den Zulauf der Eindickung vor der Faulung erfolgen. Die Zugabe unmittelbar vor der Faulung ermöglicht es, den Schlamm des MBR einer anaeroben Schlammstabilisierung inkl. Entwässerung zuzuführen. Dieses Konzept ermöglicht auch, eine energetische Verwertung der organischen Bestandteile des Mischschlammes durch Umwandlung in Faulgas und Verwertung in einem BHKW. Der Abtransport von der Kläranlage am Krankenhaus erfolgt in diesem Fall mit Saugwagen. Entsprechende Saugleitungen mit Perrot-Kupplungen zur Schlamm-entnahme aus Belebungsbecken und Vorklärung sind am MBR bereits vorhanden.

Für den Transport können gemäß Angaben des Aggerverbandes [HALLER 2009] Kosten in Höhe von 6 €/m<sup>3</sup> entsprechend 167 €/t TR angesetzt werden. Unter Berücksichtigung des üblichen Preises für die Fremdschlammannahme ergeben sich Gesamtkosten von ca. 23,49 €/m<sup>3</sup> bzw. 653 €/t TS.

## 7.4 Vergleichende Bewertung der Szenarien und Ableitung eines Entsorgungskonzeptes

Bei der Bewertung der verschiedenen Szenarien für die Abfallsentsorgung der krankenhauseigenen Kläranlage werden die bereits in Kapitel 6.4 genannten Kriterien zugrunde gelegt. Die dort genannten Kriterien „Realisierungschancen für regionale Bedingungen“ und „Entsorgungssicherheit“ werden jedoch nicht weiter betrachtet, da ihnen bei Auswahl der Szenarien unter Berücksichtigung der lokalen Randbedingungen und der Einbindung bestehender Entsorgungskonzepte bereits Rechnung getragen wurde. Die Bewertung der einzelnen Szenarien erfolgt anhand „Ökonomischer Gesichtspunkte“, „Umweltbezogener Gesichtspunkte“ und „Verfügbare Kapazitäten“. Darüber hinaus wurden der Bewertung die im Weiteren genannten Randbedingungen zugrunde gelegt:

- Wie in Kapitel 4.6 erläutert, sind bei der Entsorgung von Abfällen aus krankenhauseigenen Kläranlagen die krankenhausspezifischen Abwasserbelastungen zu berücksichtigen. Der Klärschlamm und das Rechengut des MBR am KKH sind deutlich höher mit Antibiotika aus der Gruppe der Floxacine belastet als Rechengut und Klärschlämme aus kommunalen Kläranlagen. Darüber hinaus wurden im Vergleich zum Klärschlamm der KA Brenzingen auch höhere Quecksilberkonzentrationen im Schlamm des MBR gemessen. Aus umwelt- und gesundheitsbezogenen Gesichtspunkten scheidet daher der Pfad der stofflichen Verwertung für die Abfälle der krankenhauseigenen Kläranlage aus.
- Vor dem Hintergrund des Anstiegs bakterieller Resistenzen, scheint auch eine biologische Vorbehandlung mit anschließender Deponierung nicht empfehlenswert. Inwieweit von Einträgen multiresistenter Bakterien über das Abwasser in die Umwelt eine Gefährdung ausgeht, ist derzeit noch nicht abschließend zu beantworten. Im Sinne des Vorsorgeprinzips sollte jedoch im vorliegenden Fall von einer mechanisch-biologischen Vorbehandlung mit anschließender Deponierung abgesehen werden. Wie in Kapitel 6.4 dargelegt sind die Kosten einer mechanisch-biologischen Vorbehandlung mit anschließender Deponierung mit denen einer thermischen Versorgung vergleichbar und liegen teilweise sogar darüber.
- Das zu entwickelnde Entsorgungskonzept, sollte für das Krankenhaus möglichst kostenschonend und praktikabel sein.

In Tabelle 7-1 werden die verschiedenen Szenarien für die Siebgutentsorgung miteinander verglichen.

**Tabelle 7-1: Vergleich der untersuchten Szenarien für die Siebgutentsorgung**

Szenario	Ökonomische Gesichtspunkte	Umweltbezogene Gesichtspunkte	Verfügbare Kapazitäten
Szenario 1 KKH Waldbröl	Sehr kostengünstige Alternative, da keine Transportkosten sondern lediglich Entsorgungskosten anfallen.	Das Siebgut wird mit dem Hausmüll des Krankenhauses gesammelt und thermisch über eine MVA entsorgt. Dies ist von Vorteil.	Es stehen ausreichend Kapazitäten zur Verfügung.
Szenario 2 KA Brenzingen	Es fallen Transportkosten und Entsorgungskosten an.	Eine Verbrennung des Siebgutes kann nur unter Änderung des derzeitigen Entsorgungskonzeptes an der kommunalen KA Brenzingen sichergestellt werden.	Es stehen ausreichend Kapazitäten zur Verfügung; derzeit jedoch keine Genehmigung für die Entsorgung von Fremdmaterial
Szenario 3 KA Lehmbach	Es fallen Transportkosten und Entsorgungskosten an.	Eine Verbrennung des Siebgutes kann nur unter Änderung des derzeitigen Entsorgungskonzeptes an der kommunalen KA Brenzingen sichergestellt werden.	Es stehen ausreichend Kapazitäten zur Verfügung; derzeit jedoch keine Genehmigung für die Entsorgung von Fremdmaterial

Die in Szenario 1 dargestellte Mitverbrennung des Siebguts in einer kommunalen Müllverbrennung stellt unter Berücksichtigung der Arzneimittelbelastung des Siebguts und der sonstigen krankenhausspezifischen Inhaltsstoffe einen geeigneten Entsorgungsweg dar. Dieser Entsorgungspfad bietet auch gute wirtschaftliche Randbedingungen und ist einfach in die Entsorgungsinfrastruktur des KKH zu implementieren ist. Unter umweltbezogenen, wirtschaftlichen und betrieblichen Gesichtspunkten ist die thermische Entsorgung des an der krankeneigenen Kläranlage anfallenden Siebgutes mit dem am Krankenhaus anfallenden Hausmüll (Szenario 1) zu bevorzugen.

In Tabelle 7-2 werden die verschiedenen Szenarien für die Klärschlammentsorgung miteinander verglichen.

**Tabelle 7-2: Vergleich der untersuchten Szenarien für die Klärschlammentsorgung**

Szenario	Ökonomische Gesichtspunkte	Umweltbezogene Gesichtspunkte	Verfügbare Kapazitäten
Szenario 1 KKH Waldbröl	Neben den Entsorgungskosten ist mit zusätzlichen Investitions- und Betriebskosten für eine Entwässerung zu rechnen. Darüber hinaus entstehen höhere Energiekosten für den Betrieb des MBR ohne Vorklärung.	Eine thermische Entsorgung mit dem Hausmüll des Krankenhauses ist zu befürworten.	Derzeit sind die am Krankenhaus verfügbaren Kapazitäten nicht ausreichend.
Szenario 2 KA Brenzingen	Sehr kostengünstige Alternative.	Die landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes ist nicht zu empfehlen.	Es sind ausreichend Kapazitäten vorhanden.
Szenario 3 KA Lehmbach	Neben den Entsorgungskosten für die thermische Entsorgung fallen Transportkosten zur KA Lehmbach an.	Eine thermische Entsorgung ist zu befürworten.	Es sind ausreichend Kapazitäten vorhanden.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten stellt die Mitbehandlung des Klärschlammes aus dem MBR in der KA Brenzingen eine sehr günstigste Entsorgungsmöglichkeit dar. Unter Berücksichtigung der umwelt- und gesundheitsbezogenen Gesichtspunkte sollten dem Abwasserkreislauf einmal entzogene AMR jedoch nicht mehr in einen Schlammkreislauf eingebracht werden, der in die stoffliche Verwertung in der Landwirtschaft mündet. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund einer deutlich höheren Belastung des Klärschlammes aus der krankenhauseigenen Kläranlage mit Chinolon-Antibiotika.

Da eine Klärschlamm Entsorgung über die Kläranlage Brenzingen aus den genannten Gründen nicht zu empfehlen ist und das Krankenhaus selbst weder über eine entsprechende technische Ausstattung noch über ausreichend Kapazitäten verfügt, um den am MBR anfallenden Klärschlamm einer thermischen Entsorgung zuzuführen, ist das Szenario 3 (Entsorgung über KA Lehmbach) zu bevorzugen. Da das KKH Waldbröl den Betrieb der Kläranlage an die Aggerwasser GmbH / Aggerverband übertragen hat, ist dieses Modell für die praktische Umsetzung problemlos zu empfehlen und auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten vertretbar.



## 8 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Auf Grundlage der in Kapitel 7 erstellten Entsorgungsszenarien wird nachfolgend ein Entsorgungskonzept für die Abfallströme der krankenhauseigenen Kläranlage am Standort Waldbröl vorgeschlagen. Das Konzept trägt sowohl umweltbezogenen als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten Rechnung. Es handelt es sich um ein Abfallentsorgungskonzept, welches die lokalen Randbedingungen berücksichtigt, indem sowohl die vorhandenen Infrastrukturen des KKH Waldbröl als auch die des Aggerverbandes einbezogen werden. Hiermit war die Ableitung einer ökologisch sinnvollen und gleichzeitig wirtschaftlich vertretbaren Entsorgungsoption möglich.

Das Entsorgungskonzept besteht aus den im Folgenden genannten wesentlichen Bausteinen:

- Die Entsorgung des Siebgutes wird in der derzeit bereits praktizierten Form fortgesetzt; d. h. das Rechengut wird gemeinsam mit den Hausmüll des KKH Waldbröl der Müllverbrennung Leverkusen zugeführt. Dieser Entsorgungsweg ist aus umweltbezogenen und wirtschaftlichen Aspekten als optimal zu erachten. Mit nur ca. 0,02 €/m<sup>3</sup> behandeltem Abwasser sind die spezifischen Entsorgungskosten für das Siebgut im Hinblick auf die Gesamtkosten der Anlage von untergeordneter Bedeutung.
- Die derzeit erfolgende Klärschlamm Entsorgung über die KA Brenzingen sollte in dieser Form nicht weiter aufrecht erhalten werden, da eine stoffliche Verwertung des Klärschlammes, aufgrund hoher Antibiotikakonzentrationen und teilweise auch erhöhten Schwermetallgehalten, im Sinne eines vorbeugenden Umwelt- und Gesundheitsschutzes nicht zu vertreten ist und dem Minimierungsgebot widerspricht. Für die Entsorgung müssen etwa 24 € je m<sup>3</sup> zu entsorgendem Klärschlamm angesetzt werden. Dies entspricht einer Erhöhung der Betriebskosten der Kläranlage um etwa 0,30 €/m<sup>3</sup> zu behandelndes Abwasser. Der Aggerverband berechnet auf seinen Kläranlagen unabhängig vom Entsorgungsweg 17,49 € je m<sup>3</sup> angenommenem Fremdschlamm. Dieser Anteil ist somit auch für die Entsorgung über die KA Brenzingen in den bisher anfallenden Betriebskosten bereits beinhaltet. Es verbleiben Mehrkosten für den Transport zur KA Leimbach in Höhe von gut 6 € je m<sup>3</sup> abzufahrendem Klärschlamm bzw. 0,07 €/m<sup>3</sup> behandeltem Abwasser. Die spezifischen Brutto-Gesamtkosten der Abwasserbehandlung am MBR Waldbröl würden somit von 5,29 €/m<sup>3</sup> auf 5,36 €/m<sup>3</sup> ansteigen. Diese zusätzliche finanzielle Belastung wird als wirtschaftlich vertretbar eingestuft.

- Es wird empfohlen, den Betrieb des MBR Waldbröl einschließlich nachgeschalteter Ozonung weiter durch das Fachpersonal des Aggerverbandes fortzuführen, da derzeit keine wirtschaftlich günstigeren Modelle für den Betrieb der Kläranlage bestehen.

Im Hinblick auf die Übertragbarkeit des vorgeschlagenen Entsorgungskonzeptes auf andere Krankenhäuser sind die jeweiligen Randbedingungen zu berücksichtigen. Grundsätzlich scheint das Konzept für die Entsorgung der am MBR Waldbröl anfallenden Abfallströme auch auf andere krankenhauseigene Kläranlagen, mit mechanisch-biologischer Abwasserreinigungsstufe übertragbar; wobei die anfallenden kläranlagenspezifischen Abfallmengen zu berücksichtigen sind. Es ist jedoch davon auszugehen, dass größere Krankenhäuser mit einem höheren Abwasseranfall und infolge dessen auch höheren Mengen an anfallendem Siebgut auch über größere Kapazitäten für die Hausmüllentsorgung verfügen.

Die Überprüfung etwaiger zusätzlicher Abfallentsorgungen aus den Verfahrensstufen, die dem MBR Waldbröl als Spurenstoffeliminationsstufe im Pilotmaßstab nachgeschaltet wurden, ergab, dass wirtschaftlich nicht vertretbare Aufwendungen für die Entsorgung der Konzentrate aus der Nanofiltration bzw. Umkehrosmose resultieren. Bei einer nachgeschalteten Ozonung resultieren keine weiteren Abfallströme. Lediglich bei der Aktivkohleadsorption, die als alternative Verfahrenstechnik zur Ozonung eingesetzt werden könnte, wäre ein regelmäßiger Austausch beladener Aktivkohle und eine Entsorgung bzw. Reaktivierung notwendig. Ob im Einzelfall zusätzliche Aufwendungen für die Aktivkohleentsorgung bzw. -reaktivierung durch Einsparung bei den Investitionskosten einer nachgeschalteten Aktivkohlefiltration gegenüber einer Ozonung ausgeglichen werden können, hängt wesentlich von den Laufzeiten der Filter ab und ist für jeden Einzelfall zu beurteilen.

Die Nutzung bereits bestehender Entsorgungspfade sowohl im Bereich des Krankenhauses als auch im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung hat sich im Rahmen des Projektes als praktikabel und vorteilhaft erwiesen. Bei der Entsorgung von Abfällen aus krankenhauseigenen Kläranlagen sind jedoch krankenhausspezifische Belastungen der Abfallströme zu berücksichtigen. Im Rahmen der Untersuchungen am Kreiskrankenhaus Waldbröl haben sich insbesondere Belastungen mit Antibiotika als relevant erwiesen. Vor diesem Hintergrund empfiehlt sich eine thermische Entsorgung der Abfälle aus krankenhauseigenen Kläranlagen.

## 9 Literaturverzeichnis

- AIDA (2007):** AIDA - Informationsplattform Abfall in NRW (abrufbar unter: <http://www.abfall-nrw.de/aida/steuer.php>) 04.-16.05.2009.
- ASA (2007):** „MBA-Steckbriefe 2007/2008.“ Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung, Ennigerloh.
- ATV - ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG E. V. (HRSG.) (1996):** ATV-Handbuch Klärschlamm, 4. Auflage, ISBN 3-433-00909-0, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2005):** Arzneistoffe in der Umwelt. (abrufbar unter: [http://www.bayern.de/lfu/umwberat/data/chem/stoff/arznei\\_2005.pdf](http://www.bayern.de/lfu/umwberat/data/chem/stoff/arznei_2005.pdf)) 30.01.2007.
- BEIER, S., PINNEKAMP, J., SCHRÖDER, H. FR., GEBHARDT, W., CRAMER, C., BIELING, U., MAUER, C., COURTH, F., WEBER, M., MIELCKE, J., SELKE, D. (2008):** Untersuchungen zur separaten Erfassung und Behandlung von Krankenhausabwasser mit Membrantechnik und weitergehenden Verfahren. 41. ESSENER TAGUNG für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 02. - 04. April 2008, Band 211 der Schriftenreihe Gewässerschutz – Wasser – Abwasser. Hrsg. von J. Pinnekamp, Aachen 2009.
- BENCHMARK (2008):** Energetisches Benchmarking für Krankenhäuser. Erhebung 2008. (unveröffentlicht).
- BERGS, C.-G. (2009):** Konsequenzen der Novelle der Klärschlammverordnung und der novellierten Düngemittelverordnung. 42. ESSENER TAGUNG für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 18. - 20. März 2009, Band 217 der Schriftenreihe Gewässerschutz – Wasser – Abwasser. Hrsg. von J. Pinnekamp, Aachen 2009.
- BOTH, G., FIEDRICH, G. F., FEHRENBACH, H., GIEGRICH, H., KNAPPE, F. (2001):** Neue Strategien der Klärschlammentsorgung in NRW. Ordnungsgemäße und schadlose Verwertung nach KrW-/AbfG und im Einklang mit dem Bodenschutz. In: KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall. Nr. 48(10), 2001, S. 1430–1442
- CSC (2009):** Persönliche Mitteilungen am 22. April 2009.
- CARBALLA, M., FINK, G., OMIL, F., LEMA J. M., TERNES T. (2008):** Determination of the solid–water distribution coefficient (Kd) for pharmaceuticals, estrogens and musk fragrances in digested sludge. Water Res. 42 (1-2), 287-295.

- DWA (HRSG.) (2009):** Entwurf Merkblatt DWA-M 775: Abwasser aus Krankenhäusern und anderen medizinischen Einrichtungen. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- EUROFINS-AUA GMBH UND PROWA GMBH (2007):** Abschlussbericht zum Vorhaben: „Bewertung der (organischen) Schadstoffbelastung kommunaler Klärschlämme in Schleswig Holstein hinsichtlich der zukünftigen landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung.“ im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MLUR). Jena/Dresden.
- FELDMANN, D. (2005):** Modellberechnungen zum Verhalten und Verbleib von Arzneimittelrückständen im Krankenhausabwasser und Beurteilungsmöglichkeiten ihres ökotoxikologischen Gefährdungspotentials. Fakultät III – Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin, Dissertation, Berlin 2005.
- GÖBEL, A., THOMSEN, A., MCARDELL, C. S., ALDER, A. C., GIGER, W., THEISS, N., LÖFFLER, D., TERNES, T. (2005):** Extraction and determination of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in sewage sludge. *J. Chromatogr. A* 1085 179-189.
- GOLET, E. M., STREHLER, A., ALDER, A. C., GIGER, W. (2002):** Anal. Chem. 74 5455. Determination of Fluoroquinolone Antibacterial Agents in Sewage Sludge and Sludge-Treated Soil Using Accelerated Solvent Extraction Followed by Solid-Phase Extraction *Anal. Chem.*, 74, 5455-5462; DOI: 10.1021/ac025762m.
- HALLER, C (2008):** „Telefonische Auskunft am 27.07.2009“ Aggerverband, Gummersbach.
- HANßEN, H. (2007):** „Stand und Entwicklung der thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland.“ 5. Klärschlammstage der DWA am 21.-23. Mai 2007 in Hildesheim.
- IMHOFF, K.; IMHOFF, K.-R. (2006):** Taschenbuch der Stadtentwässerung. 30. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag.
- JONES, O. H. A., GREEN, P. G., VOULVOULIS, N., LESTER, N. J. (2007):** Questioning the excessive use advanced treatment to remove organic micropollutants from wastewater. *Environ. Sci. Technol.*, (14): 5085-5089.
- JONES-LEPP, T. L., STEVENS, R. (2007):** Pharmaceuticals and personal care products in biosolids/ sewage sludge, the interface between chemistry and regulation. *Anal Bioanal Chem.* 387, 1173- 1183.
- KIMURA, K.; HARA, H.; WATANABE Y. (2007):** Elimination of Selected Acidic Pharmaceuticals from Municipal Wastewater by an Activated Sludge System and Membrane Bioreactors. *Environ. Sci. Technol.*, 41 (10), 3708-3714.

- KINNEY, C. A.; FURLONG, E. T.; ZAUGG, S. D.; BURKHARDT, M. R.; WERNER, S.L.; CAHILL, J. D.; JORGENSEN, G. J. (2006):** Survey of Organic Wastewater Contaminants in Biosolids Destined for Land Application. *Environ. Sci. Technol.*, 40 (23), 7207-7215.
- LANUV (2007):** „AIDA - Informationsplattform Abfall in NRW.“ Recklinghausen. <http://www.nrw-luawebapps.de/aida/> (06.10.2008).
- LINDBERG, R., JARNHEIMER, P.-Å., OLSEN, B., JOHANSSON, M., TYSKLIND, M. (2004):** Determination of antibiotic substances in hospital sewage water using solid phase extraction and liquid chromatography/ mass spectrometry and group analogue internal standards. *Chemosphere*, 57, 1479-1488.
- LINDBERG, R. H.; WENNBERG, P.; JOHANSSON, M. I.; TYSKLIND, M.; ANDERSSON, B. A. V. (2005):** Screening of Human Antibiotic Substances and Determination of Weekly Mass Flows in Five Sewage Treatment Plants in Sweden. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 3421-3429.
- LÖFFLER, D.; TERNES, T. (2003):** Determination of acidic pharmaceuticals, antibiotics and ivermectin in river sediment using liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *J. Chromatogr. A*, 1021, 133-144.
- LÜCKE (2008):** „Telefonische Auskunft am 06.10.2008“ infracor GmbH, Marl.
- MUNLV (HRSG.) (2004):** Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben: Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunale Kläranlagen. Düsseldorf.
- MUNLV (HRSG.) (2001):** Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen – Teil B: Klärschlamm Entsorgung in Europa. Düsseldorf.
- PINNEKAMP, J. UND FRIEDRICH H. F. (HRSG.) (2006):** Klärschlamm Entsorgung: Eine Bestandsaufnahme. FiW Verlag, Aachen.
- PINNEKAMP, J.; KEYSERS, C.; MONTAG, D. (2008):** Studie zur Zukunft der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung bundesweit und in NRW, Aachen.
- PINNEKAMP, J.; BEIER, S.; CRAMER, C.; SCHRÖDER, H. FR.; MAUER, C.; SELKE D. (2009):** Eliminierung von Spurenstoffen aus Krankenhausabwasser mit Membrantechnik und weitergehenden Behandlungsverfahren – Pilotprojekt Kreiskrankenhaus Waldbröl (Abschlussbericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Förderkennzeichen IV – 9 – 042 1B4 0020), Aachen.

- ROEDIGER, H.; ROEDIGER, M.; KAPP, H. (1990):** Anaerobe alkalische Schlammfäulung. 4. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag.
- SCHMITZ, J. (2009):** Perspektiven der Mitverbrennung von Klärschlämmen. Vortrag anlässlich der 6. Klärschlammstage der DWA am 12. Mai 2009 in Fulda.
- SCHRÖDER, H. FR.; BEIER, S.; PINNEKAMP, J. (2009):** Klärschlämme aus der weitestgehenden Reinigung von Krankenhausabwässern. 42. ESSENER TAGUNG für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 18. - 20. März 2009, Band 216 der Schriftenreihe Gewässerschutz – Wasser – Abwasser. Hrsg. von J. Pinnekamp, Aachen 2009
- STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND (2009):** Klärschlamm Entsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung 2007. (abrufbar unter: <http://www.destatis.de/> Stand: 04.05.2009).
- TERNES, T.; BONERZ, M.; HERRMANN, N.; LÖFFLER, D.; KELLER, E.; BAGO LACIDA, B.; ALDER, A. C. (2005):** 213. Determination of pharmaceuticals, iodinated contrast media and musk fragrances in sludge by LC tandem MS and GC/MS. J. Chromatogr. A 1067, 213-223.
- VELTMANN, K. (2008):** Elimination von Arzneimitteln aus Krankenhausabwässern mit Membranverfahren. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft der RWTH Aachen (unveröffentlicht).
- WENDENBURG, H. (2009):** Aspekte der Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie in deutsches Abfallrecht. 42. ESSENER TAGUNG für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 18. - 20. März 2009, Band 216 der Schriftenreihe Gewässerschutz – Wasser – Abwasser. Hrsg. von J. Pinnekamp, Aachen 2009.
- WU, C. X.; SPONGBERG, A. L.; WITTER J. D. (2008):** Determination of the persistence of pharmaceuticals in biosolids using liquid-chromatography tandem mass spectrometry. Chemosphere, 73, 511-518.