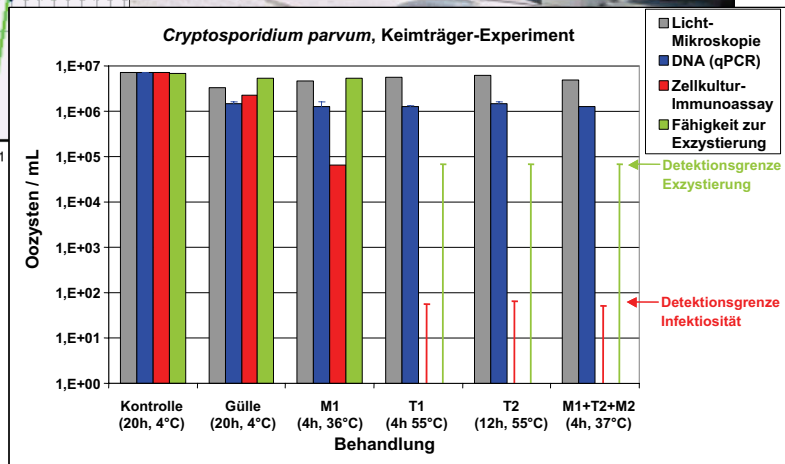
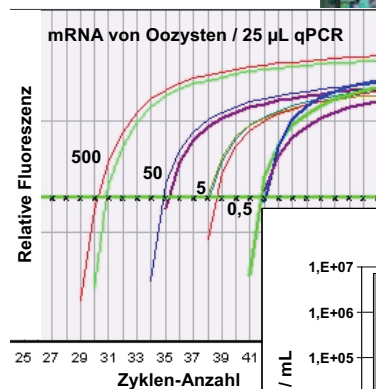




# LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

## Biogastechnologie für Hygiene und Umwelt in wasserwirtschaftlich sensiblen Gebieten



# LfL-Information

**Impressum:**

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)  
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan  
Internet: <http://www.LfL.bayern.de>

Redaktion: Institut für Landtechnik und Tierhaltung  
Vöttinger Str. 36, 85354 Freising-Weihenstephan  
E-Mail: [TierundTechnik@LfL.bayern.de](mailto:TierundTechnik@LfL.bayern.de)  
Tel.: 08161/71-3450

2. Auflage September / 2008

Druck: Lerchl Druck, 85354 Freising

© LfL



**Biogastechnologie  
für Hygiene und Umwelt  
in wasserwirtschaftlich sensiblen  
Gebieten**

**Dr. Michael Lebuhn  
Dipl.-Ing. M.Sc. Mathias Effenberger  
Dipl-Ing. (FH) Johannes Bachmaier  
Dr. Andreas Gronauer**



<b>Inhaltsverzeichnis</b>		Seite
<b>1</b>	<b>Einleitung, Hintergrund und Zielsetzung</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Material und Methoden</b> .....	<b>8</b>
2.1	Beschreibung der Untersuchungsobjekte.....	8
2.1.1	Pilot-Biogasanlage Berbling und Modellanlage .....	8
2.2	Boden-Beprobung .....	10
2.3	Mikrobiologische und molekularbiologische (qPCR, RTqPCR) Untersuchungen .....	10
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>11</b>
3.1	Eignung molekularbiologischer Methoden zum Nachweis von Hygienisierung.....	11
3.2	Hygienisierungsleistung der Pilot-Biogasanlage Berbling .....	12
3.3	Bodenproben .....	13
3.4	Reduktion klimarelevanter Ausgasungen .....	14
3.5	Wirtschaftlichkeit.....	15
<b>4</b>	<b>Zusammenfassende Diskussion</b> .....	<b>17</b>
4.1	Mikrobiologische Methodik.....	17
4.2	Hygienisierungsleistung der Pilot-Biogasanlage Berbling .....	17
4.3	Wirkungen im Boden .....	18
4.4	Wirtschaftlichkeit.....	18
4.5	Beitrag zum Klima- und Gewässerschutz.....	18
<b>5</b>	<b>Empfehlungen für eine Umsetzung in die Praxis</b> .....	<b>19</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>21</b>

## 1 Einleitung, Hintergrund und Zielsetzung

Um in Zukunft die Versorgung der Bevölkerung mit hygienisch unbedenklichem und schadstofffreiem Trinkwasser gewährleisten zu können, werden auch in Bayern (Umsetzung der Beschlüsse des Rio-Gipfels in der Bayern-Agenda 21) geänderte Anforderungen an den Bereich des Gewässerschutzes gestellt. 3,2 % (zukünftig 5 %) der Landesfläche von Bayern sind als Wasserschutzgebiete ausgewiesen, wovon 32 % als Acker- und 23 % als Grünland landwirtschaftlich genutzt werden. Mit der vorhandenen Tierhaltung fallen Wirtschaftsdünger an, die im Sinne der Kreislaufwirtschaft auf den Futterbauflächen nachhaltig durch Düngung verwertet werden sollen. Hieraus ergibt sich ein Spannungsfeld zwischen Land- und Wasserwirtschaft. Im Zusammenhang mit der Erweiterung der Wasserschutzgebiete kann dies zu Konflikten mit landwirtschaftlichen Interessen führen, z.B. wenn aktuell landwirtschaftlich genutzte Fläche der engeren Schutzzone (Zone II) von Wasserschutzgebieten zugeordnet wird. Besonders problematisch kann die Situation für bio-/ökologisch produzierende tierhaltende Betriebe werden, die ja nicht auf Mineraldünger zurückgreifen können. Für betroffene Betriebe kann ein Ausbringungsverbot ökonomische Einbußen und auch eine Wertminderung der Grundstücke zur Folge haben. Es kann auch zu Zielkonflikten mit der DüV kommen, und es werden bestehende Nährstoffkreisläufe unterbrochen. Für die Wasserwirtschaft bedeutet dies einen erhöhten Überwachungsaufwand, eventuell steigende Ausgleichszahlungen und einen Akzeptanzverlust bei den betroffenen Landwirten.

Zum Schutz des Trinkwassers ist in Bayern in der Wasserschutzzone II die Ausbringung von Wirtschaftsdünger verboten. Hintergrund ist, dass die Landwirtschaft als diffuse Quelle vor allem für die Grundbelastung eines Wassereinzugsgebietes mit pathogenen Mikroorganismen (wie auch mit Nähr- und Schadstoffen) verantwortlich gemacht wird. In diesem Zusammenhang sind auch die Zielsetzungen der Wasserrahmenrichtlinie zu sehen, Belastungen z.B. von Badegewässern durch diffuse Quellen aus der Landwirtschaft zu minimieren. Solche Belastungen entstehen vor allem bei der Ausbringung der Wirtschaftsdünger. Dabei kann der Zustrom über Abschwemmung, Drän- oder Sickerwässer erfolgen (WEIß und POPP, 2004) oder durch schnelle Perkolation z.B. im Karst. Da viele Infektionen von landwirtschaftlichen Nutztieren mit Beteiligung des Verdauungstrakts verlaufen, stellen Ausscheidungen der Tiere (Stallmist, Jauche, Flüssigmist / Gülle) ein potentiell Reservoir für die Ausbreitung von Seuchen- und Krankheitserregern dar. Eine Quantifizierung des tatsächlichen Eintrags von Krankheitserregern kann allerdings im Einzelfall sehr schwierig sein.

Mit der Erweiterung des Wasserschutzgebietes für die Wassergewinnungsanlagen der Stadtwerke Rosenheim, Bad Aibling und der Stadt Kolbermoor entsteht eine solche Konfliktsituation. Zur Zeit ist das Wasserschutzgebiet (noch) in die Zonen I, IIa, IIb, IIIa und IIIb untergliedert. Bis zur Neufassung der Schutzgebietsverordnung ist die Ausbringung unbehandelter Wirtschaftsdünger in der Zone IIb (noch) erlaubt. Als Voraussetzung für eine Lockerung des Ausbringungsverbots in Einzelfällen wird von den zuständigen Behörden eine präventive Behandlung der Wirtschaftsdünger angeführt, die eventuell vorhandene pathogene Organismen so weit reduziert, dass für das Trinkwasser keine Gefährdung zu erwarten ist. Daher sollte wissenschaftlich insbesondere untersucht werden, ob in der Praxis durch thermophile (55°C) Behandlung in einer Biogasanlage im Gärrest seuchenhygienische Unbedenklichkeit erreicht werden kann. Wenn dies der Fall ist, könnte die Ausbringung thermophil behandelter Wirtschaftsdünger eine Alternative sein, die einerseits den betroffenen Landwirten einen Ausweg bietet und andererseits eine wesentliche Verbesserung der hygienischen Situation vor Ort darstellen würde. Dies könnte im Weiteren den Landratsämtern auch die Möglichkeit geben, Ausnahmegenehmigungen für die Zone II zu erteilen.

Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen eines Verbundprojekts der Stadtwerke Rosenheim GmbH & Co. KG (StwRo), des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung (vormals Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik) der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL-ILT, Förderung durch das StMLF) und des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft (vormals Wassergüte- und Abfallwirtschaft) der Technischen Universität München (TUM-SWW, Förderung durch das StMUGV, vormals StMLU). Die Studie wurde im Zeitraum 2002 – 2005 durchgeführt. Die StwRo koordinierten das Vorhaben, die wissenschaftliche Bearbeitung erfolgte in einem gemeinsamen Ansatz des LfL-ILT (Betrieb und Optimierung der Biogasanlage) und des TUM-SWW (Mikrobiologie). Es sollte u.a. der Kenntnisstand über Verfahrenskenndaten, Kostenstruktur, logistische Notwendigkeiten, Energieausbeute und Nutzungseffizienz aber vor allem über Auswirkungen auf die Umwelt einer hinsichtlich hygienischer Parameter zu optimierenden landwirtschaftlichen Biogasanlage in der Praxis deutlich erweitert werden. Die zentralen Fragestellungen im Bereich Mikrobiologie – Hygiene waren folgende:

- Wie zuverlässig ist die keimabtötenden Behandlung von Wirtschaftsdünger im Routinebetrieb einer landwirtschaftlichen Biogasanlage? Hier gab es bisher kaum Erfahrungen.
- Wie ist die Reduktion wichtiger, auch widerstandsfähiger Krankheitserreger und Fäkal-Indikatorkeime bei mesophiler (ca. 37°C) und thermophiler (hier gesichert 55°C) Behandlung, und welche Verweilzeiten sind für eine seuchenhygienische Unbedenklichkeit des Gärrests einzuhalten? Dabei wurde besonderer Wert darauf gelegt, das Verhalten im Flüssigmist (Gülle) enthaltener (nicht von artifiziell zugesetzten) Mikroorganismen zu untersuchen. Besondere Beachtung fand auch das Verhalten infektiöser Kryptosporidien-Parasiten (Erreger u.a. des Kälberdurchfalls).
- Wie hilfreich sind mit molekularbiologischen Methoden erzielte Ergebnisse zur Beurteilung der Wirksamkeit eines hygienisierenden Eingriffs?
- Findet im (abgeschlossenen) Endlager eine Rückverkeimung statt, und ändert sich die hygienische Situation durch Ausbringung des Gärrests im Boden?
- Wie ist die Keimverlagerung in verschiedenen Böden, und wie sind die Ausgasungen über Gärrest gegenüber Flüssigmist zu beurteilen?

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde die 3-gliedrige Pilot-Biogasanlage Berbling erbaut. An dieser sowie an einer vom LfL-ILT konstruierten, maßstäblich 1:6 verkleinerten Modellanlage wurden die Untersuchungen durchgeführt. Die einzelnen Abschlussberichte (EFFENBERGER ET AL., 2006; HENKELMANN, 2006; LEBUHN UND WILDERER, 2006) wurden in einem gemeinsamen Abschlussband detailliert veröffentlicht (LfL, 2006). In der vorliegenden LfL-Information sind vor allem die mikrobiologisch-hygienischen Ergebnisse zusammengefasst. Empfehlungen, die den Ergebnissen zufolge in Ausnahmesituationen eine Ausbringung thermophil behandelten Gärrests ohne Beeinträchtigung der hygienischen Situation in wasserwirtschaftlich sensiblen Gebieten wie der Wasserschutzzone II erlauben könnten, werden vorgestellt.

## 2 Material und Methoden

In dieser Informations-Broschüre wurde der Schwerpunkt auf die Bereiche Mikro-/Molekularbiologie und Hygiene gelegt. Detaillierte Angaben zu Anlagenbetrieb, verfahrenstechnischen Untersuchungen, Lysimeterstudien und Gasuntersuchungen finden sich bei EF-FENBERGER ET AL., 2006 und HENKELMANN, 2006.

### 2.1 Beschreibung der Untersuchungsobjekte

Die Untersuchungen gliedern sich im Wesentlichen in zwei Bereiche auf:

- Bestimmung der Hygienisierungsleistung einzelner Fermenter, der Fermenterkette incl. Endlager und der Wiederverkeimung v.a. im Endlager sowie
- Vergleichende Erfassung von Wiederverkeimung im Boden nach Ausbringung von Flüssigmist bzw. Gärrest.

#### 2.1.1 Pilot-Biogasanlage Berbling und Modellanlage

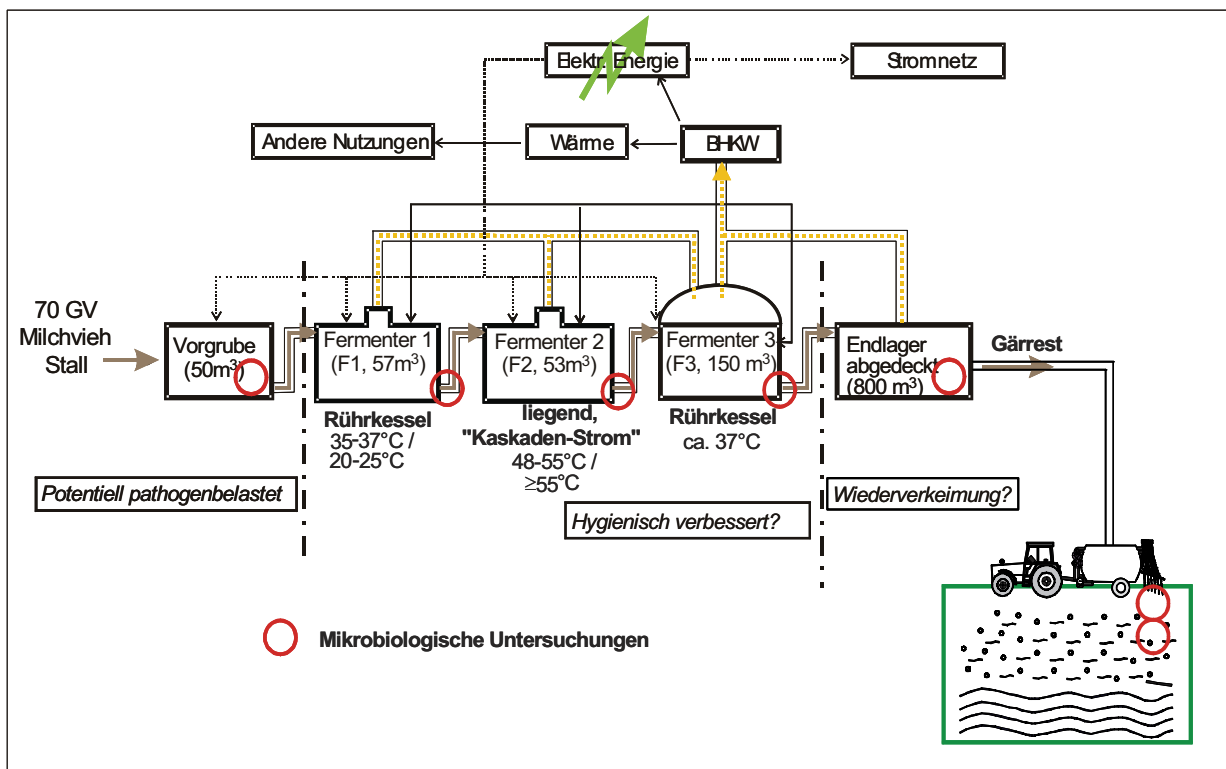


Abbildung 1: Schema der Biogasanlage Berbling mit Probennahmepunkten

Die meisten der mikrobiologischen Fragestellungen konnten anhand der Berblinger Pilotanlage (Abb. 1) gelöst werden. Die Untersuchungen zur Desaktivierung von Kryptosporidien ließen sich besser in einer Modellanlage (s.u.) untersuchen.

Die Berblinger Anlage wurde ausschließlich mit Rinderflüssigmist von gesundem Milchvieh beschickt. Verfüttert wurde ganzjährig eine TMR aus Grassilage, Heu, Getreide und Mineralmischung. Die Flüssigmist (Inhalt der Vorgrube) beinhaltete Strohmehl sowie das gesamte, im Stall anfallende Abwasser von Melkstand, Milchküchen und Waschraum. Der



Betreiber war verpflichtet, Tiererkrankungen und Gegenmaßnahmen zu melden. Es wurden keine Krankheiten gemeldet.

Zusätzlich zum Monitoring-Programm mit Entnahme von Zufalls-Stichproben wurden Chargenversuche in der Berblinger Pilotanlage durchgeführt. Dabei wurde versucht, eine Flüssigmist-Charge ausgehend vom Vorgruben-Material jeweils nach den mittleren hydraulischen Verweilzeiten in den Fermentern (Tab. 1) zu verfolgen, um die relativ hohen Schwankungen der Keimzahlen im Ausgangsmaterial zu eliminieren und dadurch die Hygienisierungsleistung besser zu charakterisieren.

Tabelle 1: Gesicherte minimale Verweilzeit und mittlere hydraulische Verweilzeiten in den Fermentern

<b>gesicherte min. Verweilzeit (h)</b>	<b>F1 (mesophil)</b>	<b>F2 (thermophil)</b>	<b>F3 (mesophil)</b>
stündl. Beschickung	1	9*	1
4-stündl. Beschickung	4	8 - 9*	4
<b>mittl. hydraulische Verweilzeit (d)</b>			
stündl. Beschickung	9,3	8,4	27,7
4-stündl. Beschickung	9,2	8,4	27,8

\* Aus Tracerstudien (EFFENBERGER ET AL., 2006); Hauptfracht (Peak) des Li<sup>+</sup> erschien nach 48 h.

Im thermophilen Fermenter (F2) der Pilotanlage Berbling konnte die angestrebte Betriebstemperatur von 55°C erst nach Umbauten (Ende 2003 beendet) konstant gehalten werden. Davor kam es immer wieder zu Ausfällen des BHKWs und der Beschickung mit Absenkung der Temperatur auf z.T. bis 48°C im F2. Anfang März 2005 wurde der mesophile Fermenter F1 auf psychophilen Betrieb bei 20 – 25°C umgestellt. Hierdurch sollte die Effektivität des zuvor dem thermophilen F2 vorgeschalteten mesophilen F1 hinsichtlich Keimreduzierung sowie der Einfluss des F1 auf den Gesamtprozess geprüft werden.

Zusätzlich zur Berblinger Pilotanlage wurde von LfL-ILT eine maßstäblich 1:6 reduzierte Modell-Biogasanlage (ohne Endlager) konstruiert und an TUM-SWW analog zur Berblinger Pilotanlage mit Flüssigmist vom Berblinger Betrieb beschickt. Sie diente v.a. zur Bearbeitung folgender Fragestellungen:

- Bestimmung der Inaktivierung von *Cryptosporidium parvum* Oozysten mit Hilfe von Diffusions-Keimträgern (sowie Wasserbad-Experimenten, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Parasitologie, Leipzig, IPL),
- Überprüfung der Hygienisierungsleistung der Pilotanlage anhand von Monitoring-Ergebnissen der Modellanlage mit Evaluierung von Up- bzw. Downscaling-Effekten,
- Bestimmung wahrscheinlicher hydraulischer Verweilzeiten (Tab. 1) von Bakterien in den einzelnen Kompartimenten anhand von Tracerstudien.

Die Betriebstemperatur des thermophilen Fermenters der Modellanlage konnte immer konstant bei 55°C gehalten werden.

Details zur Probenahme und –aufbereitung finden sich bei LEBUHN UND WILDERER (2006).

## 2.2 Boden-Beprobung

Von 4 verschiedenen gegüllten bzw. Gärrest-gedüngten ( $12 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  und Schnitt) Standorten unter Grünland wurden über 3 Jahre Bodenproben bis zu 1 m Tiefe gezogen und lagenweise unterteilt mikrobiologisch untersucht. Als Vergleiche dienten Proben aus der Schutzzone I, von unterschiedlichen Lysimetern und von anderen bayerischen Grünlandstandorten (LEBUHN UND WILDERER, 2006).

Die Berblingler Standorte waren relativ einheitlich im Profilaufbau und der Horizontierung (Parabraunerde-Pseudogley). Einem etwa 15 – 20 cm mächtigen  $A_h$ - folgte ein 20 – 25 cm starker  $A_h B_v$ -Horizont. Darunter befand sich ein typisches, etwa 20 – 40 cm mächtiges, kompaktes Schlufflehmband. Darunter, im Bereich 80 – 100 cm Bodentiefe, stieß das Ausgangssubstrat Geschiebemergel an.

Details zur Probenahme und -aufbereitung finden sich bei LEBUHN UND WILDERER (2006).

## 2.3 Mikrobiologische und molekularbiologische (qPCR, RTqPCR) Untersuchungen

Im Rahmen der mikrobiologischen Untersuchungen wurde in den einzelnen Kompartimenten (Vorgrube, F1-F3, Endlager (nur Berbling)) eine Reihe von relevanten Krankheitserregern und Fäkalindikatoren quantifiziert (Fäkalcoliforme, Coliforme, Gesamt- und intestinale Enterokokken, *Yersinia enterocolitica*, thermophile *Campylobacter*; *Bacillus-cereus*-Gruppe, *Clostridium perfringens*; *Cryptosporidium parvum/hominis* (Gesamtzahl, Infektiosität), *Enterovirus* sp., *Norovirus* sp., Rotaviren). Neben den Lebendkeimzahlen (KBE: Koloniebildende Einheiten, MPN: Most probable number) bzw. Aktivitätsparametern (für *C. parvum/hominis*) wurde die Anzahl der jeweils entsprechenden spezifischen Genome molekularbiologisch über Quantitative Real-Time PCR (qPCR, für DNA; RTqPCR, für RNA) ermittelt. Detaillierte Angaben zur mikro- und molekularbiologischen Analytik finden sich in LEBUHN und WILDERER (2006).

Um die Möglichkeit einer Überschätzung lebender Zellen durch falsch-positiven qPCR-Nachweis abgetöteter Zellen (LEBUHN UND GARCÉS, 2007) zu evaluieren, wurde der qPCR exemplarisch für ausgewählte Krankheitserreger eine selektive Anreicherung vorgeschaltet und die Quantifizierung über MPN-Analysen vorgenommen.

Zur Bestimmung der Inaktivierung von *Cryptosporidium parvum/hominis* Oozysten wurden Diffusions-Keimträger (Vol. 3 mL;  $0,4 \mu\text{m}$  Membranfilter) in die Fermenter eingebracht. Der Inhalt bestand aus definierten Mengen von *C. parvum* Oozysten vermischt mit Material jeweils aus den Kompartimenten der Modellanlage (Vorgrube, F1, F2, F3). Damit konnten hohe Oozysten-Konzentrationen direkt den jeweiligen chemischen und physikalischen Einflüssen definiert ausgesetzt und praktisch verlustfrei wiedergewonnen werden. Die Infektiosität der Oozysten wurde mit einem durch das Institut für Parasitologie Leipzig (IPL) entwickelten Immunfluoreszenz- bzw. qPCR-Nachweis an einer humanen Zellkultur (HCT-8) quantitativ ermittelt. Parallel dazu wurde die Fähigkeit zur Exzystierung sowie die Membranintegrität (Vitalfärbung) bestimmt. Zur Absicherung der Ergebnisse der Keimträgerversuche wurden durch das IPL entsprechende Wasserbad-Experimente mit reinen Oozysten-Suspensionen durchgeführt.

### **3 Ergebnisse**

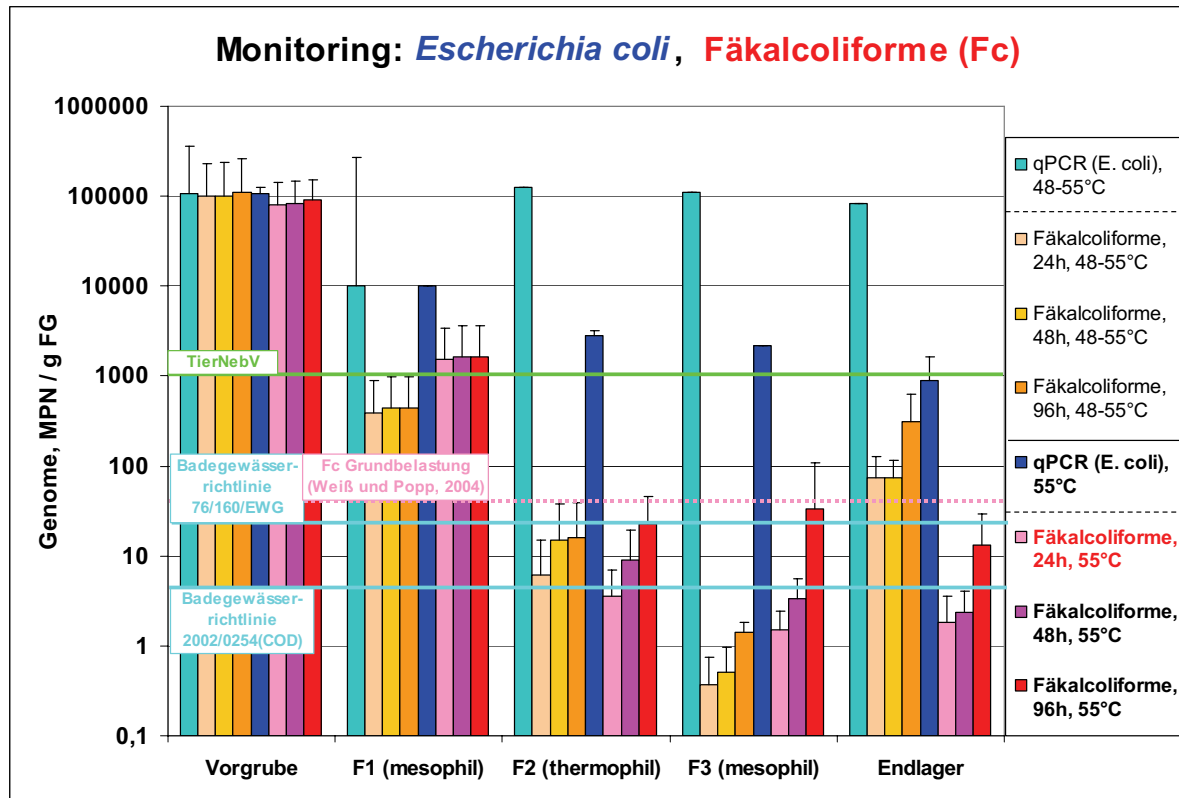
#### **3.1 Eignung molekularbiologischer Methoden zum Nachweis von Hygienisierung**

Die Anzahl der Zielorganismen ließ sich über qPCR in Verbindung mit einer optimierten Nukleinsäure-Extraktion sehr genau und spezifisch bestimmen (Abb. 2). Die Methode ist damit hervorragend zu einem schnellen Screening von Umweltproben im Hochdurchsatz geeignet. Allerdings werden dabei – dies gilt gleichermaßen für die Fluoresz-in-situ-Hybridisierung und serologische Methoden - auch die durch die Behandlung abgetöteten Zielorganismen teilweise erfasst (Abb. 2, LEBUHN UND GARCÉS, 2007).

Wenn allerdings der qPCR ein selektiver Anreicherungsschritt vorgeschaltet wurde, konnten über MPN-Analyse lebensfähige Einheiten kultivierbarer Organismen (z.B. thermophile *Campylobacter*, *Y. enterocolitica*, LEBUHN UND WILDERER, 2006) bestimmt werden. Die Inkubation mit einer Human-Zellkultur gestattete die Quantifizierung infektiöser Kryptosporidien über qPCR oder Immunfluoreszenz (LEBUHN UND WILDERER, 2006). Vorschaltung einer Reversen Transkription (RT) ermöglicht die Bestimmung lebensfähiger Einheiten über Messung der Induzierbarkeit der Bildung von Boten-RNA (mRNA) (GARCÉS ET AL., 2006).

### 3.2 Hygienisierungsleistung der Pilot-Biogasanlage Berbling

Nach Durchgang durch den mesophilen F1 zeigten die untersuchten Organismen eine zwar deutliche, aber für die Zielsetzung nicht ausreichende Reduktion. Fäkalcoliforme (im Wesentlichen *E. coli*) wurden z.B. nur um etwa 2 log-Stufen (99 %) reduziert (Abb. 2).



24h, 48h, 96h: Inkubationszeit in Fluorocult®; 48-55°C: Probenahmen vor Mitte Februar 2004; 55°C: Probenahmen nach Mitte Februar 2004. Zur Erleichterung der Interpretation sind relevante Richtlinien und Belastungsniveaus eingetragen.

Abbildung 2: *E. coli* (Genome) und Fäkalcoliforme, Pilotanlage Berbling, Monitoring

Nach dem thermophilen F2 betrug die Reduktion dagegen 4-5 log-Stufen (Reduktion um 99,99 – 99,999 %). Der Gärrest erreichte für Fäkalcoliforme (sowie Coliforme) Badegewässerqualität. Eine Rückverkeimung im (abgeschlossenen) Endlager war nur bei suboptimaler Temperaturführung (48-55°C) im F2 erkennbar (Abb. 2). Entscheidend für sehr gute Hygienisierung im Gärrest ohne Rückverkeimung war also der Betrieb des F2 bei  $\geq 55^\circ\text{C}$ .

Die aus früheren Untersuchungen ermittelten Daten zur Vitalität der als sehr resistent beschriebenen *C. parvum* Oozysten überschätzen deren Infektiosität nach thermophiler Behandlung deutlich (Tab. 2). Aus den Wasserbadexperimenten ergab sich bei 55°C die gleiche Reduktion auch ohne vorgeschaltete mesophile Behandlung. Bereits nach 1 h 55°C betrug die Abnahme mehr als 5 log-Stufen, was nach Empfehlung der WHO (2004) bei Weitem zur Aufbereitung von Trink- aus Rohwasser ausreicht. Durch mesophile Behandlung bzw. Vergärung wurde auch bei langer Einwirkzeit keine bzw. eine nur geringe Reduktion der Infektiosität erreicht. Andere Krankheitserreger waren in den untersuchten Proben nicht oder nur in sehr geringen Konzentrationen nachweisbar (Tab. 2).

Als Hygienisierungs-Indikator eigneten sich die intestinalen Enterokokken am besten, da sie außer den getesteten bakteriellen Sporenbildnern (*C. perfringens*, *B. cereus*), die weder zu- noch abnahmen, alle relevanten mikrobiellen Parameter abdeckten (Tab. 2). Dabei waren

auch alle relevanten viralen Tierseuchenerreger thermophil empfindlicher als die intestinalen Enterokokken (HOFERER, 2001). Allerdings reicht die Konzentration intestinaler Enterokokken in Rinderflüssigmist typischerweise nicht, um die aus wissenschaftlicher Sicht erwünschte Reduktion um 4 log-Stufen direkt aus dem Substrat zu demonstrieren (LEBUHN und WILDERER, 2006). Der Nachweis kann aber über Keimträgerexperimente (ggf, Einlegeproben) erfolgen.

Tabelle 2: Zusammenstellung und Bewertung der Reduktion mikrobieller Parameter bei thermophiler Behandlung

Parameter	Reduktion ( <sup>10</sup> log) Berbling (8-9h 55°C)	T <sub>99,99</sub> (h) thermophil Berbling / Literatur	Bewertung
Fäkalcoliforme	4,8 - 6,0 < Badegew.-Richtlinie	0,12 (- 1,6?)	●
<i>Enterovirus sp.</i>	nicht nachweisbar	0,12 - 0,36	●
thermophile <i>Campylobacter</i>	> 1 (3 → <0,3 KBE / mL)	0,04 - 0,15	●
<i>Yersinia enterocolitica</i>	> 2 (100 → <1 KBE / mL)	0,27 (- 2,04?)	●
Rotaviren	nicht nachweisbar	0,48 - 1,2	●
<i>Norovirus</i> (Gg1+2)	nicht nachweisbar	(ca. 4?)	●
Coliforme / <i>S. marcescens</i>	3,5 – 5,6 ≤ Badegew.-Richtlinie	0,52	●
<i>Cryptosporidium parvum</i>	> 5*	< 0,8 [ <del>8,9 (- 121,3)]</del>	●
intestinale Enterokokken	> 2,5 – 3,0	4 - 6,8 (1. Phase)	●
<i>Bacillus cereus</i>	0	3298 - 400000	●
<i>Clostridium perfringens</i>	0 - -0,5	10629 - 400000	●
<b>MGRT: &gt; 4 h (8 – 9 h) bei ≥ 55°C</b>			

\* Im Keimträgerexperiment in der Modellanlage. T<sub>99,99</sub> (h): Zeit (h) zur Reduktion um 4<sup>10</sup>log-Stufen. MGRT: Minimale gesicherte Verweilzeit.

Obwohl die Sporenbildner *B. cereus* und *C. perfringens* durch thermophile Behandlung nicht beeinflusst wurden, werden sie wegen ihrer geringen Konzentrationen (10<sup>3</sup> – 10<sup>4</sup> bzw. 10<sup>2</sup> – 10<sup>3</sup> KBE·mL<sup>-1</sup>) in den untersuchten Proben als unbedenklich eingestuft. Sie kommen ubiquitär z.B. im Boden vor, in hohen Konzentrationen aber wohl nur in verwesenden Tieren und Fleischfresserkot (LEBUHN und WILDERER, 2006). Sie werden allenfalls durch Dampfdrucksterilisation abgetötet, was aber Landwirten im Hinblick auf die Wirtschaftsdüngerbehandlung nicht zuzumuten wäre.

### 3.3 Bodenproben

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Bodenproben sind wegen der Kürze des Beobachtungszeitraums (3 Jahre) und der teilweise hohen Variabilität im Boden als vorläufig zu betrachten. Für eine gesicherte Aussage sind längerfristige Untersuchungen nötig.

Es konnten keine eindeutig negativen Effekte der Gärrest-Ausbringung im Boden festgestellt werden. Die Gehalte der untersuchten Parameter in der Gärrest-gedüngten Parzelle waren nicht oder nur geringfügig von denen im Boden der Fassungsbereich des Wasser-

schutzgebiets (WZ I) Willinger Au verschieden. *C. perfringens* fand sich in z.T. erheblichen Konzentrationen selbst noch in 1 m Tiefe im Boden der Berblinger Standorte, während im Boden eines lange unbehandelten Lysimeters an der Sohle (40 - 50 cm Bodentiefe) nur noch 23 KBE *C. perfringens*  $\cdot (\text{g TB})^{-1}$  festgestellt wurden. Ähnliches wurde für die intestinalen Enterokokken beobachtet und wird auch für Vertreter der *B. cereus*-Gruppe (BcG) diskutiert. Wahrscheinlich ermöglichten Wühlmausgänge bzw. Schwundrisse im Lehmband in den Berblinger Böden (beides nicht im Lysimeterboden vorhanden) einen schnellen Transport in die Tiefe. Möglich ist auch ein lateraler Zustrom von *C. perfringens* von benachbarten Standorten, da der Organismus extrem persistent in der Umwelt ist.

Geringfügig oder kleinräumig höhere Gehalte intestinaler Enterokokken, BcG-Vertreter und *C. perfringens* schienen also eher auf den Besatz mit Bodentieren bzw. deren Exkremente als auf die Düngung zurückzuführen zu sein. Allerdings ergaben sich in einzelnen Fällen Hinweise, dass es nach Flüssigmist-Düngung zu einer Anreicherung mit diesen Organismen im Boden kommen kann.

### 3.4 Reduktion klimarelevanter Ausgasungen

Die vergleichenden Untersuchungen zu Ausgasungen über Flüssigmist- und Gärrestgedüngten Flächen (sowie die Lysimeterstudien) wurden in einem Unterauftrag durch das Institut für Agrarökologie durchgeführt und sind in einem eigenen Abschlussbericht ausführlich dargestellt (HENKELMANN, 2006).

Für die Gärrest-gedüngten Flächen ergab sich eine fast 50 %ige Reduktion der Methanemissionen, während Kohlendioxid sogar um 65 % weniger emittiert wurde. Daraus ergibt sich ein großes Potenzial, über Düngung mit Gärrest die Freisetzung klimarelevanter Gase zu verringern. Auch Emissionen von Methyl- und Sauerstoffgruppen waren deutlich reduziert, was auf geringere Ausgasungen flüchtiger, geruchsbelästigender Fettsäuren hinweist. Stickoxide wurden nicht freigesetzt. Bei unsachgemäßer Düngung besteht zwar potentiell das Risiko etwas erhöhter Ammoniak-Freisetzung, allerdings wird der Ammonium-Stickstoff bei sachgemäßer Schleppschlauch-/Schleppschuhdüngung fast verlustfrei in den Boden eingebracht. Allgemein wird dem Gärrest gegenüber Flüssigmist u.a. wegen seiner geringeren Viskosität eine bessere Düngewirkung zugeschrieben.

Für die Bilanzierung der klimarelevanten Prozesse bei der Biogastechnologie stehen der Vermeidung von Treibhausgasen durch die Bereitstellung von elektrischer Energie und die Lagerung des Gärrestes im abgedeckten Endlager die Errichtung der Biogasanlage, der Methanschluß im Blockheizkraftwerk und der Einsatz von fossilen Betriebsenergien gegenüber. Insgesamt ergab sich für die Pilot-Biogasanlage Berbling eine positive Bilanz von jährlich 42 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, die vor allem auch durch eine Erniedrigung des kumulierten Energieaufwands (KEA) der Nutzung verbessert werden könnte (EFFENBERGER ET AL., 2006). Prognostiziert für eine 550 GV-Biogasanlage zur Behandlung der Milchviehflüssigmist der gesamten engeren Schutzzone des betrachteten Trinkwassergewinnungsgebietes ergab sich eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz von jährlich 376 t vermiedenen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten.

In Bayern betragen nach einer Schätzung die Methan-Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdüngern, bei der u.a. klimaschädliches Methan freigesetzt wird, umgerechnet etwa 1,6 Millionen Tonnen Kohlendioxidäquivalente (KTBL, 2005). Könnte die Hälfte der Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft einer Verwertung in einer Biogasanlage zugeführt werden, würde die Emission von 0,8 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalenten vermieden werden (Tab. 3).

Tabelle 3: Vermeidungspotenzial von Methanemissionen bei Verwertung von Wirtschaftsdüngern in einer Biogasanlage

Tierart und Haltungs- form	Anzahl in Bayern	Methan- Bildungs- Potential	pot. Methan- bildung	Me- than- Konv.- faktor	Gesamt
		kg*(T.*a) <sup>-1</sup>	kg (abs.)		kg (abs.)
<b>Milchkühe</b>					
Flüssigmist	994.322	345		0,15	51.456.181
Festmist	176.966	345	61.053.429	0,015	915.801
Weidehaltg.	101.851	345		0,015	527.080
<b>Sonst. Kühe</b>			343.041.207		
Flüssigmist	293.195	162	47.497.563	0,15	7.124.635
Festmist	76.750	162	12.433.449	0,015	186.502
Weidehaltg.	182.211	162	29.518.260	0,015	442.774
<b>Kälber</b>					
Festmist	1.761.704	59	103.940.536	0,015	1.559.108
<b>Schweine</b>					
	3.711.000	32	118.752.000	0,05	5.937.600
<b>Geflügel</b>					
	7.912.257	2,4	18.989.417	0,1	1.898.942
<b>Summe</b>	15.210.257		770.364.525		70.048.622 kg Methan
				entspr.	1,61 10 <sup>6</sup> t CO <sub>2</sub> -Äqu.
				½ ist	0,81 10 <sup>6</sup> t CO <sub>2</sub> -Äqu.

### 3.5 Wirtschaftlichkeit

Verfahrenstechnische Kennwerte und Eckdaten zur Wirtschaftlichkeit der Pilot-Biogasanlage Berbling wurden vom LfL-ILT ermittelt und sind im Abschlussbericht von EFFENBERGER ET AL. (2006) ausführlich dargestellt.

Aus der mesophil-thermophil-mesophilen Vergärung von Milchviehflüssigmist in der Pilotanlage wurde eine relativ hohe Methanausbeute von 0,24 m<sup>3</sup>\*(kg oTM)<sup>-1</sup> erzielt. Dies ist angesichts des relativ hohen Abbaugrads und demzufolge geringen Energiegehalts von Rinderflüssigmist ein gutes Ergebnis. Die spezifische Methanproduktionsrate war mit 0,33-0,34 m<sup>3</sup>\*(m<sup>3</sup>\*d)<sup>-1</sup> aufgrund der seriellen Anordnung der Fermenter allerdings gering. Dabei wurde die zweite Stufe nicht so hoch belastet, wie dies für einen thermophilen Prozess anzustreben wäre. Durch Verzicht auf die auch für die hygienisierende Wirkung unnötige erste mesophile Stufe (F1, siehe 3.2) und einen Betrieb des Systems bei höherer Raumbelastung sollte die Abbaueffizienz gesteigert werden können. Vorläufige Ergebnisse deuten auf eine deutlich erhöhte Biogasproduktionsrate bei thermophil-mesophiler Betriebsweise hin.

Tabelle 4: Berechnung des Unternehmensgewinns für eine zentrale Biogasanlage für die Hygienisierung des Flüssigmists von 550 GV Milchvieh

<b>Fixkosten</b>				
Abschreibung	Bautechnik	20 Jahre	€/a	19.314
	Anlagentechnik	10 Jahre	€/a	25.752
	Zündstrahlmotor	4,5 Jahre	€/a	3.600
Zinsen	Anteil an Ges.-Investition	4,0 %	€/a	12.800
Versicherung	Anteil an Ges.-Investition	0,5 %	€/a	3.300
<b>Variable Kosten</b>				
Wartung, Reparaturen	Bautechnik	1 % d. Invest.	€/a	3.863
	Anlagentechnik	3 % d. Invest.	€/a	7.726
	Zündstrahlmotor	0,4 Ct/kWh <sub>el</sub>	€/a	2.119
Zündölkosten	16.557 L/a	0,4 €/L	€/a	6.623
Strom f. Anlagenbetrieb	21.193 kWh/Jahr	0,13 €/kWh	€/a	2.755
<b>Arbeitskosten</b>				
	600 h/a	15 €/h	€/a	9.000
<b>Kosten für Gülletransport zur Biogasanlage und Ausbringung</b>				
Transport	11.000 t/a à	1,29 €/m <sup>3</sup>	€/a	14.188
Ausbringung	11.000 t/a à	1,86 €/m <sup>3</sup>	€/a	20.462
<b>Jährliche Gesamtkosten</b>				
ohne Ausbringkosten			€/a	111.039
mit Ausbringkosten			€/a	131.502
<b>Jährliche Gesamteinnahmen</b>				
			€/a	90.919
<b>Unternehmensgewinn</b>				
ohne Ausbringkosten			€/a	<b>-20.120</b>
mit Ausbringkosten			€/a	<b>-40.583</b>

Eine sinnvolle Wirtschaftlichkeitsprognose lässt sich anhand der Daten der für Forschungszwecke aufwändig konzipierten Pilot-Biogasanlage nicht berechnen. Ein mögliches Modell für die Praxis bestünde darin, dass der Wasserversorger eine zentrale Biogasanlage betreibt, in der die gesamte in der engeren Wasserschutzgebietszone anfallende Flüssigmist behandelt wird. Da offenbar ein zum dreistufigen Betrieb vergleichbarer Gasertrag (und Hygienisierungseffekt) auch mit einer zweistufigen thermophil-mesophilen Behandlung erreicht werden kann, wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine solche zentrale Biogasanlage mit zwei Fermentern für die Behandlung der äquivalenten Menge an Milchvieh Flüssigmist von 550 GV durchgeführt. Die geringe Energiedichte und der hohe Wassergehalt der Flüssigmist bedingen vergleichsweise hohe spezifische Investitionskosten, so dass die Aufwendungen für den Bau und Betrieb der Biogasanlage die Einnahmen aus dem Stromverkauf übersteigen. Die aufgeschlüsselte Berechnung des Unternehmensgewinns ist in Tabelle 4 dargestellt.

Aus dem jährlichen Defizit von 40.600 EUR (inkl. Ausbringung) errechnen sich Behandlungskosten von 3,69 EUR pro m<sup>3</sup> Rinder-Flüssigmist. Würden diese Kosten vollständig auf



den Trinkwasserpreis im betroffenen Wasserversorgungsgebiet umgelegt, bedeutete dies ein Preissteigerung von ca. 0,8 EUR-cent pro m<sup>3</sup> oder 0,9 % des derzeitigen Preises.

Hierbei ist allerdings nicht berücksichtigt, dass es dem Betreiber offen steht, neben dem Wirtschaftsdünger zusätzlich nachwachsende Rohstoffe einzusetzen. Dadurch würden sich die Biogas- und Methanausbeute wesentlich erhöhen und damit die Behandlungskosten zur Hygienisierung der Wirtschaftsdünger reduzieren. Ergebnisse aus der Praxis weisen für eine solche Prozessführung sogar einen Gewinn aus.

## 4 Zusammenfassende Diskussion

### 4.1 Mikrobiologische Methodik

Es wurden klassische Kultivierung, Infektiositätstests für Kryptosporidien (neben anderen, weniger geeigneten Techniken) und quantitative Real-Time PCR (qPCR) mit direkter Extraktion von DNA aus den Proben (oder in Einzelfällen nach Voranreicherung) eingesetzt und verglichen.

Die qPCR erlaubt mit direkter DNA-Extraktion eine verlässliche Quantifizierung der Ziel-DNA in den Proben im Hochdurchsatz. Nach Abtötungsmaßnahmen wird aber die vitale Fraktion der Ziel-Organismen massiv um die tote Fraktion überschätzt, deren DNA offenbar nur langsam in den Fermentern und im Endlager abgebaut wird. Dagegen eignete sich MPN-qPCR nach (selektiver) Voranreicherung, über Kultivierung sonst nur schwierig und aufwändig zu bestimmende lebensfähige Pathogene zu quantifizieren. Hierzu hat auch die Messung der Induzierbarkeit spezifischer mRNA-Produktion ein hohes Potenzial.

Infektiositätstests (mit humaner HCT-8-Zelllinie) waren hervorragend geeignet, infektiöse Kryptosporidien-Oozysten in den Proben zu quantifizieren und übertrafen herkömmlich verwendete Techniken (Membranintegrität, Exzystierung) hinsichtlich Verlässlichkeit und Spanne des Analysebereichs (Inaktivierung > 5 log-Stufen) bei Weitem.

Die klassische (selektive) Kultivierung erwies sich als zuverlässig, auch wenn sich einzelne Methoden als verbesserungsbedürftig herausstellten und nach den Abtötungsmaßnahmen eine (eher unerhebliche) Unterschätzung um die Fraktion subletal geschädigter Zellen erkennbar war.

### 4.2 Hygienisierungsleistung der Pilot-Biogasanlage Berbling

Bei gesicherten 55°C und ca. 8,5 h Verweilzeit im thermophilen F2 der Berblinger Biogasanlage (sowie in der maßstäblich 1:6 verkleinerten Modellanlage) wurde in den folgenden Kompartimenten bezüglich Fäkalcoliformer und Coliformer Badegewässerqualität festgestellt. Bakterielle Sporenbildner (getestet *Bacillus cereus*-Gruppe, *Clostridium perfringens*) ausgenommen, werden alle relevanten Krankheitserreger bei diesen Bedingungen soweit reduziert, dass von Hygienisierung gesprochen werden kann. Der Prozess ist auch einer Pasteurisierung äquivalent. Die Sporenbildner nahmen aber auch nicht zu und fanden sich in vergleichsweise hoher Konzentration im Boden der Wasserschutzzone I. Vorausgesetzt dass das Substrat für den Biogasprozess keine Tierkadaver, keinen Fleischfresserkot und kein Geflügelkot enthält, sind sie als vernachlässigbar anzusehen.

Eine Wiederverkeimung im (abgeschlossenen) Endlager fand nur unter thermisch suboptimalen Bedingungen statt, bei gesicherten 55°C und mindestens 4 h Verweilzeit konnte keine Wiederverkeimung beobachtet werden.

Als Hygienisierungsindikator eignen sich die intestinalen Enterokokken am besten, da sie alle relevanten Krankheitserreger (mit Ausnahme der bakteriellen Sporenbildner) abdecken. Zur Dokumentation der Hygienisierung können sie wegen ihrer relativ geringen Konzentration in Rinder-Flüssigmist auch in Keimträgern oder Einlegeproben eingesetzt werden.

### **4.3 Wirkungen im Boden**

Eine Anreicherung von Krankheitserregern oder Indikatorkeimen im Gärrest-gedüngten Boden konnte nicht festgestellt werden. Zur Absicherung sind allerdings längerfristige Studien mit höherer Wiederholung wegen der kleinräumigen Heterogenität der Böden erforderlich. Gemessene Unterschiede waren wahrscheinlich auf Unterschiede im Tierbesatz zurückzuführen. Bezüglich der Feststellung der natürlichen Keimbelastung besteht hoher Forschungsbedarf.

### **4.4 Wirtschaftlichkeit**

Bei den hohen Anschaffungskosten für eine Biogasanlage und den relativ geringen möglichen Gasausbeuten aus reiner Rinder-Flüssigmist lässt sich bei dieser Betriebsweise kaum ein Gewinn erzielen. Beim substituierenden Einsatz für Flüssigmistdüngung in Wasserschutzgebieten würde der Aufpreis für das Trinkwasser dennoch kaum einen €-cent pro m<sup>3</sup> betragen.

Wirtschaftlich interessant wird eine Co-Vergärung mit nachwachsenden Rohstoffen, da dabei typischerweise ein wesentlich höherer Gasertrag erzielt wird.

### **4.5 Beitrag zum Klima- und Gewässerschutz**

Gärrest-gedüngte Flächen weisen gegenüber gegüllten Flächen wesentlich geringere Emissionen klimarelevanter und geruchsbelästigender Gase auf. Weitere Einsparungen – insbesondere gegenüber offenen Flüssigmistlagern - lassen sich auch durch abgedeckte Endlager (zusätzliche Verwertungsmöglichkeit von dort produziertem Biogas) erzielen.

Zur Verbesserung der Badegewässerqualität kann bereits die Ausbringung mesophil vergorenen Wirtschaftsdüngers im Zustrombereich wesentlich beitragen. Entsprechende Überlegungen sollten in der Landwirtschaft nicht nur angesichts zu erwartender gesetzlicher Novellierungen sondern auch im Hinblick auf eine Verringerung der diffusen Belastung durch die Tierhaltung vorausschauend stattfinden.

Die vorliegende Studie bestätigt, dass die Berblinger Biogasanlage bei optimaler Prozessführung (gesicherte 55°C im thermophilen Fermenter bei minimaler gesicherter Verweilzeit von > 4 h) in der Lage war, potentiell pathogene Keime (Bakterien, Parasiten, Viren) in Rinder-Flüssigmist in einem Maß abzutöten, dass der Gärrest hinsichtlich seiner hygienischer Qualität als sehr stark verbessert einzustufen war. Zum Einsatz der thermophilen Biogastechnologie mit Gärrest-Ausbringung in wasserwirtschaftlich sehr sensiblen Gebieten (z.B. Wasserschutzzone II) kann eine Betriebsweise bei gesicherten 55°C, > 4 h (besser 8 - 9 h) (oder eine adäquate Behandlung, z.B. Pasteurisierung) sehr gute Hygienisierung des Gärrests gewährleisten. Die in Kapitel 5 genannten Empfehlungen sollten Anwendung finden.

## 5 Empfehlungen für eine Umsetzung in die Praxis

Sauberes Trinkwasser ist sicher eines unserer wertvollsten Güter. Das soll auch in Zukunft so bleiben. Mit der Ausweitung der Wasserschutzgebiete sind allerdings für die betroffenen viehhaltenden Landwirte Probleme verbunden, die über intelligente und umweltfreundliche Technologien wie der Biogasproduktion gelöst werden könnten. Ist vorgesehen, Gärrest aus der Vergärung von Wirtschaftsdüngern in sehr sensiblen Bereichen, in denen der Eintrag von Krankheitserregern in das Grundwasser oder ein Oberflächenzufluss in das Fassungsgebiet der Trinkwassergewinnung verhindert werden muss, als Dünger auszubringen, muss die effiziente Hygienisierung des Substrats über Prozess- und Produktkontrollen dokumentiert werden. Trinkwasser darf nicht mit potentiell pathogenen Keimen infiziert und der Bodenfilter nicht über das natürliche Hintergrund-Niveau hinaus belastet werden.

Wo eine Ausbringung von unbehandelter Wirtschaftsdünger in wasserwirtschaftlich sehr sensiblen Gebieten (noch) praktiziert wird bzw. zulässig ist, z.B. in der engeren Schutzzone oder der weiteren Schutzzone im Karst, ist daher eine Ausbringung von Gärresten statt unbehandelter Wirtschaftsdünger sehr wünschenswert. Für möglichst optimale Hygienisierungsergebnisse, auch im Hinblick auf eine mögliche Auswaschung von nicht abgetöteten Mikroorganismen in das Grundwasser, sollten insbesondere folgende Prüfkriterien beachtet werden:

### A: Standortprüfung

- Die hydrogeologische Situation sollte einen direkten Kurzschluss zum Grundwasserstrom ausschließen. Auf Böden mit typischerweise ausreichender Überdeckung und Filtereigenschaft sollte die Gärrestapplikation differenziert geregelt werden. Gärrest sollte z.B. nicht auf einem tonreichen Boden nach längerer Trockenheit (Schwundrissbildung) ausgebracht werden.

### B: Anlagentechnik

- Das Verfahren sollte bei thermophil anaerober Vergärung eine minimale gesicherte Verweilzeit (MGRT) von  $> 4$  h bei gesicherten  $\geq 55^{\circ}\text{C}$  im thermophilen Fermenter beinhalten (um einen Toleranzspielraum freizuhalten wären 8 - 9 h MGRT oder eine höhere Temperatur wünschenswert), alternativ eine Pasteurisierung oder einen adäquaten Schritt. Kurzschlüsse während des Prozesses sind auszuschließen (in Rührkessel-Fermentern bestimmt das Beschickungs-Intervall die MGRT), nach der thermophilen (oder adäquaten) Hygienisierungs-Stufe muss Schwarz-Weiß-Trennung gegeben sein. Vorgeschlagene Technologien sollten im Rahmen einer Baumusterprüfung die Einhaltung der MGRT bei gesicherten  $\geq 55^{\circ}\text{C}$  nachweisen.

### C: Prozesskontrolle

- Die Prozesstemperatur von  $\geq 55^{\circ}\text{C}$  sollte im Betrieb online verfolgt und dokumentiert werden (indirekte Prozesskontrolle).
- Eine zumindest einmalig nach Inbetriebnahme (steady-state Betrieb) exemplarisch vorgenommene direkte Prozesskontrolle sollte die Reduktion intestinaler Enterokokken um  $> 4$   $^{10}\log$ -Stufen demonstrieren. Die Reduktion kann ggf. mit Hilfe in den Fermenterinhalt eingebrachter Keimträger mit  $10^6 - 10^7$  KBE *Enterococcus faecium*  $\cdot\text{mL}^{-1}$  nachgewiesen werden, wobei die für den Betrieb vorgesehene MGRT ( $> 4$  h) als Verweilzeit dient.

#### D: Substrat- und Endproduktkontrolle

- Substrat ist Rinder-Flüssigmist von gesundem Milchvieh, ggf. unbefallene nachwachsende pflanzliche Rohstoffe (in Mischung mit solcher Rinder-Flüssigmist). Andere Substrate oder Mischungen mit diesen sind vorher auf Eignung und Hygienisierung zu evaluieren.
- Nach Inbetriebnahme (steady-state Betrieb) sollte eine etwa 2 Wochen vor Ausbringung vorgenommene Produktprüfung (Endlagerprobe) dem Gärrest folgende Qualitäten bestätigen:
  - < 150 intestinale Enterokokken \*mL<sup>-1</sup> (z.B. Membranfilter, Kultivierung auf Äsculin-Galle-Agar nach Slanetz-Bartley-Agar),
  - < 5 Fäkalcoliforme \*mL<sup>-1</sup> und/oder < 100 Coliforme \*mL<sup>-1</sup> (z.B. Fluorocult®-System),
  - optional, bei unklarer Herkunft des Gärguts, v.a. bei nicht ausgeschlossener Kontamination mit Kot von Fleischfressern: < 3000 *Clostridium perfringens* \*mL<sup>-1</sup> (z.B. TSCF-Plattenguss).
- Diese Endproduktprüfung sollte bei gleichbleibender Prozessführung in der Anlage 1x jährlich wiederholt werden, insbesondere nach der Winterpause vor der ersten Frühjahrsdüngung, da besonders nach längerer Lagerung Wiederverkeimung nicht auszuschließen ist und überprüft werden sollte.

#### E: Betriebsänderungen

- Im Falle von Änderungen des Anlagenbetriebs sollte der unter den neuen Bedingungen produzierte Gärrest erst dann ausgebracht werden, wenn Prozess- und Endproduktkontrollen seinen hygienisch einwandfreien Zustand bestätigt haben.

Bei Einhaltung dieser Empfehlungen kann auf Basis der aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnislage davon ausgegangen werden, dass von einer Gärrest-Ausbringung nach den oben definierten Kriterien in pflanzenbaulich sinnvoller, am Nährstoffbedarf orientierter Dosierung keine hygienisch relevante Gefährdung des Grundwasserstroms und von Oberflächengewässern ausgeht. Das Verfahren eignet sich nach jetzigem Kenntnisstand besonders, die diffusen landwirtschaftlichen hygienischen Belastungen von Trinkwassereinzugsgebieten, Badegewässern und Vorflutern zu vermindern. Wenn aktuellere Informationen insbesondere zu der Frage der Anreicherung von Sporenbildnern oder der Belastung des Gärrests durch Xenobiotika aus der Tierhaltung vorliegen, sollte die vorgeschlagene Konzeption überdacht werden.

## Literatur

EFFENBERGER, M., BACHMAIER, J. UND GRONAUER, A. (2006): Biogastechnologie zur umweltverträglichen Gülleverwertung und Energiegewinnung in Wasserschutzgebieten. Abschlussbericht der Arbeitsgruppe Reststoffmanagement, Arbeitsbereich Umwelttechnik in der Landnutzung, Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik (ILT) der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL).

[http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/schriftenreihe/p\\_23481.pdf](http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/schriftenreihe/p_23481.pdf)

GARCÉS, G., EFFENBERGER, M., NAJDROWSKI, M., WACKWITZ, C., GRONAUER, A., WILDERER, P.A. AND LEBUHN, M. (2006): Quantification of *Cryptosporidium parvum* in anaerobic digesters treating manure by (reverse-transcription) quantitative real-time PCR, infectivity and excystation tests. *Water Sci. Tech.* 53/8, 195-202.

HENKELMANN, G. (2006): Biogastechnologie zur umweltverträglichen Gülleverwertung und Energiegewinnung in Wasserschutzgebieten: wasserwirtschaftliche und hygienische Begleituntersuchung. Projektteil: Wasserwirtschaftliche und hygienische Begleituntersuchungen – Lysimeter-, Labor- und Praxisversuche.

[http://www.wga.bv.tum.de/component/option,com\\_docman/task,cat\\_view/gid,63/Itemid,46/lang,de/](http://www.wga.bv.tum.de/component/option,com_docman/task,cat_view/gid,63/Itemid,46/lang,de/)

HOFERER, M. (2001): Seuchenhygienische Untersuchungen zur Inaktivierung ausgewählter Bakterien und Viren bei der mesophilen und thermophilen anaeroben alkalischen Faulung von Bio- und Küchenabfällen sowie anderen Rest- und Abfallstoffen tierischer Herkunft. Inaugural Dissertation beim Fachbereich Veterinärmedizin an der Freien Universität Berlin, Journal-Nr. 2528, S. 1-211.

KTBL (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 13. Auflage. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). Darmstadt.

LEBUHN, M. UND WILDERER, P. (2006): Abschlussbericht des StMUGV-Projekts "Biogastechnologie zur umweltverträglichen Gülleverwertung und Energiegewinnung in Wasserschutzgebieten: wasserwirtschaftliche und hygienische Begleituntersuchung, Projektteil: Mikrobiologische, parasitologische und virologische Untersuchungen". Technische Universität München, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft.

[http://www.wga.bv.tum.de/component/option,com\\_docman/task,cat\\_view/gid,63/Itemid,46/lang,de/](http://www.wga.bv.tum.de/component/option,com_docman/task,cat_view/gid,63/Itemid,46/lang,de/)

LEBUHN, M. UND GARCÉS, G. (2007): Neue molekularbiologische Ansätze zur Bestimmung der Vitalität von Krankheitserregern. *Landtechnik* 62/1, 36-37

LfL (2006): Biogastechnologie zur umweltverträglichen Gülleverwertung und Energiegewinnung in Wasserschutzgebieten. LfL-Schriftenreihe 23/2006, ISSN 1611-4159.

WEIß, K. UND POPP, W. (2004): Quantifizierung der diffusen Belastung von Gewässern mit Fäkalbakterien aus landwirtschaftlich genutzten Flächen. Schlussbericht, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Materialien Nr. 111, S. 1-74.

WHO (2004): Microbial aspects. In: Guidelines for drinking-water quality. 3<sup>rd</sup> ed. Geneva, World Health Organization, pp. 121-144.





