

Entwicklung einer sicheren Methode zur Bioabfallhygienisierung mit Kalk

V. Schirm, W. Philipp, R. Böhm,
A. Wecker und N. Weber

Forschungsbericht Nr. 1/03 / C 023 i/e

**Entwicklung einer sicheren Methode zur
Bioabfallhygienisierung mit Kalk**

V. Schirm, W. Philipp, R. Böhm, A. Wecker und N. Weber

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

AiF-Nr. **12543 N**

Forschungsstelle 1: Forschungsinstitut der
Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.
Annastraße 67-71
50968 Köln

Forschungsstelle 2: Universität Hohenheim
Institut für Umwelt und Tierhygiene
Garbenstraße 30
70599 Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	1
1.	Einleitung	3
1.1	Ziel des Forschungsvorhabens und Vorgehensweise	3
2.	Gesetzliche Bestimmungen	5
2.1	Rechtsvorgaben für die Hygienisierung	6
3.	Substrate	7
3.1	Klärschlamm	7
3.2	Gärrückstand	9
3.3	Panseninhalt und Rindermist	11
3.4	Bioabfall aus Haushalten	11
4.	Keime	12
4.1	Salmonella senftenberg	12
4.2	Fäkalstreptokokken	12
4.3	Escherichia coli	13
4.4	Clostridium perfringens	13
4.5	Bovines Parvovirus (BPV)	14
4.6	Rinder Enterovirus (ECBO)	14
4.7	Ascaris suum	15
4.8	Indikatorkeime	16
5.	Hygienisierung mit Kalk	17
5.1	Branntkalk (CaO)	17
6.	Material und Methoden	19
6.1	Bakteriologische Untersuchungen	19
6.2	Virologische Untersuchungen	19
6.3	Parasitologische Untersuchungen	20
6.4	Physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden	20
6.5	Laborversuche	21
6.6	Versuche im halbtechnischen Maßstab	21
6.7	Praxisversuche	23
6.8	Substrate	24
6.9	Keime	25
6.10	Branntkalk (CaO)	26

7.	Ergebnisse	27
7.1	Hygienische Beschaffenheit der Substrate	27
7.2	Vorversuche	28
7.3	Versuche im halbtechnischen Maßstab	30
7.3.1	Klärschlamm	30
7.3.2	Panseninhalt	38
7.3.3	Gärrückstand	43
7.4	Praxisversuche	47
7.4.1	Klärschlamm	49
7.4.2	Gärrückstand	56
7.4.3	Homogenität	59
7.4.4	Ammoniak	64
8.	Diskussion	66
8.1	Vorversuche und halbtechnische Versuche	66
8.2	Praxisversuche	70
9.	Literaturverzeichnis	72
	Danksagung	79

die Reduzierung des Gehaltes an Bovinen Parvoviren aus und beschleunigt die Hygienisierung zusätzlich.

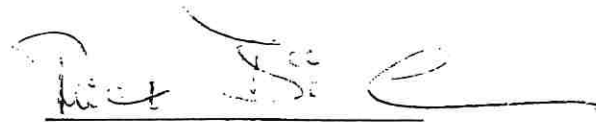
Für die Substrate Bioabfall aus Haushalten und Rindermist, die einen hohen Anteil an Strukturstoffen (Stroh, Äste usw.) besitzen, zeigte sich, dass auch nach einer Vorzerkleinerung eine sichere homogene Mischung mit Branntkalk in den eingesetzten Mischertypen nicht möglich ist. Im Endprodukt lagen jeweils gut vermischte und nicht vermischte Anteile neben unvermischem Branntkalk vor.

Der faserige Anteil im Panseninhalt führte zu Verstopfungen in dem auch für die halbtechnischen Versuche vorgesehen, kontinuierlich betriebenen Mischaggregat. Zur Vergleichbarkeit der Substrate im halbtechnischen Maßstab wurde daher für alle Substrate ein Chargenmischer mit einem integrierten Zerkleinerungsaggregat eingesetzt. Aufgrund der o.g. Faserigkeit konnte der Panseninhalt nicht im Praxisversuch eingesetzt werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde für die Substrate Klärschlamm und Gärrückstand erreicht.



Leiter Fst 1



Leiter Fst 2

1. Einleitung

Mit dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG), das am 7. Oktober 1996 in Kraft trat, wurden die Weichen für eine Abfallbehandlung im Sinne einer Kreislaufführung gestellt. Ziel dieses Gesetzes ist gemäß §1, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und die umweltverträgliche Beseitigung von Abfällen zu sichern. Dabei ist die Rangfolge: vermeiden, verwerten, umweltgerecht beseitigen, in jedem Fall zu prüfen und einzuhalten [1].

Bioabfälle, wie z.B. Reststoffe aus der Landwirtschaft, der Verarbeitung landwirtschaftlicher Produkte und aus der Abfallentsorgung, sind in Abhängigkeit ihrer Konsistenz, Herkunft und Behandlung unterschiedlich häufig und stark mit obligat oder fakultativ pathogenen Bakterien, Viren und Parasiten behaftet. Bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Bioabfällen besteht deshalb ein Hygienierisiko [2, 3]. Bevor Bioabfälle in den Verkehr gebracht werden können, sind sie daher nach der Bioabfallverordnung [4] einer Behandlung zu unterziehen, die eine seuchen- und phytohygienische Unbedenklichkeit gewährleistet. Die dazu verwendeten Hygienisierungsverfahren werden mittels Prozess- und Endproduktprüfung kontrolliert. Die Endprodukte müssen außerdem bei der landwirtschaftlichen Verwertung einen Nutzen für den Boden (Düngung, Verbesserung der Bodenstruktur, Humusbildung) aufweisen [5].

Neben der Kompostierung, der thermophilen Vergärung oder der externen Erhitzung stellt die Behandlung mit Kalk ebenfalls ein anerkanntes Hygienisierungsverfahren dar. Die hygienisierende Wirkung beruht dabei auf einer pH-Wert-Erhöhung und/oder bei der Verwendung von Branntkalk zusätzlich auf einer Temperaturerhöhung. Der hohe pH-Wert verhindert die Wiederverkeimung des Endproduktes noch Wochen nach der Behandlung. Dies hat besondere Vorteile, wenn ein Kontakt von unbehandeltem Material nicht ausgeschlossen werden kann.

Die Hygienisierung mittels Branntkalk ist ein Verfahren, das auch Erzeuger kleinerer Abfallmengen wirtschaftlich, zeit- und energiesparend durchführen können. Die gekalkten Produkte sind schon nach kurzer Zeit in der Landwirtschaft ausbringfähig. Das Endprodukt kann zusätzlich zur Kalkdüngung des Bodens genutzt werden und ist durch den hohen pH-Wert gegen Rekontamination geschützt.

1.1 Ziel des Forschungsvorhabens und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, nachzuweisen, dass Branntkalk großtechnisch mit der notwendigen Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit zur Erzeugung hygienisch einwandfreier Bioabfälle, die sich als Dünger nutzen lassen, eingesetzt werden kann.

Bisher durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass der Hygienisierungseffekt des Branntkalks vor allem von der homogenen Einmischung in das jeweilige Substrat abhängt. Deshalb wurde in dieser Arbeit mit Substraten unterschiedlicher Konsistenz und mit unterschiedlichen Mischaggregaten gearbeitet. Der Erfolg des Hygienisierungsprozesses wurde anhand der Reduzierung bzw. Inaktivierung widerstandsfähiger Bakterien, Viren und parasitärer Dauerstadien als Indikatorkeime überprüft.

Die Untersuchungen sind in drei Abschnitte gegliedert, und zwar sind im Labormaßstab Voruntersuchungen bzgl. der Einmischfähigkeit von Branntkalk in die verwendeten Substrate erfolgt, deren Erkenntnisse erst im halbtechnischen Maßstab und später im Praxisversuch an zwei Substraten verifiziert wurden.

Zu diesem Zweck wurde eine Mischanlage konzipiert mit der folgende, für eine Hygienisierung notwendigen Prozess- und Produktbedingungen untersucht wurden:

- Hygienische Beschaffenheit der Ausgangsprodukte
- Mischbarkeit des Bioabfalls mit dem Branntkalk
- Homogenität der erzielten Mischung
- Temperaturentwicklung innerhalb des Endproduktes bzw. des Mischaggregates
- Branntkalkmenge
- Hygienisierungsgrad des Endproduktes anhand ausgewählter Indikatorkeime
- Sicherheit gegen Wiederverkeimung

Zur Untersuchung der Tenazität der eingesetzten Indikatorkeime wurden diese in speziell vorbereiteten „Keimträgern“ in das Substratgemisch eingebracht. Diese Keimträger wurden speziell für die Anwendung in Bioabfallsubstraten entwickelt [6].

2. Gesetzliche Bestimmungen

Die Bedingungen, unter denen Bioabfälle auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden als Sekundärrohstoffdünger ausgebracht werden dürfen, werden in erster Linie durch die Bioabfallverordnung geregelt [4]. Sie beruht auf den Grundlagen des Gesetzes zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (KrW-/AbfG), in dem die Verwertung von Abfällen gefordert wird [1].

Die Bioabfallverordnung enthält umfassende Vorgaben zur Seuchen- und Phytohygiene, die bei der Abgabe oder Aufbringung der Bioabfälle einzuhalten sind. Diese Vorgaben gewährleisten, dass keine tierischen Krankheitserreger oder Erreger von Pflanzenkrankheiten weiter verbreitet werden. Die hygienische Unbedenklichkeit von Produkten aus der biologischen Abfallbehandlung wird mit Hilfe von direkter und indirekter Prozessprüfung und mit einer Produktprüfung festgestellt (Anhang 2 Punkt 2.2 der BioAbfV).

Die Produktprüfung (Endproduktkontrolle) erfolgt im Rahmen der Fremdüberwachung und soll gewährleisten, dass das Endprodukt hygienisch unbedenklich ist. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn in keiner der entnommenen Proben Salmonellen nachweisbar sind (in 50g Substrat n.n.) (Anhang 2 Punkt 2.2.3. der BioAbfV).

Klärschlämme aus kommunalen Kläranlagen unterliegen auch weiterhin der Klärschlammverordnung [7]. Sie gilt für das Aufbringen von Klärschlamm auf landwirtschaftliche oder gärtnerisch genutzte Böden. Für pathogene Keime im Klärschlamm, der landwirtschaftlich verwertet werden soll, gibt es in Deutschland bisher noch keine Grenzwerte oder Hygienisierungsvorschriften.

Seit dem 7.10.1996 unterliegen Bioabfälle und Klärschlamm in vollem Umfang unter der Bezeichnung „Sekundärrohstoffe“ auch dem Düngemittelrecht, aus dem sich die Düngemittelverordnung [5] herleitet, die die Anwendung von Düngemitteln in der Landwirtschaft konkretisiert. In §1 Abs. 2 der Düngemittelverordnung wurde für das Inverkehrbringen von Sekundärrohstoffdüngern die Forderung aufgenommen, dass die Materialien hinsichtlich der Verursachung von Krankheiten bei Mensch und Tier, durch Übertragung von Krankheitserregern und hinsichtlich von Schäden an Pflanzen, Pflanzenerzeugnissen oder Böden durch Verbreitung von Schadorganismen unbedenklich sein müssen.

Auf europäischer Ebene wird zur Zeit das Arbeitspapier „Die biologische Behandlung von Bioabfällen“ (2. Entwurf, Feb. 2001, [54]) diskutiert. Kernstück dieses Papiers ist die Aufstellung von Anforderungen für verschiedene Arten von Komposten. Dabei sind im Anhang II die Anforderungen für eine Hygienisierung aufgeführt. Es wird eine Prozessprüfung mit dem Indikatororganismus *Salmonella senftenberg* W 775 (H_2S negativ) gefordert, Vorgaben für die Prozessführung (Kompostierung, Vergärung und mech./biol. Behandlung) gemacht und eine Endproduktprüfung gefordert. In dieser Endproduktprüfung ist derzeit noch, außer dem anerkannten Prüfkeim *Salmonella senftenberg*, *Clostridium perfringens* als Indikatorkeim (nicht nachweisbar in 1g Substrat) vorgesehen.

Zusätzlich wird derzeit eine Neufassung der Richtlinie 86/278/EWG (Klärschlammrichtlinie, [11]) vorbereitet. Das aktuelle 3. Arbeitsdokument vom 27. April 2000

enthält auch konkrete Vorgaben zur Hygienisierung und stellt Grenzwerte für maximal zulässige Keimkonzentrationen (*Salmonella senftenberg*; *Escherichia coli*) auf.

Auf internationaler Ebene sieht die EPA-Richtlinie 40 Part 503 (Environmental Protection Agency – USA) zwei Hygienisierungsklassen, A und B, vor. Klasse A bedeutet dabei eine uneingeschränkte Verwendungsmöglichkeit der Bioabfälle. Dazu sind die folgenden Grenzwerte einzuhalten:

Klasse A:	Salmonella Spezies	< 3 KBE/4 g Klärschlamm
	Enterovirus	< 1 KID 50 /4g Klärschlamm
	Spulwurmeier	< 1 Ei/4g Klärschlamm

KBE = Koloniebildende Einheiten; KID = Kulturinfektiöse Dosies 50%

2.1 Rechtsvorgaben für die Hygienisierung

Das Europäische Komitee für Normung (CEN, 2002) setzt in einem Vorschlag vom Januar 2002 für die Desinfektionsmittelprüfung eine Reduktion um 10^4 Zehnerpotenzen zur Überprüfung der viruziden Wirkung voraus [59].

Für die Überprüfung der bakteriziden Wirkung stellt das CEN-Komitee (2001) in einem Vorschlag ebenfalls die Reduzierung um 4 Zehnerpotenzen zur Diskussion [60]. Nach den Vorgaben der Europäischen Norm EN 1040 muss das geprüfte Produkt jedoch noch eine Reduktion der Lebendkeimzahl um mindestens den Faktor 10^5 erreichen [61].

Als Anforderung an die sporozide Wirkung von Desinfektionsmitteln wird eine Reduzierung der Lebendkeimzahl um mindestens 10^4 gefordert, als Prüfkeim sollten zu diesen Untersuchungen *Bacillus subtilis* und *cereus*-Sporen eingesetzt werden [62]. In einer anderen CEN Version (2001) wird eine Reduzierung um den Faktor 10^3 gefordert [63].

Auf europäischer Ebene werden zur Zeit Vorgaben für validierte Verfahren zur Hygienisierung von Klärschlamm diskutiert. Zur Inaktivierung von parasitären Dauerstadien (Wurmeier) gilt derzeit die Vorgabe, dass die Entwicklungsfähigkeit von Askarideneiern um 99,9% gesenkt werden muss [64].

3. Substrate

Als Substrate wurden verwendet:

- Klärschlamm
- Gärrückstand
- Panseninhalt und Rindermist
- Bioabfall aus Haushalten.

3.1 Klärschlamm

Klärschlamm wird in der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) § 2, Absatz 2 definiert als „bei der Behandlung von Abwasser in Abwasserbehandlungsanlagen einschließlich zugehöriger Anlagen zur weitergehenden Abwasserreinigung anfallender Schlamm, auch entwässert oder getrocknet oder in sonstiger Form behandelt“ [7].

Die Abwasserrichtlinie (91/271/EWG) schreibt EU-weit vor, dass bis spätestens zum Jahresende 2005 alle Kommunen mit mehr als 2000 Einwohnern (Einwohneräquivalente) mit einer Abwasserableitung in Binnengewässer und von mehr als 10.000 Einwohner (Einwohneräquivalente) mit einer Abwasserableitung in Küstengewässer mindestens zweistufige Verfahren zur Abwasserbehandlung einsetzen müssen. Hieraus dürfte in den Ländern der EU ein Anstieg des Klärschlammmanfalls von 7,6 Mio. Mg TS im Jahr 1995 auf ca. 15-20 Mio. Mg TS/a bis zum Jahr 2005 resultieren [8].

Die Deponierung von Klärschlamm wird mit der Umsetzung der EU-Deponierichtlinie 94/904/EG in der AbfAbIV (Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen) ab dem Jahr 2005 entfallen [9].

Die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm als Dünger hat, insbesondere in ländlichen Regionen, eine lange Tradition, vor allem wegen der Gehalte an Stickstoff- und Phosphorverbindungen [10]. Die rechtlichen Rahmenbedingungen der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung sind in der AbfKlärV [7] geregelt. Klärschlamm darf auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Böden nur so aufgebracht werden, dass das wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird und die Aufbringung nach Art, Menge und Zeit auf den Nährstoffbedarf der Pflanzen, unter Berücksichtigung der im Boden verfügbaren Nährstoffe und organischen Substanzen sowie der Standort- und Anbaubedingungen, ausgerichtet wird. Im Übrigen gelten für das Aufbringen von Klärschlamm die Bestimmungen des Düngemittelrechts entsprechend [5]. Zusätzlich kommt über die im Entwurf befindliche Klärschlammrichtlinie der EU zukünftig die Forderung nach Hygienisierung vor der landwirtschaftlichen Verwertung [11].

Keime im Klärschlamm werden über das Abwasser eingetragen. Außer den menschlichen und tierischen Ausscheidungen sind als weitere Eintragsquellen die Abwässer vor allem von Krankenhäusern, Schlacht- und Viehöfen, Tierkörperbeseitigungsanstalten, Fischmehl- und Eipulverproduzenten, Leimfabriken, Gerbereien, Betriebe der Häute-, Fell- und Borstenverarbeitung zu nennen [12, 13].

Tab.1 : Auswahl von Bakterienarten im Klärschlamm

Obligate Pathogene	Fakultative Pathogene
Salmonella spp.	Escherichia
Shigella spp.	Klebsiella
Escherichia coli	Enterobakter
Pseudomonas aeruginosa	Serratia
Yersinia enterocolitica	Citrobakter
Clostridium perfringens	Proteus
Clostridium botulinum	Providencia
Bacillus anthracis	Multiresistente Bakterien
Listeria monocytogenes	
Vibrio Cholerae	
Mycobakterium spp.	
Leptospira spp.	
Camphylobakter spp.	
Staphylococcus	
Streptococcus	

Tab. 2: Mögliche Virenarten im Klärschlamm aufgrund von menschlichen Ausscheidungen

Virusgruppe	Auswahl von Typen	Hervorgerufene Krankheiten oder Symptome
Enterovirus		
Poliovirus	3	Poliomyelitis, Meningitis, Fieber
Coxsackievirus A	24	Herpangina, Atemwegsinfektionen, Meningitis
Coxsackievirus B	6	Myocarditis, Herzmissbildungen, Meningitis, Atemwegserkrankungen, Hautausschlag, Fieber
Echovirus	34	Meningitis, Atemwegserkrankungen, Durchfall, Fieber, Hautausschlag,
Weitere Enteroviren	4	Meningitis, Atemwegserkrankungen, Fieber, haemorrhagische Konjunktivitis
Adenovirus	41	Atemwegserkrankungen, Augeninfektionen
Reovirus	3	Nicht definiert
Hepatitis A-virus	1	Hepatitis
Rotavirus	4	Erbrechen und Durchfall
Astrovirus	5	Gastroenteritis
Calciavirus	2	Erbrechen und Durchfall
(Norwalk agent)		
Coronavirus	1	Erkältung
Adeno-associated virus	4	Nicht genau definiert aber mit Atemwegserkrankungen bei Kindern vergesellschaftet
Parvovirus	2	Ein Typ steht möglicherweise mit Darminfektionen in Zusammenhang

Das Spektrum der im Abwasser vorkommenden Krankheitserreger umfaßt eine Vielzahl von Bakterien, Viren und parasitären Erregern, Hefen und Pilze [14], dargestellt in Tabellen 1-3 nach STRAUCH [3], modifiziert nach BÖHM:

Nach ROLLE [15] enthalten Siedlungsabwässer immer Salmonellen. Diese lassen sich in 80-90% der Proben von Frischschlamm aus Kläranlagen mit städtischem

Einzugsgebiet nachweisen.

Die Schließung von epidemiologischen Kreisläufen für verschiedene Krankheits- und Tierseuchenerreger durch die landwirtschaftliche Verwertung von Bioabfällen ist bekannt und konnte für die Salmonellose eindrucksvoll in Verbindung zur Klärschlammdüngung gebracht werden [16].

Tab.3 : Auswahl an Parasiten, die meist in Form von Dauerstadien im Klärschlamm vorkommen können

Protozoa	Cestodes	Nematodes
Cryptosporidia parvum	Taenia saginata	Ascaris lumbricoides
Entamoeba histolytica	Taenia solium	Ancylostoma duodenale
Giardia lamblia	Diphyllobothrium latum	Toxocara canis
Toxoplasma gondii	Echinococcus granulosus	Toxocara cati
Sarcocystea spp.		Trichuris trichiura

3.2 Gärrückstand

Unter Vergärung versteht man den Abbau von biogenen Materialien durch Mikroorganismen in Abwesenheit von Sauerstoff, d.h. unter anaeroben Bedingungen. Dabei wandeln unterschiedliche Bakterienarten biogenes Material in sog. Biogas, mit einem hohen Gehalt an Methan, um. Als Rückstand verbleibt nach der Aufarbeitung eine faserhaltigen Fraktion (fester Gärrückstand) und eine flüssige Fraktion (flüssiger Gärrückstand).

Die anaerobe Behandlung von kommunalen und gewerblichen Bioabfällen gewinnt neben der Kompostierung zunehmend an Bedeutung. Die Vorteile gegenüber der Kompostierung liegen neben der energetischen Nutzung des Biogases auch in einer Verminderung störender Geruchsemissionen [17, 18].

Die Vergärung kann im mesophilen (33-37°C) oder im thermophilen (55-69°C) Temperaturbereich durchgeführt werden. Die Gärtemperatur beeinflusst die Abbaurate und die Gasausbeute sowie den Grad der Hygienisierung [19].

Die organischen Abfälle aus Haushalten, Großküchen und der lebensmittelverarbeitenden Industrie enthalten human- bzw. veterinär- und phytohygienisch bedeutsame Bakterien, Pilze, Viren und Parasiten unterschiedlichster Art und Menge, die grundsätzlich geeignet sind, die Gesundheit von Mensch, Tier und Pflanze zu schädigen oder menschliche, tierische und pflanzliche Strukturen zu besiedeln bzw. die Umwelt zu belasten [20]. Unter den Bakterienarten, die in biologischen Rest- und Abfallstoffen vorkommen können, befinden sich auch viele Zoonosenerreger, die sich unter den gegebenen Bedingungen sogar vermehren können. In Tabelle 4 ist eine entsprechende Zusammenstellung gegeben, die auch Hinweise auf mögliche Vektoren enthält [2].

Mit der Verarbeitung von Speiseabfällen ergeben sich insbesondere Risiken durch Viren, wie dem Virus der Europäischen Schweinepest, dem Maul- und Klauen-seuchenvirus, dem Herpes suis Virus und dem Virus der Afrikanischen Schweine-

pest. Diese Viren können im Fleisch und in Fleischerzeugnissen relativ lange überleben [2].

Tab. 4: Bakterielle Zoonosenerreger in biologischen Rest- und Abfallstoffen [2]

Erreger	Hautreservoir, Infektionsquelle, Zwischenträger	Häufigkeit und Verbreitung
Brucella spec.	Haus- und Wildtiere Futter, Einstreu, Abwasser	Regional, weltweit
Campylobakter spec.	Haus- und Wildtiere Geflügel, Gewässer	Verbreitet, weltweit
Clostridium perfringens	Wasser, Boden, Darminhalt von Tieren	Sporadisch bis gehäuft, weltweit
Escherichia coli	Tier und Mensch, Lebensmittel	Verbreitet, weltweit
Erysipelothrix rhusiopathiae	Landw. Nutztiere, Dung, Kommunales Abwasser	Sporadisch oder gruppenweise, weltweit
Leptospira interrogans Subs.	Haus- und Heimtiere, Gewässer, Schlamm	Regional, weltweit
Listeria monocytogenes	Haustiere, Milchprodukte, Erdboden	Sporadisch, gruppenweise, weltweit
Bacillus anthracis	Erdboden (ehemals Abdeckereien), Haus- und Wildwiederkäuer, Schweine	Sporadisch, weltweit, regional
Staph.aureus	Mensch, Hospitalismus, Haustiere, Lebensmittel	Sporadisch, gehäuft, weltweit,
Strept. Pyogenes Serovare	Mensch und Haustier	Sporadisch, weltweit, regional
Salmonella-Serovare	Haussäugetiere, Geflügel, Reptilien, Gewässer, Abwasser	Häufig, gruppenweise bis endemisch, weltweit
Shigella spec.	Mensch, Abwasser	Häufig, weltweit
Clostridium tetani	Abwasser, Boden, Darm, Tier, Mensch	sporadisch, weltweit
Yersinia spec.	Wildnagetiere, Hausschweine	sporadisch, weltweit
Pasteurella spec.	Landw. Nutztiere, Haus- und Wildnagetiere	sporadisch, weltweit
Chlamidia psittaci	Wild- Zier- und Hausgeflügel	Sporadisch bis Gruppenerkrankung

Um die seuchenhygienischen Anforderungen zu erfüllen, müssen die Speisereste vor der Vergärung auf eine Partikelgröße < 10mm zerkleinert und anschließend bei einer Temperatur von mindestens 70°C für die Dauer von mindestens 60 Minuten hygienisiert werden [21].

In mesophil betriebenen Biogasanlagen muß in den anfallenden Gärrückständen immer noch von einem Hygienierisiko ausgegangen werden, obwohl innerhalb der üblichen Reaktorverweilzeiten eine Minderung der seuchenhygienisch relevanten Keime um mehrere Größenordnungen stattfindet. Eine ausreichende Inaktivierung wird allerdings erst bei thermophiler Betriebsweise mit Temperaturen um 55°C

erreicht, sofern eine Aufenthaltszeit von mindestens 24 Stunden eingehalten wird [21].

Bei der Überprüfung von Biogasanlagen, die überwiegend eine einstufige, mesophile Vergärung bei Temperaturen zwischen 27°C und max. 48°C betreiben, zeigte sich, dass über 50% der Anlagen die zulässige Höchstkeimzahl an E-coli und Fäkalstreptokokken ($< 5 \times 10^3$ KBE/g) überschreiten und bei einigen Proben noch Salmonellen nachgewiesen werden konnten. Daher wurde im Arbeitspapier der Europäischen Kommission über „die biologische Behandlung von Abfällen“ festgesetzt, dass in Vergärungsanlagen, die bei einer Betriebstemperatur unter 55°C oder einer Aufenthaltszeit unter 20 Tage betrieben werden, eine weitere Behandlung der Produkte erfolgen muß. Vorgesehen sind dabei die folgenden Auswahlmöglichkeiten:

- Vorbehandlung der Bioabfälle bei 70°C eine Stunde
- Nachbehandlung der festen Gärrückstände bei 70°C eine Stunde
- Kompostierung der festen Gärrückstände

3.3 Panseninhalt und Rindermist

Auch Abfallstoffe aus Schlachthöfen, wie Mist aus den Stallungen und Panseninhalt, eignen sich für biologische Behandlungsprozesse und können über diese Form der Verwertung in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden [22].

Panseninhalt ist der Inhalt des ersten Vormagens von Wiederkäuern, der im Schlachthof entfernt wird. Der Magen- und Darminhalt von Schlachttieren kann Krankheitserreger unterschiedlichster Herkunft enthalten. In der Schweiz fallen jährlich 5000 t /TS Panseninhalt an, davon wurden 1500t als Futter und 1500 t im Pflanzenbau verwendet. 1500 t wurden kompostiert und 500t wurden vergärt, wobei die direkte Verwertung des Panseninhaltes als Futtermittel oder im Pflanzenbau immer weiter zurückgeht, so dass der Anteil der Kompostierung und Vergärung ansteigt [23].

Insgesamt fielen 1989 etwa 36,5 Mio. t Frischmist an, wovon nach der Lagerung etwa 22,5 Mio. t im Ackerbau eingesetzt wurden. Davon waren ca. 73 % Rindermist [24]. In den Stallungen gelangen die pathogenen Keime auf den Stallfußboden, auch wenn sie nicht über den Verdauungstrakt emittiert werden. Dort mischen sie sich mit Stallmist, Jauche und Gülle und gelangen bei deren Entfernung aus dem Stall ebenfalls in die entsprechenden Lagerstätten für Fest- und Flüssigmist. Wenn solche infizierte Wirtschaftsdünger landwirtschaftlich verwertet werden, besteht die Gefahr einer weiträumigen Verschleppung von Seuchenerregern [3].

3.4 Bioabfall aus Haushalten

Der Anteil an Bioabfällen aus Haushaltssammlungen zum Zwecke der Kompostierung steigt in zunehmendem Maße, da viele Städte und Gemeinden diese Getrenntsammlung als Pflichtbenutzung einführen. Das unbehandelte Material, das im wesentlichen aus Grünschnitt und Speiseresten besteht, besitzt eine sehr uneinheitliche Konsistenz und ein hohes Infektionsrisiko.

4. Keime

Als Keime wurden verwendet:

Bakterien:	Salmonella senftenberg, Fäkalstreptokokken, Escherichia coli
Sporen:	Clostridium perfringens
Viren:	Bovines Parvovirus (BPV), Rinder Enterovirus (ECBO)
Parasitäre	
Dauerstadien:	Eier von Ascaris suum (Askarideneier).

4.1 Salmonella senftenberg

Das Genus Salmonella gehört mit derzeit 30 weiteren Genera zur Familie der Enterobacteriaceae. Salmonellen sind 2-3 µm lange, plumpe, gramnegative, sporenlose, meist bewegliche, peritrich begeißelte Stäbchen, die morphologisch untereinander und von anderen gramnegativen Darmbakterien nicht zu unterscheiden sind.

Als Salmonellose werden verschiedene Infektionen und Erkrankungen bei Tieren und Menschen durch Bakterien des Genus Salmonella bezeichnet. Die Salmonellosen sind weltweit verbreitet und spielen vor allem in Ländern mit intensiver Tierhaltung eine wichtige Rolle.

Bei den Salmonellosen entsteht ein Infektionskreislauf von fäkaler Ausscheidung über die Kontamination von Wasser und Boden zur Reinfektion der Ausscheider oder Infektion anderer Tierarten. Das trifft für Menschen, Haus- oder Wildtiere in gleicher Weise zu und führt zu teils einfacher, teils komplizierter Infektketten, wobei meist mehrere Tierarten an den Infektionskreisläufen und an der Kontamination von Wasser, Erdboden, Futter- oder Lebensmittel beteiligt sind [19].

In feuchtem Rinderkot waren Salmonellen 10-11 Monate, in getrocknetem Kot sogar 2 Jahre und 7 Monate, in Gülle über 33 Monate lang nachweisbar. In feuchter Erde blieben sie 12 Monate, in trockener Erde 16 Monate lebensfähig. Je trockener das Material ist, desto größer ist die Tenazität. Gegen Kälte sind sie resistent. In Nahrungsmitteln überstehen sie Einfrieren und Tiefkühlen. In sauren Medien sterben sie rasch ab. Durch Hitzeeinwirkung sterben sie bei 55°C nach 1 Stunde, bei 60°C nach einer halben Stunde und bei 70°C innerhalb von Sekunden ab. Die Widerstandsfähigkeit gegen trockene Wärme ist größer als gegen feuchte Wärme [15, 34].

4.2 Fäkalstreptokokken (Enterokokken, D-Streptokokken)

Die Enterokokken (D-Streptokokken, Fäkalstreptokokken) bilden innerhalb der Gattung Streptococcus eine Gruppe mehrerer Spezies, die sich durch ihr ubiquitäres Vorkommen, ihre auffallenden biologischen Eigenschaften und ihren abweichenden Zellaufbau von den übrigen Streptokokken abheben [35].

Enterokokken sind grampositive, runde oder ovoide Kokken, die gewöhnlich als Diplokokken vorkommen. Sie bilden spezifische Fäden, da nach einer Zellteilung die Tochterzellen paarig miteinander verbunden bleiben. Hierdurch entsteht eine fädige, kettenförmige Struktur, wobei die Einzelzelle einen kugelförmigen Durchmesser von 0,5- 1 μm besitzt [36].

Der taxonomisch nicht definierte Begriff der Fäkalstreptokokken stammt aus dem Sanitärbereich und umfasst alle mit dem Faeces von Mensch und Tier ausgeschiedenen Streptokokken. Beschrieben werden damit grampositive, unbewegliche und nicht sporenbildende Kugelbakterien.

Enterokokken zeichnen sich durch hohe Thermotoleranz (60°C über 30 min), Salztoleranz (Wachstum in Nährlösung mit 6,5% NaCl) und Wachstum bei pH-Werten bis 9,6 aus [36, 37].

Nach Untersuchungen von BREITENFELD et. al. [20] erwies sich der Testkeim *Enterococcus faecium* in Laborversuchen resistenter als *S. senftenberg*. Der Keim war bei 55°C noch nach 12 Stunden nachweisbar. Erst nach 24 Stunden konnte das Bakterium nicht mehr aus dem Substrat isoliert werden.

4.3 *Escherichia coli*

Escherichia coli kommt im Dickdarm von Menschen und warmblütigen Tieren, mit Ausnahme von Meerschweinchen und Chinchilla, vor. *Escherichia coli* ist ein gramnegatives, nicht sporenbildendes Stäbchen mit abgerundeten Enden. Es ist 2-6 μm lang und 1-1,5 μm breit. Die meisten Stämme bilden eine Kapsel und sind durch peritriche Begeißelung beweglich [15].

Darmpathogene Colikeime werden nach ihren Virulenzfaktoren und Pathogenesemechanismen in 7 Gruppen eingeteilt [37]. Man unterscheidet bei *E.-coli* zwischen enteralen Infektionen (z.B. starker Durchfall) und nicht enteralen Infektionen (z.B. Harnwegsinfektionen). Die Bakterien gelangen mit den Ausscheidungen in die Umwelt und bleiben dort aufgrund der relativ großen Widerstandskraft lange Zeit vermehrungsfähig [15].

Im feuchten Milieu besitzen die Keime eine hohe Tenazität, auch in angetrocknetem Kot kann *E.-coli* über Monate vermehrungsfähig bleiben. Bereits durch Erhitzung auf 60°C lässt sich der überwiegende Teil der Stämme abtöten, die gebräuchlichen Desinfektionsmittel sind gut wirksam [37].

4.4 *Clostridium perfringens*

Zur Gattung *Clostridium* gehören mehr als 100 Spezies, die nach phänotypischen Kriterien in verschiedene Gruppen eingeteilt werden.

Clostridien sind stäbchenförmige, grampositive, in der Mehrzahl bewegliche, streng anaerob wachsende, sporenbildende Bakterien, deren natürlicher Lebensraum der Erdboden ist. Verschiedene Clostridienarten besiedeln auch regelmäßig den Magen-Darm-Trakt von Mensch und Tier. Differenziert werden die Stämme nach ihren

Toxintypen. Durch *C. perfringens* werden Enterotoxämien, (nektotisierende) Enteritiden und Gasödeminfektionen verursacht [37].

Clostridien sind in der Lage, unter ungünstigen Bedingungen Dauerzellen, sogenannte Endosporen, zu bilden. Diese sind unter dem Lichtmikroskop als stark lichtbrechende Körper zu erkennen [38]. Endosporen werden innerhalb der Zelle als Reaktion auf einen Mangel an essentiellen Nährstoffen, vor allem an Kohlenstoff, Stickstoff, und/oder Phosphor gebildet. Sie überdauern lange Zeiträume und sind widerstandsfähig gegen extreme Temperaturen und pH-Werte, Austrocknung, Strahlung, chemische Substanzen und physikalische Beschädigungen [39].

Die gegenüber der vegetativen Zelle erhöhte Hitze- und Chemikalienresistenz gründet im geringen Wassergehalt des Sporenprotoplasten, der nur ca. 10 bis 30% des Wassers einer vegetativen Zellen enthält. Außerdem bewirkt die Dehydratisierung eine Inaktivierung von Enzymen [38].

Die Tenazität der vegetativen Formen unterscheidet sich kaum von der der aeroben Bakterien. Die Sporen jedoch überstehen 100°C für eine bis mehrere Minuten, werden jedoch in der Regel nach 10 Minuten abgetötet. Manche Stämme von *Clostridien perfringens* sind noch thermoresistenter, so dass man erst nach 10 min bei 121°C von einer vollständigen Inaktivierung der Sporen ausgehen kann.

4.5 Bovines Parvovirus (BPV)

Die Familie der Parvoviridae (von lat. Parvus= klein) ist in zwei Subfamilien untergliedert: Parvovirinae und Densovirinae.

Das Genom ist ein lineare, einsträngige DNS. Die Virionen sind isometrisch, ohne Hülle und haben einen Durchmesser zwischen 18 und 22 nm. Die Vermehrung des Genus Parvovirinae findet im Zellkern statt und ist abhängig von bestimmten Funktionen der Wirtszellen [37]. Das Infektionsspektrum des bovinen Parvovirus scheint auf das Rind beschränkt zu sein. Es verursacht vor allem bei neugeborenen Kälbern sowie bei Feten während der ersten zwei Drittel der Trächtigkeit Krankheiten mit enteritischem Charakter.

Parvoviren gehören zu den umweltstabilsten unter den Viren überhaupt. Überwiegend werden sie erst bei Temperaturen zwischen 80 und 90°C innerhalb von 20 Minuten bis zu einer Stunde inaktiviert [15].

WEBER et. al. [36] beschreibt, dass Parvoviren bei 100°C nach 10 Minuten und bei 60°C nach 10 Stunden inaktiviert werden.

Branntkalk eignet sich zur Desinfektion von im Klärschlamm auftretenden Viren. Ein pH-Anstieg auf über 12 verbunden mit einer NH₃-Freisetzung führt zur Inaktivierung von Polio- und Parvovirus [40].

4.6 Rinder Enterovirus (ECBO)

Enteroviren gehören zu der Familie der Picornaviridae. Diese Familie umfasst Virusarten mit einsträngiger RNS positiver Polarität. Picornaviren sind 22 bis 30nm groß und unbehüllt. Die Virusvermehrung findet im Zytoplasma der Zelle statt.

Die Enteroviren vermehren sich primär in der Darmschleimhaut. Sie sind säurestabil

(bis pH 3). Überwiegend sind sie nur fakultativ pathogen und rufen allenfalls unter bestimmten Bedingungen oder bei gewissen Altersklassen von Tieren Krankheitserscheinungen hervor. Dies gilt insbesondere für die Orphan-Viren, zu denen das ECBO-Virus (Enteric Cytophathogenic Bovine Orphan) gehört [37]. Die Viren sind wärmempfindlich; bei Temperaturen von 55°C geht ihre Infektiosität innerhalb von 30 Minuten verloren. Allerdings konnten ECBO-Viren noch nach 10 Wochen aus einer offenen Mietenkompostierung bei pH 5,6 isoliert werden [20].

Enteroviren haben ein pH-Optimum zwischen 3-9 und werden bei einem pH-Wert von 11,5 innerhalb von 60 Minuten abgetötet [41].

4.7 *Ascaris suum*

Der Spulwurm des Schweins, *Ascaris suum*, gehört zur Klasse der Nematoden. Er kommt im Dünndarm von Schweinen vor. Nach BOCH [42] legen die Weibchen des Schweinespulwurms täglich etwa 0,2-2 Mio. Eier ab, die mit dem Kot in die Außenwelt gelangen. Die Eier sind 65-85 µm x 40-60 µm groß, dickschalig und haben eine braune Farbe. Charakteristisch für Askarideneier sind hellbraune bis gelbe, glasige Buckel an der Oberfläche der Eischale.

Die Embryonalentwicklung im Freien, die mit der infektiösen Larve III endet, ist stark temperaturabhängig und benötigt Feuchtigkeit und Sauerstoff; bei hohen Temperaturen von 30-33°C ist sie in zwei Wochen abgeschlossen. Die Infektion neuer Wirte erfolgt über die orale Aufnahme infektiöser Larven. Die Larven schlüpfen wenige Stunden nach der Aufnahme im Magen und bohren sich im hinteren Dünndarm, vorwiegend jedoch im Zäkum und Colon in die Mesenterialvenen ein und sind bereits sechs Stunden nach der Infektion in der Leber anzutreffen. Innerhalb von 4-6 Tagen wachsen sie zum nächsten Stadium heran und wandern im Parachym der Leber umher. Durch diese Wanderungen entsteht in der Leber ein Narbengewebe, das bei der Schlachtung der Schweine durch die Verkalkung des Gewebes als sogenannte Milk Spots zu erkennen ist. Nach der Leberwanderung gelangen die Larven durch die Lebervene, Hohlvene und das rechte Herz in die Lunge. Im Kapillargebiet der Lunge bohren sie sich nach der Entwicklung zur Larve IV durch die Alveolen und gelangen über Bronchien und Trachea zum Pharynx, werden abgeschluckt und siedeln sich im Dünndarm an, wo die Häutung zum adulten Wurm erfolgt. Mit der Ausscheidung von Eiern ist der Kreislauf dann wieder geschlossen.

Aufgrund ihrer dreischichtigen Schale sind die Eier von *Ascaris suum* in der Außenwelt gegen viele Umwelteinflüsse sehr widerstandsfähig. Die Innere Schicht (75% Lipid und 25% Protein) verleiht dem Ei eine hohe Chemoresistenz, sogar gegen 10% Formalin. Eine Entwicklung der Eier findet bei Temperaturen über 15°C, einer relativen Feuchte von mindestens 80% und bei Sauerstoffzutritt statt.

Im feuchten Erdreich bleiben *Ascaris suum* Eier 5-6 Jahre lebensfähig und infektiös, auch können sie monatelang ohne Sauerstoffzufuhr überdauern.

In Gülle bleiben Askarideneier bei 8-18°C etwa 65-85 Tage lebensfähig. Gegen Austrocknung sind sie sehr empfindlich. Bei 55-56°C werden sie innerhalb von 10 Minuten inaktiviert [43].

STRAUCH und BERG [28] haben gezeigt, dass eine pH-Wert-Erhöhung auf pH>12 zwar zur Abtötung von Salmonellen, nicht jedoch zur Inaktivierung von Spul-

wurmeiern ausreicht. Sie schlossen aus ihren Untersuchungen, dass hierfür zusätzlich eine Temperaturerhöhung benötigt wird. Allerdings stellte OSTERTAG [44] in ihren Untersuchungen fest, dass nach einer Zugabe von Branntkalk zu Klärschlamm ohne Temperaturerhöhung eine schwache Wirkung hinsichtlich der Entwicklungshemmung von Askarideneiern zu beobachten war. Dabei stellt der Zeitfaktor einen wichtigen Parameter dar. So sind bei 42°C nach einer Woche Einwirkzeit sowohl in einer mit Branntkalk behandelten Probe, als auch in einer unbehandelten Probe keine entwicklungsfähigen Eier mehr nachweisbar. Eine Inaktivierung ist demnach also primär auf den Temperatureinfluss zurückzuführen.

LANG [45] stellte in seinen Untersuchungen fest, dass eine Reduzierung der Entwicklungsfähigkeit der Spulwurmeier bei 50°C nach einer Stunde, bei 55°C nach 20 Minuten und bei 60°C nach 15 Minuten erfolgt.

4.8 Indikatorkeime

Indikatorkeime werden als Vertreter einer Gruppe pathogener Keime ausgewählt. Sie sollten verschiedenen Anforderungen gerecht werden [45]:

- Vorkommen in großer Anzahl im zu untersuchenden Material.
- Zuverlässige, schnelle, routinemäßige, quantitative Nachweismöglichkeit mit standardisierten Methoden.
- Zugehörig oder verwandt zu den zu untersuchenden pathogenen Spezies.
- Weitgehend ähnliche Eigenschaften zu den zu untersuchenden pathogenen Spezies.
- Gleiche oder geringfügig größerer Resistenz als die relevanten Krankheitserreger.

Außerdem dürfen Indikatorkeime auch im Falle eines Austretens in die Umgebung, wie es z.B. bei der Überprüfung von Praxisanlagen möglich wäre, kein umwelthygienisches Risiko darstellen [19].

Die Nutzung von **Salmonella senftenberg** W775 (H₂S negativ) als Indikatorkeim ist vielfach erprobt [47, 46, 19]. Dieser Keim wird aufgrund seiner guten Indikatoreigenschaften auch als Prüfkeim in der BioAbfV und im Arbeitsdokument „Biologische Behandlung von biologisch abbaubaren Abfällen“ der Europäischen Kommission genannt. *Salmonella senftenberg* hat außer seiner erhöhten Thermoresistenz den Vorteil, anhand seines natürlichen Markers (H₂S negativ) leicht von Kontaminationen unterschieden werden zu können.

Fäkalstreptokokken lassen sich als Indikatorkeim für die Produktprüfung einsetzen [48], da sie lebensmittelhygienische Bedeutung als Indikator für fäkale Verunreinigungen [15] haben, wobei man sie nur im Beisein von E.-coli als Fäkalindikatoren verwendet sollte [49].

Die gebräuchlichen Desinfektionsmittel sind gegen **E.-coli** gut wirksam. Kolibakterien werden daher auch als Indikatoren für die Wirksamkeit der Desinfektion genutzt [37].

Das thermostabile **Parvovirus** dient als „Indikatorvirus“ zur Überprüfung der hygienischen Wirksamkeit von Anaerobanlagen, die tierkörperbeseitigungspflichtige Abfälle (z.B. Speiseabfälle) verwerten [50]. Aufgrund seiner Thermostabilität und seiner Seuchenrelevanz kann das bovine Parvovirus als geeigneter Indikator für

Behandlungsverfahren betrachtet werden, deren wesentliche Komponente in der thermischen Inaktivierung besteht. Der Nachweis seiner Inaktivierung über drei bis vier Zehnerpotenzen erlaubt den Rückschluss, dass mit einem hinreichend großen Sicherheitsspielraum alle relevanten Tierseuchenerreger und fast alle anderen Bakterien und Viren inaktiviert worden sind [51].

Nach Böhm [52] besitzen **Spulwurmeier** zusammen mit Salmonellen und Enteroviren (**ECBO**) eine besondere epidemiologische Bedeutung bei der Klärschlammverwertung. Die hohe Widerstandsfähigkeit der Spulwurmeier macht sie nach Erfahrungen von Lang [45] und SCHWARZ [53] zu idealen Indikatorkeimen, um die Effizienz verschiedener Verfahren zur Abtötung parasitärer Dauerstadien zu überprüfen.

5. Hygienisierung mit Kalk

Bioabfälle müssen vor der Aufbringung auf landwirtschaftlichen Flächen in einen seuchenhygienisch unbedenklichen Zustand gebracht werden. Dies bedeutet die „Verminderung und Inaktivierung von pathogenen Mikroorganismen, Viren und parasitären Dauerformen“ [25]. Zur Erreichung dieses Ziels stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Neben den biologischen (Kompostierung) und thermischen Verfahren (Pasteurisierung) gibt es die Möglichkeit der chemischen Behandlung durch Zugabe von Kalk [26].

Kalk kann einerseits in der ungelöschten Form als Branntkalk (ungelöschter Kalk, Calciumoxid, CaO) und andererseits in der gelöschten Form als Kalkhydrat (gelöschter Kalk, Calciumhydroxid, Ca(OH)₂) oder als wässrige Suspension (Kalkmilch) eingesetzt werden. Die hygienisierende Wirkung beruht dabei in erster Linie auf der pH-Wert-Erhöhung. Unter diesen Milieubedingungen (pH > 12,5) kann eine Vielzahl von Mikroorganismen nicht überleben. Bei der Verwendung von Branntkalk kommt zu der pH-Wert-Erhöhung noch die exotherme, chemische Reaktion mit dem Wasseranteil des Substrats hinzu. Dies kann zu Temperaturerhöhungen auf ca. 70°C in den behandelten Substraten führen. Die inneren Bereiche können diese Temperatur über einen längeren Zeitraum auf hohem Niveau halten, so dass dies einer Pasteurisierung ähnelt [27].

Untersuchungen haben gezeigt, dass die pH-Wert-Erhöhung auf pH > 12,5 zwar zur Abtötung von Salmonellen ausreicht, nicht jedoch zur Inaktivierung der Entwicklungsfähigkeit von Spulwurmeiern führt. Zu diesem Zweck ist eine Temperaturerhöhung erforderlich [28, 33]. Daher wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhaben für alle Versuche Branntkalk verwendet.

5.1 Branntkalk (CaO)

Die natürliche Form von Kalk ist Kalkstein (Calciumcarbonat, CaCO₃). Zur Gewinnung von Branntkalk wird Kalkstein bei einer Temperatur zwischen 900 – 1200°C thermisch behandelt (gebrannt). Dabei wird CO₂ gem. Gl. 1 freigesetzt.



Die Qualität des Produkts ist abhängig von der Qualität des Kalksteins, der Brenntemperatur, der Brenndauer und der Art des Brennstoffs. Diese Qualität ist entscheidend für die exotherme Reaktion von Branntkalk mit Wasser (Gl. 2).



Gelöschter Kalk reagiert wiederum mit dem Kohlendioxid aus der Atmosphäre oder aus biologischer Aktivität zu Calciumcarbonat (Gl. 3) und schließt damit den CO₂-Kreislauf.



Anhand von Gl. 2 kann die Temperaturerhöhung theoretisch bei vollständiger Wärmenutzung, d.h. ohne Wärmeverluste, berechnet werden. Über verschiedene Untersuchungen an Klärschlämmen konnte empirisch eine reale Temperaturerhöhung abgeschätzt werden (Gl. 4). Dabei wird der CaO-Gehalt des Kalkes, die prozentuale Kalkzugabe bezogen auf den Klärschlamm und der TS-Gehalt des Klärschlammes berücksichtigt.

$$\Delta T = \frac{1160x\%CaO}{4,16(100\% - \%TS) + 0,25x\%TS + 0,3x\%CaO} \quad (4)$$

Die Gleichung (4) zeigt eine lineare Zunahme von ΔT mit der CaO-Zugabe. Für entwässerten Klärschlamm mit einem Trockensubstanzanteil zwischen 20 - 30% kann somit eine Temperaturerhöhung um 3,4 bis 3,9°C pro % CaO-Zugabe berechnet werden [29].

Neben der hygienisierenden Wirkung des Kalkes bei der Nachbehandlung von Klärschlamm lassen sich jedoch auch die nachfolgenden positiven Effekte erzielen [30 – 32]:

- Anhebung des Trockensubstanzgehaltes
- Verbesserung der bodenmechanischen Eigenschaften
- Verbesserung der Schlammstruktur.

6. Material und Methoden

6.1 Bakteriologische Untersuchungen

Vor der Kalkzugabe wurde dem jeweiligen Substrat eine definierte Bakterien-suspension zugegeben und danach, zur Bestimmung der Ausgangskonzentration, je zwei parallele Nullproben gezogen und die jeweilige Ausgangskeimzahl ermittelt. Zur Bestimmung der nativen Keimflora wurden die Substrate vorab auf ihren Gehalt an Salmonellen, *E.-coli*, Fäkalstreptokokken und *Clostridium perfringens* untersucht.

Nach der Probenahme erfolgte die Neutralisation des gekalkten Materials, um ein weiteres Einwirken des hohen pH-Wertes zu verhindern.

Für die quantitative Untersuchung wurde bei allen Keimarten eine Verdünnungsreihe hergestellt, bei der das zu untersuchende Material in einer verdünnten Natriumchlorid-Lösung eingewogen und mit einer Natriumdihydrogenphosphat-Lösung neutralisiert wurde. Aus dieser Stammlösung konnte eine dekadische Verdünnungsreihe angesetzt werden.

Zur quantitativen Keimbestimmung ist das MPN-Verfahren (Most-probable-Number) benutzt worden. Dies ist ein statistisch abgesichertes Schätzverfahren, mit dem in der Mikrobiologie Keimzahlbestimmungen durchgeführt werden.

Die Herstellung der Bakterien-suspension erfolgte, indem eine Kolonie der entsprechenden Bakterienart in Nährbouillon überführt und der Keimgehalt anschließend bestimmt wurde.

Für die Tenazitätsversuche mit Bakterien im großtechnischen Maßstab wurden Stahl- oder Holzkeimträger verwendet. Die verwendeten Stahlkeimträger hatten einen Durchmesser von 2cm und bestanden aus rostfreien Plättchen. Die Holzkeimträger bestanden aus 1mm starkem Pappelholz, das vor Gebrauch auf eine Größe von 20 x 10 mm zugeschnitten wurde. Vor Versuchsbeginn wurden die Keimträger mit Bakterien-suspension beimpft und in einem Brutschrank getrocknet (ausführliche Beschreibung in [55]).

6.2 Virologische Untersuchungen

Bei den Tenazitätsversuchen wurden die Viren auf Sandwichkeimträger in das schon mit dem Kalk vermischte Substrat eingebracht. Dazu sind jeweils drei Keimträger mit etwa 10g Kalk-Substrat-Gemisch in handelsübliche Zwiebelsäckchen (Maschenweite 1cm) eingepackt und dann mit diesen in das Gemisch eingebracht worden. Durch die porenhaltige Membran der Keimträger ist gewährleistet, dass alle Prozessabläufe während des Versuchs genauso auf die Viren einwirken, als wenn sie frei im Substrat vorliegen würden. Diese Methode hat den Vorteil, dass die Viren nicht in die Umwelt gelangen können.

Zur Virenvermehrung wurden Zellsuspensionen aus Zellkulturen hergestellt, so dass ein Zellrasen entstand. Auf diesen Zellrasen ist Virensuspension gegeben und anschließend bebrütet worden. Nach der Virenvermehrung wurden diese vom Zellrasen als Virensuspension abgelöst.

Der Virustiter wurde als kulturinfektiöse Dosis 50% (KID₅₀)/ ml im Endpunkt-Verdünnungsverfahren bestimmt. Dazu ist eine dekadische Verdünnungsreihe hergestellt, diese in mehreren Parallelproben auf einen Zellrasen gegeben und anschließend bebrütet worden.

Die Zellrasenauswertung erfolgte lichtmikroskopisch. Als Titer wird der positive dekadische Logarithmus derjenigen Verdünnung bezeichnet, bei der statistisch die Hälfte der Parallelproben reagiert (Angaben in $\log_{10} \text{KID}_{50} / \text{Testvolumen}$).

Bovines Parvovirus (Stamm HADEN) wurde auf primären bovinen embryonalen Lungenzellkulturen (BEL-Zellen) vermehrt, während das ECBO-Virus (Enteric Cytopathogenic Bovine Orphan, Stamm LCR-4) auf bovinen embryonalen Nierenzellkulturen vermehrt wird (ausführliche Beschreibung in [55]).

6.3. Parasitologische Untersuchungen

Eine bereits von LANG [45] und RAPP [56] benutzte „Gaze-Sack-Keimträgertechnik“ wurde in der modifizierten Form nach SCHWARZ [53] für die Tenazitätsversuche mit Ascarideneiern verwendet. Vor dem Einbringen in den Versuch wurden die Keimträger zusammen mit ca. 10g des behandelten Substrats in handelsübliche Zwiebelsäckchen (Maschenweite 1cm) verpackt. Durch die geringe Maschenweite des Gazematerials ist der Kontakt der Eier zum umgebenen Milieu während des Versuches gegeben, ohne dass diese ausgeschwemmt werden können.

Die Eier von *Ascaris suum* wurden auf Ihre Entwicklungsfähigkeit untersucht, in dem sie nach einer Bebrütung von 4 Wochen bei 29°C lichtmikroskopisch begutachtet worden sind. Als positiv gelten dabei die Eier, die das zweite Larvenstadium erreicht haben.

Zur Herstellung der Eisuspension wurden frische, weibliche Spulwürmer von mind. 15cm Länge verwendet. Nach Entfernung der Eier aus dem Uterus erfolgte eine Suspendierung in Wasser. Die durch lichtmikroskopische Auszählung errechnete Konzentration der Eier in der Suspension sollte ca. 1 Millionen Eier pro ml betragen (ausführliche Beschreibung in [55]).

6.4. Physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden

pH-Wert

Der pH-Wert wurde mittels pH-Meter in einer Substratsuspension (0,01 molare Calciumchlorid-Lösung, Verhältnis 1:10) bestimmt.

Temperaturmessung

Die Temperaturentwicklung im Kalk-Substratgemisch wurde während des gesamten Versuchs mittels eines elektrischen Thermoelementfühlers gemessen und

kontinuierlich aufgezeichnet. Dabei wurde ein Temperaturfühler im Kernbereich der Mischung und einer im Randbereich eingebracht.

Trockensubstanzgehaltsbestimmung (TS)

Der Trockensubstanzgehalt des Substrats wurde durch Trocknung einer definierten Menge bei 105°C gem. DIN 38414 S2 bestimmt.

CaO-Bestimmung

Die CaO-Konzentration wurde komplexometrisch in Anlehnung an die DIN EN 196-2 in der Trockensubstanz bestimmt.

Ammoniumbestimmung

Die Ammoniumbestimmung erfolgte in Anlehnung an die DIN 38406 E5.

Ammoniakmessung

Der Ammoniakgehalt in der Gasphase wurde mittels eines handelsüblichen Dräger-Röhrchens gemessen.

6.5 Laborversuche

Die Durchführung der Vorversuche zur Grundlagenermittlung für die Hauptversuche erfolgte im Labormaßstab. Dazu wurden die homogene Vermischung der Substrate mit Branntkalk, der Temperatur- und pH-Wert-Verlauf sowie die benötigte Branntkalkmenge für die Hauptversuche ermittelt. Als Mischaggregat diente ein Hobart-Labormischer (Paddelrührer) mit einer Behandlungskapazität von 1 kg.

6.6 Versuche im halbtechnischen Maßstab

Für die halbtechnischen Versuche war vorgesehen, dass auch für die Praxisversuche angedachte, kontinuierliche Mischaggregat einzusetzen. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass einige Einsatzmaterialien von so heterogener Konsistenz waren (Panzeninhalt, Rindermist), dass sie zur Verstopfung in der Excenterschnecke führten. Außerdem bestand bei den genannten Substraten die Gefahr des Eintrags von Steinen, die zu einer Beschädigung des Aggregates geführt hätten. Damit in den halbtechnischen Versuchen trotzdem die Einsatzmöglichkeit von Branntkalk zur einwandfreien Hygienisierung für alle angedachten Substrate unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt werden konnte, wurden als Alternative diskontinuierliche Mischer verwendet, und zwar

Mischer 1: Freifallmischer
Drehtrommel mit eingebauten Schikanen
 $V = 145 \text{ l}$

Mischer 2: Chargenmischer
Ein Schleuderwerk mit 2 Pflugscharschaufeln und eingebautem
Messerkopf
 $V = 130 \text{ l}$; Nutzvolumen = 40 – 90 l;
Messerkopf: Hakenmesser; 1500 - 3000 U/min

Der Mischer 2 besteht aus einer horizontalen Trommel mit eingebautem Schleuderwerk und pflugscharförmigen Mischelementen. Zum Aufschließen von vorhandenen oder sich aufbauenden Agglomeraten ist in die Mischtrommel ein separat angetriebener Mehrstufen-Messerkopf eingebaut (Bild 1, Anhang I).



Bild 1: Aufbau des Mixers 2 (Chargenmischer)

In den halbtechnischen Versuchen wurde 10 - 20 kg Substrat, je nach Volumen des eingesetzten Substrats, manuell in das jeweilige Mischaggregate eingebracht und mit der erforderlichen Branntkalkmenge vermischt. Die Aufenthaltszeit im Mischer 1 betrug 10min., um eine optisch homogene Mischung zu erzeugen. Der Mischer 2 wurde ca. 2 min bei 80-100 U/min und wahlweise mit dem Messerkopf bei 1500 U/min betrieben.

Das Kalk-Substrat-Gemisch wurde anschließend in 60l Plastikfässer umgefüllt, damit der Temperaturverlauf während des gesamten Versuches verfolgt werden konnte. Ein Temperaturfühler wurde im Kernbereich und einer im Randbereich (3-10cm Tiefe) des Substrates eingebracht. Der pH-Wert wurde in regelmäßigen Zeitabständen ermittelt.

Für die Tenazitätsversuche wurden die Bakterien als Suspension direkt mit den Substraten vermischt, die Askarideneier und Viren wurden nach dem Mischen in Keimträgern zugegeben.

Die Probenahme erfolgte aus dem Kernbereich und Randbereich der jeweiligen Mischung.

6.7 Praxisversuche

Nach Beendigung der halbtechnischen Versuche wurden die dort gewonnen Erkenntnisse auf die Praxisversuche übertragen. Zu diesem Zweck wurde das kontinuierlich zu beschickende Mischaggregat, Mischer 3 (Bild 2 u. 3) zunächst direkt hinter die Siebbandpresse einer Kläranlage in Südbaden geschaltet und der anfallende Klärschlamm kontinuierlich mittels Förderband über die Mischstrecke geführt.

Als zweites Substrat für die Praxisversuche wurden Gärrückstände aus der Schneckenpresse einer mesophilen Vergärungsanlage (Nordrhein-Westfalen) eingesetzt, da das ursprünglich angedachte Substrat Panseninhalt zu Verstopfungen und Beschädigungen der Excenterschneckenpumpe geführt hätte. Das Substrat besaß eine pumpbare Konsistenz, so dass es kontinuierlich in das Mischaggregat, Mischer 3, gefördert werden konnte.

Mischer 3: Paddelmischer mit nachgeschalteter Excenterschneckenpumpe.
Durchsatz: 0,3 – 1 m³/h

Das Mischaggregat besteht im oberen Teil aus zwei gegeneinanderlaufenden Paddelwellen, die eine Brückenbildung von Substrat und Kalk verhindern sollen. Unterhalb dieses Paddelmischers ist eine Schnecke angeordnet, die in eine Excenterpumpe mündet (Bild 2). Die Pumpe ist mit einer Steuereinheit ausgerüstet, die einen Niveau-geregelten Betrieb ermöglicht. Am Austrag der Excenterpumpe ist ein Temperaturfühler (Pt 100) installiert, der direkten Kontakt mit dem Fördermedium hat.

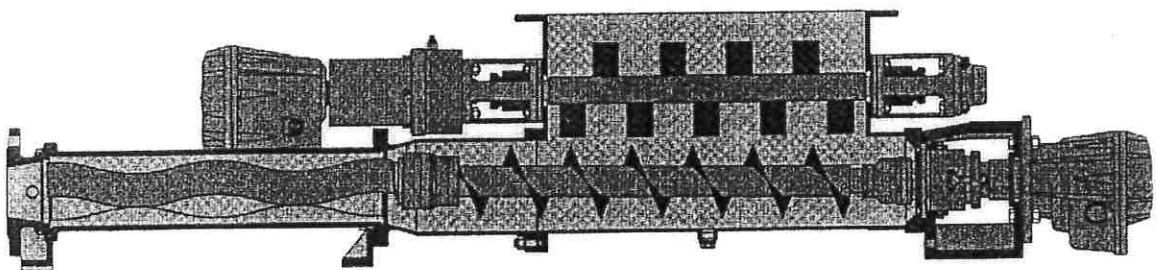


Bild 2: Schemazeichnung des Mischers 3

Das Mischaggregat wurde kontinuierlich mit dem entsprechenden Substrat (Klärschlamm aus einer Siebbandpresse bzw. Gärrückstand aus einer Schneckenpresse) beschickt. Es wurde die jeweils maximal mögliche Beschickungsmenge von 450 – 500 kg/h eingestellt. Die Dosierung des Branntkalks erfolgte temperaturabhängig aus einem handelsüblichen Silo (5 m³) über einen

Flachbodenaustrag mit flexiblem Feindosierer direkt in den Zulaufstrom des Substrates (Bild 3).

Die Substrat- und Kalkzuführung wurde nach dem Füllstand geregelt, so dass die Durchsatzmenge in Abhängigkeit von den zugeführten Stoffströmen variiert wurde. Dabei wurde der Zufluss des Substrates immer konstant gehalten und die Kalkmenge für die einzelnen Versuchseinstellungen variiert. Somit stand ein Mischvolumen von 50 l zur Verfügung.

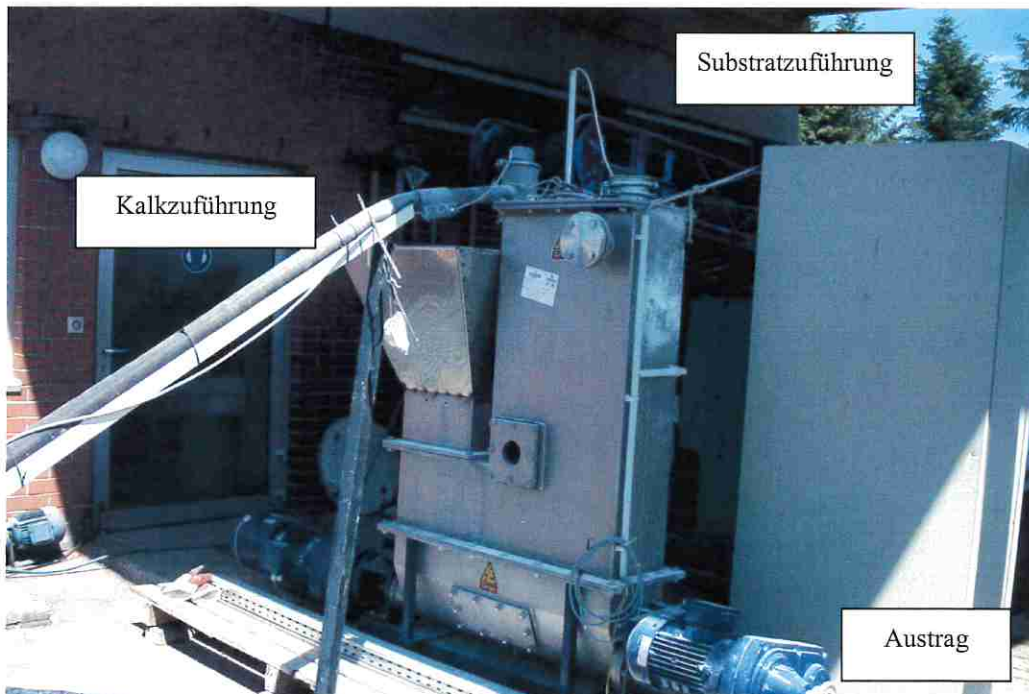


Bild 3: Aufbau des Praxisversuches mit Kalkzuführung über einen Feindosierer (Spiraldosierer) und Substratzuführung über ein Förderband

Das Substrat-Kalk-Gemisch wurde in einer Radladerschaufel aufgefangen und zu einem Haufwerk aufgetürmt. Der Temperaturverlauf wurde in der ausgetragenen Mischung während des gesamten Versuches automatisch gemessen, wobei immer ein Temperaturfühler im Kernbereich und einer im Randbereich (2-10cm Tiefe) angebracht wurde. Die pH-Wert-Bestimmung erfolgte in regelmäßigen Zeitabständen.

Für die Tenazitätsversuche wurden die Bakterien auf Holz- und Metallkeimträgern, die Askarideneier in Keimträgern nach SCHWARZ [53] und die Viren in Sandwichkeimträgern in die Mischung eingebracht.

6.8 Substrate

Als Substrate für die halbtechnischen Versuche wurden Klärschlamm, Gärrückstand und Panseninhalt ausgewählt.

Der Klärschlamm stammte aus einer Kläranlage in Süddeutschland und wurde durch eine Siebbandpresse auf einen Trockensubstanzgehalt von 18 - 20% gebracht; weitere Zusätze waren nicht vorhanden.

Der Panseninhalt stammte aus einem Schlachthof Nordwürttembergs und hatte je nach Leistung des Entwässerungsaggregates einen Trockensubstanzanteil von 16% oder 28%.

Der Gärrückstand wurde von einer Biogasanlage in Bayern zu Verfügung gestellt. Er hatte nach der Entwässerung einen Trockensubstanzgehalt von 25% bzw. 30%. Die Biogasanlage verwertet Bio- und Speiseabfälle und wird im thermophilen (55-60°C) Temperaturbereich betrieben.

Für die Praxisversuche wurden Klärschlamm und Gärrückstand ausgewählt, da die Vorversuche gezeigt hatten, dass mit Panseninhalt, ohne eine gezielte Vorbehandlung des Substrats, ein Betrieb des Mischers 3 nicht möglich war (s. Kap. 6.7). Der Klärschlamm stammt aus einer Kläranlage in Südbaden und wurde durch eine Siebbandpresse auf einen Trockensubstanzgehalt von 18 - 20% gebracht; weitere Zusätze waren nicht vorhanden. Der Ammoniumgehalt des Klärschlammes lag bei 0,6 – 0,8 % bzw. auf den Trockensubstanzgehalt.

Der Gärrückstand stammte aus einer mesophilen (33 – 37°C) Biogasanlage in NRW und wurde mittels Schneckenpresse auf einen Trockensubstanzgehalt von 17 – 19% gebracht. Der Ammoniumgehalt des Gärrückstandes lag bei 1,8 – 2,2 % bzw. auf den Trockensubstanzgehalt.

Mit dem Substrat Bioabfall aus Haushalten wurden zwei Versuchsreihen im Labormaßstab durchgeführt. Die ersten Versuche wurden mit unbearbeitetem Material durchgeführt, in den weiteren Versuchen wurde das inhomogene Material zur besseren Verarbeitung in einer Getreidemühle zerkleinert.

6.9 Keime

Für die Versuche wurden die folgenden Keime verwendet:

Halbtechnische- und Praxisversuche

- Salmonella senftenberg (H₂S positiv), DSM¹10062, SIT²100
- Salmonella senftenberg (H₂S negativ), DSM 10062, SIT 112
- Enterococcus faecium, DSM 2146, SIT 13
- Bovines Parvovirus (BPV, Stamm Haden)
- Askarideneier (Ascaris suum)

Nur halbtechnische Versuche

- Escherichia coli, DSM 498, SIT 63
- Clostridium perfringens, DSM 765
- ECBO (enteric cytopathogenic bovine orphan)

¹ Deutsche Stammsammlung für Mikroorganismen

² Stammsammlung des Instituts für Umwelt- und Tierhygiene(460)der Universität Hohenheim

6.10 Branntkalk (CaO)

Für alle Versuche wurde ein handelsüblicher Weißfeinkalk (Baukalk CL 90) mit einem Calciumoxidgehalt von 93,7% verwendet. Die Reaktivität des Kalkes, bestimmt mittels Nasslöschkurve nach EN 459-2, lag bei einem t_{60} -Wert von 2,5 Minuten und bei einer maximalen Temperatur von $T_{\max} = 73^{\circ}\text{C}$. Die Schüttdichte betrug 0,95 kg/l und die Siebanalyse nach DIN 4188 ergab folgende Verteilung:

0,63 mm	-	0%
0,1 mm	-	6%
0,063 mm	-	18%
0,04 mm	-	29%

7. Ergebnisse

7.1 Hygienische Beschaffenheit der Substrate

Die ausgewählten Versuchssubstrate wurden auf ihren nativen Keimgehalt an Salmonellen, Fäkalstreptokokken, *E-coli* und *Clostridium perfringens* (Sporen und vegetative Form) untersucht.

Tab.5: Darstellung des nativen Keimgehaltes (KBE/g) in unterschiedlichen Klärschlammchargen

	E.-coli	FKS	Salm.	Clost.perf. Sporen	Clost.perf. veg.
Charge 1	9,30E+03	1,50E+04	neg.	4,60E+02	4,30E+03
Charge 2	2,30E+05	2,30E+05	qual. pos.	3,20E+03	2,30E+03
Charge 3	4,30E+04	2,30E+04	neg.	7,60E+02	1,50E+03
Mittelwert	9,41E+04	8,93E+04		1,47E+03	2,70E+03

Tab.6: Darstellung des nativen Keimgehaltes (KBE/g) in unterschiedlichen Panseninhaltschargen

	E.-coli	FKS	Salm.	Clost.perf. Sporen	Clost.perf. veg.
Charge 1	9,20E+00	3,60E+04	neg.	4,30E+02	2,30E+03
Charge 2	2,30E+05	2,30E+04	2,30E+04	2,10E+01	4,30E+02
Charge 3	1,50E+05	2,10E+05	neg.	2,30E+01	2,3E+02
Charge 4	1,50E+04	4,30E+05	neg.	qual.pos.	1,50E+01
Charge 5	1,50E+04	4,30E+05	qual. pos.	qual.pos.	1,50E+01
Charge 6	9,30E+02	9,30E+04	qual. pos.	1,50E+02	4,30E+03
Mittelwert	6,58E+04	2,05E+05		1,05E+02	1,22E+03

Tab.7: Darstellung des nativen Keimgehaltes (KBE/g) in unterschiedlichen Gärrückstandschargen

	E.-coli	FKS	Salm.	Clost.perf. Sporen	Clost.perf. .veg
Charge 1	n.n.	4,30E+02	neg.	4,30E+03	9,30E+02
Charge 2	n.n.	2,30E+02	neg.	neg.	neg.
Charge 3	n.n.	9,30E+03	neg.	2,30E+02	9,30E+01
Mittelwert	n.n.	3,32E+03		1,51E+03	3,42E+02

FKS: Fäkalstreptokokken

Salm.: Salomellen

Clost.perf.veg.: Vegetative Clostridien perfringens

qual.pos.: qualitativer Nachweis positiv, quantitativer Nachweis negativ

n.n. nicht (mehr) nachweisbar

KBE/g: Koloniebildende Einheiten

Anhand der Tabellen 5 –7 ist ersichtlich, dass die untersuchten Keime in sehr unterschiedlichen Konzentrationen in den jeweiligen Substraten und Chargen vorkommen.

7.2 Vorversuche

In den Vorversuchen wurde die homogene Vermischung der Substrate mit Branntkalk, der Temperaturverlauf, der pH-Wert und die voraussichtlich benötigte Kalkmenge für die Hauptversuche ermittelt. Dabei wurde versucht, eine Temperaturerhöhung auf ca. 50°C zu erreichen.

Der **Bioabfall aus Haushalten** mit einem TS-Gehalt von 37% und einem pH-Wert von 5,3 wurde sowohl unzerkleinert als auch mittels Getreidemühle zerkleinert mit Branntkalk (0,1 – 0,3 kg Kalk / kg TS) gemischt. Dabei konnte jedoch in beiden Fällen keine homogene Mischung erzielt werden. In allen Versuchen lagen schon optisch sichtbar gut durchmischte Bereiche neben weniger gut durchmischten vor, so dass keine weiteren Versuche mit diesem Substrat vorgenommen wurden.

Der verwendete **Klärschlamm** wies zunächst einen Trockensubstanzgehalt von 22% und einen pH-Wert von 8 auf. Mit diesem Substrat wurden Versuche im Labormischer und im Mischer 1 durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass zur Erreichung einer Mindesttemperatur von 50°C im Labormischer eine Kalkmenge von 0,9 kg / kg TS benötigt wurde. Die gleiche Kalkmenge ergab jedoch im Mischer 1 eine Temperaturerhöhung auf 58°C (Abb. 1). Der pH-Wert der Mischung lag in beiden Fällen >12,5 und wurde auch über den gesamten Beobachtungszeitraum auf diesem Niveau gehalten. Eine Erhöhung der Branntkalkmenge auf 1,1 kg / kg TS ergab keine wesentliche Temperatursteigerung mehr in beiden Mixern.

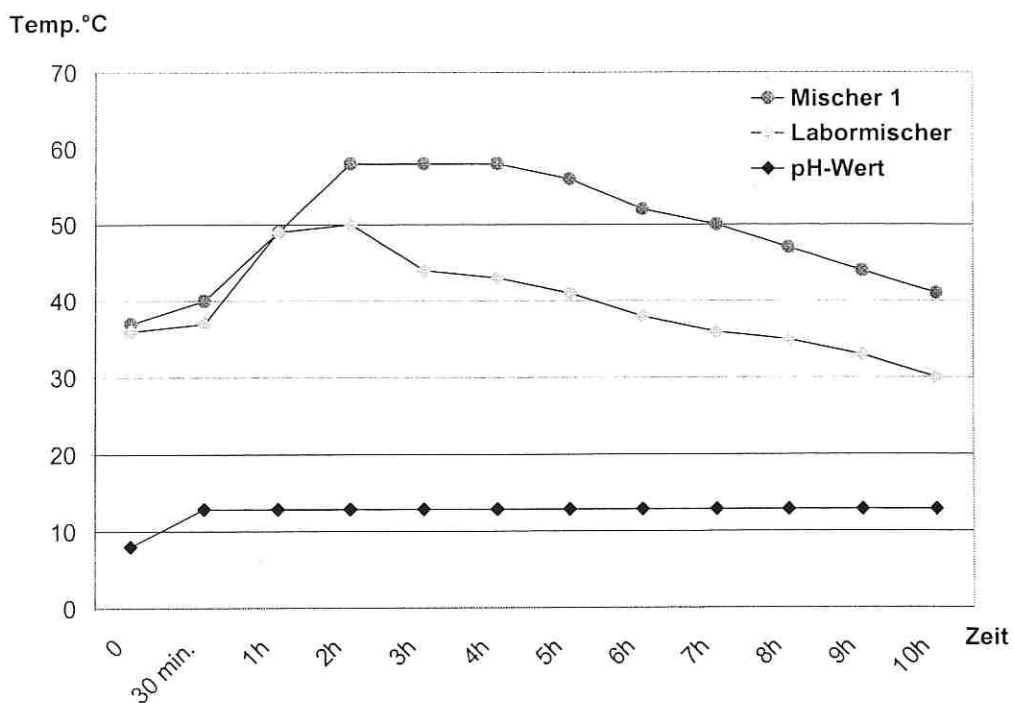


Abb. 1: Temperaturverlauf und pH-Wert in Klärschlamm mit 0,9 kg Kalk / kg TS

Bei Versuchen mit Klärschlamm, der einen Trockensubstanzgehalt von 18% aufwies, zeigte sich sowohl im Labor- als auch im Mischer 1 eine ungleichmäßige Vermischung mit Kalk. Ein Teil des durch die Mischbewegungen schmierig gewordenen Klärschlammes blieb an den Mischorganen des jeweiligen Mixers kleben. Im Mischer 1 kam es dabei zusätzlich zur vermehrten Ballenbildung. Die gebildeten Substratballen hatten einen Durchmesser von ca. 10cm.

Das Substrat **Panseninhalt** mit einem TS-Gehalt von 28% wurde im Labormischer mit drei unterschiedlichen Kalkzugaben 0,7 kg, 0,9 kg und 1 kg Kalk / kg TS gemischt. Dabei wurde festgestellt, dass sich das langfaserige Substrat immer wieder in den Mischorganen verhärtete. Nur durch manuelle Nachhilfe konnte ein homogenes Gemisch erzeugt werden.

Mit 0,7 kg Kalk / kg Trockensubstanz wurde nach drei Stunden eine maximale Temperatur von 42°C gemessen, mit 0,9 kg Branntkalk pro kg Trockensubstanz 57°C und mit 1 kg CaO/kg TS nach zwei Stunden eine maximale Temperatur von 69°C. Der pH-Wert lag während des gesamten Untersuchungszeitraums über pH 12 (Tab. 8).

Tab.8: Temperaturverlauf und pH-Wert in Panseninhalt mit unterschiedlichen Kalkzugaben im Labormischer

	Zeit	0	30 min	1h	2h	3h	4h	5h	24h
0,7 kg Kalk / kg TS	Temp. °C	20	30	33	39	42	38	30	22
	pH-Wert	8	12	12,2	12,3	12,6	12,4	12,3	12,1
0,9 kg Kalk / kg TS	Temp. °C	20	30	34	46	57	53	50	22
	pH-Wert	8	12,6	12,8	12,7	12,7	12,5	12,6	12,6
1 kg Kalk / kg TS	Temp. °C	20	32	40	69	62	50	45	23
	pH-Wert	8	12,9	13	12,9	13	12,8	12,8	12,7

Bei den Versuchen im Mischer 1 kam es zur Bildung Zusammenballungen, die einen Durchmesser bis zu 10 cm aufwiesen. Diese bestanden außen aus einem schmierigen Kalk-Substrat-Gemisch und im Kern aus unvermischem Panseninhalt. Nach drei Stunden entstand in diesen Ballen ein fauliger Geruch und nach ein paar Tagen kam es zur Schimmelbildung.

Mit **Gärrückstand**, der einen TS-Gehalt von 25% und einen pH-Wert von 8 aufwies, wurden zunächst Versuche im Labormischer mit 0,1 - 0,5 kg Kalk / kg TS durchgeführt. Dabei kam es zu einer maximalen Temperaturerhöhung auf 29°C. Die Ergebnisse sind in Tab. 9 dargestellt.

Weitere Versuche mit 0,8 kg und 1 kg Kalk / kg TS ergaben max. Temperaturen von 46°C bzw. 51°C nach einer Reaktionszeit von 5 Stunden im Labormischer. Versuche mit gleichen Kalkmengen, die im Mischer 2 durchgeführten wurden, ergaben max. Temperaturen, die um 11°C bzw. 7°C höher lagen.

Tab.9: Temperaturverlauf und pH-Wert in Gärrückstand mit unterschiedlichen Kalkzugaben im Labormischer

	Zeit	0	30 min	1h	2h	3h	24h
0,1 kg Kalk / kg TS	Temp. °C	19	20	23	23	21	19
	pH-Wert	8	12,7	12,8	12,8	13	12,6
0,2 kg Kalk / kg TS	Temp. °C	19	20	23	23	21	19
	pH-Wert	8	12,8	13	12,8	13,4	13,2
0,3 kg Kalk / kg TS	Temp. °C	19	24	25	24	22	20
	pH-Wert	8	12,9	13	12,9	13	12,7
0,5 kg Kalk / kg TS	Temp. °C	19	26	29	25	23	20
	pH-Wert	8	12,9	13	12,8	13,4	12,9

Die Mischversuche mit dem Substrat **Rindermist** wurden mit drei unterschiedlichen Substratchargen durchgeführt. In den Versuchen I und II wurde ein sehr strohhaltigen Substrat (Strohstücke bis zu 15cm lang) verwendet. Der TS-Gehalt lag bei 32%. In einem dritten Versuch wurde ein bereits in Rotte befindlicher Mist aus einem Ziegenlaufstall mit einem TS-Gehalt von 29% eingesetzt. Das Material ließ sich in allen Fällen nicht im Labormischer vermischen.

Bei der Verwendung der ersten beiden Rindermistchargen in dem Mischer 2 konnte der strohige Anteil des Substrats von dem Messerkopf weder bei 1500 noch bei 3000 U/min genügend zerkleinert werden. Der Strohanteil des Substrates verharrte sich immer wieder an den Paddelmischern, so dass keine homogene Vermischung stattfand, es verblieben sogar Reste von unvermischem Branntkalk im Mischer. Im Endprodukt lagen gut vermischte und nicht vermischte Anteile vor.

Im dritten Versuch, mit dem bereits in Rotte befindlichen Mist, konnte erst bei hoher Drehzahl des Messerkopfes im Mischer 2 (3000 U/min, 5 Minuten) das Substrat genügend zerkleinert werden, um eine homogene Vermischung zu erzielen. Bei diesem Versuch und in den gut vermischten Anteilen der beiden anderen Versuche I und II konnte ein pH-Wert von 12,9 und maximale Temperaturen von 65°C bei einer Kalkzugabe von 0,9 kg / kg TS erreicht werden.

7.3 Versuche im halbtechnischen Maßstab

Die Vorversuche haben gezeigt, dass sich für den halbtechnischen Maßstab die Substrate Klärschlamm, Panseninhalt und Gärrückstand eignen. Mit den Substraten Bioabfall aus Haushalten und Rindermist lassen sich keine sicheren homogenen Mischungen herstellen, da immer die Gefahr besteht, dass unvermischte Zusammenballungen auftreten.

7.3.1 Klärschlamm

Für die Tenazitätsversuche mit **Askarideneiern** wurden mehrere Versuche mit 0,45 kg, 0,9 kg und 1,1 kg Kalk / kg TS durchgeführt. Der Trockensubstanzanteil des verwendeten Klärschlammes betrug 22%. In allen Fällen konnte eine homogene Mischung erzielt werden.

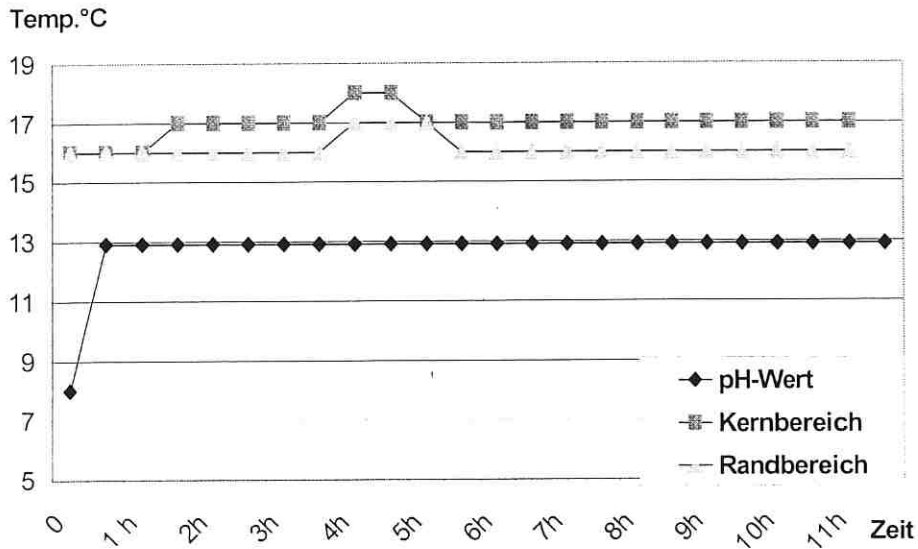


Abb. 2: Temperaturverlauf und pH-Wert in Klärschlamm mit 0,45kg Kalk / kg TS

Bei der Verwendung von 0,45 kg Kalk / kg TS wurde eine max. Temperaturerhöhung von 2°C gemessen. Der pH-Wert wurde über 4 Wochen ermittelt und betrug nach der Kalkzugabe konstant pH 12,9 (Abb. 2). Nach drei Wochen wurden im Randbereich 28% und im Kernbereich 18% entwicklungsfähige Eier ausgezählt. Nach 8 Wochen konnten im Kernbereich des Substrates keine entwicklungsfähigen Askarideneier mehr nachgewiesen werden (Abb. 3).

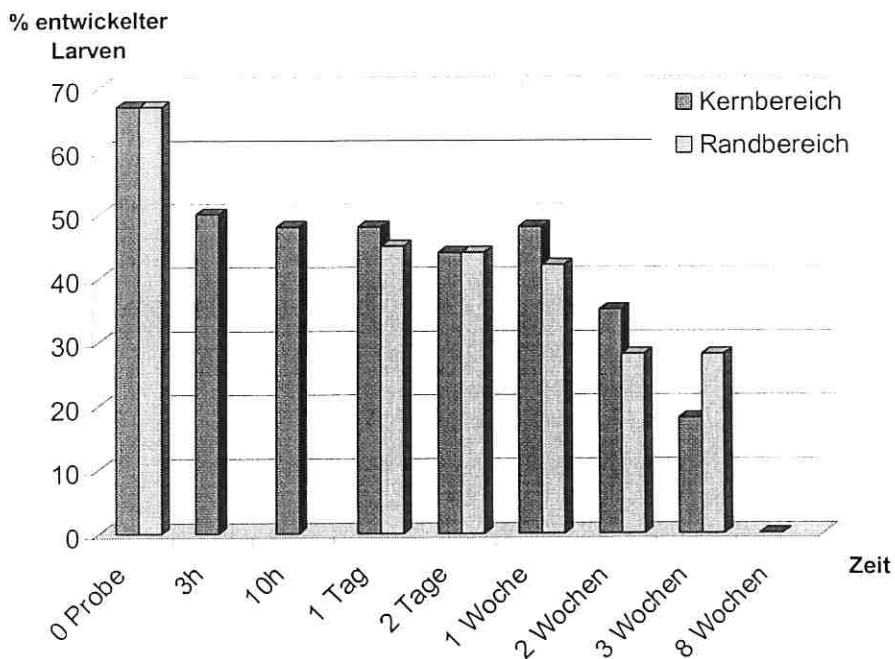


Abb. 3: Entwicklungsfähigkeit von Askarideneiern in Klärschlamm mit 0,45kg Kalk / kg TS

Dies bedeutet, dass sich allein durch den pH-Effekt die Askarideneier in einem Zeitraum von 3 bis 8 Wochen vollständig inaktivieren lassen, ohne dass eine Temperaturerhöhung erfolgen muss.

Bei der Verwendung höherer Kalkmengen wird der Temperatureffekt deutlich. So stieg bei einer Kalkzugabe von 0,9 kg Kalk / kg TS nach 2 ½ Stunden die Temperatur im Kernbereich auf über 50°C an, die maximal erreichte Temperatur betrug 57°C. Im Randbereich wurde eine maximale Temperatur von 45°C erreicht. Im Kernbereich der Mischung erfolgte innerhalb von 5 Stunden eine Reduzierung der Entwicklungsfähigkeit der Askarideneier von 68% auf 7%, nach 10 Stunden waren keine lebenden Askarideneier mehr nachweisbar. In den Randbereichen erfolgte eine Reduzierung der Entwicklungsfähigkeit auf 34% innerhalb von 24 Stunden.

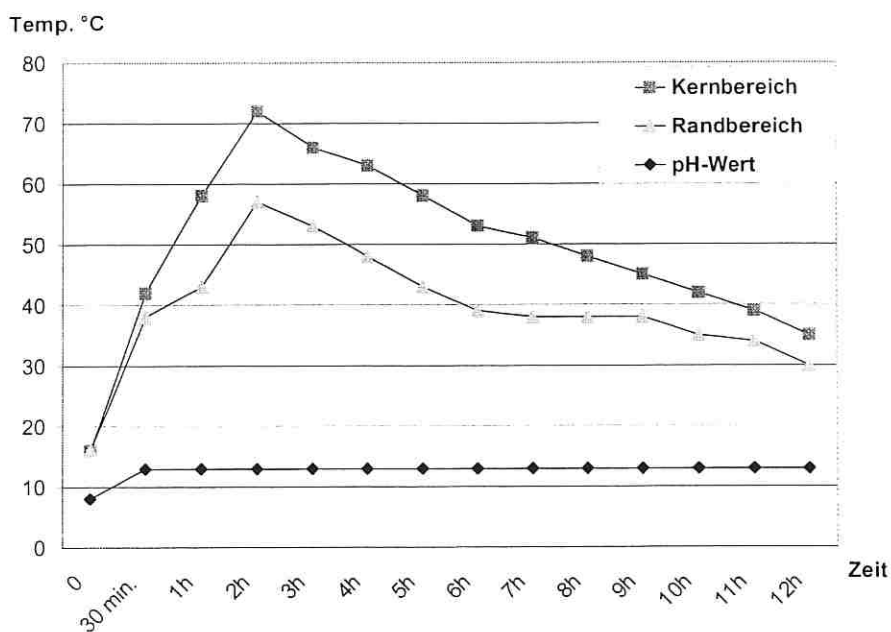


Abb. 4: Temperaturverlauf und pH-Wert in Klärschlamm mit 1,1kg Kalk / kg TS

Bei einer Kalkzugabe von 1,1 kg Kalk / kg TS wurde im Kernbereich der Mischung über einen Zeitraum von 6 Stunden eine Temperatur über 50°C gemessen. Nach 2 ½ Stunden wurde der höchste Temperaturwert mit 71°C im Kernbereich und 58 °C im Randbereich gemessen. Der pH-Wert lag bei 12,9 und blieb während des gesamten Zeitraums konstant (Abb. 4). Sowohl im Kernbereich als auch im Randbereich wurden nach 2 h, also etwa bei Erreichen der max. Temperaturen, bereits weniger als 3% entwicklungsfähige Askarideneier festgestellt (Abb. 5).

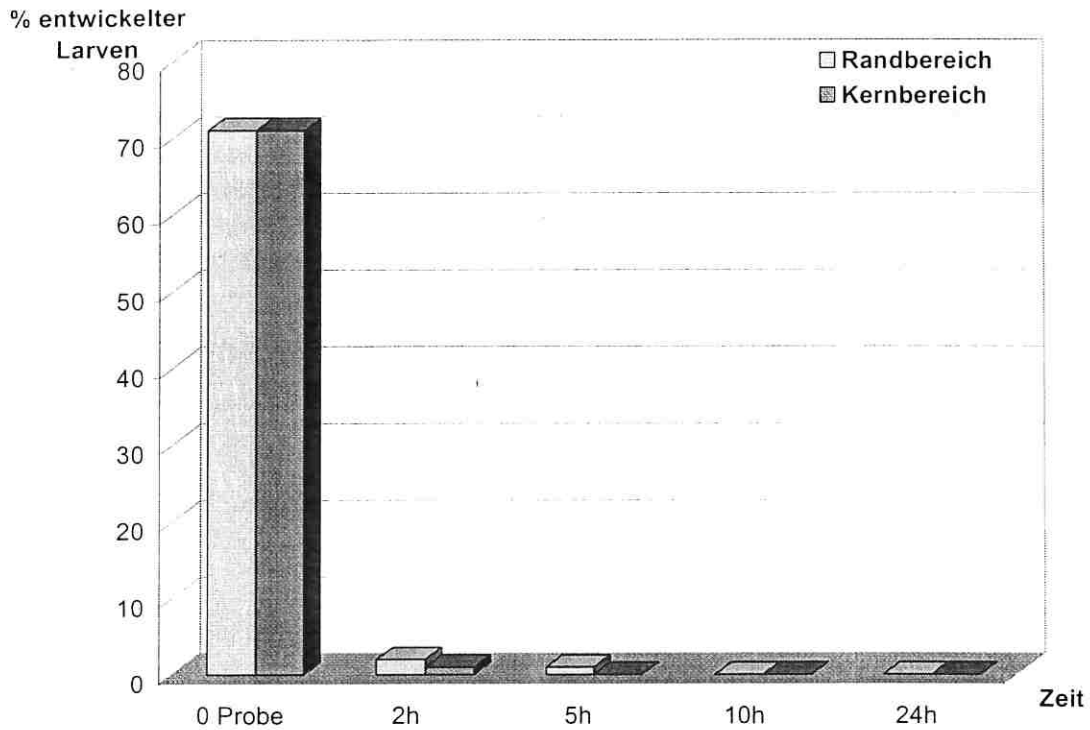


Abb. 5: Entwicklungsfähigkeit von Askarideneiern in Klärschlamm mit 1,1kg Kalk / kg TS

Die Tenazitätsuntersuchungen von **Viren** wurden mit 0,9 kg und 1,1 kg Kalk / kg TS bei gleichen Temperatur- und pH-Wert-Profilen (Abb. 6), wie sie auch bei den Tenazitätsversuchen mit Askarideneiern gefunden wurden, durchgeführt.

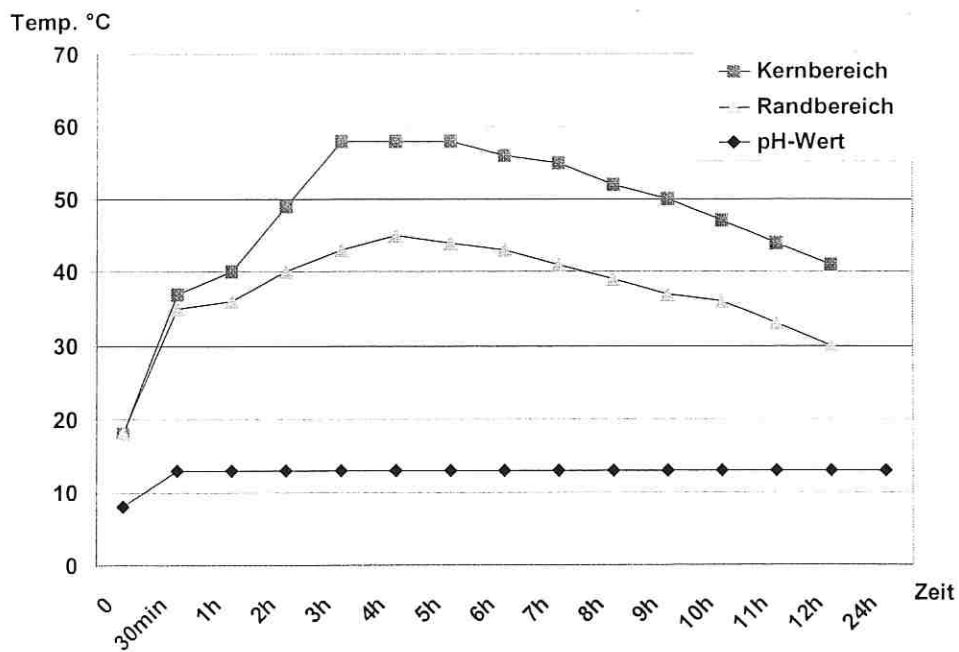


Abb. 6: Temperaturverlauf und pH-Wert in Klärschlamm mit 0,9kg Kalk / kg TS

Im Kern- und Randbereich der Mischung erfolgte eine Reduzierung des Keimgehaltes von **BPV** innerhalb von 10 Stunden um 3 Zehnerpotenzen. Von einem Ausgangswert von $2,3 \times 10^5$ KID₅₀/ml auf $1,77 \times 10^2$ KID₅₀/ml. Man erkennt in Abb. 7, dass die größte Abnahme im Bereich 2 – 3 h erfolgt, also einhergeht mit einem starken Temperaturanstieg (Abb. 6).

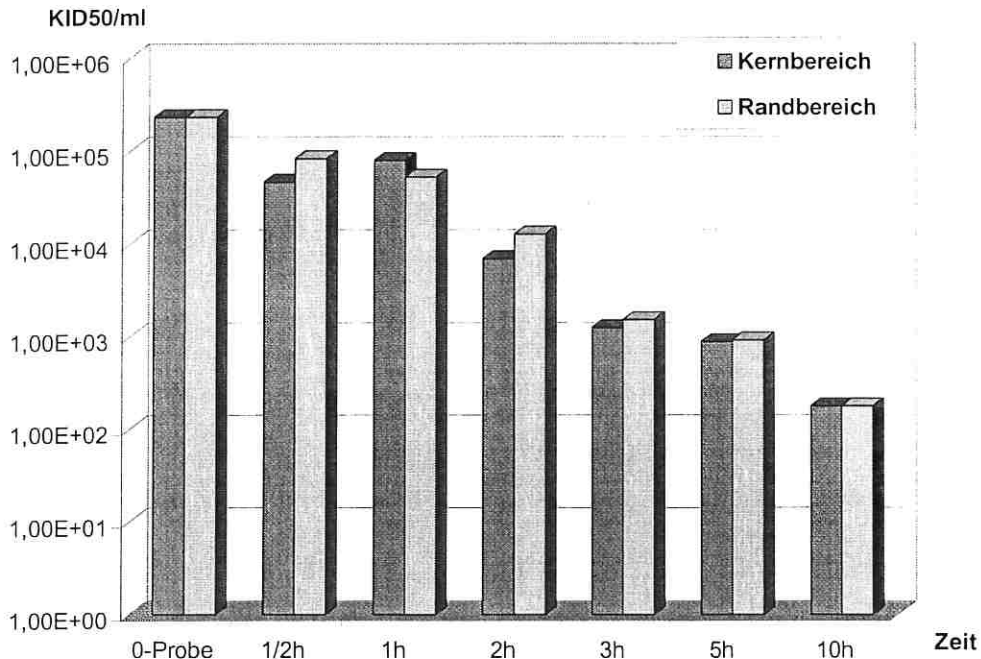


Abb. 7: Reduzierung des Keimgehaltes an **BPV** in Klärschlamm mit 0,9kg Kalk / kg TS

Bei der Zugabe von 1,1 kg Kalk / kg TS ergibt sich insbesondere im Kernbereich eine deutliche schnellere Reduzierung des Keimgehaltes von BPV in den ersten 2 h, also mit Erreichen der max. Temperatur (Abb. 4). Im Kernbereich des Substrates erfolgte so eine Reduzierung des Keimgehaltes innerhalb von 2 h um 5 Zehnerpotenzen. Im Randbereich erfolgte innerhalb von drei Stunden eine Reduzierung des Keimgehaltes an BPV um 4 Zehnerpotenzen.

Bei den **ECBO-Viren** wurde schon mit einer Kalkzugabe von 0,9 kg / kg TS eine drastische Keimreduzierung innerhalb der ersten 30 Minuten erreicht. So wurde sowohl im Kern- und Randbereich eine Reduzierung um 5 Zehnerpotenzen bis zur Nachweisgrenze $5,60 \times 10^1$ KID₅₀/ml nachgewiesen (Tab. 10).

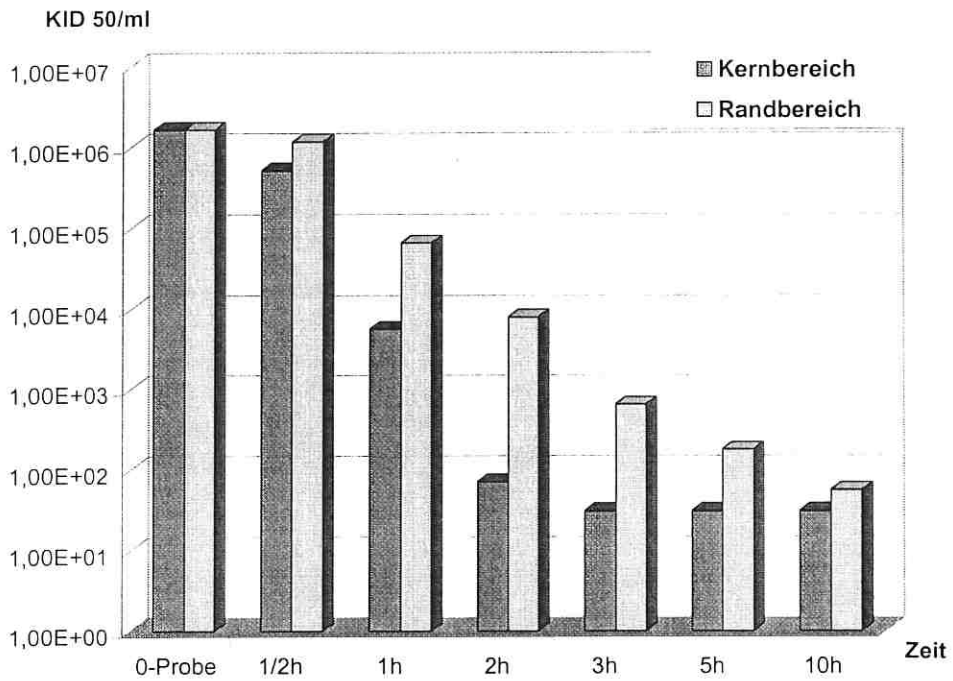


Abb. 8: Reduzierung des Keimgehaltes an **BPV-Viren** in Klärschlamm mit 1,1kg Kalk / kg TS

Tab. 10: Reduzierung des Keimgehaltes an **ECBO-Viren** in Klärschlamm mit 0,9 kg Kalk / kg TS

Zeit	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml
VERSUCH I		
0-Probe	3,16E+06	3,16E+06
30min.	n.n.	n.n.
1h	n.n.	n.n.
2h	n.n.	n.n.
VERSUCH II		
0-Probe	6,16E+06	6,16E+06
30min.	n.n.	n.n.
1h	n.n.	n.n.
2h	n.n.	n.n.

n.n. : nicht nachweisbar bis 5,60E+01
 KID₅₀/ml: kulturinfektiöse Dosis 50%

Mit den **bakteriellen Keimen** *Salmonella senftenberg*, Fäkalstreptokokken (*Streptococcus faecium*), *E.-coli* und Clostridium perfringens-Sporen wurden Versuche mit Kalkzugaben von 0,2 kg, 0,9 kg und 1,1 kg pro kg Trockensubstanz durchgeführt.

Bei den Versuchen mit 0,2 kg Kalk / kg TS erfolgte im Kernbereich des Substrates nach einer Stunde eine Temperaturerhöhung von 15°C auf 26°C. Im Randbereich wurde nach einer Stunde eine Temperatur von 23°C gemessen. Der ermittelte pH-Wert lag während des gesamten Untersuchungszeitraumes (7 Tage) bei pH 12,9. Im Kernbereich des Substrats erfolgte eine Reduzierung von *E.-coli* nach 5 Stunden um 5 Zehnerpotenzen, im Randbereich sind diese Keime nach 10 Stunden nicht mehr nachweisbar (Nachweisgrenze $0,36 \times 10^1$ KBE /g). Eine Reduzierung der Fäkalstreptokokken um 5 Zehnerpotenzen erfolgt nach 48 Stunden im gesamten Substrat.

Tab. 11: Reduzierung der bakteriellen Keime in Klärschlamm mit 0,2 kg Kalk / kg TS

Zeit	Randbereich KBE /g				Kernbereich KBE /g			
	E.-coli	FKS	S.senfb.	Clost.perf.	E.-coli	FKS	S.senfb.	Clost.perf.
0-Probe	2,37E+06	3,95E+05	6,80E+06	9,20E+04	2,37E+06	3,95E+05	6,80E+06	9,20E+04
2h	2,30E+02	2,30E+03	4,30E+04	2,30E+03	1,50E+02	2,30E+03	9,30E+04	9,20E+04
5h	2,30E+02	2,30E+03	2,30E+03	2,30E+03	9,20E+00	9,30E+02	2,30E+03	9,20E+04
10h	n.n.	9,30E+02	4,30E+02	2,30E+03	n.n.	4,30E+02	3,60E+02	1,50E+02
24h	n.n.	2,30E+01	neg.	2,30E+03	n.n.	2,30E+01	9,20E+00	9,30E+02
48h	n.n.	n.n.	neg.	9,30E+02	n.n.	n.n.	neg.	1,50E+02
7 Tage	n.n.	n.n.	neg.	qual.pos.	n.n.	n.n.	neg.	qual.pos.

Legende:

KBE/g: Koloniebildende Einheiten pro g

FKS: Fäkalstreptokokken

n.n.: nicht nachweisbar

qual. Pos.: Qualitativer Nachweis positiv, quantitativer Nachweis negativ

Der Nachweis von *S.senftenberg* ist im Randbereich nach 24 Stunden negativ. Im Kernbereich erfolgt eine Reduzierung des Keimgehaltes von *S.senftenberg* um 5 Zehnerpotenzen innerhalb von 24 Stunden; nach 48 Stunden sind keine Keime mehr nachweisbar. Im beimpften Ausgangssubstrat (Nullprobe) ließen sich 10^4 KBE/g von Clostridium perfringens-Sporen nachweisen. Nach 48 Stunde sind diese Keime auf 10^2 KBE/g reduziert. Nach einer Woche ist Clostridium perfringens nur noch qualitativ nachweisbar, d.h. es erfolgt innerhalb von 7 Tagen eine Reduzierung um 4 Zehnerpotenzen.

Bei einer Kalkzugabe von 0,9 kg / kg TS erfolgte Innerhalb der ersten halben Stunde eine Reduzierung des Keimgehaltes von Salmonellen im Kernbereich um 5 Zehnerpotenzen, im Randbereich um 4 Zehnerpotenzen. Qualitativ nicht mehr nachweisbar waren Salmonellen nach zwei Stunden im Kern- und nach 5 Stunden im Randbereich.

Fäkalstreptokokken wurden innerhalb einer Stunde um 5 Zehnerpotenzen reduziert, nach zwei Stunden ließen sie sich in der gesamten Mischung nicht mehr nachweisen.

Innerhalb der ersten halben Stunde erfolgte eine Reduzierung des Keimgehaltes von *E.-coli* bis an die Nachweisgrenze von $0,36 \times 10^1$ KBE/g.

Der Ausgangskeimgehalt von *Clostridium perfringens*-Sporen betrug $9,15 \times 10^4$ KBE/g, nach 5 Stunden war im Kernbereich eine Reduzierung um 4 Zehnerpotenzen auf $0,83 \times 10^1$ KBE /g erfolgt. Nach einer Woche konnten keine Keime mehr nachgewiesen werden. Im Randbereich erfolgte eine Reduzierung um 4 Zehnerpotenzen innerhalb von 24 Stunden. Nach 4 Wochen konnten noch $0,53 \times 10^1$ KBE/g von *Clostridium perfringens*-Sporen nachgewiesen werden.

Bei einer Kalkzugabe von 1,1 kg / kg TS erfolgte Innerhalb der ersten halben Stunde im Kernbereich eine Reduzierung der Keime *S. senftenberg* und Fäkalstreptokokken um 6 Zehnerpotenzen. Fäkalstreptokokken waren im Randbereich des Substrates erst nach einer Stunde um 6 Zehnerpotenzen reduziert.

E.-coli waren nach einer halben Stunde nicht mehr nachweisbar.

Die Ergebnisse der Tenazitätsversuche mit *Clostridium perfringens* sind nicht eindeutig. Sie streuen im Kernbereich bei einer Reduzierung um 4 Zehnerpotenzen zwischen 3 Stunden und einer Woche. Auch im Randbereich konnte ebenfalls eine Reduzierung um 4 Zehnerpotenzen zwischen 3 Stunden und 2 Wochen beobachtet werden.

Tab. 12: Keimreduktionszeiten bei unterschiedlichen Reduktionsfaktoren in Klärschlamm mit unterschiedlichen Kalkmengen

Reduktionsfaktor: 10^5 KBE /g						
Keim	Randbereich: Zeit in h			Kernbereich: Zeit in h		
	0,2 kg/kg TS	0,9 kg/kg TS	1,1 kg/kg TS	0,2 kg/kg TS	0,9 kg/kg TS	1,1 kg/kg TS
<i>E.-coli</i>	10	0,5	0,5	5	0,5	0,5
FKS	48	1	0,5	48	0,5	0,5
<i>S.senfb.</i>	24	1	0,5	24	0,5	0,5

Reduktionsfaktor: 10^4 KBE /g						
Keim	Randbereich: Zeit in h			Kernbereich: Zeit in h		
	0,2 kg/kg TS	0,9 kg/kg TS	1,1 kg/kg TS	0,2 kg/kg TS	0,9 kg/kg TS	1,1 kg/kg TS
<i>E.-coli</i>	2	1	0,5	2	0,5	0,5
FKS	24	0,5	0,5	24	0,5	0,5
<i>S.senfb.</i>	10	0,5	0,5	10	0,5	0,5

Reduktionsfaktor: 10^3 KBE /g						
Keim	Randbereich: Zeit in h			Kernbereich: Zeit in h		
	0,2 kg/kg TS	0,9 kg/kg TS	1,1 kg/kg TS	0,2 kg/kg TS	0,9 kg/kg TS	1,1 kg/kg TS
<i>E.-coli</i>	2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
FKS	10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<i>S.senfb.</i>	5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

In Tab. 12 ist dargestellt, in welchem Zeitraum die entsprechenden Keime um die Faktoren 10^5 , 10^4 und 10^3 gegenüber der Ausgangskonzentration reduziert werden

konnten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Untersuchungen immer in den gleichen Zeitabständen erfolgten, so dass insbesondere bei schneller Keimreduzierung das zeitliche Raster nicht fein genug für eine differenzierte Betrachtungsweise angelegt ist. Man kann jedoch erkennen, dass eine Keimreduktion im Kernbereich um 3 Zehnerpotenzen bereits nach 0,5 h, unabhängig von der zugegebenen Kalkmenge, erreicht wird.

7.3.2 Panseninhalt

Aufgrund der unterschiedlichen Chargen an Panseninhalt wurde Material mit 28% und 16% Trockensubstanzanteil eingesetzt. Für die Tenazitätsversuche mit **Askarideneiern** wurden Kalkmengen von 0,7 kg, 0,9 kg, 1,25 kg und 1,56 kg / kg TS eingesetzt. Dabei stellte sich heraus, dass eine vollständig homogene Vermischung von Panseninhalt mit 28% TS und Kalk unter Verwendung des Mixers 1 nicht möglich war, da immer wieder inhomogene Zusammenballungen mit einem Durchmesser von ca. 5 cm auftraten. Außerhalb dieser Zusammenballungen war die Mischung jedoch homogen und wurde für die Tenazitätsuntersuchungen verwendet.

In Tab. 13 sind die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt. Bei dem Einsatz von 0,7 kg Kalk / kg TS stieg die Temperatur im Kernbereich nach 30 Minuten auf über 50°C an und verblieb über 4½ Stunden in diesem Temperaturbereich. Nach 1 ½ Stunden wurde eine maximale Temperatur von 64°C gemessen. Im Randbereich wurde dagegen nach einer Stunde eine maximale Temperatur von 50°C gemessen. Im Kernbereich waren nach 5 Stunden keine entwicklungsfähigen Askarideneier mehr nachweisbar, im Randbereich erst nach 10 Stunden.

Bei der Verwendung von 0,9 kg Kalk / kg TS stieg die Temperatur in der gesamten Mischung nach einer halben Stunde auf über 50°C an und verblieb über 5 Stunden in diesem Temperaturbereich. Nach einer Dreiviertelstunde wurde im Kernbereich eine maximale Temperatur von 74°C und im Randbereich von 66°C gemessen. In der nach zwei Stunden entnommenen Probe konnten im Kernbereich keine entwicklungsfähigen Askarideneier mehr nachgewiesen werden. Im Randbereich waren zu diesem Zeitpunkt nur noch 2% auszählbar. Nach 5 Stunden konnten auch im Randbereich keine entwicklungsfähigen Askarideneier mehr nachgewiesen werden.

Bei einer Kalkmenge von 1,25 kg Kalk / kg TS wurde Panseninhalt mit einem Trockensubstanzanteil von 16% im Mixer 2 eingesetzt. Die maximal erreichte Temperatur im Kernbereich betrug nach 4 ½ Stunden 35 °C. Im Randbereich wurde nach 4 ½ Stunden eine maximale Temperatur von 27°C gemessen. Der pH-Wert des Gemisches betrug ab der ersten Messung, die eine halbe Stunde nach der Vermischung stattfand, pH 12,9 und blieb in einem Messzeitraum von 14 Tagen konstant. Im Kernbereich des Substrates erfolgte eine Reduzierung der Entwicklungsfähigkeit von Askarideneiern nach 3 Wochen auf ein Prozent, nach vier Wochen waren keine entwicklungsfähigen Eier mehr nachweisbar. Im Randbereich erfolgt eine Reduzierung nach 6 Wochen auf 29%.

Tab. 13: Entwicklungsfähigkeit von **Askarideneiern** in Panseninhalt bei unterschiedlichen Kalkzugaben

Zeit	0,7 kg Kalk / kg TS (TS=28%)		0,9 kg Kalk / kg TS (TS=28%)		1,25 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		1,56 kg Kalk / kg TS (TS=16%)	
	Randbereich %	Kernbereich %	Randbereich %	Kernbereich %	Randbereich %	Kernbereich %	Randbereich %	Kernbereich %
0 Probe	82	82	82	82	76	76	76	76
2h	4	0,5	2	0				
3h					76	76	70	59
5h	2	0	0	0			47	1
10h	0	0	0	0	76	76	42	0
24h	0	0	0	0	76	74	42	0
48h					n.a.	71		
14 Tage					63	43		
21 Tage					n.a.	1		
28 Tage					n.a.	0		
35 Tage					42	0		
42 Tage					29	0		
T_{max} (°C)	50	64	66	74	27	35	40	55
Zeit (h)	1	1,5	0,75	0,75	4,5	4,5	4	5

n.a. = nicht auswertbar

Bei einer Zugabe von 1,56 kg Kalk / kg TS stieg die Temperatur im Kernbereich der Mischung nach vier Stunden auf über 50°C an und verblieb 3½ Stunden in diesem Temperaturbereich. Nach 5 Stunden wurde im Kernbereich eine maximale Temperatur von 55°C gemessen. Im Randbereich wurde nach vier Stunden eine maximale Temperatur von 40°C ermittelt. Im Kernbereich der Mischung sind nach 5 Stunden noch ein Prozent entwicklungsfähige Askarideneier nachweisbar während nach 10 Stunden keine mehr nachweisbar sind. Im Randbereich erfolgte eine Reduzierung von 76 % auf 42% innerhalb von 24 Stunden.

Tab. 14: Reduzierung des Keimgehaltes an **BPV** in Panseninhalt bei unterschiedlichen Kalkzugaben

Zeit	0,7 kg Kalk / kg TS (TS=28%)		0,9 kg Kalk / kg TS (TS=28%)		1,25 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		1,56 kg Kalk / kg TS (TS=16%)	
	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml
0-Probe	4,39E+05	4,39E+05	4,39E+05	4,39E+05	3,38E+05	3,38E+05	3,38E+05	3,38E+05
1/2h	4,72E+05	2,98E+05	7,99E+04	2,40E+05				
1h	1,78E+04	2,56E+04	8,04E+04	---	2,38E+05	7,77E+04	9,77E+04	1,87E+05
2h	6,26E+04	3,16E+02	7,08E+03	1,24E+03				
3h					2,76E+05	2,04E+04	2,63E+04	5,07E+03
5h	8,54E+03	2,65E+02	4,72E+03	n.n.	2,83E+04	1,60E+04	7,36E+03	4,59E+03
10h	5,62E+03	2,65E+02	1,35E+03	n.n.	1,66E+04	2,94E+03	8,10E+02	1,68E+02
24h					1,12E+04	3,40E+03	9,97E+02	2,72E+02
T_{max} (°C)	50	64	66	74	27	35	40	55
Zeit (h)	1	1,5	0,75	0,75	4,5	4,5	4	5

KID₅₀/ml: kulturinfektiöse Dosis 50%
n.n.: nicht nachweisbar (<5,60E+01)

Die Tenazitätsuntersuchungen von **BPV** wurden parallel zu den Untersuchungen mit Askarideneiern durchgeführt. Die Ergebnisse mit BPV sind in Tab. 14 aufgeführt.

Bei einer Kalkzugabe von 0,7 kg / kg TS betrug der Ausgangskeimgehalt an BPV 10^5 KID₅₀/ml (Tab. 14), nach 10 Stunden war im Randbereich der Mischung eine Reduzierung auf 10^3 KID₅₀/ml und im Kernbereich auf 10^2 KID₅₀/ml erfolgt.

Bei einer Kalkzugabe von 0,9 kg / kg TS erfolgte im Kernbereich der Mischung nach fünf Stunden eine Reduzierung um 5 Zehnerpotenzen bis zur Nachweisgrenze von $5,6E+01$ KID₅₀/ml. Im Randbereich war nach 10 Stunden noch ein Keimgehalt von $1,35 \times 10^3$ KID₅₀/ml an Bovinem Parvovirus nachweisbar.

Im Kernbereich der Mischung mit 1,25 kg Kalk / kg TS erfolgte innerhalb von 24 Stunden eine Reduzierung des Keimgehaltes um 3 Zehnerpotenzen. Im Randbereich wurde innerhalb der gleichen Zeitspanne nur eine Reduzierung um eine Zehnerpotenz festgestellt.

Nach 10 Stunden Inkubation der virologischen Keimträger mit 1,56 kg Kalk / kg TS konnte eine Reduzierung des Keimgehaltes an BPV um 3 Zehnerpotenzen nachgewiesen werden.

Die Versuche mit ECBO-Viren im Mischer 2 wurden mit Panseninhalt durchgeführt, der einen Trockensubstanzgehalt von 16% aufwies. Es wurden Mischungen mit 0,3 kg, 0,6 kg und 1,56 kg Kalk / kg TS hergestellt.

Tab. 15: Reduzierung des Keimgehaltes an **ECBO-Viren** in Panseninhalt bei unterschiedlichen Kalkzugaben

Zeit	0,3kg Kalk / kg TS (TS=16%)		0,6 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		1,56 kg Kalk / kg TS (TS=16%)	
	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml
0-Probe	5,62E+06	5,62E+06	1,00E+06	1,00E+06	1,00E+06	1,00E+06
1/2h			3,31E+06	2,65E+06		
1h	---	4,34E+06	3,31E+06	9,39E+05	1,78E+06	3,26E+06
2h	---	3,77E+06			n.a.	n.n.
3h			n.a.	5,62E+05		
4h	---	3,77E+04			2,31E+04	n.n.
10h	n.a.	7,10E+01				
24h	2,20E+01	1,20E+01	3,16 E+03	4,08E+03	n.n.	n.n.
2 Tage	1,70E+01	3,10E+01				
7 Tage	1,00E+01	3,10E+01				
T_{max} (°C)	20	22	20	22	55	65
Zeit (h)	2	2	1,5	1,5	8	7,5

n.n.: nicht nachweisbar (<5,60E+01)
n.a.: nicht auswertbar
KID50/ml: kulturinfektiöse Dosis 50%

Bei einer Kalkmenge von 0,3 kg / kg TS wurde eine Temperaturerhöhung im Kernbereich um 6°C erzielt. Der in regelmäßigen Abständen ermittelte pH-Wert betrug nach

einer halben Stunde 12,9 und veränderte sich über einen Meßzeitraum von 14 Tagen nicht mehr. Es erfolgte im Kernbereich eine Reduzierung des Keimgehaltes nach 10 Stunden um 5 Zehnerpotenzen. Im Randbereich der Mischung war die 10-Stunden-Probe nicht auswertbar; nach 24 Stunden wurde aber ein Keimgehalt in gleicher Größenordnung wie im Kernbereich ermittelt (Tab. 15).

Bei einer Kalkzugabe von 0,6 kg / kg TS konnte eine Reduzierung des Keimgehaltes von ECBO-Viren innerhalb von 24 Stunden von 10^6 auf 10^3 KID₅₀/ml festgestellt werden.

Mit einer Kalkmenge von 1,56 kg / kg TS wurde im Kernbereich der Mischung nach 5½ Stunden eine Temperatur von 50°C, nach 6½ h 60°C und nach 7½ h Stunden eine maximale Temperatur von 65°C gemessen. Im Randbereich wurde nach 8 Stunden eine maximale Temperatur von 55°C erreicht. Der ermittelte pH-Wert lag während des gesamten Versuches konstant bei pH 12,9. Nach zwei Stunden erfolgte im Kernbereich der Mischung eine Reduzierung des Keimgehaltes bis auf die Nachweisgrenze von 5,60E+01 KID₅₀/ml. Im Randbereich war nach vier Stunden noch ein Keimgehalt von 10^4 KID₅₀/ml nachweisbar. Innerhalb von 24 Stunden erfolgte in diesem Bereich eine Reduzierung bis zur Nachweisgrenze.

Mit den **bakteriellen Keimen** *Salmonella senftenberg*, Fäkalstreptokokken (*Streptococcus faecium*), *E.-coli* und Clostridium perfringens-Sporen wurden Versuche mit Panseninhalt (16% TS) und Kalkzugaben von 0,2 kg, 0,3 kg, 0,6 kg und 1,25 kg pro kg Trockensubstanz durchgeführt.

Tab. 16: Reduzierung des Keimgehaltes an **Salmonella senftenberg** in Panseninhalt bei unterschiedlichen Kalkzugaben

Zeit	0,2 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		0,3 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		0,6 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		1,25 kg Kalk / kg TS (TS=16%)	
	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g
0-Probe	4,30E+06	4,30E+06	2,30E+07	2,30E+07	2,30E+07	2,30E+07	2,30E+07	2,30E+07
1/2h			---	4,30E+02				
1h	2,30E+07	2,30E+07	qual. pos.	9,20E+01	4,30E+06	7,40E+00	qual. pos.	qual. pos.
3h	2,30E+07	2,30E+07	2,30E+01	3,60E+00	2,30E+05	9,20E+00	qual. pos.	neg.
5h	2,30E+06	2,30E+07	3,60E+00	3,60E+00	2,30E+03	3,60E+00	qual. pos.	neg.
10h	2,30E+06	2,30E+07	3,60E+00	qual. pos.	2,30E+03	3,60E+00	qual. pos.	neg.
24h	1,00E+01	qual. pos.	qual. pos.	qual. pos.	qual. pos.	neg.	qual. pos.	neg.
48h	qual. pos.	qual. pos.	neg.	neg.	neg.	neg.		
1 Woche							n.n.	
4 Wochen	neg.	neg.	neg.	neg.				
T _{max} (°C)	20	22	20	22	20	22	27	35
Zeit (h)	2	2	2	2	1,5	1,5	3	4

n.n.: nicht nachweisbar

n.a.: nicht auswertbar

KBE/g: Koloniebildende Einheiten

Anhand von Tab. 16 und 17 lässt sich erkennen, dass ab einer Kalkzugabe von 0,3 kg pro kg TS eine Reduzierung des Keimgehaltes bei *Salmonella senftenberg* und *Escherichia coli* um 5 Zehnerpotenzen innerhalb von 0,5–1h erfolgt. Dabei spielt die

Temperatur keine entscheidende Rolle. Der gemessene pH-Wert lag nach einer halben Stunde bei 12,9 und blieb über den gesamten Messzeitraum konstant.

Tab. 17: Reduzierung des Keimgehaltes an *Escherichia coli* in Panseninhalt bei unterschiedlichen Kalkzugaben

	0,2 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		0,3 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		0,6 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		1,25 kg Kalk / kg TS (TS=16%)	
Zeit	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g
0-Probe	2,30E+06	2,30E+06	9,30E+06	9,30E+06	2,30E+07	2,30E+07	2,30E+07	2,30E+07
1/2h			---	9,30E+02				
1h	9,20E+04	1,50E+05	3,60E+00	n.n.	4,30E+03	n.n.	n.n.	n.n.
3h	2,30E+05	4,30E+05	n.n.	n.n.	1,50E+02	n.n.	n.n.	n.n.
5h	2,30E+05	9,30E+04	n.n.	n.n.	7,50E+01	n.n.	n.n.	n.n.
10h	2,30E+05	9,30E+04	n.n.	n.n.	2,30E+01	n.n.	n.n.	n.n.
24h	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
48h	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.		
4 Wochen	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.				
T_{max} (°C)	20	22	20	22	20	22	27	35
Zeit (h)	2	2	2	2	1,5	1,5	3	4

n.n.: nicht nachweisbar
n.a.: nicht auswertbar
KBE/g: Koloniebildende Einheiten

Die Reduzierung des Keimgehaltes von Fäkalstreptokokken um 5 Zehnerpotenzen wird innerhalb von 1 – 5 h ab einer Kalkzugabe von 0,3 kg / kg TS erreicht.

Tab. 18: Reduzierung des Keimgehaltes an *Fäkalstreptokokken* in Panseninhalt bei unterschiedlichen Kalkzugaben

	0,2 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		0,3 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		0,6 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		1,25 kg Kalk / kg TS (TS=16%)	
Zeit	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g	Randbereich KBE /g	Kernbereich KBE /g
0-Probe	2,30E+06	2,30E+06	9,30E+06	9,30E+06	9,30E+06	9,30E+06	2,30E+07	2,30E+07
1/2h			---	7,40E+04				
1h	4,30E+06	4,30E+06	7,40E+02	9,30E+03	2,30E+05	9,30E+02	2,20E+04	2,10E+01
3h	4,30E+06	4,30E+06	4,30E+03	2,10E+02	2,3E+05	2,3E+02	4,30E+03	n.n.
5h	2,30E+06	4,30E+06	9,30E+01	9,30E+02	4,30E+04	9,30E+01	n.n.	n.n.
10h	4,30E+06	9,30E+05	4,30E+01	2,30E+04	2,30E+04	9,20E+00	n.n.	n.n.
24h	4,30E+02	4,30E+02	4,30E+01	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
48h	2,30E+02	2,30E+02	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.		
4 Wochen	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.				
T_{max} (°C)	20	22	20	22	20	22	27	35
Zeit (h)	2	2	2	2	1,5	1,5	3	4

n.n.: nicht nachweisbar
n.a.: nicht auswertbar
KBE/g: Koloniebildende Einheiten

Bei den Untersuchungen mit Sporen von Clostridium perfringens ergab sich das Problem, dass teilweise eine Auswertung der Proben nicht möglich war, da sie mit Bazillen-Stämmen überwuchert waren. Daher konnte keine eindeutige Tendenz ermittelt werden.

Tab. 19: Reduzierung des Keimgehaltes an **Sporen von Chlostridium Perfringens** in Panseninhalt bei unterschiedlichen Kalkzugaben

	0,2 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		0,3 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		0,6 kg Kalk / kg TS (TS=16%)		1,25 kg Kalk / kg TS (TS=16%)	
Zeit	Randbe- reich KBE /g	Kernbe- reich KBE /g	Randbe- reich KBE /g	Kernbe- reich KBE /g	Randbe- reich KBE /g	Kernbe- reich KBE /g	Randbe- reich KBE /g	Kernbe- reich KBE /g
0-Probe	4,30E+03	4,30E+03	2,30E+03	2,30E+03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
1/2h			---	---				
1h	2,30E+03	4,30E+03	7,40E+02	3,60E+01				
3h	2,30E+03	2,30E+03	7,40E+02	3,60E+01				
5h	2,30E+03	2,30E+03	3,60E+00	3,60E+00				
10h	9,30E+02	1,00E+03	qual. pos.	qual. pos.				
24h	qual. pos.	qual. pos.	qual. pos.	qual. pos.				
48h	4,30E+01	2,30E+02	qual. pos.	qual. pos.				
4 Wochen	qual. pos.	qual. pos.	neg.	neg.				
T_{max} (°C)	20	22	20	22	20	22	27	35
Zeit (h)	2	2	2	2	1,5	1,5	3	4

n.n.: nicht nachweisbar

n.a.: nicht auswertbar

KBE/g: Koloniebildende Einheiten

7.3.3 Gärrückstand

Die verwendete Gärrückstände hatten einen Trockensubstanzgehalt von 25 und 30%. Die homogene Einmischung des Branntkalks wurde im Mischer 2 vorgenommen.

Tab. 20: Entwicklungsfähigkeit von **Askarideneiern** in Gärrückstand bei unterschiedlichen Kalkzugaben

	0,7 kg Kalk / kg TS (TS=30%)		0,8 kg Kalk / kg TS (TS=25%)		1 kg Kalk / kg TS (TS=25%)		1,1 kg Kalk / kg TS (TS=25%)	
Zeit	Randbe- reich %	Kernbe- reich %	Randbe- reich %	Kernbe- reich %	Randbe- reich %	Kernbe- reich %	Randbe- reich %	Kernbe- reich %
0 Probe	45	45	55	55	58	58	55	55
1h	40	40					0	0
2h			37	38	56	56		
5h	40	0	21	0	8	0	0	0
10h	40	0	20	0	0	0	0	0
24h	40	0	1	0	0	0	0	0
7 Tage	n.a.	0						
T_{max} (°C)	38	50	48	62	55	69	84	84
Zeit (h)	5	5	3	3	5,5	4	1	1

Für die Tenazitätsversuche mit **Askarideneiern** wurden Kalkmengen von 0,7 kg, 0,8 kg, 1 kg und 1,1 kg / kg TS eingesetzt.

Anhand der Tab. 20 lässt sich erkennen, dass ab Erreichen einer Temperatur von >50°C die Inaktivierung der entwicklungsfähigen Eier innerhalb von 2 – 5h erfolgt. Bei Temperaturen oberhalb von 80°C sind nach einer Stunde keine entwicklungsfähigen Eier mehr nachweisbar.

Die Tenazitätsuntersuchungen von **BPV** in Gärrückstand wurden mit 0,8 kg, 1 kg und 1,1 kg Kalk pro kg TS-Gehalt durchgeführt. Anhand von Tab. 21 lässt sich erkennen, dass eine Reduzierung des Keimgehaltes um 4 Zehnerpotenzen im Temperaturbereich von ca. 50 – 60°C innerhalb von 5 – 10h erfolgt. Über diesen Temperaturbereich hinaus erfolgt die Reduzierung innerhalb von 2 – 5h.

Tab. 21: Reduzierung des Keimgehaltes an **BPV** in Gärrückstand bei unterschiedlichen Kalkzugaben

Zeit	0,8 kg Kalk / kg TS (TS=25%)		1 kg Kalk / kg TS (TS=25%)		1,1 kg Kalk / kg TS (TS=25%)	
	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml
0-Probe	1,30E+06	1,30E+06	2,47E+05	2,47E+05	3,16E+06	3,16E+06
2h		1,26E+05	---	1,11E+04	1,26E+02	5,60E+01
4h					n.a.	3,10E+01
5h	1,20E+04	2,54E+02	2,96E+02	3,10E+01		
10h		8,40E+01	2,16E+02	3,10E+01	3,10E+01	3,10E+01
24h	3,18E+02	2,63E+01	7,80E+01	3,10E+01	3,10E+01	1,80E+01
48h	3,10E+01	2,60E+01	3,10E+01	3,10E+01		
7 Tage	3,10E+01	1,47E+01	3,10E+01	3,10E+01		
T_{max} (°C)	48	62	55	69	84	84
Zeit (h)	3	3	5,5	4	1	1

n.n.: nicht nachweisbar (<5,60E+01)
n.a.: nicht auswertbar
KID50/ml: kulturinfektiöse Dosis 50%

Die Untersuchungen mit ECBO-Viren wurden in Gärrückstand mit 0,2 kg und 0,4 kg Kalk pro kg Trockensubstanzgehalt durchgeführt.

Eine Reduzierung des Keimgehaltes um 4 Zehnerpotenzen lässt sich bei einer Temperatur ab 30°C innerhalb von 2 – 3h erreichen (Tab. 22).

Tab. 22: Reduzierung des Keimgehaltes an **ECBO-Viren** in Gärrückstand bei unterschiedlichen Kalkzugaben

Zeit	0,2 kg Kalk / kg TS (TS=25%)		0,4 kg Kalk / kg TS (TS=25%)	
	Randbe- reich KID ₅₀ /ml	Kernbe- reich KID ₅₀ /ml	Randbe- reich KID ₅₀ /ml	Kernbe- reich KID ₅₀ /ml
0-Probe	7,29E+06	7,29E+06	3,16E+06	3,16E+06
1/2h			---	9,39E+05
1h	1,51E+05	8,33E+03		
2h			5,40E+01	5,40E+01
3h	1,05E+05	3,50E+01		
5h	3,10E+01	3,10E+01	---	3,10E+01
8h	3,10E+01	3,10E+01	3,10E+01	3,10E+01
24h	3,10E+01	3,10E+01	3,10E+01	2,40E+01
T _{max} (°C)	28	32	36	45
Zeit (h)	1	2	4	5

n.n.: nicht nachweisbar (<5,60E+01)

n.a.: nicht auswertbar

KID50/ml: kulturinfektiöse Dosis 50%

Mit den **bakteriellen Keimen** *Salmonella senftenberg*, Fäkalstreptokokken (*Streptococcus faecium*), *E.-coli* und Clostridium perfringens-Sporen wurden Versuche mit Kalkzugaben in Gärrückstand von 0,06 kg, 0,08 kg, 0,1 kg, 0,2 kg, 0,3 kg und 0,7 kg pro kg Trockensubstanz durchgeführt.

Die Ergebnisse in Tab. 23 zeigen, dass zur Reduzierung der bakteriellen Keime (außer Clostridium perfringens-Sporen) in Gärrückstand um 4 bis 5 Zehnerpotenzen innerhalb eines Zeitraumes bis zu 5h, eine Kalkmenge von 0,2 – 0,3 kg pro kg TS-Gehalt ausreicht. Die Werte für Clostridium perfringens-Sporen sind teilweise nicht eindeutig, da einige Proben aufgrund einer Überwucherung mit Bazillen-Stämmen nicht auswertbar waren. Es lässt sich aber dennoch erkennen, dass sie wesentlich resistenter als die übrigen bakteriellen Keime sind.

Bei der Verwendung von 0,06 kg Kalk / kg TS konnte der pH-Wert nicht über 12 eingestellt werden, so dass diese Menge nicht ausreicht, um eine Hygienisierung vorzunehmen.

Detailergebnisse zu den Vorversuchen und den Versuchen im halbtechnischen Maßstab können der Literaturstelle [55] entnommen werden.

Tab. 23: Keimreduktionszeiten bei unterschiedlichen Reduktionsfaktoren in Gärrückstand mit unterschiedlichen Kalkzugaben

Reduktionsfaktor: 10 ⁵ KBE /g						
Keim	Zeit in h					
	0,06kg/ kg TS	0,08kg/ kg TS	0,1 kg/kg TS	0,2 kg/kg TS	0,3 kg/kg TS	0,7 kg/kg TS
E.-coli	5	5	5 - 10	2	1	0,5
FKS	>48	5	24	24	5	5
S.senfb.	5 - 10	5	5 - 10	1	1	3
Clost.perf.	---	---	---	---	---	---

Reduktionsfaktor: 10 ⁴ KBE /g						
Keim	Zeit in h					
	0,06kg/ kg TS	0,08kg/ kg TS	0,1 kg/kg TS	0,2 kg/kg TS	0,3 kg/kg TS	0,7 kg/kg TS
E.-coli	2	1	2 - 5	1 - 2	0,5	<0,5
FKS	24 - >48	<5	10	2 - 5	1 - 3	3 - 5
S.senfb.	2 - 5	1 - 3	2 - 5	<1	0,5	0,5
Clost.perf.	---	---	---	---	---	---

Reduktionsfaktor: 10 ³ KBE /g						
Keim	Zeit in h					
	0,06kg/ kg TS	0,08kg/ kg TS	0,1 kg/kg TS	0,2 kg/kg TS	0,3 kg/kg TS	0,7 kg/kg TS
E.-coli	2	<1	<2	0,5 - 1	<0,5	<0,5
FKS	10 - 24	3 - 5	<10	2	0,5 - 3	1
S.senfb.	2 - 5	1	2	<1	<0,5	<0,5
Clost.perf.	120	24	10 - 24	24	n.a.	1 -24

KBE/g: Koloniebildende Einheiten

7.4 Praxisversuche

Bei der Durchführung der Praxisversuche im kontinuierlichen Betrieb wurde die Durchsatzmenge an Substraten so gewählt, dass sie der maximal lieferbaren Menge der vorgeschalteten Anlage entsprach. Die Dosiermenge an Kalk wurde entsprechend der gewünschten Temperatur eingestellt. Es stellte sich heraus, dass die vorgesehene Kalkzugabestelle im geschlossenen Raum oberhalb des Eintritts in die Excenterpumpe aufgrund der Wasserdampfbildung bei höheren Temperaturen zu Verstopfungen führte, so dass die Kalkzugabe an die gleiche Stelle wie die Substratzugabe verlegt wurde. Diese Stelle gewährleistete einen konstanten Kalkfluss und führte nicht zu Verstopfungen.

Sowohl die Kalkmenge (Abb. 9) als auch die Gesamtdurchsatzmenge an Mischgut zeigt einen linearen Zusammenhang mit der entsprechenden Stellgröße (z.B. Pumpendrehzahl, Abb. 10), so dass eine komplizierte Regelstrecke nicht benötigt wurde.

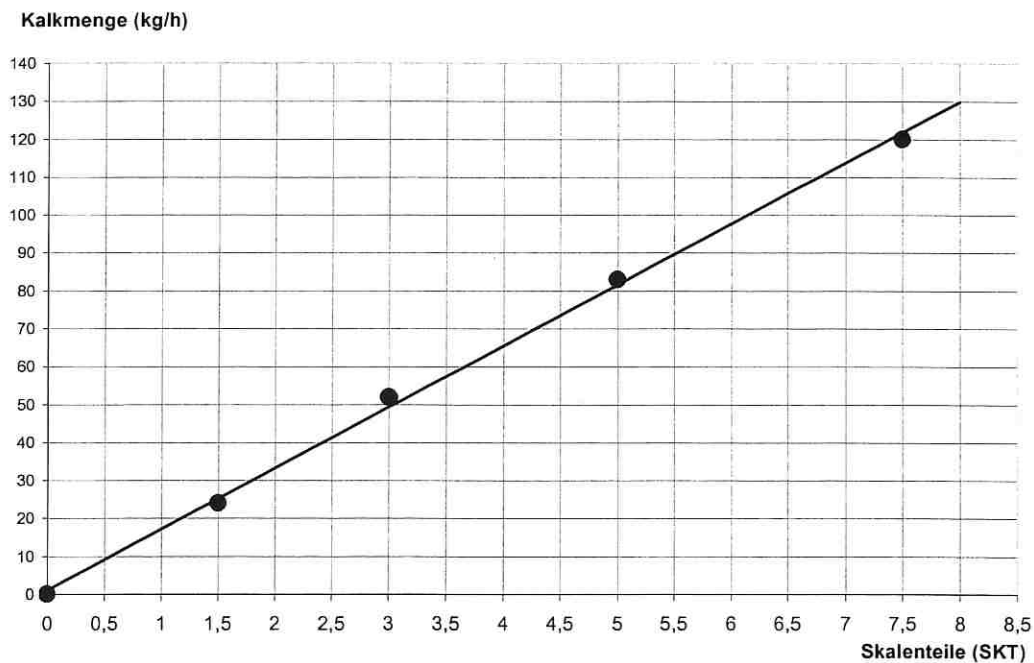


Abb. 9: Kalkmenge in Abhängigkeit der Einstellung an der Pumpendrehzahl

Die gewünschte Temperatur im Mischer wurde durch Erhöhung oder Erniedrigung der Kalkmenge bei konstanter Zufuhr des entsprechenden Bioabfalls eingestellt und konstant gehalten. Die Durchsatzmenge wurde niveaugesteuert angepasst.

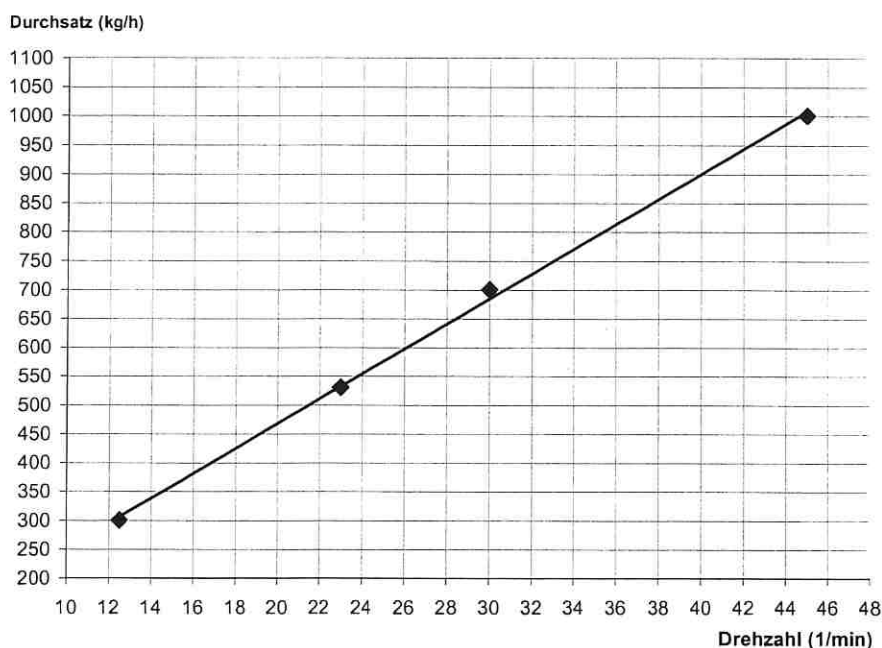


Abb. 10: Durchsatzmenge in Abhängigkeit von der Pumpendrehzahl

Bei einem Gesamtdurchsatz von 450 - 550 kg/h beträgt die Aufenthaltszeit des Mischgutes im Mischer zwischen 5 und 7 Minuten. Aus den Versuchen im halbertechnischen Maßstab ist zu ersehen, dass diese Zeit nicht ausreicht, um schon im Mischer eine vollständige Hygienisierung zu erreichen. Daher ist es wichtig, mit dem Austrag aus dem Mischer entweder ein Haufwerk zu bilden oder besser noch das Material in einem umschlossenen Behälter zur vollständigen Hygienisierung zu lagern, um ein schnelles Auskühlen zu verhindern.

In Abb. 11 ist der Temperaturverlauf der Mischungen eines Haufwerks in Abhängigkeit von der Zeit in unterschiedlichen Schichttiefen und bei verschiedenen Austragstemperaturen dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass eine schnelle Abkühlung nur in den ersten Zentimetern stattfindet, während in den tieferen Schichten die Temperatur über einen Zeitraum von 2 Stunden nahezu konstant gehalten werden kann.

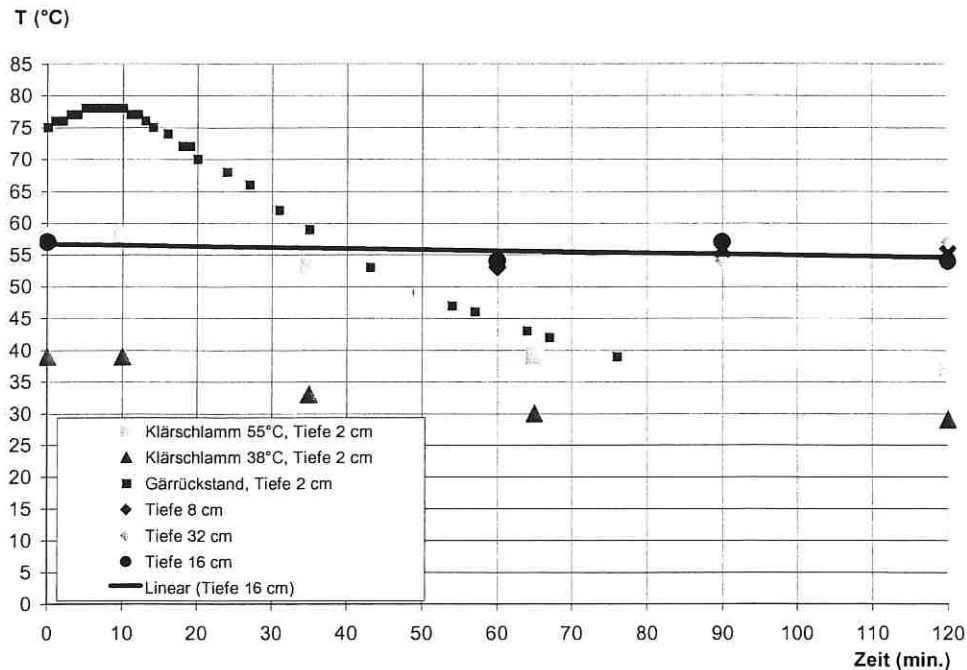


Abb. 11: Abkühlung des Mischgutes in unterschiedlichen Schichttiefen

7.4.1 Klärschlamm

Im Praxisversuch wurden fünf Tenazitätsversuche mit dem Substrat Klärschlamm durchgeführt (KS I - IV). Der aerob stabilisierte Klärschlamm hatte einen Trockensubstanzgehalt von 18 – 20 % TS und einen Ammoniumgehalt von 0,6 bis 0,8 % bzgl. auf den Trockensubstanzgehalt.

In den Versuchen KS I - III wurden die Keimträger in einem, nach dem Austrag des Mischgutes, künstlich angelegten Haufwerk eingebracht, so dass sie mit dem Mischgut erst ca. eine halbe Stunde nach dem Austrag aus dem Mischer 3 in Kontakt gekommen sind und das Material aufgrund einer großen Oberfläche bereits teilweise abgekühlt war. Die Probenahme erfolgte aus dem Kernbereich des Haufwerks, einzelne Proben wurden auch aus dem Randbereich (ca. 3 cm Tiefe) entnommen.

Der Temperaturverlauf wurde während des Probenahmezeitraums automatisch gemessen. Ein Temperaturfühler wurde im Kernbereich und einer im Randbereich des Haufwerks eingebracht. Ebenso wurde der pH-Wert in regelmäßigen Zeitabständen ermittelt.

In den Versuchen KS IV-V wurde der Austrag in einem 5-seitig umschlossenen Behälter (Schaufel eines Radladers, Bild 4) gesammelt und verblieb dort bis zum Ende der Probenahme. Die Keimträger wurden in den Behälter eingebracht, so dass sie direkt mit dem frisch ausgetragenen Mischgut in Kontakt kamen. Die Probenahme erfolgte aus dem Kernbereich der Mischung.



Bild 4: Lagerung des Mischgutes in einem Behälter

In Abb. 12 ist beispielhaft für alle durchgeführten Versuche das Temperaturverhalten des Mischgutes am Austrag des Mixers dargestellt. Man kann deutlich erkennen, dass die Temperatur des Mischgutes sehr gut über die Kalkzugabemenge eingestellt und gesteuert werden kann.

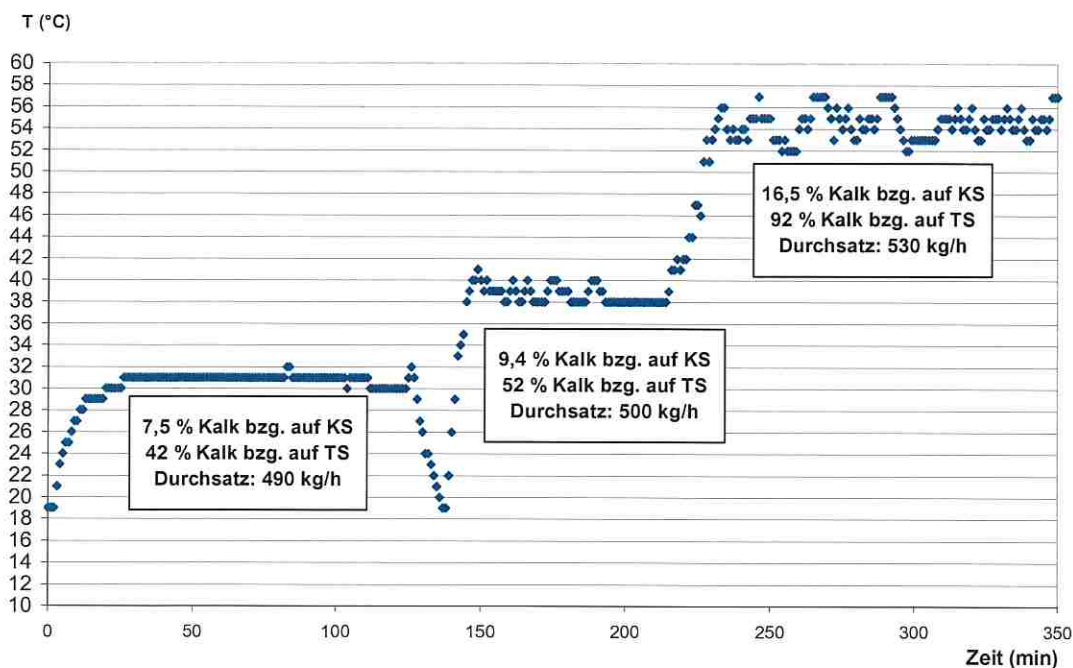


Abb. 12: Unterschiedliche Kalkzugaben bei konstantem Klärschlammzufluss (KS)

Dabei sind die Schwankungen im Bereich stationärer Zustände bei höherer Temperatur (ca. 5°C) größer als bei geringerer Temperatur (ca. 2°C). Es lässt sich

außerdem erkennen, dass bis zur Erreichung von stationären Zuständen ca. 20 – 30 Minuten Einstellzeit benötigt wird. Danach wird ein sicherer und stabiler Zustand erreicht.

Bei der Reaktion von Branntkalk mit den Substraten wirken puffernde Substanzen reaktionsverzögernd. Je nach Vorbehandlung des anfallenden Bioabfalls (aerobe Stabilisierung oder anaerobe, mesophile Faulung) fallen unterschiedliche Mengen an Puffersubstanzen an, die bei mäßig entwässerten Schlämmen (18 – 40% TS) zu einer deutlichen Reaktionsverzögerung mit Branntkalk führen. Folgende Puffersubstanzen können dabei eine Rolle spielen: z.B. CO_2 , HCO_3^- , NH_4^+ , HPO_4^{2-} . Dies hat zur Folge, dass die Endtemperatur im Mischer selbst, je nach Aufenthaltszeit, nicht erreicht wird.

Mit einem Ammoniumgehalt von 0,6 bis 0,8 % bzgl. auf die Trockensubstanz ergab sich eine Endtemperatur des Mischgutes innerhalb von 5 Minuten nach dem Austrag, die um ca. 2 – 5 °C höher lag als die Austrittstemperatur am Mischer.

Zwei Versuche wurden mit der Kalkmenge 1,1 kg Kalk pro kg Trockensubstanz (Versuch KS I und III) durchgeführt. Die Austragstemperatur des Mischgutes lag bei 65°C. Im Versuch KS I wurde nach dem Einbringen der Keimträger (0-Minuten) noch eine Temperatur von 58°C und nach 60 Minuten von 53°C gemessen. Im zweiten Versuch betrug die Temperatur beim Einbringen der Keimträger 50°C und nach einer Stunde 44°C. In den Randbereichen des Gemisches konnte im ersten Versuch eine maximale Temperatur von 39°C und im Versuch KS III ein maximaler Wert von 46°C gemessen werden (Tab. 24).

Tab. 24: Temperaturverlauf des Mischgutes bei einer Zugabe von 1,1 kg Kalk / kg TS (Haufwerk wurde erst nach einer halben Stunde mit schon abgekühltem Material errichtet)

VERSUCH KS I : Austragstemperatur ca. 65°C		
Zeit	Randbereich	Kernbereich
0 Minuten	39	58
30 Minuten	39	54
60 Minuten	33	53
90 Minuten	30	39
120 Minuten	29	37
VERSUCH KS III : Austragstemperatur ca. 65°C		
0 Minuten	46	50
30 Minuten	42	48
60 Minuten	40	44
90 Minuten	39	41
120 Minuten	39	41

In den Keimträgern von *Ascaris suum* wurde ein Ausgangskeimgehalt von 73% entwicklungsfähiger Spulwurmeier ausgezählt. Im ersten Versuch wurde im Kernbereich der Mischung nach einer halben Stunde noch ein Prozent entwicklungsfähiger Eier nachgewiesen, nach einer Stunde waren keine entwicklungsfähigen Spulwurmeier mehr vorzufinden (Tab. 25). Im Randbereich

erfolgte innerhalb von 24 Stunden eine Reduzierung der Entwicklungsfähigkeit der Askarideneier auf 60%. Im Versuch KS III wurden nach 24 Stunden im Kernbereich noch 68% und im Randbereich 70% entwicklungsfähige Askarideneier ausgezählt.

Tab. 25: Entwicklungsfähigkeit von Askarideneiern bei einer Zugabe von 1,1 kg Kalk / kg TS (Haufwerk wurde erst nach einer halben Stunde mit schon abgekühltem Material errichtet)

Zeit	Randbereich in %	Kernbereich in %
VERSUCH KS I		
0 Probe	73	73
1 Stunde	70	1
2 Stunden	69	0
3 Stunden	---	0
5 Stunden	---	0
24 Stunden	60	0
VERSUCH KS III		
0 Probe	73	73
1 Stunde	71	71
24 Stunde	70	68

In den Tenazitätsversuchen mit dem Bovinen Parvovirus konnte im ersten Versuch innerhalb von 24 Stunden der Keimgehalt bis auf die Nachweisgrenze ($<5,60E+01$ KID₅₀/ml) reduziert werden. Im Versuch KS III erfolgte im Kernbereich des Mischgutes eine Reduzierung um 3 Zehnerpotenzen. Im Randbereich wurde nach 24 Stunden noch ein Keimgehalt von $3,7 \times 10^3$ KID₅₀/ml nachgewiesen (Tab. 26).

Tab. 26: Reduzierung von BPV bei einer Zugabe von 1,1 kg Kalk / kg TS (Haufwerk wurde erst nach einer halben Stunde mit schon abgekühltem Material errichtet)

Zeit	Randbereich KID ₅₀ /ml	Kernbereich KID ₅₀ /ml
VERSUCH KS I		
0-Probe	1,00E+05	1,00E+05
1h	1,37E+04	1,98E+04
3h	4,52E+04	3,52E+03
5h	3,98E+04	1,43E+03
24h	n.n.	n.n.
VERSUCH KS III		
0-Probe	1,00E+05	1,00E+05
1h	4,08E+04	3,16E+05
24h	3,77E+03	4,56E+02

KID₅₀/ml: kulturinfektiöse Dosis 50%

Bei einer Zugabemenge von 0,8 kg Kalk / kg TS wurde eine Austragstemperatur des Kalk-Substrat-Gemisches von 50°C gemessen. Im gebildeten Substrathaufen

konnte im Kernbereich eine maximale Temperatur von 45°C und im Randbereich von 37°C nachgewiesen werden (Tab.27).

Tab. 27: Temperaturverlauf des Mischgutes bei einer Zugabe von 0,8 kg Kalk / kg TS (Haufwerk wurde erst nach einer halben Stunde mit schon abgekühltem Material errichtet)

VERSUCH KS II : Austragstemperatur 50°C		
Zeit	Randbereich	Kernbereich
0 Minuten	37	45
30 Minuten	30	43
60 Minuten	26	43
90 Minuten	22	41
120 Minuten	21	34

In den Keimträgern mit Askarideneiern wurde ein Ausgangskeimgehalt von 73% entwicklungsfähiger Spulwurmeier ausgezählt. Im Versuch KS II wurden nach 24 Stunden im Kernbereich des Substrates noch 61% und im Randbereich 73% entwicklungsfähige Askarideneier ausgezählt (Tab.50).

Tab. 28: Entwicklungsfähigkeit von Askarideneiern bei einer Zugabe von 0,8 kg Kalk / kg TS (Haufwerk wurde erst nach einer halben Stunde mit schon abgekühltem Material errichtet)

Zeit	Randbereich in %	Kernbereich in %
0 Probe	73	73
1Stunde	73	73
24 Stunde	73	61

Tab. 29: Reduzierung von BPV bei einer Zugabe von 0,8 kg Kalk / kg TS (Haufwerk wurde erst nach einer halben Stunde mit schon abgekühltem Material errichtet)

Zeit	Randbereich KID₅₀/ml	Kernbereich KID₅₀/ml
0-Probe	1,00E+05	1,00E+05
1h	1,63E+05	4,08E+04
24h	3,52E+04	2,31E+03

KID₅₀/ml: kulturinfektiöse Dosis 50%

In den Tenazitätsversuchen mit dem Bovinen Parvovirus wurde im Versuch KS II nach 24-stündiger Inkubation der Keimträger im Kernbereich des Substrathaufens ein Keimgehalt von $2,3 \times 10^3$ KID₅₀/ml und im Randbereich von $3,5 \times 10^4$ KID₅₀/ml nachgewiesen (Tab. 29).

In den weiteren Versuchen mit Klärschlamm wurde mit einer Kalkdosierung von 0,9 kg und 1,1 Kalk pro kg Trockensubstanz gearbeitet. Die Proben wurden aus dem Kernbereich der in einem Behälter (Bild 4) gelagerten Mischung entnommen. Der Temperaturverlauf wurde an drei unterschiedlichen Stellen ermittelt.

Im Versuch KS V wurde eine Austragstemperatur von 67 bis 72°C gemessen. Im Kernbereich des Substrates wurde über eine Stunde eine Temperatur von über 60°C ermittelt. Die maximal gemessene Temperatur lag bei 75°C. Im Versuch KS IV trat das Substrat mit einer Temperatur von 52 bis 55°C aus dem Mischaggregat aus. Der Temperaturbereich über 50°C konnte über 5 Stunden gehalten werden und es wurde eine maximale Temperatur von 57°C gemessen (Tab. 30).

Tab. 30: Temperaturverlauf des Mischgutes bei Zugabe unterschiedlicher Kalkmengen
 KS IV mit 0,9 kg Kalk/kg TS
 KS V mit 1,1 kg Kalk/kg TS

VERSUCH KS IV : Austragstemperatur 52-55°C			
Zeit	Temperatur 1 in °C	Temperatur 2 in °C	Temperatur 3 in °C
15 min.	53	51	51
30 min.	53	53	51
60 min.	53	54	54
90 min.	55	54	57
120min	56	57	54
240 min.	55	56	54
VERSUCH KS V : Austragstemperatur 67-72°C			
15 min.	72	60	73
30 min.	69	67	75
60 min.	67	63	74
90 min.	65	60	72
120 min.	63	60	70

In den Keimträgern mit Askarideneiern konnte ein Ausgangswert von 75% entwicklungsfähiger Askarideneier nachgewiesen werden. Im Versuch KS V sind nach 15 Minuten und im Versuch KS IV sind nach einer halben Stunde keine entwicklungsfähigen Spulwurmeier mehr nachweisbar (Tab. 31).

Tab. 31: Entwicklungsfähigkeit von Askarideneiern bei Zugabe unterschiedlicher Kalkmengen

Zeit	VERSUCH KS IV 0,9kg Kalk / kg TS	VERSUCH KS V 1,1kg Kalk / kg TS
0 Probe	75 %	75%
15 min.	2%	0%
30 min.	0%	0%
60 min.	0%	0%
120 min.	0%	0%

Bei den Tenazitätsversuchen mit dem Bovinen Parvovirus konnte ein Ausgangswert von 10^5 KID₅₀/ml in den Viruskeimträgern nachgewiesen werden. Im Versuch IV und V wurde nach einer bzw. zwei Stunden noch ein Keimgehalt von 10^4 KID₅₀/ml festgestellt. Nach 24h konnte eine Reduzierung des Keimgehaltes an Bovinen Parvovirus in beiden Versuchen um 4 Zehnerpotenzen nachgewiesen werden (Tab. 32).

Tab. 32: Reduzierung von BPV bei Zugabe unterschiedlicher Kalkmengen

Zeit	VERSUCH KS IV 0,9kg Kalk / kg TS		VERSUCH KS V 1,1kg Kalk / kg TS	
0 Probe	7,32E+05 KID ₅₀ /ml		7,32E+05 KID ₅₀ /ml	
15 min.	1,52E+05 KID ₅₀ /ml		9,86E+04 KID ₅₀ /ml	
30 min.	1,83E+05 KID ₅₀ /ml		2,30E+04 KID ₅₀ /ml	
60 min.	1,83E+05 KID ₅₀ /ml		2,30E+04 KID ₅₀ /ml	
120min	1,26E+04 KID ₅₀ /ml		1,05E+02 KID ₅₀ /ml	
24h	5,60E+01 KID ₅₀ /ml		5,60E+01 KID ₅₀ /ml	

KID₅₀/ml: kulturinfektiöse Dosis 50%

Bei den Tenazitätsversuchen mit Salmonella senftenberg (Tab. 33) konnte im Versuch KS V innerhalb von 15 Minuten eine Reduzierung bis auf die Nachweisgrenze erreicht werden. Im Versuch KS IV erfolgte auf den Holzkeimträger nach 15 Minuten eine Reduzierung bis zur Nachweisgrenze. Auf einem Metallkeimträger konnte nach 15 Minuten noch ein Keimgehalt an von $9,3 \times 10^3$ KBE/g nachgewiesen werden, die Parallelprobe zu diesem Keimträger war nicht auswertbar.

Tab. 33: Reduzierung von Salmonella senftenberg bei Zugabe unterschiedlicher Kalkmengen

Zeit	VERSUCH KS IV 0,9kg Kalk / kg TS		VERSUCH KS V 1,1kg Kalk / kg TS	
	Metallkeimträger	Holzkeimträger	Metallkeimträger	Holzkeimträger
0 Probe	2,30E+07	2,30E+07	2,30E+07	2,30E+07
15 min.	9,30E+03	n.n.	n.n.	n.n.
30 min.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
60 min.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

KBE/g: Koloniebildende Einheiten

Der Keimgehalt an Fäkalstreptokokken konnte im Versuch KS V innerhalb von 15 Minuten um 6 Zehnerpotenzen reduziert werden. Im Versuch IV erfolgte eine Reduzierung um 5 Zehnerpotenzen nach 30 Minuten.

Tab. 34: Reduzierung von Fäkalstreptokokken bei Zugabe unterschiedlicher Kalkmengen

Zeit	VERSUCH KS IV 0,9kg Kalk / kg TS		VERSUCH KS V 1,1kg Kalk / kg TS	
	Metallkeimträger KBE/g	Holzkeimträger KBE/g	Metallkeimträger KBE/g	Holzkeimträger KBE/g
0 Probe	4,30E+06	2,30E+07	4,30E+06	2,30E+07
15 min.	---	2,30E+04	n.n.	4,30E+01
30 min.	2,10E+01	2,30E+02	n.n.	n.n.
60 min.	n.n.	2,30E+01	n.n.	n.n.

n.n.: nicht nachweisbar
KBE/g: Koloniebildende Einheiten

7.4.2 Gärrückstand

Der anaerob mesophil stabilisierte Gärrückstand hatte einen Trockensubstanzgehalt von 18 – 20 % TS und einen Ammoniumgehalt von 1,8 bis 2,2 % bzw. auf den Trockensubstanzgehalt.

In Abb. 13 ist das Temperaturverhalten des Mischgutes am Austrag des Mischers dargestellt. Man kann deutlich erkennen, dass die Temperatur des Mischgutes, ebenso wie bei Klärschlamm als Substrat, sehr gut über die Kalkzugabemenge gesteuert werden kann.

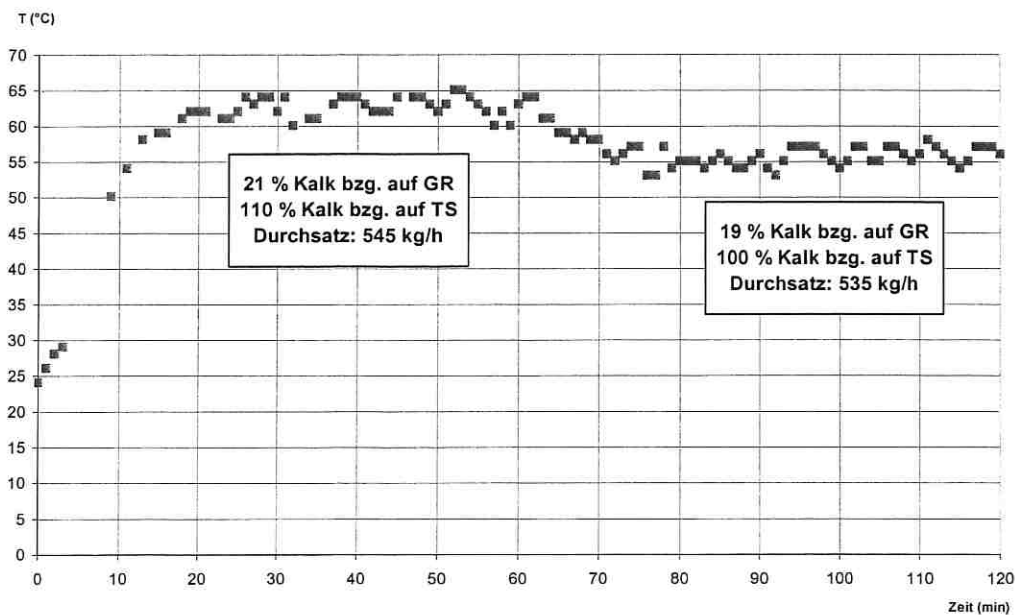


Abb. 13: Unterschiedliche Kalkzugaben bei konstantem Zufluss von Gärrückstand (GR)

Allerdings ergibt sich gegenüber dem Klärschlamm der Nachteil, dass eine wesentlich größere Löschverzögerung auftritt, so dass in einer Nachreaktionsphase die Temperaturen noch um ca. 10 – 15 °C steigen. Dieser Effekt ist in Abb. 14 darge-

stellt. Dabei zeigt sich, dass dieser Temperaturanstieg innerhalb eines Zeitraumes von ca. 15 Minuten nach dem Austrag aus dem Mischaggregat stattfindet.

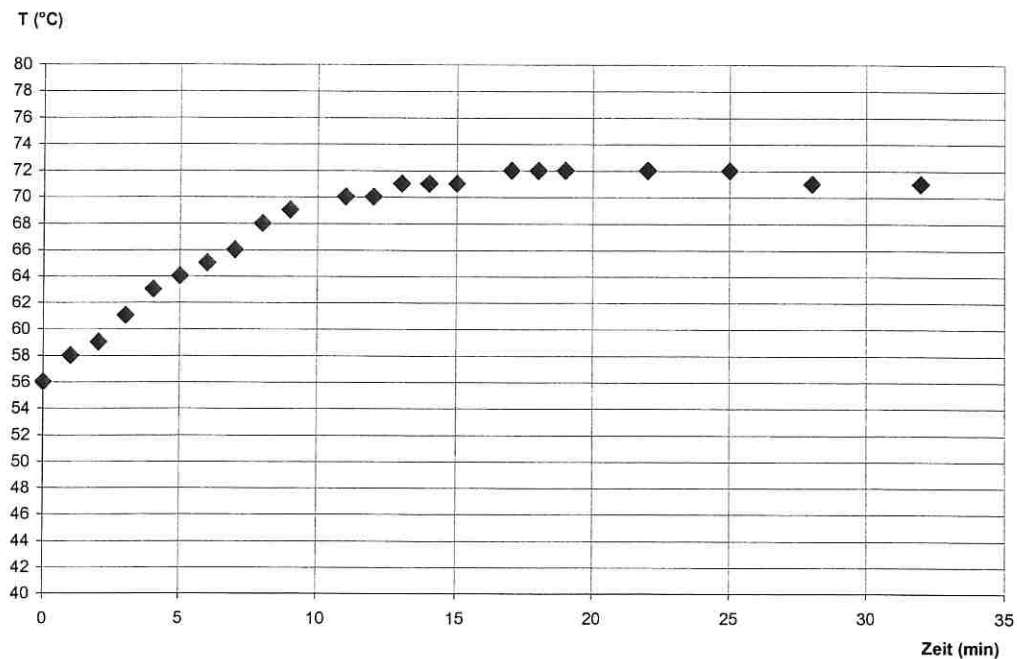


Abb. 14: Temperaturentwicklung von gekalkten Gärrückständen nach Austrag aus dem Mischaggregat

Im ersten Versuch (GR I) wurde mit einer Kalkmenge von 1,1 kg Kalk pro kg Trockensubstanz gearbeitet, im zweiten Versuch (GR II) wurden 1,0 kg Kalk pro kg Trockensubstanz verwendet.

In dem Versuch G I lag die Austragstemperatur des Mischgutes bei 60 –65°C. Durch die Nachreaktion wurde ein Temperaturbereich zwischen 75°C und 80°C erreicht.

Tab. 35: Temperaturverlauf des Mischgutes bei Zugabe unterschiedlicher Kalkmengen

VERSUCH GI: Austragstemperatur 60-65°C		
Zeit	Temperatur 1 in °C	Temperatur 2 in °C
15 min.	81	75
30 min.	78	76
60 min.	76	76
90 min.	78	75
VERSUCH GII: Austragstemperatur 53-57°C		
15 min.	67	63
30 min.	71	71
60 min.	75	72
90 min.	73	71
120 min.	66	73
240 min.	67	62

Dieser Temperaturbereich blieb über den Untersuchungszeitraum von 1½ Stunden erhalten. Die Austragstemperatur des Mischgutes lag im Versuch G II bei 53-55°C, innerhalb von zwei Stunden wurde eine Temperatur von 60°C im Mischgut nicht unterschritten (Tab. 35).

In den Keimträgern von *Ascaris suum* konnte ein Ausgangswert von 80% entwicklungsfähiger Askarideneier nachgewiesen werden. Nach 15 Minuten Inkubation sind im Versuch GI noch 2% und im Versuch GII ein Prozent entwicklungsfähiger Spulwurmeier nachweisbar. Nach einer halben Stunde sind in beiden Versuchen keine entwicklungsfähigen Askarideneier mehr nachweisbar (Tab.36).

Tab. 36: Entwicklungsfähigkeit von Askarideneiern bei Zugabe unterschiedlicher Kalkmengen

Zeit	VERSUCH GI 1,1 kg Kalk / kg TS	VERSUCH GII 1,0 kg Kalk / kg TS
0 Probe	80 %	80%
15 min.	2%	1%
30 min.	0%	0%
60 min.	0%	0%
120 min.	0%	0%

Bei den Tenazitätsversuchen mit dem Bovinen Parvovirus konnte ein Ausgangswert von 10^6 KID₅₀/ml in den Viruskeimträgern nachgewiesen werden. Im Versuch G I erfolgte innerhalb von einer Stunde eine Reduzierung des Keimgehaltes um 5 Zehnerpotenzen. Innerhalb von 30 Minuten erfolgte im Versuch II eine Reduzierung des Keimgehaltes um 5 Zehnerpotenzen (Tab.37).

Tab. 37: Reduzierung von BPV bei Zugabe unterschiedlicher Kalkmengen

Zeit	VERSUCH GI 1,1 kg Kalk / kg TS	VERSUCH GII 1,0 kg Kalk / kg TS
0 Probe	1,93E+06 KID ₅₀ /ml	1,93E+06 KID ₅₀ /ml
15 min.	1,30E+05 KID ₅₀ /ml	1,75E+03 KID ₅₀ /ml
30 min.	2,13E+03 KID ₅₀ /ml	2,30E+00 KID ₅₀ /ml
60 min.	7,84E+01 KID ₅₀ /ml	2,30E+00 KID ₅₀ /ml
120 min.	2,30E+00 KID ₅₀ /ml	2,30E+00 KID ₅₀ /ml

KID₅₀/ml: kulturinfektiöse Dosis 50%

Bei den Tenazitätsversuchen mit *Salmonella senftenberg* konnte nach 15 Minuten keine Keime mehr nachgewiesen werden (Tab. 38).

Der Keimgehalt von Fäkalstreptokokken konnte im Versuch G I auf Holzkeimträgern innerhalb von 15 Minuten um 6 Zehnerpotenzen reduziert werden, auf Metallkeimträgern erfolgte eine Reduzierung des Keimgehaltes nach 30 Minuten um 4

Zehnerpotenzen. Im Versuch GII erfolgte eine Reduzierung um 4 Zehnerpotenzen nach 15 Minuten (Tab. 39). Nach 30 Minuten wurde auf den Holzkeimträgern ein Keimgehalt an Fäkalstreptokokken von $2,4 \times 10^4$ KBE/g festgestellt.

Tab. 38: Reduzierung von Salmonella senftenberg bei Zugabe unterschiedlicher Kalkmengen

Zeit	VERSUCH GI 1,1 kg Kalk / kg TS	VERSUCH GII 1,0 kg Kalk / kg TS
0 Probe	2,30E+05 KBE/g	2,30E+05 KBE/g
15 min.	n.n.	n.n.
30 min.	n.n.	n.n.
60 min.	n.n.	n.n.

n.n.: nicht nachweisbar
KBE/g: Koloniebildende Einheiten

Tab. 39: Reduzierung von Fäkalstreptokokken bei Zugabe unterschiedlicher Kalkmengen

Zeit	VERSUCH GI 1,1 kg Kalk / kg TS		VERSUCH GII 1,0 kg Kalk / kg TS	
	Metallkeimträger KBE/g	Holzkeimträger KBE/g	Metallkeimträger KBE/G	Holzkeimträger KBE/g
0 Probe	2,33E+05	2,30E+06	2,33E+05	2,30E+06
15 min.	1,15E+01	n.n.	2,52E+01	n.n.
30 min.	9,30E+00	n.n.	7,40E+00	2,40E+04
60 min.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

n.n.: nicht nachweisbar
KBE/g: Koloniebildende Einheiten

7.4.3 Homogenität

Die Homogenität einer Feststoffmischung hängt vom Grad der Durchmischung (Mischungsgrad) ab. So treten z.B. bei der diskontinuierlichen Herstellung von Feststoffmischungen zu Beginn des Mischvorgangs an unterschiedlichen Stellen der Mischung große Unterschiede auf, während das Produkt einer kontinuierlichen Mischung bei konstanten Parametern den gleichen Mischungsgrad aufweist.

Eine einfache Methode zur Ermittlung des Mischungsgrades kann über die Bestimmung der Standardabweichung (Mischgüte) eines mischungsbezogenen Analysenparameters erfolgen. Dazu werden im diskontinuierlichen Misch-Betrieb Proben an unterschiedlichen Orten der Mischung genommen, z.B. im Kern- und Randbereich, und im stationären, diskontinuierlichen Betrieb zu unterschiedlichen Zeiten. Die Proben werden auf einen einfachen, aussagefähigen Analysenparameter hin untersucht und daraus die jeweilige Mischgüte ermittelt [57, 58].

$$s = \frac{\sqrt{\sum (x_i - x_m)^2}}{\sqrt{n - 1}} \quad (5)$$

- n = Anzahl Proben
 s = Standardabweichung
 x_i = Konzentration zur Zeit i
 x_m = Mittelwert

Die theoretische initiale (=maximale) Standardabweichung (s_{\max}) eines zwei-Komponentensystems lässt sich ebenfalls einfach errechnen:

$$S_R = \frac{s}{x_m} \quad (6)$$

$$s_{\max} = \sqrt{x_0/x_m(1 - x_0/x_m)}$$

- S_R = rel. Standardabweichung
 s_{\max} = max. Standardabweichung
 x_0 = Anfangskonzentration

Dementsprechend errechnet sich der Mischungsgrad M wie folgt:

$$M = 1 - \frac{S_R}{S_{\max}} \quad (7)$$

M = Mischungsgrad

M = 1 ideale Mischung

M < 1 reale Mischung

M = 0 keine Mischung

Bei der Hygienisierung von Bioabfall mit Kalk besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Trockensubstanz-Gehalt und dem Kalkanteil (s. Abb. 15).

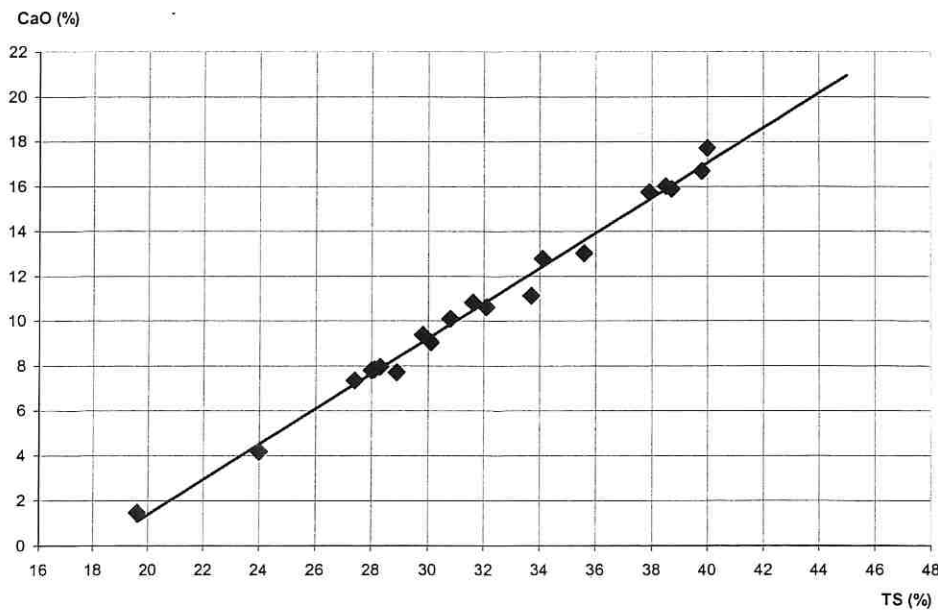


Abb. 15: Zusammenhang zwischen Trockensubstanzgehalt und CaO-Gehalt

Daher lässt sich aus der einfachen Ermittlung des Trockensubstanz-Gehaltes der Mischungsgrad direkt berechnen.

Tab. 40: Berechnung des Mischungsgrades
(Klärschlamm: 450 kg/h; Kalk: 36 kg/h, Temp.: 31°C)

Zeit (min.)	TS (%)
0	18,0
30	28,9
45	28,1
60	28,3
75	28,0
90	28,5
100	27,4
110	27,6
$x_0 = 18,0; x_m = 28,1$	
$s = 0,60; s_R = 0,021; s_{max} = 0,48$	
$M = 0,96$	

Tab. 41: Berechnung des Mischungsgrades
(Klärschlamm: 450 kg/h; Kalk: 45 kg/h, Temp.: 38°C)

Zeit (min.)	TS (%)
0	18,0
155	30,8
165	30,5
170	29,8
185	30
190	31
200	29,7
210	29,5
$x_0 = 18,0; x_m = 30,2$	
$s = 0,77; s_R = 0,025; s_{max} = 0,48$	
$M = 0,95$	

Tab. 42 : Berechnung des Mischungsgrades
(Klärschlamm: 450 kg/h; Kalk: 79 kg/h, Temp.: 55°C)

Zeit (min.)	TS (%)
0	18,0
245	37,9
265	39,8
275	38,7
285	38,0
300	37,8
320	38,5
345	38,1
$x_0 = 18,0; x_m = 38,4$	
$s = 1,10; s_R = 0,029; s_{max} = 0,48$	
$M = 0,94$	

Anhand der Tabellen 40 - 42 ist zu erkennen, dass im kontinuierlichen Betrieb Mischungsgrade zwischen 94% und 96%, bei maximalen Differenzen in den Trockensubstanz-Gehalten zwischen 2% und 1,5%, erreicht werden können.

Die optische Beurteilung des Mischgutes (Bild 5) bestätigt noch einmal sehr anschaulich den rechnerisch ermittelten Mischungsgrad.



Bild 5: Klärschlamm unbehandelt (rechts) und mit Branntkalk behandelt (links)

In Bild 5 ist ein Vergleich zwischen unbehandeltem und mit Branntkalk behandeltem Klärschlamm dargestellt. Anhand dieser Darstellung lässt sich die gute und

homogene Einmischung des Kalkes, wie sie sich auch aus der Berechnung des Mischungsgrades ergibt, darstellen.

Bei den diskontinuierlichen Versuchen wurden Proben im Kern- und im Randbereich der Mischungen gezogen. Die Differenzen zwischen den jeweils gemessenen Konzentrationen liegen in der gleichen Größenordnung wie bei den kontinuierlichen Versuchen (Tab. 40 - 42), so dass auch hier die Mischungsgrade in der gleichen Größenordnung zu finden sind.

Tab. 43: TS-Gehalte im Kern- und Randbereich versch. Bioabfälle bei diskontinuierlichen Mischversuchen

Art des Bioabfalls	TS (%)	CaO (% bzg. auf TS)
Gärrückstand (Kern)	28,4	12,7
Gärrückstand (Rand)	29,7	11,9
Gärrückstand (Kern)	33,3	15,6
Gärrückstand (Rand)	32,1	15,8
Gärrückstand (Kern)	39,5	27,5
Gärrückstand (Rand)	38,9	28,7
Gärrückstand (Kern)	46,2	35,3
Gärrückstand (Rand)	47,8	34,5
Gärrückstand (Kern)	50,6	39,1
Gärrückstand (Rand)	49,4	39,0
Panseninhalt (Kern)	26,2	19,0
Panseninhalt (Rand)	24,7	19,9
Panseninhalt (Kern)	43,5	29,6
Panseninhalt (Rand)	42,4	29,7

Die Bestimmung der Mischungsgrade anhand der Trockensubstanz-Gehalte hat gezeigt, dass unabhängig vom gewählten Mischsystems vergleichbar gute Homogenitäten erzielt werden können.

7.4.4 Ammoniak

Bioabfälle enthalten unterschiedliche Konzentrationen an Ammoniumverbindungen. Bei der Zugabe von Branntkalk wird dabei Ammoniak gasförmig aus diesen Verbindungen gemäß Reaktionsgleichung (8) freigesetzt.



Die im Praxisversuch eingesetzten Substrate wiesen unterschiedliche Gehalte an Ammoniumverbindungen auf. So lag der Ammoniumgehalt des Klärschlammes unter 1%, während er bei dem Gärrückstand deutlich darüber lag. (s. Kap. 6.8).

Während der kontinuierlichen Versuche wurde festgestellt, dass bei der Behandlung des Klärschlammes mit Kalk bei allen Versuchen keine Ammoniakentwicklung festgestellt werden konnte, bei der der Ammoniakgehalt in der Abluft des Mischaggregates oberhalb des MAK-Wertes von 35 mg/m^3 (Geruchsschwelle $3,5 \text{ mg/m}^3$) lag.

Anders dagegen bei der Behandlung des Gärrückstandes. Hier wurde der MAK-Wert überschritten, so dass bei einer praxisnahen Anwendung geeignete Schutzmaßnahmen ergriffen werden müssen.

8. Diskussion

In den vorliegenden Untersuchungen sollte gezeigt werden, ob sich die konzipierte Mischanlage (Mischer 3) mit der notwendigen Betriebssicherheit zur Erzeugung homogener und hygienisch einwandfreier Bioabfälle mit Branntkalk einsetzen lässt. Dazu waren zunächst Vorversuche nötig, um die Mischbarkeit der vorgesehenen Substrate mit Kalk zu untersuchen. Anhand von halbtechnischen Versuchen mit dem Mischer 3 sollten die Bedingungen für die Praxisversuche festgelegt und mit Klärschlamm und Panseninhalt überprüft werden.

Es stellte sich bei der Versuchsdurchführung heraus, dass der Mischer 3 bei der Verwendung von faserreichen Stoffen (Stroh, Panseninhalt) verstopfte und durch Fremdkörper (z.B. Steine aus Panseninhalt) beschädigt werden konnte. Um dennoch die Substrate unter gleichen Bedingungen untersuchen zu können, wurde in den halbtechnischen Versuchen mit einem Chargenmischer gearbeitet und im Praxisversuch die Substrate Klärschlamm und Gärrückstand überprüft.

8.1 Vorversuche und halbtechnische Versuche

Aus den Vorversuchen ergab sich, dass sowohl unbehandelter als auch vorab zerkleinerter **Bioabfall** aus Haushalten zu inhomogen ist, um eine homogene Vermischung mit Kalk zu gewährleisten.

Mit **Klärschlamm** konnten homogene Mischungen erzielt werden. Allerdings zeigte sich, dass im halbtechnischen Maßstab die Temperatur einen um ca. 10°C höheren Verlauf aufwies als in den Laborversuchen. Dies zeigt, dass der Mischungsgrad in den technischen Versuchen deutlich höher liegt. Zur Erreichung einer Temperatur >50°C wurden 0,8 – 0,9 kg Kalk/kg TS benötigt. Die verwendeten Klärschlämme wiesen dabei TS-Gehalte zwischen 18% - 22% auf.

Bei **Panseninhalt** (TS = 16%–28%) stellte sich die faserige Konsistenz des Substrates als Problem dar. Nur mit Hilfe des Zerkleinerungsaggregates in Mischer 2 gelang es eine homogene Mischung zu erzeugen. Dabei wurde zur Erreichung einer Temperatur >50°C 0,9 kg Kalk/kg TS benötigt.

Aufgrund des strohigen Anteils in **Rindermist** (TS = 32%) gelang es selbst mit dem Zerkleinerungsaggregat des Mixers 2 nicht, eine homogene Mischung herzustellen. Im Endprodukt lagen immer gut vermischte und nicht vermischte Anteile nebeneinander vor. Nur wenn sich dieses Substrat bereits im Rottezustand befindet, wie am Beispiel von Ziegenmist gezeigt werden konnte, lassen sich mit Mischer 2 homogene Mischungen erzeugen.

Bei **Gärrückständen** konnte eine Temperatur von >50°C im Mischgut ab einer Kalkdosierung von 0,8 kg pro kg Trockensubstanzgehalt erreicht werden.

Der Schwerpunkt der Probenahme wurde auf den Kernbereich des Kalk-Substrat-Gemisches gelegt, da der Randbereich im großtechnischen Betriebsablauf nur einen geringen Einfluss ausübt. So ist im großtechnischen Maßstab, je nach Volumen und Geometrie der Mischgutlagerung, der Randbereich bei ca. 1–5% des Gesamtvolumens anzusetzen.

Das zeitliche Raster der Probenahmen lässt nicht immer eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse zu, so dass für die Überprüfung des Hygienisierungserfolges teilweise nur Zeitspannen angegeben werden können. Die prinzipiellen Abhängigkeiten lassen sich allerdings gut erkennen.

Die verwendeten Kalkmengen sind immer auf den Trockensubstanzgehalt des Substrates bezogen, da sich im Laufe der Untersuchungen herausstellte, dass nicht nur die unterschiedlichen Substrate verschiedene Trockensubstanzgehalte besitzen, sondern auch innerhalb der Substratchargen teilweise große Unterschiede auftraten.

Zur Beurteilung der Ergebnisse ist es notwendig, ein Maßstab für den Hygienisierungserfolg festzulegen. Die Anforderungen hierzu sind in unterschiedlichen Rechtsvorgaben geregelt (Kap. 2.1). Aus diesen Vorgaben lässt sich entnehmen, dass folgende Faktoren zur Keimreduzierung diskutiert werden oder bereits festgelegt sind:

Tab. 44: Rechtliche Vorgaben zur Hygienisierung

Keime	Reduktionsfaktoren
Viren	10^4
Bakterien	$10^4, 10^5$
Sporen	$10^3, 10^4$
Wurmeier	99,9%

Insbesondere von Wurmeiern (*Ascaris suum*) ist bekannt, dass diese erst bei Temperaturen ab 50°C innerhalb kurzer Zeit inaktiviert werden können. Aus diesem Grund wird bei der Diskussion um die europäische Klärschlammrichtlinie eine Temperaturerhöhung über 50°C gefordert.

In der Literatur ist jedoch beschrieben, dass bei Erreichen von pH-Werten >12,5 und einer Lagerung des Klärschlammes von mindestens 2 Monaten das seuchenhygienische Risiko auch ohne Temperaturerhöhung drastisch reduziert werden kann [27, 65]. Diese Aussage konnte in dieser Arbeit bestätigt werden, da bei einer Kalkdosierung von 0,45 kg / kg TS ohne Temperaturerhöhung eine Reduzierung der Entwicklungsfähigkeit von Askarideneiern in Klärschlamm von 99,9% innerhalb von zwei Monaten erreicht werden konnte (Abb. 3). Die Temperaturerhöhungen, die mit den anderen Kalkzugaben von 0,9 und 1,1 kg / kg TS erreicht wurden, stimmen sehr gut mit den Laborergebnissen aus [66] überein.

In Tab. 45 sind die Ergebnisse der halbtechnischen Versuche zur **Inaktivierung von Askarideneiern** zusammenfassend dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass, unabhängig vom eingesetzten Substrat, bei Temperaturen zwischen 50 – 60°C die Inaktivierungszeit 5 – 10h und bei Temperaturen zwischen 60 – 70°C die Inaktivierungszeit 2 - 5h beträgt. Bei Temperaturen oberhalb von 80°C kann die Zeit auf <1h verkürzt werden. Zur Erreichung dieser Werte werden Kalkmengen zwischen 0,7 und 1,1 kg / kg TS bei Trockensubstanzgehalten zwischen 20 und 30% benötigt. Bei diesen Werten ist jedoch zu berücksichtigen, dass neben der maximal erreichten

Temperatur auch die Zeit, in der sie sich einstellt, einen wesentlichen Einfluss ausübt.

Tab. 45: Inaktivierung von Askarideneiern

Reduktionsfaktor: 99,9% für Askarideneier				
Substrat	TS (%)	Kalkmenge (kg Kalk / kg TS)	T _{max} (°C)	Dauer (h)
Klärschlamm	22	0,45	17	670 - 1300
	22	0,9	57	5 - 10
	22	1,1	71	2 - 5
Panseninhalt	28	0,7	64	3 - 5
	28	0,9	74	0,5 - 2
	16	1,25	35	50 - 670
	16	1,56	55	5 - 10
Gärrückstand	30	0,7	64	2 - 5
	25	0,8	62	2 - 5
	25	1	69	2 - 5
	25	1,1	84	<1

Die Ergebnisse mit 1,1 kg Kalk / kg TS decken sich ebenfalls mit den Ergebnissen von LANG [45]. Er konnte nach einer halben Stunde eine Reduzierung der Entwicklungsfähigkeit der Askarideneier um 97,3% nachweisen und fand zwei Stunden nach der Vermischung von Kalk mit Klärschlamm keine entwicklungsfähigen Askarideneier mehr vor.

In Kap. 7.3 konnte gezeigt werden, dass unter den Viren der Bovine Parvovirus und unter den Bakterien die Fäkalstreptokokken am widerstandsfähigsten gegenüber der Kalkbehandlung waren. Daher wurde die Reduzierung dieser Keime in den Tabellen 46 und 47 noch einmal gegenübergestellt.

Das **Bovine Parvovirus** wird als Testkeim in thermophilen Prozessen verwendet. Der Nachweis seiner Reduzierung über drei bis vier Zehnerpotenzen in thermophil betriebenen Biogasanlagen erlaubt den Rückschluss, dass mit einem hinreichend großen Sicherheitsspielraum alle relevanten Tierseuchenerreger und fast alle anderen Bakterien und Viren sicher inaktiviert worden sind [51].

Anhand von Tab. 46 lässt sich erkennen, dass zur Reduzierung von BPV mehr Zeit benötigt wird, als zur Inaktivierung von Askarideneiern. So werden bei Temperaturen zwischen 50 – 60°C über 10h und bei Temperaturen zwischen 60 – 70°C etwa 5h zur Reduzierung dieses Keimes benötigt. Bei Temperaturen oberhalb von 80°C kann die Zeit auf 0,5 - 2h verkürzt werden. Zur Erreichung dieser Werte werden Kalkmengen zwischen 0,8 und 1,1 kg / kg TS bei Trockensubstanzgehalten zwischen 20 und 30% benötigt.

Tab. 46: Reduzierung von BPV

Reduktionsfaktor: 10 ⁴ für BPV				
Substrat	TS (%)	Kalkmenge (kg Kalk / kg TS)	T _{max} (°C)	Dauer (h)
Klärschlamm	22	0,9	57	>10
	22	1,1	71	2
Panseninhalt	28	0,7	64	>10
	28	0,9	74	5
	16	1,25	35	>24
	16	1,56	55	>24
Gärrückstand	25	0,8	62	5
	25	1	69	4 - 5
	25	1,1	84	0,5 - 2

In Gegensatz zu den anderen Substraten konnte der Keimgehalt an BPV in Gärrückständen schon bei Erreichen von Temperaturen zwischen 60°C und 70°C innerhalb von 5 h um 4 Zehnerpotenzen mit einer Kalkmenge von 0,8 kg / kg TS reduziert werden. Dies ist vermutlich auf die erhöhte Ammoniakbildung (Kap. 7.4.4) während der Reaktion des Branntkalks mit dem Substrat Gärrückstand zurückzuführen. BPV scheint im Vergleich zu Poliovirus empfindlicher auf Ammoniak zu reagieren [68]. Ammonium, das selber nicht viruzid wirkt, zeigt nach der Umwandlung zu Ammoniak durch Erhöhung des pH-Wertes und der Temperatur eine inaktivierende Wirkung auf BPV. Diese Wirkung beruht auf einer Spaltung der RNA [19].

Tab. 47: Reduzierung von Fäkalstreptokokken

Reduktionsfaktor: 10 ⁴ für Fäkalstreptokokken				
Substrat	TS (%)	Kalkmenge (kg Kalk / kg TS)	T _{max} (°C)	Dauer (h)
Klärschlamm	22	0,2	26	24
	22	0,9	57	0,5
	22	1,1	71	0,5
Panseninhalt	28	0,2	22	24
	28	0,3	22	1
	28	0,6	22	1
	16	1,25	35	<1
Gärrückstand	25	0,1	24	10
	25	0,2	32	2 - 5
	30	0,3	32	1 - 3

Zur Reduzierung von **bakteriellen Keimen** reicht eine pH-Wert-Erhöhung bei der Vermischung mit Kalk aus. Dabei ist ein Mindestgehalt von ca. 0,1 kg Kalk pro kg

Trockensubstanzgehalt erforderlich, um den pH-Wert über einen längeren Zeitraum stabil zu halten. Anhand von Tabelle 46 ist zu erkennen, dass bei Kalkmengen von 0,3 – 0,6 kg / kg TS die Reduzierung bakterieller Keime (am Beispiel der Fäkalstreptokokken, Tab. 47) bereits innerhalb von 1h erreicht werden kann. Bei diesen Kalkmengen werden ebenfalls **ECBO-Viren** entsprechend reduziert.

Diese Ergebnisse stimmen mit Untersuchungen von OSTERTAG et al. [67] überein.

Auf die Ergebnisse mit den Sporen von *Clostridium perfringens* wird nicht näher eingegangen, da sich im Laufe der Versuche herausstellte, dass sie als Indikatorkeime nicht geeignet sind. Aufgrund von widersprüchlichen Ergebnissen werden sie auch in der Literatur mittlerweile als Indikatorkeim in Frage gestellt [52, 47]. BÖHM und auch KNIE et. al. stellten in ihren Untersuchungen fest, dass dieser Keim aufgrund seiner schwankender Ergebnisse keine klare Aussage bezüglich seiner Inaktivierung zulässt.

Clostridium perfringens Sporen wurden in dieser Arbeit unter anderem als Indikatorkeim ausgewählt, weil sie für die Endproduktprüfung (nicht nachweisbar in 1g) für Bioabfälle auf europäischer Ebene zur Diskussion standen. Mittlerweile wird davon aber wieder Abstand genommen, da *Clostridium perfringens* ubiquitär im Boden vorkommt und seine vollständige Eliminierung eine zu hohe Anforderungen an die Hygienisierung von Komposten/Gärrückständen stellen würde. Als sporenbildende Bakterien sind sie in der Lage, Temperaturen über 100°C zu überstehen. Um sie zu inaktivieren, müssten alle Komposte/Gärrückstände noch einem zusätzlichen Sterilisationsgang unterzogen werden, was nicht der Sinn der biologischen Behandlung von Bioabfällen sein kann. Auch aus dem Entwurf der österreichischen Kompostverordnung wurde dieser Indikatorkeim wieder gestrichen.

8.2 Praxisversuche

Aus den Versuchen im halbtechnischen Maßstab wurde ermittelt, dass zur Reduzierung resistenter Keime, wie Askarideneier und Bovine Parvoviren, Kalkmengen zwischen 0,8 – 1,1 kg / kg TS benötigt werden. Daher wurden in den Praxisversuchen diese Kalkmengen dosiert. Die hergestellten Mischungen waren homogen.

Die Ergebnisse zeigen (Tab. 48), dass die Zeiten für die Inaktivierung der Keime teilweise drastisch reduziert werden konnten gegenüber den halbtechnischen Versuchen. Dies hängt damit zusammen, dass im stationären Zustand der Temperatureinfluss sofort wirksam werden konnte. Dagegen stellt sich im Chargenbetrieb die Temperatur erst über einen längeren Zeitraum langsam ein.

Für die Reduzierung von Bovinen Parvoviren spielt die Ammoniakfreisetzung eine wichtige Rolle. Nur wenn bei der Hygienisierung Ammoniak freigesetzt wird, wie im Fall der Gärrückstände, dann reicht auch für diese Keimhygienisierung eine Zeit von 0,5 h bei der entsprechenden Temperatur aus.

Tab. 48: Hygienisierungszeiten bei den Praxisversuchen

kg Kalk pro kg TS	Temp. (°C)	Askarideneier	BVP	Salm. Senf.	FKS
0,9	50 - 55	0,5 h	24 h	0,25 h	0,5 h
1 – 1,1	65 - 75	0,25 h	0,5 – 2 h	0,25 h	0,25 h

Es hat sich herausgestellt, dass mit dem verwendeten Mischaggregat (Mischer 3) nicht alle vorgesehenen Substrate mit Kalk gemischt werden konnten. Insbesondere stark faserhaltige oder strohige Substrate führen zu Verstopfungen innerhalb des Aggregates. Zur Behandlung dieser Substrate hat sich teilweise ein Chargenmischer mit einem integrierten Zerkleinerungsaggregat als geeigneter erwiesen.

Die in den Praxisversuchen eingesetzten Substrate Klärschlamm und Gärrückstand, mit Trockensubstanzgehalten zwischen 18 – 20%, konnten jedoch mit dem verwendeten Mischaggregat sicher hygienisiert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Aufenthaltszeit im Mischer nicht ausreicht, um eine vollständige Hygienisierung zu gewährleisten. Das Material muss daher anschließend so gelagert werden, dass die Temperatur auf hohem Niveau gehalten werden kann. Am besten eignet sich hierzu ein Container, der evtl. noch mit einer Plane abgedeckt werden kann.

Die ursprünglich vorgesehene Kalkdosierung oberhalb des eigentlichen Mischraums in einem geschlossenen System, erwies sich als nicht praktikabel, da es durch die Wasserdampffreisetzung zu Verstopfungen der Dosiereinrichtung kam. Mit Verlegung dieser Dosierstelle in den Zugabebereich des Substrates konnte ein problemloser Betrieb aufrecht erhalten werden.

Aufgrund der störungsfreien Zuführung von Substrat und Kalk ließ sich auch ohne besondere Regelung ein Betrieb der Anlage über Stunden aufrecht erhalten, so dass eine einfache und sichere Handhabung gegeben ist.

Probleme ergeben sich, wenn die eingesetzten Substrate einen hohen Ammoniumgehalt aufweisen, so dass bei der Kalkbehandlung Ammoniak ausgestrippt wird. In diesen Fällen tritt eine Beeinträchtigung der näheren Umgebung des Mischaggregates auf, so dass ggfs. Ammoniakrückhaltemaßnahmen eingesetzt werden müssen.

Eine alternative Hygienisierungsmöglichkeit von Bioabfällen ist die Kompostierung. Die Kosten der Kompostierung liegen bei einem TS-Gehalt von 20% zwischen 60 und 110 € / t Bioabfall. Für die Hygienisierung mit Kalk werden zwischen 16 – 20 € / t Bioabfall bei dem Einsatz von Branntkalk benötigt. Zusätzlich sind entweder Investitionskosten oder Mietkosten für das Mischaggregat und die Kalkdosierung erforderlich. Diese Kosten sind jedoch in starkem Maße abhängig von den Jahresdurchsatzmengen und der benötigten Infrastruktur.

9. Literaturverzeichnis

- 1 KrW-/AbfG, Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen, BGBl I 1994, 2705
- 2 **BÖHM, R.** (1999)
Begründung der Hygieneregelung und vergleichbare Regelungen in anderen Ländern. *Tagungsband zum 7. Hohenheimer Seminar: Biologische Abfallbehandlung- Erste Erfahrungen mit der Bioabfallverordnung in Deutschland*, 29.-31. März 1999, Universität Hohenheim.
- 3 **STRAUCH, D.** (1991)
Survial of Pathogenic Microorganism and Parasites in Excreta, Manure and Sewage Sludge. *Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz.* 10: 813-846
- 4 BioAbfV (Bioabfallverordnung), Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden vom 21. Sept. 1998 (BGBl. I S. 2955)
- 5 Düngemittelverordnung, vom 4. August 1999, BGBl.I S.1758, geändert am 17.12.1999, BGBl. I. S. 2451
- 6 **Braumiller, P.; Martens, W.; Philipp, W. und Böhm, R.** (1999)
Development of suitable monitoring system for the pathogene reducing potential of the rotting process. IEA Bioenergy Workshop Vol. II. Hygienic and Environmental Aspects of Anaerobic Digestion: Legislation and Experiences in Europe Dt. Vet. Med. Gesellschaft, Gießen, S.107
- 7 AbfKlärV, Klärschlammverordnung vom 15. April 1992 (BGBl. I S.912), geändert durch VO v. 6.3.1997 (BGBl. I S.446)
- 8 **FRICKE, K.** (2002)
Abfallmengen und Qualität für biologische Verwertungs- und Behandlungsverfahren.
ATV-Handbuch, Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung, Hrsg. ATV-DVWK. Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- 9 AbfAbIV, Ablagerungsverordnung (Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen) vom 20.Februar 2001
- 10 **FEHRENBACH, H** (2001)
Ökobilanz für die Verwertung organischer Düngemittel, Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und andere Dünger unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes, BMU/BMVEL Wissenschaftliche Anhörung. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt

- 11 **Europäische Kommission** (2000)
Arbeitsdokument Klärschlammbewirtschaftung, 3. Fassung, Stand 27.04.2000
Anhang 1: Verfahren zur Behandlung von Klärschlamm.
- 12 **STRAUCH, D.** (1964)
Die Abwasserbeseitigung aus tierärztlicher Sicht.
Dt. Tierärztl. Wschr. **71**, 386-390
- 13 **PFUDERER, G.** (1985)
Desinfektionswirkung von Kalk bei den verschiedenen Verfahren der Klärschlammbehandlung. *Agr. wiss. Diss. Hohenheim, Stuttgarter Bericht zur Siedlungswasserwirtschaft* Band 89
- 14 **STRAUCH & PHILIPP,** (1983)
Seuchenhygienische Probleme des Klärschlammes.
Zbl. Bakt. Hyg. I Abt., Org. B. **178**, 142-154
- 15 **ROLLE / MAYR** (1993)
Medizinische Mikrobiologie, Infektions- und Seuchenlehre, Hrsg. von Anton Mayr – 6. neu bearb. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- 16 **STRAUCH, D** (1988)
Krankheitserreger und ihre epidemiologische Bedeutung.
Tierärztliche Praxis 3 : 21-27
- 17 **STRAUCH, D.** (1997)
Hygieneaspekte bei der Nutzung landwirtschaftlicher Biogasanlagen zur Kofermentation. *Amtstierärztlicher Dienst und lebensmittelkontrolle*, **1+2**, 61-69+121+132
- 18 **WELLINGER et.al.** (1991)
Biogas-Handbuch. Verlag Wirtz AG Aarau
- 19 **HOFERER, M.** (2001)
Seuchenhygienische Untersuchung 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.
- 20 **BREITENFELD, P.; MARTENS, W.; PHILIPP, W. und BÖHM, R:**(1998)
Substrathygienische Untersuchungen, Teilbereich I von Human-/ Veterinärhygiene der Bioabfallkompostierung, Hrsg. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Initiative zum Umweltschutz Band 9, Zeller Verlag, Osnabrück.
- 21 **WEILAND, P.** (2002)
Biologische Verfahren zur Bio- und Grünabfallverwertung und Restabfallbehandlung (Abschn. 6.3.2.). *ATV- Handbuch, Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung*, Hrsg. ATV-DVWK.Ernst Sohn Verlag, Berlin.

- 22 **KERN, (2002)**
 ATV-Handbuch Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung.
ATV- Handbuch, Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung,
 Hrsg. ATV-DVWK, Ernst Sohn Verlag, Berlin.
- 23 **LÖTSCHER & HUNGERBÜHLER, (1997)**
 Abfälle zur Verwendung als Dünger, Bestandsaufnahme für die Schweiz.
 Interner Bericht des Institutes für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL), Bern.
- 24 **ZIMMERMANN, K.-H. (1992)**
 Stoffflüsse bei der Lagerung und Ausbringung von Stallmist. Umweltverträgliche
 Verwertung von Festmist, KTBL Arbeitspapier 182, Darmstadt
- 25 **SAIER, M. (1987)**
 Untersuchung zum Verhalten Human- und Tierpathogener thermostabiler Viren
 bei der Pasteurisierung von Klärschlamm, Agr. wiss. Diss. Hohenheim.
- 26 **WASMUS et. al. (1986)**
 Klärschlammbehandlung mit niedrigen Kalkmengen aus seuchenhygienischen
 Gesichtspunkten. Forum-Städte-Hygiene 37
- 27 **PHILIPP,W. & OSTERTAG, S. (1986)**
 Entseuchungsverfahren mit chemischer bzw. physikalischer Wirkung –
 Technologie-
 Tagungsband des 1. Hohenheimer Seminar : Entseuchung von Klärschlamm
 8. April 1986, Universität Hohenheim.159-191
- 28 **STRAUCH & BERG (1980)**
 Mikrobiologische Untersuchungen zu Hygienisierung von Klärschlamm, 6.
 Mitteilung, Gwf Wasser/Abwasser **121**, Heft 10
- 29 **ANDREADAKIS, A.D. (2000)**
 Treatment and disinfection of sludge using quicklime
 Sludge Treatment and there effekt of pathogene,
 URL.europa.eu.int./comm/evironment/sludge/workshoppart2.pdf
- 30 **GRALLE, A. (1988)**
 Technologie der Nachkonditionierung von Klärschlamm mit Branntkalk.
 Tagungsband des 2. Hohenheimer Seminars : Entseuchung von Klärschlamm –
 Erfahrungsberichte aus der Praxis-, 23-24.Feb.1988, Universität
 Hohenheim.158-167
- 31 **Rüffer, H.; Rosenwinkel, K.H.; Otte-Witte, R. (1983)**
 Z. Wasser-Abwasser-Forsch. **16**, 220
- 32 **Peschen, N. (1995)**
 Kommunalwirtschaft **9**, 380
- 33 **BOLANZ et al. (1988)**
 Klärschlammmentseuchung durch Rohschlammaufkalkung mit nachfolgender
 mesophilen Faulung. gWf- Wasser/Abwasser **129**, Heft 10, 627-631

- 34 **PIETSCH, O.** (1981)
Salmonella. Handbuch der bakteriellen Infektionen bei Tieren, Bd.III, Hrsg. Blobel H. und Schliesser, Th.. Fischer Verlag, Stuttgart
- 35 **SELBITZ, H.-J.** (1992)
Lehrbuch der veterinärmedizinischen Bakteriologie. Gustav Fischer Verlag Jena, Jena-Stuttgart.
- 36 **WEBER, H.; MÜLLER, G.** (1996)
Biologie der Lebensmittel, Grundlage, Behr's Verlag, Hamburg.
- 37 **ROLLE / MAYR** (2002)
Medizinische Mikrobiologie, Infektions- und Seuchenlehre, Hrsg. von Anton Mayr – 7. neu bearb. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- 38 **MADIGAN, M.-T.; MARTINCKO, J.; PARKER, J.** (2001)
Brock Mikrobiologie. Spektrum, Akademischer Verlag Heidelberg.
- 39 **SINGLETON, P.** (1995)
Einführung in die Bakteriologie. Quelle & Meyer, Wiesbaden
- 40 **STRAUCH, D.; SCHREIBER-ROTHSCHILD, R.; PFUDERER, G.; KOCH, K.** (1983)
Hygienische Gesichtspunkte der Kalkbehandlung von Klärschlamm und Abwasser, GWf-Wasser/Abwasser, Heft 12, 3-10
- 41 **PENDINGER, T.** (1990)
Seuchenhygienische Untersuchungen bei der großtechnischen Optimierung einer anaerob-thermophil-mesophilen Klärschlammstabilisierung. Agr. wiss. Diss. Hohenheim.
- 42 **BOCH** (1992)
Veterinärmedizinische Parasitologie, 4. Auflage, Verlag Paul Parey.
- 43 **ROMMEL, M. et. al.** (2000)
Veterinärmedizinische Parasitologie (Boch & Supperer), 5. Auflage, Parey Verlag, Berlin
- 44 **OSTERTAG, S.** (1987)
Mikrobiologische - hygienische Untersuchungen über die Anwendung von Brannt- und Löschkalk zur Klärschlammmentseuchung. Dissertation, Vedewa Schriftenreihe, Band 4
- 45 **LANG, A.** (1987)
Mikrobiologische Untersuchungen über die Eignung verschiedener Indikatororganismen zur seuchenhygienischen Beurteilung von Klärschlamm. Dissertation Universität Hohenheim

- 46 **BRAUNMILLER, P; BÖHM, R.; HOFERER M.; MARTENS, W. und PHILIPP W.**
Abschlußbericht zu „Aeroben und anaeroben Behandlung von Bio- und
Küchenabfällen sowie anderen Rest- und Abfallstoffen tierischer Herkunft unter
den Aspekten der Seuchenhygiene. Inst. für Umwelt und Tierhygiene der
Universität Hohenheim, Stuttgart. (2000)
- 47 **KNIE, A.; BÖHM, R.; MARTENS, W. und PHILIPP, W.** (2001)
Untersuchung zur Inaktivierung von Indikatororganismen in anaeroben
Kofermentationsanlagen, Teil 2A des Abschlußberichts zum
Forschungsvorhaben UTOX 98009 „Untersuchung zur Seuchen- und
Phytohygiene in Anerobanlagen (Halb- bzw. großtechnische Anlagen)“, Inst. für
Umwelt und Tierhygiene der Universität Hohenheim, Stuttgart.
- 48 **FEACHEM et al.**(1983),
Sanitation and disease health aspects of excreta and wastewater management.
John Wiley & Sohn, Chister
- 49 **SOLDIER, W.** (1991)
Experimentelle Untersuchung zum Einfluß einer thermischen Desinfektion von
Flüssigmist auf die Vermehrungsfähigkeit ausgewählter Mikroorganismen.
Vet. Med. Diss., Univ. Gießen.
- 50 **PHILIPP, W.** (2001)
Interne Mitteilung, Vorlesungsskript „Umwelt und Tierhygiene“ des Instituts
Umwelt und Tierhygiene der Universität Hohenheim, Stuttgart
- 51 **MARTENS, W.; PHILIPP, W. und BÖHM, R.** (2000)
Seuchenhygienische Bewertung von Anaerobverfahren unter besonderer
Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Kofermentation.
Bio- und Restabfallbehandlung IV, biologisch-mechanisch –thermisch.
Witzenhausen-Institut für Abfall, Hrsg: Wiemer K. und Kern M., Druckhaus
Göttingen.
- 52 **BÖHM, R.** (2001)
Persönliche Mitteilung
- 53 **SCHWARZ, M.** (2003)
Vergleichende seuchenhygienisch-mikrobiologische Untersuchungen an einer
horizontal und drei vertikal beschickten Pflanzenkläranlagen mit vorgeschalteter
Mehrkammerfaulgruppe bzw. einem als Grobstofffang dienenden Rottebehälter
(Rottefilter). *Dissertation in Vorbereitung, Universität Hohenheim*
- 54 **Europäische Kommission,** (2001)
Arbeitspapier „Die biologische Behandlung von Bioabfällen“, zweiter Entwurf,
Stand 12. Februar 2001
URL.europa.eu.int/comm/evironment/waste/biodegradable2.de.pdf
- 55 **Schirm, V.** (2003)
„Entwicklung einer sicheren Methode zur Bioabfallhygienisierung mit Kalk“
Dissertation in Vorbereitung, Universität Hohenheim

- 56 **RAPP, A.** (1995)
Hygienisch-mikrobiologische Untersuchungen zum Verhalten von ausgewählten Bakterien und Viren während der längerfristigen Speicherung von Flüssigmist in Güllegemeinschaftsanlagen, Agr. wiss. Diss. Universität Hohenheim.
- 57 **Martin, A.; Swarbrick, J.; Cammarata, A.; Stricker, H.** (1987)
Physikalische Pharmazie, 3. Auflage
Wiss. Verl.-Ges., Stuttgart
- 58 **Sucker, H.; Asche, H.** (1991)
Pharmazeutische Technologie, 2. Auflage
Thieme-Verlag, Stuttgart
- 59 **Europäisches Komitee für Normung** (2002)
Draft WI 216026, CEN/TC 216/WG2 – N147 von Januar 2002, englische Fassung, Chemische Desinfektionsmittel und Antiseptika- Quantitativer Suspensionsversuch zur Bestimmung der viruziden Wirkung chemischer Desinfektionsmittel und Antiseptika für den Veterinärbereich- Prüfverfahren und Anforderungen. Zentralsekretariat Brüssel
- 60 **Europäisches Komitee für Normung** (2001)
Draft WI 216024, CEN/TC 216 WG2 N133 Rev 4 von März 2001, englische Fassung, Chemische Desinfektionsmittel und Antiseptika- Quantitativer Suspensionsversuch zur Bestimmung der bakteriziden Wirkung chemischer Desinfektionsmittel und Antiseptika für den Veterinärbereich- Prüfverfahren und Anforderungen. Zentralsekretariat Brüssel.
- 61 **Europäisches Komitee für Normung** (1997)
EN 1040 vom Februar 1997, Chemische Desinfektionsmittel und Antiseptika - Bakterizide Wirkung (Basistest) – Prüfverfahren und Anforderungen (Phase 1), Zentralsekretariat Brüssel.
- 62 **Europäisches Komitee für Normung** (2001)
PrEN 14347, CEN TC 216 von Dezember 2001, Chemische Desinfektionsmittel – Sporozide Wirkung (Basistest) – Prüfverfahren und Anforderungen (Phase 1), Zentralsekretariat Brüssel.
- 63 **Europäisches Komitee für Normung** (2001)
Draft WI 216040, CEN/TC 216 WG2 – N146 von Juni 2001, englische Fassung, Chemische Desinfektionsmittel und Antiseptika- Quantitativer Suspensionsversuch zur Bestimmung der sporiziden Wirkung chemischer Desinfektionsmittel und Antiseptika für den Veterinärbereich- Prüfverfahren und Anforderungen. Zentralsekretariat Brüssel.
- 64 **BÖHM, R.** (2002)
Anforderungen der Hygiene an biologische Verfahren.
ATV-Handbuch, Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung, Kapitel 16, Hrsg. ATV-DVWK. Ernst & Sohn Verlag, Berlin

- 65 SCHUH, R.; PHILIPP, W. & STRAUCH, D. (1985)**
Influence of sewage sludge with and without lime treatment on the development of *Ascaris suum* eggs. In „ Inactivation of micro-organism in sewage sludge by stabilization processes“ Hrsg, Strauch,D., Havelaar A-H. & L`Hermite, 110-113.
- 66 BANAS, S.; DELOGE, M.; MAUL, A.; & SCHWARTZBROD, J. (2002)**
Sludge hygenization: Helminth eggs destruction by lime treatment. *Ascaris* eggs as model. UMR 7564 CNRS / UHP, Fakultät der Pharmazie, Universität Nancy.
- 67 OSTERTAG, S. & STRAUCH, D. (1986)**
Hygienisch-bakteriologische Untersuchungen bei der Kalkhydratbehandlung von Rohabwasser und Primärschlamm sowie der Nachkonditionierung von Siloschlamm mit Branntkalk. *GWf-Wasser/Abwasser*, 127, Heft 6, 291-297
- 68 KOCH, K. (1982)**
Hygienisch-virologische Untersuchungen bei der Kalkkonditionierung von Klärschlamm. *Forum Städte-Hygiene* **33**, 117-119

Danksagung

Die Forschungsarbeit „Entwicklung einer sicheren Methode zur Bioabfallhygienisierung mit Kalk“ wurde mit Mitteln des Bundesministers für Wirtschaft (BMW) im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) durchgeführten Forschungsvorhabens gefördert, wofür wir an dieser Stelle unseren Dank aussprechen.

Ebenfall danken wir den Klärmeistern, Herren Meier und Bechtel, der Kläranlage Hammerstein (Baden-Württemberg) für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der Praxisversuche sowie allen beteiligten Firmen für die Überlassung der Substrate.

Köln, im Januar 2003