

Die Dauer der Nachsorgephase wird maßgeblich vom langfristigen Emissionsverhalten abgeschlossener Deponien bestimmt. Da die Nachsorge mit erheblichen Kosten verbunden ist und zukünftige unkontrollierte Emissionsfreisetzungen zu vermeiden sind, sollte das Emissionspotenzial von Deponien möglichst frühzeitig reduziert werden. In dieser Arbeit sind experimentelle Untersuchungen zur Beschreibung des Emissionspotenzials von abgeschlossenen Deponien durchgeführt und Prognosen über das Langzeitemissionsverhalten von Kohlen- und Stickstoffverbindungen erstellt worden. Als Maßnahmen zur beschleunigten und kontrollierten Reduktion mobilisierbarer Schadstoffe wurden Untersuchungen über die Belüftung und intensive Befeuchtung durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen das große Potenzial dieser Verfahren für eine beschleunigte Kohlenstoff- und Stickstoffreduktion auf, um Dauer und Aufwand der Nachsorge reduzieren zu können.

**Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge**

Kai-Uwe Heyer

## **Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge**

Heyer

## **Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge**

# **Hamburger Berichte**

Band 21

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. R. Stegmann

# **Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge**

von

**Kai-Uwe Heyer**

Verlag Abfall *aktuell*

Die Deutsche Bibliothek CIP- Einheitsaufnahme

**Heyer, Kai-Uwe:**

Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge / von Kai-Uwe Heyer -

Stuttgart: Verlag Abfall *aktuell*, 2003

(Hamburger Berichte; Bd. 21)

ISBN 3-9808180-4-7

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Verlages gestattet.

© 2003 Verlag Abfall *aktuell*, Stuttgart

Druck: Buch- & Offsetdruckerei Stubbemann GmbH, Hamburg

Papier: hergestellt aus 100% chlorfrei gebleichten Faserstoffen

ISBN 3-9808180-4-7

## **Vorwort**

Die TA Siedlungsabfall aus dem Jahr 1993 schreibt vor, dass alle Deponien nach dem Betriebsende mit einer Kombinationsdichtung bestehend aus einer mineralischen Schicht und einer Kunststoffdichtungsbahn abzudichten sind. Als Folge dieser Kapselung werden von diesem Zeitpunkt an die abbaubaren und auslaugbaren Abfallstoffkomponenten im Deponiekörper konserviert. Falls es zu einem späteren Zeitpunkt zu einer Undichtigkeit in der Oberflächenabdichtung kommt, können erneut Stoffe freigesetzt werden. Möglicherweise gibt es zu diesem Zeitpunkt auch Undurchlässigkeiten in der Basisabdichtung, die Sickerwasserbehandlungs- und Entgasungsanlage wird nicht mehr betrieben und die Deponie nur noch in einem geringen Umfang oder gar nicht mehr überwacht, so dass signifikante Emissionen unkontrolliert in die Umwelt entweichen können.

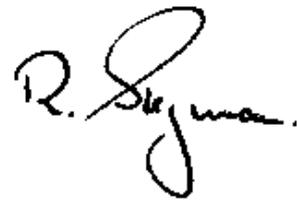
Die wissenschaftliche Fachwelt hat sich schon frühzeitig gegen dieses Stilllegungskonzept gewandt und an seiner Stelle eine möglichst weitgehende Reduktion des Emissionspotenzials im Deponiekörper vor Aufbringung einer – alternativen – Oberflächenabdeckung/-dichtung gefordert. Vor diesem Hintergrund ist die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Kai-Uwe Heyer zu sehen. Er hat u.a. das Emissionspotenzial von Abfallproben, die aus alten abgeschlossenen Deponien entnommen wurden, ermittelt. Darüber hinaus sind Prognosen über die Dauer relevanter Emissionen bis zum Erreichen vorgegebener Restbelastungen erstellt worden.

Aus der Arbeit geht hervor, dass signifikante Emissionen noch über Jahrzehnte bis Jahrhunderte nach Abschluss des Deponiebetriebes zu erwarten sind. Dadurch wird ein hoher Nachsorgeaufwand erforderlich. Die Ergebnisse zeigen, dass in Siedlungsabfalldeponien je nach Abfallzusammensetzung, Ablagerungsdauer und Milieubedingungen teilweise beträchtliche Stoffabbau- und Auslaugvorgänge stattfinden. Auf der Grundlage der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wird die Forderung erhoben, das Emissionspotenzial von Deponien durch einen geeigneten Deponiebetrieb (Deponie als Bioreaktor) und anschließende „Nachbehandlungsverfahren“ in der Stilllegungsphase bzw. zu Beginn der Nachsorge kontrolliert zu reduzieren. Zu diesem Zeitpunkt sind noch alle Deponiebarrieren funktionstüchtig und der Betrieb zur Erfassung und Behandlung der Emissionen ist technisch und wirtschaftlich möglich.

Als grundsätzlich geeignete Verfahren zur Emissionsreduktion nach der Verfüllphase stehen die Belüftung sowie die erhöhte gleichmäßige Infiltration von Wasser zur Verfügung. Durch diese Maßnahmen, die ebenfalls in der Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Kai-Uwe Heyer untersucht

worden sind, wird der biologische Abbau relevanter Abfallstoffkomponenten beschleunigt, und/oder es werden verstärkt Stoffe ausgelaugt. Erst nach Abschluss dieser Maßnahmen sollte eine endgültige Oberflächenabdichtung aufgebracht werden, die es ermöglicht, auf der einen Seite restliche Methangasmengen in der Oberfläche biologisch zu oxidieren und auf der anderen Seite die Sickerwasserbildung weitgehend zu reduzieren. Die Deponieverordnung vom August 2002 trägt dieser Vorgehensweise in gewissem Rahmen Rechnung, in dem sie unter bestimmten Randbedingungen sowohl die Wasserinfiltration als auch alternative Oberflächenabdichtungen zulässt.

Hamburg, im April 2003

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'R. Stegmann'.

Prof. Dr.-Ing. Rainer Stegmann

# Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge

## Inhalt

### Verzeichnis der Tabellen

### Verzeichnis der Abbildungen

### Verzeichnis der Abkürzungen

<b>1</b>	<b>Einführung und Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
1.1	Wirtschaft, Abfallbeseitigung auf Deponien und Umweltbelastungen	1
1.2	Emissionsverhalten und Deponienachsorge – eine Begriffsbestimmung	1
1.3	Thesen zum Umgang mit Siedlungsabfalldeponien	3
1.4	Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit	5
<b>2</b>	<b>Entwicklung der Ablagerungsmengen und Ablagerungspraxis in Deutschland</b>	<b>6</b>
2.1	Deponieentwicklung und Deponietechnik	6
2.2	Ablagerungsmengen auf Siedlungsabfalldeponien	8
2.3	Zusammensetzung der abgelagerten Siedlungsabfälle	8
<b>3</b>	<b>Wasserhaushalt im Deponiekörper</b>	<b>13</b>
3.1	Einflussfaktoren auf den Wasserhaushalt	13
3.1.1	Niederschlag $N$	14
3.1.2	Oberflächenabfluss $A_O$	14
3.1.3	Evaporation $V_E$ und klimatische Sickerwasserbildung $S_b$ bei offener Deponieoberfläche	15
3.1.4	Evaporation $V_E$ , Transpiration $V_T$ und klimatische Sickerwasserbildung $S_b$ bei abgedichteter Deponieoberfläche	16
3.1.5	Speicherung $S$ und Rückhalt $R$	17
3.1.6	Wasserbedarf/-freisetzung aus biologischer Umsetzung $W_B$	18
3.1.7	Konsolidation $W_K$	19
3.2	Fließverhalten des Wassers und hydrogeologische Eigenschaften abgelagerter Abfälle	20
3.2.1	Fließbewegungen im Deponiekörper	20
3.2.2	Hydrogeologische Eigenschaften abgelagerter Siedlungsabfälle	21
3.3	Sickerwasserabfluss $A_b$	23
3.3.1	Untersuchungen zum Sickerwasserabfluss $A_B$ bei offener Einbaufläche	23
3.3.2	Ergebnisse zum Einfluss von Oberflächenabdichtungen auf Sickerwasserentstehung und -abfluss	26
3.4	Schlussfolgerungen zum Wasserhaushalt von Deponien	28

<b>4</b>	<b>Prozesse im Deponiekörper</b>	<b>30</b>
4.1	Biochemische Abbauprozesse und Abbaubarkeit organischer Substanzen	32
4.2	Aerobe Abbauprozesse	34
4.2.1	Milieubedingungen der aeroben Abbauprozesse	35
4.2.2	Huminstoffbildung bei aeroben Abbauprozessen	39
4.3	Anaerobe Abbauvorgänge	41
4.3.1	Milieubedingungen der anaeroben Abbauprozesse in Deponien	45
4.3.2	Hemmstoffe und hemmende Prozesse des anaeroben Abbaus	50
<b>5</b>	<b>Emissionsverhalten von Deponien</b>	<b>55</b>
5.1	Verlauf der Emissionen im Deponiekörper	55
5.1.1	Deponiegasemissionen	57
5.1.2	Sickerwasseremissionen	62
5.2	Kenntnisse zum Langzeitemissionsverhalten	65
5.3	Kenntnisse zur Beeinflussung und Beschleunigung von Stabilisierungsprozessen in der Deponie	67
5.3.1	Kenntnisse zum Einfluss von Befeuchtungs- und Bewässerungsmaßnahmen auf das Emissionsverhalten	67
5.3.2	Kenntnisse zur Belüftungstechnik und zum Einfluss von Belüftungsmaßnahmen auf das Emissionsverhalten	73
5.4	Schlussfolgerungen zum Emissionsverhalten von Siedlungsabfallablagerungen zur thematischen Eingrenzung der vorliegenden Arbeit	76
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen im Labormaßstab</b>	<b>78</b>
6.1	Untersuchungsmethoden und Versuchsprogramm	78
6.1.1	Chemisch-physikalische Feststoffuntersuchungen	80
6.1.2	Auslaugversuche: Einfach- und Mehrfachauslaugungen	80
6.1.3	Atmungsaktivitätsmessungen im Respirometer (Sapromat)	81
6.2	Lysimeterversuche in Deponiesimulationsreaktoren unter anaeroben Milieubedingungen	83
6.2.1	Versuchsaufbau, Einbau und Betrieb der DSR zur Simulation anaerober Milieubedingungen	83
6.3	Feststoffprobenahmen auf Abfallablagerungen	88
6.3.1	Abfallablagerung A	88
6.3.2	Abfallablagerung B	89
6.3.3	Abfallablagerung C	90
6.3.4	Abfallablagerung D	91
6.3.5	Abfallablagerung E	91
6.3.6	Abfallablagerung F	92
<b>7</b>	<b>Charakterisierung der untersuchten Abfallproben</b>	<b>94</b>
7.1	Chemisch-physikalische Feststoffuntersuchungen	94
7.1.1	Wassergehalt, pH-Wert und Leitfähigkeit	94
7.1.2	Glühverlust-, Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt	96

### III

7.1.3	Biologisch verfügbare Anteile – „korrigierter Glühverlust“	99
7.1.4	Schwermetallgehalte der Feststoffproben	102
7.2	Auslaugversuche	104
7.2.1	Einfachauslaugung nach DEV-S4	104
7.2.2	Konzentrationen und Frachten bei der Mehrfachauslaugung	105
7.2.3	Auslaugverhalten der Schwermetalle	109
7.3	Atmungsaktivität im Respirationstest (Sapromatversuch)	111
7.3.1	Einfluss des Wassergehalts auf den biologischen Abbau im Respirometer	111
7.3.2	Atmungsaktivitäten aller Feststoffproben	115
7.3.3	Übertragung der Ergebnisse der Laboruntersuchungen auf den Deponiekörper und die Möglichkeiten der in situ Belüftung	119
7.4	Schlussfolgerungen der Feststoffbeprobungen	123
<b>8</b>	<b>Ergebnisse der Deponiesimulationsversuche unter anaeroben Milieubedingungen</b>	<b>125</b>
8.1	Emissionsverhalten über den Sickerwasserpfad	126
8.1.1	pH-Wert und Hydrogenkarbonat	126
8.1.2	Chemischer Sauerstoffbedarf und biologischer Sauerstoffbedarf	128
8.1.3	Kjeldahl-Stickstoff, Ammonium und Nitrat	130
8.1.4	Chlorid und halogenierte organische Kohlenwasserstoffverbindungen	131
8.2	Schwermetallemissionen über den Sickerwasserpfad	132
8.3	Emissionsverhalten über den Gaspfad	133
8.3.1	Menge und Hauptbestandteile des Deponiegases	133
8.3.2	Geschwindigkeit der biologischen Abbauprozesse in den DSR	137
8.3.3	Spurenstoffe im Deponiegas	140
<b>9</b>	<b>Ergebnisse der Deponiesimulationsversuche unter aeroben Milieubedingungen</b>	<b>141</b>
9.1	Aerobe Stabilisierung: Ziele, Versuchsaufbau und -durchführung	141
9.2	Auswirkungen der Belüftungsmaßnahmen auf das Emissionsverhalten über den Sickerwasserpfad	143
9.2.1	pH-Wert, Redoxpotenzial und Hydrogenkarbonat	143
9.2.2	Chemischer Sauerstoffbedarf und biologischer Sauerstoffbedarf	145
9.2.3	Stickstoffverbindungen	147
9.2.4	Sulfat und halogenierte organische Kohlenwasserstoffe	148
9.3	Schwermetalle im Sickerwasser belüfteter Deponiesimulationsreaktoren	150
9.4	Auswirkungen der Belüftungsmaßnahmen auf das Emissionsverhalten über den Gaspfad	152
9.4.1	Zusammensetzung der Gasatmosphäre	152
9.4.2	Kohlenstoffaustrag über den Gaspfad	156
9.4.3	Stickstoffaustrag über den Gaspfad	158

<b>10</b>	<b>Untersuchungen nach Abschluss der Deponiesimulationsversuche</b>	<b>160</b>
10.1	Chemisch-physikalische Feststoffuntersuchungen nach Abschluss der Deponiesimulationsversuche	160
10.2	Schwermetallgehalte der Feststoffproben nach Abschluss der Deponiesimulationsversuche	163
10.3	Auslaugversuche an Feststoffproben nach Abschluss der Deponiesimulationsversuche	165
10.4	Atmungsaktivitätsmessungen an Feststoffproben nach Abschluss der Deponiesimulationsversuche	168
<b>11</b>	<b>Übertragung der DSR-Ergebnisse auf Deponieverhältnisse unter anaeroben Milieubedingungen</b>	<b>170</b>
11.1	Qualitativer Verlauf der Emissionen	170
11.2	Quantitativer Verlauf der Emissionen - Bilanzierungen über den Wasserpfad	171
11.3	Zeitlicher Verlauf der Emissionen über den Wasserpfad	178
11.3.1	Randbedingungen des Emissionsverlaufs über den Wasserpfad	178
11.3.2	Extrapolation der Sickerwasserkonzentrationen in den DSR	179
11.3.3	Annahmen zur zeitlichen Entwicklung der Sickerwasseremissionen	181
11.3.4	Zeiträume bis zum Erreichen von Grenzkonzentrationen	182
11.3.5	Die Halbwertszeit als veränderlicher Parameter	184
11.4	Vergleich mit anderen Langzeitabschätzungen	187
11.4.1	Laboruntersuchungen	187
11.4.2	Auswertungen von Messungen auf Deponien	191
11.5	Kriterien zur Beendigung der Nachsorge	193
11.5.1	Rechtliche Rahmenbedingungen zur Beendigung der Nachsorge	193
11.5.2	Sickerwasserkonzentrationen und -frachten als Kriterien zur Beendigung der Nachsorge	195
11.5.3	Schlussfolgerungen zur Dauer und Durchführung der Nachsorge	197
<b>12</b>	<b>Übertragung der DSR-Ergebnisse im Hinblick auf Bewässerungsmaßnahmen zum beschleunigten Stoffaustrag</b>	<b>198</b>
12.1	Wasserzugabe zur gesteuerten Befeuchtung des Deponiekörpers	198
12.2	Erhöhte Wasserzugabe zum beschleunigten Stoffaustrag über den Wasserpfad	201
12.3	Schlussfolgerungen zum Vorgehen bei der Bewässerung	208
<b>13</b>	<b>Übertragung der Ergebnisse der Belüftungsuntersuchungen zur beschleunigten in situ Stabilisierung auf Deponieverhältnisse</b>	<b>210</b>
13.1	Verlauf der Sickerwasseremissionen, Verkürzung von Nachsorgezeiträumen	210
13.1.1	Stickstoffverbindungen	210
13.1.2	Organische Verbindungen	212
13.1.3	Halogenierte organische Verbindungen	214
13.1.4	Emissionsverlauf nach Abschluss der Belüftung	214
13.2	Verlauf der gasförmigen Emissionen	216
13.3	Kombination der Belüftung mit Befeuchtungs- und Bewässerungsmaßnahmen	219

<b>14</b>	<b>Untersuchungen an Abfallablagerungen zur großtechnischen Anwendung der in situ Belüftung</b>	<b>220</b>
14.1	In situ Belüftung – vom Labormaßstab zum technischen Maßstab	220
14.2	Versuchsordnung und technische Ausrüstung	221
14.2.1	Auswahl des Belüftungsbrunnens und Position der Gaspegel	221
14.2.2	Mobile Belüftungsanlage und Gasmessung	222
14.3	Ergebnisse der Belüftungsuntersuchungen	224
14.3.1	Technische Durchführbarkeit der Belüftung und eingebrachte Luftvolumina	224
14.3.2	Verteilung der eingebrachten Luft im Deponiekörper	226
14.3.3	Auswirkungen der eingebrachten Luft auf den Gashaushalt	227
14.3.4	Auswirkungen der eingebrachten Luft auf den Wasserhaushalt	230
14.4	Technische Umsetzung der in situ Belüftungsmaßnahmen	232
14.4.1	Grundkonzept der aeroben in situ Stabilisierung	232
14.4.2	Vorgaben zur technischen Gestaltung der Belüftungs- und Ablufterfassungseinrichtungen	233
14.4.3	Belüftungsraten zur Stabilisierung des Deponiekörpers	236
14.4.4	Begleitende Untersuchungen, Überwachung und Erfolgskontrolle	237
<b>15</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>238</b>
15.1	Zusammenfassung	238
15.2	Ausblick - Maßnahmenkette zur Stilllegung, Nachsorge und Sicherung von Abfallablagerungen	242
<b>16</b>	<b>Literatur</b>	<b>245</b>
<b>17</b>	<b>Glossar</b>	<b>260</b>
	<b>Anhang</b>	<b>264</b>
	Anhang A zu Kapitel 6	264
	Anhang A zu Kapitel 7	269
A1	Daten zu den Feststoffuntersuchungen Kapitel 7	269
A2	Daten zu den Respirationsmessungen Kapitel 7	273

## Verzeichnis der Tabellen

Tab. 2.1:	Entwicklung der Anzahl an betriebenen Siedlungsabfalldeponien in Deutschland	6
Tab. 2.2:	Basisabdichtungen, Sickerwasser- und Gasfassung an Siedlungsabfalldeponien in den alten Bundesländern (Stand 1998)	7
Tab. 2.3:	Ablagerungsmengen auf Siedlungsabfalldeponien (Quellen: Statistisches Bundesamt, 2000, Abfallbilanzen der Bundesländer, zitiert in UBA, 2000, KRÜMPELBECK, 2000)	8
Tab. 2.4:	Hausmüllzusammensetzungen aus den achtziger Jahren (Quellenangaben s. JÄGER, 1989)	9
Tab. 2.5:	Stoffliche Zusammensetzung von Siedlungsabfällen: Ergebnisse der bundesweiten Hausmüllanalyse (BHMA) von 1985	10
Tab. 3.1:	Trocken- und Feuchtdichten sowie Durchlässigkeiten in Abhängigkeit der Auflast (nach Untersuchungen von BEAVEN, 1997)	22
Tab. 3.2:	Sickerwasserabflüsse von Hausmülldeponien, Einfluss der Einbautechnik	24
Tab. 3.3:	Unterschreitungshäufigkeiten von Sickerwasserabflüssen von Betriebsdeponien (EHRIG, 1989) und in Abhängigkeit des Speicherzustands (RAMKE, 1991, KRUSE, 1994)	25
Tab. 3.4:	Sickerwassermengen bezogen auf den Niederschlag in Abhängigkeit der Oberflächenabdeckung/-abdichtung (KRÜMPELBECK, 2000)	26
Tab. 4.1:	Überblick über die Abbaubarkeit von Stoffgruppen im Hausmüll (nach JÄGER, 1987 und BIDLINGMAIER, 1983)	33
Tab. 4.2:	Qualitativer Vergleich zwischen den Eigenschaften verschiedener Huminstoffe	41
Tab. 4.3:	Auswirkungen von Ionenkonzentrationen auf die Methanproduktion (nach MCCARTY et al., 1961)	50
Tab. 4.4:	Hemmende bzw. toxische Schwermetallkonzentrationen bei der Klärschlammfäulung (nach BRAUN, 1982)	52
Tab. 5.1:	Spurenstoffe und halogenierte Kohlenwasserstoffe im Deponiegas bezogen auf luftfreies Deponiegas (Auszug aus RETTENBERGER (1986) und POLLER (1990))	59
Tab. 5.2:	Sickerwasserinhaltsstoffe von Siedlungsabfalldeponien (Daten von KRUSE, 1994 und EHRIG, 1989)	63
Tab. 6.1:	Kenndaten der beprobten Deponieabschnitte A, B und C	90
Tab. 6.2:	Kenndaten der beprobten Deponieabschnitte D, E und F	92
Tab. 6.3:	Untersuchungsprogramm der Feststoffproben der sechs Abfallablagerungen A - E	93

## VII

Tab. 7.1:	Eluatkonzentrationen des 1. Auslaugzyklus, Feststoffproben Deponien A und B; Grenzwerte der TA Siedlungsabfall, Anhang B	104
Tab. 7.2:	Extrapolierte maximal mobilisierbare Auslaugpotenziale von Feststoffproben der Ablagerungen A, B und D	107
Tab. 7.3:	Frachten der Schwermetalle nach 10 Auslaugzyklen im Verhältnis zum Feststoffgehalt, Feststoffproben der Deponie A	110
Tab. 7.4:	Steigerung der Wassergehalte im Respirometer (Feststoffe der Deponie F)	113
Tab. 7.5:	Bandbreite der Atmungsaktivitäten von Feststoffproben der beprobten Deponieabschnitte	117
Tab. 7.6:	Bandbreite des Netto-Belüftungsbedarfs der Feststoffproben und Mittelwert für gesamten Deponieabschnitt	120
Tab. 8.1:	Übersicht der Deponiesimulationsreaktoren DSR	125
Tab. 8.2:	Konzentrationsbereiche an Spurenstoffen im Deponiegas DSR 1-7, Deponie A	140
Tab. 9.1:	Übersicht der belüfteten Deponiesimulationsreaktoren DSR	142
Tab. 11.1:	Emissionspotenziale für CSB, TKN, AOX und Cl über den Wasserpfad und Restemissionspotenziale nach Erreichen einer Grenzkonzentration $C_E$ , Feststoffproben aus Kernbereich Deponie A	174
Tab. 11.2:	Abschätzung des Zeitraumes $T_E$ für die Parameter CSB, TKN, AOX und Cl bis zum Erreichen der Grenzkonzentration $C_E$	183
Tab. 11.3:	Vergleich der Emissionsentwicklung über Wasser/Feststoff-Verhältnisse	190
Tab. 11.4:	Ergebnisse von Auswertungen von Deponiedaten (KRÜMPELBECK, 2000) im Vergleich zu den Ergebnissen der DSR-Versuche	191
Tab. 12.1:	Stoffaustrag über den Wasserpfad: erforderliche Wasser/Feststoff-Verhältnisse infolge physikalischer Prozesse (Verdünnung) und bei Berücksichtigung langfristiger biochemischer Prozesse (DSR Ergebnisse)	205
Tab. 13.1:	Veränderung der Nachsorgezeiträume durch Belüftungsmaßnahmen, Leitparameter Stickstoff im Sickerwasser	211
Tab. 14.1:	Altdeponie D: Beschaffenheit des Sickerwasser-/Grundwassergemischs am Grundwasserpegel unterhalb des Deponiekörpers	231
Tab. 15.1:	Maßnahmenkatalog zum Betrieb, zur Stilllegung und zur Nachsorge von Deponien und zur Sanierung von Ablagerungen	243

## VIII

Tab. A6.1: Analyseverfahren für die Untersuchung von Feststoffproben	264
Tab. A6.2: Zusammenstellung der Analyseverfahren für die Untersuchung von Sickerwasser und Eluaten	265
Tab. A7.1: Ergebnisse der Feststoffanalysen Deponie A, Kernbereich und Randabschnitt	269
Tab. A7.2: Ergebnisse der Feststoffanalysen Altablagerung B	270
Tab. A7.3: Ergebnisse der Feststoffanalysen Deponie C	270
Tab. A7.4: Ergebnisse der Feststoffanalysen Altdeponie D	271
Tab. A7.5: Ergebnisse der Feststoffanalysen Altablagerung E	271
Tab. A7.6: Ergebnisse der Feststoffanalysen Deponie F	272
Tab. A7.7: Atmungsaktivitäten von Feststoffproben der Ablagerungen A und B	273
Tab. A7.8: Atmungsaktivitäten von Feststoffproben der Ablagerungen D, E und F	274

## Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 2.1:	Deponiebasisabdichtungssysteme nach TA Siedlungsabfall (TASi, 1993)	7
Abb. 2.2:	Entwicklung der Hausmüllzusammensetzung am Beispiel der Stuttgart (BUCHWALD et al., zit. in WIRTZ et al., 1997)	9
Abb. 2.3:	Beispiele verschiedener Resthausmüllanalysen von 1993 - 1994 im Vergleich zu einer "mittleren" Hausmüllanalyse (BHMA) im Jahr 1985	12
Abb. 3.1:	Wasserhaushalt einer Deponie	14
Abb. 3.2:	Oberflächenabdichtungssysteme: Regelsysteme nach TA Siedlungsabfall (1993)	16
Abb. 3.3:	Oberflächenabdichtungssysteme: Alternativsysteme mit mächtigerer Rekultivierungsschicht, Kapillarsperre oder Bentonitmatte	17
Abb. 3.4:	Wirksamkeit der Rekultivierungsschicht, Niederschlagsabfluss und Versickerung unterschiedlicher Abdichtungsvarianten, Simulation mit HELP	27
Abb. 4.1:	Überblick über mögliche Reaktionen in einer Hausmülldeponie (nach ELLING, 1985)	31
Abb. 4.2:	Schematische Darstellung der Stoffumsetzungen beim aeroben Abbau (nach SCHUCHARDT, 1988)	34
Abb. 4.3:	Parameter des aeroben Abbaus und Wechselbeziehungen (nach SCHUCHARDT, 1988)	35
Abb. 4.4:	Schematische Darstellung des Dreiphasensystems	38
Abb. 4.5:	Schematische Struktur von Huminstoffen (CERNAY, 1994)	40
Abb. 4.6:	Substrate und Bakteriengruppen des anaeroben Abbaus	42
Abb. 5.1:	Hauptkomponenten im Deponiegas, Konzentrationsverläufe während der Abbauphasen im Deponiekörper (nach RETTENBERGER et al., 1992)	58
Abb. 5.2:	Entwicklung der Gas- und Sickerwasserkonzentrationen im Deponiekörper (nach CHRISTENSEN et al., 1989)	64
Abb. 5.3:	Zeiträume einiger Sickerwasserinhaltsstoffe bis zum Erreichen umweltverträglicher Konzentrationen (BELEVI et al., 1989)	66
Abb. 6.1:	Untersuchungsprogramm im Labormaßstab	79
Abb. 6.2:	Versuchsordnung zur Respirationsmessung im Sapromat	82
Abb. 6.3:	Versuchsaufbau eines Deponiesimulationsreaktors DSR zur Simulation anaerober Milieubedingungen	84
Abb. 6.4:	Vergleich des Wasserdurchsatzes in einer Deponie und im Deponie- simulationsreaktor (DSR) (nach HÖRING et al., 1996)	87

Abb. 7.1	Wassergehalt, pH-Wert und Leitfähigkeit der Feststoffproben der Ablagerungen A - E über die Ablagerungsdauer	95
Abb. 7.2:	Glühverlust-, Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte der Feststoffproben der Ablagerungen A - E über die Ablagerungsdauer	97
Abb. 7.3:	Org. und anorg. Bestandteile bei frischem Siedlungsabfall und einer Feststoffprobe aus Deponie A (AP3T16) nach 8 Jahren Ablagerungsdauer	99
Abb. 7.4:	„Korrigierte“ Glühverlustgehalte der Abfallfeststoffproben aus Ablagerung A und B im Vergleich zur modellierten Abnahme über die Ablagerungsdauer	101
Abb. 7.5:	Schwermetallgehalte von Feststoffproben der Ablagerungen A und B nach der Probenahme	103
Abb. 7.6:	Mehrfachauslaugung der Feststoffprobe AP3T16: CSB, TKN und Cl	105
Abb. 7.7:	Frachtensummen und Extrapolation zur Ermittlung des maximalen CSB-Emissionspotenzials der Feststoffprobe AP3T16	106
Abb. 7.8:	Extrapolierte maximale Auslaugpotenziale nach Mehrfachauslaugungen	107
Abb. 7.9:	Mehrfachauslaugung mit demineralisiertem Wasser und Elutionsmedium pH 2, Schwermetallkonzentrationen im Eluat der Feststoffprobe AP1T13	109
Abb. 7.10:	Feststoffprobe AP2T08: Atmungsaktivität und –intensität über 96 h bei Variation des Wassergehalts (Mittelwerte aus Doppelansatz)	112
Abb. 7.11:	Atmungsaktivität der Abfallfeststoffproben über 500 h bei originalen sowie erhöhten bzw. optimierten Wassergehalten	114
Abb. 7.12:	Vergleich der Atmungsaktivitäten der Abfallfeststoffproben der Deponie F bei unterschiedlichen Wassergehalten über 4, 7, 14 und 21 Tagen	115
Abb. 7.13:	Atmungsaktivität der Feststoffproben Deponie A, Bohrung 1, über 1500 h	116
Abb. 7.14:	Atmungsaktivität der Feststoffproben nach 96 h und 500 h mit Ausgangswassergehalt bei Feststoffprobenahme	118
Abb. 7.15:	Gesamt-Kohlenstoffgehalt und biologisch maximal abbaubarer Anteil bei Feststoffproben der Deponie F	121
Abb. 7.16:	Biologisch maximal abbaubarer Kohlenstoff und prozentualer Anteil am Gesamt-Kohlenstoffgehalt	122
Abb. 8.1:	pH-Werte und $\text{HCO}_3$ im Sickerwasser der Deponiesimulationsreaktoren, anaerobe Milieubedingungen	127
Abb. 8.2:	CSB und $\text{BSB}_5$ im Sickerwasser der Deponiesimulationsreaktoren, anaerobe Milieubedingungen	129
Abb. 8.3:	TKN, $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ im Sickerwasser der Deponiesimulationsreaktoren, anaerobe Milieubedingungen	130
Abb. 8.4:	Cl und AOX im Sickerwasser der Deponiesimulationsreaktoren, anaerobe Milieubedingungen	131
Abb. 8.5:	Schwermetalle Kupfer, Blei, Nickel und Chrom im Sickerwasser der Deponiesimulationsreaktoren, anaerobe Milieubedingungen	133

Abb. 8.6:	Deponiegaszusammensetzung und -produktion im DSR 7/AP3T16 (Kernbereich Dep. A, 8 Jahre Ablagerungsdauer), anaerobe Milieubedingungen	134
Abb. 8.7:	Deponiegas: Restgaspotenziale im DSR-Versuch und Vergleich mit theoretischer Abnahme des Restgaspotenzials $G_E - G_t$	136
Abb. 8.8:	Vergleich theoretischer Gasproduktionsraten in Deponien mit denen der DSR	139
Abb. 9.1:	pH-Werte und $\text{HCO}_3^-$ im Sickerwasser der Deponiesimulationsreaktoren, anaerobe - aerobe Milieubedingungen	144
Abb. 9.2:	Redoxpotenzial $E_h$ im belüfteten DSR 12/BP2T11	145
Abb. 9.3:	CSB und $\text{BSB}_5$ im Sickerwasser der Deponiesimulationsreaktoren, anaerobe - aerobe Milieubedingungen	146
Abb. 9.4:	Stickstoff-Konzentrationen im Sickerwasser der Deponiesimulationsreaktoren, anaerobe - aerobe Milieubedingungen	147
Abb. 9.5:	Sulfat und AOX-Konzentrationen im Sickerwasser der Deponiesimulationsreaktoren, anaerobe - aerobe Milieubedingungen (in DSR 20/DP1T07: AOX nicht bestimmt)	149
Abb. 9.6:	Schwermetallgehalte (Pb, Cu, Ni, Cr) im Sickerwasser der Deponiesimulationsreaktoren, anaerobe - aerobe Milieubedingungen	150
Abb. 9.7:	Gaszusammensetzung der Deponiesimulationsreaktoren 1, 3, 5, 8, 12 und 20, anaerobe - aerobe Milieubedingungen	153
Abb. 9.8:	Ausschnitt der Gaszusammensetzung der Deponiesimulationsreaktoren 12/BP2T11 und 20/DP1T07, Methan-, Kohlendioxid- und Sauerstoffgehalte während der Belüftung	155
Abb. 9.9:	Kohlenstoffaustrag über den Gaspfad, Deponiesimulationsreaktoren 1, 3, 8 und 12, anaerobe - aerobe Milieubedingungen	157
Abb. 9.10:	Bilanzierung des Stickstoffaustrags der belüfteten DSR 8 und 12	159
Abb. 10.1:	Abnahme des Glühverlustes und Kohlenstoffgehalts in Feststoffproben anaerob und anaerob/aerob betriebener DSR	161
Abb. 10.2:	Abnahme des Stickstoffgehalts und der Leitfähigkeit in Feststoffproben anaerob und anaerob/aerob betriebener DSR	162
Abb. 10.3:	Blei-, Kupfer- und Zinkgehalte in Feststoffproben anaerob und anaerob/aerob betriebener DSR	164
Abb. 10.4:	Abnahme der Konzentrationen des ersten Auslaugzyklusses bei Feststoffproben anaerob und anaerob/aerob betriebener DSR	166
Abb. 10.5:	Abnahme der mobilisierbaren Frachten bei Mehrfachauslaugungen von Feststoffproben anaerob und anaerob/aerob betriebener DSR	167
Abb. 10.6:	Abnahme der Atmungsaktivitäten von Feststoffproben anaerob und anaerob/aerob betriebener DSR	169

Abb. 11.1: Idealisierter Verlauf der Entfrachtung über den Sickerwasserpfad	171
Abb. 11.2: CSB-Entfrachtungssumme über den Sickerwasserpfad in den DSR, Feststoffproben aus dem Kernbereich der Deponie A	173
Abb. 11.3: Entfrachtung über den Sickerwasserpfad aus den DSR-Versuchen, Mittelwertbildung für drei Deponieabschnitte der Deponien A und B	175
Abb. 11.4: Vergleich der Feststoffgehalte, der maximal auslaugbaren Frachten (Mehrfachelutionen) und der Emissionen im Deponiesimulationsversuch unter anaeroben Milieubedingungen (Deponie A)	177
Abb. 11.5: Extrapolation der CSB- und TKN- Sickerwasserkonzentrationen unter anaeroben Milieubedingungen	180
Abb. 11.6: Extrapolation der Cl- und AOX- Sickerwasserkonzentrationen unter anaeroben Milieubedingungen	180
Abb. 11.7: Anwachsen der Halbwertzeiten über die Versuchsdauer in Deponiesimulationsreaktoren	185
Abb. 11.8: Langfristige Emissionspotenziale und Zeiträume bis zum Erreichen von Grenzkonzentrationen / Vergleich mit weiteren Untersuchungen	188
Abb. 12.1: Wassergehalte von Abfallfeststoffproben der Deponien A und B bei der Probenahme, maximale Wasserhaltekapazitäten $w_{kmax}$ .	199
Abb. 12.2: Abnahme der Sickerwasserkonzentrationen infolge Verdünnung	205
Abb. 12.3: Vergleich der Abnahme der Sickerwasserkonzentrationen in den DSR mit der zu erwartenden Konzentrationsabnahme infolge der Verdünnung	206
Abb. 13.1: Extrapolation der TKN-Sickerwasserkonzentrationen unter strikt anaeroben Milieubedingungen und Verlauf des TKN-Gehaltes im DSR-Sickerwasser bei aerober Stabilisierung	211
Abb. 13.2: Abnahme der organischen Belastungen (BSB <sub>5</sub> und CSB) unter anaeroben und aeroben Milieubedingungen im DSR, Abfallfeststoffproben der Deponie D	213
Abb. 13.3: DSR-Sickerwasseremissionen nach Abschluss der Belüftung: Verlauf der Parameter BSB <sub>5</sub> , CSB, AOX und TKN in den DSR 8/AP8T89 und DSR 12/BP2T11	215
Abb. 13.4: Vergleich des Kohlenstoffaustrags über den Gaspfad in den DSR unter anaeroben und aeroben Bedingungen bei Belüftungsmaßnahmen (Belüftungsdauer 280 - 700 Tage)	217
Abb. 13.5: Kohlenstoffaustrag über den Gaspfad in den DSR 1,3, 5 vor, während und nach den Belüftungsmaßnahmen	218
Abb. 14.1: Position der Gaspegel im Umfeld des Gasbrunnens 2 (Belüftungsbrunnen), nordwestlicher Bereich der Altdeponie F	222
Abb. 14.2: Schematische Darstellung der mobilen Gasabsaug-/Belüftungsanlage (hier für Belüftungsbetrieb)	223
Abb. 14.3: Belüftungsbetrieb am Gasbrunnen Br. 2, Altdeponie F: Belüftungsvolumen und Überdruck am Gasmesswagen und am Gasbrunnen	225

Abb. 14.4: Ausbreitungsverhalten der eingepressten Luft im Umfeld des Belüftungsbrunnens Br. 2 der Altdeponie F, Bestimmung anhand der Überdrücke	226
Abb. 14.5: Altdeponie F: Gaszusammensetzung an den 4 m-tiefen Gaspegeln in 20 m Entfernung vom Gasbrunnen Br. 2: GP 1-3, GP 2-3, GP 3-3, GP 4-3	228
Abb. 14.6: Altdeponie D: pH-Wert im Sickerwasser in Abhängigkeit vom Abstand zum Belüftungsbrunnen unmittelbar nach Abschluss der Belüftungsversuche	231
Abb. 14.7: Grundkonzept der beschleunigten in situ Stabilisierung durch Belüftungsmaßnahmen (Deponiekörper ohne Basisabdichtung)	232
Abb. 14.8: Gesamtkonzept der baulichen Einrichtungen zur beschleunigten aeroben in situ Stabilisierung der Altdeponie D	235

**Verzeichnis der Abkürzungen**

AAS	Atom-Adsorptions-Spektroskopie
A <sub>B</sub>	Sickerwasserabfluss an der Deponiebasis
AbfG	Abfallgesetz
AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AbwV	Abwasserverordnung
A <sub>O</sub>	Oberflächenabfluss
AOX	halogenierte organische Kohlenwasserstoffverbindungen
AT <sub>n</sub>	Atmungsaktivität in n Tagen
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSB <sub>n</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf in n Tagen
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol
C	Kohlenstoff
C <sub>0</sub>	Anfangskonzentration
Cd	Cadmium
C <sub>E</sub>	Grenzkonzentration
CH <sub>4</sub>	Methan
Cl	Chlor
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
C <sub>t</sub>	Konzentration zur Zeit t
Cu	Kupfer
Dep.	Deponie
DepV	Deponieverordnung
DEV S4	Deutsches Einheitsverfahren, Schlamm und Sediment, Teil 4
DSR	Deponiesimulationsreaktor
E <sub>h</sub>	Redoxpotenzial
F	Fluor
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
Fe	Eisen
FM	Feuchtmasse
G <sub>E</sub>	Gasbildungspotenzial
G <sub>L</sub>	Toxizität gegenüber Leuchtbakterien

$G_t$	produziertes Gasvolumen zur Zeit t
GV	Glühverlust
$GV_{\text{korr.}}$	korrigierter Glühverlust
H	Wasserstoff
$H_2S$	Schwefelwasserstoff
$HCO_3$	Hydrogenkarbonat
Hg	Quecksilber
k	Abbaukonstante
LF	Leitfähigkeit
LHKW	Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe
N	Niederschlag
n	Porosität
n.b.	nicht bestimmt
$N_2$	Stickstoff
NE	Nichteisenmetalle
$N_{\text{ges.}}$	Gesamtstickstoff
$NH_4\text{-N}$	Ammoniumstickstoff
$NO_2\text{-N}$	Nitritstickstoff
$NO_3\text{-N}$	Nitratstickstoff
$NO_x$	Stickstoffoxide
$O_2$	Sauerstoff
oTS	organische Trockensubstanz
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PCB	Polychlorierte Biphenyle
$PO_4\text{-P}$	Phosphat-Phosphor
$P_t$	Gasproduktionsrate
$\rho$	Dichte
r	Korrelationskoeffizient
$R_v$	Rückhalt (verzögerter Abfluss)
S	Schwefel
Sp	Speicherung
SAV	Standardarbeitsvorschrift
$S_b$	klimatische Sickerwasserbildung

## XVI

SO <sub>4</sub>	Sulfat
t	Zeit
T <sub>½</sub>	Halbwertszeit
T <sub>E</sub>	Emissionszeitraum bis zum Erreichen einer Grenzkonzentration
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
TKN	Stickstoffgehalt nach Kjehldal
TOC	Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff
TS	Trockensubstanz
V <sub>E</sub>	Evaporation
Vol.-%	Volumen-Prozent
V <sub>T</sub>	Transpiration
w	Wassergehalt
w <sub>kmax.</sub>	maximale Wasserhaltekapazität
W/F	Wasser/Feststoff-Verhältnis
W <sub>B</sub>	Wasserbedarf/-freisetzung aus biologischer Umsetzung
W <sub>K</sub>	Wasserfreisetzung aus Konsolidation
Zn	Zink