
Materialien

Nr. 54

**Gezielte Infiltration von Wasser in
einen Deponiekörper zur Reduzierung
des Emissionspotentials**

**Untersuchungsbericht des Instituts für
Siedlungswasserwirtschaft der Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule Aachen im Auftrag des
Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen**

Essen 1999

IMPRESSUM:

Herausgegeben vom
Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6 • 45133 Essen
Telefon (0201) 7995-0 • Telefax (0201) 7995-1448
e-mail: poststelle@essen.lua.nrw.de

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Max Dohmann (Wissenschaftliche Leitung)
Dipl.-Ing. Günther Kabbe (Bearbeitung)

Redaktion: Dr. Ulrike Nienhaus, Dipl.-Ing. Michael Trapp

Projektbetreuung: Dr. Ulrike Nienhaus, Dipl.-Ing. Michael Trapp

ISSN 0947 - 5206

Informationsdienste: Umweltdaten aus NRW, Fachinformation des LUA-NRW
• Internet unter <http://www.lua.nrw.de>

Bereitschaftsdienst: Nachrichtenbereitschaftszentrale des LUA-NRW
(24-Std.-Dienst): Telefon (0201) 7144448

gedruckt auf 100% Altpapier ohne Chlorbleiche

Vorwort

Ein wesentliches Ziel der TA Siedlungsabfall ist die Schaffung einer „nachsorgearmen Deponie“. Grundlage hierfür sind die dem Multibarrierenkonzept zugrundeliegenden Barrieren und hierbei im besonderen die Beschaffenheit der Abfälle selbst, die bestimmten Zuordnungswerten genügen müssen. Es dürfen nur noch solche Abfälle deponiert werden, die schadstoffarm sind sowie selbst und auch untereinander zu keinen nachteiligen Reaktionen führen.

Aus der Zeit vor dem Inkrafttreten der TA Siedlungsabfall, aber auch im Rahmen des Betriebes nach den geltenden Übergangsvorschriften, gibt es eine Vielzahl von Altdeponien auf denen unbehandelte Abfälle abgelagert wurden und noch werden. Diese Deponien verfügen hinsichtlich der Deponiegasbildung sowie der organischen Belastung des Sickerwassers aufgrund der mit abgelagerten organischen Abfälle über ein erhöhtes Emissionspotential.

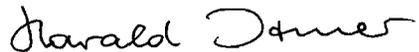
Die TA Siedlungsabfall fordert bei Abschluss einer Deponie oder eines Deponieabschnittes die Aufbringung eines Oberflächenabdichtungssystems; bei Altdeponien kann jedoch bis zum Abklingen der Hauptsetzungen zunächst eine Abdeckung vorgenommen werden, die die Sickerwasserbildung minimiert und die Deponiegasmigration verhindert.

Die Erfahrungen in den vergangenen Jahren zeigten, dass nach dem Aufbringen der Oberflächenabdichtung ein Rückgang der Gasproduktion zu verzeichnen war. Als Ursache hierfür wurde vielfach eine Abnahme des Wassergehaltes im Deponiekörper angesehen. Dies führt zu einer Hemmung der biochemischen, Abbauprozesse mit der Folge einer vorzeitigen Stabilisierung des abgelagerten Abfalls und somit zu einer „Mumifizierung“ des Deponiekörpers; als Konsequenz hieraus folgte eine verminderte Gasproduktion. Im Weiteren wurden auf verschiedenen Deponien Versuche zur Rückführung von Wasser in den Deponiekörper durchgeführt, die die Gasproduktion wieder ansteigen ließen. Hieraus leitet sich der Gedanke ab, dass durch eine gezielte Infiltration von Wasser in den Altmüllkörper ein verstärkter Abbau der organischen Substanz erreicht werden kann und somit eine Minderung des langfristigen Emissionspotentials zu erwarten ist.

Die Frage nach einer möglichen Infiltration auf einer Siedlungsabfalldeponie in NRW war Anlass für ein Untersuchungsvorhaben, das zum einen eine systematische Zusammenstellung und Auswertung der bisher realisierten Infiltrationsmaßnahmen beinhaltetete als auch Laborversuche, die den Einfluss der Fließbewegung des Wassers auf die Gasbildung untersuchen sollten.

Wegen der Bedeutung dieser Maßnahmen und des großen Interesses wird der Original-Untersuchungsbericht hier als LUA-Materialienband der Fachöffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Es ist selbstverständlich, dass sowohl die Ergebnisse der auf den Deponien durchgeführten Infiltrationsmaßnahmen als auch die Laborergebnisse noch diskutiert werden müssen, bevor hieraus weitergehende Regelungen für den Abschluss von Deponien getroffen werden können.

Essen, im Oktober 1999



Dr.-Ing. Harald Imer
Präsident des
Landesumweltamtes NRW

VORWORT	III
INHALTSVERZEICHNIS	V
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	VII
VERZEICHNIS DER TABELLEN	IX
VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND INDIZES	X

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung	1
2 Wasser im Deponiekörper	2
3 Infiltrationssysteme	6
3.1 Geplante und realisierte Systeme	6
3.1.1 Deponie A	6
3.1.2 Deponie B	9
3.1.3 Deponie C	14
3.1.4 Deponie D	15
3.1.5 Deponie E	16
3.1.6 Deponie F	17
3.1.7 Deponie G	18
3.1.8 Deponie H	19
3.1.9 Deponie I	19
3.1.10 Deponie J	20
3.1.11 Deponie K	21
3.1.12 Deponie L	21
3.1.13 Deponie M	22
3.1.14 Deponie N	23
3.1.15 Deponie O	23
3.1.16 Deponie P	24
3.1.17 Deponie Q	25
3.1.18 Deponie R	25
3.2 Bewertung der Systeme	26
3.2.1 Ziel und Zweck eines Infiltrationssystems	27
3.2.2 Möglichkeiten zur Integration eines Infiltrationssystems auf der Deponie	27
3.2.3 Planung und Betrieb von Infiltrationssystemen	28
3.2.4 Kosten	29
4 Untersuchungen	30
4.1 DSR-Untersuchungen	30
4.1.1 Probenahme und Einbau der Abfälle in die Reaktoren	30

4.1.2	Infiltrationswasser	34
4.1.3	Feststoffe zu Beginn der Untersuchungen	35
4.1.4	Gasproduktion und -zusammensetzung	36
4.1.5	Einfluß der Wasserbewegung auf die Gasproduktion	40
4.1.6	Sickerwassermengen und -zusammensetzung	43
4.1.6.1	Sickerwassermengen	43
4.1.6.2	Sickerwasserzusammensetzung	44
4.1.7	Feststoffe nach Abschluß der Untersuchungen	49
4.1.8	Zusammenfassung der Ergebnisse der DSR-Untersuchungen	50
4.2	Gärtests	51
4.3	Schlußfolgerungen aus den Untersuchungen	53
5	Umsetzung der Ergebnisse auf die Deponie R	55
5.1	Darstellung des Ist-Zustands der Deponie R	55
5.1.1	Allgemeines	55
5.1.2	Beschaffenheit der Abfälle	56
5.1.3	Wasserhaushalt der Deponie R	58
5.1.3.1	Niederschlag	58
5.1.3.2	Sickerwassermengen	59
5.1.3.3	Verdunstung und oberflächlicher Abfluß	60
5.1.3.4	Speicherung und Rückhalt	60
5.1.3.5	Korrelationen zwischen Niederschlag und Sickerwasseranfall	62
5.1.4	Deponiegasmengen	64
5.1.5	Qualitative Beschaffenheit der Sickerwasser- und Gasemissionen	65
5.1.5.1	Sickerwasserzusammensetzung	65
5.1.5.2	Deponiegaszusammensetzung	67
5.1.6	Zusammenhang zwischen dem Deponiegasanfall und ausgewählten Größen des Wasserhaushalts	68
5.1.7	Setzungsverhalten	72
5.2	Schlußfolgerungen für das Infiltrationssystem der Deponie R	72
5.3	Infiltrationswassermenge	73
5.4	Infiltrationssysteme	74
5.5	Einfluß der Infiltration auf die Gasproduktion des BA 3 der Deponie R	76
5.6	Meß- und Steuerungskonzept für ein Infiltrationssystem am Beispiel der Deponie R	76
6	Zusammenfassung und Ausblick	79
7	Literatur	83

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Einfluß des Wassergehalts auf die Gasproduktion von Abfällen (EHRIG 1980)	4
Abbildung 2: Einfluß der Versorgung mit Wasser auf die Methankonzentrationen im Deponiegas (LECKIE ET AL. 1979)	5
Abbildung 3: Oberflächenabdichtungs- und Infiltrationssystem auf der Deponie A	7
Abbildung 4: Anordnung des Infiltrationssystems auf der Deponie B	11
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Oberflächenabdichtung mit dem Infiltrationssystem der Deponie B	12
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Infiltrationssystems der Deponie B	13
Abbildung 7: Schematische Darstellung eines während der Untersuchungen eingesetzten Deponiesimulationsreaktors (DSR)	32
Abbildung 8: Summenkurven der spezifischen Gasproduktion	38
Abbildung 9: Gasproduktionsraten der untersuchten Reaktoren	39
Abbildung 10: Zusammensetzung des Gases der untersuchten Reaktoren	40
Abbildung 11: Verlauf der Wassergehalte in den untersuchten Reaktoren	42
Abbildung 12: Beziehung zwischen Wassergehalt und spezifischer Gasproduktion	43
Abbildung 13: Wasserbilanz für die untersuchten Reaktoren	44
Abbildung 14: Verlauf der pH-Werte im Sickerwasser	45
Abbildung 15: CSB- und BSB ₅ -Konzentrationen im Sickerwasser	46
Abbildung 16: BSB ₅ /CSB-Verhältnis im Sickerwasser	46
Abbildung 17: Essigsäureäquivalente im Sickerwasser	47
Abbildung 18: NH ₄ -N-Konzentrationen im Sickerwasser	48
Abbildung 19: Chloridkonzentrationen und Leitfähigkeit im Sickerwasser	49
Abbildung 20: Kumulierte Gasproduktion des untersuchten Abfalls und anteilige Gasproduktion aus Gärtest- und DSR-Untersuchungen	52
Abbildung 21: Abfallaufkommen auf der Deponie R in den Jahren 1988 - 1994	56
Abbildung 22: Organische Substanz (bestimmt als Glühverlust) der Feststoffe der Deponie R im Vergleich mit Daten von anderen Altdeponien und Altablagerungen (aus: DOHMANN ET AL. 1997a)	57

Abbildung 23: Jahresniederschlagshöhen der Deponie R von 1983 bis 1996 sowie das Mittel der Jahre 1988 bis 1996 (entspricht etwa dem Verfüllungszeitraum des BA 3)	59
Abbildung 24: Zeitliche Verteilung der Sickerwassermengen von 1983 bis 1996	60
Abbildung 25: Relativer, auf den Niederschlag bezogener Sickerwasseranfall der Deponie R (Monatswerte)	63
Abbildung 26: Relativer, auf den Niederschlag bezogener Sickerwasseranfall der Deponie R (Jahreswerte)	63
Abbildung 27: Deponiegasmengen (getrennt nach Erfassungssträngen)	64
Abbildung 28: CSB- und BSB ₅ -Konzentrationen sowie deren Verhältnis im Sickerwasser der Deponie R	65
Abbildung 29: NH ₄ -Konzentrationen im Sickerwasser der Deponie R	66
Abbildung 30: AOX-Konzentrationen im Sickerwasser der Deponie R	67
Abbildung 31: CH ₄ -Anteil im Gas der Deponie R (das Gas des BA 3 wird über den neuen Strang erfaßt)	67
Abbildung 32: Beziehung zwischen Deponiegasmenge (Gesamtmenge (oben) und Menge des neuen Strangs (unten)) und Niederschlag	69
Abbildung 33: Beziehung zwischen Deponiegasmenge (Gesamtmenge (oben) und Menge des neuen Strangs (unten)) und absoluter Sickerwassermenge (jeweils in m ³)	70
Abbildung 34: Beziehung zwischen Deponiegasmenge (in m ³ , Gesamtmenge (oben) und Menge des neuen Strangs (unten)) und relativem Sickerwasseranfall (in % des Niederschlags)	71

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 1:	Technische und konstruktive Probleme beim Betrieb von Infiltrationssystemen	28
Tabelle 2:	Infiltrationsmengen für Reaktor 2	33
Tabelle 3:	Drehung des Wendereaktors (Reaktor 3)	33
Tabelle 4:	Zustand in den Reaktoren zu Beginn der Untersuchungen	34
Tabelle 5:	Zusammensetzung des Wassers aus der begleitenden Bachdrainage (BBD) der Deponie R (Analysen des ISA)	35
Tabelle 6:	Zusammensetzung der festen Abfälle sowie der daraus hergestellten Eluate zu Beginn der Untersuchungen	36
Tabelle 7:	Daten zur Gasproduktion	37
Tabelle 8:	Ursachen und Auswirkung der Änderung des Wassergehalts während der Untersuchungen	41
Tabelle 9:	Ergebnisse der Feststoffanalysen nach Abschluß der Untersuchungen	50
Tabelle 10:	Ergebnisse von Untersuchungen an Feststoffeluaten	50
Tabelle 11:	Meßgrößen zur Bewertung einer Infiltrationsmaßnahme	77

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND INDIZES

A	Abfluß
AOX	adsorbierbare, organisch gebundene Halogenverbindungen
BA	Bauabschnitt
BBD	Wasser der begleitenden Bachdrainage
BSB ₅	biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
CH ₄	Methan
Cl	Chlorid
CO ₂	Kohlendioxid
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
DSR	Deponiesimulationsreaktor
GV	Glühverlust
h _p	Druckhöhe
h _v	Geschwindigkeitshöhe
KDB	Kunststoffdichtungsbahn
Mg	1 Megagramm (= 1000 kg)
N	Niederschlag
N ₂	Stickstoff
N _{ges}	Gesamtstickstoff
NH ₃	Ammoniak
NH ₄	Ammonium
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff
o	oberflächig
O ₂	Sauerstoff
P _{ges}	Gesamtphosphor
R	Rückhalt
r	Korrelationskoeffizient
S	Speicherung
SAV	Standardarbeitsvorschrift
SW	Sickerwasseranfall
TOC	gesamter organisch gebundener Kohlenstoff
TR	Trockenrückstand (nach Trocknung bei 105 °C)
UBA	Umweltbundesamt
V	Verdunstung

1 Einleitung

In den letzten Jahren gewinnen Fragestellungen zum Abschluß von Deponien und die damit verbundene Nachsorge zunehmend an Aktualität. Dabei ergibt sich die Notwendigkeit, der Nachbetriebs- und Nachsorgephase verstärkte Aufmerksamkeit zukommen zu lassen. Die ökologische Notwendigkeit hierzu wird durch ökonomische Vorteile verstärkt, da das infolge anaerober Abbau- und Umsetzungsprozesse entstehende Deponiegas energetisch genutzt werden kann.

Nach den Vorgaben der TA Siedlungsabfall (TASI 1993) ist für Altdeponien nach der Verfüllung die Aufbringung eines Oberflächenabdichtungssystems erforderlich. Vorrangige Ziele einer Abdichtung sind die Minimierung des Sickerwasseranfalls durch versickerndes Niederschlagswasser sowie die Verhinderung des unkontrollierten Austritts von Deponiegas. Es zeigte sich jedoch bereits an mehreren abgedeckten oder abgedichteten Deponien, daß dadurch eine ausreichende Versorgung mit Wasser gestört wird. Damit wird die auf ausreichend Feuchtigkeit angewiesene biochemische Deponiegasproduktion gehemmt bzw. unterbrochen. Darüber hinaus besteht die Gefahr, daß es bei einem Versagen der Barriersysteme zu einem erneuten Einsetzen der biochemischen Abbauprozesse kommt, die zu erhöhten Emissionen führen. Als Lösungsansatz bietet die gesteuerte und kontrollierte Infiltration von Wasser unter einem Abdichtungssystem daher eine geeignete Möglichkeit, die mit der Aufbringung eines Abdichtungssystems angestrebten Ziele - Minimierung der Sickerwasserneubildung und Erhöhung der Gasproduktionsrate sowie des Gaserfassungsgrads - zu verbinden.

In einem vom Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW) geförderten Untersuchungsvorhaben wurden vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA), ausgehend von den oben angesprochenen Problemen, die folgenden Fragestellungen bearbeitet:

- Theoretische Überlegungen zum Wassertransport im Deponiekörper
- Erfassung geplanter und realisierter Anlagen zur Infiltration in Deutschland
- Untersuchung der Auswirkungen der Infiltration von Wasser auf die Gasproduktion im Labormaßstab und einer halbtechnischen Versuchsanlage
- Konzeption eines Systems zur Steuerung eines Bewässerungssystems am Beispiel der Deponie R
- Begleitung der großtechnischen Umsetzung einer Infiltrationsmaßnahme auf einer Siedlungsabfalldéponie
- Darstellung des IST-Zustands auf der Deponie R

2 Wasser im Deponiekörper

Der Wasserhaushalt von Deponien kann vereinfacht gemäß der folgenden allgemeinen Bilanzgleichung dargestellt werden:

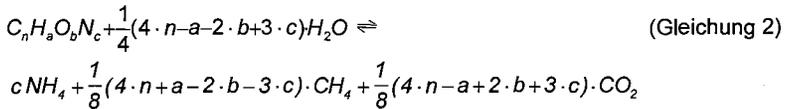
$$N = A_o + V + SW \pm R \pm W_{bio} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Für die einzelnen Glieder der Gleichung lassen sich unterschiedlich umfangreiche Angaben in der Literatur finden. Nach LAGA (1984) beträgt der Niederschlag in Deutschland im langjährigen Mittel zwischen 500 und 900 mm/a. Ein großer Teil des Niederschlags, nach EHRIG (1989) zwischen 30 und 70 %, dringt infolge von Verdunstung nicht in den Deponiekörper ein. Der Verdunstungsanteil wird stark durch die Art und Gestaltung der Oberfläche beeinflusst. Der auf den Niederschlag bezogene Sickerwasseranfall beträgt nach EHRIG zwischen 2 und 45 %. Durch die Inbetriebnahme neuer Abschnitte kann es darüber hinaus zu einem deutlich erhöhten Sickerwasseranfall kommen. KRÜMPELBECK (1996) gibt deshalb anhand einer Auswertung von Überwachungsdaten zahlreicher Betriebs- und Altdeponien einen bis auf 55 % des Niederschlags erweiterten Sickerwasseranfall an. Der Sickerwasseranfall wird u. a. durch die Beschaffenheit der abgelagerten Abfälle, deren Speichervermögen sowie die Art der Verdichtung bestimmt. Bei den im Gegensatz zum Rückhalt dauerhaft wirksamen Speichervorgängen muß zwischen dem Speichervermögen der Deponie, das z. B. infolge von Stauhorizonten zu unerwünschten Stabilitätsproblemen führen kann, und dem Speichervermögen der Abfälle unterschieden werden. EHRIG (1989) gibt auf der Grundlage von Untersuchungen für Abfälle eine zusätzliche Speicherkapazität zwischen 90 und 160 l/Mg trockenem Abfall an. Bezogen auf einen Jahresniederschlag von 750 mm und eine Deponiehöhe von 20 m entspricht dies einem Niederschlagsanteil von ca. 7 bis 18 %. Eine deutlich höhere Speicherkapazitäten geben COLLINS ET AL. (1986) mit ca. 330 l/Mg trockenem Abfall an, die zusätzlich zu der Eigenfeuchte der Abfälle unter Berücksichtigung des durch die Abbauprozesse bedingten Massenverlusts gespeichert werden kann.

Beim Anteil des aus biochemischen Prozessen resultierenden Wassers muß zwischen Neubildung und Verbrauch unterschieden werden. Nach RAMKE (1993) beträgt die Bildungsrate bei einer vollständigen Umsetzung etwa 250 l/Mg TR. Im Vergleich dazu geben COLLINS ET AL. (1986) einen Verbrauch von etwa 50 bis 125 l/Mg TR an. Dies entspricht unter der Annahme, daß je Mg Abfall ca. 180 m³

Gas entstehen, einem Verbrauch von $0,28 \text{ l H}_2\text{O/m}^3 \text{ Gas}$. Demgegenüber führt BRÄCKER (1995) einen deutlich geringeren spezifischer Bedarf an. Er quantifiziert den für die Aufrechterhaltung der biochemischen Umsetzungsprozesse erforderlichen Wasserbedarf auf 3 bis 30 mm/a, was ca. 0,2 bis 2 l/Mg TR entspricht (Annahmen: $h = 20 \text{ m}$, $\rho = 1,0 \text{ Mg/m}^3$, $\text{TR} = 70 \%$). Nach BRÄCKER (1997) ist demnach für die Gasproduktion eine Wassermenge in einer Größenordnung von nur $0,15 \text{ l/Nm}^3 \text{ Gas}$ dem Deponiekörper zuzuführen.

Für die biochemischen Gasbildungsprozesse sind insbesondere die den Deponiekörper durchströmenden bzw. die gespeicherten oder zurückgehaltenen Anteile von Bedeutung. In diesem Zusammenhang kann man von der Mikrofunktion des Wassers sprechen. Ein ausreichender Wassergehalt im Deponiekörper ist für die biochemischen Prozesse der Gasproduktion erforderlich, da nur gelöste Stoffe bioverfügbar, d.h. den Mikroorganismen direkt zugänglich sind. Ferner zeigt die folgende Gleichung, daß Wasser unmittelbar an der Umsetzung beteiligt ist.



In Abbildung 1 zeigt sich der Einfluß des Wassergehalts auf die Gasproduktion. Es wird deutlich, daß unterhalb von ca. 25 % die Umsetzungsprozesse zum Erliegen kommen. Dies führt zu einer Konservierung der potentiell abbaubaren Stoffe. Mit zunehmendem Wassergehalt steigt die Gasproduktion an. Daß die Höhe der Gasproduktion nicht nur eine Funktion des Wassergehalts darstellt, sondern auch von anderen Größen wie z. B. der Substratbeschaffenheit etc. beeinflusst wird, verdeutlichen die ebenfalls in Abbildung 1 dargestellten Werte von CHIAN ET AL.

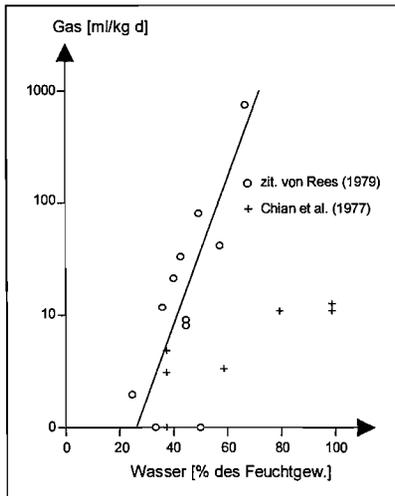


Abbildung 1: Einfluß des Wassergehalts auf die Gasproduktion von Abfällen (EHRIG 1980)

Darüber hinaus erfüllt Wasser als Transportmedium für die gelösten Stoffe im Deponiekörper eine Makrofunktion. Dieser Makro- oder auch Transportfunktion des Wassers kommt in Deponien eine ausschlaggebende Bedeutung zu, da der Deponiekörper als biochemischer „Festbettreaktor“ betrachtet werden kann. Die Versorgung der sessilen Mikroorganismen mit Substrat etc. muß gewährleistet sein.

Anhand von Untersuchungen konnte die Bedeutung einer regelmäßigen Versorgung mit Wasser für die Gas- bzw. Methanproduktion gezeigt werden. Abbildung 2 zeigt dementsprechende Untersuchungsergebnisse von LECKIE ET AL. (1979). Bei gleichen Anfangswassergehalten (Feldkapazität) steigerten sich die Gaszusammensetzung der täglich mit Wasser versorgten Abfälle nach vier Jahren auf CH_4 -Konzentrationen von rund 70 Vol.-%, während die nur zu Beginn wassergesättigten Abfälle Werte zwischen 20 und 30 Vol.-% erreichten.

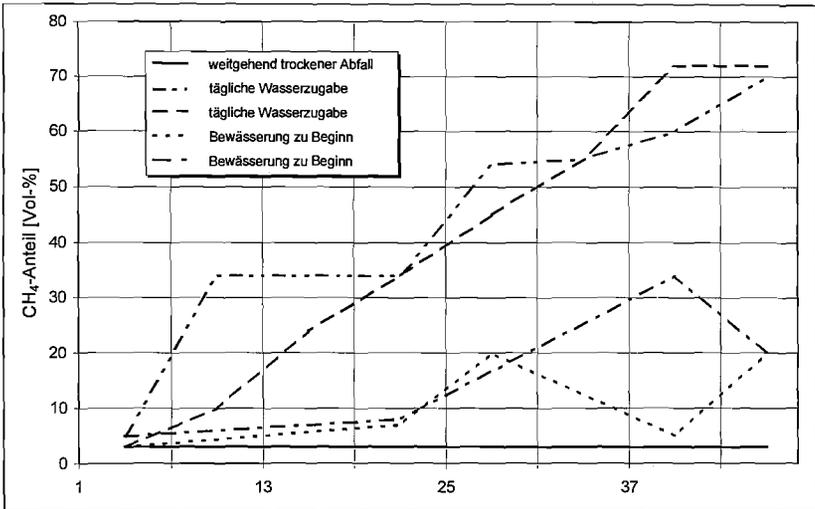


Abbildung 2: Einfluß der Versorgung mit Wasser auf die Methankonzentrationen im Deponiegas (LECKIE ET AL. 1979)

Über die Bewegung des Wassers im Deponiekörper bestehen nur geringe Erkenntnisse. In Anlehnung an die Bodenkunde werden das von der Schwerkraft abhängige und frei bewegliche Sickerwasser, das Haftwasser, welches als Adsorptions- und Kapillarwasser nur bedingt an der Wasserbewegung teilnimmt, sowie das gebundene Wasser unterschieden. Aus Untersuchungen an Siedlungsabfalldeponien ist bekannt, daß Wasser in einer Deponie nicht gleichmäßig verteilt vorkommt. Vor allem durch den flächigen und verdichteten Einbau der Abfälle entsteht eine horizontale Schichtung im Deponiekörper, die zu einer gegenüber der vertikalen deutlich erhöhten horizontalen Wasserwegsamkeit führt. Durch Abfallbestandteile wie beispielsweise Kunststoffolien wird dieser Effekt noch verstärkt. Die Ausbildung von wasserstauenden Horizonten konnte bei zahlreichen Aufgrabungen und Bohrungen beobachtet werden.

Neben der Art der Abfälle und dem Einbau beeinflussen auch die biochemischen Umsetzungsprozesse die Bewegung von Wasser im Deponiekörper. Durch die mikrobielle Zersetzung werden die Korngrößenverteilung und die Gefügestruktur verändert. Ferner kann es zu einer Behinderung der gegensätzlich ausgerichteten, konvektiven Wasser- und Gastransportprozesse im räumlich begrenzten Porenraum kommen. STEGMANN ET AL. (1982) berichten über sogenannten virtuelle

Wasserstände bei Säulenversuchen, bedingt durch den Ausgleich von Wasser- und Gasdruck in den Poren. Der daraus resultierende Stillstand der freien Wasserfront wurde durch eine Veränderung der Druckbedingungen, z. B. durch die weitere Produktion von Gas oder die Erhöhung des angelegten Unterdrucks zur Gasabsaugung, aufgehalten.

Darüber hinaus bilden sich durch lokal unterschiedlich starke Setzungen sowie wasserleitende Bereiche aber auch ausgeprägte Sickerpfade im Deponiekörper aus. Neben Hohlräumen erweisen sich dabei sowohl die Abfälle als vor allem auch vertikale und horizontale Elemente von Gasdrainagen als gute Wasserleiter.

3 Infiltrationssysteme

3.1 Geplante und realisierte Systeme

Im folgenden werden auf Siedlungsabfalldéponien geplante und realisierte Infiltrationssysteme dargestellt und erläutert. Die auf Grundlage einer Erhebung unter Betreibern, Behörden und Ingenieurbüros basierenden Ergebnisse können infolge der vor allem in der letzten Zeit zunehmend zahlreicher werdenden Planungen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Bei der Auswertung der Erhebung zeigte sich, daß die auf verschiedenen Déponien geplanten und realisierten Infiltrationssysteme sich im Hinblick auf die technische Ausführung in wenige Gruppen gliedern lassen. Unterschiede waren dagegen vor allem beim Betrieb der Anlagen sowie der Motivation zur Installation eines entsprechenden Systems festzustellen.

3.1.1 Déponie A

Auf der Déponie A wurden seit 1983 Siedlungsabfälle und Klärschlamm unbehandelt abgelagert. Bislang wurden auf drei Abschnitten mit einer Fläche von ca. 6,2 ha rund 410.000 Mg Abfälle eingebaut; die Schütthöhe der Déponie beträgt 7 bis 9 m. Die Abschnitte 1 und 2 verfügen über eine zweilagige mineralische Basisabdichtung von 60 cm Stärke mit einer Durchlässigkeit von $k_f \leq 10^{-8}$ m/s. Auf den dritten Abschnitt wurde 1996 ebenfalls eine Oberflächenabdeckung aufgebracht. Dieser Abschnitt verfügt über eine Kombinationsabdichtung an der Basis (mineralische Dichtung: 75 cm, $k_f \leq 10^{-9}$ m/s, HDPE-Dichtung: $d = 2,5$ mm; 40 cm mächtiger Flächenfilter mit Kies 16/32). Der Aufbau der mineralischen Oberflä-

chenabdichtung mit einer geringen Durchlässigkeit von $k_f = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s stellt sich wie folgt dar (Abbildung 3).

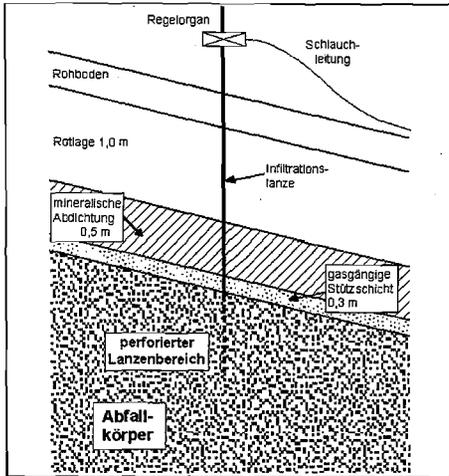


Abbildung 3: Oberflächenabdichtungs- und Infiltrationssystem auf der Deponie A

Die Deponie A verfügt in allen Bereichen über ein System zur Sammlung und Ableitung des Sickerwassers.

Auf der Deponie A wurden bislang zwei verschiedene Systeme installiert. Aus einem Altabschnitt wurden vertikale Lanzen nachträglich durch die bestehende Oberflächenabdeckung hindurch zur Bewässerung eingebaut. Bei einem weiteren Abschnitt wurde gemeinsam mit der Aufbringung der Oberflächenabdeckung ein System aus Rigolen installiert.

Lanzensystem

Aufgrund des Rückgangs der Gasproduktion in einem Abschnitt wurde beschlossen, zwei abgedichtete Versuchsfelder zur Ermittlung des Einflusses der Zugabe von Sickerwasser einzurichten, da der Rückgang auf die erhöhte Dichtheit der Oberflächenabdeckung und die daraus resultierende unterbrochene Wasserversorgung zurückgeführt wurde. Im Versuchsfeld wurden 39 Lanzen aus Stahlrohr zur Einbringung des Sickerwassers durch die Oberflächenabdeckung bis zu einer Tiefe von ca. 1 bis 2 m in den Deponiekörper gerammt. Die Rohre sind am unteren Ende perforiert (Lochdurchmesser ca. 10 mm). Durch die Einleitung in die

Filterschicht bzw. den Abfall wurde eine flächige Verteilung des Wassers angestrebt (Abbildung 3). Darüber hinaus wurden zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Verteilung der Infiltrationswassermengen und vor allem zur Kontrolle aller Lanzen mit einem Regelsystem aus Ventil und Wasseruhr versehen. Die Ausführung der Anschlüsse der Lanzen erfolgte gasdicht.

Primäres Ziel der Infiltration auf der Deponie A war die Steigerung des Wassergehalts im Deponiekörper von im Mittel rund 25 auf etwa 40 %. Mit Hilfe des zusätzlich in den Deponiekörper geleiteten Wassers sollte die Versorgung der Abfälle mit Wasser sichergestellt werden und die Gasproduktion wieder ansteigen. Die Ermittlung der zu infiltrierenden Wassermengen erfolgte anhand des mittleren Trockenrückstands, welcher mit Hilfe von mehreren, aus dem Deponiekörper entnommenen Bohrproben ermittelt wurde. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Probenahme sowie der grundsätzlichen Heterogenität der gezogenen Proben traten dabei vergleichsweise große Schwankungen bei den Meßwerten auf.

Zur Erhöhung des Wassergehalts sollten dem Versuchsabschnitt rund 245 kg Wasser pro m³ Abfall zugeführt werden. Dies entspricht 3480 m³ bzw. einem flächenbezogenen Wert von rund 1.715 mm. Aufgrund von versuchstechnischen Problemen wurden zwischen März 1994 und Mai 1995 insgesamt jedoch nur etwa 2.300 m³ respektive 1.135 mm über einen Zeitraum von etwa 11 Monaten eingebracht. Damit ergab sich eine durchschnittliche Aufbringungsmenge von ca. 3,3 mm/d bzw. bei Berücksichtigung der rund 14.200 Mg an abgelagertem Abfall ca. 0,48 l/Mg d. Der Sickerwasseranfall, der für das Versuchs- und das Vergleichsfeld getrennt ermittelt wurde, erhöhte sich während des Versuchszeitraums nicht. Nach IA GMBH (1996) war dies vermutlich auf das vergleichsweise geringe Ablagerungsalter und die demzufolge noch nicht erschöpfte Speicherkapazität der Abfälle zurückzuführen.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde die Menge des infiltrierten Sickerwassers variiert auf 5 mm/(Betriebs-)d bzw. 0,7 l/Mg d. Dies entsprach bei 180 Betriebstagen pro Jahr einer flächenbezogenen Aufbringungsmenge von 882 mm/a.

Rigolensystem

Auf dem zwischenzeitlich verfüllten Bauabschnitt BA 3 wurde ebenfalls ein Infiltrationssystem installiert. Im Gegensatz zum Lanzensystem auf BA 2 wurde hier das System während des Baus in die Oberflächenabdeckung integriert. Es besteht

aus zwei mit geringem Gefälle zu den Höhenlinien verlaufenden Schotter-Rigolen mit umliegendem Vlies, in welchen Drainagerohre DN 100 mit einer Länge von jeweils ca. 70 m zur Wasserverteilung eingebettet sind (IA GMBH 1998, KINDSMÜLLER 1998). Die Rigolen werden über Sickerwasserzischenspeicher aus HDPE beaufschlagt, deren Befüllung aus dem Sickerwasserspeicher der Deponie mit Hilfe von Füllstandsreglern erfolgt. Dabei wird die Befüllung der Behälter so gesteuert, daß jeweils das vollständige Volumen der Drainagerohre zwischengespeichert wird. Die Entleerung in die Rigolen erfolgt über elektrisch gesteuerte Schieberklappen.

Durch die Infiltration von Sickerwasser konnte die Gasproduktion im Versuchsfeld gegenüber dem Vergleichsfeld, welches über eine vergleichbare Oberflächenabdeckung verfügte, jedoch nicht bewässert wurde, um ca. den Faktor 3,7 gesteigert werden (IA GMBH 1998, KINDSMÜLLER 1998).

Der Beginn der Infiltration auf dem BA 3 verzögerte sich, da nach Aufbringung der Oberflächenabdeckung erhöhte Sauerstoffgehalte im Deponiegas festgestellt wurden. Nach IA GMBH (1998) war dies auf den unter der Abdeckung eingeschlossenen Sauerstoff zurückzuführen. Des weiteren mußte der Sickerwasseranfall des unbeeinflussten Zustands, d. h. die „Hintergrundbelastung“, ermittelt werden. Aufgrund von Problemen mit der Sickerwassermengenmessung sowie einem Anstieg der Sickerwassermengen nach Aufbringung der Abdeckung, der vermutlich auf Konsolidierungsvorgänge zurückzuführen ist, verzögerte sich die Inbetriebnahme des Systems bis zum September 1998, so daß derzeit noch keine fundierten Aussagen über die Auswirkungen dieser Maßnahme getroffen werden können.

3.1.2 Deponie B

Die Deponie B, auf der seit 1977 etwa 5,9 Mio. m³ Siedlungsabfälle abgelagert wurden, ist von einer Dichtwand umgeben. Innerhalb dieses Dichtwandtopfes wurde der Wasserspiegel um ca. 1,0 m gegenüber dem Außenwasserspiegel bzw. 0,3 m gegenüber dem 2. Aquifer abgesenkt, um aufgrund des Druckgefälles eine nach innen gerichtete Strömung zu erzielen. Dazu wurde bereits seit 1991 Wasser abgepumpt und auf den begrünten Deponiebereichen wieder versickert. Trotz des gegenüber dem Untergrund ohne besondere Sicherungsmaßnahmen ausgestatteten Altteils - der Neuteil verfügt über eine Kombinationsdichtung auf der Basis bzw. an der Böschung - wurden bislang noch keine Auffälligkeiten im

Grundwasser festgestellt. Dies wird auf die minimierte Sickerwasserneubildung infolge der geringen Niederschlagsmengen von nur rund 400 mm/a (Jahresmittel der letzten 30 Jahre) zurückgeführt.

Mit der Aufbringung des Oberflächenabdichtungssystems wurde 1987/88 begonnen. Die Deponieoberfläche von ca. 20,3 ha ist derzeit zu etwa 60 % mit dem in Abbildung 5 schematisch dargestellten Abdichtungssystem versehen. Kontrollmessungen mit dem FID ergaben, daß das System gegenüber einem Austritt von Gas ausreichend undurchlässig ist.

Nach Aufbringung der Oberflächenabdichtung zeigte sich ein gegenüber der Prognose übermäßig starker Rückgang der Gasproduktion um ca. 70 %. Die Gasqualität verbesserte sich dagegen infolge des von ca. 3,4 auf 1,3 Vol.-% verminderten Sauerstoffanteils. Während dieser Effekt unmittelbar auf die Aufbringung der Abdichtung zurückgeführt werden kann, läßt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt im Hinblick auf die Gasmengen noch kein unmittelbarer Zusammenhang ableiten, wenngleich er jedoch zu vermuten ist.

Um die Gasproduktion langfristig zu gewährleisten, wurde die bereits abgedeckte Deponieoberfläche zur flächigen Bewässerung in mehrere Felder eingeteilt. Mit Hilfe eines fischgrätenartig angeordneten Drainagesystems (Abbildung 4), welches aus HDPE-Rohren (20 x 1,9 PN 10 mit 1 mm Lochbohrung) besteht (Abbildung 5, Abbildung 6), wird Wasser aus dem Dichtwandtopf entnommen und verteilt. Das System dient gleichzeitig der Entgasung der Deponie unter der Abdichtungsschicht.

Die infiltrierten Wassermengen - verwendet wurde bisher nur schwach belastetes Wasser aus dem Dichtwandtopf - betragen 1996 150 mm/a und wurden verteilt auf mehrere Einzelgaben zu ca. 30 mm aufgebracht. Das Wasser wurde mit Hilfe eines Gewebefilters zur Schonung des Infiltrationssystems „vorgereinigt“ (Elimination von Schwebstoffen). 1998 wurden die infiltrierten Wassermengen mit 500 mm auf einigen Feldern gegenüber den vorangegangenen Versuchen deutlich erhöht. Die restlichen Felder wurden dagegen nur mit 45 mm beaufschlagt.

Nach Angaben von SCHODER (1997) war am Beispiel mehrerer Gasbrunnen infolge der Zuführung von Wasser unter das Abdichtungssystem ein - wenn auch zeitverzögerter - Anstieg der Gasproduktion festzustellen. Die Gasproduktion erhöhte sich gegenüber dem Zeitraum vor der Infiltration um 30 bis 45 %. Inzwischen ist

jedoch eine systematische Abhängigkeit zwischen aufgebrachtter Wassermenge und Gasproduktion nicht feststellbar. Als problematisch erwies sich dabei insbesondere die horizontale Gasdrainage, welche die Ermittlung bzw. Zuordnung der je Feld produzierten Gasmengen erheblich erschwert.

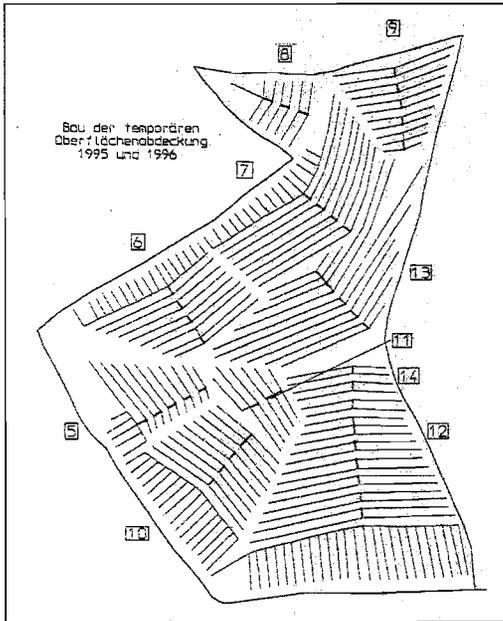


Abbildung 4: Anordnung des Infiltrationssystems auf der Deponie B

Systemschnitt

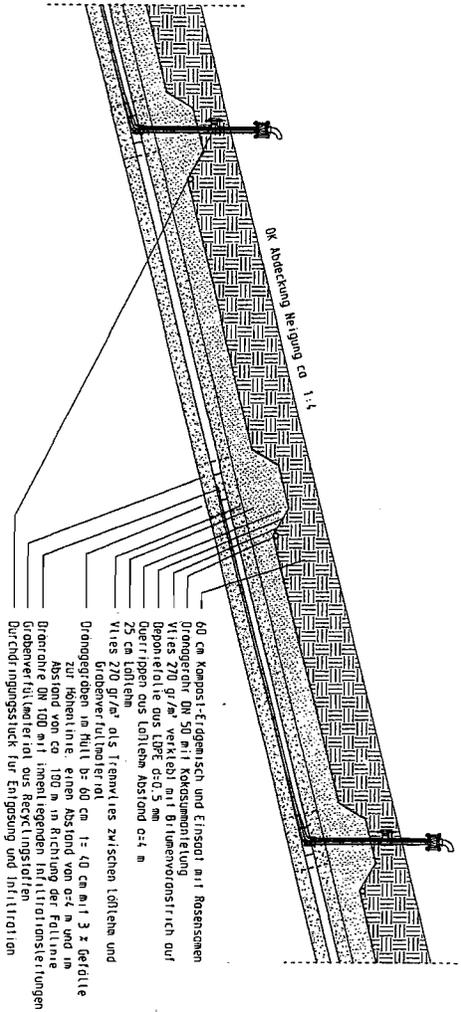


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Oberflächenabdichtung mit dem Infiltrationssystem der Deponie B

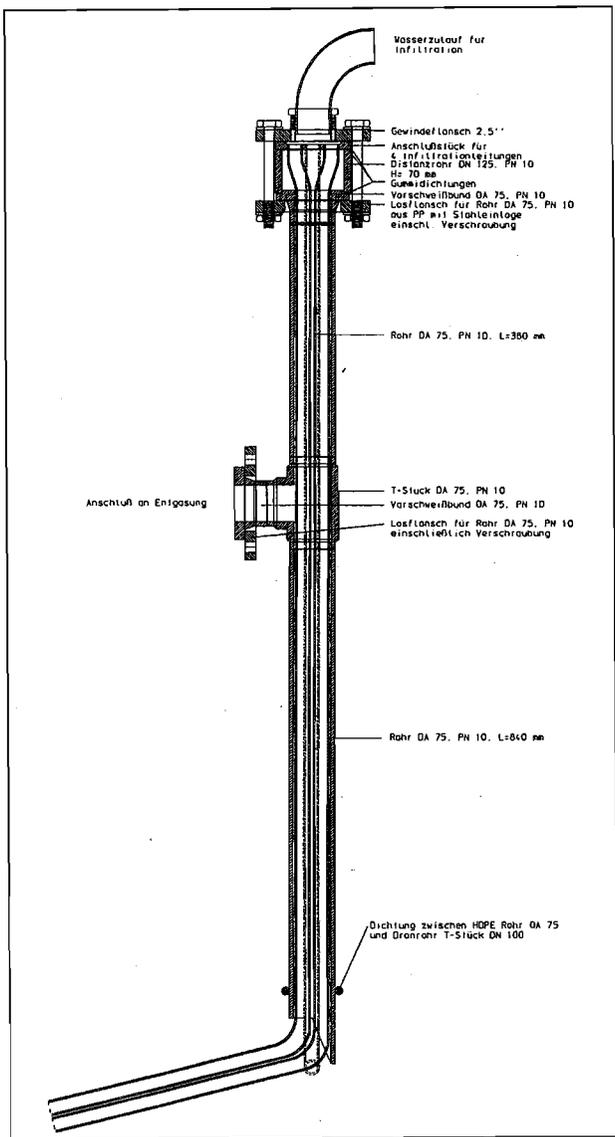


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Infiltrationssystems der Deponie B

3.1.3 Deponie C

Die Deponie C beinhaltet ein Verfüllvolumen von rund 6 Mio. m³ bei einer Fläche von ca. 55 ha. Sie verfügt über eine mineralische Basisabdichtung (UBA 1993). Aufgrund von Geruchsproblemen wurde nach verschiedenen provisorischen Zwischenabdeckungen sowie einer Entgasung 1996 ein wesentlicher Teil der Deponie nach Erreichen der vorgesehenen Endhöhe mit einer mineralischen Oberflächenabdichtung versehen. Da der sich daraufhin ergebende starke Rückgang der Gasmengen auf die Abdichtungsmaßnahme zurückgeführt wurde, wurden Versuche zur gezielten Bewässerung der Deponie geplant und durchgeführt.

Das auf der Deponie C realisierte Infiltrationssystem besteht aus Bewässerungsschläuchen aus HDPE (Ø 2,5 cm) mit eingesetzten Tropfern. Die Zuleitung des Wassers wird über Pumpen, Ventile und eine elektronische Regelung gesteuert. Die Untersuchungen wurden auf zwei Feldern durchgeführt, auf denen das System in unterschiedlicher Dichte verlegt wurde. Der Abstand der Bewässerungsschläuche betrug 20 bzw. 2 m bei Schlauchlängen von 40 bzw. 200 m. Die Tropfer waren in einem Abstand von rund 1 m angebracht. Da die Bestimmung des Wassergehalts in diesem Fall als nur schwer möglich angesehen wurde, sollte im Rahmen der Versuche zunächst die Hälfte des Jahresniederschlags zugeführt werden. Dazu wurden Wassermengen zwischen 4 und 2 l/h · lfm aufgebracht. Der im System aufgebrauchte Wasserdruck betrug ca. 2 bar. Die zugeführte, spezifische Wassermenge von rund 0,4 l/m² · d entsprach ca. 14 bis 15 % des Jahresniederschlags von 985 mm. Aufgrund des Einsatzes von vorbehandeltem, schwebstoffarmem Grundwasser traten bislang keine Störungen wie Verstopfungen etc. auf (GIBIS 1997).

In einem zweiten Bewässerungsversuch wurden 1997 drei weitere Testfelder eingerichtet. Die Einzelflächen betragen 7.500 und zweimal 6.000 m². Auf den ersten beiden Feldern wurden Brunnen- und Oberflächenwasser in die horizontale Gasdrainageschicht in stark unterschiedlichen Mengen eingeleitet (0,48 mm/d und 11 mm/d), da sich beim ersten Versuch gezeigt hatte, daß ein großer Teil des eingebrachten Wassers infolge der in der horizontalen Gasdrainageschicht stark erhöhten Wasserwegsamkeit nicht in den Deponiekörper gelangte. In das dritte Feld wurde Niederschlagswasser infiltriert, welches in Speicherbecken gesammelt und

über mit einer speziellen Syphonkonstruktion versehene Schluckbrunnen eingeleitet wurde (2,7 mm/d).

Beim ersten Versuch war hinsichtlich der Gasmengen und -zusammensetzung aufgrund der Versuchsdauer von nur 156 Tagen kein Einfluß der Sickerwasser-rückführung auf die Gasproduktion festzustellen. Auch bei der Beschaffenheit des Sickerwassers war nach Abschluß der Versuche keine Veränderung erkennbar. Dies wurde auf die geringen Anteile zurückgeführt, die aufgrund der guten Wasserwegsamkeit der Drainageschicht auch wirklich in den Deponiekörper gelangten. Darüber hinaus war die Speicherkapazität des Abschnitts und die daraus resultierende Wasserrückhaltefähigkeit vermutlich noch nicht erschöpft.

3.1.4 Deponie D

Auf der Deponie D wurden in der Zeit zwischen 1960 und 1990 rund 15 Mio. m³ für Siedlungsabfälle auf einer Fläche von etwa 40 ha abgelagert. Im Anschluß an die Verfüllung wurde eine mineralische Oberflächenabdichtung mit einem Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 10^{-10} - 10^{-11}$ m/s aufgebracht. Die Gasfassung erfolgt mit Hilfe von 95 vertikalen Gasbrunnen und 42 vertikale Fassungelementen.

Auf der Deponie D wurden aufgrund der zu geringen Gasproduktion bislang drei Bewässerungsversuche auf Feldern mit Flächen von 6.000 bis 20.000 m² durchgeführt.

Auf dem ca. 6.000 m² umfassenden Versuchsfeld wurden 20 bis 30 m³/d Sickerwasser - das entspricht rund 3,3 bis 5 mm/d - an fünf Tagen in der Woche über Rigolen auf dem Versuchsfeld aufgebracht (RYTEC 1997). In einem zweiten Versuch wurden vertikale Gasbrunnen für die Infiltration genutzt. Über die hierbei infiltrierten Wassermengen liegen keine Informationen vor. Für den bislang letzten Versuch wurden 36 Lanzen auf einer Fläche von rund 20.000 m² ca. 2 m in die Deponie gerammt. Auch hier sollen etwa 20 m³/d infiltriert werden (1 mm/d).

Die Überprüfung der Auswirkungen der Bewässerung erfolgte während des ersten Versuchs mit Hilfe eines umfangreichen Gasmeßprogramms. Im Rahmen der Vorversuche zur Ermittlung des Ausgangszustands wurden die Gaszusammensetzung (CH₄, CO₂, O₂, N₂), die Gasmengen, die Druckverhältnisse in den Brunnen und der Umgebung sowie Betriebsparameter des Verdichters erfaßt und ausgewertet. Dabei wurden Schwankungsbreiten um den Faktor 2 - 3 festgestellt. Ein

positiver Einfluß der Bewässerung wäre also erst dann gegeben, wenn die Steigerung des Gasertrags deutlich über diesem Wert läge. Der erste Versuch auf der Deponie D ließ keine Aussagen über die Auswirkung der Bewässerung zu, da der zuvor erläuterte Schwankungsbereich nicht übertroffen werden konnte.

Über die Effektivität des zweiten Versuchs liegen keine Informationen vor. Der dritten Versuch läuft erst seit kurzem und läßt ebenfalls noch keine Rückschlüsse auf die Auswirkungen zu.

3.1.5 Deponie E

Auf der Deponie E wurde im Sommer 1998 auf dem Altteil ein Infiltrationssystem installiert (GUGGEMOS 1998, IA GMBH 1998). Der Altteil, der über eine mineralische Basisabdichtung verfügt, befindet sich in einer ehemaligen Kiesgrube und wurde zwischen 1982 und 1993 mit rund 480.000 m³ Abfällen verfüllt. Nach Betriebsende wurde die Oberfläche mit einem mit Bitumen bespritzten Geotextil abgedeckt. Unmittelbar im Anschluß an die Abdeckung war zunächst ein Anstieg der Gasproduktion feststellbar. Es ist zu vermuten, daß dieser Umstand durch die gegenüber der unbedeckten Deponie erhöhte Erfassungsrates bedingt war. Im Anschluß daran lagen die erfaßten Gasmengen deutlich unter den Mengen, die ohne Berücksichtigung der Abdeckung prognostiziert wurden. Als Folge davon wurde die Gasnutzungsanlage wieder außer Betrieb genommen und das Deponiegas über eine Fackel entsorgt. Mit dem Betrieb des nachfolgend beschriebenen Infiltrationssystems soll nach Aussage des Betreibers für eine Reduzierung des Emissionspotentials während der Zeiträume gesorgt werden, in denen die Deponie noch der Überwachung unterliegt. Darüber hinaus wird mit dem Einsatz von Rohsickerwasser die zu behandelnde Sickerwassermenge minimiert, welche derzeit noch in einer kommunalen Kläranlage mitbehandelt wird.

Das Infiltrationssystem erfaßt eine Fläche von ca. 2,5 ha und besteht aus insgesamt 5 Lanzen sowie einer im Böschungsbereich angelegten Rigole. Aufgrund der Verlegung der Rigole im Böschungsbereich mit einer Neigung von 1:2 wurde ein Standsicherheitsnachweis erforderlich. Das System entspricht weitgehend dem der Deponie A. Im Gegensatz hierzu wurden bei der Deponie E allerdings die wasserführenden Leitungen zwischen den Speichern und den einzelnen Infiltrationspunkten frostsicher in die Oberflächenabdeckung integriert. Damit besteht die Möglichkeit eines witterungsunabhängigen Ganzjahresbetriebs. Über die Infiltrati-

onsmengen liegen keine Informationen vor, da erst Ende 1998 mit der Inbetriebnahme begonnen werden soll.

Da die Inbetriebnahme erst für Ende 1998 vorgesehen war, liegen noch keine Erfahrungen über die Auswirkungen der Infiltrationsmaßnahme auf Gasproduktion, Sickerwasseranfall etc. vor.

3.1.6 Deponie F

Die Deponie F mit einem Gesamtvolumen von 1,2 Mio. m³ wurde in Zeiten der Deponieraumknappheit ausgehoben und 1989 in Betrieb genommen. Die insgesamt eine Fläche von rund 10 ha umfassende Grubendeponie ist mit einer mineralischen Basisabdichtung sowie einem Sickerwassersammelsystem versehen. Das Sickerwasser wird in einer kommunalen Kläranlage mitbehandelt. Das entstehende Deponiegas wird über vertikale (Gasbrunnen) und horizontale Fassungselemente (Rigolen) abgesaugt und derzeit über eine Fackel entsorgt. Die früher erfolgte Nutzung des Gases über einen Gasmotor mußte aufgrund von Betriebsstörungen infolge siliziumorganischer Verbindungen eingestellt werden. Ein Bereich der Deponie, der mit ca. 600.000 m³ verdichteten und zerkleinerten Abfällen verfüllt war, wurde vor ca. 3 Jahren mit einer Oberflächenabdichtung aus Bentonitmatten sowie einem jeweils ca. 40 cm mächtigen Ober- und Unterbau versehen.

Ziel der Infiltration ist die Steigerung der Gasproduktion sowie die Minimierung des zu behandelnden Sickerwassers, wobei eine Zunahme des Sickerwasseranfalls bzw. eine Kreislaufführung des Sickerwassers auszuschließen sind. Das Infiltrationssystem besteht aus 16 Infiltrationslanzen, welche die Oberflächenabdeckung durchdringen und in Bohrungen (\varnothing ca. 100 mm) rund 2 m in den Abfallkörper hineinreichen. An der Oberfläche wurden die Bohrungen mit quellfähigem Material abgedichtet. Die Versorgung der Lanzen erfolgt derzeit noch über fliegende Leitungen aus PE. Es bestehen allerdings Überlegungen, diese für einen möglichen Winterbetrieb umzurüsten. Die infiltrierte Fläche umfaßt im unmittelbaren Infiltrationsbereich ca. 1.600 m².

Mit der Infiltration auf der Deponie F wurde Mitte 1998 begonnen. Als Infiltrationsmedium kommt Rohsickerwasser zum Einsatz, das über einen Tankwagen und eine Pumpe mit Drücken bis zu 4 bar auf die einzelnen Lanzen verteilt wird. Bislang war allerdings nur an einer Stelle ein Infiltrationswiderstand auf dem Ma-

nometer ablesbar, die sich an jeder einzelnen Lanze befinden. Zur Abscheidung von Schwebstoffen aus dem Sickerwasser dient ein Einfachfilter. Derzeit werden rund 30 - 40 m³ je Woche bzw. 0,5 - 0,7 m³ je Lanze und Arbeitstag aufgebracht. Unter Berücksichtigung der unmittelbaren Infiltrationsfläche von 1.600 m² entspricht dies einer Beaufschlagung von 5 - 7 mm/d bzw. 975 - 1.300 mm/a.

Anhand der Aufzeichnungen zeigte sich, daß sich die Gasproduktion zum einen von ca. 130 auf rund 180 m³/h steigerte und zum anderen im Hinblick auf die Mengen deutlich stabiler ist.

3.1.7 Deponie G

Die Deponie G wird seit 1981 als Haldendeponie betrieben. Sie verfügt über eine mineralische Basisabdichtung, die aus einer 50 cm mächtigen Lehmschicht mit einer Durchlässigkeit von 10⁻¹¹ m/s (Laborwert) besteht. Darüber befindet sich eine als Flächenkiesfilter ausgebildete Drainageschicht mit Entwässerungsrohren aus PVC (DN 100). Darüber hinaus wurden im Randbereich der Deponie Stichleitungen zur Sickerwasserfassung verlegt, da die Funktionstüchtigkeit der ursprünglichen Fassungselemente vermutlich nicht mehr gewährleistet ist. Die Gasfassung erfolgt über 18 vertikale Brunnen, die sowohl nachträglich abgeteufelt wurden (1989) als auch mit entsprechend dem Fortschreiten der Deponiehöhe mit hochgezogen wurden. Das gefaßte Deponiegas wird verstromt.

Das auf einer Fläche von insgesamt ca. 1,3 bis 1,5 ha auf der Deponie G installierte Infiltrationssystem besteht aus 23 Schluckbrunnen mit einem Volumen von 8 m³, die aus Betonschachtringen ohne Gründung unmittelbar in den Abfall eingelassen wurden. Als Infiltrationsmedium kommt vorgereinigtes Sickerwasser zum Einsatz. Nach Aussage des Betreibers hat sich der Einsatz des nur über eine Aktivkohle-Stufe gereinigten Wassers gegenüber unbehandeltem Rohsickerwasser aufgrund der verminderten Schwermetallgehalte bewährt. Täglich werden rund 64 m³ über jeweils 8 Schluckbrunnen (mit einer theoretischen Einflußfläche von je 500 m²) aufgebracht. Dies entspricht einer flächenbezogenen Infiltrationsmenge von insgesamt ca. 5,3 mm/d.

Durch die Infiltration konnte nach Auskunft des Betreibers die Betriebszeit des Motors von 20 h/Woche auf 120 h/Woche um 500 % und damit proportional auch die Gasmenge gesteigert werden.

3.1.8 Deponie H

Die Deponie H umfaßt ein Gesamtvolumen von 6,3 Mio. m³ auf einer Fläche von 56 ha. Die mit einer Basisabdichtung ausgestattete Deponie wurde an der Oberfläche mit einer Kunststoffdichtungsbahn (d = 1,5 - 2 mm) abgedichtet, die auf einem 10 - 20 cm mächtigen Planum aufliegt. Im infiltrierten Bereich wurden in der Zeit zwischen 1989 und 1993 etwa 300.000 m³ bzw. Mg Abfälle auf einer Fläche von 30.000 m² abgelagert.

Das Infiltrationssystem besteht aus insgesamt 24 abgedeckten Schluckbrunnen, die ca. 3 m tief in den Abfallkörper eingebaut wurden. Die Brunnen verfügen über eine Grundfläche von 4 m² und sind nicht mit Schotter verfüllt. Damit besteht die Möglichkeit, bei Problemen (z. B. nachlassender Infiltrationsleistung) den Brunnen einfach reparieren zu können. Die Versorgung der Brunnen mit Sickerwasser erfolgt über PE-Zuleitungen (d = 1,5") aus einem Speicherbehälter. Ein Winterbetrieb ist nicht vorgesehen (TIEBEL-PAHLKE 1998).

Seit Inbetriebnahme des Systems wurden insgesamt etwa 10.000 m³ in 180 Tagen infiltriert. Bezogen auf die Fläche bzw. die Abfallmenge wurden dabei maximal 5 mm/d bzw. 0,5 l/Mg d infiltriert.

Die Auswirkung der Infiltration ist aufgrund des geringen Restgaspotentials, das mit Hilfe von Gärtests ermittelt wurde, schwer abzuschätzen. Das Restgaspotential lag dabei mit 5 bis 10 l/kg TR im Bereich der Werte, die von KABBE ET AL. (1997) an Abfallproben aus Altablagerungen und Altdeponien entnommen wurden. Ein Einfluß auf die Sickerwasserbeschaffenheit war bislang im Hinblick auf den CSB nicht feststellbar. Dagegen konnte durch anhand der Leitfähigkeit eine leichte Aufsalzung festgestellt werden (TIEBEL-PAHLKE 1998).

3.1.9 Deponie I

Die Deponie I, die seit 1975 mit Siedlungsabfällen verfüllt wird, umfaßt ein Volumen von 2,2 Mio. m³ und eine Fläche von rund 14,1 ha (UBA 1993). Die Deponie verfügt über eine Basisabdichtung, die bereichsweise als mineralische und als Kombinationsdichtung ausgebildet ist. Für die Deponie ist die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung (2-lagige mineralische Abdichtung) aufgrund des Bescheids der Genehmigungsbehörde vorgegeben. Da bei vergleichbaren Fällen aufgrund der unterbrochenen Wasserversorgung die Gasproduktion beeinträchtigt

war und dies hier vermieden werden soll, ist die prophylaktische Integration eines Infiltrationssystems in die Oberflächenabdichtung geplant.

Dazu wurde auf einem ca. 40.000 m² großen Bereich der Deponie ein Infiltrationssystem installiert, das trotz unterschiedlicher Gefälle- bzw. Steigungsverhältnisse eine annähernd gleichmäßige Verteilung des Wassers an nahezu jedem Punkt der Leitungsstränge zuläßt. Das System besteht aus einem Drainagerohr mit einem innenliegendem Wasserverteilungsschlauch, der als Tropfersystem ausgebildet ist. Durch die Ausbildung des Wasserverteilungsschlauchs als Druckleitung mit einem vergleichsweise hohen Wasserdruck wird der Einfluß der gefälleabhängigen Fließvorgänge vernachlässigbar klein ($h_p \gg h_v$). Über die gefälleunabhängige Wasserverteilung hinaus wird sich vermutlich die gegenüber einem Ein-Rohr-System (z. B. Deponie C) verbesserte Reparierbarkeit des Tropfersystems bei Schadensfällen (Verstopfungen etc.) sowie der erhöhte Schutz gegen unmittelbare mechanische Beanspruchungen als vorteilhaft erweisen. Das Infiltrationssystem wurde unterhalb der mineralischen Deckschicht und über der Ausgleichsschicht (Planum für die Oberflächenabdichtung) in der flächig ausgebildeten Gasdrainageschicht installiert. Die Verteilung des Wassers soll von einem Hochpunkt, auf dem mehrere Speicherschächte angelegt wurden, fächerförmig über das gesamte Areal der Deponie erfolgen. Die maximale Länge der Stränge beträgt 150 bis 200 m. Die Wartung und nachträgliche Reparatur bzw. Ergänzung des unter der Abdichtung befindlichen und damit nur sehr schwer zugänglichen Systems wird dadurch gewährleistet, daß die Drainageleitungen und damit auch die Tropfschläuche aus HDPE an beiden Seiten von der Oberfläche her erreichbar sind.

Das System soll 1999 in Betrieb genommen werden. Als Infiltrationsmedium ist Niederschlagswasser vorgesehen. Über die zu infiltrierenden Mengen liegen keine Informationen vor.

3.1.10 Deponie J

Die Deponie J, die seit 1972 mit Siedlungsabfällen verfüllt wird, umfaßt ein Volumen von rund 9 Mio. m³ auf einer Fläche von insgesamt ca. 86 ha. Durch die vorgesehene Aufbringung einer Oberflächenabdichtung wird befürchtet, daß die Produktion von Deponiegas und damit die (geplante) Gasverwertung beeinträchtigt wird. Aus diesem Grund ist auf einer Fläche von 14,2 ha ein Infiltrationssystem

wie auf der Deponie I geplant, das in die Ausgleichsschicht über dem Abfallkörper eingefräst werden soll.

Für die Infiltration stehen grundsätzlich Grundwasser, Oberflächenwasser oder Sickerwasser zur Verfügung. Als Infiltrationsmenge sind derzeit rund 50 bis 75 % der Jahresniederschlagsmenge von rund 500 mm/a vorgesehen. Aufgrund der als schwierig zu bezeichnenden Verhältnisse im Untergrund sowie bei der Basisabdichtung ist die Verwendung eines vorgereinigten Wassers in Mengen anzustreben, bei denen eine Sickerwasserneubildung nicht zu erwarten ist.

3.1.11 Deponie K

Die Deponie K umfaßt ein Gesamtvolumen von rund 3,2 Mio. m³ auf einer Fläche von ca. 40 ha (UBA 1993). Auf der profilierten Deponieoberfläche wurde eine Sandschicht von 30 cm Mächtigkeit sowie eine PE-Folie (d = 1,5 mm, verschweißt) aufgebracht. Aufgrund der deutlich unter der Prognose liegenden Gasproduktion wurde parallel zur Gasdrainage ein Infiltrationssystem eingebaut. Es besteht aus geschlitzten PE-Rohren DN 100, die 1 m unter der Endverfüllhöhe in mit Schotter gefüllten Gräben verlegt wurden. Die Wasserverteilung erfolgt über eine zentrale Verteilerstelle, von welcher aus Sickerwasser über die Freispiegelleitungen in den Deponiekörper eingetragen wird. Der Abstand der Rohre beträgt rund 30 m. Zwischen zwei Infiltrationsrohren befindet sich jeweils ein Gasdrainagerohr. Aufgrund des bislang nur sporadischen Einsatzes des Infiltrationssystems mit dem Hintergrund der Minimierung des zu behandelnden Sickerwassers liegen keine detaillierten Informationen über den Einfluß der Infiltration vor. Ein signifikanter Einfluß auf die Gasproduktion etc. konnte nach MÖLLENBERND (1997) jedoch nicht festgestellt werden. Eine intensive und geregelte Nutzung des Systems soll möglicherweise dann erfolgen, wenn das erfaßte Gas nicht mehr nur abgefakelt, sondern auch in einem BHKW genutzt werden soll.

3.1.12 Deponie L

Die Deponie L umfaßt ein Volumen von rund 3 Mio. m³ auf einer Fläche von ca. 22 ha (UBA 1993). In den an der Basis nicht abgedichteten Bereichen erfolgt die Sickerwasserfassung mit Hilfe von Pumpen. In den mit einer mineralischen Dichtung versehenen Bereichen wird das Sickerwasser über eine Drainage gefaßt. Der neueste Teil der Deponie verfügt über eine Kombinationsdichtung entsprechend der TA Siedlungsabfall (FRÖCHTENICHT 1997). Die mittlere Tiefe der Gru-

bendeponie beträgt rund 20 m. Als Oberflächenabdichtung wurde ein System aus einer 60 cm mächtigen Sandschicht, einer 3-lagigen Folie (d = 0,3 mm, Baufolie), welche bei einer Überlappung von jeweils rund 1 m nicht verschweißt ist, sowie eine ca. 60 cm starke Schicht aus Bewuchsboden aufgebracht. FID-Begehungen auf der abgedichteten Oberfläche ergaben keinen meßbaren Gasaustritt.

Aufgrund der trotzdem stark unter der Prognose liegenden Gasproduktion (nur ca. 50 % der Menge und geringer CH₄-Anteil) sowie bestehenden Lieferverpflichtungen für Gas wird Sickerwasser in den Deponiekörper infiltriert. Als Infiltrationssystem dienen drei nachträglich hergestellte, kegelförmige Schluckbrunnen aus Basaltschotter mit einer Tiefe von ca. 4 m und einem Durchmesser von rund 12 m. Die Verteilung des unbehandelten Sickerwassers zu den Schluckbrunnen (3 Brunnen auf ca. 25 ha) erfolgt mit Hilfe eines schiebergeregelten Rohr- und Pumpensystems. Die „Steuerung“ der Infiltration erfolgt (weitgehend nach Erfahrung) über die Parameter Gasmenge bzw. -zusammensetzung. Die aufzubringenden Mengen werden durch die Bedingung, daß kein Wasser in die vertikalen Gasabsaugbrunnen gelangen darf, limitiert.

3.1.13 Deponie M

Die seit 1978 betriebene Deponie M (3,4 Mio. m³; 19,4 ha) besteht aus drei Abschnitten, die über unterschiedlich ausgebildete Basisabdichtungssysteme verfügen (keine Abdichtung, mineralische Abdichtung, Konbinationsdichtung). Da früher keine Sickerwasserbehandlungsanlage vorhanden war, wurde das gesammelte Sickerwasser auf dem Deponiekörper verrieselt (SCHIRMER 1996). Dies war nach Aufbringung des Oberflächenabdichtungssystems nicht mehr zulässig. Aufgrund der zwischenzeitlich in Betrieb genommenen Sickerwasserbehandlungsanlage besteht dazu derzeit auch keine unmittelbare Notwendigkeit mehr. Zur Prophylaxe wurde ein Verteilungssystem in der Oberflächenabdichtung über dem kombinationsabgedichteten Bereich installiert, das aus einem Verteilungsbauwerk aus HDPE (Speicher) sowie sternförmig angeordneten, gelochten HDPE-Drainagerohren DN 125 besteht. Die Drainagerohre sind von einer Schotter-schicht (16/32) umgeben, um den Eintrag störender Stoffe etc. zu verhindern. Die Rohre sind darüber hinaus nicht von Abfall überlagert. Die Möglichkeit der Verlegung der Drainagerohre in einer horizontalen Gasdrainageschicht wurde aufgrund der Gefahr von Kurzschlußströmungen (Eindringen von Sauerstoff) nicht angewendet. Die nächst gelegene horizontale Gasfassung befindet sich rund 4 m unterhalb der Infiltrationsschicht. Die Speisung des Verteilerbauwerks aus HDPE,

das aus statischen Gründen nicht als Speicher dient, erfolgt durch nicht auf dem Deponiekörper selbst gelegene Pumpen. Mit Hilfe dieser Einrichtung besteht für den Fall, daß die Gasproduktion aufgrund der Oberflächenabdichtung zurückgeht - derzeit stimmen Ist-Zustand und Prognose noch sehr gut überein - eine Möglichkeit zur Unterstützung der Gasproduktion durch Infiltration von (Sicker-)Wasser.

Aufgrund der ursprünglichen Zielsetzung - Minimierung der zu behandelnden Sickerwassermengen - wurde im Rahmen der früher betriebenen Sickerwasserkreislaufführung kein Einfluß auf die Gasbildung beobachtet (REUTER 1997).

3.1.14 Deponie N

Die Deponie N wurde bis 1993 mit Siedlungsabfällen befüllt. Sie umfaßt ein Volumen von rund 1,6 Mio. m³ und hat eine Ausdehnung von ca. 8,5 ha (UBA 1993). Seit 1988 ist auf der Deponie ein System zur Fassung und Verwertung des anfallenden Deponiegases installiert. Zur Minimierung des Sickerwasseranfalls von ursprünglich rund 100 m³/d wurde in der Zeit zwischen 1990 und 1995 eine mineralische Oberflächenabdichtung von 0,6 m Mächtigkeit und einer Durchlässigkeit von $k_f = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s aufgebracht (SASSE 1997). In diese Dichtung wurde zur Verringerung der zu behandelnden Sickerwassermengen bzw. -behandlungskosten ein System aus mit Filterkies und geschlitzten HDPE-Drainagerohren verfüllten Gräben installiert, das an eine Ringleitung zur Verteilung des Sickerwassers angeschlossen ist. Die einzelnen Stränge mit einer maximalen Länge von ca. 150 m verfügen über mehrere seitliche Zuleitungen sowie Schieber, um eine Verteilung des Wassers zu erreichen. Mit Hilfe dieser Anordnung kann der Inhalt des derzeit vorhandenen Pumpensumpfes von ca. 3,5 m³ unterschiedlichen Stellen der Deponie zugeführt werden. Eine gleichmäßige Infiltration des Wassers ist mit Hilfe dieses Systems jedoch nicht zu erreichen.

Seit Frühjahr 1996 ist auf der Deponie N eine rückläufige Gasproduktion zu beobachten. Bislang lassen sich aufgrund der ursprünglichen Zielsetzung (Minimierung der zu behandelnden Sickerwassermengen) sowie der unregelmäßigen Durchführung der Bewässerung keine Aussagen über absolute oder spezifische infiltrierte Mengen sowie die Auswirkung der Maßnahme auf die Gasproduktion treffen.

3.1.15 Deponie O

Die Deponie O, welche in einer alten Erztagebaugrube errichtet wurde, stellt im

Hinblick auf den Eintrag von Wasser in den Deponiekörper einen Sonderfall dar. Der Altteil der Deponie wurde von 1973 bis 1992 mit ca. 5,5 Mio. Mg Siedlungsabfällen verfüllt. Die gesamte Ablagerungsfläche betrug etwa 10,3 ha. Da die Deponie über keine Abdichtung gegenüber dem Untergrund verfügt und sich zudem im Bereich des Grundwassers befindet, wurde sie mit einer Zwischenabdichtung in Anlehnung an die TA Siedlungsabfall versehen. Um eine Beeinträchtigung der Beschaffenheit des Grundwassers zu verhindern, ist eine Wasserhaltung erforderlich. Zur Reduzierung des Emissionspotentials der Deponie durch Auslaugung und Förderung der biochemischen Abbauprozesse wurde darüber hinaus die Infiltration zusätzlicher Wassermengen in den Deponiekörper vorgesehen.

Die Infiltration des Mischwassers erfolgt über eine unterhalb der Zwischenabdeckung liegende, 40 cm mächtige Schicht aus Kies (16/64 mm), welche auf dem profilierten Planum der alten Ablagerung mit einem Gefälle von 1,5 % aufgebracht wurde (DAMIECKI ET AL. 1989). In dieser Schicht liegen quer zum Gefälle einseitig gelochte Sickerrohre mit einem Lochabstand von 1 m und Lochdurchmessern von 15 - 25 mm. Mit diesem System sollten rund 130.000 m³/a intervallartig infiltriert werden. Diese Wasserzugabe, die etwa einer Niederschlagsmenge von ca. 1.640 mm/a entspricht, übertrifft die natürliche Jahresniederschlagsmenge am Standort von rund 700 mm/a um mehr als 130 % und sollte vorwiegend die Minimierung des Emissionspotentials bewirken. Zur Verhinderung von Problemen mit der Rückführung des Wassers, die unter der Zwischenabdichtung schwer auszubessern sind, erfolgt eine Vorreinigung des Wassers (Flockung/Fällung zur Elimination von Kalk und Eisen mit nachgeschalteter pH-Regulierung).

Nach KETTERN ET AL. (1997) wurden entgegen den Voruntersuchungen bislang nur maximal 900 mm/a in den Deponiekörper zurückgeführt. Anhand der Aufzeichnungen wurde erkennbar, daß aufgrund der Mischwasserrückführung zunächst ein Rückgang der Gasproduktion festzustellen war. Erst mit der Verringerung der Infiltrationsraten auf 2 mm/d erhöhte sich die Gasproduktion wieder (DREES 1998).

3.1.16 Deponie P

Auf der Deponie P wurden zwischen 1981 und 1988 ca. 380.000 Mg (365.000 m³) Siedlungsabfälle auf einer Fläche von rund 3 ha abgelagert. Die Deponie verfügt über eine mineralische Basisabdichtung (60 cm Lehm, $k_f = 10^{-9}$ m/s) und eine als Flächenfilter ausgebildete Sickerwasserdrainage (d = 25 - 40 cm, Korn > 32 mm), welche nach Abschluß der Deponie aufgrund von Inkrustationen bereits saniert

werden mußte. Die Deponie wurde nach der Verfüllung mit einer ca. 1,5 bis 2 m mächtigen mineralischen Dichtungsschicht aus Lehm abgedeckt. Ein Teil der Deponie ist mit Bäumen bedeckt. Die Gasfassung erfolgt über 20 vertikale sowie einen sternförmigen, horizontalen Gasbrunnen. Das Deponiegas wird verstromt und die dabei entstehende Abwärme in einer nahegelegenen Gärtnerei genutzt.

Das Infiltrationssystem besteht aus in den Abfall eingefrästen PVC-Filterrohren (DN 100). Die Stränge können einzeln geregelt werden. Seit November 1992 erfolgt die Zugabe von unbehandeltem Sickerwasser. Zweimal täglich werden rund 1 bis 2 m³ unbehandeltes Sickerwasser auf die Fläche aufgegeben. Ein geringer Einfluß der Infiltration auf die Gasproduktion ist nach Angaben des Betreibers feststellbar.

3.1.17 Deponie Q

Auf der Deponie Q (4,4 Mio. m³, 38,4 ha) ist geplant, auf einem zwischen 1975 und 1984 verfüllten Abschnitt ein Infiltrationssystem zu installieren. Der Bereich mit einer Fläche von 35.000 m² ist an der Basis mit einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB) abgedichtet, auf dem sich eine als Flächenfilter ausgebildete Sickerwasserdrainage befindet. An der Oberfläche wurde auf den abgelagerten Abfall eine Ausgleichs- und Gasdrainageschicht aus Sand aufgebracht, in welche auch das Infiltrationssystem integriert werden soll. Auf diese Ausgleichsschicht soll eine KDB aufgebracht werden. Es ist geplant, das Deponiegas mit Hilfe von Vertikalbrunnen zu erfassen und in einer ebenfalls noch nicht realisierten Anlage zu verwerten.

Die Planungen für das Infiltrationssystem sind noch nicht abgeschlossen. Vorgeesehen sind entweder die Verlegung von Tropferrohren unmittelbar in der Sandausgleichsschicht oder ummantelt in Drainagerohren. Als Infiltrationsmedium soll Leitungswasser eingesetzt werden. Mit der Infiltration soll im Sommer 1999 begonnen werden.

3.1.18 Deponie R

Auf die Bedingungen der Deponie R sowie die Planung und Umsetzung der Infiltrationsmaßnahme wird in Kapitel 5 gesondert eingegangen.

3.2 Bewertung der Systeme

Ausgehend von den Ergebnissen der Erhebung lassen sich die vorhandenen und geplanten Infiltrations- und Versickerungssysteme nach folgenden Kriterien unterscheiden:

A Transport und Verteilung des Wassers

1. Ausbildung der Sickerleitungen als Freispiegelleitungen
2. Verteilung des Wasser über Druckleitungen

B Infiltration des Wassers auf dem bzw. in den Deponiekörper

1. punktförmige bzw. vertikale Einleitung über
 - Schluckbrunnen
 - Gaskollektoren
 - Bewässerungslanzen
2. linienförmige, horizontale Einleitung über
 - Rigolen mit geschlitzten oder gelochten Drainagerohren
 - oberflächennahe Gasdrainagen
 - Tropfersysteme (ein- und zweischalig)
3. flächige, horizontale Einleitung
 - z. B. Gasdrainage in der Abdeckung bzw. Abdichtung

Die in Kapitel 3.1 vorgestellten Systeme lassen sich hinsichtlich ihrer Eignung unter folgenden Aspekten bewerten:

1. Ziel und Zweck des Infiltrationssystems
2. Möglichkeiten zur Integration eines Infiltrationssystems auf der Deponie
3. Betrieb und Erweiterung des Infiltrationssystems
4. Kosten

3.2.1 Ziel und Zweck eines Infiltrationssystems

Aus der Erhebung ergaben sich zwei Hauptziele für die Einrichtung bzw. den Betrieb von Infiltrationssystemen.

- Förderung der Gasproduktion
- Minimierung der zu behandelnden Sickerwassermengen

Als weiterer Grund für eine Infiltrationsmaßnahme wurde darüber hinaus von einem Betreiber die Erhöhung der Feuchtigkeit zur Verminderung der Brandgefahr genannt (nicht in der Auswertung in Kapitel 3.1 berücksichtigt).

Bei einer Reihe von Deponien orientieren sich die Zielvorgaben zumeist an der Initiierung oder Aufrechterhaltung sowie der Förderung des wirtschaftlich genutzten Gases. Aufgrund der Aufbringung eines Oberflächenabdichtungssystems sowie der daraus resultierenden Minderversorgung mit Feuchtigkeit traten bereits in einigen Fällen Probleme in dieser Hinsicht auf. Mit dem Abbau der organischen Substanz im Deponiekörper geht gleichzeitig eine unter ökologischen Aspekten positiv zu bewertende, aktive und gezielte Verringerung des Emissionspotentials einher.

Die Minimierung der zu behandelnden Sickerwassermengen bzw. der daraus resultierenden Behandlungskosten ist insbesondere in Süddeutschland aufgrund der geringen Anzahl von Sickerwasserbehandlungsanlagen als gängige Praxis zu bezeichnen. Eine Genehmigung sollte und wird in der Regel nur nach kritischer Prüfung bei Deponien mit einer intakten Basisabdichtung und unter der Maßgabe erteilt, daß es nicht zu einer Steigerung des Sickerwasseranfalls kommt, da das Sickerwasser im Kreis geführt wird.

3.2.2 Möglichkeiten zur Integration eines Infiltrationssystems auf der Deponie

Grundsätzlich sind bei der Errichtung eines Bewässerungssystems zwei Ausgangssituationen zu unterscheiden: Das Oberflächenabdichtungs- bzw. -abdeckungssystem wurde entweder bereits errichtet oder es besteht noch nicht. Für den Fall eines nachträglich in die Abdichtung zu integrierendes Bewässerungssystems schränkt sich die Zahl der Möglichkeiten aus bautechnischen und finanziellen Gründen stark ein. Für den Fall einer unmittelbaren Integration des Infiltrati-

onssystemen in die Dichtung stehen dagegen grundsätzlich alle aufgeführten Varianten zur Verfügung.

3.2.3 Planung und Betrieb von Infiltrationssystemen

Trotz der im Vergleich mit den Ergebnissen des 1997 erstellten Zwischenberichts gestiegenen Anzahl der bereits umgesetzten und betriebenen Systeme bestehen derzeit nur beschränkte Betriebserfahrungen. Dies ist auf die zum Teil nur unzureichende Begleitung und Auswertung der Maßnahmen zurückzuführen. Die in Tabelle 1 aufgeführten Probleme können beim Betrieb von Infiltrationssystemen auftreten.

Tabelle 1: Technische und konstruktive Probleme beim Betrieb von Infiltrationssystemen

Problem	Ursache	Maßnahme
Verstopfung, Inkrustationen etc.	Schwebstoffe, Ausfällungserscheinungen	<ul style="list-style-type: none"> • Spülen der Leitungen (ggf. mit Säure), Vorbehandlung des Infiltrationswassers (Filtern, Enthärtung, Enteisenung, Entmanganung etc.) • Konzeption einfacher und beständiger Systeme
ungleichmäßige Wasserverteilung	Topographie der Deponieoberfläche und nachträgliche Setzungen	<ul style="list-style-type: none"> • flächige und enge Verteilung der Infiltrationsrohre • abgestufte Verteilung der Schlitzbreiten im Verteilungsrohr bei Freispiegelleitungen • Wahl eines weitgehend gefälleunabhängigen Verteilungssystems
Schäden durch Frosteinwirkung		frostsichere Verlegung sämtlicher Leitungen und Behälter
Wartung und Reparatur, nachträgliche Eingriffe in das System	Erreichbarkeit infolge der Verlegung unter der Oberflächenabdichtung eingeschränkt	Konstruktive Ausbildung eines wartungsfreundlichen und reparierbaren Systems <ul style="list-style-type: none"> • beidseitiger Zugang zu den Verteilungsleitungen • ggf. Wasserverteilungsrohre in Drainagerohren verlegen etc.
kein Eintrag in den Deponiekörper	erhöhte Durchlässigkeiten in der Infiltrationsschicht gegenüber dem Abfallkörper	<ul style="list-style-type: none"> • Vermeidung von hydraulischen Trennflächen im Dichtungs- bzw. Infiltrationssystem • Ausbildung eines vertikalen, hydraulischen Gradienten durch Reduzierung des Gefälles
Beständigkeit der verwendeten Materialien	Aggressivität der umgebenden Medien (Sickerwasser, Deponiegas etc.)	Auswahl geeigneter Materialien (Erfahrungen und Anforderungen aus Sickerwasserdrainagesystemen)
Sicherheit (Explosionschutz)	Kurzschlußströmungen zwischen Infiltrationsschicht und Gasdrainage	geeignete, konstruktive Ausbildung

Aufgrund der Neuartigkeit und der daraus resultierenden erst kurzen Anwendung sind derzeit noch keine Langzeiterfahrungen mit Infiltrationssystemen auf Deponien vorhanden. Dies bezieht sich sowohl auf den eigentlichen Betrieb (Infiltrationsmengen, zeitliche Verteilung der Infiltration etc.) als auch auf die Anforderungen an die einzusetzenden Materialien. Infolge der Integration eines Systems in den obersten Bereich der Deponie ist mit erhöhten physikalischen und chemischen Beanspruchungen zu rechnen. Dazu gehören neben Setzungen vor allem auch Belastungen infolge des aggressiven Milieus (Deponiegas, Abfall, ggf. Sickerwasser). Dies ist bei der Planung und der Auswahl der Materialien zu berücksichtigen. Bestehende Erfahrungen mit Materialien und Konstruktionen aus der Sickerwasser- und Gasfassung sollten daher unbedingt mit in die Planung entsprechender Anlagen integriert werden.

Eine wesentliche Anforderung bei der Planung und Konzeption entsprechender Infiltrationssysteme besteht darin, eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Wassers auf der Deponieoberfläche zu gewährleisten, da die Verteilung im Deponiekörper nachträglich in der Regel nicht oder nur aufwendig beeinflusst werden kann. Die Dichte und Anordnung der Drainageleitungen ist für jede Deponie im Einzelfall in Abhängigkeit der jeweiligen technischen und finanziellen Randbedingungen zu prüfen.

3.2.4 Kosten

Die Kosten für ein System zur Infiltration von Wasser in die Oberflächenabdichtung lassen sich auf der Grundlage der durchgeführten Umfrage nur bedingt angeben. Die Angaben zu den spezifischen Kosten für die in Kapitel 3.1 erläuterten Systeme lagen im Bereich von etwa 2 bis 40 DM/m². Probleme beim Vergleich der Werte bereitet jedoch zum einen die Definition der Bezugsgröße (z. B. Bezug auf die reine Infiltrationsfläche oder die Gesamtfläche eines Abschnitts) und zum anderen die bei den untersuchten Objekte unterschiedliche Zuordnung einzelner Komponenten zum Abdichtungs- oder Infiltrationssystem. So wurde beispielsweise eine horizontale Gasdrainage, die auch als Bestandteil des Infiltrationssystems genutzt wurde, mal der Oberflächenabdichtung und mal dem Infiltrationssystem zugerechnet.

Zusammenfassend läßt sich jedoch feststellen, daß die Werte nur einen Bruchteil der Aufwendungen erreichen, die insgesamt für eine Oberflächenabdichtung erforderlich sind und je nach Ausführung etwa zwischen 150 und 250 DM/m² liegen

(für TASI-konforme (End-)Abdichtungssysteme). Auf jeden Fall ist eine Integration der Infiltrationssysteme vor Aufbringung der Oberflächenabdichtung aus technischen und finanziellen Gründen vorteilhaft.

4 Untersuchungen

Zur Ermittlung des Einflusses der Infiltration auf die Gasproduktion wurden Untersuchungen in Deponiesimulationsreaktoren (DSR) durchgeführt. In weiteren Versuchen im Labormaßstab wurden das Gaspotential mit Hilfe von Gärtests ermittelt. Diese Versuche wurden mit den originalen Abfällen aus der Siedlungsabfalldeponie sowie mit den aus den DSR ausgebauten Abfällen nach Abschluß der Untersuchungen durchgeführt.

4.1 DSR-Untersuchungen

4.1.1 Probenahme und Einbau der Abfälle in die Reaktoren

Für die Untersuchungen in den Deponiesimulationsreaktoren (DSR) wurden folgende Anforderungen an die Abfälle gestellt:

- Siedlungsabfälle mit einem möglichst hohen Anteil an organischer Substanzen
- Die Abfälle sollten bereits teilweise stabilisiert sein. Um Hemmungen der Untersuchung infolge einer Versäuerung der Reaktoren zu vermeiden, sollte eine biochemische Umsetzung der organischen Substanzen schon im Deponiekörper erfolgt sein. Dafür ist eine Ablagerung der Abfälle auf der Deponie vor rund 2 bis 4 Jahren notwendig. Nach dieser Zeit erfolgt oftmals die erste Abdeckung eines verfüllten Deponiebereichs.
- Die Abfälle sollten aus tiefer gelegenen Bereichen der Deponie stammen, um den Einfluß oberflächennaher, aerober Prozesse zu minimieren.

Unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen bot sich auf der Deponie J eine günstige Gelegenheit zur Entnahme von entsprechenden Altabfallproben. Der Einbau der Abfälle erfolgte auf der Deponie verdichtet in ca. 0,3 m dünnen Schichten. Im Gegensatz zu tiefer gelegenen Bereichen wurde der oberhalb des GW-Spiegels liegende Teil der Abfälle nur vom Niederschlag beeinflusst.

Die Feststoffproben wurden entsprechend der im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens „Deponiekörper“ erarbeiteten Standardarbeitsvorschrift SAV 1 (CONRAD ET AL. 1997) entnommen und für die Untersuchungen bzw. die Analytik aufbereitet.

Zur Entnahme der Abfallproben wurde auf der Deponie die oberste Abdeckung der Deponie (ca. 0,2 m Erdabdeckung) sowie die unmittelbar darunter liegende Schicht mit einem Bagger entfernt. Aus einer Tiefe von 1 bis 3 m unter der Deponieoberfläche wurden die Abfälle, eine Mischung aus Haus- und Gewerbemüll, entnommen und mit Hilfe eines Backenbrechers auf eine Größe von ca. 200 mm zerkleinert. Die schwarze Färbung der Abfälle ließ auf anaerobe Umsetzungsvorgänge während der bisherigen Ablagerung schließen. Anhand von Zeitungen und Verfallsdaten auf Lebensmittelbehältnissen wurde die ursprüngliche Ablagerung der Abfälle auf einen Zeitpunkt von ca. 3,5 Jahren vor der Probenahme datiert. Die Abfälle wiesen einen augenscheinlich hohen Anteil an Kunststoffen, insbesondere Folien, auf.

Im Rahmen der DSR-Untersuchungen wurden drei der in Abbildung 7 dargestellten Reaktoren mit Abfällen befüllt. Die Infiltration des Wassers sowie die Gasfassung erfolgte über Ventile, die im oberen Abschlußdeckel der gasdicht verschlossenen Reaktoren angebracht waren. Für die Bestimmung der Gasmengen wurden spezielle Gasuhren für geringe Volumenströme eingesetzt. Das Sickerwasser wurde aus einem Sammelbehälter an der Unterseite entnommen. Die Zwischenspeicherung war aufgrund der geringen Mengen sowie der Mindestmengen für die Analytik unumgänglich. Da bei Untersuchungen an Siedlungsabfalldeponien Temperaturen im mesophilen Bereich zwischen 30 und 40 °C am häufigsten bestimmt wurden (vgl. DOHMANN ET AL. 1997a), erfolgte der Betrieb der Reaktoren ebenfalls in diesem Bereich bei einer Temperatur von 40 °C. Die Zugabe des Infiltrationswassers erfolgte bei Reaktor 2 an der Oberseite. Zur Vermeidung von Kurzschlußströmungen waren in den Reaktoren 1 und 2 Ringe an der Wandung in ca. 2/3 der Reaktorhöhe angeschweißt worden.

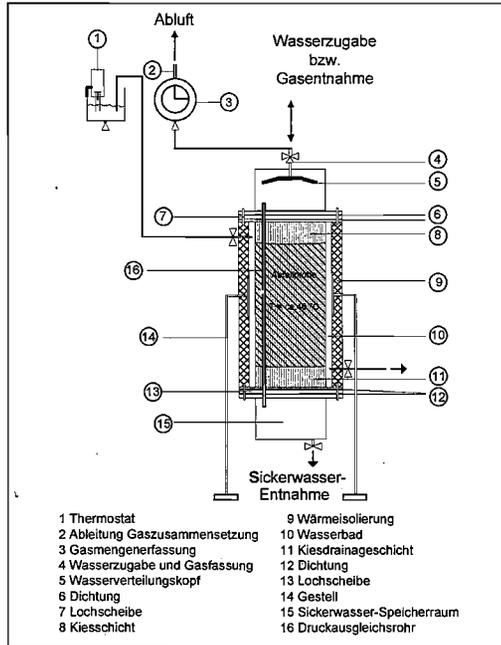


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines während der Untersuchungen eingesetzten Deponiesimulationsreaktors (DSR)

Die Reaktoren wurden über einen Versuchszeitraum von 210 Tagen wie folgt betrieben:

Reaktor 1: Nach Inbetriebnahme der Reaktoren erfolgte bei diesem Ansatz keine weitere Bewässerung. Damit wird die Unterbrechung der Sickerwasserneubildung durch Niederschlagsinfiltration infolge der Oberflächenabdichtung simuliert. Der Einbauwassergehalt dieses Reaktors sollte ungefähr dem Wassergehalt der Abfälle aus der Deponie R entsprechen. Dieser Versuchsansatz wird im folgenden als Nullreaktor bezeichnet.

Reaktor 2: Im Gegensatz zu Reaktor 1 wurde Reaktor 2 (Betriebsreaktor) während des Betriebs regelmäßig mit „infiltriertem“ Wasser zur Unterstützung der biochemischen Abbauvorgänge beaufschlagt. Als Infiltrationsmedium kam gering belastetes Wasser aus der Bachdrainage der

Deponie R zum Einsatz. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die in Reaktor 2 infiltrierten Wassermengen. Die durchschnittlich infiltrierte Wassermenge während der Untersuchungen entsprach 0,6 mm/d bzw. 0,84 l/Mg Abfall und Tag.

Reaktor 3: Reaktor 3 (Wendereaktor) wurde wie Reaktor 1 betrieben. Um den Einfluß der Fließbewegung, d. h. der Transportvorgänge, zu simulieren, erfolgte eine Drehung des Reaktors um die Querachse gemäß des in Tabelle 3 dargestellten Programms.

Tabelle 2: Infiltrationsmengen für Reaktor 2

	Infiltrierte Wassermenge			N-Anteil ¹⁾ %
	l/Woche	l/(m ² Wo)	l/(m ² Jahr)	
1. - 112. Versuchstag	0,6	6,2	320	43
113. - 152. Versuchstag	0,3	3,1	160	21
153. - 176. Versuchstag	0	0	0	0
176. - 210. Versuchstag	0,3	3,1	160	21
Summe	-	-	214	29

¹⁾ N = 750 mm/a

Tabelle 3: Drehung des Wendereaktors (Reaktor 3)

	Drehung
1. - 112. Versuchstag	täglich
113. - 162. Versuchstag	keine Drehung
163. - 210. Versuchstag	arbeitstäglich

Der Einbau der Abfälle in die Reaktoren und die Verdichtung erfolgten mit einem Handstamper in ca. 10 bis 15 cm mächtigen Schichten. Zur Erhöhung der Verdichtung wurde den Abfällen dabei jeweils Wasser aus der begleitenden Bachdrainage der Deponie R zugegeben. Der Wassergehalt der Abfälle wurde in den Reaktoren 2 und 3 zunächst auf die maximale Speicherkapazität eingestellt. Dazu wurde nach Abschluß des Einbaus der Abfälle zusätzlich Wasser auf der Oberfläche der Reaktoren verteilt. Die zu- und abgeführten Wassermengen wurden zur Bestimmung der Massen sowie der Ermittlung der Wassergehalte protokolliert. Dabei wurde auch Sickerwasser, daß noch wenige Tage nach dem Einbau der Abfälle an der Unterseite der Reaktoren austrat, nicht bei der (rechnerischen) Ermittlung des Wassergehalts berücksichtigt. Im Gegensatz zu den Reaktoren 2

und 3 wurde bei Reaktor 1 nur das für einen Wassergehalt von 40 % erforderliche Wasser zugegeben. Da die in Reaktor 1 eingebauten Abfälle das zugegebene Wasser nicht vollständig speichern konnten, lagen die Wassergehalte hier anfangs unter den beabsichtigten 40 %. In Tabelle 4 sind die Wasser- und Trockenmassen sowie die zugehörigen Dichten der in den Reaktoren untersuchten Abfälle zu Beginn der Untersuchungen angeführt. Die Zusammensetzung der originären Abfälle wird in Kapitel 4.1.3 vorgestellt.

Die Differenzen bei Massen und Dichten zwischen den Reaktoren 1 bzw. 2 und dem Reaktor 3 ergaben sich aus der unterschiedlichen Konzipierung der Reaktoren, da durch das Fehlen des Querrings bei Reaktor 3 eine höhere Verdichtung möglich war. Die im Rahmen der DSR-Untersuchungen erzielten Feuchtdichten lagen mit Werten zwischen 0,72 und 1,02 kg/l im Bereich der Werte von Siedlungsabfalldeponien.

Tabelle 4: Zustand in den Reaktoren zu Beginn der Untersuchungen

Einbauwerte		Reaktor 1 Nullreaktor	Reaktor 2 Betriebsreaktor	Reaktor 3 Wendereaktor
Gesamtmasse	[kg]	55,8	67,9	79,7
Trockenrückstand	[%]	64,4	57,8	60,1
Wassergehalt	[%]	35,6	42,2	39,9
Trockenmasse	[kg]	35,9	39,2	47,9
Wassermasse	[kg]	19,9	28,6	31,8
Reaktorvolumen	[m ³]	0,078	0,078	0,078
Feuchtdichte	[m ³ /Mg]	0,72	0,87	1,02
Trockendichte	[m ³ /Mg]	0,46	0,50	0,62

4.1.2 Infiltrationswasser

Als Infiltrationsmedium wurde Wasser aus der begleitenden Bachdrainage der Deponie R gewählt. Im Rahmen der Versuche wurden zwei Chargen gezogen und analysiert. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Beschaffenheit des Infiltrationswassers. Die erste Charge wurde zur Ermittlung möglicher Veränderung jeweils am Anfang und am Ende des Einsatzzeitraums untersucht.

Das Wasser wies eine nur geringe organische Belastung auf. Aufgrund der BSB₅/CSB-Verhältnisse um 0,5 war das Wasser prinzipiell als gut biologisch abbaubar einzustufen. Die Ergebnisse von Leuchtbakterientests an den Proben aus der begleitenden Bachdrainage zeigten keine toxischen Wirkungen.

Tabelle 5: Zusammensetzung des Wassers aus der begleitenden Bachdrainage (BBD) der Deponie R (Analysen des ISA)

		BBD1 (Beginn der Charge) 17.04.98	BBD1 (Ende der Charge) 01.10.98	BBD2 01.10.98
pH	[-]	6,63	5,15	7,25
Redoxpotential	[mV]	12	282	166
Leitfähigkeit	[µS/cm]	14100	2680	3470
CSB	[mg/l]	427	390	420
BSB ₅	[mg/l]	227	202	218
BSB ₅ /CSB	[-]	0,53	0,52	0,52
TOC	[mg/l]	140	130	140
NH ₄ -N	[mg/l]	680	36	250
NO ₃ -N	[mg/l]	0,82	-	-
N _{ges}	[mg/l]	-	52	290
P _{ges}	[mg/l]	-	16,2	18,7
Chlorid	[mg/l]	256	247	263
AOX	[µg/l]	200	217	220
Leuchtbakterien	[G ₁]	-	2	2

4.1.3 Feststoffe zu Beginn der Untersuchungen

Die festen Abfälle wurden zu Beginn der Untersuchungen auf ihre Zusammensetzung hin analysiert. Dazu wurde eine Probe der Abfälle - bis auf die Probe für die Trockenrückstandsbestimmung - vorgetrocknet und anschließend in einer Schneid-Schermühle auf < 10 mm zerkleinert. Die Aufbereitung und Analyse der Feststoffprobe und Eluate (nach DIN 38414, Teil 4) erfolgte im Labor gemäß den entsprechenden Analysevorschriften. Für die Bestimmung des Trockenrückstands wurde eine Probemenge von ca. 5 kg eingesetzt, die gegenüber den in den DSR eingebauten Abfällen nicht verändert wurde. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Beschaffenheit des Abfalls zu Beginn der Untersuchungen.

Tabelle 6: Zusammensetzung der festen Abfälle sowie der daraus hergestellten Eluate zu Beginn der Untersuchungen

Feststoffe		
Trockenrückstand	[%]	66,5
TOC	[g/kg TR]	152
GV	[%]	43,4
N _{ges}	[g/kg TR]	4,2
Eluate		
CSB	[mg/l]	1.080
BSB ₅	[mg/l]	618
N _{ges}	[mg/l]	61
NH ₄ -N	[mg/l]	47
Cl	[mg/l]	65

Die ermittelten Werte lagen im Bereich entsprechend alter Abfälle aus Siedlungsabfalldeponien (vgl. DOHMANN ET AL. 1997a). Ein Teil der ursprünglich im Abfall enthaltenen organischen Substanzen wurde bereits während der Ablagerung auf der Deponie abgebaut. Unter der Voraussetzung, daß frischer Hausmüll einen organischen Anteil von ca. 60 % als Glühverlust bzw. von 25 bis 30 % als TOC enthält, so kann die Reduzierung während der Ablagerung auf der Siedlungsabfalldeponie infolge der aeroben und anaeroben Umsetzungs- und Eliminationsprozesse mit etwa 30 bis 50 % abgeschätzt werden.

Aus den Ergebnissen der Feststoff- und Eluatuntersuchungen geht ferner hervor, daß rund 14 % des im Feststoff enthaltenen Stickstoffs unter den Bedingungen des Elutionsverfahrens nach DIN 38414, Teil 4, zu Beginn der Untersuchungen eluierbar waren.

4.1.4 Gasproduktion und -zusammensetzung

Aufgrund der bereits in der Deponie abgelaufenen Abbau- und Umsetzungsprozesse setzte die Gasproduktion in den Reaktoren fast unmittelbar nach dem Einbau der Abfälle ein. In Tabelle 7 sind die Daten zur Gasproduktion für die drei unterschiedlich betriebenen Reaktoren dargestellt.

Die höchste absolute Gassumme war bei Reaktor 3 feststellbar. Bei einem Vergleich ist jedoch die grundsätzlich einem Abbau zur Verfügung stehende (Trocken-)Masse zu berücksichtigen. Dies kann mit der spezifischen Gasproduktion erfolgen. Danach war beim unbeeinflussten Reaktor 1 mit 91,4 l/kg TR die höchste spezifische Gasproduktion zu verzeichnen. Mit 85,3 l/kg TR bzw. 82,8 l/kg TR produzierten die Reaktoren 2 und 3 rund 6,7 bzw. 9,5 % weniger als Reaktor 1. Die Differenz bei der Gasproduktion zwischen Reaktor 1 und 2 ist als gering zu bewerten. Die Ursache wird auf geringfügige Unterschiede bei der Zusammensetzung der jeweils eingebauten Abfälle sowie auf den Toleranzbereich der Gasuhren zurückzuführen sein. Da insbesondere zwischen dem 35. und 63. Versuchstag die Gasproduktion bei Reaktor 3 gegenüber der bei Reaktor 1 eingeschränkt war, ist vermutlich über die genannten Ursachen hinaus bei Reaktor 3 die besondere Betriebsweise für die in dieser Größenordnung verminderte Produktion verantwortlich. In diesem Zeitraum war bei allen Reaktoren ein Rückgang der Gasproduktion festzustellen. Durch die kontinuierliche Änderung der Bewegungsrichtung von Gas und Wasser infolge der Drehung ist eine zusätzliche Behinderung des konvektiven Transports, der für Gas und Wasser jeweils gegensätzlich gerichtet ist, im begrenzten Porenraum gegenüber den nicht gedrehten Reaktoren denkbar.

Tabelle 7: Daten zur Gasproduktion

		Reaktor 1	Reaktor 2	Reaktor 3
absolute Gassumme	[l]	3.281	3.346	3.967
spezifische Gassumme	[l/kg TR]	91,4	85,3	82,8
mittlere CH ₄ -Konz.	[Vol.-%]	53,1	53,8	55,6
mittlere CO ₂ -Konz.	[Vol.-%]	46,1	43,6	39,8
mittlere N ₂ -Konz.	[Vol.-%]	1,8	1,7	3,1
mittlere O ₂ -Konz.	[Vol.-%]	0,8	0,9	1,5
max. Gasproduktionsrate	[l/kg TR h]	0,12	0,13	0,09
max. Gasproduktionsrate	[l/h]	4,29	4,97	4,32
C-Austrag über Gaspfad	[kg]	1,75	1,75	2,05
Anteil am TOC ¹⁾	[%]	32,1	29,3	28,2

¹⁾ bezogen auf TOC zu Beginn der Untersuchungen

Unter Berücksichtigung der mittleren CH₄- und CO₂-Konzentrationen wurden zwischen 1,75 und 2,05 kg an Kohlenstoff über den Gaspfad ausgetragen. Dies ent-

sprach etwa 28 bis 32 % des in den Abfällen zum Zeitpunkt des Beginns der Untersuchungen enthalten TOC. Damit wird die besondere Bedeutung der biochemischen Abbau- und Umsetzungsprozesse auf die Reduzierung des Emissionspotentials bestätigt.

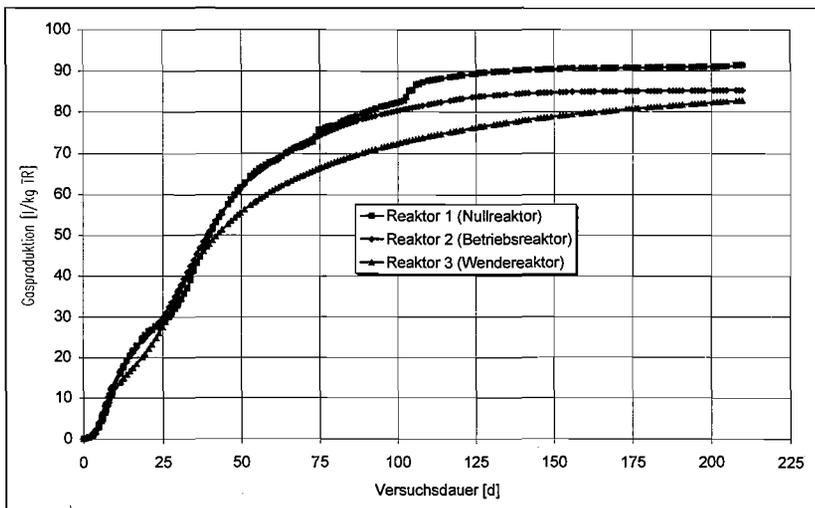


Abbildung 8: Summenkurven der spezifischen Gasproduktion

Unter der Annahme, daß aus 1 kg trockenem Abfall insgesamt etwa 180 l Gas entstehen (vgl. EHRIG 1986), entsprach die im Verlauf der DSR-Untersuchungen produzierte Gasmenge rund 46 bis 51 % der Gesamtmenge. Aufgrund des in Abbildung 8 dargestellten, zum Ende der Untersuchungen annähernd horizontalen Verlaufs der Gassummenkurven ist davon auszugehen, daß das Restgaspotential der untersuchten Abfälle nur noch gering war. Einen ähnlichen Schluß lassen die Ergebnisse der Gärtests zu, die vor Beginn und nach Abschluß der DSR-Untersuchungen an den untersuchten Abfällen durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 4.2). Darüber hinaus fällt an den Summenkurven der ungleichmäßigere Verlauf der Kurve von Reaktor 1 gegenüber den beiden anderen Reaktoren auf, der durch die nachfolgend dargestellten Gasproduktionsraten in Abbildung 9 noch besser veranschaulicht wird.

Die spezifischen Gasproduktionsraten (in l/kg TR h) verdeutlichen neben der grundsätzlicher Ähnlichkeit der Verläufe die höheren Schwankungen der Gaspro-

duktionsrate des Reaktors 1 gegenüber den Reaktoren 2 und 3. Der gleichmäßigere Verlauf der Reaktoren 2 und 3 kann auf den stetigen Nachschub mit Wasser bzw. die gleichmäßige Befuchtung infolge der Drehung zurückgeführt werden. Die Betrachtung der Beziehungen zwischen Wassergehalt und Gasproduktionsraten in Kapitel 4.1.5 bestätigt diese These.

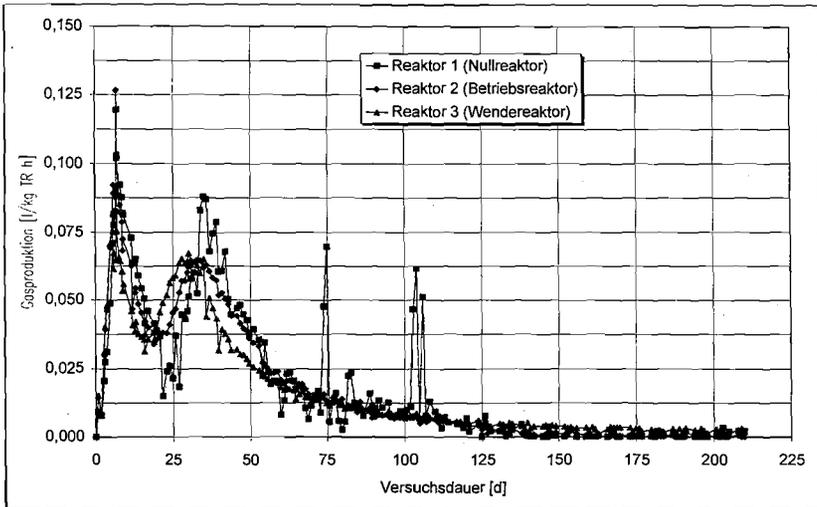


Abbildung 9: Gasproduktionsraten der untersuchten Reaktoren

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß im Untersuchungszeitraum die Befuchtung bzw. Durchströmung des untersuchten Abfalls auf die Gesamtgasmenge keinen steigernden Einfluß ausübte. Diese Feststellung wurde durch die Ergebnisse eines im Anschluß an den Auswertzeitraum durchgeführten Versuchs unterstützt, bei dem Reaktor 1 mit Wasser aus einer Vergärungsanlage beaufschlagt wurde. Durch die Zugabe des Abwassers, das methanbildende Bakterien enthielt und zudem ein geringes Eigengaspotential besaß, konnte keine Steigerung der Gasproduktion erreicht werden.

Der Verlauf der CH_4 - und CO_2 -Konzentrationen im Gas der drei Reaktoren kann bis zum 125. Versuchstag als vergleichsweise konstant bezeichnet werden. Das Verhältnis CH_4/CO_2 lag in diesem Zeitraum zwischen 1,1 und 1,2. Anschließend erhöhte sich das Verhältnis auf 1,5 bis 1,9. Als Erklärung für diese Erhöhung ist der Abbau schwerer abbaubarer Verbindungen denkbar, der in der Regel mit hö-

heren CH_4 -Anteilen im Gas verbunden ist. Die stärkste Veränderung der Verhältnisse war bei Reaktor 3 feststellbar. Hierfür kann ein verstärkter Übergang von CO_2 in die flüssigen Phase aufgrund des gegenüber den anderen Reaktoren intensiveren Kontakts der flüssigen und der gasförmigen Phase infolge der Drehung verantwortlich sein. Insgesamt können alle drei Reaktoren im Hinblick auf die Gaszusammensetzung der Methanphase zugeordnet werden.

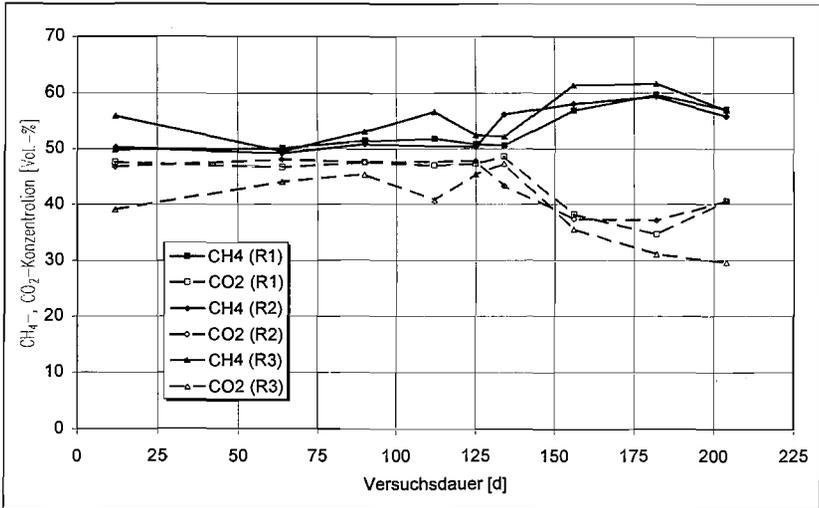


Abbildung 10: Zusammensetzung des Gases der untersuchten Reaktoren

4.1.5 Einfluß der Wasserbewegung auf die Gasproduktion

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Infiltration mit Wasser in Reaktor 2 zu keiner Erhöhung der Gasmengen gegenüber dem unbeeinflussten Versuch geführt hat. Dies ist im wesentlichen auf die in allen untersuchten Reaktoren insgesamt hohe Gasproduktion während der DSR-Untersuchungen zurückzuführen. Diese betrug unter der Annahme eines Gesamtgaspotentials der Abfälle von 180 l/kg TR etwa 50 %. Unterstützt wurde diese These durch die geringen Gasproduktionsraten zum Ende der Untersuchungen. Die Unterschiede zwischen den insgesamt produzierten Gasmengen der einzelnen Reaktoren betragen nur rund 7 bis 10 %. Zur weitergehenden Ermittlung der Ursachen für diese geringen Unterschiede werden deshalb im folgenden Abschnitt die Wassergehalte in den Reaktoren untersucht.

Die Wassergehalte in den Reaktoren zu Beginn der Untersuchungen wurden auf Werte zwischen 35,6 und 42,2 % bestimmt. Aufgrund der in Tabelle 8 angeführten Ursachen und Änderungen stellte der Wassergehalt während der Untersuchungen keine konstante Größe dar.

Tabelle 8: Ursachen und Auswirkung der Änderung des Wassergehalts während der Untersuchungen

Ursache	Auswirkung auf den Wassergehalt
Abbau von Trockenmasse	Steigerung des Wassergehalts
Zufuhr von Wasser durch Niederschlags- bzw. Infiltrationswasser	Steigerung des Wassergehalts
Wasseraustrag mit dem in der Regel gesättigten Gas	Rückgang des Wassergehalts
Wasserverbrauch durch anaerobe Prozesse	Rückgang des Wassergehalts

In Abbildung 11 ist der Verlauf der Wassergehalte über der Versuchsdauer dargestellt. Bei der Berechnung der Wassergehalte wurde die Sickerwassermenge, die in unregelmäßigen Abständen entnommen wurde, gleichmäßig auf den dazwischen liegenden Zeitraum verteilt. Darüber hinaus wurde die Zufuhr von Infiltrationswasser bei Reaktor 2 berücksichtigt. Dagegen kann die Masse der mit dem Gas ausgetragenen Feuchtigkeit aufgrund der geringen Mengen bei dieser Berechnung der Wassergehalte vernachlässigt werden, da der Wasseranteil im Gas bei einer für Deponiegas typischen Luftfeuchtigkeit von annähernd 100 %, einer Temperatur von 20 °C sowie einem Luftdruck von 1,013 mbar nur etwa 18 g Wasser/m³ Gas beträgt.

Bei Reaktor 2 wurde der Verlauf der Wassergehalte im wesentlichen durch die zugeführten Infiltrationswassermengen, den Abbau der Feststoffe sowie die Entnahme von Sickerwasser bestimmt. Bei Reaktor 3 wurde die Steigerung infolge des Abbaus von Feststoffen durch den Rückgang aufgrund der Entnahme von Sickerwasser bis zum 100. Versuchstag weitgehend ausgeglichen. Im weiteren Verlauf ging zum einen die Gasproduktion stark zurück und zum anderen wurde Sickerwasser entnommen, was sich in einer Abnahme der Wassergehalte widerspiegelt (die verstärkte Entnahme von Sickerwasser erfolgte erst ab diesem fortgeschrittenen Versuchsstadium, da zuvor eine ausreichende Wassermenge für die Durchfeuchtung der Abfälle vorhanden sein sollte). An der stetigen Abnahme

des Wassergehalts in Reaktor 1 ist erkennbar, daß hier der Rückgang infolge der Entnahme von Sickerwasser die Zunahme aufgrund des Feststoffabbaus deutlich übertraf.

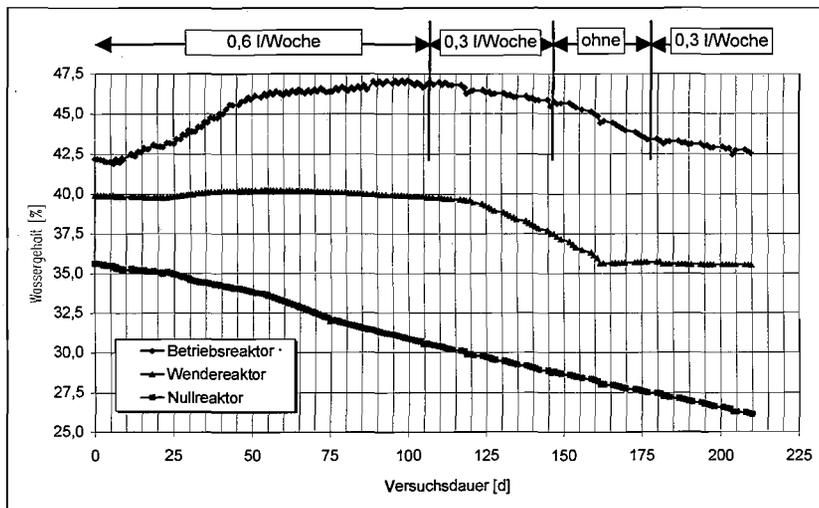


Abbildung 11: Verlauf der Wassergehalte in den untersuchten Reaktoren

Anhand der bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigte sich, daß die zusätzlich aufgebrauchte Wassermenge (Reaktor 2) bzw. die gleichmäßige Durchströmung (Reaktor 3) auf die Gesamtgasproduktion keinen fördernden Einfluß ausübte. In Abbildung 12 ist die Beziehung zwischen dem Wassergehalt der Abfälle in den Reaktoren und der gemessenen spezifischen Gasproduktion ($l/kg TR h$) dargestellt. Ferner sind die Schwerpunkte (\otimes) der einzelnen Wertemengen eingetragen. Aus den nur geringfügig unterschiedlichen Ordinatenwerten der Schwerpunkte läßt sich ablesen, daß die durchschnittliche spezifische Gasproduktion (ca. $0,02 l/kg TR h$) bei den untersuchten Abfällen weitgehend unabhängig vom Wassergehalt war. Im Gegensatz dazu wiesen die Abszissenwerte und die Bandbreite der Wassergehalte bei den drei Reaktoren deutliche Unterschiede auf. Das Spektrum umfaßte bei Reaktor 1 einen Bereich von $9,5\%$ ($26,1 - 35,6\%$), während die Bandbreiten bei den Reaktoren 2 und 3 mit $5,19\%$ ($41,9 - 47,1\%$) und $4,17\%$ ($35,5 - 40,3\%$) nur rund 49 bis 55% davon betrug. Dieser Effekt ist durch die gleichmäßigere Durchfeuchtung der Abfälle bzw. den Transport von Nährstoffen infolge der Infiltration bzw. der Drehung bedingt. Insgesamt kann für diese Abfälle

aus dem Diagramm ein für die Gasproduktion günstiger Bereich der Wassergehalte zwischen rund 33 und 46 % abgelesen werden.

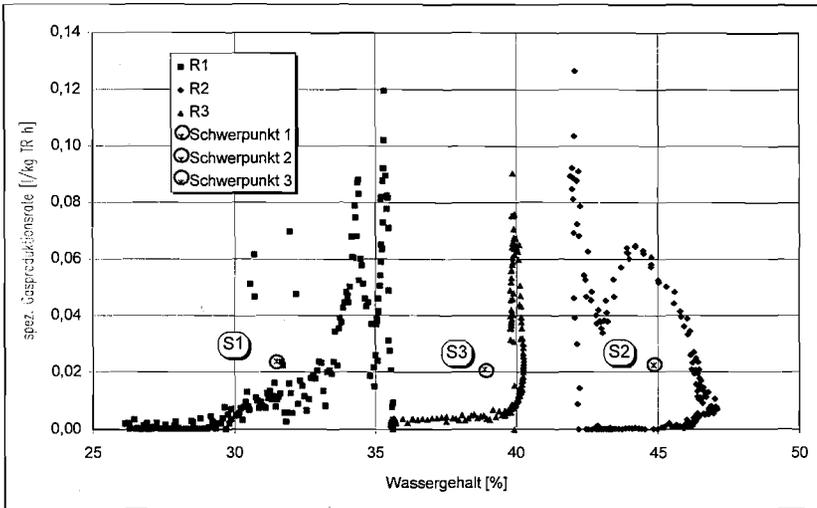


Abbildung 12: Beziehung zwischen Wassergehalt und spezifischer Gasproduktion

4.1.6 Sickerwassermengen und -zusammensetzung

4.1.6.1 Sickerwassermengen

Von besonderem Interesse sind bei einer Infiltrationsmaßnahme auch die Auswirkungen der Wasserzugabe auf den Wasserhaushalt. Die in Abbildung 13 dargestellten Wasserbilanzen wurden zur besseren Vergleichbarkeit um die unterschiedlichen Anfangszustände bereinigt. Die relative Abnahme der Wassermengen, die aufgrund der fehlenden Anfangszustände nicht aus Abbildung 13 ablesbar ist, war mit 31,8 % erwartungsgemäß bei Reaktor 1 am stärksten. Mit 16,1 % war sie bei Reaktor 3 deutlich geringer ausgeprägt. Aufgrund der Wasserzugabe betrug die Abnahme bei Reaktor 2 nur 5,4 %, was auch an der weitgehend ausgeglichenen Bilanz erkennbar wird.

Der auf die Infiltrationswassermenge bezogene Sickerwasseranfall bewegte sich bei Reaktor 2 zwischen 70 und 150 %. Während der Phase zwischen dem 150. und dem 180. Versuchstag, in der nur wenig bis überhaupt kein Infiltrationswasser

aufgegeben wurde, stieg der Sickerwasseranfall auf Werte zwischen 300 und 500 % an. Dieser Sickerwasseranfall wurde durch die minimale Bezugsgröße bedingt und kann demnach nicht als (unerwünschte) Erhöhung betrachtet werden.

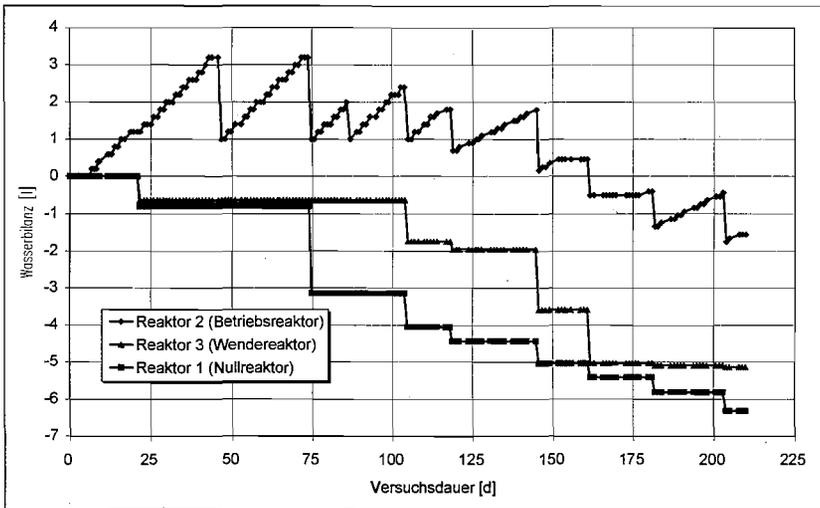


Abbildung 13: Wasserbilanz für die untersuchten Reaktoren

4.1.6.2 Sickerwasserzusammensetzung

Während der Untersuchungen unterlagen die Feststoffe Abbau- und Umsetzungsprozessen, welche die Zusammensetzung des Sickerwassers beeinflussen. Dementsprechend kann an der Beschaffenheit des Sickerwassers der Zustand einer Deponie beurteilt werden.

In Abbildung 14 ist der Verlauf der pH-Werte im Sickerwasser der untersuchten Reaktoren dargestellt. Die Werte aller Reaktoren liegen in einem engen Bereich. Dadurch wird die grundsätzliche Gleichartigkeit der ablaufenden Prozesse für alle Reaktoren bestätigt. Nach einer anfänglichen Phase, in der die pH-Werte bis auf ca. 6,2 absanken, verliefen anschließend die pH-Werte aller Reaktoren in engen Bereichen zwischen 7,0 und 6,8 (Reaktor 2 und 3) bzw. 6,9 und 6,6 (Reaktor 1). Die niedrigeren pH-Werte im Sickerwasser von Reaktor 1 sind zumindest während der letzten Phase der Untersuchungen auf die bei Reaktor 1 gegenüber den an-

deren Reaktoren erhöhten Anteile an organischen Säuren zurückzuführen (vgl. Abbildung 17).

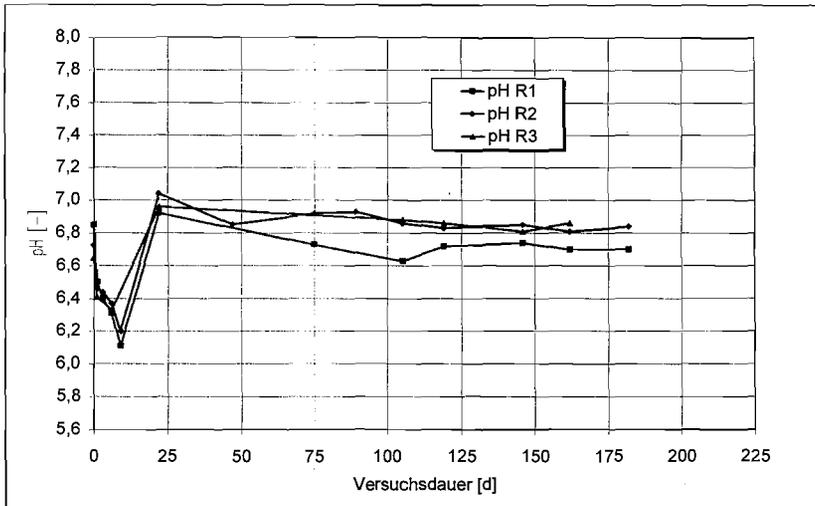


Abbildung 14: Verlauf der pH-Werte im Sickerwasser

Die Anfangsphase, die zunächst mit einer Abnahme und einem darauf folgenden Ansteigen der pH-Werte verbunden war, ist auch bei den organischen Sickerwasserbelastungen, in Abbildung 15 am Beispiel der CSB- und BSB₅-Konzentrationen dargestellt, durch starke Veränderungen der Konzentrationen geprägt. In dieser Phase erfolgte bei den Reaktoren 1 und 2 eine starke Abnahme der organischen Sickerwasserbelastungen um 65 -77 %. Bei Reaktor 3 waren die absoluten Konzentrationen ebenso wie deren relative Abnahme aufgrund der Drehung und dem damit verbundenen intensiveren Kontakt zwischen Abfall und Wasser weniger ausgeprägt. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen nahmen die CSB- und BSB₅-Konzentrationen der Reaktoren 1 und 3 weiter bis auf 600 bis 700 mg/l (CSB) bzw. 300 mg/l (BSB₅) ab. Aufgrund der regelmäßig zugeführten Verdünnung mit dem gering belasteten Infiltrationswasser (vgl. Tabelle 5) betrugen die Konzentrationen bei Reaktor 2 zum Ende der Untersuchungen nur rund 140 (CSB) bzw. 70 mg/l (BSB₅). Bei allen Sickerwässern lag das Verhältnis der Parameter BSB₅ und CSB während der gesamten Untersuchungen um 0,5 (Abbildung 16).

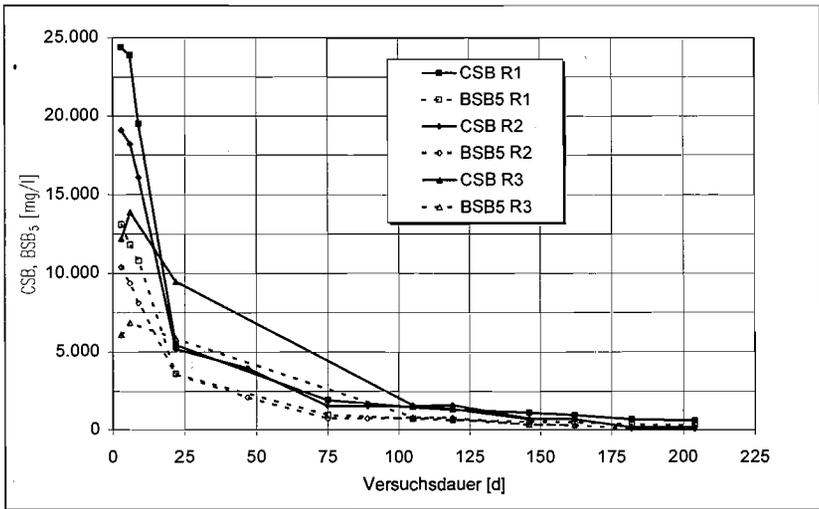


Abbildung 15: CSB- und BSB₅-Konzentrationen im Sickerwasser

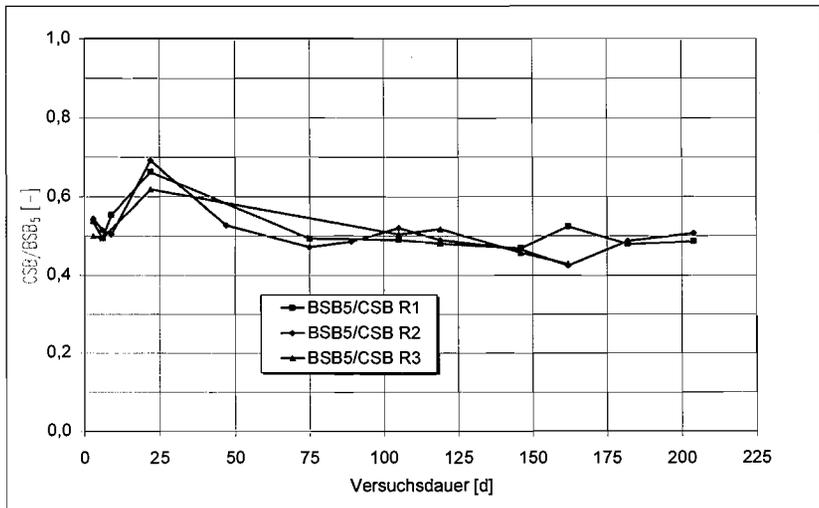


Abbildung 16: BSB₅/CSB-Verhältnis im Sickerwasser

Die starke Abnahme der organischen Sickerwasserbelastungen korrelierte zeitlich sehr gut mit dem Anstieg der pH-Werte sowie der Gasproduktion. Im Gegensatz

zu Untersuchungen mit frischen Siedlungsabfällen oder Hausmüll (vgl. KABBE 1998, WOLFFSON 1985), wo dieser Effekt auch beobachtet werden konnte, ist diese hier sehr kurze erste Phase mit den hohen organischen Sickerwasserbelastungen jedoch nicht als saure Phase, sondern vielmehr als Inbetriebnahmephase zu bezeichnen. In Abbildung 17 sind die Konzentrationen an organischen Säuren als Essigsäureäquivalente über der Versuchsdauer aufgetragen, die sowohl analytisch als auch stöchiometrisch anhand der Einzelkonzentrationen der organischen Säuren bestimmt wurden. Die Konzentrationen sind insgesamt als gering zu bezeichnen. Auch die erhöhten Konzentrationen zu Beginn der Untersuchungen lassen sich nicht einer sauren Phase zuordnen, da hierfür um eine Größenordnung höhere Konzentrationen von rund 13.000 mg/l in der Literatur angegeben werden (z. B. WIENBERG ET AL. 1984).

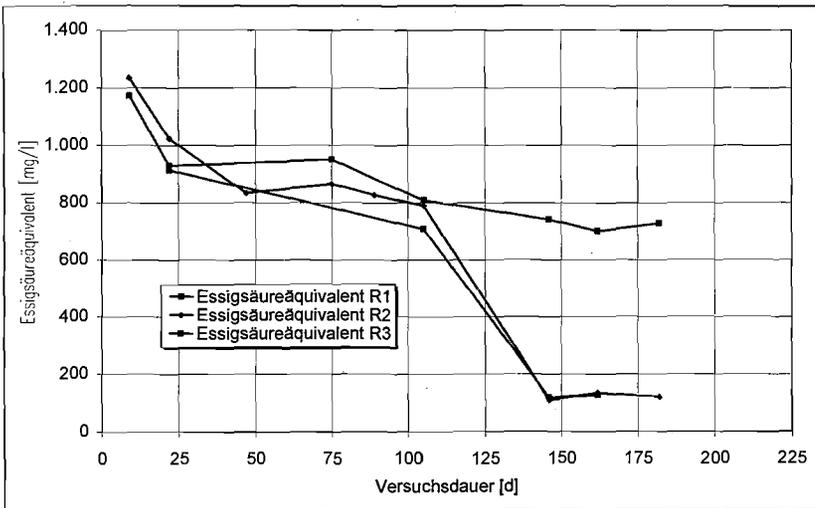


Abbildung 17: Essigsäureäquivalente im Sickerwasser

In Abbildung 18 sind die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser dargestellt. Der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil am Gesamtstickstoff lag bei allen Reaktoren um 90 %. Auch hier ist eine verstärkte Reduzierung der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen in der Anfangsphase festzustellen. Im Anschluß daran verblieben die Konzentrationen bei Reaktor 3 auf einem Niveau von rund 400 mg/l. Die Konzentrationen bei den Reaktoren 1 und 2 stiegen im Gegensatz dazu leicht an. Gegen Ende der Untersuchungen erreichte

Reaktor 2 ebenfalls rund 400 mg/l, während die Konzentrationen bei Reaktor 1 bis auf etwa 200 mg/l abnehmen.

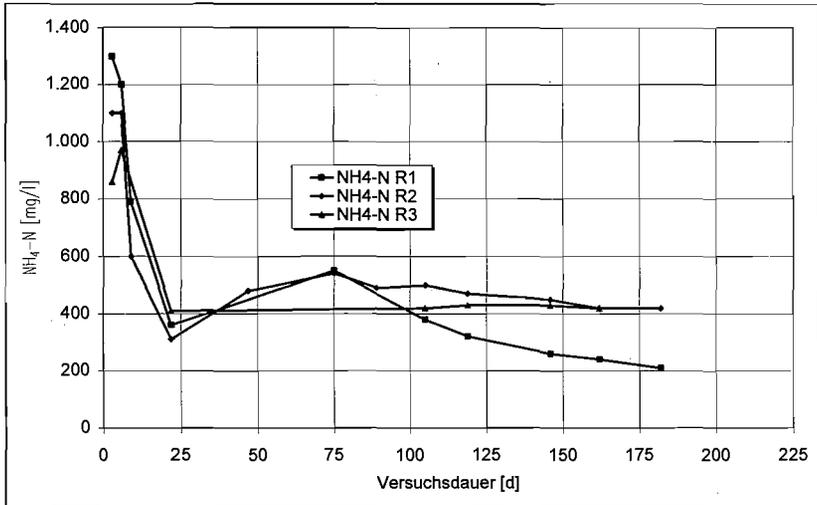


Abbildung 18: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser

In Abbildung 19 sind die Chloridkonzentrationen und die elektrische Leitfähigkeit im Sickerwasser der untersuchten Reaktoren dargestellt. Im Gegensatz zu den Chloridkonzentrationen, die nur wenig im Verlauf der Untersuchungen abnehmen, war bei der Leitfähigkeit eine deutliche Reduzierung feststellbar. Diese Abnahme ist auf den Einfluß anderer in ionischer oder molekularer Form vorliegender Verbindungen wie beispielsweise NH_4^+ oder HCO_3^{2-} zurückzuführen. Eine Aufkonzentrierung oder Verdünnung des Sickerwassers im Betriebsreaktor 2 durch die Zugabe des Infiltrationsmediums, das geringere Chloridkonzentrationen aufwies, konnte somit nicht festgestellt werden.

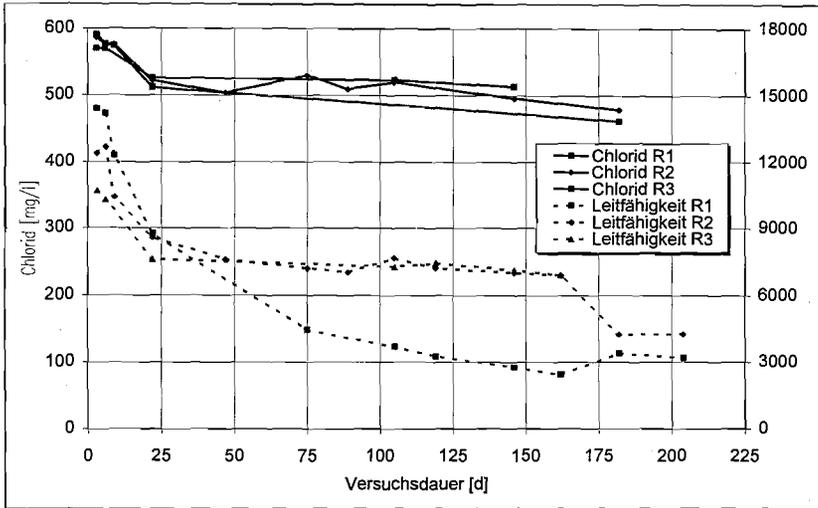


Abbildung 19: Chloridkonzentrationen und Leitfähigkeit im Sickerwasser

4.1.7 Feststoffe nach Abschluß der Untersuchungen

Nach Beendigung der Untersuchungen wurden die Abfälle aus den DSR ausgebaut und Proben für die Bestimmung der Trockenrückstände sowie der organischen und anorganischen Feststoffgehalte entnommen. Die Ergebnisse der Analysen sind in Tabelle 9 angeführt. Als Trockenrückstände sind hier die Werte angegeben, die theoretisch in Kapitel 4.1.5 ermittelt wurden, da im Anschluß an die Versuche noch weitergehende Untersuchungen zur Durchflußzeit sowie zur Förderung der Gasproduktion durchgeführt wurden. Die Ergebnisse der Feststoffanalysen wurden entsprechend auf diese Trockenrückstände umgerechnet.

Im Vergleich mit den Werten zu Beginn der Untersuchungen nahmen die TOC-Gehalte aller Reaktoren um ca. 37 bis 38 % auf TOC-Werte von etwa 9,5 % ab. Die Veränderungen des Glühverlusts streuten mit Eliminationsgraden zwischen 15 und 36 % stärker als beim TOC.

Tabelle 9: Ergebnisse der Feststoffanalysen nach Abschluß der Untersuchungen

	TR ¹⁾ [%]	TOC [g/kg TR]	GV [%]	N _{ges} [g/kg TR]
Reaktor 1	73,9	95	27,7	1,5
Reaktor 2	57,5	96	33,8	2,2
Reaktor 3	64,5	93	36,9	3,1

¹⁾ Daten aus theoretischer TR-Bestimmung (vgl. Kapitel 4.1.5)

Die in Tabelle 10 angeführten Ergebnisse der Eluatuntersuchungen unterschritten die für NH₄-N sowie die Leitfähigkeit vorgegebenen Anforderungen des Anhangs B der TA Siedlungsabfall (TASI 1993). Die CSB- und NH₄-Konzentrationen blieben im Vergleich mit den Einbauwerten annähernd konstant, während die N_{ges}-Konzentrationen abnahmen. Das Verhältnis NH₄/NH_{ges} stieg aufgrund der anaeroben Bedingungen in den DSR leicht an auf etwa 80 bis 90 %.

Tabelle 10: Ergebnisse von Untersuchungen an Feststoffeluat

	CSB [mg/l]	BSB ₅ [mg/l]	N _{ges} [mg/l]	NH ₄ -N [mg/l]	Chlorid [mg/l]	Leitfähigk. [µS/cm]
Reaktor 1	729	252	52	43	114	1.470
Reaktor 2	1.130	452	54	49	129	1.820
Reaktor 3	1.040	420	55	44	136	1.300

4.1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse der DSR-Untersuchungen

Im Rahmen von Versuchen in Deponiesimulationsreaktoren wurde der Einfluß der Infiltration und der Wasserbewegung auf die Gasproduktion an Abfällen untersucht, die bereits über einen Zeitraum von rund 3,5 Jahren in einer Siedlungsabfalldeponie abgelagert waren. Im Verlauf der Untersuchungen produzierten die Abfälle spezifische Gesamtgas Mengen, die unabhängig von der Betriebsart mit 83 bis 91 l/kg TR in einem engen Bereich lagen. Unter der Annahme, daß Siedlungsabfälle ein Gesamtgaspotential von rund 180 l/kg TR aufweisen, entsprach die während der DSR-Untersuchungen erzeugte Menge etwa 50 %. Da die Gasproduktionsraten zum Ende der Untersuchungen sehr gering waren, war davon auszugehen, daß die Abfälle nur noch über ein minimales Restgaspotential verfügten. Dies konnte anhand der nachfolgend diskutierten Gärtests bestätigt werden. Auf-

grund der während der DSR-Untersuchungen bei allen untersuchten Reaktoren weitgehend ausgeschöpften Gasbildung konnte kein Einfluß der Infiltration von Wasser oder der Wasserbewegung auf die biochemische Gasproduktion festgestellt werden.

Im Verlauf der Untersuchungen wurden 1,8 bis 2,1 kg Kohlenstoff über den Gaspfad ausgetragen. Bezogen auf die Masse an organischem Kohlenstoff (TOC) zu Beginn der Untersuchungen entsprach dies einer Reduzierung um rund 30 %. Daran zeigte sich die besondere Bedeutung der biochemischen Abbau- und Umsetzungsprozesse auf die Elimination von Kohlenstoff.

Anhand der Betrachtung der Wassergehalte sowie der Gasproduktionsraten zeigte sich, daß die Bandbreite der Wassergehalte des infiltrierten bzw. des gedrehten Reaktors bei gleichen Gasproduktionsraten um rund 50 % geringer als das Spektrum des unbeeinflussten Reaktors war. Die Gasproduktionsraten des unbeeinflussten Reaktors 1 unterlagen dabei deutlich höheren Schwankungen. Daraus kann geschlossen werden, daß bei einer Befeuchtung der Abfälle die Gasproduktion gleichmäßig wird.

Die Infiltration und die Wasserbewegung zeigten keine negativen Auswirkungen auf die Sickerwasserkonzentrationen. Die hohen organischen Anfangskonzentrationen reduzierten sich innerhalb kurzer Zeit um rund 70 %. Die weitere Verringerung im Verlauf der Untersuchungen ließen keine Störung der biochemischen Umsetzungsprozesse erkennen. Infolge der Zugabe von Wasser war weder eine Aufkonzentrierung noch eine Verdünnung feststellbar.

4.2 Gärtests

In Ergänzung zu den DSR-Untersuchungen wurden Gärtests in Anlehnung an die Vorgaben der DIN 38414, Teil 8 und unter Berücksichtigung der Erfahrungen des BMBF-Verbundvorhabens „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“ durchgeführt (DACH ET AL. 1997).

Die verwendete Apparatur sowie die Methodik sind bei DOHMANN ET AL. (1997) beschrieben. Bei den hier durchgeführten Versuchen wurden die Abfälle auf eine Größe < 10 mm zerkleinert und mit ausgefaultem Klärschlamm aus einer kommunalen Kläranlage angeimpft. Die Gemische besaßen Feststoffgehalte von rund 10 %.

Die Gärtests wurden jeweils mit Abfallproben, die in die DSR eingebaut wurden, sowie mit Proben aus den Reaktoren 1 und 2 nach Abschluß der DSR-Untersuchungen durchgeführt.

Im Rahmen der Gärversuche wurde das Gaspotential der noch nicht im DSR untersuchten Proben mit 85,8 l/kg TR bestimmt, welches damit sehr gut dem in den DSR-Untersuchungen für den Betriebsreaktor ermittelten Gaspotential entspricht. Einen Eindruck über den zeitlichen Verlauf der Gasproduktion vermittelt Abbildung 20. Dabei waren die insbesondere um den 30. Versuchstag herum auftretenden Schwankungen in der (Summen-)Kurve der kumulierten Nettogasproduktion durch die Bereinigung der Bruttogasproduktion um die Anteile des Faulschlammes bedingt. Nach einer Versuchsdauer von 140 Tagen waren die Gasproduktionsraten höher als die vergleichbaren Werte bei den DSR-Untersuchungen. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Gasproduktion zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig erschöpft war. Aufgrund des Verlaufs der Summenkurve dürfte die Steigerung allerdings nicht mehr hoch sein.

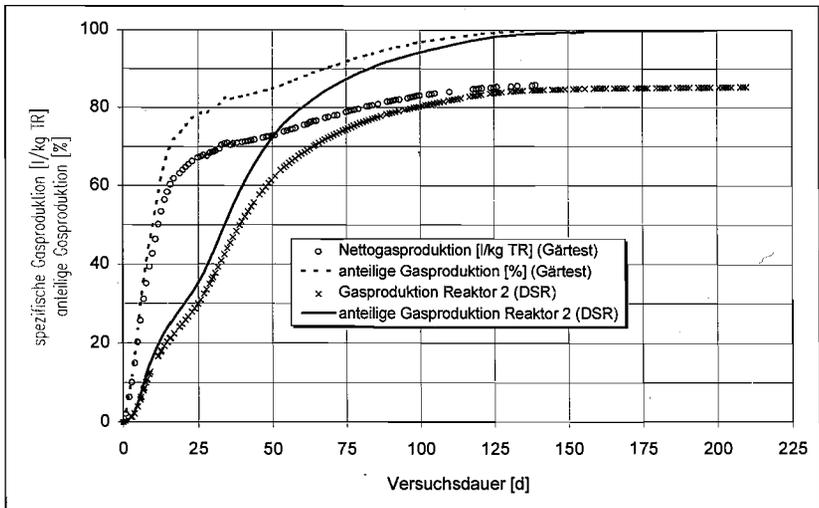


Abbildung 20: Kumulierte Gasproduktion des untersuchten Abfalls und anteilige Gasproduktion aus Gärtest- und DSR-Untersuchungen

Bei diesen Gärtests wurden bereits nach 28 Tagen etwa 80 % und nach 70 Tagen ca. 90 % der insgesamt gebildeten Gasmenge produziert. Zum Vergleich ist im

Diagramm der Verlauf der auf das Gesamtgaspotential bezogene Verlauf der Gasproduktion aus den DSR-Untersuchungen für den Reaktor 2 mit dargestellt. Es zeigt sich, daß nach etwa 125 Tagen bei beiden Versuchen das Gesamtgaspotential zu 98 % erreicht wurde. Die Umsetzung erfolgte bei den Gärtests schneller.

Nach Abschluß der DSR-Untersuchungen wurden Abfallproben aus den Reaktoren 1 und 2 ebenfalls Gärtests zur Ermittlung des Restgaspotentials unterzogen. Auch nach einer Versuchsdauer von 28 Tagen war das Restgaspotential erwartungsgemäß mit Werten von 3,0 l/kg TR (Reaktor 1) bzw. 1,4 l/kg TR (Reaktor 2) sehr gering. Der Kurvenverlauf war im Gegensatz zu den Versuchen mit den in die DSR eingebauten Abfallproben flacher. Dementsprechend war nach insgesamt 35 Tagen nur eine geringe Steigerung auf 3,5 bzw. 1,5 l/kg TR zu verzeichnen.

Anhand der Ergebnisse der Gärtests werden die Ergebnisse der DSR-Untersuchungen im wesentlichen bestätigt. Die Gaspotentiale der untersuchten Abfälle wurden im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen weitestgehend bis auf einen geringen Rest abgebaut. Dies ist auf die, gemessen an Siedlungsabfalldeponien, vergleichsweise guten Randbedingungen zurückzuführen. Als vorteilhaft erwies sich bei den DSR-Untersuchungen die gegenüber den Gärtests größere untersuchte Abfallmenge sowie insbesondere die Möglichkeit, während des Versuchsbetriebs steuernd auf die Randbedingungen Einfluß nehmen zu können. Bei den Gärtests (Batch-Versuch) war dies nicht möglich. Da weder die Wassergehalte entscheidend noch die Infiltrationsmengen überhaupt variiert werden können, stellen die DSR-Untersuchungen bei der Ermittlung des Einflusses von Infiltrationsmaßnahmen eine sinnvolle und dynamische Methode dar.

4.3 Schlußfolgerungen aus den Untersuchungen

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurden Abfälle, die bereits über einen Zeitraum von rund 3,5 Jahren auf einer Siedlungsabfalldeponie abgelagert waren, mit Deponiesimulationsreaktoren und Gärtests untersucht. Es konnte keine Steigerung der Gasproduktion durch die Infiltration oder die Wasserbewegung festgestellt werden. Dies war auf die weitgehend erschöpfte Gasproduktion der Abfälle, unabhängig von der Betriebsart der Reaktoren, zurückzuführen. Die Randbedingungen in den DSR waren im Vergleich mit den Bedingungen in Siedlungsabfalldeponien günstiger. Neben dem gleichmäßigen Temperaturniveau im mesophilen Bereich waren die als vergleichsweise homogen zu bezeichnenden Abfälle in

den DSR ausreichend mit Wasser bzw. Feuchtigkeit versorgt. Dies ist aufgrund des schichtartigen Aufbaus sowie den daraus resultierenden Inhomogenitäten bei Deponien nicht gegeben.

Anhand der Untersuchungsergebnisse zeigte sich jedoch, daß durch die Zugabe von Wasser sowie die Förderung der Wasserbewegung eine Vergleichmäßigung der Gasproduktionsraten erzielt werden konnte. Insgesamt wurden während der Versuche 1,8 bis 2,1 kg Kohlenstoff über die Gasphase ausgetragen. Dies entsprach etwa 30 % des insgesamt in den Abfällen zu Beginn der Untersuchungen enthaltenen organischen Kohlenstoffs. Der Austrag an Kohlenstoff über den Sickerwasserpfad betrug dagegen nur 0,5 bis 1,5 % des Gesamtaustrags. Damit zeigte sich die besondere Bedeutung der biochemischen Abbau- und Umsetzungsprozesse auf die Elimination von Kohlenstoff.

Bei Untersuchungen von PURCELL ET AL. (1995) mit nach dem Prinzip des „flushing reactor“ deutlich erhöhten Infiltrationsraten von bis zu 1.860 mm/a war die Gasproduktion (max. 35 l/kg TR) und damit auch der Gesamtaustrag an Kohlenstoff geringer. Dementsprechend betrug die Eliminationsleistung im Hinblick auf den TOC hier nur ca. 10 bis 15 %. Es ist zu vermuten, daß durch die überhöhten Wassermengen die biochemischen Umsetzungsprozesse nur eingeschränkt abließen, was durch die vergleichsweise geringen Temperaturen in den Reaktoren (17 - 26 °C) verstärkt wurde. Dieser Effekt konnte bei einer mit hohen Infiltrationsraten beaufschlagten Altdeponie in Deutschland ebenfalls festgestellt werden. Nach einer Reduzierung der Infiltrationsmengen stieg die Gasproduktion hier wieder an (DREES 1998).

Aus den Untersuchungsergebnissen kann daher die Schlußfolgerung gezogen werden, insbesondere in der ersten Zeit der Nachsorgephase günstige Bedingungen für die biochemischen Abbau- und Umsetzungsprozesse zu schaffen. Durch die erhöhte Gasproduktion wird das Emissionspotential reduziert. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Nutzung des energiereichen Gases. Nach dem Abklingen der Gasproduktion sollte vor allem der Elimination des langfristig das Emissionsverhalten bestimmenden Stickstoffs vorrangige Beachtung zukommen. Da Stickstoff überwiegend über den (Sicker-)Wasserpfad aus dem Deponiekörper ausgetragen wird, sind dann auch Strategien mit einer verstärkten Beaufschlagung von Wasser denkbar.

5 Umsetzung der Ergebnisse auf die Deponie R

5.1 Darstellung des Ist-Zustands der Deponie R

Die Erfassung und Darstellung des Ist-Zustands ist eine wesentliche Grundlage für die Infiltration von Wasser auf der Deponie R. Dafür sind Daten und Informationen zum Aufbau des Deponiekörpers sowie zum Verformungs- und Setzungsverhalten, zur Wasserbilanz (Niederschlags- und Sickerwassermengen) und zur Beschaffenheit der Emissionen (Sickerwasser- und Gaszusammensetzung) erforderlich. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Daten über die Beschaffenheit der abgelagerten Feststoffe, die im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens „Deponiekörper“ vom ISA auf der Deponie R erhoben wurden, heranzuziehen.

5.1.1 Allgemeines

Die Deponie R wird seit 1982 vom Bergischen Abfallwirtschaftsverband BAV betrieben. Die in wald- und forstwirtschaftlich genutztem Gelände gelegene Deponie umfaßt insgesamt eine planfestgestellte Fläche von rund 45 ha und ein Gesamtvolumen von ca. 10 Mio. m³. Die Entfernung zur nächsten Bebauung beträgt 500 bis 600 Meter. Die durch die Verfüllung eines Tals begonnene Deponie wurde weiter aufgeschüttet, so daß sie als Kombination aus Tal- und Hangdeponie ausgebildet ist. Sie unterteilt sich in einen mit durchlässigen Materialien abgedeckten Altteil (Bauphase BA 1 und BA 2), den verfüllten und unmittelbar vor der (Zwischen-) Abdichtung stehenden Baubaschnitt BA 3 sowie die noch zu verfüllenden Bereiche des Bauphase BA 4. Die Verfüllung des für die Infiltration vorgesehenen BA 3 erfolgt seit etwa 1988. Der Altteil der Deponie (BA 1 und 2) verfügt ebenso wie der BA 3 über ein Gasfassungssystem aus vertikalen Gasbrunnen.

Unter dem Ablagerungsbereich und der gesamten Basisabdichtung verläuft ein verdolter Bach. Die Basisabdichtung im BA 3 ist mit Bitumen (d = 5 mm) sowie mit Kunststoffdichtungsbahnen (CHD, d = 2,5 mm) ausgebildet, welche auf einem ca. 20 cm mächtigen Planum aus Sand aufliegen. Auf der Basisabdichtung befindet sich das Sickerwasserdrainagesystem aus einem Flächenfilter, in dem Sickerwasserdrainageleitungen aus HDPE verlegt sind. Über dieses Leitungssystem fließt das Sickerwasser aus dem Bereich des BA 3 über den BA 2 und den BA 1 zu einem Entnahmebrunnen.

Die Abfälle werden im Eingangsbereich der Deponie angenommen, gewogen und

mittels EDV erfaßt. Anschließend werden sie auf den Ablagerungsbereich gefahren, wo sie in Schichten von geringer Mächtigkeit abgelagert und mit Hilfe von Kompaktoren zerkleinert und verdichtet werden.

Die Ausdehnung des BA 3 beträgt ca. 8,2 ha bei einer maximalen Abfallüberschüttung von rund 50 m. Die Neigung der Böschungen reicht von 1:3 bis zu 1:10. Der letzte Wert resultiert aus den zwischenzeitlich erfolgten Setzungen des Deponiekörpers infolge der biochemischen Abbau- und Umsetzungsprozesse.

5.1.2 Beschaffenheit der Abfälle

Die an die Deponie R angelieferten Abfälle bestehen im wesentlichen aus Hausmüll und hausmüllähnlichem Gewerbemüll sowie Spermüll, Bodenaushub, Schlämmen etc. Für den Zeitraum zwischen 1988 und 1994 sind die Hauptabfallarten in Abbildung 21 dargestellt.

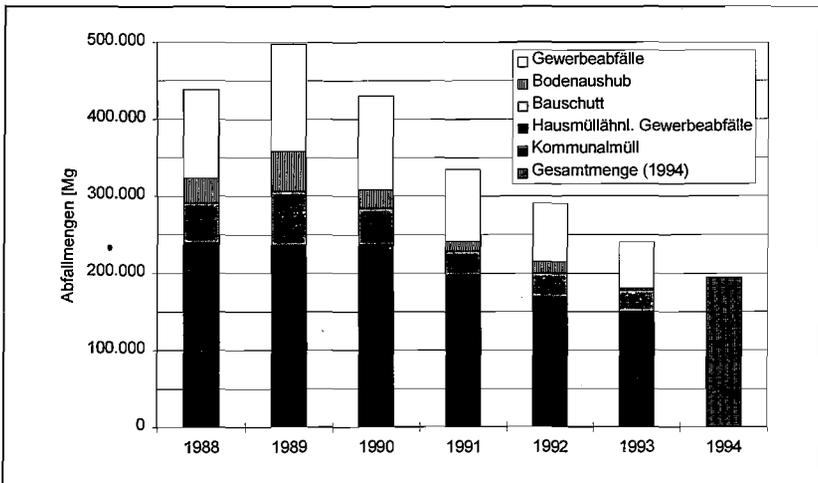


Abbildung 21: Abfallaufkommen auf der Deponie R in den Jahren 1988 - 1994

Aufgrund der Art der Abfälle ist zu vermuten, daß ein hoher Anteil der abgelagerten Mengen aus organischen Substanzen besteht und damit grundsätzlich biochemischen Abbau- und Umsetzungsprozessen zur Verfügung steht. Im Zusammenhang mit Untersuchungen im Rahmen des BMBF-Verbundforschungsvor-

habens „Deponiekörper“ wurden u. a. auf der Deponie R mit Hilfe großkalibriger Bohrungen ($\varnothing = 600 \text{ mm}$) Abfallproben auch aus tiefer gelegenen Schichten des Deponiekörpers entnommen und weitergehend untersucht. In Abbildung 22 sind die organischen Feststoffanteile am Beispiel des Glühverlusts im Vergleich mit Daten von anderen Siedlungsabfalldeponien dargestellt. Die Ergebnisse wurden im wesentlichen durch Feststoffanalysen des TOC (gesamter organisch gebundener Kohlenstoff) sowie des CSB (chemischer Sauerstoffbedarf) bestätigt.

Es zeigte sich, daß im BA 3 der Deponie R aufgrund der kurzen bisherigen Ablagerungszeiträume ($< 5 \text{ Jahre}$) noch hohe Anteile an organischen Bestandteile vorhanden sind. Diese sollten grundsätzlich in Zeiten abgebaut werden, in denen eine Fassung der Emissionen noch möglich ist. Zur Vermeidung von Konservierungseffekten infolge der Aufbringung einer zeitlich begrenzt wirksamen Oberflächenabdichtung und der daraus resultierenden Unterbrechung der Versorgung mit Wasser besteht die Möglichkeit, das Emissionspotential z. B. durch die Zufuhr von Wasser unter dem Abdichtungssystem zu verringern und die biochemischen Abba- und Umsetzungsprozesse sowie die Gasproduktion zu unterstützen.

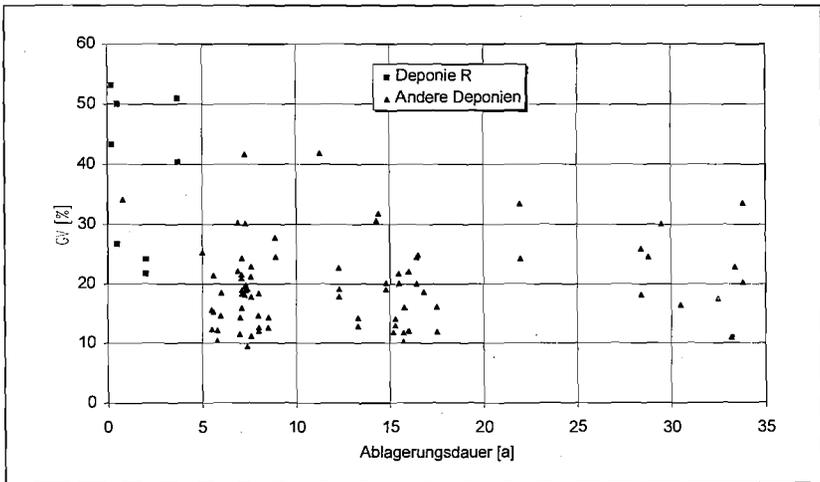


Abbildung 22: Organische Substanz (bestimmt als Glühverlust) der Feststoffe der Deponie R im Vergleich mit Daten von anderen Altdeponien und Altablagerungen (aus: DOHMANN ET AL. 1997a)

5.1.3 Wasserhaushalt der Deponie R

Der Wasserhaushalt des BA 3 der Deponie R stellt gemäß der allgemeinen Bilanzgleichung wie folgt dar:

$$N = A_o + V + SW \pm R \quad (\text{Gleichung 3})$$

mit	N	Niederschlag	SW	Sickerwasseranfall
	A_o	Oberflächenabfluß	R	Speicherung und Rückhalt
	V	Verdunstung		

Im Hinblick auf die Durchströmung des Deponiekörpers lassen sich die Wasserströme in die oberflächlich abfließenden bzw. verdunstenden Anteile A_o bzw. V und die den Deponiekörper durchströmenden Anteile SW und R unterscheiden. Die letztgenannten Anteile sind für die biochemischen Abbau- und Umsetzungsvorgänge sowie die Auslaugungsprozesse und damit für die Reduzierung des Emissionspotentials von Bedeutung. Eine differenzierte Quantifizierung dieser beiden Ströme ergibt Hinweise auf die für die Infiltration erforderlichen Wassermengen.

In den folgenden Kapiteln erfolgt zunächst eine Einzelbetrachtung der Bilanzgrößen, bevor Korrelationen zwischen ausgewählten Gliedern aufgezeigt werden.

5.1.3.1 Niederschlag

Die Höhe des auf der Deponie R gemessenen Jahresniederschlags ist im Vergleich mit durchschnittlichen Werten aus Deutschland recht hoch. In Abbildung 23 sind die Werte für die Jahre 1983 bis 1996 dargestellt. Der Mittelwert der Jahre 1988 bis 1996 - in dieser Zeit wurde der BA 3 verfüllt - beträgt rund 1.173 mm und liegt damit nur geringfügig unter dem Mittelwert für den gesamten Betriebszeitraum (1983 - 1996: 1.202 mm).

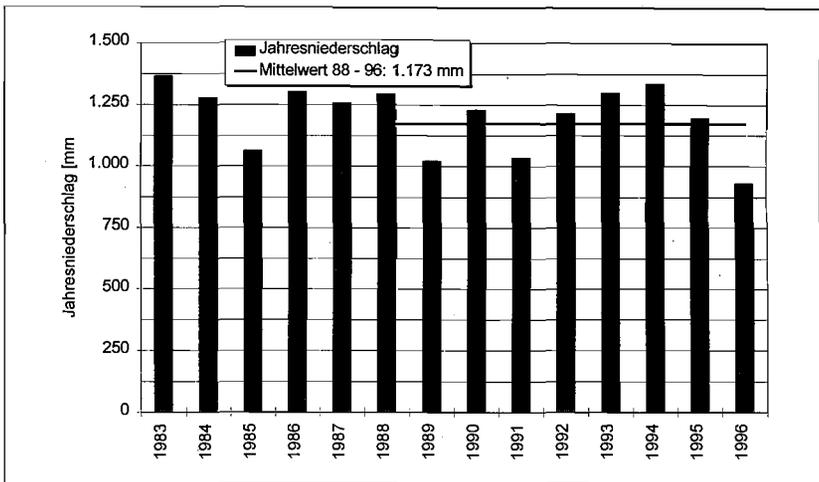


Abbildung 23: Jahresniederschlagshöhen der Deponie R von 1983 bis 1996 sowie das Mittel der Jahre 1988 bis 1996 (entspricht etwa dem Verfüllungszeitraum des BA 3)

5.1.3.2 Sickerwassermengen

Das Sickerwasser wird auf der Deponie R für die BA 1 bis 3 gemeinsam erfaßt. Aus diesem Grund ist eine getrennte Bestimmung der Einzelströme nicht möglich. Die BA 1 und 2 wurden mit einer wasserdurchlässigen Erdabdichtung versehen. Die zeitliche Verteilung der auf den drei Abschnitten insgesamt erfaßten Sickerwassermengen ist in Abbildung 24 dargestellt.

Bis 1994 war ein Anstieg der Sickerwassermengen festzustellen, der im wesentlichen durch die offenliegenden Einbauflächen bedingt war. Der Rückgang des Sickerwasseranfalls im Anschluß daran ist mit der teilweisen Abdichtung abgeschlossener Bereiche sowie der optimierten Wasserhaltung der neu angeschlossenen Bereiche zu erklären.

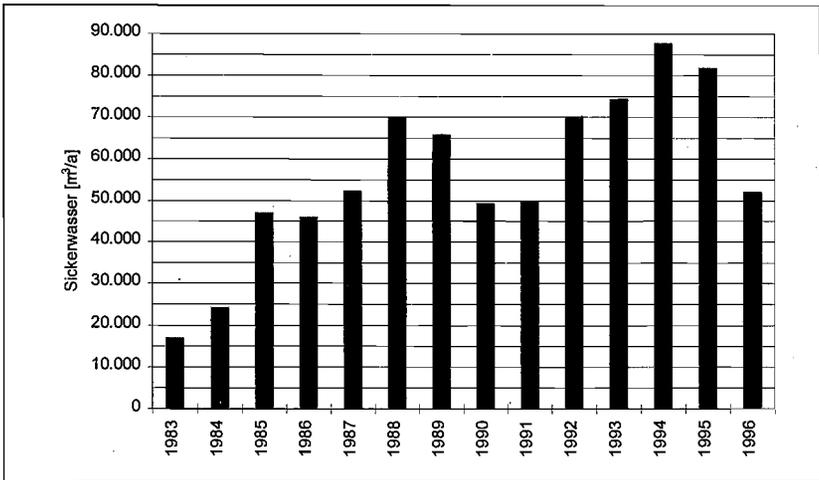


Abbildung 24: Zeitliche Verteilung der Sickerwassermengen von 1983 bis 1996

5.1.3.3 Verdunstung und oberflächlicher Abfluß

Die Verdunstung - insbesondere von der Deponieoberfläche - ist eine nur mit sehr hohem Aufwand zu messende Größe. Aus diesem Grund erfolgt die Bestimmung zumeist über eine Abschätzung (z. B. nach HAUDE oder THORNTHWAITE). Für die Deponie R wurde der Anteil der Verdunstung am Niederschlag für verschiedene Zeiträume nach THORNTHWAITE auf rund 24 % abgeschätzt (BAV 1997).

Über die oberflächlichen Abflußmengen des BA 3 lagen keine unmittelbaren Daten vor. In einer Gesamtbilanz für die Deponie R wurde der Oberflächenabfluß für die Gesamtdeponie auf rund 25 % ermittelt (BAV 1997).

Die vom BAV (1997) berechneten Werte stimmten sehr gut mit Angaben von EHRIG (1989) überein. Demzufolge beträgt der Anteil aus Verdunstung und oberflächlichem Abfluß rund 50 bis 65 % des Niederschlags.

5.1.3.4 Speicherung und Rückhalt

Die Größen Speicherung und Rückhalt lassen sich für eine gesamte Deponie aufgrund der grundsätzlichen Probleme bei der Aufstellung der Wasserhaushaltsbi-

lanz nicht direkt bestimmen. Sie werden u. a. durch betriebstechnische Parameter (z. B. Art der Verdichtung, Zwischenabdichtungen etc.) sowie durch die Eigenschaften des Abfalls (z. B. Eigenfeuchte, Speicherkapazität etc.) beeinflusst.

Auf Grundlage der Untersuchungen im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens sowie der Auswertung der Bohrprotokolle, die im Zusammenhang mit der Abteufung der Gasbrunnen auf dem BA 3 erstellt wurden, lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Der Wassergehalt der untersuchten Abfallproben - untersucht wurden die Fraktionen 0/8 und 8/20 - lag zwischen 35,0 und 45,6 % bei einem Mittelwert von 40,1 %. Es ist davon auszugehen, daß diese Werte etwas zu hoch sind, da sie im Trockenschrank an den Fraktionen < 20 mm bei 105 °C ermittelt wurden. Demgegenüber ist der Wassergehalt der Grobfractionen > 20 mm aufgrund der Eigenschaften einiger Bestandteile (z. B. Kunststoffe, Metalle, Mineralstoffe etc.) geringer. Die ermittelten Werte der Fraktionen < 20 mm sollten - trotzdem sie sehr gut mit den Ergebnissen von Untersuchungen an anderen Deponien übereinstimmen - nur als zusätzliche Information, jedoch nicht als repräsentativ für den gesamten Abschnitt BA 3 gewertet werden. Die Werte für die Wassergehalte stimmen gut mit denen einer theoretischen Abschätzung auf der Grundlage einer Bilanzierung der Wasserströme überein (BAV 1997). Hier wurde der Wassergehalt des Deponiekörpers zu etwa 38 % abgeschätzt.
- Im Verlauf der Bohrungen wurde an verschiedenen Stellen und in mehreren Tiefenbereichen der Deponie Schicht- bzw. Stauwasser angetroffen. Die räumlich diffuse Verteilung im Bereich des BA 3 läßt vermuten, daß das Auftreten des Wassers auf durch- bzw. abflußhemmende Zwischenschichten (z. B. Zwischenabdeckungen, Ablagerung entsprechender Abfälle etc.) zurückzuführen ist.
- Die organischen und anorganischen Belastungen dieses Wassers (z. B. CSB und BSB₅ bzw. NH₄-N) waren aufgrund des intensiven Kontakts mit dem ohnehin hohe organische Anteile enthaltenden Abfall (vgl. Abbildung 22) im Vergleich mit entsprechenden Wässern aus anderen Deponien hoch. Darüber hinaus werden die hohen Temperaturen in diesem Teil des Deponiekörpers (bis zu 52 °C; T_{mittel} = 48,5 °C) ebenfalls zu einer verstärkten Überführung von Stoffen aus der festen in die flüssige Phase beigetragen haben. Aufgrund des vollständigen Temperatenausgleichs zwischen Schichtwasser und festen Abfällen ist zudem zu vermuten, daß der Kontakt zwischen den beiden Phasen länger andauerte.

Die Speicherkapazität für Hausmüll wird von EHRIG (1989) auf der Grundlage von Untersuchungen mit 52 bis 59 %, bezogen auf die Trockenmasse, angegeben. Unter Ansatz der im BA 3 ermittelten Trockensubstanzgehalte sowie der Vernachlässigung des Masseverlusts infolge der biochemischen Abbauprozesse verfügt der Abfall im BA 3 somit noch über eine theoretische Speicherkapazität von rund 70 bis 240 kg/Mg TS. Durch den schichtweisen Aufbau der Deponie sowie die räumlich stark unterschiedliche Beschaffenheit der abgelagerten Abfälle und die daraus resultierende Ausbildung ausgeprägter Sickerwege im Deponiekörper ist davon auszugehen, daß dieser theoretische Wert nicht erreicht wird.

5.1.3.5 Korrelationen zwischen Niederschlag und Sickerwasseranfall

Aus den oben dargestellten Bilanzgrößen lassen sich weitergehende Informationen ableiten. Der Vergleich von Niederschlag und Sickerwasseranfall lieferte Hinweise zum zeitlichen Verlauf des Niederschlags-Abfluß-Verhaltens und damit auf das „Infiltrations-“ bzw. „Speicherverhalten“ einer Deponie. Die Auswertung ausgewählter Aufzeichnungen der täglichen Niederschlags-(Sickerwasser-)Abfluß-Ereignisse ergab, daß zwischen einem Starkregenereignis und dem darauf folgenden erhöhten Sickerwasseranfall ein Zeitraum von rund drei Tagen liegt. Dies ist sowohl auf das Speicher- bzw. Rückhaltevermögen des Deponiekörpers als auch auf die benötigte Fließzeit zwischen dem BA 3 und der Sickerwassermeßstelle zurückzuführen, welche in Fließrichtung unterhalb der BA 1 und 2 liegt (MÖLLER 1997).

Nach BAV (1997) machten sich Niederschlagsereignisse, die unter 10 mm liegen, nur in Ausnahmefällen in einer Erhöhung des Sickerwasseranfalls bemerkbar.

In Abbildung 25 ist der relative, auf den Niederschlag bezogene, Sickerwasseranfall in Zeitschritten von jeweils einem Monat dargestellt. Es zeigte sich, daß der Sickerwasseranfall den typischen jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. Dabei beträgt der Sickerwasseranfall zeitweise fast das Fünffache des Niederschlags im zugehörigen Bezugsmonat.

Die Auftragung der Jahresmittelwerte für das Verhältnis zwischen Sickerwasser und Niederschlag in Abbildung 26 ergab Werte zwischen 31 und 66 % des jeweils zugehörigen Niederschlags. Zugleich bestätigte sich der Anstieg des Sickerwassers in den Jahren zwischen 1991 und 1995. Eine über die Ansätze von Kapitel

5.1.3.2 hinausgehende Erklärung wurde bislang noch nicht gefunden (MÖLLER 1997).

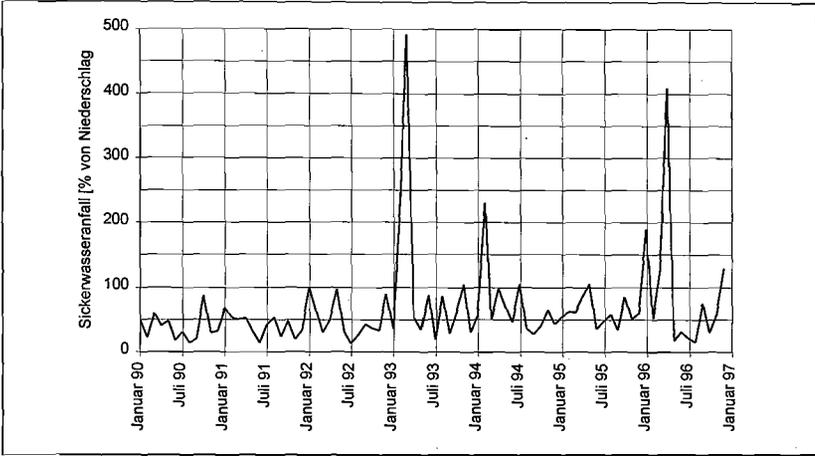


Abbildung 25: Relativer, auf den Niederschlag bezogener Sickerwasseranfall der Deponie R (Monatswerte)

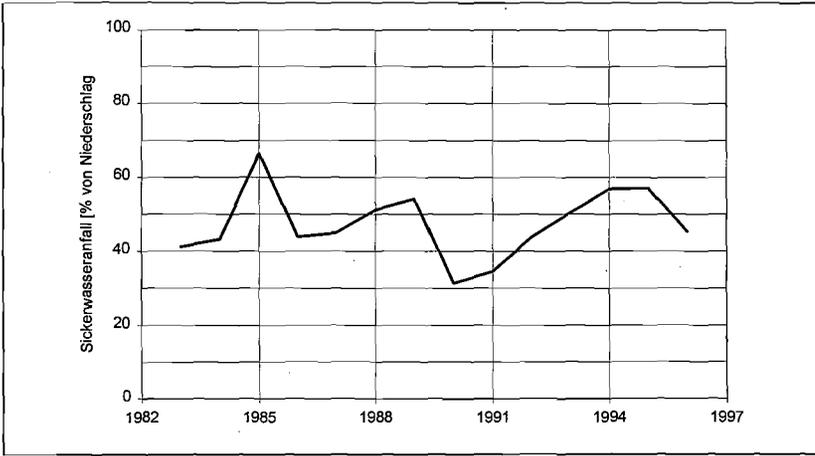


Abbildung 26: Relativer, auf den Niederschlag bezogener Sickerwasseranfall der Deponie R (Jahreswerte)

5.1.4 Deponiegasmengen

Das infolge der biochemischen Abbau- und Umsetzungsprozesse entstehende Deponiegas wird auf der Deponie R über vertikale Gasbrunnen abgesaugt, die in zwei Strängen zusammengefaßt sind. Über den sogenannten alten Strang werden die BA 1 und 2 sowie der nördliche Teil des BA 3 und über den neuen Strang der südliche Bereich des BA 3 (seit Oktober 1993) und die neuen Verfüllabschnitte erfaßt. Die abgesaugten Gasmengen sind für den Zeitraum zwischen August 1994 und Dezember 1996 in Abbildung 27 als Gesamtmenge und getrennt für die beiden Stränge dargestellt.

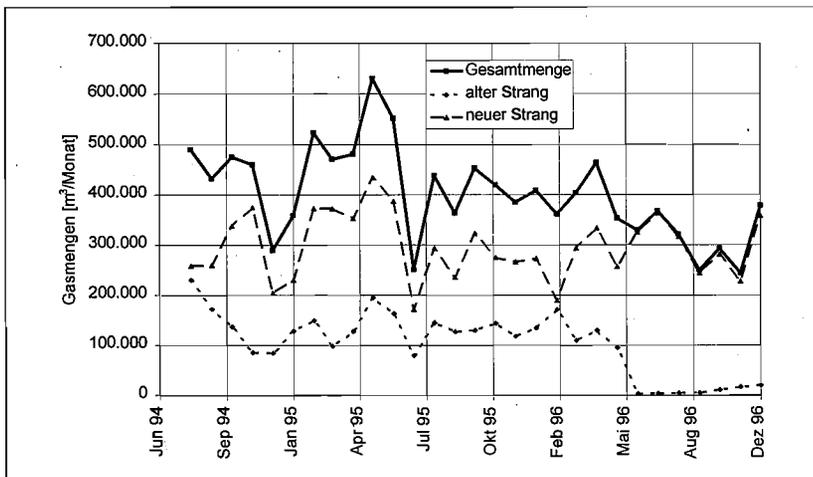


Abbildung 27: Deponiegasmengen (getrennt nach Erfassungssträngen)

Es zeigte sich, daß die Gasproduktion in den neuen Bereichen deutlich über der der alten lag. Seit Juli 1996 war sie in BA 1 und 2 so gering, daß das gebildete Gas fast vollständig über den neuen Strang abgesaugt wurde. Aus diesem Grund ist es erforderlich, im BA 3 die Bedingungen für eine stabile Gasproduktion auch nach der Aufbringung einer Oberflächenabdichtung aufrechtzuerhalten bzw. zu schaffen.

5.1.5 Qualitative Beschaffenheit der Sickerwasser- und Gasemissionen

5.1.5.1 Sickerwasserzusammensetzung

In den folgenden Abbildungen ist die Zusammensetzung des Sickerwassers der Deponie R am Beispiel der Parameter CSB und BSB₅ sowie NH₄ und AOX dargestellt (Abbildung 28 bis Abbildung 30).

Die CSB-Konzentrationen lagen im Bereich zwischen 500 und rund 2.000 mg/l. Im Vergleich mit Konzentrationswerten aus Untersuchungen an Siedlungsabfalldponien sind die Belastungen der Deponie R als gering einzustufen (z. B. KRÜMPELBECK 1996, KRUSE 1994). Das Verhältnis zwischen BSB₅ und CSB, welches als Kriterium zur Einordnung des biochemischen Zustands einer Deponie genutzt wird, erreicht während des betrachteten Zeitraums Werte unter 0,16. Dies ist im wesentlichen auf die geringen BSB₅-Konzentrationen mit Werten zwischen 30 und 215 mg/l zurückzuführen. Dementsprechend ist die Deponie auf Grundlage der Beschaffenheit der organischen Sickerwasserparameter der Methanphase zuzuordnen.

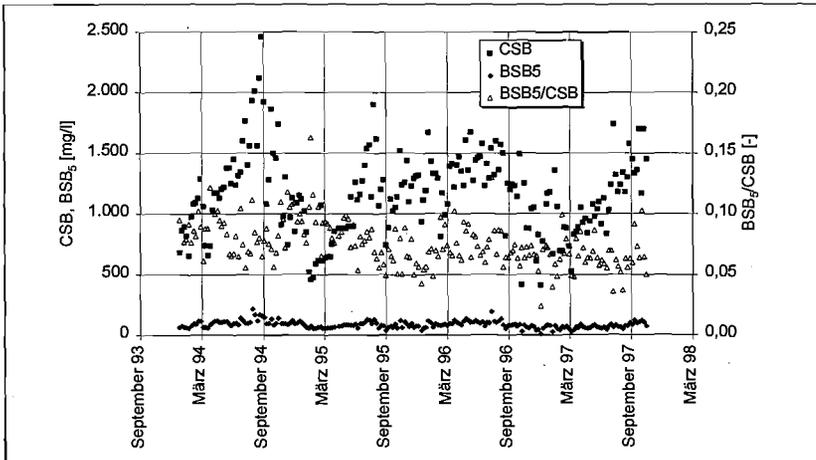


Abbildung 28: CSB- und BSB₅-Konzentrationen sowie deren Verhältnis im Sickerwasser der Deponie R

Die in der Abbildung dargestellten CSB-Werte unterlagen in dem betrachteten Zeitraum zwischen Januar 1994 und September 1997 stärkeren Schwankungen. Der Vergleich mit den (im Bericht nicht als Abbildung enthaltenen) Monatsganglinien zeigte, daß die geringen Konzentrationswerte zum Teil durch längerfristig hohe Niederschlagsereignisse bzw. die daraus resultierenden hohen Sickerwassermengen bedingt waren. Der Anstieg der Werte Anfang 1995 wurde neben den zu diesem Zeitpunkt geringen Sickerwassermengen auch durch die Inbetriebnahme des neuen Abschnitts BA 4 hervorgerufen.

Die in Abbildung 29 dargestellten NH_4 -Konzentrationen bewegten sich zwischen 500 und 1.500 mg/l. Sie lagen damit im für Sickerwasser aus Siedlungsabfalldeponien typischen Bereich (vgl. z. B. KRUSE 1994). Auch hier traten die schon beim CSB beobachteten und durch Verdünnungseffekte bzw. die Inbetriebnahme des BA 4 erklärten Konzentrationsschwankungen auf.

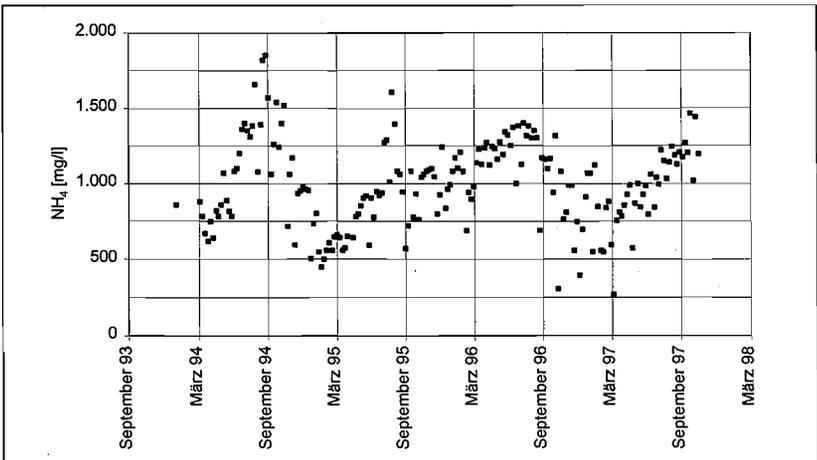


Abbildung 29: NH_4 -Konzentrationen im Sickerwasser der Deponie R

Die AOX-Konzentrationen im Sickerwasser der Deponie R (Abbildung 30) lagen zwischen 0,25 und 1,25 mg/l und damit im unteren Bereich der von KRUSE (1994) für Siedlungsabfalldeponien angegebenen Werte.

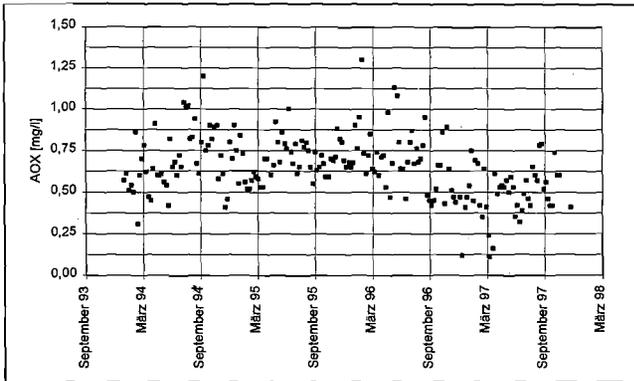


Abbildung 30: AOX-Konzentrationen im Sickerwasser der Deponie R

5.1.5.2 Deponiegaszusammensetzung

Anhand der in Abbildung 31 dargestellten CH_4 -Anteile im Gas der beiden Stränge zeigte sich, daß das Gas des BA 3, welches über den neuen Strang erfaßt wurde, mit rund 50 - 60 % im Vergleich zum alten Strang ($\leq 27\%$) einen deutlich höheren CH_4 -Gehalt aufwies. Diese Tendenz traf nach Angaben des BAV (MÖLLER 1997) auch für den nachfolgenden Zeitraum, d. h. ab Januar 1997, zu. Dies unterstreicht erneut die Bedeutung und Notwendigkeit von Maßnahmen, welche die Gasproduktion in diesem Bereich der Deponie auch nach Aufbringung der Oberflächenabdichtung zu fördern bzw. zu unterstützen.

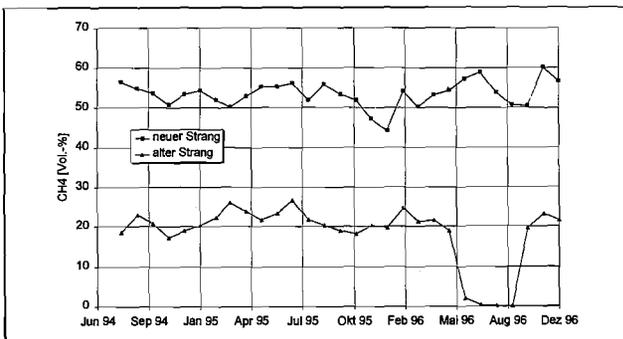


Abbildung 31: CH_4 -Anteil im Gas der Deponie R (das Gas des BA 3 wird über den neuen Strang erfaßt)

5.1.6 Zusammenhang zwischen dem Deponiegasanfall und ausgewählten Größen des Wasserhaushalts

Zur Ermittlung der Infiltrationswassermengen ist neben der möglichst weitgehenden Kenntnis der Bilanzgrößen Niederschlag, Sickerwasseranfall etc. auch deren Einfluß auf die Gasproduktion zu bestimmen. Aus diesem Grund werden in den folgenden Abschnitten die einzelnen Größen in Beziehung zu den erfaßten Deponiegasmengen gesetzt. Dabei wird zwischen den insgesamt und den im neuen Strang erfaßten Gasmengen differenziert. Der neue Strang deckte im betrachteten Zeitraum den Bereich des BA 3 ab. Für die Niederschlags- bzw. Sickerwassermengen war aufgrund der gemeinsamen Erfassung keine bereichsweise Differenzierung möglich.

Niederschlag

In Abbildung 32 ist die Beziehung zwischen Niederschlag und erfaßter Gasmenge für die Monatswerte dargestellt. Dabei wurde zwischen dem Gesamtbereich sowie dem BA 3 (neuer Strang) differenziert. Die Korrelationskoeffizienten r von 0,12 bzw. 0,13 zeigen, daß der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen bei statistischer Betrachtung als nicht vorhanden bezeichnet werden kann. Dies erstaunt insofern, da der Niederschlag den Wasserhaushalt wesentlich beeinflusst. Über das eingebrachte (Niederschlags-) Wasser werden sowohl der Feuchtegehalt der Abfälle als auch der Transport der Nähr- und Spurenstoffe gesteuert (Mikro- und Makrofunktion, vgl. auch DOHMANN ET AL. 1997b).

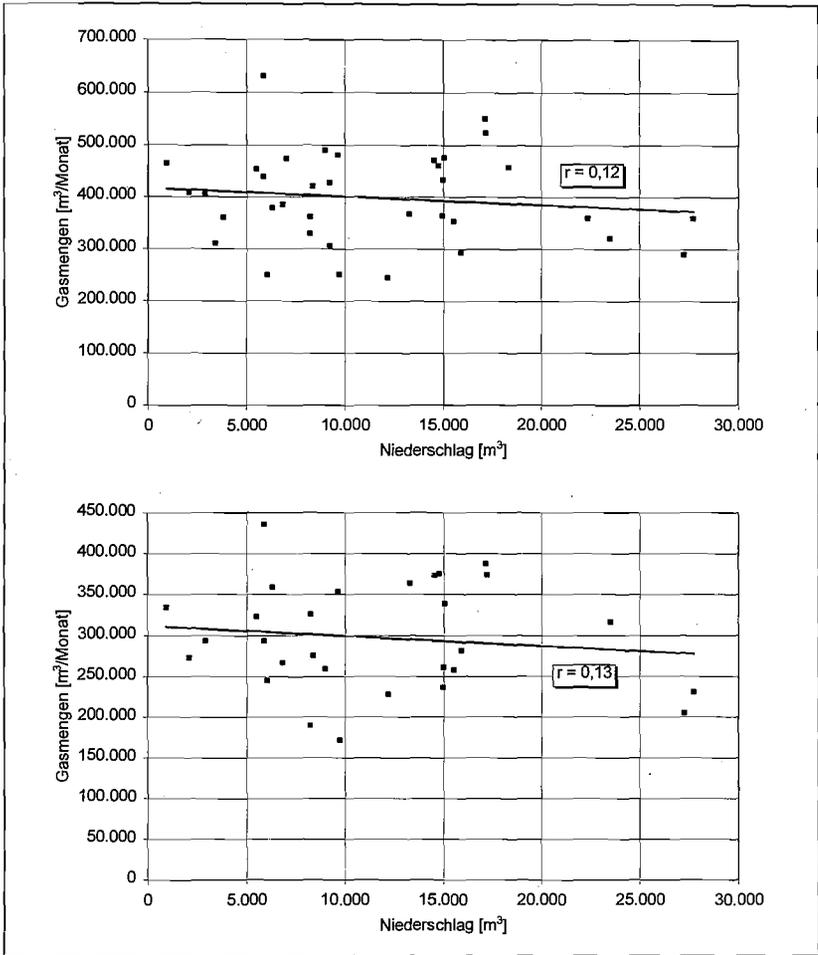


Abbildung 32: Beziehung zwischen Deponiegasmenge (Gesamtmenge (oben) und Menge des neuen Strangs (unten)) und Niederschlag

Sickerwasser

Ähnlich wie beim Niederschlag bestanden auch zwischen dem Sickerwasseranfall und den Gasmenigen nahezu keine statistischen Zusammenhänge. Im Gegensatz zum Niederschlag ist dies auch unter naturwissenschaftlichen Aspekten nachvoll-

ziehbar, da mit dem Sickerwasser nur diejenige Menge erfaßt wird, welche den Deponiekörper bereits verlassen und somit keinen Einfluß mehr auf die darin stattfindenden Prozesse hat.

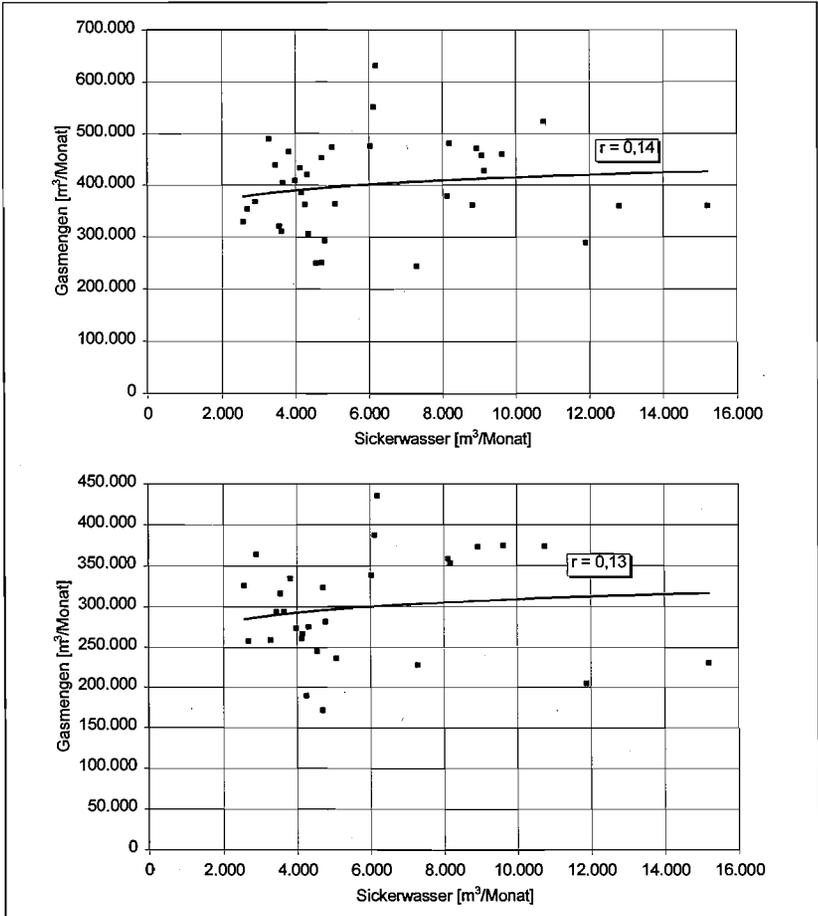


Abbildung 33: Beziehung zwischen Deponiegasmenge (Gesamtmenge (oben) und Menge des neuen Strangs (unten)) und absoluter Sickerwassermenge (jeweils in m^3)

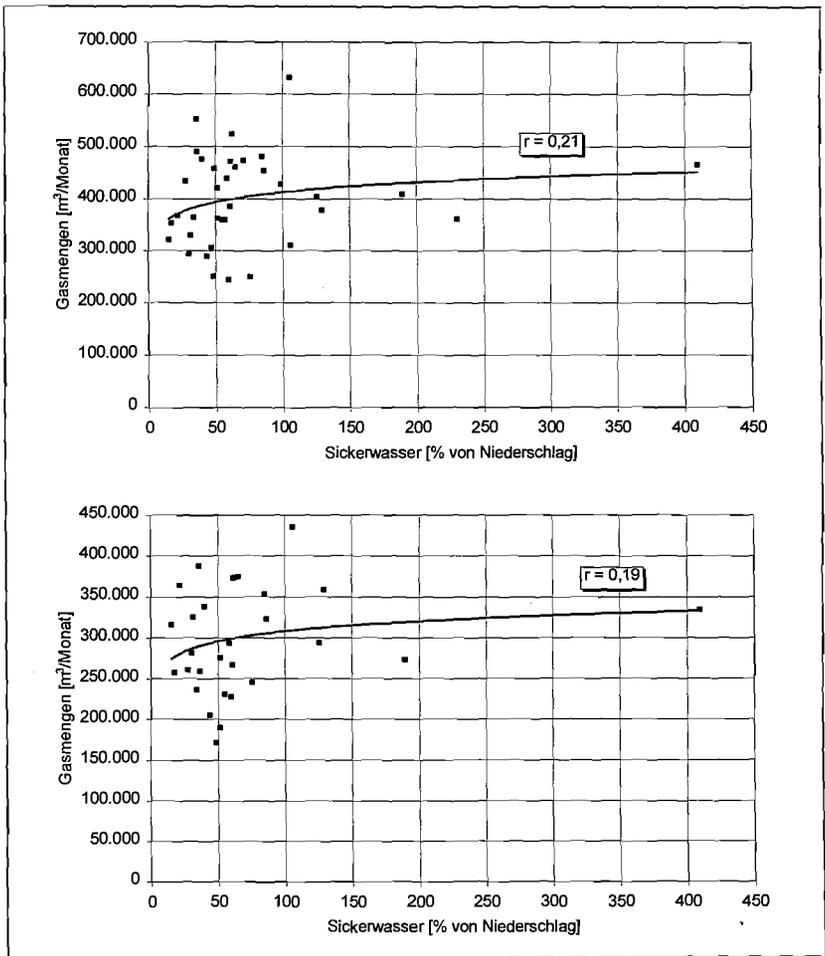


Abbildung 34: Beziehung zwischen Deponiegasmenge (in m³, Gesamtmenge (oben) und Menge des neuen Strangs (unten)) und relativem Sickerwasseranfall (in % des Niederschlags)

5.1.7 Setzungsverhalten

Aufgrund der biochemischen Abbauprozesse, welche mit einem Massenverlust verbunden sind, entstehen Setzungen und Verformungen an der Deponieoberfläche. Neben der Bedeutung für die Funktionsfähigkeit des Oberflächenabdichtungssystems kann die Ausbildung der Oberfläche auch die Wirksamkeit eines Infiltrationssystems beeinflussen. Dies ist vor allem bei Systemen der Fall, bei denen die Wasserverteilung mit Hilfe von gefälleabhängigen Freispiegelleitungen erfolgt.

Auf dem BA 3 wurden bislang nur an den Gasbrunnen Setzungsmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse liefern Informationen über das absolute Setzungsverhalten. Es lassen sich jedoch keine differenzierten Aussagen über das Setzungsverhalten des Deponiekörpers treffen, da sich punktuelle Setzungen der Gasbrunnen infolge Eigengewicht und Mantelreibung sowie die Verformung des Deponiekörpers überschneiden. Mit der meßtechnischen Bestimmung der Setzungen anhand von Festpunkten wird erst nach Abschluß der Verfüllung des BA 3 begonnen. Demzufolge liegen derzeit auch noch keine Prognosen für das künftige Setzungsverhalten in diesem Abschnitt vor. Es ist jedoch aufgrund von Erfahrungen - u. a. mit den älteren Bereichen BA 1 und 2 der Deponie R - damit zu rechnen, daß Gesamtsetzungen zwischen 10 und 20 % auftreten werden.

5.2 Schlußfolgerungen für das Infiltrationssystem der Deponie R

Im vorangegangenen Kapitel wurden die im Hinblick auf eine Infiltration von Wasser in den Deponiekörper relevanten Daten der Deponie R dargestellt und erläutert. Anhand der vorhandenen Aufzeichnungen zeigte sich, daß ein Großteil der abgelagerten Abfälle nennenswerte organische Bestandteile enthält. Mit Hilfe von weitergehenden Untersuchungen an festen Abfallproben auch aus tieferen Schichten der Deponie konnten diese Ergebnisse bestätigt werden (vgl. DOHMANN ET AL. 1997a). Die Voraussetzung und die Notwendigkeit für eine gezielte Unterstützung der biochemischen Gasproduktion sowie der Reduzierung des Emissionspotentials ist somit für den BA 3 der Deponie R gegeben.

Bei der Untersuchung der weiteren Daten zum Wasserhaushalt zeigte sich, daß - wie auch bei anderen Deponien - eine direkte Quantifizierung und Zuordnung der einzelnen Wasser- und Stoffströme für Teilbereiche der Deponie nicht möglich war (vgl. Kapitel 5.1.3). Die für die Infiltration erforderlichen Wassermengen sind

deshalb auf Grundlage der vorliegenden Datenbasis in einem ersten Schritt zunächst abzuschätzen. Darüber hinaus müssen bei der Bemessung von Infiltrationssystemen die systemabhängigen Größen wie Tropfer- und Rohrabstand oder die hydraulische Leistungsfähigkeit berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde bei der Planung eine iterative Vorgehensweise erforderlich. Die Festlegung bzw. Abschätzungen der Eingangsgrößen erfolgte dabei auf Grundlage von Daten zum Zustand der Deponie R sowie anhand von Angaben der Systemhersteller. Die Erfahrungen anderer Betreiber mit entsprechenden Systemen wurden ebenfalls mit einbezogen (vgl. DOHMANN ET AL. 1997b).

5.3 Infiltrationswassermenge

Der Jahresniederschlag im Bereich der Deponie R betrug im Mittel 1.172 mm/a (1988 - 1996). Der relative Sickerwasseranfall lag bei Betrachtung der Jahresmittelwerte zwischen 31 und 66 %. Die einzelnen Monatswerte schwankten stärker und betrugen bis zu 500 % des jeweils zugehörigen Niederschlags. Anhand einer Auswertung ausgewählter Monate wurde eine Retentionszeit von rund 3 Tagen zwischen einem stärkeren Regenereignis und dem darauf folgenden, erhöhten Sickerwasseranfall ermittelt. Diese Zeit war sowohl auf die Fließzeit zwischen Anfalls- und Erfassungsort als auch auf das Speicher- und Rückhaltevermögen des Deponiekörpers zurückzuführen.

Da die Größen Oberflächenabfluß und Verdunstung bei einer „Beregnung“ unter der Oberflächenabdichtung entfallen, ist nur ein entsprechend reduzierter „Niederschlagsanteil“ in den Deponiekörper zu infiltrieren. Nach BAV (1997) beträgt der Anteil aus Oberflächenabfluß und Verdunstung für die Deponie R rund 50 % des Niederschlags. Dementsprechend sollte die Infiltrationswassermenge in einer Größenordnung von ca. 30 bis maximal 50 % des Jahresniederschlags liegen. Dies bedeutet eine „Niederschlagshöhe“ von 350 bis 590 mm/a bzw. $l/m^2 a$. Eine möglichst gleichmäßige und großflächige Verteilung auf der Deponieoberfläche ist dabei anzustreben. Dabei ist zu berücksichtigen, daß nicht der gesamte BA 3 infiltriert werden kann. Eine Überprüfung der Wirksamkeit der Maßnahme erfolgt durch die Beobachtung des Sickerwasseranfalls sowie der Gasproduktion nach Inbetriebnahme. Aufgrund der geringen, für die Infiltrationsmaßnahme noch verfügbaren Fläche auf dem BA 3 ist gegebenenfalls eine Erhöhung der auf die Infiltrationsfläche bezogenen Wassermengen vorzunehmen, während eine Reduzierung erst bei einem deutlich erhöhten Sickerwasseranfall erforderlich wird.

5.4 Infiltrationssysteme

In Abhängigkeit von den zu infiltrierenden Wassermengen erfolgte die Auswahl eines geeigneten Infiltrationssystems für die Deponie R. Dabei waren die folgenden Randbedingungen zu beachten:

- **Hydraulische Leistungsfähigkeit:** Mit Hilfe des Infiltrationssystems müssen die unter Kapitel 5.3 beschriebenen Wassermengen unter hydraulischen Gesichtspunkten möglichst gleichmäßig auf der Deponieoberfläche unterhalb der Abdichtung verteilt werden können. Aus der Leistungsfähigkeit des Infiltrationssystems ergeben sich dann u. a. die Infiltrationsintervalle.
- **Fläche:** Der BA 3 umfaßt eine Fläche von rund 8,18 ha. Die für die Verlegung der Infiltrationsrohre verfügbare, d. h. zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgedeckte Fläche beträgt jedoch nur noch ca. 1,8 bis 2 ha, welche zudem nur den südlichen Bereich abdeckt. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, den gesamten Bereich des BA 3 mit Wasser zu beaufschlagen. Es ist nicht auszuschließen, daß dieser Umstand zu Problemen bei der Wirksamkeit der Maßnahme, d. h. bei der Gasproduktion, führen kann.
Es ist grundsätzlich zu prüfen, welche Möglichkeiten bestehen, bei einem signifikanten Rückgang der Gasproduktion den zunächst unbewässerten Teil des BA 3 ebenfalls zu bewässern.
Darüber hinaus ist zu überlegen, ob die aufgrund der genannten Randbedingungen bestehende Unterteilung des BA 3 in einen bewässerten Abschnitt und einen unbewässerten (Referenz-) Abschnitt nicht dazu genutzt werden kann, die Wirksamkeit der Infiltrationsmaßnahme quantitativ zu überprüfen.
- **Gefälleverhältnisse:** Die Wahl eines geeigneten Infiltrationssystems hängt u.a. von den Gefälleverhältnissen auf der Oberfläche der Deponie ab, auf der das System aufgebracht wird. Aufgrund der zum Teil starken Neigungen der Deponieoberfläche bzw. der Böschungen sowie der noch zu erwartenden Setzungen ($\leq 20\%$) im Infiltrationsbereich der Deponie R ist die Wahl eines Systems auf der Basis einer gefälleabhängigen Wasserverteilung möglicherweise mit Problemen beim Betrieb verbunden. Aus diesem Grund sollte auf ein weitgehend gefälleunabhängiges System zurückgegriffen werden.

- **Wartung etc. nach Aufbringung der Abdichtung:** Da das Infiltrationssystem unterhalb der Oberflächenabdichtung verlegt wird, sind nachträglich erforderliche Eingriffe bzw. Änderungen mit hohem Aufwand bzw. großen Schwierigkeiten verbunden. Dies ist bei der Auswahl und der konstruktiven Ausbildung eines Infiltrationssystems zu berücksichtigen.

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen auf der Deponie R erscheint die Wahl eines nahezu gefälleunabhängigen Verteilungssystems als günstig. Dazu bietet sich ein Tropfersystem an, das in Hüllrohren (geschlitztes oder gelochtes Drainagerohr) verlegt wird. Dieses Rohr-im-Rohr-System erlaubt auch nach Aufbringung der Abdichtung bei entsprechender konstruktiver Ausbildung eine nachträgliche Wartung bzw. Auswechslung des Systems, ohne die Abdichtung zu zerstören. Darüber hinaus kann das System bei Verlegung ohne zu große Gefälle erforderlichenfalls auch als Freispiegelsystem genutzt werden.

Die detaillierte Bemessung eines Infiltrationssystems ist für die Deponie R ebenso wie für jede Deponie unter Berücksichtigung der topographischen sowie der sonstigen Randbedingungen im einzelnen durchzuführen. Dazu ist u. a. die Festlegung der nachfolgenden Größen erforderlich:

- Material der Tropferrohrleitungen sowie der Drainagerohre (statische und (bio-)chemisch-physikalische Beanspruchung)
- Abstand der Infiltrationsrohre
- Abstand der Tropfer
- Durchmesser der Tropferrohrleitungen
- Durchflußleistung
- Betriebsdruck im System
- Betriebsdauer des Infiltrationssystems (Ansatz einer 5 oder 7 Tage-Woche)
- maximale Leitungslänge (u. a. abhängig vom Betriebsdruck sowie dem Durchmesser der Tropferrohrleitungen)

Bei der Wahl des Materials sowie der statischen Bemessung der Drainagerohre sollte auf bestehende Erfahrungen und ggf. Vorschriften aus dem Bereich der Sickerwasser- bzw. der Gasfassung zurückgegriffen werden.

Der Abstand der Tropferrohrleitungen sollte zwischen 5 und maximal 15 Metern liegen. Die Wahl eines geeigneten Drainagesystems, welches in Abhängigkeit der

Gefälleverhältnisse als Flächendrainage oder als Rigolensystem ausgebildet werden kann, ermöglicht darüber hinaus eine zusätzliche „Steuerung“ der Wasserverteilung.

Die Abstände der Tropfer bzw. der Exfiltrationsöffnungen wie auch der Durchmesser der Tropferrohre richtet sich nach den zu infiltrierenden Wassermengen, dem Betriebsdruck sowie den notwendigen Leitungslängen. Die Vorgaben der Hersteller sind dabei zu beachten.

5.5 Einfluß der Infiltration auf die Gasproduktion des BA 3 der Deponie R

Bestandteil des Vorhabens war die Begleitung der Infiltrationsmaßnahme auf der Deponie R. Die baulichen Maßnahmen für das System sollten im 4. Quartal 1997 bzw. Anfang 1998 fertiggestellt sein. Aufgrund von Problemen beim Betrieb auf der Deponie R verzögerte sich die Fertigstellung sowie die Erteilung einer Genehmigung, die in der Zwischenzeit mit Auflagen erteilt wurde. Es ist vorgesehen, mit dem Infiltrationsbetrieb Anfang 1999 zu beginnen. Aus diesem Grund war eine Bearbeitung dieses Punktes nicht möglich.

5.6 Meß- und Steuerungskonzept für ein Infiltrationssystem am Beispiel der Deponie R

Die Umsetzung einer Infiltrationsmaßnahme ist mit einer Reihe von Unwägbarkeiten verbunden. Aus diesem Grund sollten bereits im Vorfeld der Maßnahme Daten und Informationen gesammelt und ausgewertet werden, um im Verlauf der Infiltration deren Auswirkungen bzw. Effektivität bewerten zu können. Darüber hinaus ist es erforderlich, die Bewässerung an die jeweiligen Erfordernisse bedarfsgerecht anzupassen. Dies erfordert ein Meß- und Steuerungskonzept. Ziel dieses Konzepts ist es zunächst, die für die Gasproduktion sowie die Infiltration relevanten Einflußgrößen qualitativ und quantitativ zu definieren. Für die biochemischen Abbau- und Umsetzungsprozesse sind u. a. die in Tabelle 11 angeführten Einflußgrößen maßgeblich.

Tabelle 11: Meßgrößen zur Bewertung einer Infiltrationsmaßnahme

Größe	Aussage/Nutzen	Bestimmungsmethodik
Deponiekörper		
Zusammensetzung des Deponiekörpers, organische Anteile, toxische Stoffe	Gasprognose	Abfallkataster (Anlieferungsprotokolle), Analyse von (Bohr-)Proben, Auswertung der Setzungsmessungen?
organische Anteile	Gasprognose	s. Zusammensetzung
Dichte	Fließverhalten	Nivellément, Luftbildauswertung
Wassergehalt	Gasprognose, Sickerwassermenge	Analyse von (Bohr-)Proben, Wasserhaushaltsbilanz
Temperatur	Gasprognose	Temperaturmessungen im Deponiekörper, Sickerwasser, Deponiegas
Fließverhalten		Tracermessung
Sickerwasser		
Menge	Wasserhaushalt	Durchflußmessung
Zusammensetzung (pH-Wert, BSB ₅ /CSB-Verhältnis, org. Säuren, toxische Komponenten)	biochemischer Zustand, Phasenzugehörigkeit	Analytik
Deponiegas		
Zusammensetzung (CH ₄ , CO ₂ , O ₂)	Gasverwertung	(Online-)Analyse von Gasproben
Volumenstrom	Überprüfung des Einflusses der Infiltrationsmaßnahme, Gasverwertung	Durchflußmesser
Unterdruck im Entgasungssystem		Druckmesser
Gasverluste (diffusiv über Oberfläche)	Überprüfung der Gasprognose, Effizienz der Infiltrationsmaßnahme	FID-Begehung
Infiltrationswasser		
Menge		Mengenmessung
Zusammensetzung (Organik, Schwermetalle, Feststoffe, Calcium-Anteil)	„Nährwert“, toxische Relevanz, Betriebssicherheit	Analytik
Sonstiges		
unbeeinflusstes Vergleichsfeld	Überprüfung der Effizienz der Infiltrationsmaßnahme	
Gasprognose	Bei fehlendem Vergleichsfeld einzige Möglichkeit zur Überprüfung der Effizienz der Infiltrationsmaßnahme	

Während einige dieser Größen wie z. B. die Sickerwasser- oder Gaszusammensetzung sich vergleichsweise einfach bestimmen lassen, können andere Parame-

ter nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand oder aufgrund der Heterogenität des Deponiekörpers mit einer hohen Unsicherheit behaftet ermittelt werden. Zu letzterem zählt beispielsweise die Zusammensetzung der Abfallstoffe oder der Wassergehalt im Deponiekörper.

Es muß deshalb das Ziel sein, mit Hilfe praktikabler Meßgrößen den Zustand im Reaktor *Deponie* zu bestimmen und Möglichkeiten zu erarbeiten, die ablaufenden Vorgänge zu beeinflussen. Dazu ist es erforderlich, Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den jeweiligen Größen aufzuzeigen. Dies erfordert die Kenntnis des unbeeinflussten Ausgangszustands.

Im konkreten Fall der Deponie R sollen die Auswirkungen auf die Gasproduktion sowie den Sickerwasseranfall wie folgt ermittelt werden:

Zusammensetzung des Deponiekörpers

Die Daten zur Zusammensetzung des Deponiekörpers im BA 3 kann näherungsweise aus den Anlieferungsmengen ermittelt werden. Beim Einbau der Abfälle wurde bis auf wenige Ausnahmen darauf geachtet, keine Monoablagerungen im Deponiekörper zu schaffen. Des weiteren stehen Daten über die Beschaffenheit der Abfälle im betreffenden Abschnitt der Deponie R zur Verfügung (vgl. DOHMANN ET AL. 1997).

Bei Bohrungen im Deponiekörper wurden im November 1998 Feststoffproben entnommen. An diesen Proben wird das Gaspotential mit Hilfe von Gärtests ermittelt.

Sickerwasser

Das Sickerwasser der Deponie R wird im Rahmen der Überwachung regelmäßig untersucht. Diese Daten stehen für die Begleitung der Infiltrationsmaßnahme zur Verfügung und können erforderlichenfalls um zusätzliche Parameter oder auch eine höhere Beprobungsintensität ergänzt werden. Als problematisch erweist sich bei der Untersuchung des Sickerwassers, daß keine Trennung der Wasserströme der alten Verfüllabschnitten BA 1 und 2 von denen des BA 3 möglich ist. Hier bietet es sich an, den Sickerwasseranfall aus BA 1 und 2 anhand alter Sickerwasserlaufzeichnungen abzuschätzen. Aufgrund der zwischenzeitlich zahlreichen Veränderungen ist allerdings zu vermuten, daß diese Möglichkeit nur bedingt geeignete Ergebnisse erbringen wird.

Deponiegas

Im Gegensatz zum Sickerwasser sieht die Situation bei der Erfassung des Gases sehr gut aus. Der BA 3 kann in zwei Bereiche unterteilt werden. Der südliche Teil stimmt näherungsweise mit der Infiltrationsfläche überein. In diesem Teil wird das Deponiegas über den Kollektorschacht KS5 erfaßt. Hier werden die Gasbrunnen B-42 bis B-48 und B-55 bis B-56 zusammengefaßt. Im von der Infiltration weitgehend unbeeinflussten nördlichen Teil werden die Brunnen B-39 bis B-41, B-49, B-51 bis B-53 und B-57 über den Kollektorschacht KS4 abgesaugt. Nach Aussage des Betreibers sind die Mengen und die Zusammensetzung des Gases für alle Brunnen einzeln sowie die beiden Kollektorschächte getrennt meßbar. Die Festlegung des Meßumfangs und der -intervalle erfolgt in Abstimmung mit dem Deponiebetreiber. Um die Messungen sinnvoll auswerten zu können, ist es erforderlich, zunächst eine orientierende Messung zur Bestimmung der tageszeitlichen Schwankungen (z.T. infolge veränderlicher Betriebsbedingungen) durchzuführen.

Infiltrationswasser

Für die Deponie R stehen grundsätzlich behandeltes und unbehandeltes Sickerwasser, Abwasser aus der Vergärungsanlage, Wasser aus der begleitenden Bachdrainage sowie Brauchwasser zur Disposition. Die regelmäßige Untersuchung des Infiltrationsmediums auf die Zusammensetzung wird durchgeführt.

Die infiltrierten Wassermengen können über die Pumpintervalle ermittelt werden. Eine differenzierte Bestimmung der den einzelnen Strängen zugeleiteten Mengen kann erforderlichenfalls mit Hilfe von Wasseruhren erfolgen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Nach den Vorgaben der TA Siedlungsabfall (TASI 1993) ist auch für Altdeponien, auf denen unbehandelte Siedlungsabfälle abgelagert wurden, nach der Verfüllung die Aufbringung eines Oberflächenabdichtungssystems erforderlich. Vorrangige Ziele einer Abdichtung sind die Minimierung des Sickerwasseranfalls infolge des versickernden Niederschlagswassers sowie die Verhinderung des unkontrollierten Austritts von Deponiegas. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen stellt sich bei diesen Altdeponien die Frage nach einer angepaßten und umweltgerechten Form der Nachsorge. Als Lösungsansatz bietet hier die gesteuerte und kontrollierte Infiltration von Wasser unter ein Abdichtungssystem eine geeignete Möglichkeit, die mit dem Abdichtungssystem angestrebten Ziele - Minimierung der Sicker-

kerwasserneubildung und Erhöhung des Gaserfassungsgrads sowie der Gasproduktionsrate - zu koppeln.

Die Kenntnisse über die Auswirkungen einer Infiltration von Wasser unter einem Abdeckungs- oder Abdichtungssystem auf die Gasproduktion und den Sickerwasseranfall sind bislang gering. In einem vom Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW) geförderten Vorhaben wurde daher vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA) die Infiltration mit Hilfe einer Erhebung unter Betreibern, Planern und Genehmigungsbehörden sowie mit Versuchen im halbtechnischen Maßstab und im Labormaßstab untersucht.

Bei der bundesweiten Erhebung wurden die Erfahrungen von 18 Siedlungsabfalldeponien in Deutschland zusammengetragen und ausgewertet, auf denen eine Rückführung von Wässern unter einer Abdichtung geplant bzw. realisiert ist. Die Infiltrationssysteme dienen in der Regel zur Förderung der Gasproduktion oder zur Minimierung der zu behandelnden Sickerwassermengen. Die Verteilung des Wassers auf und im Deponiekörper erfolgt über vertikale (z. B. Lanzen, Schluckbrunnen) und horizontale Elemente (z. B. Rigolen, Tropfersysteme). Als Infiltrationsmedien kamen Rohsickerwasser, gereinigtes Sickerwasser sowie Grund- und Brauchwasser zum Einsatz. Die infiltrierten Wassermengen variierten stark zwischen 150 und 1.640 mm/a. Große Unterschiede ergaben sich auch bei massen- bzw. volumenspezifischen Infiltrationsraten. Hier reichte das Spektrum von 0,04 bis 0,7 l/Mg d bzw. l/m³ d.

Bei einigen Deponien konnte eine Zunahme der Gasproduktion im Zusammenhang mit den Infiltrationsmaßnahmen festgestellt werden. Als Grund wurde die (bessere) Versorgung mit Wasser sowie mit Nährstoffen und Mikroorganismen, insbesondere beim Einsatz von Rohsickerwasser, angegeben. Daß bei einigen Deponien keine oder keine eindeutigen Auswirkungen festgestellt werden konnten, war unter anderem auch auf die unzulängliche Erfassung der Gasmengen sowie die ungenügende Betreuung der Maßnahme zurückzuführen. In einem Fall war das Restgaspotential bereits weitgehend erschöpft, wie anhand von Gärtests nachgewiesen werden konnte (Deponie H).

Im Rahmen der Untersuchungen in halbtechnischen Deponiesimulationsreaktoren (DSR) wurde an Abfällen, die bereits über einen Zeitraum von rund 3,5 Jahren auf einer Siedlungsabfalldeponie abgelagert waren, der Einfluß der Bewässerung und der Wasserbewegung auf die Gasproduktion sowie die Menge und Zusammen-

setzung des Sickerwassers untersucht. Als Infiltrationsmedium diente gering belastetes Wasser der Deponie R. Die durchschnittliche Infiltrationsrate betrug 214 mm/a bzw. 0,6 mm/d. Die auf die Masse des Abfalls bezogene spezifische Infiltrationsrate lag im Mittel bei 0,84 l/Mg d. In einem weiteren Versuch (Referenzversuch) wurden die gleichen Abfälle ohne die Zugabe von Wasser untersucht.

Die Abfälle produzierten unabhängig von der Betriebsart zwischen 82 und 91 l Gas je kg Trockenmasse. Unter der Annahme, daß Siedlungsabfälle ein Gesamtgaspotential von rund 180 l/kg TR aufweisen (z. B. EHRIG 1986), entsprach die während der DSR-Untersuchungen erzeugte Menge damit etwa 50 % des gesamten Potentials. Die Gasproduktionsraten waren zum Ende der Untersuchungen - ebenso wie auch bei mit den entsprechenden Proben darüber hinaus durchgeführten Gärtests - sehr gering. Damit kann davon ausgegangen werden, daß das Gaspotential der Abfälle aufgrund der günstigen Randbedingungen in den DSR weitgehend ausgeschöpft wurde. Mit Hilfe von anschließend durchgeführten Gärtests an Abfallproben, die aus den DSR ausgebaut wurden, wurde dies bestätigt. Nach einer Versuchsdauer von 28 Tagen ergaben sich nur noch sehr geringe Restgaspotentiale von 1,4 bzw. 3,0 l/kg TR (GB₂₈).

Aufgrund der weitgehenden biochemischen Umsetzung der abbaubaren Abfallbestandteile konnte bei den DSR-Untersuchungen eine Steigerung durch die Infiltration oder die Wasserbewegung auf die Gasproduktion nicht ermittelt werden. Es zeigte sich jedoch, daß durch die Zugabe von Wasser sowie die Förderung der Wasserbewegung eine Vergleichmäßigung der Gasproduktion erzielt werden konnte. Im Gegensatz zu den DSR werden sich die Bedingungen in Siedlungsabfalldeponien im Hinblick auf die Homogenität der Abfälle sowie die physikalischen und biochemischen Randbedingungen weniger günstig darstellen. Durch den in der Regel schichtweisen Aufbau eines Deponiekörpers entstehen sowohl mit Wasser eingestaute als auch trockene Bereiche. Darüber hinaus beeinflußt die Art der Abfälle die Verteilung des Wassers und damit auch der Nährstoffe sowie der für die biochemischen Umsetzungsprozesse notwendigen Mikroorganismen. Zur Förderung der Transportvorgänge und der daraus resultierenden Unterstützung der biochemischen Umsetzungsprozesse ist die kontrollierte Zuführung von Wasser in Siedlungsabfalldeponien als geeignete Maßnahme anzustreben.

Insgesamt wurden während der DSR-Versuche zwischen 1,8 und 2,1 kg Kohlenstoff über die Gasphase ausgetragen. Dies entsprach etwa 30 % des insgesamt in den Abfällen zu Beginn der Untersuchungen enthaltenen organischen Kohlen-

stoffs. Der Austrag an Kohlenstoff über den Sickerwasserpfad betrug nur rund 0,5 bis 1,5 % des Gesamtaustrags. Damit zeigte sich die besondere Bedeutung der biochemischen Gasproduktionsprozesse für die Elimination von Kohlenstoff.

Eine weitere wichtige Erkenntnis der Untersuchungen war, daß sich die Infiltration und die Wasserbewegung nicht negativ auf die Sickerwasserkonzentrationen auswirkten. Die hohen organischen Anfangskonzentrationen im Sickerwasser reduzierten sich innerhalb kurzer Zeit um rund 70 %. Die weitere Verringerung der Konzentrationen im Verlauf der Untersuchungen ließ keine Störung der biochemischen Umsetzungsprozesse erkennen. Infolge der Zugabe von Wasser war weder eine Aufkonzentrierung noch eine Verdünnung feststellbar.

Bei Untersuchungen mit gegenüber den hier infiltrierten Mengen deutlich erhöhten Infiltrationsraten von bis zu 1.860 mm/a nach dem Prinzip des vor allem in Großbritannien verfolgten Konzepts des „flushing reactor“ war die Gasproduktion und damit auch der Gesamtaustrag an Kohlenstoff mit ca. 10 bis 15 % der Anfangsgehalte deutlich geringer (PURCELL ET AL. 1997). Auch bei einer mit hohen Infiltrationsraten (ca. 900 mm/a) beaufschlagten Altdeponie in Deutschland konnte eine rückläufige Gasproduktion festgestellt werden, die nach einer Reduzierung der Infiltrationsmengen wieder anstieg (DREES 1998).

Aus den gesamten Untersuchungsergebnissen kann daher die Schlußfolgerung gezogen werden, daß insbesondere in der ersten Zeit der Nachsorgephase günstige Bedingungen für die biochemischen Abbau- und Umsetzungsprozesse zu schaffen sind. Wie insbesondere die Erfahrungen mit Infiltrationsmaßnahmen bei Siedlungsabfalldeponien zeigten, erscheint die kontrollierte und gesteuerte Infiltration von Wasser unter einer Abdeckung oder Abdichtung als geeignete Lösung. Durch die Gewährleistung einer stabilen und zum Teil sogar verbesserten Gasproduktion wird das Emissionspotential reduziert. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Nutzung des energiereichen Gases. Nach dem Abklingen der Gasproduktion sollte vor allem der Elimination des langfristig das Emissionsverhalten bestimmenden Stickstoffs vorrangige Beachtung zukommen. Da Stickstoff überwiegend über den (Sicker-)Wasserpfad aus dem Deponiekörper ausgetragen wird, sind dann auch Strategien mit einer verstärkten Beaufschlagung von Wasser denkbar.

7 Literatur

- BAUER, W.P.
KINDSMÜLLER, W.
MEISINGER, S.
ROSINGER, S.
BIENER, E.
BLAKEY, N.
BRADSHAW, K.
REYNOLDS, P.
KNOX, K.
BOTHMANN, P.
BRÄCKER, W.
COLLINS, H.-J.
BRAMMER, F.
CONRAD, H.
KABBE, G.
LOHOFF, W.
CORD-LANDWEHR, K.
DACH, J.
DANHAMMER, J.
JAGER, J.
DAMIECKI, R.
LANZRATH, B.
- Infiltration von Sickerwasser - ein Weg zur Aktivierung der Deponie.
Müll und Abfall, H. 12, S. 758-761 (1997)
- Persönliche Mitteilung (1997)
- Bio-Reactor Landfill - A Field Trial of Accelerated Waste Stabilisation.
in: Proc. Sardinia 97, 6th Int. Landfill Symposium, Cagliari, Italy, pp. 375-385 (1997)
- Die Befeuchtung des Deponiekörpers zur Anregung der Gasproduktion - kritische Betrachtung -.
in: Rettenberger/Stegmann (Hrsg.): Neue Aspekte bei der Deponiegasnutzung, Trierer Berichte, Bd. 11, S. 75-85 (1997)
- Empfehlung zur Rückführung von Sickerwasser in Deponien.
in: Abfallwirtschafts Fakten 1: Informationsblatt des Niedersächsischen Landesamts für Ökologie NLÖ und des Niedersächsischen Landesamts für Bodenforschung, Hildesheim, unveröffentlicht (1995)
- Bewässerung von Müloberflächen.
Müll und Abfall, H. 5, S. 260-278 (1994)
- „Probenahme von Feststoffen aus Altdeponien und Altablagerungen“ (SAV 1).
in: Tagungsband zum 2. Statusseminar des BMBF-Verbundvorhabens „Deponiekörper“ am 4./5. Februar 1997 in Wuppertal, Umweltbundesamt (Hrsg.), PTA-WAS des BMBF (1997)
- Stabilisierung von Mülldeponien durch eine Sickerwasserkreislaufführung.
Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 66 (1986)
- Ergebnisse eines Laborvergleichs zur Harmonisierung des Gärtests für feste Siedlungsabfälle.
Müll und Abfall, H. 12, S. 762-771 (1997)
- Anpassung einer Hausmülldeponie an den Stand der Technik durch gezielte Stabilisierung.
in: Fehlau/Stief (Hrsg.): Praxis der Abfalltechnik, S. 231-247 (1989)

DOHMANN, M. KABBE, G.	Möglichkeiten der Infiltration von Wasser in einen Deponiekörper zur Gewährleistung einer stabilen Gasproduktion und der Reduzierung des Emissionspotentials. 1. Zwischenbericht des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen zum Untersuchungsvorhaben des Landesumweltamts NRW, unveröffentlicht (1997b)
DOHMANN, M. KABBE, G.	Möglichkeiten der Infiltration von Wasser in einen Deponiekörper zur Gewährleistung einer stabilen Gasproduktion und der Reduzierung des Emissionspotentials. 2. Zwischenbericht des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen zum Untersuchungsvorhaben des Landesumweltamts NRW, unveröffentlicht (1997c)
DOHMANN, M. WIRTZ, A. KABBE, G. ROOS, H.-J. FORGE, F.	Emissionsverhalten umweltrelevanter Schadstoffe in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Abfalls und der Standzeit der Deponien. Abschlußbericht des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen zum Teilvorhaben des BMBF-Verbundvorhabens „Deponiekörper“ (FKZ 1460799C), unveröffentlicht (1997a)
DREES, K.	Persönliche Mitteilung (1998)
EHRIG, H.-J.	Untersuchungen zur Gasproduktion aus Hausmüll. Müll und Abfall, H. 5, S. 173-183 (1986)
FRÖCHTENICHT	Persönliche Mitteilung (1997)
GIBIS, G. PERSON, G.	Bewässerungsversuch Deponie C. Vortrag auf der Fachtagung des Arbeitskreises Deponiegas Baden-Württemberg am 2.-3. Juni (1997)
GUGGEMOS	Persönliche Mitteilungen (1998)
HOCHSTATTER	Persönliche Mitteilung (1997)
IA GMBH	Optimierung von biologischen Umsetzungsvorgängen in abgedichteten Deponien durch Reinfiltration von Sickerwasser. Schlußbericht zum Vorhaben E9, erstellt durch Ingenieurbüro IA GMBH Ingenieure im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen, unveröffentlicht (1996)
IA GMBH	Persönliche Mitteilungen (1998)

- KABBE, G.
WIRTZ, A.
ROOS, H.-J.
DOHMANN, M.
- Zusammenhang zwischen Stoffpotential und Emissionsverhalten von Altablagerungen und Altdeponien.
in: Tagungsband zum 2. Statusseminar des BMBF-Verbundvorhabens „Deponiekörper“ am 4./5. Februar 1997 in Wuppertal, Umweltbundesamt (Hrsg.), PTA-WAS des BMBF (1997)
- KETTERN, J.
DREES, K.
UTSCH, J.
- Untersuchungen zur beschleunigten Inertisierung einer Altdeponie.
in: Tagungsband zum 2. Statusseminar des BMBF-Verbundvorhabens „Deponiekörper“ am 4./5. Februar 1997 in Wuppertal, S. 79-104 (1997)
- KINDSMÜLLER, W.
- Persönliche Mitteilung (1998)
- KINDSMÜLLER, W.
- Sickerwasserinfiltration in Hausmülldeponien.
Umwelt, H. 11/12, S. 50-54 (1997)
- KRÜMPELBECK, I.
- Einfluß der Oberflächenabdeckungen auf die Sickerwasserbildung und Gasproduktion bei Altdeponien und Altablagerungen bzw. Altstandorten.
Studie im Auftrag des Landesumweltamts Nordrhein-Westfalen (LUA NRW), unveröffentlicht (1996)
- MENNERICH, A.
- Beitrag zur anaerob-aeroben Behandlung von Sickerwässern aus Hausmülldeponien.
Institut für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig, Heft 44 (1988)
- MÖLLENBERND
- Persönliche Mitteilung (1997)
- PURCELL, B.E.
SOLLARS, C.J.
BUTLER, A.P.
- Enhanced Moisture Movement in Simulated Landfill Environments.
in: Proc. Sardinia 97, 6th Int. Landfill Symposium, Cagliari, Italy, pp. 409-418 (1997)
- REUTER
- Persönliche Mitteilung (1997)
- RYTEC
- Optimierung der Gasproduktion durch deponieinterne Versuche.
Zwischen- und Schlußbericht der Rytec AG im Auftrag des Magistrats der Stadt Frankfurt am Main, Umweltamt, unveröffentlicht (1997)
- SAAL
- Persönliche Mitteilung (1997)
- SASSE
- Persönliche Mitteilung (1997)
- SCHIRMER
- Erfahrungsbericht zur Sickerwasserkreislaufführung auf der Deponie M.
Bericht der SCHIRMER UMWELTECHNIK GMBH, unveröffentlicht (1996)

- SCHODER
Grundlagen und Anfangserfahrungen mit temporären Abdichtungen und Infiltration und deren Einfluß auf die Gasbildung.
Erfahrungsaustausch Deponiegasnutzung '97, Fachtagung an der Fachhochschule Rheinland-Pfalz, Trier 3./4. März (1997)
- STEGMANN, R.
BUCK, R.
Der Einfluß der biochemischen Umsetzungsprozesse auf den Wasserhaushalt von Deponien.
in: Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig: Gas- und Wasserhaushalt von Deponien, Int. Fachtagung in Braunschweig, Heft 33 (1982)
- SEYFAHRT, R.
Über die Vorgänge in Kornhaufen beim Durchfließen von Wasser.
Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Heft 15 (1965)
- TIEBEL-PAHLKE
UBA
Persönliche Mitteilungen (1998)
Hausmülldeponien in der Bundesrepublik Deutschland.
Texte des Umweltbundesamts 44/93 (1993)
- WALKER, A.N.
BEAVEN, R.P.
POWRIE, W.
Overcoming Problems in the Development of a High Rate Flushing Bioreactor Landfill.
in: Proc. Sardinia 97, 6th Int. Landfill Symposium, Cagliari, Italy, pp. 398-408 (1997)
- WIENBERG, R.
GOETZ, D.
Die gaschromatographische Bestimmung von Kohlenstoffdioxid aus dem Sickerwasser von Mülldeponien.
Müll und Abfall, H. 6, S. 176-177 (1984)
- WOLFFSON, C.
Untersuchungen über den Einfluß der Hausmüllzusammensetzung auf die Sickerwasser- und Gasemissionen - Untersuchungen im Labormaßstab.
in: EHRIG, H.-J.; MENNERICH, A. (Hrsg.): Sickerwasser aus Mülldeponien - Einflüsse und Behandlung - Fachtagung März 1985, Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen, TU Braunschweig, Bd. 39, S. 119-146 (1985)

Seit 1. April 1994 sind bisher folgende „Materialien“ des Landesumweltamtes NRW erschienen:

1	Der Dynamische Daphnientest – Erfahrungen und praktische Hinweise – Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 44 S.	15,00 DM
2	Umsetzung der TA-Siedlungsabfall bei Deponien 2. Abfallwirtschaftliches Fachgespräch Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 99 S.	15,00 DM
3	Verwertung von Elektro- und Elektronikgeräten Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 153 S.	20,00 DM
4	Einsatz alternativer Baustoffe in Abdichtungssystemen Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 91 S.	15,00 DM
5	Einwicklung im Bereich der Sonderabfallentsorgung Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 39 S.	15,00 DM
6	Ökologische Auswirkungen von Fischteichen auf Fließgewässer Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 208 S.	25,00 DM
7	Ökologische Effizienz von Renaturierungsmaßnahmen an Fließgewässern Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 462 S.	28,00 DM
8	Vermeidung von Bunkerbränden in Abfallverbrennungsanlagen mit Hilfe der Infrarot-Thermographie Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 53 S.	15,00 DM
9	Prozesseittechnik in Anlagen der chemischen Industrie – Anlagenschutz und sicherheitsrelevante Komponenten Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 119 S.	20,00 DM
10	Sicherheitstechnische Hinweise und Anforderungen an Abschott- und Entlastungssysteme aus der Sicht der Störfall-Verordnung Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 40 S.	15,00 DM
11	Literaturstudien zum PCDD/F-Transfer vom Boden in die Nahrungskette Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 149 S.	25,00 DM
12	Die verlust- und kontaminationsfreie Probenahme und -vorbereitung von Wässern und Feststoffen Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 203 S.	28,00 DM
13	Essener Verfahren zur Bewertung von Altlastenverdachtsflächen – Erstbewertung und normierte Charakterisierung – Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 66 S.	15,00 DM
14	Optimierung der thermischen Behandlung organischer chlorhaltiger Problemabfälle Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 132 S.	25,00 DM
15	Entsorgungsbericht 1993 über Sonder- und Massenabfälle in NRW Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 75 S.	20,00 DM
16	Begleitende meßtechnische Erfolgskontrolle bei der Sanierung einer Textilreinigungsanlage Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 60 S.	15,00 DM

Vertrieb: Landesumweltamt NRW • Postfach 102 363 • 45023 Essen

- 17 Ausgewählte Untersuchungsergebnisse der halbtechnischen Versuchskläranlage
– Untersuchungen zur Stickstoffelimination –
– Praxiserprobung von Online-Meßtechnik –
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 110 S. 20,00 DM
- 18 Vergleich verschiedener europäischer Untersuchungs- und Bewertungsmethoden für Fließgewässer
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 140 S. 25,00 DM
- 19 Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer vor gefährlichen Stoffen
– Ergebnisse der Erprobung in NRW –
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 150 S. 25,00 DM
- 20 Information und Dokumentation bei Deponien
4. Abfallwirtschaftliches Fachgespräch, 26. Oktober 1994
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 98 S. 20,00 DM
- 21 Ausbreitungsuntersuchungen von Gerüchen anhand einer Modellquelle
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 57 S. 15,00 DM
- 22 Erschütterungen und Körperschall des landgebundenen Verkehrs
– Prognose und Schutzmaßnahmen –
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 658 S. 40,00 DM
- 23 Naturraumspezifische Leitbilder für kleine und mittelgroße Fließgewässer in der freien Landschaft
Eine vorläufige Zusammenstellung von Referenzbach- und Leitbildbeschreibungen für die Durchführung von Gewässerstrukturgütekartierungen in Nordrhein-Westfalen
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 127 S. 25,00 DM
- 24 Siedlungsabfalldeponien – Oberflächenabdichtung und Sickerwasser
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 162 S. 25,00 DM
- 25 Thermodynamische Analyse der Verfahren zur thermischen Müllentsorgung
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 121 S. 25,00 DM
- 26 Normierung und Konventionen in der Abfallanalytik – Aufgaben und Ziele
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 188 S. 28,00 DM
- 27 Entsorgungsbericht 1994 über Sonder- und Massenabfälle in Nordrhein-Westfalen
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 92 S. 20,00 DM
- 28 Umweltüberwachung im Spannungsfeld; integral/medial – privat/staatlich
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 289 S. 30,00 DM
- 29 Bauabfallentsorgung – von der Deponierung zur Verwertung und Vermarktung
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 181 S. 28,00 DM
- 30 Ergebnisse von Dioxin-Emissionsmessungen an Industrieanlagen in NRW
– Dioxinmeßprogramm Nordrhein-Westfalen –
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 114 S. 20,00 DM
- 30 Results of Measurements of the Emissions of Dioxins by Industrial Plants in North Rhine-Westphalia – Dioxins Measurement Programme
North Rhine-Westphalia – Final Report 1996
English translation of the report LUA-Materialien No. 30 (1996); original edition published in German language – Translated by Edith Navé, Hohenbrunn, Germany

Vertrieb: Landesumweltamt NRW • Postfach 102 363 • 45023 Essen

- 31 Umsetzung der TA Siedlungsabfall bei Deponien in NRW
Fortbildungsveranstaltung am 27./28. Juni 1995 im Bildungszentrum für
die Entsorgungs- und Wasserwirtschaft GmbH (BEW) in Essen
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 189 S. 28,00 DM
- 32 Medienübergreifendes Arbeiten im technischen Umweltschutz
Beiträge aus dem Fachgespräch anlässlich der Verabschiedung von
Herrn Abteilungsdirektor Dr.-Ing. H.-O. Weber am 06. Juli 1995
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 78 S. 20,00 DM
- 33 Handbuch der Laborpraxis für Ver- und Entsorgerinnen/
Ver- und Entsorger – 1. und 2. Ausbildungsjahr –
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 186 S. 30,00 DM
- 34 Explosionsschutz bei der Lagerung brennbarer Flüssigkeiten
Entwicklungen und Erkenntnisse
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 54 S. 18,00 DM
- 35 Physikalisch-chemische und biologische Auswirkungen bei der Verwendung
von Waschbergen in Schifffahrtskanälen
Untersuchungsbericht des Arbeitskreises „Waschberge im Wasserbau“
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 154 S. 25,00 DM
- 36 Anforderungen an sachverständige Stellen für die Bekanntgabe und die
Zulassung im Bereich des Immissionsschutzes
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 132 S. 25,00 DM
- 37 Schadstoffströme bei der Gebrauchtholzverwertung für
ausgewählte Abfallarten
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 275 S. 30,00 DM
- 38 Zivile Anschlußnutzung von Militärstandorten
– Risikofaktor Altlasten/Bodenbelastung – Tagungsband
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 168 S. 25,00 DM
- 39 Flächenhafter Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in das Grundwasser
– Abschlußbericht, Dezember 1994
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 217 S. 30,00 DM
- 40 Gewässerüberwachung in Nordrhein-Westfalen
Teil I: Oberirdische Gewässer
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 40 S. 15,00 DM
- 41 Brand- und Zersetzungsprodukte
Abschlußbericht des Projekts „Integration von Daten zu Brand- und
Zersetzungsprodukten in das Informationssystem für gefährliche/
umweltrelevante Stoffe (IGS)“
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 134 S. 25,00 DM
- 42 Kreislaufwirtschaft und Abfallverwertung in thermischen Prozessen
9. Aachener Kolloquium am 5. Dezember 1996 – Tagungsband –
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 156 S. 25,00 DM
- 43 Identification of Relevant Industrial Sources of Dioxins and Furans
in Europe (The European Dioxin Inventory) – Final Report –
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 926 S. 50,00 DM

Vertrieb: Landesumweltamt NRW • Postfach 102 363 • 45023 Essen

44	Emissionskataster der genehmigungsbedürftigen Anlagen im Lande Nordrhein-Westfalen Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 32 S.	15,00 DM
45	Entsorgungsbericht 1995 über Sonder- und Massenabfälle in Nordrhein-Westfalen Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 101 S.	22,00 DM
46	Validierung von Passivsammlern für Immissionsmessungen von Kohlenwasserstoffen Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 95 S.	22,00 DM
46	Validation of Passive Samplers for Measurements of Hydrocarbons in Ambient Air English translation of the report LUA-Materialien No. 46 (1998) original edition published in German language Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 92 S.	30,00 DM
47	Leitfaden für Analysen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung von Abfällen aus Haushaltungen Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 131 S.	25,00 DM
48	Kommunale Abfallvermeidungs- und -Verwertungsmaßnahmen in NRW Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 92 S.	25,00 DM
49	Vollzugshilfe zum Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz • Dichtetabelle • EAK-Schlüssel-Kennzeichnung anhand von Nachweispflichten Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 66 S.	25,00 DM
50	Konzept zur Optimierung der Energieversorgung bei einem Unternehmen der Wellpappenherstellung Abschlußbericht des Forschungsvorhabens des Lehrstuhls für Nukleare und Neue Energiesysteme (NES) der Ruhr-Universität Bochum im Auftrag des Landesumweltamtes Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 131 S.	30,00 DM
51	Konzept zur Optimierung der Energieversorgung bei einem Unternehmen der Textilverarbeitung Abschlußbericht des Forschungsvorhabens des Lehrstuhls für Nukleare und Neue Energiesysteme (NES) der Ruhr-Universität Bochum im Auftrag des Landesumweltamtes Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 182 S.	30,00 DM
52	Analysenverfahren für Abwasser Essen: Landesumweltamt NRW 1999, 86 S.	22,00 DM
53	Entsorgungsbericht 1996/97 über Sonder- und Massenabfälle in Nordrhein-Westfalen Essen: Landesumweltamt NRW 1999, 104 S.	22,00 DM
54	Gezielte Infiltration von Wasser in einen Deponiekörper zur Reduzierung des Emissionspotentials Essen: Landesumweltamt NRW 1999, 104 S.	22,00 DM

Vertrieb: Landesumweltamt NRW • Postfach 102 363 • 45023 Essen
