

Inhaltsverzeichnis

1.	<u>EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG</u>	1
2.	<u>MIKROBIOLOGISCHE GRUNDLAGEN</u>	3
2.1	ALLGEMEINE GRUNDLAGEN	3
2.1.1	ANAEROBER ABBAU.....	5
2.1.2	WACHSTUMSKINETIK.....	9
2.1.3	BEDARF AN SPURENELEMENTEN UND NÄHRSTOFFEN.....	14
2.1.4	HEMMUNG UND TOXIZITÄT.....	17
2.2	BEDEUTUNG RELEVANTER PARAMETER FÜR DEN ANAEROBEN ABBAUPROZESS	18
2.2.1	pH-WERT.....	19
2.2.2	CHEMISCHER SAUERSTOFFBEDARF (CSB).....	20
2.2.3	TOC (TOTAL ORGANIC CARBON).....	21
2.2.4	FLÜCHTIGE ORGANISCHE FETTSÄUREN.....	21
2.2.5	PHOSPHORVERBINDUNGEN.....	23
2.2.6	STICKSTOFFVERBINDUNGEN.....	23
2.2.7	SCHWEFELVERBINDUNGEN.....	24
2.2.8	TROCKENSUBSTANZ (TS, OTS).....	25
2.2.9	SAUERSTOFF.....	26
2.2.10	PUFFERKAPAZITÄT UND ALKALITÄT.....	26
2.2.11	TEMPERATUR.....	28
2.2.12	FAULGASZUSAMMENSETZUNG.....	30
2.2.12.1	Methan (CH ₄).....	31
2.2.12.2	Kohlendioxid (CO ₂).....	32
2.2.12.3	Schwefelwasserstoff (H ₂ S).....	32
2.2.13	SCHLAMMALTER (VERWEILZEIT).....	32
3.	<u>VERFAHRENSTECHNIKEN UND REAKTORTYPEN</u>	34
3.1	VERFAHRENSTECHNIK	34
3.1.1	EINSTUFIGE VERFAHRENSTECHNIK.....	34
3.1.2	ZWEISTUFIGE VERFAHRENSTECHNIK.....	34
3.2	STOFFSTRÖME UND DURCHMISCHUNG	35
3.3	REAKTORTYPEN	36
3.3.1	LABORVERSUCHSANLAGE.....	37
3.3.2	PILOTVERSUCHSANLAGE.....	38
3.3.3	GROßTECHNISCHE BIOGASANLAGE.....	41
4.	<u>VERFAHRENSSCHRITTE ZUR HERSTELLUNG VON PRODUKTEN AUS DER ZUCKERINDUSTRIE UND KARTOFFELVERARBEITENDEN BETRIEBEN</u>	43
4.1	ERZEUGUNG VON ZUCKER AUS DER ZUCKERRÜBE	43
4.2	ERZEUGUNG VON STÄRKE UND KARTOFFELDAUERPRODUKTEN	45
4.2.1	STÄRKEPRODUKTION.....	45
4.2.2	KARTOFFELDAUERPRODUKTE.....	46

5.	<u>CHARAKTERISIERUNG DER UNTERSUCHTEN SUBSTRATE AUS DER ZUCKER- UND STÄRKEPRODUKTION</u>	47
5.1	ZUCKERRÜBENPRESSSCHNITZEL (ZPS)	47
5.1.1	WEITERE RESTSTOFFE.....	53
5.2	PÜLPE UND SCHÄLBREI	54
5.3	ZUCKERÜBEN (ZR)	56
6.	<u>UNTERSUCHUNGSMETHODEN</u>	58
6.1	ANALYTIK	58
6.2	BILANZIERUNG EINES ANAEROBREAKTORS	60
6.2.1	CSB ALS BILANZIERUNGSGRÖÖE	61
6.2.2	STICKSTOFF ALS BILANZIERUNGSGRÖÖE	63
6.2.3	PHOSPHOR ALS BILANZIERUNGSGRÖÖE.....	64
6.3	BETRIEB DER LABORANLAGE	64
6.3.1	BETRIEB DER ZWEISTUFIGEN LABORANLAGE	64
6.3.2	BETRIEB DER EINSTUFIGEN LABORANLAGE.....	67
6.3.2.1	Einstufige Versuchsanlage mit ZPS.....	67
6.3.2.2	Einstufige Versuchsanlage mit Pülpe und Schälbrei	69
6.4	AKTIVITÄTSTESTS (BATCHVERSUCHE)	70
6.5	VERSUCHE ZUR NACHBEHANDLUNG DES ABLAUFSCHLAMMES AUS DEN METHANREAKTOREN	73
6.5.1	RESTAKTIVITÄT DES ABLAUFSCHLAMMES VON ANAEROB ABGEBAUTEN ZPS UND P&S.....	74
6.5.2	ZENTRIFUGENTESTS	75
6.5.3	AEROBE NACHBEHANDLUNG	79
6.5.3.1	Aerober Versuch - Batchversuch	80
6.5.3.2	Aerober Versuch mit Ablaufschlamm der abgebauten P&S - Durchlaufversuch.....	80
6.5.4	AEROBER VERSUCH MIT ABLAUFSCHLAMM DER ABGEBAUTEN ZR – BATCHVERSUCH UND DURCHLAUFVERSUCH.....	82
6.5.4.1	Ozon-Behandlung des Ablaufs aus dem Durchlaufreaktor.....	83
6.6	BETRIEB DER PILOTANLAGE	87
6.6.1	BETRIEB DER PILOTANLAGEN MIT ZPS ALS SUBSTRAT	87
6.6.2	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG MIT ZUCKERRÜBEN (ZR) ALS SUBSTRAT.....	92
6.6.3	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG MIT PÜLPE UND SCHÄLBREI ALS SUBSTRAT	92
7.	<u>DARSTELLUNG UND DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE</u>	93
7.1	VERSUCHSERGEBNISSE DES ZWEISTUFIGEN ANAEROBEN ABBAUS VON ZPS	94
7.1.1	VERSUCHSERGEBNISSE DES ZWEISTUFIGEN ANAEROBEN ABBAUS VON ZPS - LABORVERSUCHE.....	94
7.1.1.1	Prozessstabilität im mesophilen Versäuerungsreaktor mit pH-Wert Regelung	94
7.1.1.2	Prozesseinstellungen im mesophilen Versäuerungsreaktor	99
7.1.1.3	Einfluss von Bioziden auf die Versäuerung.....	102
7.1.1.4	Prozessstabilität im thermophilen Versäuerungsreaktor	103
7.1.1.5	Prozessstabilität und Abbaugrade in den mesophilen Methanreaktoren als zweite Stufe - Laborversuche	106

7.1.2	VERSUCHSERGEBNISSE DES ZWEISTUFIGEN ANAEROBEN ABBAUS VON ZPS - PILOTVERSUCHE	114
7.2	VERSUCHSERGEBNISSE DES EINSTUFIGEN ANAEROBEN ABBAUS VON ZPS	117
7.2.1	ERGEBNISSE IM EINSTUFIGEN BETRIEB - LABORVERSUCHE	117
7.2.2	ERGEBNISSE IM EINSTUFIGEN BETRIEB - PILOTVERSUCHE	128
7.3	ERGEBNISSE ZUM ANAEROBEN ABBAU VON ZR IM EINSTUFIGEN BETRIEB - PILOTVERSUCHE	138
7.4	ERGEBNISSE BEIM ANAEROBEN ABBAU VON PÜLPE UND SCHÄLBREI IM EINSTUFIGEN BETRIEB	142
7.4.1	VERSUCHSERGEBNISSE IM LABORMAßSTAB	142
7.4.2	VERSUCHSERGEBNISSE IM PILOTMAßSTAB	146
8.	<u>UNTERSUCHUNGEN ZUR HEMMUNG DER METHANBAKTERIEN</u>	149
8.1	HEMMWIRKUNG VON BIOZIDEN	149
8.2	HEMMWIRKUNG VON ENTSCHÄUMERN	152
8.3	LIMITIERUNG DURCH SPURENELEMENTEMANGEL (BATCHVERSUCH)	155
8.4	LIMITIERUNG DURCH MANGEL AN NÄHRSTOFFEN BEIM ANAEROBEN ABBAU VON ZPS	159
8.5	LIMITIERUNG DURCH MANGEL AN NÄHRSTOFFEN BEIM ANAEROBEN ABBAU VON ZUCKERRÜBEN	162
9.	<u>START-UP VERSUCHE UND ABBAUERGEBNISSE IM EINSTUFIGEM VERFAHREN MIT FAULSCHLAMM AUS DER KOMMUNALEN KLÄRANLAGE BUDAPEST</u>	164
9.1	START-UP VERSUCHE IM LABORMAßSTAB	164
9.2	START-UP VERSUCHE IM PILOTMAßSTAB	170
9.3	HOCHFHRVERSUCHE DER REAKTOREN NACH EINER BETRIEBSPAUSE	175
9.3.1	HOCHFHRVERSUCHE IM LABORMAßSTAB	175
9.3.2	HOCHFHRVERSUCHE IM PILOTMAßSTAB	177
9.3.3	ZUSAMMENFASSUNG DER START-UP -UND HOCHFHRVERSUCHE	179
10.	<u>CHARAKTERISIERUNG DES RESTMATERIALS (ABLAUFSCHLAMM) AUS DEM ANAEROBEN ABBAU ORGANISCHER SUBSTRATE</u>	182
10.1	NACHBEHANDLUNG DES ABLAUFSCHLAMMES ANAEROB ABGEBAUTER ZPS	182
10.1.1	BIOLOGISCHE RESTAKTIVITÄT DER ANAEROB ABGEBAUTEN ZPS	182
10.1.2	AEROBE ABBAUBARKEIT DER ANAEROB ABGEBAUTEN ZPS	185
10.1.3	ENTWÄSSERBARKEIT DES ABLAUFSCHLAMMS AUS DEN ANAEROBREAKTOREN	187
10.1.4.	ENTWÄSSERUNGSEIGENSCHAFTEN DES ABLAUFSCHLAMMES AUS DER GROßTECHNISCHEN BIOGASANLAGE	188
10.1.5	VERBESSERUNG DER ENTWÄSSERBARKEIT DES ABLAUFSCHLAMMES AUS DEN ANAEROBREAKTOREN MIT KONDITIONIERUNGSMITTEL	191
10.2	ABSCHÄTZUNG DER STOFFSTRÖME AUS DEM ANAEROBEN ABBAU VON ZPS AM STANDORT KAPOSVAR	195
10.3	ABSCHÄTZUNG DER ÖKOLOGISCHEN FOLGEN DURCH DIE BIOGASANLAGE	200

<u>11. ENTSORGUNG DES RESTMATERIALS NACH ANAEROBEM ABBAU VON ZR UND P&SB</u>	203
11.1 ENTWÄSSERUNGSEIGENSCHAFTEN DES ABLAUSCHLAMMES VON ANAEROB ABGEBAUTEN ZUCKERRÜBEN	204
11.1.1 ZENTRATEIGENSCHAFTEN DES ENTWÄSSERTEN ABLAUSCHLAMMES DER ANAEROB ABGEBAUTEN ZUCKERRÜBEN HINSICHTLICH DER ENTSORGUNG ...	207
11.2 ENTWÄSSERUNGSEIGENSCHAFTEN DES ABLAUSCHLAMMES VON ANAEROB ABGEBAUTEM P&SB	208
11.2.1 ZENTRATEIGENSCHAFTEN DES ENTWÄSSERTEN ABLAUSCHLAMMES DES ANAEROB ABGEBAUTEN P&SB HINSICHTLICH DER ENTSORGUNG.....	212
11.3 ERGEBNISSE DER AEROBEN NACHBEHANDLUNG	213
11.3.1 ERGEBNISSE DER AEROBEN NACHBEHANDLUNG DER ANAEROB ABGEBAUTEN ZR IM DURCHLAUFVERSUCH	214
11.3.1.1 CSB-Abbau	214
11.3.1.2 Nitrifikation.....	217
11.3.2 ERGEBNISSE DER AEROBEN NACHBEHANDLUNG DES ANAEROB ABGEBAUTEN P&SB IM AEROBEN DURCHLAUFVERSUCH	220
11.3.2.1 CSB-Abbau	220
11.3.2.2 Nitrifikation.....	222
11.3.2.3 Verdünnungsversuche.....	223
<u>12. WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNG DER GROßTECHNISCHEN BIOGASANLAGE</u>	225
12.1 EINSPARUNG AN KOSTEN FÜR FOSSILE ENERGIE	225
12.2 ZUSÄTZLICHE EINNAHMEN DURCH DEN VERKAUF VON EMISSIONSZERTIFIKATEN	225
12.3 „BREAK EVEN POINT“ ZWISCHEN INVESTITIONS- UND BETRIEBSKOSTEN	227
<u>13. ZUSAMMENFASSUNG</u>	228
<u>14. LITERATURVERZEICHNIS</u>	232

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Kohlenstoffbilanz beim vollständigen aeroben und anaeroben Abbau organischer Stoffe	4
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus	5
Abbildung 3:	Wachstumskurve einer Bakterienkultur (Quelle: www.mallig.eduvinet.de/bio/bakwaku.gif).....	10
Abbildung 4:	Abhängigkeit der Bakterien von Wachstumsrate μ und der verfügbaren Substratkonzentration S	13
Abbildung 5:	Anteil an NH_4 und NH_3 in der flüssigen Phase in Abhängigkeit vom pH-Wert, $T = 20^\circ\text{C}$	24
Abbildung 6:	Anteile der Kohlensäureformen in Abhängigkeit vom pH-Wert bei 20°C	27
Abbildung 7:	Relative Versäuerungsrate der Säurebakterien beim Glucoseabbau in Abhängigkeit von der Temperatur (Zeotmeyer et.al, 1982; zitiert von Kroiss & Svardal, 2005)	29
Abbildung 8:	Schematische Darstellung der einstufigen Laborversuchsanlage mit Gaszylindern zur Faulgasmessung.....	38
Abbildung 9:	Schematische Darstellung der zweistufigen Pilotanlage	40
Abbildung 10:	Schema der großtechnischen Biogasanlage	41
Abbildung 11:	Schematische Darstellung der Zuckergewinnung.....	43
Abbildung 12:	Schematische Darstellung der Verfahrensschritte zur Stärkeproduktion (Agrana Stärke GmbH, 2009).....	45
Abbildung 13:	Korngrößenverteilung der aufgetauten, unbehandelten bzw. zerkleinerten ZPS.....	52
Abbildung 14:	CSB-Bilanz eines Anaerobreaktors	61
Abbildung 15:	Stickstoffbilanz eines Anaerobreaktors	63
Abbildung 16:	Ergebnisbeispiel eines Aktivitätstests im Batchversuch mit Ablaufschlamm beim Vorliegen einer Wachstumslimitierung bzw. Hemmwirkung im Vergleich zum Referenzschlamm.....	73
Abbildung 17:	a) Laborzentrifuge mit Ausschwenkrotor b) Messglas mit Schlammprobe	76
Abbildung 18:	Eindickungs- und Entwässerungsverhalten von (nicht konditioniertem) kommunalem Faulschlamm beim Zentrifugentest mit einer Laborzentrifuge: Trockensubstanz (TS_{EZ}) im Schlammkuchen in Abhängigkeit vom Beschleunigungsverhältnis ($\log z$).....	79
Abbildung 19:	Schematische Darstellung der Laborversuchsanlage zur aeroben Behandlung vom Zentrat P&S (Durchlaufversuch).....	81
Abbildung 20:	Beispiel eines Verlaufs der O_2 -Konzentration in der Versuchsanlage während der belüfteten und der nicht-belüfteten Intervalle.....	82
Abbildung 21:	Ozonanlage: Sauerstoffgenerator (Fa. Lenntech, Typ ATF-8), Ozongenerator (Fa. Fischer, Typ OZ 500), Ozonreaktor (transparente PVC-Röhre, Höhe 124 cm, Durchmesser 10 cm), Glaswaschflasche (250 mL), Ozonvernichter.	84

Abbildung 22:	Ozonverbrauch und CSB-Konzentrationen im Ablauf in Abhängigkeit von der Ozonierungszeit	86
Abbildung 23:	Verlauf der Säurekonzentrationen in Reaktor LV1 mit silierten, verdünnten ZPS (durchschnittliche Verweilzeit 5 d und Raumbelastung 14 kg CSB/(m ³ /d)).....	96
Abbildung 24:	Verlauf der Säurekonzentrationen in Reaktor LV2 mit silierten, verdünnten ZPS (durchschnittliche Verweilzeit 5 d und Raumbelastung 14 kg CSB/(m ³ .d)).....	96
Abbildung 25:	oTS-Konzentrationen im Zulauf (silierte, verdünnte ZPS) und im Ablauf der Versäuerungsreaktoren LV1 und LV2.....	97
Abbildung 26:	CSB-Konzentrationen im Zulauf (silierte, verdünnte ZPS) und im Ablauf der Versäuerungsreaktoren LV1 und LV2.....	97
Abbildung 27:	Verlauf der Konzentrationen an organischen Säuren in Reaktor LV1 in Abhängigkeit vom eingestellten pH-Wert mit Rezirkulierung aus LM1	100
Abbildung 28:	Verlauf der Konzentrationen an organischen Säuren im Reaktor LV1 mit Zugabe von Spurenelementen	101
Abbildung 29:	Versäuerungsgrad und oTS-Abbaugrad im Versäuerungsreaktor LV1 in Abhängigkeit vom pH-Wert (Ergebnisse aus den bilanzierten Versuchszeiträumen).....	102
Abbildung 30:	Anteil der organischen Säuren am CSB _{gesamt} im mesophilen und thermophilen Bereich im Versäuerungsreaktor LV2.....	105
Abbildung 31:	oTS-Konzentrationen im Zu- und Ablauf von Versäuerungsreaktor LV2 in thermophiler Betriebsweise	105
Abbildung 32:	Verlauf der oTS Abbaugrade unter verschiedenen Prozessbedingungen im Reaktor LV2	106
Abbildung 33:	Verlauf der Konzentrationen an organischen Säuren im Methanreaktor LM1 (zweite Stufe) (bei BR= 3 kg CSB/(m ³ *d))	107
Abbildung 34:	Verlauf der Konzentrationen an organischen Säuren im Methanreaktor LM2 (zweite Stufe) (bei BR= 3 kg CSB/(m ³ *d))	108
Abbildung 35:	CSB-Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Methanreaktoren LM1 und LM2 (0.-301. Versuchstag).....	108
Abbildung 36:	oTS-Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Methanreaktoren LM1 und LM2 (0.-301. Versuchstag).....	109
Abbildung 37:	Verlauf der Konzentration an organischen Säuren sowie des pH-Wertes im Versäuerungsreaktors V1 (Pilotanlage).....	115
Abbildung 38:	Konzentrationen der organischen Säuren im Reaktor LM2 (einstufig).....	119
Abbildung 39:	Verlauf der eingestellten CSB-Raumbelastung und der Konzentration an organischen Gesamtsäuren im Reaktor LM2 (einstufig)	120
Abbildung 40:	Konzentration an organischen Säuren im Reaktor LM1 (einstufig).....	121
Abbildung 41:	Verlauf der eingestellten CSB-Raumbelastung und der Konzentration an organischen Gesamtsäuren im Reaktor LM1 (einstufig, mit silierten ZPS).....	122
Abbildung 42:	Verlauf der CSB-Konzentration im Zu- und Ablauf in den Reaktoren LM1 und LM2 (einstufig).....	124

Abbildung 43:	Verlauf der oTS-Konzentrationen im Zu- und Ablauf in den Reaktoren LM1 und LM2 (einstufig).....	124
Abbildung 44:	oTS- und CSB-Abbaugrade im Vergleich einstufig-zweistufig	127
Abbildung 45:	Konzentration der organischen Säuren in der Linie 1 (M1) (einstufig).....	129
Abbildung 46:	Konzentration an organischen Säuren in der Linie 2 (M2) (einstufig).....	129
Abbildung 47a:	Steigerung der CSB-Raumbelastung und Verlauf der Gesamtsäurekonzentrationen in Linie 1 (Reaktor M1) mit ZPS als Substrat (1.-140. Versuchstag).....	130
Abbildung 48a:	Steigerung der CSB-Raumbelastung und Verlauf der Gesamtsäurekonzentrationen im Methanreaktor Linie 2 mit ZPS als Substrat (0.-203. Versuchstag).....	132
Abbildung 49:	Verlauf der CSB-Konzentration im Zu- und Ablauf in Linie 1 (M1) und Linie 2 (M2).....	134
Abbildung 50:	Verlauf der oTS-Konzentration in Zu- und Ablauf in Linie 1 (M1) und Linie 2 (M2).....	134
Abbildung 51:	oTS-Abbau beim einstufigen Betrieb der Labor- und Pilotversuche in Funktion der Verweilzeit	136
Abbildung 52a:	Steigerung der CSB-Raumbelastung und Verlauf der Gesamtsäurekonzentrationen in der Linie 1 (Reaktor M1) der Pilotanlage mit ZR als Substrat (0.-63. Versuchstag).....	139
Abbildung 53:	Konzentration der organischen Säuren in Linie 1 (Reaktor M1) mit Substrat ZR.....	140
Abbildung 54:	Konzentration an organischen Säuren im Reaktor Schälbrei	142
Abbildung 55:	Konzentration an organischen Säuren im Reaktor Pülpe	143
Abbildung 56:	Verlauf der eingestellten CSB-Raumbelastung und der Konzentration an organischen Säuren im Reaktor Pülpe	144
Abbildung 57:	Verlauf der CSB-Raumbelastung und der Gesamtsäuren im Reaktor SB und Reaktor P&SB.....	145
Abbildung 58:	Konzentration der organischen Säuren im Reaktor P&SB (Pilotversuch).....	147
Abbildung 59:	Steigerung der CSB-Raumbelastung und Verlauf der Gesamtsäurekonzentrationen im Reaktor P&SB.....	147
Abbildung 60:	Hemmung der acetoclastischen Methanbakterien durch Zugabe der Biozide Perestop-PDM, Nalco und Coburon bei unterschiedlicher Dosierung.....	150
Abbildung 61:	Aktivität der acetoclastischen Methanbakterien in mL/min bei Anwendung der Biozide Nalco, Coburon und Perestop-PDM (Dosierung 0,1 mL/L)	151
Abbildung 62:	Aktivität der acetoclastischen Methanbakterien bei Anwendung der Biozide Nalco, Coburon und Perestop-PDM (Dosierung 0,01 mL/L)	151
Abbildung 63:	Hemmung der acetoclastischen Methanbakterien im kommunalen Faulschlamm und Faulschlamm aus der Pilotanlage Kaposvar bei unterschiedlicher Dosierung des Entschäumers Glanapon DS44.....	153
Abbildung 64:	Entwicklung der Gasproduktion im Referenzschlamm und in den Schlammproben mit den Entschäumern Sugar UH, Glanapon DS44 und Glanapon 05-5(Dosierung: 0,4 mL/L)	153

Abbildung 65:	Entwicklung der Gasproduktion im Referenzschlamm und in den Schlammproben mit den Entschäumern Sugar UH, Glanapon DS44 und Glanapon 05-5 (Dosierung: 1 mL/L)	154
Abbildung 66:	Verlauf der Gasproduktion im Referenzschlamm und in den Schlammproben mit Co+Ni, Cu+Zn und Mo+Se	156
Abbildung 67:	Entwicklung der Gasproduktion im Referenzschlamm und in den Schlammproben mit Cu+Zn, Ni, Se+Mo	157
Abbildung 68:	Entwicklung der Gasproduktion im Referenzschlamm und in den Schlammproben mit ZPS als Substrat (7 g CSB/L)	157
Abbildung 69:	Spezifische Methanproduktion in Abhängigkeit von der Co-Dosierung, Pilotanlage, Schlammalter 23 d	158
Abbildung 70:	NH ₄ -N-Konzentrationen im Ablauf von Linie 2 in Abhängigkeit mit den CSB-Raumbelastungssteigerungen	160
Abbildung 71:	PO ₄ -P-Konzentrationen im Ablauf von Linie 2 in Abhängigkeit mit den CSB-Raumbelastungssteigerungen	160
Abbildung 72:	Yield (Biomasseertrag) in den Biozönosen der Labor- und Pilotreaktoren in Abhängigkeit vom Schlammalter	161
Abbildung 73:	Verlauf der CSB-Raumbelastung in Abhängigkeit der Dosierung von Spurenelementen und Nährstoffen (Pilotanlage, ZR als Substrat)	163
Abbildung 74:	Aktivitätstestvergleich der Faulschlämme aus Budapest und aus den Reaktoren der Pilotanlage	165
Abbildung 75:	Verlauf der eingestellten CSB-Raumbelastung und der Gesamtsäuren im Reaktor LM3 im halblogarithmischen Maßstab	166
Abbildung 76:	Konzentration an organischen Säuren im Ablauf des Reaktors LM3	167
Abbildung 77:	Verlauf der CSB-Konzentration im Zu – und Ablauf von Reaktor LM3 ..	168
Abbildung 78:	Verlauf der Konzentration an org. Trockensubstanz im Zu- und Ablauf von Reaktor LM3	168
Abbildung 79:	Start-up Versuche in der Pilotanlage, Reaktor M1 mit kommunalem Faulschlamm im halblogarithmischen Maßstab	172
Abbildung 80:	Verlauf der Säurekonzentrationen während der Start-up Versuche im Reaktor M1	172
Abbildung 81:	Start-up Versuche in der Pilotanlage, Reaktor M2 mit kommunalem Faulschlamm im halblogarithmischen Maßstab	173
Abbildung 82:	Verlauf der Säurekonzentrationen während den Start-up Versuche im Reaktor M2	173
Abbildung 83:	CSB-Belastungssteigerung und Konzentration der organischen Säuren während der Hochfahrphase in LM3 (halblogarithmischer Maßstab)	176
Abbildung 84:	Verlauf der Konzentration der organischen Säuren während des Hochfahrversuchs im Reaktor LM3	176
Abbildung 85:	CSB-Raumbelastung während des Hochfahrversuchs in der Pilotanlage, Reaktor M2 mit Schlamm aus der großtechnischen Biogasanlage (halblogarithmischer Maßstab)	178
Abbildung 86:	Verlauf der Konzentration der organischen Säuren während des Hochfahrversuchs im Reaktor M2	178

Abbildung 87:	Start-up der großtechnischen Biogasanlage im ersten und zweiten Kampagnenjahr	181
Abbildung 88:	Verlauf der Gasproduktion während der anaeroben Nachstabilisierung der abgebauten ZPS	183
Abbildung 89:	CSB-Abbau der anaerob abgebauten ZPS bei der Nachstabilisierung in Abhängigkeit von der Versuchsdauer	183
Abbildung 90:	CSB-Abbau der abgebauten ZPS in der aeroben Nachbehandlung	186
Abbildung 91:	Verlauf der Konzentration von Ammonium, Nitrit und Nitrat während der aeroben Nachstabilisierung von anaerob abgebauten ZPS	186
Abbildung 92:	Vergleich der Entwässerbarkeit von Faulschlamm aus kommunalen Kläranlagen und Ablaufschlamm der abgebauten ZPS aus den Reaktoren LM1 und LM2	187
Abbildung 93:	Entwässerungskurve der Anaerobschlämme aus dem Laborreaktoren (LM1, LM3) und aus den Reaktoren der Pilotanlage (M1, M2)	188
Abbildung 94:	Entwässerungsverhalten des Ablaufschlammes aus der großtechnischen Biogasanlage im Vergleich zu kommunalen Faulschlämmen	189
Abbildung 95:	Entwässerungsverhalten des Ablaufschlammes aus der Biogasanlage, im Vergleich unbehandelte Probe mit ausgewaschener Probe	189
Abbildung 96:	Einfluss der Nachfermentation auf die Entwässerungseigenschaften des Ablaufschlammes aus der Biogasanlage	190
Abbildung 97:	Einfluss vom kationischen Polyelektrolyt auf die Entwässerungseigenschaften des Ablaufschlammes aus der Biogasanlage mit VTA LC899 (kationisches Polyelektrolyt)	193
Abbildung 98:	Einfluss von FeCl ₃ und PAX18 auf die Entwässerungseigenschaften des Ablaufschlammes aus der Biogasanlage	193
Abbildung 99:	Schematische Darstellung der Stoffströme (Mengen, TS, oTS) über die geplante Biogasanlage und über die Erdkassetten am Standort Kaposvar	197
Abbildung 100:	Massenbilanz über die Erdkassetten bei Einleitung des Abwassers aus der Rübenschwemme sowie des Ablaufschlammes aus der Biogasanlage am Standort Kaposvar	198
Abbildung 101:	Entwässerungsverhalten des Restmaterials von anaerob abgebauten ZR im Vergleich zum Restmaterial von anaerob abgebauten ZPS und kommunalen Faulschlämmen	204
Abbildung 102:	Einfluss von FeCl ₃ und PAX18 auf die Entwässerungseigenschaften des Zentrats von anaerob abgebauten ZR	205
Abbildung 103:	Einfluss von Ca(OH) ₂ und Ca(OH) ₂ /FeCl ₃ auf die Entwässerungseigenschaften des Ablaufschlammes von anaerob abgebauten ZR	205
Abbildung 104:	Entwässerungsverhalten des Zentrats von anaerob abgebautem P&SB aus der Pilotanlage im Vergleich zu Faulschlämmen von kommunalen Kläranlagen in Abhängigkeit von der Beschleunigungszahl	208
Abbildung 105:	Mikroskopbilder der unteren (a, Kartoffelschalenreste) sowie der oberen (b, anaerobe Mikroorganismen) Schlammschicht im zentrifugierten Ablaufschlamm des anaerob abgebauten P&SB	209

Abbildung 106:	Einfluss von FeCl_3 und PAX18 auf die Entwässerungseigenschaften des Ablaufschlammes von anaerob abgebautem P&SB	209
Abbildung 107:	Einfluss von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bzw. von $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{FeCl}_3$ auf die Entwässerungseigenschaften des Ablaufschlammes von anaerob abgebautem P&SB	210
Abbildung 108:	Einfluss von CaCO_3 auf die Entwässerungseigenschaften des Zentrats von anaerob abgebautem P&SB	211
Abbildung 109:	Verlauf der Konzentration an CSB im Zu- und Ablauf des Durchlaufreaktors zur aeroben Behandlung des Zentrats der anaerob abgebauten ZR, mit und ohne Ozonierung	215
Abbildung 110:	Verlauf der Konzentration an gelöstem CSB im Zu- und Ablauf des Durchlaufreaktors zur aeroben Behandlung des Zentrats der anaerob abgebauten ZR, mit und ohne Ozonierung	215
Abbildung 111:	Konzentrationen von $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ im Zu- und Ablauf des Zentrats von anaerob abgebauten ZR im aeroben Durchlaufreaktor	218
Abbildung 112:	Notwendiges Schlammalter für eine vollständige Nitrifikation in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur	218
Abbildung 113:	Verlauf der CSB-Konzentration des Zentrats des abgebauten P&SB im Zu- und Ablauf des Durchlaufreaktors	221
Abbildung 114:	Konzentrationen von $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ im Zu- und Ablauf des Zentrats des anaerob abgebauten P&SB	222
Abbildung 115:	Ablaufkonzentrationen von $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ im Nitrifikationsversuch	223
Abbildung 116:	„Break even point“ zwischen Betriebskosten und Baukosten	227