

## Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>IV</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>VII</b>
<b>1        EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2        KENNTNISSTAND .....</b>	<b>3</b>
2.1 <b>Entwicklungsgeschichte der Deponien.....</b>	<b>4</b>
2.2 <b>Die Deponie als Reaktor .....</b>	<b>9</b>
2.2.1    Methanbakterien .....	11
2.2.2    Wassergehalt und Temperatur in Deponien .....	14
2.3 <b>Sickerwasser .....</b>	<b>17</b>
2.3.1    Sickerwassermenge .....	19
2.3.2    Sickerwasserqualität .....	22
2.4 <b>Deponiegas.....</b>	<b>27</b>
2.4.1    Gasprognosemodelle .....	29
2.4.2    Gasqualität .....	34
2.5 <b>Oberflächenabdeckung .....</b>	<b>37</b>
2.6 <b>Langzeitverhalten von Deponien .....</b>	<b>40</b>
2.7 <b>Möglichkeiten zur Intensivierung der Umsetzungsprozesse in der Deponie.....</b>	<b>42</b>
<b>3        MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>44</b>
3.1 <b>Mittelwertbildung .....</b>	<b>46</b>
3.2 <b>Charakterisierung der Deponien .....</b>	<b>47</b>
<b>4        ERGEBNISSE.....</b>	<b>50</b>
4.1 <b>Sickerwasserqualität .....</b>	<b>50</b>
4.1.1    Schwankungsbreite der Einzelwerte für ausgewählte Parameter .....	50
4.1.2    Mittlere Konzentrationen der Parameter innerhalb vorgegebener Zeitintervalle .....	55
4.1.3    Frachten der Sickerwasserinhaltsstoffe .....	66

4.1.4	Entwicklung der Konzentrationen der Sickerwasserinhaltsstoffe nach Abschluß der Deponie	70
4.1.5	Sickerwasser-Niederschlagsverhältnis in Bezug auf die jeweilige Oberflächenabdeckung	76
4.1.6	Gegenüberstellung des Wasser-Feststoff-Verhältnisses und einzelner Sickerwasserkonzentrationen von Deponien und Deponiesimulationsreaktoren	81
<b>4.2</b>	<b>Deponiegas.....</b>	<b>89</b>
4.2.1	Gasparameterkonzentrationen	89
4.2.2	Gaskonzentrationen luftfrei berechnet	92
4.2.3	Vergleich der Konzentrationen von Spurenstoffen im Deponiegas	93
4.2.4	Gasmenge	95
4.2.4.1	Oberflächenabdichtung und Gasproduktion.....	97
4.2.4.2	Berechnung des Vertrauensbereichs für die erfaßten Gasmengen.....	101
4.2.4.3	Gegenüberstellung der C-Emissionen aus dem Sickerwasser und dem Deponiegas .....	103
4.2.5	Gegenüberstellung von gemessenen Gasmengen an einzelnen Deponien mit Gasprognosen	105
<b>4.3</b>	<b>Abschätzung der Nachsorge.....</b>	<b>113</b>
4.3.1	Sickerwasserparameter und Grenzwerte	114
4.3.2	Extrapolation des Parameters CSB	115
4.3.3	AOX-Extrapolationen	119
4.3.4	Extrapolation des Parameters Gesamtstickstoff	120
4.3.5	Extrapolationen des Parameters Chlorid	121
4.3.6	Extrapolationen der Schwermetalle im Sickerwasser	122
4.3.7	Emissionszeiträume im Überblick	122
<b>4.4</b>	<b>Prognose der Emissionspotentiale verschiedener Sickerwasserparameter .....</b>	<b>123</b>
4.4.1	Gesamtemissionen verschiedener Parameter	125
<b>5</b>	<b>DISKUSSION UND AUSBLICK.....</b>	<b>130</b>
<b>5.1</b>	<b>Sickerwasserqualität .....</b>	<b>130</b>
5.1.1	Sickerwasserverhalten von Deponien und Deponiesimulationsreaktoren	133
<b>5.2</b>	<b>Sickerwassermenge - Gasmenge - Oberflächenabdichtung.....</b>	<b>135</b>
<b>5.3</b>	<b>Gasproduktion .....</b>	<b>137</b>
5.3.1	Gasmengenprognosen	142
<b>5.4</b>	<b>Frachten, Emissionspotentiale und Nachsorgezeiträume.....</b>	<b>142</b>
<b>5.5</b>	<b>Bilanzierung der Frachten aus kommunalen Kläranlagen und Siedlungsabfalldeponien...</b>	<b>146</b>
5.5.1	Gegenüberstellung der Emissionen	147
5.5.1.1	Berechnung der Frachten.....	150

5.5.2	Vergleich der errechneten Frachten mit dem Modell von BACCINI, BELEVI, LICHTENSTEIGER [1992]	163
5.6	<b>Für und Wider einer Oberflächenabdichtung</b> .....	165
5.7	<b>Prognose des langfristigen Deponieverhaltens bei unterschiedlicher Vorgehensweise während der Nachsorgephase</b> .....	168
5.8	<b>Die Deponie als Risikofaktor in der Literatur</b> .....	174
5.9	<b>Konzeptvorschläge zum langfristigen Umgang mit Deponien, die mit unvorbehandelten Abfällen verfüllt wurden</b> .....	176
6	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	182
7	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	186
	<b>ANHANG 1</b> .....	197
	<b>ANHANG 2</b> .....	201
	<b>ANHANG 3</b> .....	204
	<b>ANHANG 4</b> .....	205
	<b>DANKSAGUNGEN</b> .....	206

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Kohlenstoffkreislauf aus SCHLEGEL [1992]	3
Abb. 2.2: Entwicklung der Basisabdichtungssysteme in NRW [SCHMIDT, 1993]	8
Abb. 2.3: Zeitliche Entwicklung der Gehalte typischer Inhaltsstoffe in der Gas- und Wasserphase von Siedlungsabfalldeponien [CHRISTENSEN UND KJELDSEN, 1989]	11
Abb. 2.4: Methanbildung aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen [HARTMANN, 1992]	13
Abb. 2.5: Energetik der Methanbildung aus Säuren und durch Reduktion des Kohlendioxids [HARTMANN, 1992]	14
Abb. 2.6: Schematische Darstellung des Wasserhaushaltes einer Deponie [RAMKE, 1991]	18
Abb. 2.7: Einfluß der Bodenart auf die Sickerwasserhöhe bei $N = 748 \text{ mm/a}$ , nach PROKSCH [1990]	21
Abb. 2.8: Schematischer Aufbau einer Entgasungsanlage nach RETTENBERGER ET AL. [1995]	28
Abb. 2.9: Schema des Langzeitmodells von RETTENBERGER UND MEZGER [1992]	36
Abb. 2.10: Basis- und Oberflächenabdichtung nach TASI für Deponien der Klasse II	37
Abb. 4.1: Darstellung der Einzelwerte für den Parameter pH-Wert.	51
Abb. 4.2: Darstellung der Konzentrationen des Parameters CSB als Einzelwerte der Deponien	51
Abb. 4.3: Darstellung der Konzentrationen des Parameters $\text{NH}_4\text{-N}$ als Einzelwerte der Deponien	52
Abb. 4.4: Darstellung der Konzentrationen des Parameters AOX als Einzelwerte der Deponien	52
Abb. 4.5: Darstellung der Konzentrationen des Parameters Chlorid als Einzelwerte der Deponien	53
Abb. 4.6: Darstellung der Konzentration des Parameters Cadmium als Einzelwerte der Deponien	53
Abb. 4.7: CSB-Konzentrationsverteilung der einzelnen Werte in Bezug zu unterschiedlichen Zeiträumen (älterer Deponien)	57
Abb. 4.8: CSB-Konzentrationsverteilung der einzelnen Werte in Bezug zu unterschiedlichen Zeiträumen (jüngere Deponien)	57
Abb. 4.9: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationsverteilung der einzelnen Werte in Bezug zu unterschiedlichen Zeiträumen (jüngere Deponien)	58
Abb. 4.10: Aerob und anaerobe metabiotische Mineralisierung des natürlichen Abfalls [nach KUCKLICK, HARBORTH, HANERT 1996]	65
Abb. 4.11: CSB-Fracht im Sickerwasser der Deponien	67
Abb. 4.12: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Fracht im Sickerwasser der Deponien	68
Abb. 4.13: AOX-Fracht im Sickerwasser der Deponien	68
Abb. 4.14: Chlorid-Fracht im Sickerwasser der Deponien	69
Abb. 4.15: Zink-Fracht im Sickerwasser der Deponien	69
Abb. 4.16: Cadmium-Fracht im Sickerwasser der Deponien	70
Abb. 4.17: 95 %-iger Vertrauensbereich für den CSB-Konzentrationsverlauf nach Abschluß der Abfallschüttung	72
Abb. 4.18: 95 %-iger Vertrauensbereich für den $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationsverlauf nach Abschluß der Abfallschüttung	72
Abb. 4.19: 95 %-iger Vertrauensbereich für den AOX-Konzentrationsverlauf nach Abschluß der Abfallschüttung	74

Abb. 4.20: 95 %-iger Vertrauensbereich für den Chloridkonzentrationsverlauf nach Abschluß der Abfall-	
schüttung	74
Abb. 4.21: 95 %-iger Vertrauensbereich für den Zinkkonzentrationsverlauf nach Abschluß der Deponien	75
Abb. 4.22: Darstellung der prozentualen Verteilung der unterschiedlichen Oberflächenabdichtungssysteme	77
Abb. 4.23: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der Deponie D31 (geringfügige Boden-	
abdeckung); 16. Jahr ist letztes Betriebsjahr.	79
Abb. 4.24: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der Deponie D10, Bodenabdeckung > 1 m,	
Jahr 11 letztes Betriebsjahr	80
Abb. 4.25: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der Deponie D15 (mineralische	
Abdichtung); 7. Jahr ist letztes Betriebsjahr.	80
Abb. 4.26: Gegenüberstellung der CSB-Konzentrationen von Deponien und DSR in Relation zum jeweiligen	
Wasser-Feststoff-Verhältnis (W/F)	84
Abb. 4.27: Gegenüberstellung der NH <sub>4</sub> -N-Konzentrationen von Deponien und DSR in Relation zum jeweiligen	
Wasser-Feststoff-Verhältnis	85
Abb. 4.28: Gegenüberstellung der Chlorid-Konzentrationen von Deponien und DSR in Relation zum jeweiligen	
Wasser-Feststoffverhältnis	86
Abb. 4.29: Jahresmittelwerte der im Deponiegas gemessenen Methan-, Kohlendioxid-, Stickstoff- und	
Sauerstoffkonzentrationen	91
Abb. 4.30: Verhältnis von Sauerstoff zu Stickstoff im Deponiegas	92
Abb. 4.31: Entwicklung der Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen, luftfrei berechnet	93
Abb. 4.32: Erfasste Gasmengen der untersuchten Deponien nach dem Abschluß der Deponie	97
Abb. 4.33: Gasmengenverläufe von 8 Deponien mit unterschiedlichen Oberflächenabdichtungssystemen	98
Abb. 4.34: Darstellung eines 95 %-igen Vertrauensbereichs für die erfaßten Gasmengen der Deponien	102
Abb. 4.35: Gegenüberstellung der Kohlenstofffrachten aus Gas und Sickerwasser	103
Abb. 4.36: Berechneter Gasmengenverlauf unter der Annahme der Halbwertszeiten 3,5 a, 6 a und 10 a, Gas-	
potential 187 m <sup>3</sup> /t TS und einr 30 -50 %-igen Erfassungsrate	108
Abb. 4.37: Berechneter Gasmengenverlauf unter der Annahme der Halbwertszeiten 3,5 a, 6 a und 10 a, Gas-	
potential 280 m <sup>3</sup> /t TS und einr 30 -50 %-igen Erfassungsrate	108
Abb. 4.38: Berechneter Gasmengenverlauf unter der Annahme unterschiedlicher Halbwertszeiten und Gas-	
potentiale, 30 - 50 %-igen Erfassungsrate	109
Abb. 4.39: Berechneter Gasmengenverlauf unter der Annahme der Halbwertszeiten 3,5 a, 6 a und 10 a, Gas-	
potential 187 m <sup>3</sup> /t TS und einer 40 - 60 %-igen Erfassungsrate	109
Abb. 4.40: Berechneter Gasmengenverlauf unter der Annahme der Halbwertszeiten 3,5 a, 6 a und 10 a, Gas-	
potential 280 m <sup>3</sup> /t TS und einr 40 - 60 %-igen Erfassungsrate	110
Abb. 4.41: Berechneter Gasmengenverlauf unter der Annahme unterschiedlicher HWZen und Gaspotentiale,	
40 - 60 %-igen Erfassungsrate	110
Abb. 4.42: Berechneter Gasmengenbereich unter Annahme einer 3,5- und 6-jährigen HWZ, 40 - 60 %-iger	
Erfassungsrate und einem Gaspotential von 280 m <sup>3</sup> /t TS	111
Abb. 4.43: Gasmengenverläufe, die aus dem für optimal erachteten Bereich herausfallen	112
Abb. 4.44: Prognose der CSB-Konzentrationsverläufe der Deponien D1, D5,II und D9	116
Abb. 4.45: Darstellung der Extrapolationen für den Parameter CSB	117

<i>Abb. 4.46: Mögliche CSB-Konzentrationsverläufe über geologische Zeiträume anhand der Extrapolation der mittleren CSB-Konzentrationen nahezu aller Deponien</i>	118
<i>Abb. 4.47: Darstellung der Extrapolationen für den Parameter AOX</i>	120
<i>Abb. 4.48: Extrapolationen des Parameters Chlorid</i>	122
<i>Abb. 4.49: Summenkurven des langfristig zu erwartenden CSB-Emissionspotentials</i>	125
<i>Abb. 5.1: Gegenüberstellung der Ergebnisse von KRUG UND HAM [1997] mit den im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Resultaten</i>	133
<i>Abb. 5.2: Gasmengenentwicklung der Deponie Hessheim</i>	136
<i>Abb. 5.3: Zusammenfassung der die Gasfassung maßgeblich beeinflussenden Faktoren</i>	138
<i>Abb. 5.4: Zusammenstellung der anthropogenen Methanemissionsquellen in Deutschland nach BUTZ, 1997</i>	141
<i>Abb. 5.5: Prozentuale Verteilung der Sickerwasserreinigung auf den untersuchten Deponien</i>	148
<i>Abb. 5.6: In Böden eingetragene Stickstofffrachten aus verschiedenen Quellen in den alten Bundesländern, nach DOHMANN [1995]</i>	149
<i>Abb. 5.7: Prognose der CSB-Frachtverläufe bei unterschiedlicher Vorgehensweise in den ersten 150 Jahren nach Deponieabschluß</i>	172
<i>Abb. 5.8: Prognose der CSB-Frachtverläufe bei unterschiedlicher Vorgehensweise in den Jahren 101 - 1.000 nach Deponieabschluß</i>	172

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1a-d: Abgelagerte Mengen an Hausmüll, statistische Angaben	5
Tab. 2.2: Mittlerer Wassergehalt der Feuchtesubstanz, [PIERAU, 1971 zitiert in BAUR, 1990]	16
Tab. 2.3: Sickerwassermenge in Bezug zur Einbautechnik [EHRIG, 1978]	19
Tab. 2.4: Mittlere jährliche Gesamtverdunstung und Abfluß von verschiedenen Landoberflächen und Vegetationsdecken auf tiefgründigen Deckschichten der Bodenart Sand bis schwach lehmiger Sand, Jahresniederschlag $N = 663 \text{ mm/a}$ , nach BRECHTEL [1984]	20
Tab. 2.5: Sickerwasserinhaltsstoffe, die Unterschiede zwischen saurer Phase und Methanphase aufweisen, nach EHRIG [1980]	23
Tab. 2.6: Sickerwasserinhaltsstoffe, die keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Phasen aufweisen, nach EHRIG [1980]	24
Tab. 2.7: Ergebnisse verschiedener Autoren zum Thema Deponiegaspotential	30
Tab. 2.8: Übersicht der unterschiedlichen Faktoren für Gasprognosemodelle	34
Tab. 2.9: Prognosen zur Dauer der Nachsorgephase bei Deponien	41
Tab. 3.1: Anzahl der Sickerwasseranalysen pro Parameter	45
Tab. 3.2: Anzahl der Gasanalysen pro Parameter	46
Tab. 3.3: Bestimmungsgrenzen	49
Tab. 4.1: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 1-5 einer Deponie bzw. eines neu eröffneten Abschnitts.	59
Tab. 4.2: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 6-10 für die Deponie bzw. für einen neu eröffneten Abschnitt	60
Tab. 4.3: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 11-20 für die Deponie bzw. für einen neu eröffneten Abschnitt	61
Tab. 4.4: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 21-30 für die Deponie bzw. für einen neu eröffneten Abschnitt	62
Tab. 4.5: Sickerwassermengen prozentual zum Niederschlag in Relation zum Abdeckungssystem	77
Tab. 4.6: Herkunft und Vorbehandlung der im DSR untersuchten Abfälle <sup>1</sup> [HÖRING, HELFER, EHRIG, 1998; BRINKMANN ET AL., 1997], <sup>2</sup> [HEYER UND STEGMANN, 1997]	82
Tab. 4.7: Darstellung der prognostizierten Frachtsummen der Deponie D7 zum Zeitpunkt eines Wasser-Feststoffverhältnisses von 10	88
Tab. 4.8: Vol.-%-Anteile der Hauptbestandteile des Deponiegases	90
Tab. 4.9: Gegenüberstellung der Konzentrationsbereiche verschiedener Spurenstoffe im Deponiegas anhand der Ergebnisse verschiedener Autoren	94
Tab. 4.10: Modellrechnung zur Ermittlung der maximalen Höhe einer Deponie unter der Voraussetzung der in Abb. 4.34 dargestellten maximalen Gasproduktionsraten zum Zeitpunkt 30 Jahre nach Deponieabschluß	102
Tab. 4.11: Daten zur Berechnung der in den Abb. 4.32 - 4.37 dargestellten Gasprognosen	106
Tab. 4.12: Grenzwerte des Anhang 51 der Rahmen-AbwasserVwV [N. N., 1996]	114
Tab. 4.13: Tabellarische Auflistung der Ergebnisse zum Problem Nachsorgedauer	123
Tab. 4.14: Prognose der Emissionspotentiale für den Sickerwasserpfad anhand ausgesuchter Parameter	128

<i>Tab. 5.1: Modellhafte Gegenüberstellung der Emissionen von kommunalem Abwasser und Sickerwasser einer Deponie</i>	<i>153</i>
<i>Tab. 5.2: Frachten in unterschiedlichen Zeiträumen im Vergleich zu Grenzwerten in der Literatur</i>	<i>157</i>
<i>Tab. 5.3: Abgeleitete Richtwerte in Form von Frachten und Konzentrationen für die Parameter CSB und NH<sub>4</sub>-N auf der Basis unterschiedlicher Vorgaben</i>	<i>160</i>
<i>Tab. 5.4: Abschätzung der jährlichen Konzentrationszunahme im Grundwasser, nachdem die Abdichtungen der Siedlungsabfalldeponie nicht mehr funktionstüchtig sind nach BACCINI, BELEVI, LICHTENSTEIGER [1992]</i>	<i>164</i>