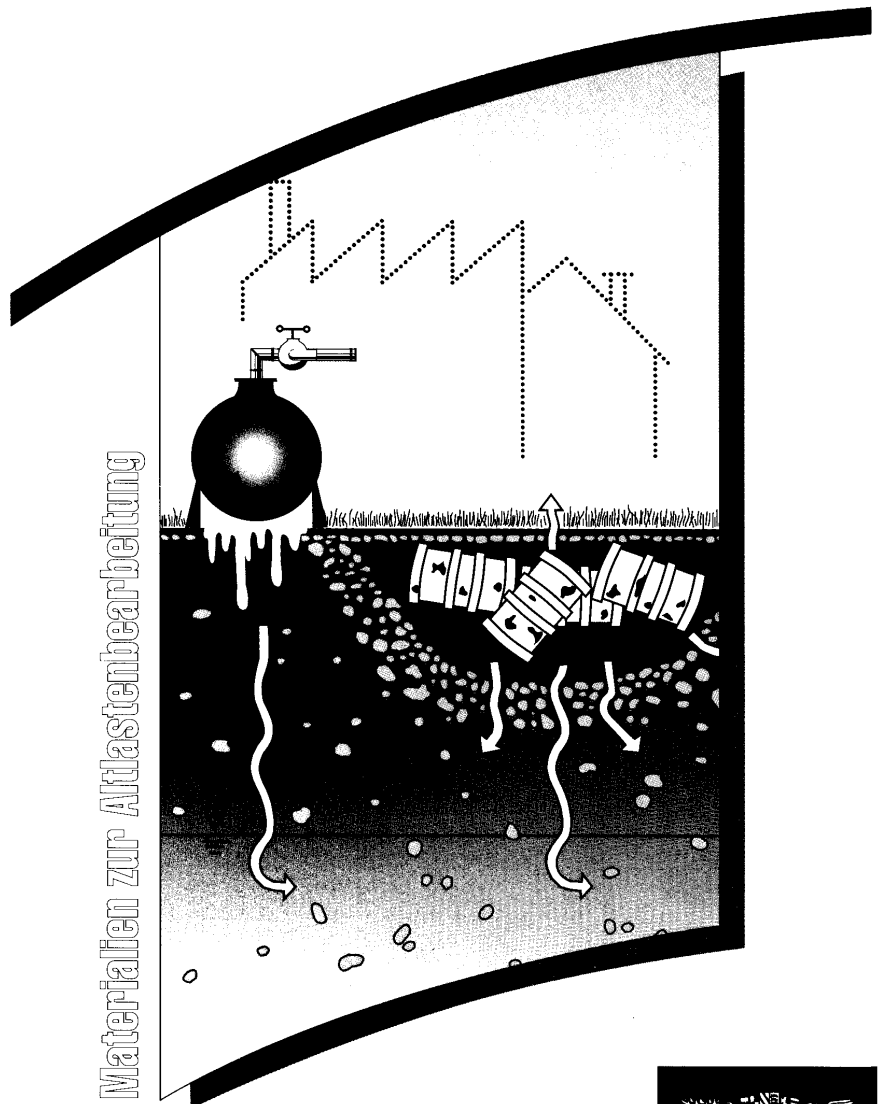


**Handbuch Altlasten  
und Grundwasserschadensfälle**

**Der Deponiegashaushalt  
in Altablagerungen  
- Leitfaden Deponiegas -**

Materialien zur Altlastenbearbeitung



**BODEN  
ABFALL  
ALTlastEN**



**Handbuch Altlasten  
und Grundwasserschadensfälle**

# **Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen - Leitfaden Deponiegas -**



Herausgegeben von der  
Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
1. Auflage

Karlsruhe 1992



Altlastenfachinformation im WWW

## **Impressum**

**Herausgeber:** Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg

**Projektbearbeitung:** Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg  
Abteilung Boden, Abfall, Altlasten  
Referat 54 – Altlastensanierung  
Dr. I. Blankenhorn, A. Kern  
Referat 53, P. Hoff  
Referat 55, D. Hueber

**Verfasser:** Prof. G. Rettenberger  
Dipl.-Geologe H. Mezger  
Ingenieurgruppe RUK Prof. G. Rettenberger  
Dipl.-Ing. S. Urban-Kiss & Partner  
Begutachtung, Beratung, Projektplanung und Forschung für Ab-  
fallwirtschaft, Deponietechnik und Altlastensanierung  
Stuttgart Trier

Karlsruhe, Oktober 1992

**Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage.  
Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt.  
Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für  
eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.**

# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT DES HERAUSGEBERS .....</b>	<b>1</b>
<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>2. GRUNDLAGEN ZUM DEPONIEGASGESCHEHEN.....</b>	<b>3</b>
2.1. BEGRIFFSBESTIMMUNG DEPONIEGAS .....	3
2.2. AUSWIRKUNGEN VON DEPONIEGAS.....	3
2.2.1. Gefährdung durch Brand- und Explosionsgefahr, bzw. Erstickungsgefahr .....	3
2.2.2. Gesundheitsgefahren durch Deponiegasspurenstoffe.....	4
2.2.3. Auswirkungen auf die Atmosphäre .....	5
2.3. BESCHREIBUNG DES GASHAUSHALTES .....	5
2.3.1. Definition .....	5
2.3.2. Gasproduktion .....	6
2.3.3. Gasableitung.....	15
2.3.4. Gasumwandlung (i.a.R. Methanoxidation).....	16
2.3.5. Gasadsorption/ Gasabsorption.....	16
2.4. EINFLUßFAKTOREN AUF DEN GASHAUSHALT .....	17
2.4.1. Milieubedingungen .....	17
2.4.2. Externe Faktoren .....	20
2.5. LANGZEITVERHALTEN DER DEPONIEGASPRODUKTION .....	23
<b>3. MAßNAHMEN ZUR GEFÄHRDUNGSABSCHÄTZUNG .....</b>	<b>28</b>
3.1. CHARAKTERISIERUNG VON ALTABLAGERUNGEN ANHAND VON DATEN AUS DER HISTORISCHEN ERKUNDUNG ("TYPISIERUNG") .....	28
3.1.1. Zielsetzung der "Typisierung" .....	28
3.1.2. Entwicklung des Verfahrens der "Typisierung".....	29
3.1.3. Durchführung der "Typisierung".....	29
3.1.4. "Typisierung" des Modellstandortes Osterhofen.....	31
3.2. UNTERSUCHUNGSMETHODEN.....	33
3.2.1. Gaskonzentrationsmessungen.....	34
3.2.2. Gasemissionsmessungen.....	53
3.2.3. Sonderuntersuchungen .....	61
3.2.4. Raumlufmessungen .....	72
3.2.5. Gasanalytik.....	76
<b>4. HANDLUNGSANWEISUNG FÜR DEN ANWENDER .....</b>	<b>81</b>
4.1. ERKUNDUNGSSTRATEGIE.....	81
4.1.1. Stoffgefährlichkeit $r_0$ nach historischer Erkundung.....	83
4.1.2. Stoffgefährlichkeit $r_0$ nach technischer Erkundung .....	85
4.1.3. Sofortmaßnahmen.....	87
4.1.4. Sofortmaßnahmen aufgrund von Meßergebnissen.....	87
4.2. VORGEHENSWEISE BEI DER ERKUNDUNG .....	88
4.2.1. Historische Erkundung ( $E_{0-1}$ ) .....	88
4.2.2. Technische Erkundung ( $E_{1-3}$ ).....	89
4.2.3. Eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/ Sanierungsvorplanung ( $E_{3-4}$ ).....	92
4.3. FALLBEISPIELE .....	93
4.3.1. Beispiel einer Altablagerung ohne Bebauung, keine Nutzungsänderung vorgesehen.....	93
4.3.2. Beispiel einer Altablagerung mit Randbebauung.....	94
<b>5. LITERATURÜBERSICHT.....</b>	<b>100</b>

<b>ANLAGEN</b> .....	<b>103</b>
ANLAGE 1: KURZBESCHREIBUNGEN MODELLSTANDORTE.....	103
<i>Anlage 1.1: Kurzbeschreibung Modellstandort Mannheim</i> .....	103
<i>Anlage 1.2: Kurzbeschreibung Modellstandort Osterhofen</i> .....	103
<i>Anlage 1.3: Kurzbeschreibung Modellstandort Herten</i> .....	104
<i>Anlage 1.4: Kurzbeschreibung Modellstandort Bitz</i> .....	104
ANLAGE 2: ENTWICKLUNG DES VERFAHRENS DER "TYPISIERUNG" .....	105
<i>Merkmale von Altablagerungen</i> .....	105
<i>Betrieb der Deponie</i> .....	105
<i>Standort- und Rahmenbedingungen</i> .....	107
<i>Ergänzende Angaben</i> .....	108
<i>Untersuchung</i> .....	108
<i>Einfaktorielle Varianzanalyse</i> :.....	109
ANLAGE 3: ERFASSUNGSBOGEN: "TYPISIERUNG VON ALTABLAGERUNGEN" .....	112
ANLAGE 4: ÜBERSICHT ÜBER DIE 84 UNTERSUCHTEN ALTABLAGERUNGEN .....	115
ANLAGE 5: DIE KLASSENEINTEILUNG DER 8 MERKMALE .....	118
ANLAGE 6: DIE 84 ALTABLAGERUNGEN MIT DEN KLASSIERTEN MERKMALEN, GEORDNET NACH PHASEN .....	119
ANLAGE 7: ERMITTLUNG EINES REPRÄSENTATIVEN RASTERS BEI SONDENMESSUNGEN .....	121
<b>ANLAGE 8: AUSWERTUNG VON DRUCKMESSUNGEN BEI EINEM ABSAUGVERSUCH</b> .....	<b>123</b>
ANLAGE 9: DURCHFÜHRUNG VON FAULVERSUCHEN MIT MATERIALPROBEN VOM MODELLSTANDORT MANNHEIM .....	125
ANLAGE 10: ERLÄUTERUNG ZUR RICHT- UND GRENZWERTTABELLE .....	127
ANLAGE 11: ALLGEMEINE HINWEISE ZU DEN ORTSBEZOGENEN FAKTOREN .....	129
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>132</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>133</b>
<b>INDEXVERZEICHNIS</b> .....	<b>134</b>

## Vorwort des Herausgebers

In Baden-Württemberg sind in der Vergangenheit an ca. 17.000 Standorten Hausmüll und sonstige Abfälle in mehr oder weniger großen Mengen abgelagert worden. Zur Zeit sind flächendeckende Erhebungen in den einzelnen Gebietskörperschaften im Gange, die u.a. die Zahl an Altablagerungen möglichst vollständig erfassen sollen. Ob und in welchem Maße von diesen Altablagerungen heute noch Gefahren ausgehen, ist nicht nur für die Fachverwaltungen des Landes, sondern auch für die bei der Ausweisung von Flächennutzungs- und Bauleitplänen in der Verantwortung stehenden Kommunen eine sehr wichtige Frage.

Die bisher durchgeführten technischen Erkundungen an Altablagerungen lassen erwarten, daß Gefährdungen über den Gas- bzw. Luftpfad nur noch an relativ wenigen Standorten gegeben sind; somit auch ein Sanierungsbedarf nur in wenigen Fällen besteht. Dennoch ist es unabdingbar, sich in jedem Einzelfall hinreichende Klarheit über das Gefährdungspotential durch Deponiegas zu verschaffen, um sicher Gefährdungen durch Deponiegas auszuschließen, aber auch, wenn erforderlich, Sofortmaßnahmen z.B. bei Randbebauung gezielt einleiten zu können. Um solche Entscheidungen schnell und kostengünstig treffen zu können, wurde der vorliegende Leitfaden entwickelt.

Ein weiteres Ziel des Leitfadens ist es, einen einheitlichen Rahmen für die Untersuchung des Deponiegaspfades zu schaffen. In der Praxis werden bisher sehr unterschiedliche Techniken und Verfahren zur Erkundung der Deponiegassituation angewandt, so daß Ergebnisse u.U. nur schwer vergleichbar sind und nicht selten kontroverse Schlußfolgerungen gezogen werden. Im Rahmen des Modellstandortprogrammes des Landes Baden-Württemberg wurden an verschiedenen Standorten unterschiedliche Methoden getestet und in ihrer Effizienz verglichen. Das Fazit aus dieser praktischen Erfahrung ist im Leitfaden niedergelegt, wobei auch zahlreiche an anderer Stelle gemachten Erfahrungen mit eingeflossen sind.

Im Leitfaden wird erstmalig ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, ausgehend von Daten aus der historischen Erkundung eine erste schnelle Gefährdungseinschätzung der Gassituation vorzunehmen. Darauf aufbauend können dann gezielte Untersuchungen für den Einzelfall durchgeführt werden. Hierzu werden im Leitfaden Empfehlungen zur Anwendung und Handhabung bestimmter Methoden gegeben. Darüber hinaus gibt der Leitfaden auch Hilfestellungen zur Bewertung des Deponiegaspfades.

Es ist zu erwarten, daß bei der praktischen Anwendung der hier vorgelegten Empfehlungen neue Erkenntnisse gewonnen werden, die im Rahmen einer Fortschreibung des Leitfadens berücksichtigt werden sollen. Für eine Rückmeldung der Anwender ist der Herausgeber daher dankbar.

Karlsruhe, im Juli 1992

Dr.-Ing. Seng  
(Ltd. Baudirektor)

# 1. Einleitung

Bei Altablagerungen spielen mögliche Gefährdungen durch Deponiegas eine wesentliche Rolle. Solche Gefährdungen zu erkennen und zu bewerten ist Zielsetzung dieses Leitfadens. Die Auswertung neuerer Literatur und die systematische Auswertung vorhandener Untersuchungsdaten von Altablagerungen haben zu einer Methodik geführt, die eine solche Gefährdungsabschätzung auf der Basis von Deponiedaten sowie Untersuchungen der Gasphase ermöglicht.

In Baden-Württemberg hat sich bei der Erkundung und Bewertung von Altablagerungen das stufenweise Vorgehen nach dem Altlastenhandbuch (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN - WÜRTTEMBERG, 1988) bewährt. Bei der Gefährdungsabschätzung einer Altlast wird beim baden-württembergischen Verfahren die formale Trennung der einzelnen Bewertungsschritte durch die Definition von Beweismustern ersetzt, die in Abhängigkeit vom Informationsumfang die Aussagesicherheit der Bewertung charakterisieren. Mit diesem Verfahren soll eine vergleichende Bewertung von Verdachtsflächen im Hinblick auf ihre Gefährlichkeit für die einzelnen Schutzgüter durchgeführt werden. Anhand der Bewertungsergebnisse erfolgt eine Prioritätensetzung für Folgemaßnahmen und die Ermittlung des Handlungsbedarfs im Einzelfall. Die Prioritätensetzung (Dringlichkeit von Maßnahmen) richtet sich nach dem von der Verdachtsfläche ausgehenden Risiko, der Handlungsbedarf (Art der Maßnahme) darüber hinaus nach dem Erkundungsstand ("Beweismuster").

Ausgangspunkt für die Bewertung von Verdachtsflächen ist die Abschätzung der Stoffgefährlichkeit ( $r_0$ -Wert), also die vom abgelagerten Material ausgehende Gefahr. Die Stoffgefährlichkeit ist für die einzelnen Schutzgüter getrennt zu ermitteln.

Der Einfluß der örtlichen Verhältnisse wird durch weitere Verfahrensschritte (Einsetzen von Multiplikatoren, sogenannte m-Werte) berücksichtigt. Die örtlichen Verhältnisse können im Hinblick auf die Ausgangsgröße Stoffgefährlichkeit gefahrminimierend, gefahrerhöhend oder ohne Einfluß sein. Nach Berücksichtigung dieser Faktoren ist das von der Verdachtsfläche ausgehende tatsächliche Risiko ermittelt. Eine Gewichtung nach der Bedeutung des Schutzgutes wird durch einen weiteren Faktor vorgenommen. Das dann erhaltene maßgebliche Risiko bestimmt das zur Behandlung der Altablagerung gebotene Vorgehen.

Das im vorliegenden Leitfaden empfohlene Vorgehen dient in erster Linie dazu, die Stoffgefährlichkeit von Deponiegas zu ermitteln. Untersuchungen, die in Zusammenhang mit der Erkundung anderer Schutzgüter z.B. Grundwasser oder Boden durchgeführt werden, können darüber hinaus die Erkundung des Deponiegashaushaltes ergänzen. Die Erkundung für das Schutzgut Luft muß daher immer in geeigneter Weise in das Gesamterkundungsprogramm eingebunden werden.

Wesentliche Erkenntnisse und Erfahrungen hinsichtlich des Deponiegasgeschehens wurden im Rahmen des Modellstandortprogrammes des Landes Baden - Württemberg gewonnen. Besonders an den beiden Modellstandorten Mannheim, Friesenheimer Insel, und Osterhofen, Kreis Ravensburg wurden Erkundungsmethoden erprobt und weiterentwickelt. Der vorliegende Leitfaden basiert auf diesen Ergebnissen.

## 2. Grundlagen zum Deponiegasgeschehen

### 2.1. Begriffsbestimmung Deponiegas

Als Deponiegas werden i.a. die im Deponiekörper durch mikrobielle Abbauprozesse entstandenen gasförmigen Stoffwechselprodukte, soweit sie nicht gelöst werden, sowie die in die Gasphase übergegangenen abgelagerten Stoffe bezeichnet.

Nach dieser Definition zählt Deponiegas zu den Biogasen bzw. Faul- oder Sumpfgasen. Entsprechend der Gasproduktion durch biologische Abbauvorgänge im Deponiekörper enthält das entstandene Gasgemisch vor allem Methan- und Kohlendioxid. Nach DVGW Arbeitsblatt G 260 sind Naturgase in die 2. Gasfamilie eingestuft (DVGW 1983).

### 2.2. Auswirkungen von Deponiegas

In Deponien, die mit Hausmüll oder hausmüllähnlichen Abfällen verfüllt werden, kommt es nach einer gewissen Zeit infolge von im Deponiekörper unter Ausschluß von Sauerstoff (anaerober Abbau) ablaufenden mikrobiologischen Umsetzungsprozessen zur Gasbildung. Dabei werden die in den eingelagerten Abfällen, speziell im Hausmüll enthaltenen Biomassen, wie z.B. Lebensmittelreste, Speiseabfälle, Grünabfälle, Papier, Textilien, Holz, Hausabfälle etc, zersetzt. Neben den durch diese biologischen Abbauprozesse entstehenden Gasbestandteilen Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) können im Deponiegas noch weitere Komponenten vorkommen, die aufgrund ihrer chemisch - physikalischen Eigenschaften (z.B. Dampfdruck) zum Übertritt aus den abgelagerten Stoffen in die Gasphase tendieren. So können im Deponiegas u.a. auch eine Vielzahl von Kohlenwasserstoffen nachgewiesen werden. Verläßt das im Deponiekörper gebildete Biogas die Ablagerung als unkontrollierte Emission, kann es zur Gefahr für die Umwelt werden.

#### 2.2.1. Gefährdung durch Brand- und Explosionsgefahr, bzw. Erstickungsgefahr

Methan ist ein brennbares Gas, das bei Zumischung bestimmter Mengen Luft ein explosionsfähiges Gemisch bildet<sup>1</sup>. Der **Explosionsbereich** von Methan allein liegt bei Luftzumischung bezogen auf das Gesamtgemisch zwischen der unteren Explosionsgrenze (UEG) 5 Vol % und der oberen Explosionsgrenze (OEG) 15 Vol %.

Dieser Explosionsfähigkeit wirkt Kohlendioxid und Wasserdampf entgegen (inertisierende Wirkung).

---

<sup>1</sup> Eine Explosion ist eine schnell verlaufende Verbrennung. Unter einer Verbrennung versteht man eine oxidative Reaktion unter Flammerscheinung. Dabei gelten für die Flammenausbreitung die beiden stabilen Grenzfälle "laminare Verbrennung" und "Detonation". Für den Fall, daß sich Flammen auch mit Geschwindigkeiten fortpflanzen, welche zwischen diesen beiden Grenzfällen liegen, handelt es sich immer um instabile Verbrennungsvorgänge, die als "Deflagration" bezeichnet werden.



Der Eintritt einer Explosion ist nur möglich bei gleichzeitigem Auftreten eines explosionsfähigen Gas -/ Luft - Gemisches und einer wirksamen Zündquelle (z.B. offene Flamme, Funke etc.).

**Erstickungsgefahr** ist dann gegeben, wenn Sauerstoff durch Deponiegas verdrängt wird. Dies ist besonders in Gebäuden (Keller, Gruben) möglich. Ob Deponiegas schwerer oder leichter als Luft ist, hängt vom Mischungsverhältnis der beiden Hauptkomponenten Methan (leichter als Luft) und Kohlendioxid (schwerer als Luft) ab. Eine Entmischung findet jedoch nicht statt.

## 2.2.2. Gesundheitsgefahren durch Deponiegasspurenstoffe

Neben den Hauptkomponenten beinhaltet Deponiegas Stoffe mit toxischem bzw. krebserzeugendem Potential. Der Anteil dieser i.a. als **Deponiegasspurenstoffe** bezeichneten Bestandteile beträgt oft nur 0,1 - 0,5 Vol % und wird mit zunehmendem Alter der Deponie verkleinert. Es handelt sich dabei überwiegend um leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe. Besondere Beachtung ist dabei den als krebserzeugend angesehenen oder eingestuft Substanzen zu schenken (Chlorethen = Vinylchlorid, Benzol u.a.). Beim unverdünnten Gas sind Überschreitungen von MAK- (=Maximale Arbeitsplatzkonzentration) Werten bzw. den entsprechenden TRK - (=Technische Richtkonzentration) Werten durchaus denkbar.

Die oben aufgeführten Grenzwerte sind nicht geeignet, mögliche Gesundheitsgefährdung durch langdauernde Einwirkung von Deponiegasspurenstoffen der freien Atmosphäre, z.B. in der Nachbarschaft von Altablagerungen anhand konstanter Umrechnungsfaktoren abzuleiten.

Eine Übersicht über die relevanten Deponiegasspurenstoffe mit den entsprechenden Grenzwerten ist in Anlage 10 gegeben.

Die Spurenstoffproblematik ist in der Mehrzahl der Fälle sehr eng mit der Problematik der Hauptkomponenten Methan und Kohlendioxid verbunden. Ist Deponiegas vorhanden, so wird auch ein entsprechender Anteil an Spurenstoffen darin zu finden sein. Typische Konzentrationsbereiche von Spurenstoffen im Deponiegas sind in POLLER, 1990 bzw. RETTENBERGER, 1991 veröffentlicht. Wie Erfahrungen zeigen, kann eine Verlagerung des Gefährdungspotentials in einzelnen Fällen durchaus auftreten. Brennbare Gase werden dann in den Hintergrund gedrängt, wenn toxikologisch relevante Komponenten in sehr hohen Konzentrationen auftreten. Dies kann soweit gehen, daß diese Stoffe vorrangig zu erfassen und zu bewerten sind. Nach der Begriffsbestimmung unter 2.1. ist dies nicht Gegenstand der hier dargelegten Betrachtungen. In aller Regel wird es ausreichend sein, das Hauptaugenmerk auf die Komponenten Methan und Kohlendioxid zu richten (siehe auch Kapitel 3.2.1.3. Deponiegasspurenstoffe).

### 2.2.3. Auswirkungen auf die Atmosphäre

In Verbindung mit  $\text{NO}_x$  - Emissionen führt Methan zur oberflächennahen Ozonbildung (Sommer - Smog). Bekannter sind Methan- und Kohlendioxidemissionen und Emissionen organischer Halogenverbindungen aus Deponien in Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt in der Atmosphäre bzw. in Zusammenhang mit der Entstehung des Ozonlochs. Die Methanemissionen aus Deponien werden weltweit mit 30 bis 70 Mio t/a angenommen. Dies entspricht etwa einem Anteil von 6 - 18 % an den geschätzten weltweiten jährlichen Methanemissionen.

## 2.3. Beschreibung des Gashaushaltes

### 2.3.1. Definition

Der Deponiekörper kann als ein System mit verzweigten Hohlräumen aufgefaßt werden. Diese Hohlräume zwischen Feststoffteilchen sind entweder mit Gas oder Wasser gefüllt, wobei die Summe aller Hohlräume erhalten bleibt. Langfristig verändert sich die Summe der Hohlräume durch Sackungen bzw. den Abbau von organischer Substanz. Die gaserfüllten Hohlräume sind Gegenstand dieser Betrachtung.

Der Begriff "Gashaushalt" umfaßt die

- mengenmäßige Betrachtung der gasförmigen Phase, d.h. Betrachtung der "Größen" Gasproduktion, Gasableitung, Gasumwandlung und Gasadsorption/ - absorption und deren Beziehung zueinander.
- Charakterisierung der gasförmigen Phase (Gasphase)

Die Gasphase läßt sich durch Angabe von Druck, Temperatur und Gaszusammensetzung in den Hohlräumen einer Ablagerung beschreiben. Dazu sind Messungen an zahlreichen Stellen der Deponie notwendig. Diese spiegeln aber nur den momentanen Zustand wider und sind das Ergebnis von verschiedenen Vorgängen, die meßtechnisch nicht oder nur unzureichend erfaßbar sind (FRANZIUS, 1982; RETTENBERGER, 1982a). Bei der Gefährdungsabschätzung sind aber gerade die verschiedenen Vorgänge wie Gasproduktion als Basisgröße und Gasableitung (Emissionen) von entscheidender Bedeutung. Zur Einschätzung des Langzeitverhaltens sind sie ebenfalls heranzuziehen. Rückschlüsse von der Gasphase auf die einzelnen Vorgänge sind schwierig und sehr stark vom Einzelfall abhängig. Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems ist mit der Entwicklung der Phasen der Deponiegasentwicklung im Kapitel 2.5. beschrieben.

Für die mengenmäßige Betrachtung der "Größen" werden im folgenden theoretische Überlegungen, Modellrechnungen und im Labor überprüfte Zusammenhänge aufgeführt.

Das Modell einer Summenbilanzierung nach FRANZIUS, 1982, sieht folgendermaßen aus:

Gasproduktion = Gasableitung + Gasadsorption + Gasumwandlung

## 2.3.2. Gasproduktion

### 2.3.2.1. Grundlagen der Deponiegasentstehung

Deponiegas kann prinzipiell entstehen aus:

- dem biochemischen Abbau von Biomassen
- dem Übergang von gelösten, adsorbierten, flüssigen oder festen Stoffen in die Gasphase
- chemischen Reaktionen von abgelagerten Stoffen untereinander oder mit Niederschlags- bzw. Sickerwasser

Als einzig wichtige Gasquelle für die mengenmäßige Betrachtung und als Basisgröße für den Gashaushalt ist der biochemische Abbau von Biomassen zu betrachten. Die biologisch abbaubaren organischen Inhaltsstoffe einer Deponie werden durch Mikroorganismen zersetzt. Bei diesem Abbau werden alle Kohlenstoffgerüste in unterschiedlichen Stufen weitgehend zu den Endprodukten  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  umgesetzt, je nachdem, ob aerobe bzw. anaerobe Zustände vorherrschen. Die Atome funktioneller Gruppen wie N, S entweichen als  $\text{NH}_3$  oder  $\text{H}_2\text{S}$ , außerdem enthält das Deponiegas flüchtige Zwischenprodukte und flüchtige Deponieinhaltsstoffe wie CKW oder aromatische KW.

Die vier Stufen des biologischen Abbaus organischer Substanz sind in Abbildung 1 zusammengestellt (FARQUHAR et al., 1973).

In der 1. Stufe, die auch als **aerobe Phase** bezeichnet wird, enthält der Deponiekörper noch Luftsauerstoff aus der nach dem Mülleinbau verbliebenen Porenluft. Beim aeroben Abbau entsteht bis zu 20 % Anteil  $\text{CO}_2$ , außerdem Wasser und Wärme. Die Porenluft wird durch  $\text{CO}_2$  verdrängt; an allen Stellen, wo der Sauerstoff vollständig verdrängt ist, geht der Abbau in die anaerobe Stufe II über.

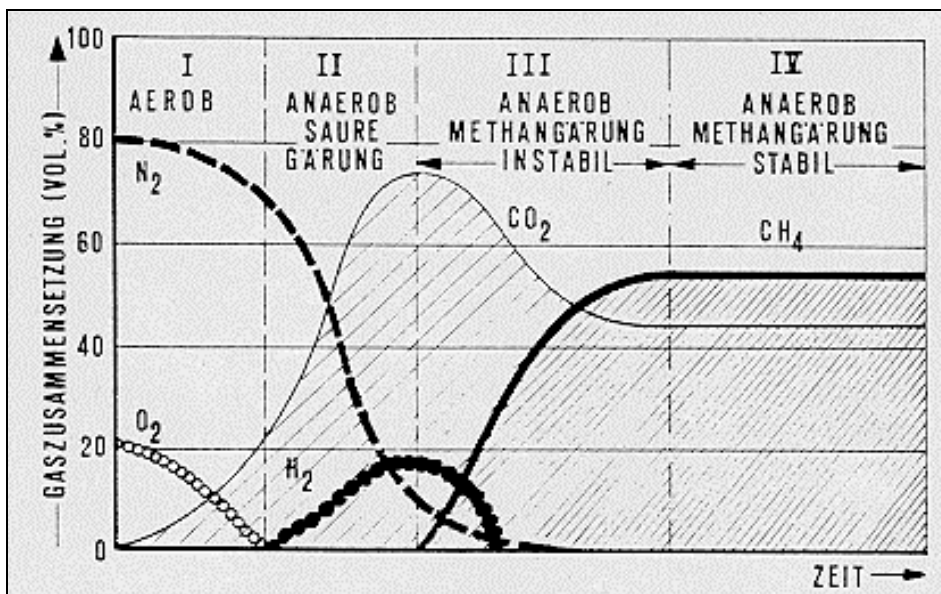


Abb. 1 Zusammensetzung des Deponiegases während der einzelnen Abbaustufen (FARQUHAR et al., 1973)

Die Stufe II wird als **saure Gärung** bezeichnet; hier werden polymere Substanzen wie Fette, Zellulose, Proteine in ihre Bausteine zerlegt: Fettsäuren, Aminosäuren, Monosaccharide. Diese Bausteine werden dann weiter zu den klassischen Gärprodukten abgebaut: Formiat, Acetat, niedere Fettsäuren,  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$ . Dadurch erreicht die  $\text{CO}_2$ - und  $\text{H}_2$ -Produktion ihr Maximum, wobei der Porenstickstoff vollständig verdrängt wird. Die dabei beteiligten Fäulnisbakterien sind fakultativ anaerob, arbeiten also auch bei eventuell noch vorhandenem Sauerstoff.

Schon während der sauren Gärung beginnen sich die Methanbakterien zu entwickeln. In der III. Stufe, der **instabilen Methanphase**, werden die Gärprodukte aus Stufe II zu Methan umgewandelt; dabei werden nur  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , Formiat und Acetat direkt zu Methan umgesetzt, die niederen Fettsäuren über einen Zwischenschritt.

Im zentralen Abbauschritt werden aus den Endprodukten der sauren Gärung Methan und Kohlendioxid gebildet. Die Methanbakterien sind sehr substratspezifisch. Unter natürlichen Bedingungen spielen bei der Methanproduktion Essigsäure,  $\text{H}_2$  und  $\text{CO}_2$  die Hauptrolle (SPENDLIN, 1991). Die Emission von  $\text{CO}_2$  nimmt wieder ab, und die Methanemission steigt bis auf ihren Maximalwert von etwa 55 Vol.-% an.

Die IV. Stufe, die **stabile Methanphase**, ist dann erreicht, wenn im Deponiegas das Verhältnis von  $\text{CO}_2$ -Gehalt zu  $\text{CH}_4$ -Gehalt konstant bleibt. Die ist im Normalfall etwa 55 %  $\text{CH}_4$  und 44 %  $\text{CO}_2$  sowie weniger als 1 % Spurengase.

Diese idealisierten Verhältnisse treffen nur für zerkleinerten, optimal gemischten und durchfeuchteten Hausmüll zu. Hier dauert Stufe I einige Wochen, Stufe II einige Monate, und nach 1 - 3 Jahren ist die stabile Methanphase (Stufe IV) erreicht.

Im Falle **realer Deponien** muß man davon ausgehen, daß der Wassergehalt örtlich unterschiedlich und meist zu niedrig ist; außerdem ist eine Durchmischung und Zerkleinerung nicht gegeben. Die Art und örtliche Verteilung der Schadstoffe ist nicht genau bekannt, weshalb eine wachstumshemmende Wirkung auf Methanbakterien schwer einschätzbar ist.

Da diese Wachstumsbedingungen für Methanbakterien für das Ziel des schnellstmöglichen Erreichens der Deponiestabilisierung entscheidend sind, wird unten näher darauf eingegangen (Kapitel 2.4.).

Bei den oben aufgeführten anaeroben Abbaustufen entsteht ein Gleichgewicht zwischen Endprodukten der einen Stufe und Abbau dieser Endprodukte in der nächsten Stufe. Dadurch laufen diese Stufen z.T. zeitgleich nebeneinander ab.

Die oberste Müllschicht zeigt durch Eindiffundieren von Luftsauerstoff auch nach Jahren noch aerobes Milieu.

Die biochemische Stabilisierung einer Deponie und das Ende der stabilen Methanphase wird dadurch angezeigt, daß im Sickerwasser der Quotient  $\text{BSB}_5 / \text{CSB}^2$  einen Wert unter 0,1 an-

---

<sup>2</sup> BSB = biochemischer Sauerstoffbedarf. Unter BSB versteht man die Menge an Sauerstoff, die von Mikroorganismen verbraucht wird, um im Wasser enthaltene organische Stoffe oxidativ abzubauen. Versuchsdauer: (n Tage) = 5.  
CSB = chemischer Sauerstoffbedarf. Mit Hilfe des CSB wird die chemische Oxidierbarkeit eines Wassers gekennzeichnet, die die Folge der darin enthaltenen reduzierend wirkenden, insbesondere organischen Stoffe ist.

nimmt. In diesem Fall sind weniger als 10 % der organischen Stoffe noch biologisch abbaubar (LAGA, 1983; TABASARAN, 1976; RETTENBERGER, 1978; STEGMANN et al., 1980).

### 2.3.2.2. Modellhafte Beschreibung der Gasproduktion, Gasprognose

Die Gasproduktion in ihrem zeitlichen Verlauf ist der entscheidende Faktor zur Aufstellung einer Prognose über das Langzeitverhalten bzw. für eine Gefährdungsabschätzung.

Zunächst interessiert die Gasmenge, die aus den abgelagerten Stoffen entstehen kann. Diese Gasmenge ist in erster Linie eine Funktion des im Abfall enthaltenen abbaubaren Kohlenstoffes. Dafür wird i.a. der Begriff **Gaspotential**<sup>3</sup> verwendet.

Vorwiegend werden folgende Ansätze der **Gasmengenabschätzung** herangezogen:

- man kann von der theoretischen Gasproduktion aufgrund der Müllzusammensetzung ausgehen, wobei der Gesamtkohlenstoffgehalt des Mülls analytisch bestimmt und daraus die maximale Gasmenge errechnet wird. Diese Berechnungen liefern in der Regel zu hohe Gasmengen!
- realistischere Werte bekommt man aus Faulversuchen mit Hausmüll. Aus Laborversuchen ist bekannt, daß für deutsche Verhältnisse die pro Tonne trockenen Hausmüll insgesamt produzierte Gasmenge zwischen 150 und 235 m<sup>3</sup> beträgt (Tabelle 1).

Diese Gasmenge ist über einen sehr langen Zeitraum aus der abgelagerten Müllmenge zu erwarten. Bei Laborversuchen wurde erkannt, daß der zeitliche Verlauf der Gasmengenentwicklung auf eine Reaktionskinetik 1. Ordnung schließen läßt.

Die Gasmengenabschätzung wird in Teilprozesse untergliedert, für die sich Gesetzmäßigkeiten finden lassen. Das Ergebnis eines solchen Abstrahierungsvorganges wird normalerweise mathematisch formuliert und als Modell bezeichnet. In der Praxis haben sich eine Reihe von Modelltypen als hilfreich herausgestellt:

- mathematische Modelle (z.B. black - box Modelle, bei denen durch eine mathematische Manipulation eines Eingangssignals ein Ausgangssignal erzeugt wird, ohne daß der physikalische Vorgang im einzelnen beschrieben wird);
- physikalisch - deterministische Modelle (z.B. Wurfbewegung);
- stochastische Modelle (z.B. Gastheorie)

	Versuchsdurchführung	Summe der Gasproduktion in m <sup>3</sup> /t feuchten Müll
PFEFFER 1974	Faulversuch mit zerkleinertem Hausmüll im Rührreaktor - 4 - 30 Tage Aufenthaltszeit Temperatur 40°	186
KLEIN 1980	Faulversuch von Hausmüll gemeinsam mit Klärschlamm	235
HITTE 1976	Faulversuch von Hausmüll gemeinsam mit Klärschlamm	204
STEGMANN 1982	Faulversuch mit zerkleinertem Hausmüll mit Sickerwasserkreislaufführung, 30°-	120 - 150

**Tab. 1 Gesamtgasproduktionspotential von Hausmüll, Ergebnisse aus Laborversuchen**

<sup>3</sup> Gaspotential: diejenige Gasmenge, die aus einer Tonne Müll bei den an einer bestimmten Deponie angetroffenen Bedingungen entsteht.

Diese Erkenntnis und Erfahrungen aus den obengenannten Ansätzen der Gasmengenabschätzung formulierte TABASARAN / RETTENBERGER, 1978 zu den unten aufgeführten Modellgleichungen.

Als wesentlichste Faktoren für die Größe des Gaspotentials gehen vor allem der abbaubare Substrat-Kohlenstoff und die Temperatur ein, was allerdings nur bei Einhaltung bestimmter Randbedingungen, wie z.B. Einstellung eines optimalen Wassergehaltes gilt. Daneben darf nicht verkannt werden, daß weitere Einflußfaktoren sicher vorhanden sind, bislang jedoch nicht genau erforscht wurden. Aufgrund der bisherigen Versuchsergebnisse kann jedoch die Größenordnung des Gaspotentials als gesichert angesehen werden. Unter Laborbedingungen ergab sich dabei für kommunalen Schlamm im mesophilen Bereich (10-45°C) folgender Zusammenhang, dessen Übertragung auf Hausabfall als plausibel erscheint:

$$G_e = 1,868 \times C_{\text{org}} \times (0,014 \times T + 0,28)$$

mit

$G_e$	= die in langen Zeiträumen gebildete Gasmenge in m <sup>3</sup>
1,868	= dieser Faktor gibt das Volumen von 1 kg Kohlenstoff als Deponiegas an
T	= Temperatur in °C
$C_{\text{org}}$	= organischer Kohlenstoff

Für mittlere Verhältnisse kann angenommen werden, daß der organische Kohlenstoff pro Tonne kommunaler Abfälle bei rund 200 kg liegt. Die Temperaturen in Deponien liegen meist über 30°C. Damit werden bei diesen Verhältnissen in einer Deponie pro Tonne Abfall über einen langen Zeitraum ca. 260 m<sup>3</sup> Deponiegas zu erwarten sein.

Die bisherigen Überlegungen sind nur als Summe der Gasproduktion zu verstehen. Die zeitliche Beschreibung der Vorgänge in einer Deponie ist gegenwärtig als physikalisches Modell nicht üblich. Für Prognoseverfahren müssen daher mathematische Modelle angewandt werden. Da bekannt ist, daß die Vorgänge in der Deponie nur wenig durch externe Gegebenheiten beeinflußt werden, ist es plausibel, den bei den Laborversuchen erkannten Reaktionstyp zur Beschreibung der zeitlichen Vorgänge im Deponiekörper heranzuziehen. Damit ergibt sich folgende Formulierung:

$$G_t = G_e \times (1 - 10^{-kt}) \text{ in m}^3/\text{t}$$

mit

$G_t$	= bis zur Zeit t gebildete spezifische Deponiegasmenge in m <sup>3</sup> pro t Abfall
k	= Abbaukonstante
t	= Zeit in Jahren

Dieses Modell wird als rein mathematisches Modell benutzt, was bedeutet, daß das komplexe Geschehen im Deponiekörper mit all seinen differenzierten Vorgängen als black-box angesehen wird. Die Anpassung an die Realität erfolgt durch eine geeignete Parameterwahl.

Für ein Prognosemodell mit zeitlicher Beschreibung der Vorgänge werden nun beide Modelle zusammengefaßt, so daß ein physikalisches Modell mit einem mathematischen verknüpft wird:

$$G_t = 1,868 \times C_{\text{org}} \times (0,014 \times T + 0,28) \times (1-10^{-kt})$$

Es ist zu beachten, daß diese Formel eine Summenkurve ergibt.

Wesentliche Voraussetzung der Anwendung des Modells ist die Wahl der Parameter:

- $C_{\text{org}}$ : Dieser Wert liegt in der Regel für Hausabfall zwischen 170 und 220 kg/t Abfall, sollte aber im Fall von Altablagerungen aufgrund von Erfahrungswerten zwischen 150 und 200 kg/t Abfall gewählt werden.
- $T$ : Die Temperaturen in Deponien liegen überwiegend um 30-36°C; allerdings werden diese Werte durchaus über- bzw. unterschritten. Wesentlich ist, daß die Anwendung des Modells nur für den mesophilen Bereich zulässig ist. Der mesophile Bereich umfaßt Temperaturen zwischen +10°C und +45°C, wobei die größte Aktivität der Bakterien zwischen 30 und 37°C liegt. Mit der Erhöhung bzw. Erniedrigung dieser optimalen Temperatur wird die Aktivität verringert.
- k-Werte: Ein Maß für die Abbaugeschwindigkeit. Diese wurden bislang mit 0,025 bis 0,05 (=Abbau von 50 % der org. Substanz in 12 Jahren = k-Wert 0,025 bzw. 6 Jahren = k-Wert 0,05) gewählt. Messungen an Deponien haben Hinweise auf einen k-Wert um 0,035 bis 0,045 ergeben.

Es hat sich bewährt, für Gasprognosezwecke mehrere sinnvolle Parameterkombinationen oder eine mittlere Parameterkombination mit zulässigen Abweichungen im Resultat von 10 bis 15 % durchzurechnen, so daß dem Wesen einer Prognose entsprechend ein Werteband entsteht.

Im oben erläuterten Modell der Gasproduktion wird von einer mittleren Abfallzusammensetzung und dem entsprechenden Verhalten des aus diesem Abfall aufgebauten Deponiekörpers ausgegangen. Es werden Zahlenbeispiele für die verschiedenen Parameter wie Kohlenstoffgehalt, Halbwertszeit (ausgedrückt durch den k - Wert) und Temperatur gegeben, wie sie für eine Hausabfalldeponie zutreffen. An dieser Stelle soll auf den Faktor Kohlenstoffgehalt des Abfalls besonders eingegangen werden, da dieser Faktor bei der Gasprognose einen entscheidenden Einfluß hat (andere Faktoren werden in Kap. 2.4. behandelt).

Da die methanerzeugenden Bakterien im Deponiekörper auf das ausreichende Vorhandensein von Kohlenstoff sowohl zum Aufbau der Zellmasse als auch als Nährstoff angewiesen sind, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Kohlenstoffgehalt des Abfalls und dem Gaspotential. Betrachtet man die mathematische Form der Gasprognose, so ist ersichtlich, daß bei sonst gleichen Parametern die Gasentwicklung dem Kohlenstoffgehalt des Abfalls direkt proportional ist. Allerdings wird vom Gesamtkohlenstoffgehalt nur ein Teil zu Deponiegas umgesetzt, ein anderer Teil liegt in Form von anaerob nicht abbaubaren Stoffen (Kunststoffpolymere etc.) vor und darf nicht in die Rechnung mit eingehen.

Für den zeitlichen Verlauf der Gasentstehung spielt neben dem aufgrund des Kohlenstoffgehaltes theoretisch möglichen Gaspotentials auch die Abbaubarkeit des dargebotenen Nährstoff-

fes eine wichtige Rolle. Die Abbaubarkeit drückt sich in der Halbwertszeit der verschiedenen Stoffe<sup>4</sup> aus und fließt also über den k - Wert direkt in die Gasprognose ein (siehe auch S. 25).

Eine kritische Bewertung der Gasprognose und der anzusetzenden Parameter ist bei EHRIG, 1991 durchgeführt. Hier werden bisherige Ansätze zur Prognose der Gesamtgasmenge bzw. zur Prognose des zeitlichen Verlaufs der Gasproduktion diskutiert und weiterentwickelt.

### 2.3.2.3. Durchführung der Gasprognose

Im folgenden wird nach den unter 2.3.2.2. dargelegten Überlegungen die **Gasprognose** erläutert. Dabei wird zunächst angenommen, daß eine Altablagerung mit 10 000 t abgelagertem Hausmüll in einem Zeitraum von einem Jahr verfüllt wurde. Folgende Parameter werden angenommen:

$C_{org}$ :	220 kg/t
T:	33°C
k - Wert:	0.04

Es ist zu berücksichtigen, daß mit einem Jahr Zeitverzögerung zu rechnen ist: im Ablagejahr wird noch kein Gas produziert. 15 Jahre nach der Verfüllung (also 14 Jahre Gasproduktion) beträgt die gesamte, bis zu diesem Zeitpunkt produzierte Gasmenge je Tonne Abfall nach der Formel:

$$G_t = 1,868 \times C_{org} \times (0,014 \times T + 0,28) \times (1 - 10^{-kt})$$

$$G_{14} = 1,868 \times 220 \text{ kg/t} \times (0,014 \times 33^\circ\text{C} + 0,28) \times (1 - 10^{-0,04 \times 14}) = 220,95 \text{ m}^3/\text{t}$$

Für 10 000 t Abfall ergeben sich somit 2.209 Mio m<sup>3</sup> Deponiegas, die bis zu diesem Zeitpunkt theoretisch produziert werden.

Um die an dieser Altablagerung z.B. im 15. Jahr nach Deponieabschluß produzierte Gasmenge zu erhalten (Gasbildung in m<sup>3</sup>/h), ist ein weiterer Rechengang notwendig. Die Differenz Gesamtgasmenge bis zum Zeitpunkt  $Z_{14}$  (siehe oben) abzüglich Gesamtgasmenge bis zum Zeitpunkt  $Z_{13}$  ergibt die im 15. Jahr produzierte Gasmenge:

Gesamtmenge 15 Jahre nach Deponieabschluß	2.209 Mio m <sup>3</sup>
Gesamtmenge 14 Jahre nach Deponieabschluß	2.128 Mio m <sup>3</sup>
produzierte Gasmenge im 15. Jahr	81 000 m <sup>3</sup>

Die Umrechnung auf die Deponiegasbildung in m<sup>3</sup>/h ergibt:

$$81\,000 \text{ m}^3 / 8760 \text{ h} = 9,24 \text{ m}^3/\text{h}$$

Der an dieser Altablagerung prognostizierte Wert für die Deponiegasbildung 15 Jahre nach Deponieabschluß ergibt ca. 9 m<sup>3</sup>/h.

Der hier dargestellte Rechengang setzt voraus, daß die gesamte Menge von 10 000 t in einem Jahr abgelagert wurde und im darauffolgenden Jahr die Gasproduktion begann. In der Realität ist es aber so, daß über mehrere Jahre Müll abgelagert wird und die Gasprognose nach obiger

<sup>4</sup> die Zeit, in der die Hälfte des abbaubaren Materials biologisch abgebaut wurde



Formel eine Summenkurve der unterschiedlich alten Müllmengen bzw. deren produzierte Gasmenge darstellt.

Die im folgenden ausgeführte Gasprognose kann als Grundlage für die schnelle und einfache Durchführung der Gasprognose bei Altablagerungen herangezogen werden:

Für diese Altablagerung wird angenommen, daß 10 Jahre lang jeweils 1000 t Abfall pro Jahr geschüttet wurden. Erfahrungswerte zeigen, daß Deponien der 60er und 70er Jahre eine ähnliche Laufzeit aufweisen.

Die einzelnen Parameter mit entsprechenden Werten sind unter "2.3.2.2. Modellhafte Beschreibung der Gasproduktion, Gasprognose", erläutert. Es werden 2 Parameterkombinationen für die Gasprognose gewählt:

Parameterkombination A:

für hohe Gasproduktion	$C_{org}$ :	220 kg/t
	T:	33°C
	k - Wert:	0.04

Parameterkombination B:

für geringe Gasproduktion	$C_{org}$ :	180 kg/t
	T:	22°C
	k - Wert:	0.03

Bezogen auf den Berechnungszeitpunkt (z.B. 15 Jahre nach Deponieabschluß) haben die einzelnen Teilmengen ein unterschiedliches Alter, das für die bis dahin entstandene Gasmenge (Gesamtgasmenge) heranzuziehen ist. Es wird wieder mit einem Jahr Zeitverzögerung gerechnet.

Die Gesamtmüllmenge der Altablagerung, die aus 10 Müllteilmengen (10 x 1000 t) besteht, teilt sich bezüglich der Gasproduktion folgendermaßen auf:

1000 t = 24 Jahre Gasproduktion = 1. Teilmenge

1000 t = 23 Jahre Gasproduktion = 2. Teilmenge

1000 t = 22 Jahre Gasproduktion = 3. Teilmenge

1000 t = 21 Jahre Gasproduktion = 4. Teilmenge

1000 t = 20 Jahre Gasproduktion = 5. Teilmenge

1000 t = 19 Jahre Gasproduktion = 6. Teilmenge

1000 t = 18 Jahre Gasproduktion = 7. Teilmenge

1000 t = 17 Jahre Gasproduktion = 8. Teilmenge

1000 t = 16 Jahre Gasproduktion = 9. Teilmenge

1000 t = 15 Jahre Gasproduktion = 10. Teilmenge

Für jede Teilmenge ist die bis zum Zeitpunkt  $Z = 15$  Jahre nach Deponieabschluß entstandene Gesamtgasmenge nach der Formel Kap. 2.3.2.2 zu berechnen:

$$G_t = 1,868 \times C_{\text{org}} \times (0,014 \times T + 0,28) \times (1 - 10^{-kt})$$

Um die Gesamtgasmenge bis zum Zeitpunkt  $Z = 15$  Jahre nach Deponieabschluß für Parameterkombination A für die gesamte Altablagerung zu erhalten, ist für jede Teilmenge die Gesamtgasmenge zu errechnen und die Summe der erhaltenen Werte zu bilden:

1. Teilmenge = 24 Jahre

$$= G_{24} = 1,868 \times 220 \text{ kg/t} \times (0,014 \times 33^\circ\text{C} + 0,28) \times (1 - 10^{-0,04 \times 24}) = 271,38 \text{ m}^3/\text{t Müll};$$

für 1000 t = 271 380 m<sup>3</sup> Deponiegas

2. Teilmenge = 23 Jahre .... 268 030 m<sup>3</sup> Deponiegas

3. Teilmenge = 22 Jahre .... 264 670 m<sup>3</sup>

4. Teilmenge = 21 Jahre .... 260 710 m<sup>3</sup>

5. Teilmenge = 20 Jahre .... 256 440 m<sup>3</sup>

6. Teilmenge = 19 Jahre .... 251 870 m<sup>3</sup>

7. Teilmenge = 18 Jahre .... 246 680 m<sup>3</sup>

8. Teilmenge = 17 Jahre .... 241 190 m<sup>3</sup>

9. Teilmenge = 16 Jahre .... 234 790 m<sup>3</sup>

10. Teilmenge = 15 Jahre .... 228 080 m<sup>3</sup>

Gesamtgasmenge 15 Jahre nach Deponieabschluß 2 523 840 m<sup>3</sup>, d. h. diese Gasmenge wurde von allen Teilmengen zusammen bis zu diesem Zeitpunkt produziert.

Um die an dieser Altablagerung, z.B. im 15. Jahr nach Deponieabschluß produzierte Gasmenge zu erhalten (Gasbildung in m<sup>3</sup>/h), ist wieder ein weiterer Rechengang notwendig. Die Differenz Gesamtgasmenge nach 15 Jahren (siehe oben) abzüglich Gesamtgasmenge nach 14 Jahren ergibt die im 15. Jahr produzierte Gasmenge.

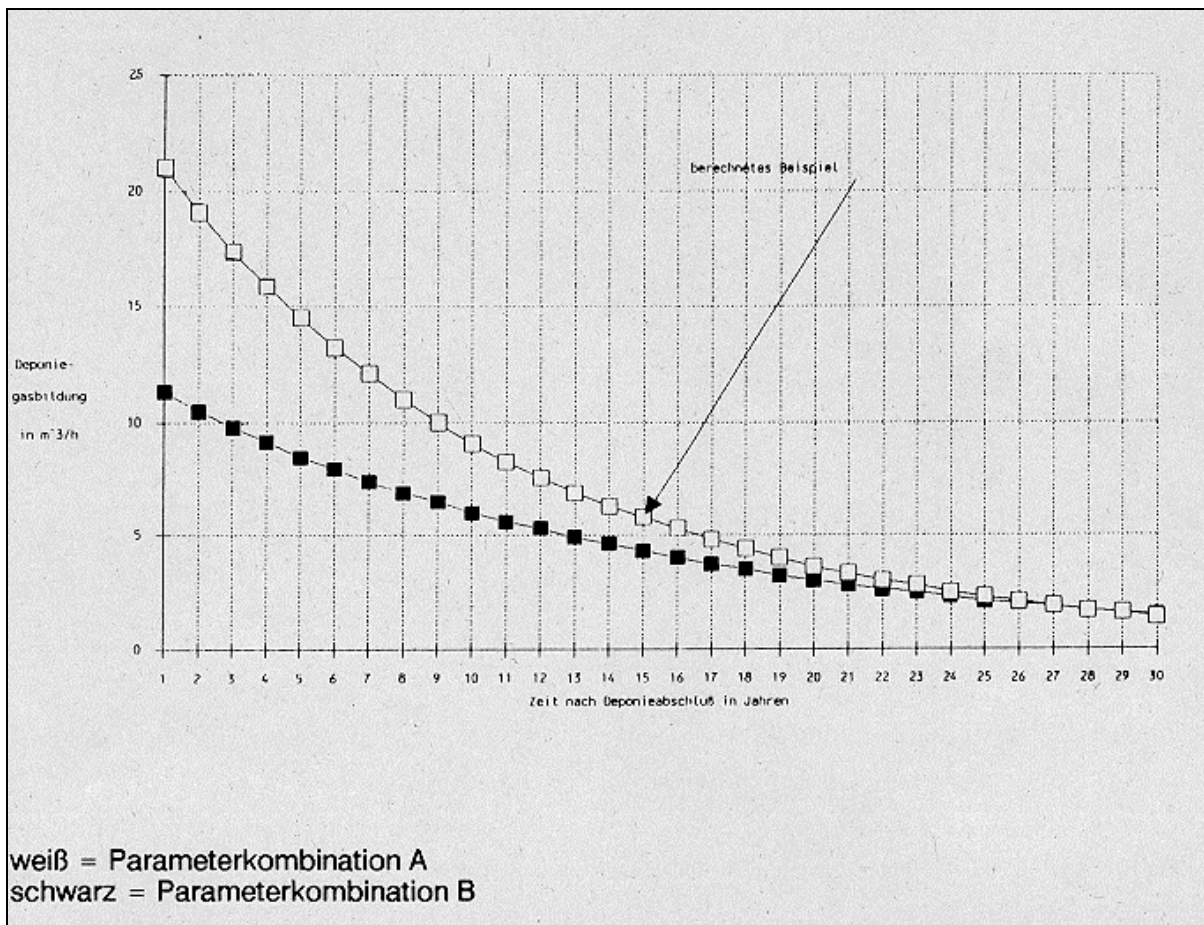
Gesamtgasmenge 15 Jahre nach Deponieabschluß	2 523 840 m <sup>3</sup>
Gesamtgasmenge 14 Jahre nach Deponieabschluß	2 473 220 m <sup>3</sup>
produzierte Gasmenge im 15. Jahr	50 620 m <sup>3</sup>

Die Umrechnung auf die Deponiegasbildung in m<sup>3</sup>/h ergibt:

$$50 620 \text{ m}^3 / 8760 \text{ h} = 5,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

Der an dieser Altablagerung prognostizierte Wert für die Deponiegasbildung 15 Jahre nach Deponieabschluß ergibt ca. 5,8 m<sup>3</sup>/h.

Die Gasprognose wird sinnvollerweise mit einem Computerprogramm errechnet. Für die beiden Parameterkombinationen aus diesem Beispiel mit 10 000 t Ablagerungsgut ergeben sich die in Abbildung 2 dargestellten Werte.



**Abb. 2 Gasprognose für eine Altablagerung mit 10 000 t für 2 Parameterkombinationen. Es sind nur die Werte für die Gasproduktion in m³/h nach Deponieabschluß berücksichtigt**

Um die Gasprognose auf den konkreten Fall ohne Computerprogramm umzurechnen, ist die Menge des abgelagerten Abfalls der jeweiligen Altablagerung einzusetzen. Hier soll als Beispiel einer Gasprognose der Modellstandort Osterhofen herangezogen werden. Die Ablagerungsmenge beträgt 300 000 t. Bezogen auf die Altablagerung mit 10 000 t ergibt sich der Faktor

$$300\,000\text{ t} / 10\,000\text{ t} = 30$$

Der Abschluß der Deponie Osterhofen war im Jahr 1976. Will man die Deponiegasbildung für das Jahr 1991 ermitteln, so sind die Werte des Jahres 15 nach Abschluß aus Abbildung 2 zu entnehmen und einzusetzen:

	Parameterkombination A	Parameterkombination B
Jahr 15 nach Abschluß	5,8 m³/h	4,3 m³/h
multipliziert mit Faktor 30	= 174 m³/h	= 129 m³/h

Die Deponiegasbildung am Modellstandort Osterhofen betrug demnach im Jahr 1991 zwischen 129 m³/h und 174 m³/h.

Am Modellstandort Osterhofen wurde im Jahre 1990 bei einem Absaugversuch überprüft, wieviel Deponiegas produziert wird. Der Versuchsaufbau und die Durchführung werden in Kap. 3.2.1.2 beschrieben.

Da die beiden Gaskollektoren, an denen die Entnahme stattfand nur einen Teil der produzierten Gasmenge erfassen, war bei einer Absaugrate von 110 m<sup>3</sup>/h im Kollektor 1 schon ein geringer Anteil an Außenluft festzustellen. Dabei wurde dieser Anteil eindeutig über die Deponie angesaugt, da der Sauerstoffanteil während des Transports verbraucht wurde und nicht mehr im Deponiegas nachweisbar war.

Genauere Aussagen über die Gasmenge sind aufgrund der kurzen Versuchsdauer jedoch nicht zu machen (siehe Kapitel 3.2.1.2. Gasabsaugversuch).

Dieses Beispiel verdeutlicht, daß von der Gasprognose ein Anhaltswert zu erwarten ist, um die aktuelle Gasproduktion einzuschätzen.

Die Gasprognose wird bei Betriebsdeponien zur Dimensionierung von Gasabsauganlagen verwendet. Kommt die Gasprognose bei Altablagerungen zur Anwendung, muß berücksichtigt werden, daß die Gasproduktion am Abklingen ist und sich dadurch sehr heterogene Zustände einstellen. Bei Altablagerungen kann daher die Gasprognose eingesetzt werden, wo noch mit einer nennenswerten Gasproduktion zu rechnen ist und die Daten aus der Prognose heranzuziehen sind, um z.B. eine Einschätzung der Emissionssituation vorzunehmen.

### 2.3.3. Gasableitung

Eine weitere wichtige Größe in der Summenbilanzformel ist der Anteil des transportierten bzw. über die Deponiegrenzen abgeleiteten Gases.

Man kann davon ausgehen, daß zunächst das gesamte entstandene Gas nahezu unverändert als Emission aus der Deponie austritt. Das im Deponiekörper entstehende Gas breitet sich in verschiedenen Richtungen aus, und zwar im wesentlichen durch

- Druckdifferenz
- Konzentrationsdifferenz (Diffusion)

Eine Ausbreitung aufgrund von Druckdifferenz entsteht durch Druckgradienten, wenn sich das Gas aus Bereichen mit hohem Gasdruck in Bereiche mit geringem Druck bewegt. Durch den höheren Gasdruck in der Deponie durch die Gasproduktion überwiegt der Transport durch Druckdifferenz. Ein Druckgefälle entsteht z.B. durch Gasproduktion, barometrische Druckänderungen oder Temperaturveränderungen. Dichte Schichten oder wassergesättigte Bereiche beeinflussen diese Ausbreitung.

Bei der Diffusion breitet sich das Gas aus Bereichen höherer Konzentration zu Bereichen niedriger Konzentration hin aus. Der Gastransport durch Diffusion ist nur dann möglich, wenn sich die Partialdrücke bzw. Konzentrationsabnahme über den gesamten Diffusionsweg erstreckt. Dichte Schichten im Deponiekörper bzw. im umgebenden Erdreich beeinflussen den Gasaustausch entscheidend. Je dichter die Schichten, desto geringer ist der Gastransport. Auch Wasser stellt beispielsweise eine fast vollständige Barriere für die Diffusionsströmung dar, da der Diffusionskoeffizient für Wasser nur etwa 1/10 000 des Wertes für Luft beträgt.

Die Diffusion hört auf, wenn zwischen Deponiekörper und dem umgebenden Medium (Luft-raum oder gasverfügbare Hohlräume im umgebenden Boden) keine Konzentrationsunterschiede mehr herrschen, was theoretisch erst nach Abschluß der Gasproduktion oder aber nach Erreichen eines Gleichgewichtszustandes Gasproduktion = Gasumwandlung + Gasabsorption erreicht ist.

### 2.3.4. Gasumwandlung (i.a.R. Methanoxidation)

Diese "Größe" umfaßt die Umwandlung von Methan durch chemische und biologische Vorgänge. Der Effekt der Methanoxidation setzt die gleichzeitige Anwesenheit von Sauerstoff und Methan voraus. Während der Betriebsphase mit hoher Gasproduktion ist dies nur in der obersten Müllschicht der Fall (bis max. 1 m Tiefe bei offener Betriebsfläche). Durch abnehmende Gasproduktion und dadurch in den Deponiekörper eindringende Luft verlagert sich dieser Zustand auf tiefere Müllschichten. Die Zufuhr von Sauerstoff zur Bodenluft erfolgt durch Konvektion (z.B. Wind) und Diffusion ausschließlich aus der Atmosphäre. Es treten also wieder aerobe Verhältnisse auf, bei denen verbliebenes und zuströmendes Methan oxidiert wird. Der Abbau von Methan kann nach MANCINELLI et al., 1985 bis 10 % der gesamten Methanproduktion einer Deponie betragen.

### 2.3.5. Gasadsorption/ Gasabsorption

Neben der Gasumwandlung ist die **Gasadsorption** eine weitere "Größe" für die Bilanzierung des Gashaushaltes. Jedoch ist die Gasadsorption in der Regel so gering, daß sie bei der Betrachtung vernachlässigt werden kann.

Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen einer Anlagerung an Feststoffe (Adsorption) und einer Lösung von Gasen in Flüssigkeiten (Absorption). Die Adsorption von Methan und Kohlendioxid kann nur auf trockenen Müll bezogen werden. Da i.a. ein bestimmter Wassergehalt für die Methanbildung vorausgesetzt werden muß, ist nur die Lösung von Methan und Kohlendioxid in Wasser zu betrachten. Bei 20°C beträgt die max. Löslichkeit von Methan in Wasser 24 mg/l. Für Kohlendioxid beträgt die max. Löslichkeit bei 20 °C 1685 mg/l.

Bei hoher Gasproduktion ist der Anteil der **Gasabsorption** für die Bilanzierung nicht relevant. Das Gas wird überwiegend als Emission in den Luftraum die Deponie verlassen. Bei nachlassender Gasproduktion wird der Anteil des adsorbierten CO<sub>2</sub> so groß, daß die Zusammensetzung des Deponiegases verändert wird. Durch die gute Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser wird ein beträchtlicher Teil des Kohlendioxids mit dem Sickerwasser ausgewaschen. Der Anteil an abgeführtem CO<sub>2</sub> an der aktuellen Gasproduktion schwankt zwischen 0,01 % und 10 %, je nach Gasproduktion und Wasserbewegung.

## 2.4. Einflußfaktoren auf den Gashaushalt

### 2.4.1. Milieubedingungen

Die folgenden Faktoren sind zum Verständnis der Deponiegasentstehung wichtig. Meßtechnisch sind sie an bestehenden Deponien bzw. an Altablagerungen nur sehr schwer zu ermitteln, da der Deponiekörper ein inhomogenes Stoffgemisch darstellt und repräsentative Ergebnisse nicht zu erhalten sind. Für den Gashaushalt und die Gefährdungsabschätzung ist von den Milieubedingungen das Nährstoff-/ Substratangebot und der Aufbau des Deponiekörpers zu berücksichtigen. Dies kann näherungsweise aufgrund von Datenerhebungen durchgeführt werden (Kapitel 3.1.). Indirekt kann der pH - Wert und der Gehalt an organischen Säuren im Kondensat und Sickerwasser Rückschlüsse auf die Gasproduktion zulassen. Die entsprechenden Untersuchungsmethoden sind im Teil Sonderuntersuchungen (Kapitel 3.2.3.) dargestellt.

Die Produktion von Deponiegas erfolgt überwiegend durch mikrobielle Abbaureaktionen. Wie oben angeführt, sind gewisse Randbedingungen für die Gasproduktion erforderlich. Dies ist in zahlreichen Veröffentlichungen über Laborversuche im Technikumsmaßstab beschrieben. Dabei wurden Abbauversuche mit Hausmüll durchgeführt und verschiedene Milieubedingungen verändert. Folgende Faktoren sind als wichtige Einflußgrößen für das Wachstum der Methanbakterien und somit für den Gashaushalt erkannt worden:

- a) Wassergehalt
- b) Temperatur
- c) Wassertransport (Abführung organischer Säuren)
- d) Nährstoff-/ Substratangebot
- e) pH-Wert, Puffersystem
- f) toxische Stoffkonzentrationen
- g) Aufbau des Deponiekörpers

#### zu a. Wassergehalt

In zahlreichen Versuchen ist gezeigt worden, daß der Wassergehalt von Müll der wichtigste Einflußfaktor für die Methanbildung ist (SCHARF, 1982; HAM, 1982; DERNBACH, 1982). In dem Bereich von 20 - 60 % Wassergehalt bewirkt eine Feuchtigkeitserhöhung um wenige Prozente eine deutliche Steigerung der Methanproduktion. Bei Gehalten über 60 % ist die Methanbildung optimal, aber in der Deponierealität kommen solch hohe Durchschnittsgehalte nicht vor.

Der Grund liegt darin, daß die meisten Bakterien ein feuchtes Klima zum Wachstum benötigen. Hierzu ist eine Wasseraktivität von  $a_w = 0,9 - 1,0$  notwendig.

$$\text{Wasseraktivität } a_w = p / p_o$$

mit  $p$  = Wasserdampfpartialdruck Müll

mit  $p_o$  = Sättigungsdampfdruck über Wasser

Das bedeutet, daß der Wasserdampfdruck im Gasraum der Deponie mindestens 90 % des Sättigungsdampfdruckes sein muß. Je nach der Hygroskopizität der Müllbestandteile sind die dazu notwendigen Wassergehalte unterschiedlich. Ein inerter Müll wie Schlacke, Sand, Schrott usw. ist bei geringem Wassergehalt schon naß ( $a_w < 0,9$ ), während hygroskopischer Müll mit hohem organischen Anteil oder salzhaltige Abfälle bei hohem Wassergehalt noch trocken wirken ( $a_w > 0,9$ ).

Im Normalfall hat der Deponiekörperbereich oberhalb des Grundwasserspiegels Wassergehalte von 15 - 50 %. Diese Gehalte unter 50 % reichen zum Großteil nicht für eine optimale Methanproduktion aus. Dadurch ist der Wassergehalt ein ständig limitierender Faktor bei der Methanproduktion.

In HAM, 1982 werden Versuche beschrieben, die diese theoretischen Überlegungen bestätigen. Bei gleichem Wassergehalt wurden Müllproben mit minimaler und maximaler Feuchtigkeitsbewegung beprobt. Im Fall starker Bewegung wurden langfristig Erhöhungen der Methanproduktion um 25 - 50 % festgestellt.

#### **zu b. Temperatur**

In (SCHARF, 1982; HAM, 1982; DERNBACH, 1982) wird gezeigt, daß die Mülltemperatur die Methanbildung beeinflusst. Der überwiegende Teil der Methanbakterien zählt zur mesophilen Klasse, die einen maximalen Wachstumsbereich von 10 - 45° C haben. Auch in der Praxis wurde unterhalb von 10° C und oberhalb 45° C keine Methanproduktion mehr festgestellt; die Optimaltemperatur für verschiedene Methanbakterien liegt zwischen 30 und 40° C (SPENDLIN, 1991).

Durch die entstehende Wärme bei biologischen Prozessen kann der Müllkörper beträchtlich erwärmt werden. Bei ausreichenden Wachstumsbedingungen sind in Stufe II - IV Erwärmungen um 15° C möglich, in der aeroben Stufe I sogar bis zu 30° C Erwärmung.

Bis in 5 m Tiefe herrschen normalerweise Temperaturen von 15 - 30° C und darunter 20 - 40° C. Es kommen aber durchaus sogenannte "Hitzenester" vor, in denen die Temperatur bis zu 55° C steigen kann.

#### **zu c. Wassertransport**

Auch die Wasserbewegung ist ein wichtiger Faktor. Die in der Stufe II gebildeten organischen Säuren würden bei fehlender Wasserbewegung im Deponiekörper angereichert. Der entstehende Nährstoffüberschuß würde zu einer Veränderung einzelner Parameter (pH - Erniedrigung) führen. Dies stellt eine Beeinflussung der Milieubedingungen der nachfolgenden Abbaustufen dar. Es kann dadurch zu einer Abbauehemmung bis hin zum Stillstand des Müllabbaus kommen.

#### **zu d. Nährstoff- und Substratangebot**

Die Zusammensetzung von Hausmüll und besonders von Klärschlamm bietet überwiegend gute Wachstumsbedingungen für Bakterien. Beim Sondermüll trifft das aber nicht zu. Die Kenntnis des Kohlenstoffgehaltes des abgelagerten Abfalls ist die wesentliche Voraussetzung für die Berechnung der Gasproduktion (siehe Kapitel 2.3.2. Gasprognose).

Entscheidend ist der Anteil, der auch tatsächlich von Bakterien abgebaut werden kann. Es muß sich um organisches Material handeln, das von den Bakterien der Stufen I oder II angegriffen und gespalten werden kann. Als Substrat kommen Küchenabfälle, Gartenabfälle, Papierprodukte, tierische Abfälle, Textilien, Pilzmycel, Schlämme aus Abwasserreinigung usw. in Frage. Bei rein anorganischem Müll ist kein Abbau möglich.

Auch das Nährstoffverhältnis muß in einem gewissen Rahmen gegeben sein. Die Komponenten N, P, S, O und einige Spurenelemente sind erforderlich, und das Verhältnis von CSB : N : P = 100 : 0,44 : 0,08 ist zum optimalen Abbau notwendig. Hier ist oft der Phosphor limitierend.

Der Anteil an Hausmüll und Klärschlamm kann näherungsweise durch Datenerhebungen ermittelt werden. Alle Versuche, die einzelnen Müllanteile bzw. den abbaubaren Kohlenstoffanteil anhand von Proben an einer Altablagerung zu bestimmen, sind in Bezug auf die Repräsentanz kritisch zu beurteilen.

#### **zu e. pH - Wert, Puffersystem**

Zur Bildung eines Puffersystems ist ein ausreichender Gehalt an  $\text{CaCO}_3$  notwendig; er erleichtert das Einhalten eines pH - Wertes im Bereich von 6 - 8. Ein zu niedriger oder zu hoher pH - Wert ist für Bakterien toxisch; außerdem besteht im sauren Milieu die Gefahr der Mobilisierung von Schwermetallen.

In der stabilen Methanphase (Stufe IV) liegt der pH - Wert etwas über 7 und bei der sauren Gärung zwischen 6 - 7. Wenn die organischen Säuren aus Stufe II nicht regelmäßig durch Sickerwasser abtransportiert werden, kann durch die pH - Senkung der weitere Abbau in Stufe III gestört werden. Nach dem Abbrechen der Methanphase wird sich eine pH - Wert Senkung feststellen lassen. Somit können Sickerwasser- und Kondensatuntersuchungen in Ausnahmefällen wichtige Ergebnisse für die Beurteilung der Gasproduktion liefern (Kapitel 3.2.3.).

#### **zu f. toxische Stoffkonzentrationen**

Einige niedere Fettsäuren sind für Bakterien giftig. Je nach Literatur (DUARTE et al., 1983; KAPP, 1984) wird ab einem Gehalt zwischen 6.000 und 15.000 mg/l an Gesamtfettsäuren das Wachstum der Methanbakterien eindeutig gehemmt.



In Abbauversuchen mit Sickerwasser wurden weitere wachstumshemmende Schwellenwerte festgestellt:

2.500	mg/l	NH <sub>4</sub> -Stickstoff
Spuren		freier Ammoniak
0.1	mg/l	Gesamt-Schwermetalle
200	mg/l	Sulfid-Schwefel

Bei den Schwermetallen sind Hg und Cd am giftigsten. Schwermetalle zeigen nur in gelöster Form eine hemmende Wirkung auf die Methangärung. Durch chemisch/physikalische Prozesse, die parallel zur Methangärung ablaufen, werden Metalle als Sulfide ausgefällt bzw. durch Komplexbildung festgelegt. Dies ist bei der Beurteilung von Schwellenwerten zu berücksichtigen.

Toxisch sind außerdem Pestizide und einige chlorierte Kohlenwasserstoffe (POLLER, 1990).

### **zu g. Aufbau des Deponiekörpers**

Bei der Anlegung einer neuen Deponie gibt es zahlreiche Techniken, die eine optimale Müllzersetzung garantieren. Bei einer alten Deponie muß man von den Gegebenheiten ausgehen. Einbautechnik, Zerkleinerungszustand des Mülls, Art der Verdichtung oder Porengröße des Gasraumes lassen sich nicht verändern.

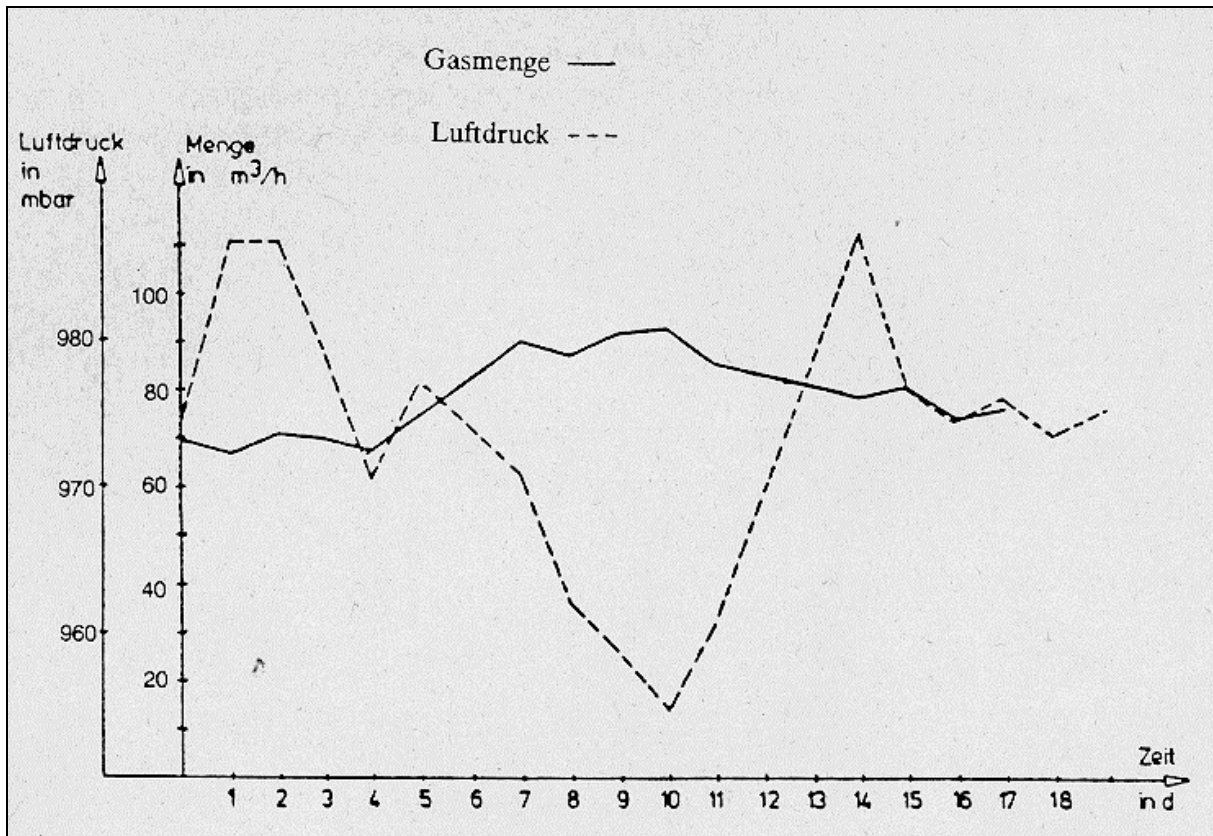
Über die Einbautechnik sind oft Informationen beim Betreiber oder bei Behörden vorhanden. Gerade beim Einbau über Kippkante bzw. bei langanhaltenden Bränden während des Einbaus ist von einer verringerten Gasproduktion auszugehen, da der organische Kohlenstoffgehalt entsprechend verringert wurde.

## **2.4.2. Externe Faktoren**

Alle Faktoren, die nur indirekt die Deponiegasentstehung und den Deponiegashaushalt beeinflussen, sind externe Faktoren. Sie sind z.T. meßtechnisch zu erfassen bzw. aus der Datenerhebung bekannt. Im Einzelfall ist von diesen Faktoren eine deutliche Beeinflussung der Emissionssituation zu erwarten. Wie sich gezeigt hat, kann es zu erheblichen Fehleinschätzungen der Gefährdungssituation kommen, wenn die externen Faktoren nicht berücksichtigt werden.

### **a. Luftdruck und Wind**

Wichtig ist hier der Einfluß der Umgebungsluft. In zahlreichen Deponien und Altablagerungen konnte eine eindeutig negative Korrelation zwischen Emission und Luftdruck aufgezeigt werden. Bei fallendem Luftdruck (Schwankungen zwischen 10 - 30 mbar sind normal) erhöhen sich die Emissionen einer Deponie erheblich. Die Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Emissionen, hier gemessen an einer künstlich geschaffenen Gasaustrittsöffnung (Betonrohr), und dem Luftdruck. Bei einer Druckabnahme steigt die austretende Gasmenge an. Das bedeutet, daß bei konstanter Deponiegasproduktion durch äußere Bedingungen (hier fallender Luftdruck) Emissionen mit größerem Volumenstrom stattfinden.



**Abb. 3** Abhängigkeit der austretenden Gasmenge vom Luftdruck, gemessen an einer künstlich geschaffenen Gasaustrittsöffnung (RETTENBERGER et al., 1982)

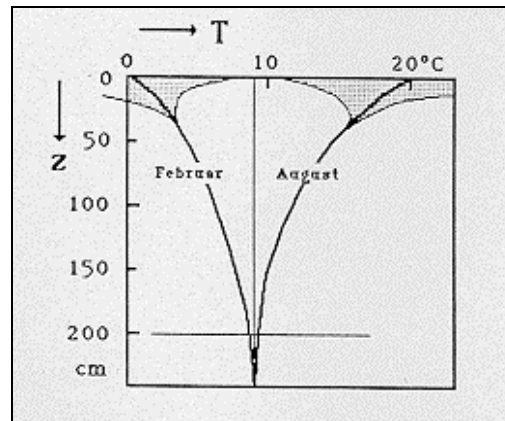
Dagegen ist der Einfluß von Wind auf den Deponiekörper meist zu vernachlässigen. Die Tiefe, bis zu der ein Windeinfluß im Boden noch meßbar ist, hängt von der Windgeschwindigkeit ab. Für eine Deponie mit einer Hangneigung von 1 : 3 ergibt sich bei starkem Wind (40 m/s) ein Staudruck von 4 mbar. Bei 5 m/s Windgeschwindigkeit beträgt der Wert nur 0,06 mbar. Die Drücke nehmen mit der Tiefe ab und betragen z.B. bei Sand in einer Tiefe von 5 m lediglich noch ein Zehntel des ursprünglichen Wertes. Somit ist ein Einfluß nur bei sehr starken Winden im oberflächennahen Bereich zu erwarten.

### b. Niederschlag

Durch erhöhte Niederschlagsmengen wird sowohl der Wassergehalt erhöht, was zu einer erhöhten Gasproduktion führt, als auch die Durchlässigkeit von mineralischen Oberflächenabdeckungen herabgesetzt. Gasemissionen können nach Niederschlagsereignissen kurzzeitig verringert werden.

### c. Außentemperatur

Die Beeinflussung bzw. Eindringtiefe der Witterung wird in Mitteleuropa 2 m nicht übersteigen. Bei geringem Wassergehalt des Substrates wird sie eher geringer sein. Die Temperatur in ca. 2 m Tiefe ist dabei ungefähr gleich dem Jahresmittel der Lufttemperatur über dem Boden (8 - 10°C). Die Abbildung 4 zeigt, daß der typische Temperaturverlauf sich mit zunehmender Tiefe dem Jahresmittel der Lufttemperatur über dem Boden angleicht. Bei Temperaturmessungen sollte dies berücksichtigt werden.



**Abb. 4 Charakteristische Temperaturprofile eines Bodens im Februar und August (RICHTER, 1986)**

#### **d. Abdichtung - Abdeckung**

Je nach Qualität der Oberflächenabdeckung werden die genannten Einflüsse der Umgebungsluft ausgeschaltet. Durch Abdichtungsmaßnahmen (Oberflächenabdichtung) wird die Gasumwandlung (Methanoxidation) reduziert, und es kann zu einem Druckanstieg innerhalb des Deponiekörpers kommen. Dies kann in der Folge zu konzentrierten Austritten von Deponiegas am Rand und an Schadstellen der Abdichtung führen.

Eine Beeinflussung des Wasserhaushaltes der Altablagerung ist durch Abdichtungsmaßnahmen gegeben. Die Ausführungen zum Wassergehalt (vgl. Kap. 2.4.1) sind unter diesem Blickwinkel ebenfalls zu berücksichtigen.

Für die Bewertung der gasförmigen Emissionen ist der Feuchtigkeitsgehalt der mineralischen Abdeckung zu berücksichtigen (siehe Begehung mit dem Gasspürgerät mit FID, Kap. 3.2.2.2), da bei hohem Feuchtigkeitsgehalt der Abdeckung Emissionen verringert werden.

#### **e. Grundwasserstand - Wasserzutritte**

Durch GW - Zutritte wird der Wassergehalt des Abfalls erhöht. Bedingt durch die Lage der Deponie können zusätzliche Wasserzutritte (z.B. Überschwemmungsgebiet, Hangwasserzutritt) stattfinden.

Ob sich die Gasproduktion dadurch erhöht, ist nicht eindeutig zu beurteilen, da andere Effekte wie Temperaturerniedrigung und Abführung von org. Säuren mit zu berücksichtigen sind.

Eine Abschätzung dieser Faktoren ist nur im Einzelfall möglich.

#### **f. sonstige externe Faktoren**

Das Verhältnis Oberfläche zu Volumen beeinflusst den Gashaushalt ebenso, wie das umgebende Gestein (Gaswegsamkeit).

Nur aus der Summe der oben aufgeführten Faktoren und der Berücksichtigung von Besonderheiten, die jede einzelne Altablagerung aufweist, ist eine Beurteilung des Gashaushaltes möglich.

## 2.5. Langzeitverhalten der Deponiegasproduktion

Das zentrale Geschehen an Deponien über **lange Zeiträume** bezüglich Sickerwasser- und Gasanfall zeigt für verschiedene Parameter eindeutige Tendenzen. Sie können somit als charakteristische Größen herangezogen werden (FARQUHAR et al., 1973 und CHRISTENSEN et al., 1989).

Was die Gasphase anbelangt, sind bislang keine fundierten Untersuchungen über die ausklingende Gasproduktion bei Altablagerungen bekannt. Bei eigenen Untersuchungen und bei einer bundesweiten Datenerhebung<sup>5</sup>, die im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden - Württemberg durchgeführt wurde, konnten typische Phasen erkannt und definiert werden. Diese Phasen sind im Gegensatz zu den "klassischen" Abbaustufen nach FARQUHAR et al., 1973 für das Langzeitverhalten bei Altablagerungen anzuwenden und schließen an die in Abbildung 1 dargestellten Abbaustufen an.

Die Zuordnung zu diesen Phasen kann für Teilbereiche einer Altablagerung in gewissen Grenzen differieren. Dieses Problem der Inhomogenität der Porengaszusammensetzung stellt sich besonders nach Abbruch der Gasproduktion. Lokale Unterschiede der Gaskonzentration werden zwar durch Diffusionsvorgänge z.T. ausgeglichen, können aber dennoch zu einer Fehleinschätzung führen. Um dies zu vermeiden, ist das Untersuchungsprogramm auf diese Problematik abzustimmen.

Wichtig ist jedoch, daß die im folgenden beschriebenen Phasen nur in eine Richtung ablaufen.

### Grenzen der Anwendung dieser Phasen

Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß durch Baumaßnahmen eine Veränderung von bestehenden Gleichgewichten verursacht wird. Dies ist vor allem bei nachträglich aufgebrachtene Oberflächenabdichtungen oder Versiegelung durch Schwarzelag zu erwarten. Hier wird der Ablauf von Austauschprozessen gestört und eine veränderte Porengaskonzentration verursacht, was eine neue Zuordnung bedeuten würde.

Durch Wasserzugabe (z.B. Grundwasseranstieg) ist es nach heutigen Erkenntnissen theoretisch möglich, daß eine verstärkte Gasproduktion einsetzt. Inwieweit diese Fälle jedoch in der Praxis relevant sind, läßt sich bisher nicht abschätzen.

Wie oben angeführt ist es möglich, daß die Zuordnung zu diesen Phasen für Teilbereiche einer Altablagerung in gewissen Grenzen differieren kann. Dies ist für eine Gefährdungsabschätzung insofern zu berücksichtigen, daß diejenige Phase zugrundegelegt wird, die eine Einschätzung auf der sicheren Seite ermöglicht. Es kann aus mehreren Gründen erforderlich sein, eine Altablagerung in gesonderte Teilbereiche zu unterteilen:

- Für große Altablagerungen ist es vorteilhaft, verschiedene Bereiche getrennt zu betrachten, da hier auch aufgrund der unterschiedlichen Ablagerungszeiträume mit verschiedenen Gaskonzentrationen zu rechnen ist.

---

<sup>5</sup> siehe hierzu Kapitel 3: "Typisierung" von Altablagerungen

- Bestimmte Teile einer Altablagerung wurden ausschließlich mit Bauschutt oder Erdaushub verfüllt und lassen sich abgrenzen.
- Altablagerungen mit ungewöhnlich langen Verfüllzeiten bzw. auffälligen örtlichen Gegebenheiten.

## Einteilung

Die Phasen des Langzeitverhaltens der Deponiegasproduktion bei Altablagerungen sind wie folgt eingeteilt (Übersicht in Abbildung 6):

### Phase I

**Stabile Methanphase:** etwa 1 - 3 Jahre nach Ablagerung ist im Normalfall die stabile Methanphase erreicht. Von dieser Phase kann dann gesprochen werden, wenn im Deponiegas ein Verhältnis von 55 Vol-% CH<sub>4</sub> zu 44 Vol-% CO<sub>2</sub> ( $CH_4 / CO_2 = 1,2$ ) erreicht ist. O<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> sind nicht oder nur in Spuren im Deponiegas vorhanden.

In die Phase I wurden bei der Datenerhebung diejenigen Altablagerungen gestellt, die bei längeren Absaugversuchen Methangehalte um 55 Vol-% aufwiesen. Altablagerungen in diesem Stadium ohne geeignete Oberflächenabdichtungen und entsprechende Entgasungsmaßnahmen zeigen sehr hohe Emissionswerte an der Oberfläche.

### Phase II

Phase steigender CH<sub>4</sub> / CO<sub>2</sub> - Verhältnisse ( $CH_4 / CO_2 > 1,5$ ). Diese auch als **Langzeitphase** bezeichnete Phase ist dadurch charakterisiert, daß hohe Methanwerte im Deponiekörper gemessen werden können. Eine Erklärung für die hohen Methanwerte liegt zum einen bei der Ausgangs-Gaszusammensetzung. Normalerweise entstehen aus Hausmüll Gase mit einem Gehalt von 55 Vol-% CH<sub>4</sub> und 44 Vol-% CO<sub>2</sub>. Je nach Ausgangsmaterial und Abbaugeschwindigkeit ist eine andere Gaszusammensetzung zu erwarten (Übersicht Abbildung 5).

Abbaugeschwindigkeit im Fermentationsprozeß		
schnell <-----		-----> langsam
Stärke, Zucker Glykogen	Zellulose Hemizellulose	Lignin (verholztes Material)
Fettsäuren	Pentosane	
Eiweiß, Peptide Zellulose Aminosäuren	Pektin Chitin	ligninkrustierte (Stroh)
Vitamine Antibiotika	Fette Öle	Keratin (Haare) Kutin Suberin (Korkstoff) Wachse

**Abb. 5 Abbaugeschwindigkeit verschiedener Stoffe**

Die Menge und die Zusammensetzung des bei vollständiger Zersetzung der organischen Substanz erzeugten Gases hängt vom Verhältnis C : H : O : N in den abzubauenen Grundstoffen und von der Temperatur (und anderen Faktoren) ab.

Von den wesentlichen Gruppen organischer Stoffe liefern

- Fette das meiste Gas mit hohem CH<sub>4</sub>-Gehalt
- Eiweißstoffe geringere Gasmengen mit ebenso hohem CH<sub>4</sub>-Gehalt
- Kohlenhydrate verhältnismäßig wenig Gas mit dem geringsten CH<sub>4</sub>-Gehalt.

Die Abbaugeschwindigkeit dieser Stoffe ist für die Ausgangsgaszusammensetzung wichtig.

Eine Veränderung dieser Ausgangs - Gaszusammensetzung wird aber auch durch Transportvorgänge (z.B. Auswaschung) hervorgerufen. Bei 20°C ist die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser sehr viel höher als die Löslichkeit von CH<sub>4</sub> (CO<sub>2</sub> = 1.685 mg/l gegenüber CH<sub>4</sub> = 24 mg/l). Dadurch kann CO<sub>2</sub> durch Wasserbewegung ausgewaschen werden. Das Verhältnis CH<sub>4</sub> zu CO<sub>2</sub> verschiebt sich zugunsten von CH<sub>4</sub>.

Bei den Altablagerungen, die in diese Phase gestellt wurden, sind in der Regel deutlich über 50 Vol-% CH<sub>4</sub> im Deponiekörper gemessen worden (mittels Sonden, aber auch Absaugversuche). Der Höchstwert lag bei 85 Vol-% CH<sub>4</sub> (keine Angaben über Meßvorgang). Das Verhältnis CH<sub>4</sub> zu CO<sub>2</sub> lag zwischen 1 und 4. Altablagerungen in diesem Stadium zeigen ebenfalls hohe Emissionswerte bei fehlenden Gegenmaßnahmen.

### Phase III

**Luft eindringphase:** es tritt O<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> zu (Atmosphärenluft), wobei das Verhältnis im Porenraum weit von dem von Luft abweicht. Das CH<sub>4</sub> / CO<sub>2</sub> - Verhältnis nimmt wieder ab.

Die Ausgangs-Gaskonzentration wird durch den Luftzutritt verdünnt. Es sind Methangehalte zwischen 10 - 40 Vol-% meßbar. Die CO<sub>2</sub>-Gehalte liegen zwischen 5 - 30 Vol-%. Ein beträchtlicher Anteil an N<sub>2</sub> ist nachweisbar (10 - 30 Vol-%).

Diese Phase ist gekennzeichnet durch Verdünnung des Deponiegases. Dies ist kein Prozess, der homogen in allen Bereichen der Altablagerung stattfindet. Es ist z.B. denkbar, daß am Rand (Böschung / Oberflächenabdichtung) schon die Phase IV erreicht ist, während im Deponeiekern die Phase III vorherrscht.

### Phase IV

**Methanoxidationsphase:** Wegen der verringerten Gasproduktion dringt verstärkt Luft in den Deponiekörper ein. Methan wird oxidiert und es entsteht Kohlendioxid. Dieser Vorgang verschiebt das Verhältnis CH<sub>4</sub> zu CO<sub>2</sub> unter 1.

Methanoxidation wird von einer Reihe von Mikro-Organismen ausgeführt, die als methylo-troph bezeichnet werden. Diese Organismen sind in der Lage, durch Oxidation von reduzierten Kohlenstoff - Komponenten Energie zu gewinnen. Über 100 Spezies von methylo-trophen Bakterien sind bekannt und in der Natur weit verbreitet (z.B. im Boden, in See-Sedimenten, in marinen Sedimenten). Voraussetzung ist das gleichzeitige Vorhandensein von Methan und Sauerstoff. Der Sauerstoff der Luft wird verbraucht, und es tritt relativ viel zusätzlicher Stickstoff auf. Dieser zusätzliche Stickstoff (hier als N<sub>Rest</sub> bezeichnet) läßt sich leicht bestimmen aus der Differenz:

$$N_{\text{Rest}} = (N_2 - 3,78 \times O_2)$$

Eine typische Gaszusammensetzung ist wie folgt:

CH <sub>4</sub> :	20 Vol-%
CO <sub>2</sub> :	30 Vol-%
N <sub>2</sub> :	45 Vol-%
O <sub>2</sub> :	5 Vol-%

In dieser Phase finden normalerweise keine Emissionen in den Luftraum mehr statt.

### Phase V

**Kohlendioxidphase:** Methan geht gegen Null, es ist noch relativ viel Kohlendioxid vorhanden. In den Bereichen, die noch anaerobes Milieu aufweisen, wird das Methan fast vollständig abgebaut. Dadurch wird der Kohlendioxidgehalt gegenüber der normalen Bodenluftzusammensetzung erhöht. Durch den aeroben Abbau von restlichem organischem Material entsteht ebenso Kohlendioxid.

In dieser Phase sind im Deponiekern die Methangehalte sehr gering (max. 2 - 5 Vol-%). Die CO<sub>2</sub>-Gehalte liegen zwischen 5 und 20 Vol-%. Neben erhöhtem N<sub>2</sub>-Gehalt (> 60 Vol-%) sind gegenüber unbeeinflusster Bodenluft erniedrigte O<sub>2</sub>-Gehalte meßbar (< 15 Vol-%).

### Phase VI

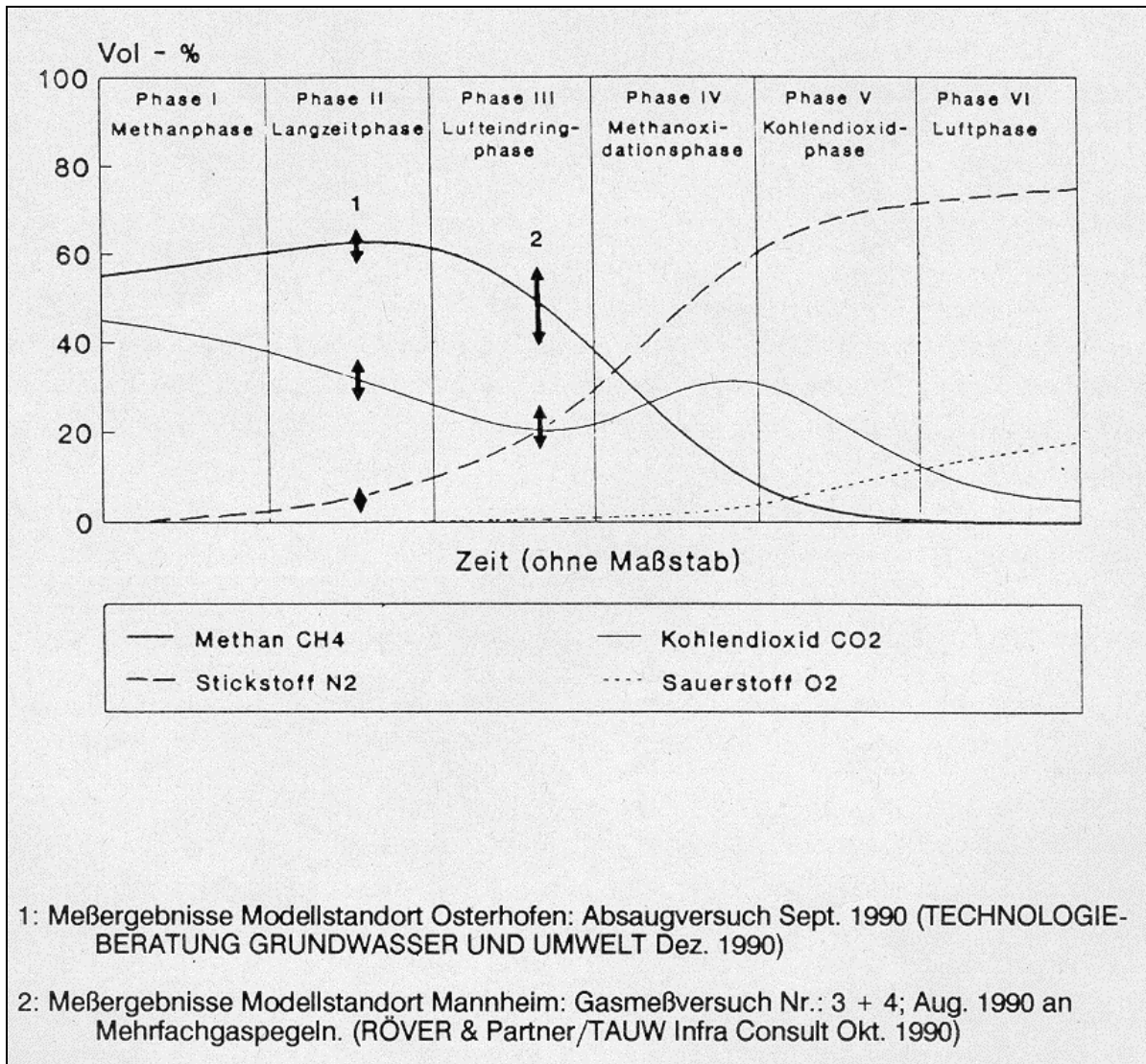
**Luftphase:** Nimmt der Kohlendioxidgehalt noch mehr ab und geht gegen wenige Vol-% und nimmt der Sauerstoffgehalt zu (rund 20 Vol-%), so ist die Luftphase erreicht und eine Beeinflussung des Bodenluft- bzw. Porenbereichs in der Deponie durch Deponiegas abgeschlossen.

Der Sauerstoffgehalt in der Bodenluft ist oft geringer als in der Atmosphäre, weil die bei Lebensvorgängen aller Art im Boden verbrauchte Sauerstoffmenge nur relativ langsam aus der atmosphärischen Luft ersetzt wird. Die O<sub>2</sub>-Gehalte sind also in entscheidendem Maße abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit, d.h. von der Durchlässigkeit gegenüber Atmosphärenluft.

Die typische Gaszusammensetzung in dieser Phase ist:

CH <sub>4</sub>	0 Vol-%
CO <sub>2</sub>	4 Vol-%
N <sub>2</sub>	78 Vol-%
O <sub>2</sub>	18 Vol-%.

Aufgrund der in diesem Kapitel erläuterten Zusammenhänge lassen die oben aufgeführten unterschiedlichen Phasen einen unterschiedlichen Grad der Gefährdung durch Deponiegas erwarten. Der Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Phasen und der Bewertung ihrer Stoffgefährlichkeit wird im Kapitel 4, erläutert.



**Abb. 6: Deponiegas - Langzeitkonzentrationsverlauf bei Altablagerungen**



### **3. Maßnahmen zur Gefährdungsabschätzung**

#### **3.1. Charakterisierung von Altablagerungen anhand von Daten aus der historischen Erkundung ("Typisierung")**

##### **3.1.1. Zielsetzung der "Typisierung"**

Das Altlastenhandbuch (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN - WÜRTTEMBERG, 1988) empfiehlt eine vergleichende Bewertung der Einzelstandorte. Sie soll zur Einstufung von Verdachtsflächen herangezogen werden, um Prioritäten für weitere aufwendige Einzelstandortuntersuchungen zu setzen.

Als Hilfe bei der ersten Bewertung einer Altablagerung ist die **"Typisierung"** zu verstehen. Sie soll durch äußere Merkmale, die bei der historischen Erkundung erkannt wurden, den Zustand einer Altablagerung in Bezug auf Deponiegas wiedergeben. Die "Typisierung" ist Grundlage zur Bewertung der Altablagerung und zur Ermittlung des Gefährdungspotentials. Desweiteren dient sie zur Einschätzung des sich ergebenden Handlungsbedarfs. Die "Typisierung" ist auch entscheidend für die Auswahl der einzelnen Untersuchungsmethoden.

Ziel der "Typisierung" ist es, einen Zusammenhang zwischen den Deponiedaten und dem Zustand einer Deponie herzustellen. Die Charakterisierung des Gashaushaltes und somit eine Einschätzung der Stoffgefährlichkeit erfolgt über die Zuordnung zu einer Phase.

Zusammen mit weiteren Kriterien, wie Nutzung der Altablagerung, Nähe zur Wohnbebauung etc., kann eine Gefahreneinschätzung vorgenommen werden, aus der sich das weitere Vorgehen ableitet (Ausscheiden oder technische Erkundung).

Die Zuordnung zu den Phasen ist als formalisierte Bewertung zu verstehen, die z. B. bei Anwendung von Experten - Systemen eingesetzt werden kann. Sie gibt den Ausgangswert (Stoffgefährlichkeit) für die Bewertung wieder.

Die folgenden Schritte bei der Erkundung von Altablagerungen sind an die Phasen angepaßt und erleichtern die Verständigung unter Fachleuten und innerhalb von Bewertungskommissionen.

Die Definition der einzelnen Phasen ist in Kapitel 2.5. zu finden.

### 3.1.2. Entwicklung des Verfahrens der "Typisierung"

In Form einer Datenerhebung wurden solche Altablagerungen erfaßt, die aufgrund einer technischen Erkundung die Zuordnung zu den definierten Phasen zuließen. Die Merkmale dieser Altablagerungen wurden mit Hilfe eines Fragebogens erfaßt und in Klassen eingeteilt. Anschließend wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen Merkmalen und Phasen besteht.

Insgesamt wurden 84 Altablagerungen mit den Merkmalen Alter, Größe, Höhe, Materialzusammensetzung, Einzugsbereich, Morphologie, Einbau und Schüttgeschwindigkeit aufgenommen. Aufgrund der Befunde hat es sich gezeigt, daß 5 Merkmale relevant in Bezug auf den Gashaushalt sind. Die Entwicklung des Verfahrens der "Typisierung" ist in der Anlage 2 dargestellt.

Im folgenden wird die Vorgehensweise für die "Typisierung" aufgezeigt.

### 3.1.3. Durchführung der "Typisierung"

Mit den aus der historischen Erkundung gewonnenen Daten soll eine Zuordnung zu den Phasen vorgenommen werden. Dazu sind folgende Merkmale zu erheben:

- **Alter,**
- **Größe,**
- **Höhe,**
- **Zusammensetzung** und
- **Einbau.**

Die Daten sind zunächst in die verschiedenen Klassen einzuteilen (siehe Tabelle 2). Diese Klasseneinteilung hat sich bei der Entwicklung der "Typisierung" als praktikabel erwiesen und ist auf die übliche Datenlage, d.h. auf Daten, die bei der historischen Erkundung gewonnen werden, abgestimmt.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß die "Typisierung" vom Alter ausgeht, dieses Merkmal also auf jeden Fall als entscheidende Größe bekannt sein muß<sup>6</sup>, Nach diesem Schritt kommt die eigentliche "Typisierung". Die Tabelle 3 stellt die Werte in den einzelnen Merkmalskombinationen dar. Es sind die fünf Merkmale Alter, Größe, Höhe, Zusammensetzung und Einbau berücksichtigt. Eine Gewichtung der einzelnen Merkmale ist durch diese Wertetabelle gegeben.

Der Vorteil bei diesem Verfahren liegt bei der schnellen und einfachen Ermittlung der Phase. Da viele Merkmale bei Altablagerungen unbekannt oder sehr ungenau sind, kann auch mit weniger als diesen fünf Merkmalen die "Typisierung" durchgeführt werden.

---

<sup>6</sup> Bei der Datenerhebung hat sich gezeigt, daß dieses Merkmal in fast allen Fällen wenigstens näherungsweise bekannt ist (Angaben wie "Ende der 60er Jahre" etc.). Durch die Einteilung in Klassen wird diese Ungenauigkeit egalisiert.

Die Merkmale sind wie folgt zu charakterisieren:

**Alter:**

Es ist das Alter seit Abschluß der Deponie einzusetzen.

**Größe:**

Die Größe ist auf die gesamte Altablagerung bezogen, also Summe der abgelagerten Stoffe einschließlich des Inertanteils (Bauschutt und Erdaushub).

**Höhe:**

Hier muß ein repräsentativer Mittelwert angenommen werden (arithmetisches Mittel). Im Zweifelsfall ist der (geschätzte) Maximalwert heranzuziehen.

**Zusammensetzung:**

Man unterstellt, daß Hausmüll abgelagert wurde; die Zusammensetzung des abgelagerten Materials ist sehr schwer durch Recherchen zu ergründen. Meist fehlen Aufzeichnungen über die Herkunft und genaue Zusammensetzung.

**Einbau:**

Hier können Luftbilder und Zeugenbefragungen sehr hilfreich sein, um den Sachverhalt zu klären.

Altersklasse		Größenklasse	
0 - 5 Jahre	1	bis 10 000 m <sup>3</sup>	1
6 - 10 Jahre	2	10 000 bis 50 000 m <sup>3</sup>	2
11 - 15 Jahre	3	50 000 bis 150 000 m <sup>3</sup>	3
16 - 20 Jahre	4	150 000 bis 500 000 m <sup>3</sup>	4
21 - 25 Jahre	5	über 500 000 m <sup>3</sup>	5
26 - 30 Jahre	6		
über 30 Jahre	7		

Höhenklasse		Zusammensetzung	
bis 1 m	1	Anteil 30 % HM+KS	1
1 bis 2 m	2	Anteil 50 % HM+KS	2
2 bis 5 m	3	Anteil 100 % HM+KS	3
5 bis 10 m	4		
über 10 m	5		

Einbau	
Brände, Vorrotte	1
Kippkante	2
Lagenweise	3

HM = Hausmüll  
KS = Klärschlamm

**Tab. 2 Zuordnung der Merkmale zu den Klassen**

		Alter						
		1	2	3	4	5	6	7
Größe	5	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5
	4	2	2,5	2,7	2,9	3,4	3,7	4
	3	3	3,75	3,9	3,9	4	4,2	4,5
	2	3,5	4	4,5	4,7	4,9	5	5,5
	1	4	4,5	4,7	5	5,3	5,6	6
Höhe	5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
	4	1,5	2	3	3,5	3,7	4	5
	3	3	3	4,25	4,4	4,5	4,5	5
	2	4,5	4,5	5	5	6	6	6
	1	5	5	5	6	6	6	6
Zusammen- setzung	3	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
	2	2	2,2	2,8	3,6	4	4,6	5
	1	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Einbau	3	1	1,33	2	2,5	2,7	3	3,3
	2	2	2,25	3	3,6	3,8	4	4,6
	1	3	3,5	4	4,5	5	5,5	5,5

Tab. 3 Wertetabelle für die Typisierung

Aus der Zuordnung der 5 Merkmale ergeben sich 4 Werte. Daraus ist der Mittelwert zu bilden. Dieser Wert (gerundet) stellt die Phase aus der "Typisierung" dar.

### 3.1.4. "Typisierung" des Modellstandortes Osterhofen

Der **Modellstandort Osterhofen** ist durch folgende Merkmale charakterisiert (siehe Anlage 1.1):

Jahr des Deponieabschlusses:	1976
Größe:	300 000 m <sup>3</sup>
Höhe:	bis 9 m
Zusammensetzung:	70 % Hausmüll, 20 % Bauschutt, 10 % Sperrmüll
Einbau:	ungeordnet, über Kippkante

		Alter						
		1	2	3	4	5	6	7
Größe	5	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5
	4	2	2,5	2,7	2,9	3,4	3,7	4
	3	3	3,75	3,9	3,9	4	4,2	4,5
	2	3,5	4	4,5	4,7	4,9	5	5,5
	1	4	4,5	4,7	5	5,3	5,6	6
Höhe	5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
	4	1,5	2	3	3,5	3,7	4	5
	3	3	3	4,25	4,4	4,5	4,5	5
	2	4,5	4,5	5	5	6	6	6
	1	5	5	5	6	6	6	6
Zusammen- setzung	3	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
	2	2	2,2	2,8	3,6	4	4,6	5
	1	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Einbau	3	1	1,33	2	2,5	2,7	3	3,3
	2	2	2,25	3	3,6	3,8	4	4,6
	1	3	3,5	4	4,5	5	5,5	5,5

**Tab. 4 Wertetabelle für die Typisierung des Modellstandortes Osterhofen bezogen auf das Jahr 1991**

Folgende Werte sind aus der Wertetabelle ersichtlich:

Größe: 2,7  
Höhe: 3  
Zusammensetzung: 2  
Einbau: 3  
10,7

Dieser Wert ist durch die Anzahl der eingesetzten Merkmale zu teilen:

$$10,7 / 4 = 2,6$$

Es ergibt sich somit durch Rundung eine Zuordnung zur Phase III.

Aufgrund der technischen Erkundung wurde der Modellstandort Osterhofen der Phase II zugeordnet. Dieses Beispiel veranschaulicht, daß mit der "Typisierung" eine Ersteinschätzung in Bezug auf den Gashaushalt möglich ist. Eine genauere Zuordnung ist nur durch die technische Erkundung zu gewährleisten. Mit der "Typisierung" ist es möglich, ein maßgeschneidertes Untersuchungsprogramm durchzuführen und somit die technische Erkundung sehr effektiv zu gestalten (Kapitel 4. Handlungsanweisung).

## 3.2. Untersuchungsmethoden

### Vorbemerkung:

Wie im Kapitel 2 dargelegt, ist der Gashaushalt einer Altablagerung durch mehrere Vorgänge innerhalb des Deponiekörpers zu charakterisieren. Die Porengaskonzentration spiegelt nur das Ergebnis dieser Vorgänge wider. Um eine Gefährdungsabschätzung vorzunehmen, sind neben der Porengaskonzentration als Stoffgefährlichkeit  $r_0$  nach Altlastenhandbuch Baden - Württemberg (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN - WÜRTTEMBERG, 1988) der Schadstoffaustrag, der Schadstoffeintrag, sowie der Schadstofftransport und die Schadstoffwirkung zu betrachten. Daraus ergeben sich für die Untersuchungsmethoden folgende Fragestellungen:

- Wie ist die Gaszusammensetzung im Deponiekörper (Deponiegasporenkonzentration)?
- Wie ist das Emissionsgeschehen sowohl seitlich in den die Altablagerung umgebenden Untergrund als auch in die Atmosphäre?
- Wie stark werden Schutzgüter, z.B. Raumluft/Atmosphäre beeinflusst?

Ausgehend von diesen Überlegungen müssen Gasproben in den verschiedensten Bereichen gewonnen und beurteilt werden. Zweckmäßigerweise kommen dabei ganz unterschiedliche Probenahmetechniken zur Anwendung, die in nachfolgender Reihenfolge in diesem Kapitel behandelt werden.

Für die **Porengaskonzentrationsmessungen** einschließlich Bodenluftmessungen sind folgende Methoden anzuwenden:

- Sondenmessungen,
- Absaugversuche und
- Erfassung der Deponiegasspurenstoffe.

Für **Gasemissionsmessungen** sind

- Gasmengenmessungen mit Gasboxen,
- Begehungen mit dem Gasspürgerät mit FID und
- Begehungen mit dem Gasspürgerät mit PID geeignet.

Unter dem Überbegriff **Sonderuntersuchungen** sind Methoden mit verschiedenen Fragestellungen zusammengefaßt:

- Kondensat- und Sickerwasseranalytik,
- Druck-, Temperaturmessungen und
- Materialuntersuchungen.

**Raumluftmessungen** sind als Untersuchungsmethode für die Frage nach der Schadstoffwirkung zu betrachten. Als Abschluß des Kapitels Untersuchungsmethoden wird ein kurzer Überblick über die **Gasanalytik** gegeben.

Die Untersuchungsmethoden beinhalten jeweils den theoretischen Hintergrund und die Zielsetzung, die Durchführung mit technischen Angaben, die Kosten, bezogen auf das Jahr 1990,

die Bewertung einschließlich einer Empfehlung über die Anwendung der Methode und die Erfahrungen an den Modellstandorten.

### 3.2.1. Gaskonzentrationsmessungen

#### 3.2.1.1. Sondenmessungen

##### Theoretischer Hintergrund - Zielsetzung

Aufgrund des durch die Gasproduktion bedingten Gasdrucks im Deponiekörper wird das Gas aus dem Deponiekörper abtransportiert. Sobald der Gasvolumenstrom vergleichsweise klein wird, kann Luft, durch Diffusion hervorgerufen, in den Deponiekörper eindringen. Eine Vermischung von Deponiegas mit der Umgebungsluft findet also bereits im Deponiekörper bzw. in der Abdeckschicht statt. Durch diesen Sachverhalt lassen sich an Deponien stets Gradienten in vertikaler Richtung beobachten (Abbildung 7). Bei seitlich aus dem Deponiekörper ausströmendem Gas (Gasmigration) treten ähnliche Gradienten auf. Allerdings verlaufen diese auch in horizontaler Richtung.

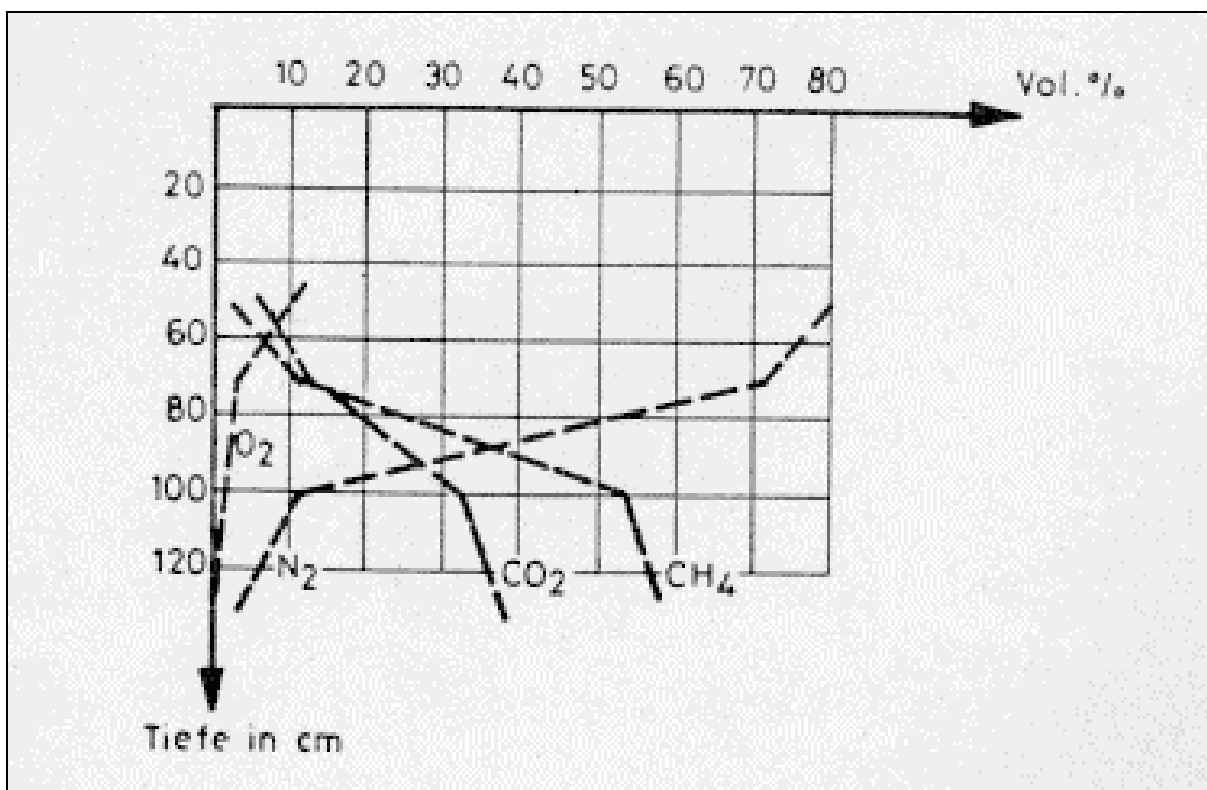


Abb. 7 Beispiel eines Porengasgradienten an einer in Betrieb befindlichen Deponie (RETTENBERGER et al., 1982)

Die Gradienten sind abhängig von der Gasproduktion, der Oberflächenabdeckung und dem herrschenden Luftdruck und zeigen bei Altablagerungen eine eintretende Veränderung des anaeroben Milieus hin zum aeroben Milieu an.

Findet innerhalb einer Deponie eine starke Gasproduktion statt, lassen sich an jeder Stelle der Deponie ähnliche Porengaskonzentrationen feststellen. Bei abklingender Gasproduktion können Bereiche unterschiedlicher Porengaskonzentrationen vorliegen.

Ziel bei Sondenmessungen in Bezug auf Porengaskonzentrationen ist die Gewinnung von:

- Proben zur Bestimmung von Gradienten
- Proben aus bestimmten Bereichen

Die Porengas- / bzw. Bodenluftproben müssen aus einer eng begrenzten Zone entnommen werden. Um dies zu erreichen, sind einige Grundsätze zu beachten:

- Probenahme erst nach entsprechender Wartezeit, da die Installationsarbeiten die Verhältnisse im Untergrund beeinflussen.
- Abdichtung der Sonde gegen Zutritt von Außenluft.
- kleines Probenvolumen, um Verhältnisse im Untergrund nicht zu stören bzw. eine Beeinflussung anderer Entnahmehorizonte auszuschließen.

Einen Sonderfall stellen Sondenmessungen in Bezug auf Deponiegasspurenstoffe dar. Hier ist es sinnvoll, Proben, die für einen größeren Bereich repräsentativ sind, zu entnehmen.

Repräsentative Probenahme/ Beprobungsraster

Zur Bestimmung der Porengaskonzentration würde bei hoher Gasproduktion theoretisch 1 Probenahme an einer beliebigen Stelle der Deponie ausreichen, um die Stoffgefährlichkeit zu ermitteln. Dies ist bei Altablagerungen deshalb nicht möglich, da mit einer abnehmenden Gasproduktion zu rechnen ist und somit Bereiche mit sehr unterschiedlichen Porengaskonzentrationen vorliegen (siehe Kapitel 2.5). Die Frage nach der Anzahl der Sonden zur Erlangung von repräsentativen Proben ist deshalb entscheidend. Als Beispiel wird in Anlage 7 eine statistische Auswertung mittels Zufallszahlen an einer Altablagerung in Phase II durchgeführt. Die Vorgehensweise ist dort dargestellt. Das Ergebnis läßt sich wie folgt zusammenfassen:

Mit einer sehr geringen Anzahl von Meßwerten (10) läßt sich ein vergleichbares Ergebnis in bezug auf den Methangehalt - Mittelwert erzielen wie mit einer großen Anzahl (100). Die Standardabweichung ist in allen untersuchten Gruppen (Anzahl: 100, 50, 30, 20, 10) ähnlich, d.h. die Streuung der einzelnen Meßwerte innerhalb der Gruppen ist annähernd gleich.

### **Durchführung:**

Je nach Zielsetzung (Deponiegasporenkonzentration bzw. Deponiegasspurenstoffe) und Erkundungsniveau sollten verschiedene Gasmeßstellen eingerichtet werden.

Orientierende Messungen mit Gassonden:

Hierzu werden temporäre Gasmeßstellen geschaffen, um Porengas/ Bodenluft zu entnehmen. Verschiedene Verfahren sind gebräuchlich:

- Einrammen/ Einschlagen von Sonden
- Vorbohren und Einstellen von Sonden



Gerammte Sonden bestehen aus Stahl bzw. verzinktem Stahl. Dies ist für einfache Porengas-/Bodenluftbestimmungen ausreichend. Da bei Stahlsonden Korrosion auftritt und bei verzinktem Stahl mit Zinksulfidbildung zu rechnen ist, empfiehlt sich bei vorgesehener Spurenstoffanalyse die Verwendung von Edelstahl.

Bau von stationären Gasmessstellen:

Je nach Beprobungstiefe werden Rammkernsondierungen niedergebracht und mit PE - HD Rohren (evtl. Edelstahlrohren) ausgebaut, die eine entsprechende Filterstrecke aufweisen. Eine Abdichtung gegen Eindringen von Außenluft mit bindigem Material ( $k_f < 10^{-8}$  m/s) sollte mindestens über eine Strecke von 30 cm eingebracht werden. Bei tiefendifferenzierter Beprobung sind die einzelnen Horizonte gegeneinander abzudichten. In Abbildung 8 und 9 sind Beispiele für Gasmessstellen dargestellt.

Eine Übersicht über die verschiedenen Gasmessstellen mit Vor- und Nachteilen gibt Tabelle 5.

### Kosten:

Als Zeitbedarf zur Herstellung eines 2,5 - 3 m tiefen Sondierlochs werden 30 min veranschlagt.

Daraus ergibt sich folgender Kostenrahmen ohne Baustelleneinrichtung:

Vorsondierung ohne Profilaufnahme	DM 14.- bis 20.-/m
Rammkernsondierung mit Profilaufnahme	DM 50.- bis 70.-/m
temporäre Gasmessstelle 2,5 m ohne Analytik	DM 100.- bis 150.-
stationäre Gasmessstelle 2,5 m ohne Analytik	DM 200.- bis 300.-
Probenahme (je nach Verfahren) je Probe	bis DM 80.-
Analytik: Bestimmung CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	DM 80.- bis 130.-

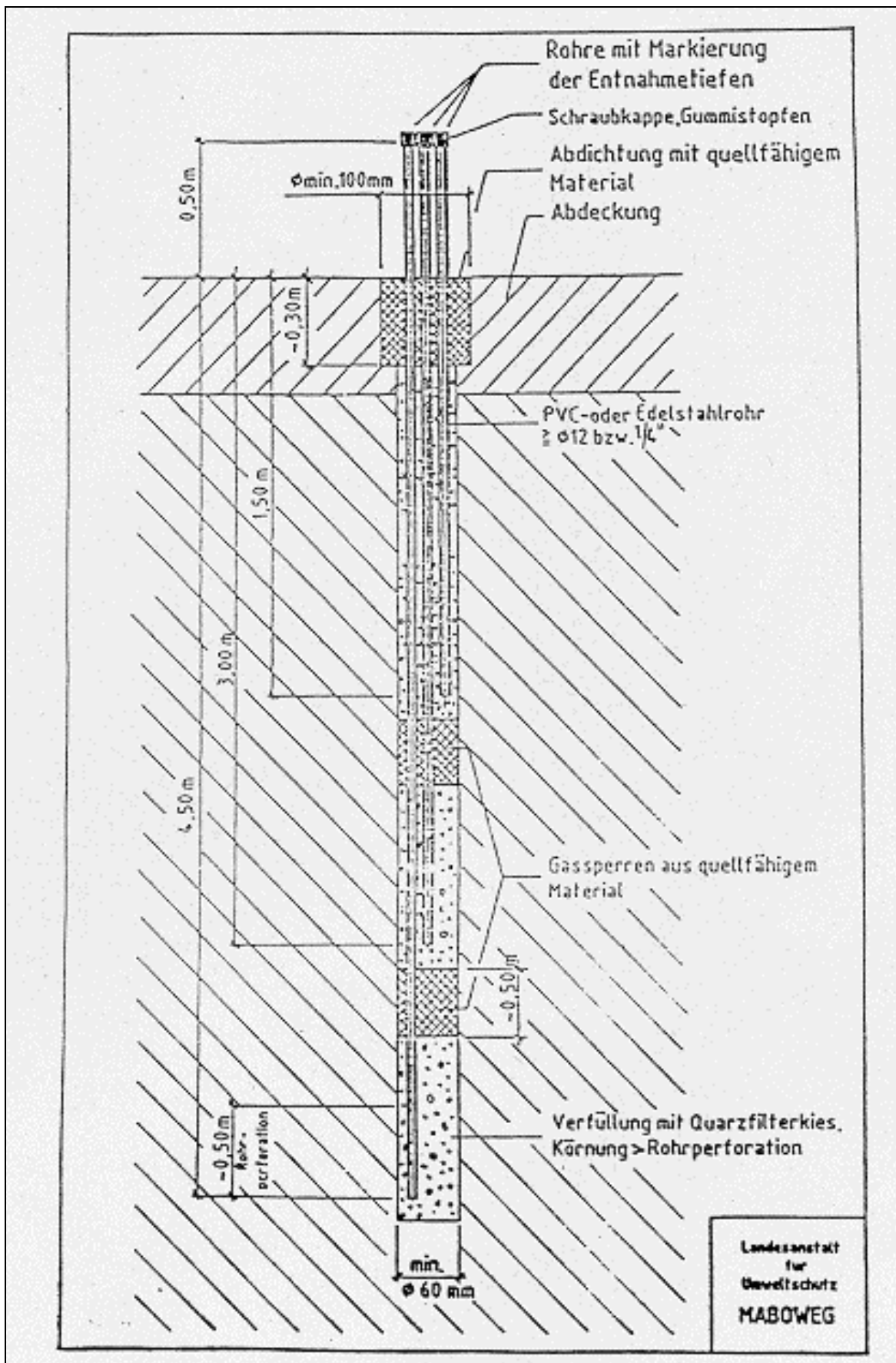


Abb. 8 Temporäre tiefendifferenzierte Gasmessstelle - Standardausbau mit Vorsondierung

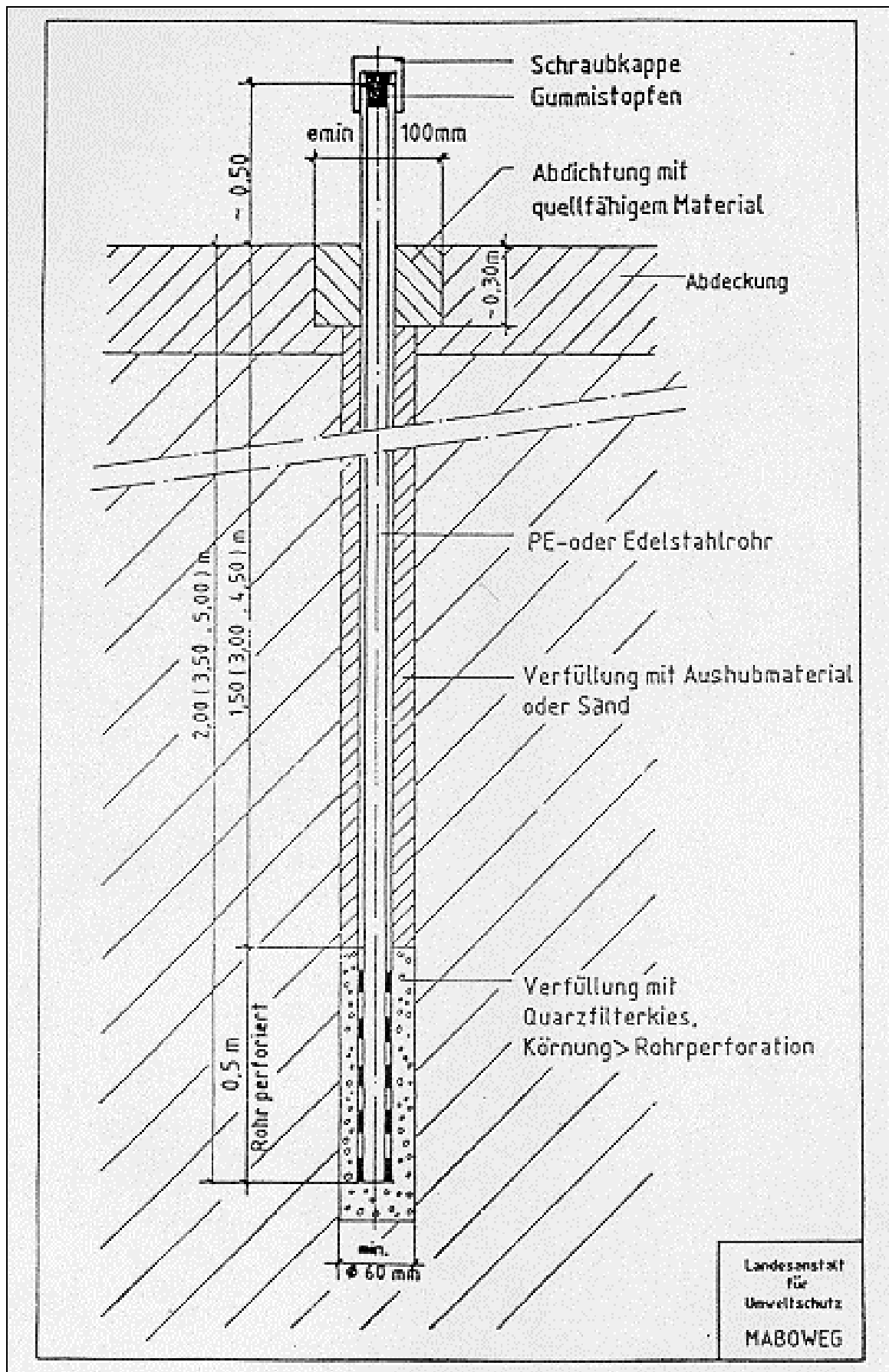


Abb. 9. Temporäre Gasmessstelle - Standardausbau mit Vorsondierung

	<b>stationäre Gasmeßstelle</b>	<b>temporäre Gasmeßstelle vorgebohrt und eingestellt</b>
Herstellung	Rammkernsondierung DN 60 Ausbau mit HDPE - Rohr 30 cm Dichtung mit quellf. Tonmaterial	Rammkern- bzw. Schlitzsondierung Dichtung mit quellf. Ton etc. oder pneumatischer Schlauchdichtung
Zeitbedarf	2 Stunden	30 min ohne Schichtenbeschreibung
Probenahme	Wartezeit mehrere Tage Direktbeprobung Anreicherungsverfahren größere Probenmenge möglich	Wartezeit mehrere Stunden Direktbeprobung problematisch Anreicherungsverfahren geringe Probenmenge
Vorteil	keine Falschlufft kein Stauwasser man gewinnt Kenntnis über Untergrund	kostengünstig man gewinnt Kenntnis über Untergrund
Nachteil	aufwendig und teuer	Falschlufftzutritt Probenahme eingeschränkt
Anwendung	bei Langzeituntersuchung bei größeren Tiefen	bei größerer Tiefe bei Unkenntnis der Untergrundverhältnisse

**Tab.5 Übersicht über verschiedene Gasmeßstellen<sup>7</sup>**

### **Bewertung und Anwendung der Methode:**

Sondenmessungen erlauben es, mit einem geringen finanziellen Aufwand den Porenraum einer Altablagerung zu beproben. Sie stellen damit eine der wichtigsten Untersuchungsmethoden zur Erkundung des Gashaushaltes. Durch Modifikationen in der Ausführung der Meßstelle (z.B. tiefendifferenzierte Sonden) und der Probenahme (z.B. Absaugung einer größeren Menge Deponiegas) lassen sich verschiedene Fragen beantworten. Die Erkundung des Gashaushalts kann auf den verschiedenen Erkundungsniveaus beliebig genau geklärt werden, ebenso eine eventuelle Gefährdung des Umfelds der Altablagerung.

### **Phasen I - II:**

Vertikale Gradienten sind im oberflächennahen Bereich vorhanden. Der Porenraum ist mit Deponiegas erfüllt. Migrationen ins Umfeld sind bei dichter Oberflächenabdeckung und bei bestimmten geologischen Bedingungen möglich und in diesen Phasen zu erwarten.

Eine rasterförmige Beprobung zur Bestimmung der Stoffgefährlichkeit ist nicht erforderlich, wenige Sonden reichen aus.

Zur Bestimmung des Austrags (Migrationen) ist je nach Erkundungsstufe eine rasterförmige Beprobung mit 10 - 30 m Rasterweite sinnvoll.

<sup>7</sup> Kommen andere Verfahren zur Anwendung, so ist die Gleichwertigkeit zu den hier angeführten Meßstellen nachzuweisen.

**Phase III - IV:**

Vertikale Gradienten sind vorhanden. Im Randbereich und in Schwächezonen (Böschung) der Altablagerung dringt Luft ein. Innerhalb der Altablagerung lassen sich Bereiche unterschiedlicher Gaskonzentrationen feststellen. Migrationen ins Umfeld sind bei dichter Oberflächenabdeckung und bei bestimmten geologischen Bedingungen möglich.

Zur Bestimmung der Stoffgefährlichkeit eignen sich tiefendifferenzierte Sonden auf der Altablagerung. Durch Bodenansprache/Schichtenaufnahme ist sicherzustellen, daß die Sonden richtig plaziert sind, d.h., daß die Entnahmehorizonte im mit Hausmüll verfüllten Bereich liegen. Zur Bestimmung von Migrationen ist im betroffenen Bereich eine rasterförmige Beprobung erforderlich. Die Rasterweite kann je nach Erkundungsstufe zwischen 10 - 50 m betragen.

**Phase V - VI:**

Bereiche mit geringem Methangehalt sind noch vorhanden. Migrationen ins Umfeld sind nur noch in Ausnahmefällen zu erwarten.

Die Sonden zur Bestimmung der Stoffgefährlichkeit sind so zu plazieren, daß der Porenraum bis zur Basis der Altablagerung erfaßt wird. Eine bessere Möglichkeit bietet hier ein Absaugversuch, d.h. eine Absaugung der Sonde/n über einen längeren Zeitraum (Kapitel 3.2.1.2.)

**Erfahrungen an den Modellstandorten:**

An den Modellstandorten Mannheim und Osterhofen wurden in bezug auf Sondenmessungen folgende Punkte näher untersucht:

1. Bau von optimal funktionierenden Gasmeßstellen (temporäre/ stationäre Meßstellen und "Mehrfachgassonden" zur tiefendifferenzierten Beprobung) sowie Überprüfung der Dichtigkeit von eingestellten Sonden
2. Ermittlung eines optimalen Meßrasters
3. Einfluß von meteorologischen Faktoren auf die Meßergebnisse
4. Erfäßbarkeit von Deponiegasspurenstoffen
5. Gasmigrationsmessungen

Folgende Erfahrungen konnten dabei gemacht werden:

zu 1.: Um ein Eindringen oder Ansaugen von Falschluff bei der Gasentnahme zu verhindern, ist auf die Abdichtung besonders zu achten. Dies konnte am Modellstandort Mannheim durch den Bau verschiedener Gasmeßstellen mit unterschiedlichen Abdichtungsstärken demonstriert werden. Eine Abdichtung mit quellfähigem Material von mindestens 30 cm Stärke stellte sich als ausreichend heraus.

Bei eingestellten Sonden am Modellstandort Osterhofen ergab sich die Schwierigkeit, daß die Sonde durch Schlamm o.ä. verstopft war, ohne daß dies während der Probenahme erkannt wurde. Erst nach Ziehen der Sonde konnte dies festgestellt werden. Dadurch war es nicht möglich, eine unverfälschte Porenprobe zu erhalten. Durch entsprechende Tests konnte nachgewiesen werden, daß der Zutritt von Falschluff nicht entlang der Sonde stattfand, son-

dern an der Verbindung Sonde - Meßgerät (Probenbehälter). Dazu wurde folgender Versuchsaufbau gewählt:

Ein umgestülpter Plastikeimer wurde über der eingeschlagenen Sonde auf die Oberfläche gesetzt und abgedichtet. Durch Einbringen eines Tracers (hier Propan) in diesen definierten Raum konnte gezeigt werden, daß Falschlufte an der Verbindung Sonde - Meßgerät (Probenbehälter) und an der Sondenverschraubung zutritt. Dieser Zutritt war bei verstopfter Sonde sehr groß, während bei "freier Sonde" kein Tracer in der Gasprobe nachgewiesen werden konnte. Dies veranschaulicht, daß bei geschlagenen Sonden der Nachteil besteht, daß keine Kenntnis über die Untergrundverhältnisse gewonnen werden. Eine gewisse Sicherheit bieten Sonden, die in geschlossenem Zustand niedergebracht und erst zur Probenahme geöffnet werden.

zu 2.: Ein optimales Meßraster konnte nicht ermittelt werden. Es wurde jedoch gezeigt, daß ein sehr enges Meßraster (Punktabstand  $< 10$  m) keine zusätzlichen Aussagen zuläßt und somit als Untersuchungsmethode zur Erkundung des Gashaushaltes nicht zur Anwendung kommen sollte. Am Anfang des Unterkapitels ist eine Zusammenfassung der statistischen Auswertung mittels Zufallszahlen an einer Ablagerung in Phase II gegeben. Die Vorgehensweise ist in Anlage 7 beschrieben.

zu 3.: Am Modellstandort Mannheim konnte an Mehrfachgasmessstellen eine Beeinflussung der Porengaskonzentration durch Luftdruckschwankungen nachgewiesen werden. Bei Vergleichsmessungen zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit vom Luftdruck, die sich bis in 1,5 m Tiefe auswirkte (Abbildung 10). Dies sollte beim Meßstellenbau bzw. bei der Probenahme berücksichtigt werden.

zu 4.: Wie oben angeführt, ist die Erfassung von Deponiegasspurenstoffen dadurch erschwert, daß extreme örtliche und zeitliche Unterschiede bestehen. Ein Trend, daß hohe Deponiegasporenkonzentrationen auch hohe Spurenstoffgehalte bedeuten, besteht nicht, wie sich sowohl am Modellstandort Mannheim wie am Modellstandort Osterhofen gezeigt hat. Allerdings ist durch das physikalische Verhalten vieler Deponiegasspurenstoffe (hohe Flüchtigkeit) eine deutliche Abnahme mit zunehmendem Alter der Ablagerung festzustellen. Eine repräsentative Erfassung der Spurenstoffe ist nur mit rasterförmiger Probenahme oder mit Proben, die für einen größeren Bereich repräsentativ sind, zu erreichen.

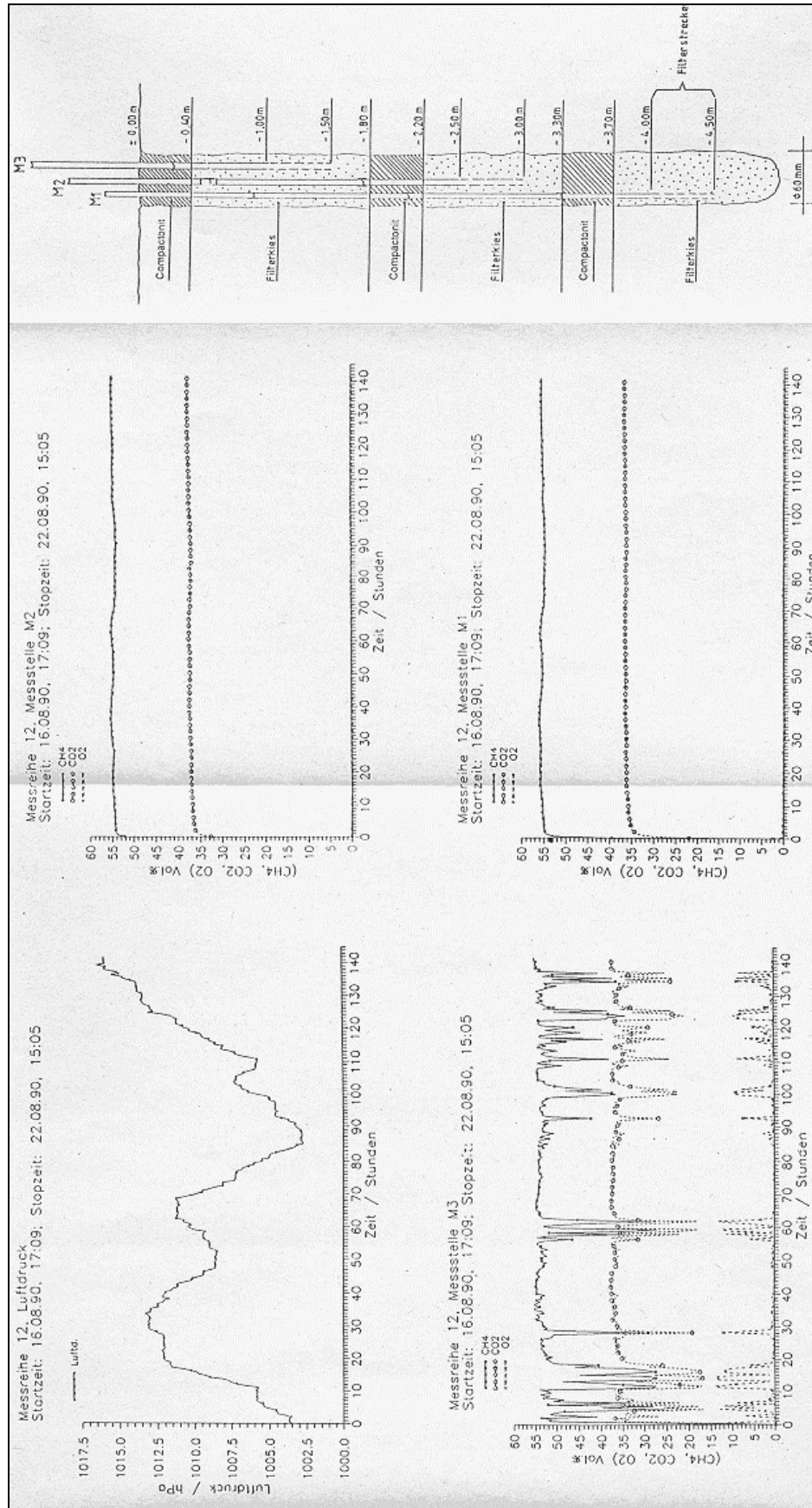


Abb. 10 Beeinflussung der Porengaskonzentration in unterschiedlichen Tiefen durch Luftdruckschwankungen am Modellstandort Mannheim (RÖVER & Partner/TAUW Infra Consult: Modellstandort Mannheim, Bericht Oktober 1990)

zu 5.: Durch rasterförmig angelegte Sondierungen im Umfeld der Altablagerung Osterhofen konnten Migrationen bis in 50 m Entfernung vom Deponierand nachgewiesen werden. Die Methangehalte lagen dabei bei 20 Vol %. Als Ursachen für das Migrationsgeschehen kommen in Frage:

- hohe Gasproduktion (Phase II)
- fehlende seitliche Deponieabdichtung
- geologische Verhältnisse (angrenzend eiszeitliche Kiese und Sande)
- relativ gering durchlässige Oberflächenabdeckung

### 3.2.1.2. Absaugversuch

#### Theoretischer Hintergrund/Zielsetzung

Der hier beschriebene **Absaugversuch** ist als qualitativer Nachweis für Deponiegas bei Altablagerungen konzipiert. Für einen Absaugversuch zur Ermittlung der Gasergiebigkeit ergeben sich grundsätzlich andere Fragestellungen. Die Durchführung eines solchen mengenbezogenen Absaugversuchs ist in TABASARAN et al., 1987 wiedergegeben.

Während mit Sonden bei Gaskonzentrationsmessungen nur ein sehr begrenzter Bereich um die Sondenspitze bzw. die Filterstrecke der Gasmessstelle beprobt wird, kann mit Absaugversuchen ein größerer Porenbereich erfaßt und beprobt werden. Dazu wird eine möglichst hohe Gasmenge an einer geeigneten Probenahmestelle (Sonde, Gaskollektor) entnommen.

Das Deponiegas tritt bei Absaugversuchen besonders häufig in Verdünnung mit Luftbestandteilen auf, wobei in einem Fall die Luft über die Oberfläche durch den Deponiekörper angesaugt wird (Sauerstoff wird verbraucht) und im anderen Fall die Luft an der unterdruckseitigen Installation (zwischen Gasentnahmestelle und Pumpe) eindringt (Gas enthält Sauerstoff).

Da Deponien/ Altablagerungen in aller Regel sehr inhomogen sind, kann nicht genau gesagt werden, woher die Gasprobe kommt. Hinsichtlich des qualitativen Verlaufs der Einzugsbereiche von Kollektoren bei der Absaugung muß von der in Abbildung 11 skizzierten Modellvorstellung ausgegangen werden. Nach diesem Modell variieren die Einzugsbereiche sehr stark. In einer bestimmten Ebene kann bereits die Abdeckschicht erreicht sein, in einer anderen Ebene dagegen ist noch ein großer Abstand vorhanden. Nach neueren Untersuchungen an einer amerikanischen Deponie muß das gesamte Gebilde des Einzugsbereiches zusätzlich zeitlich instationär, räumlich und lückenbehaftet betrachtet werden (LOFY, 1982).



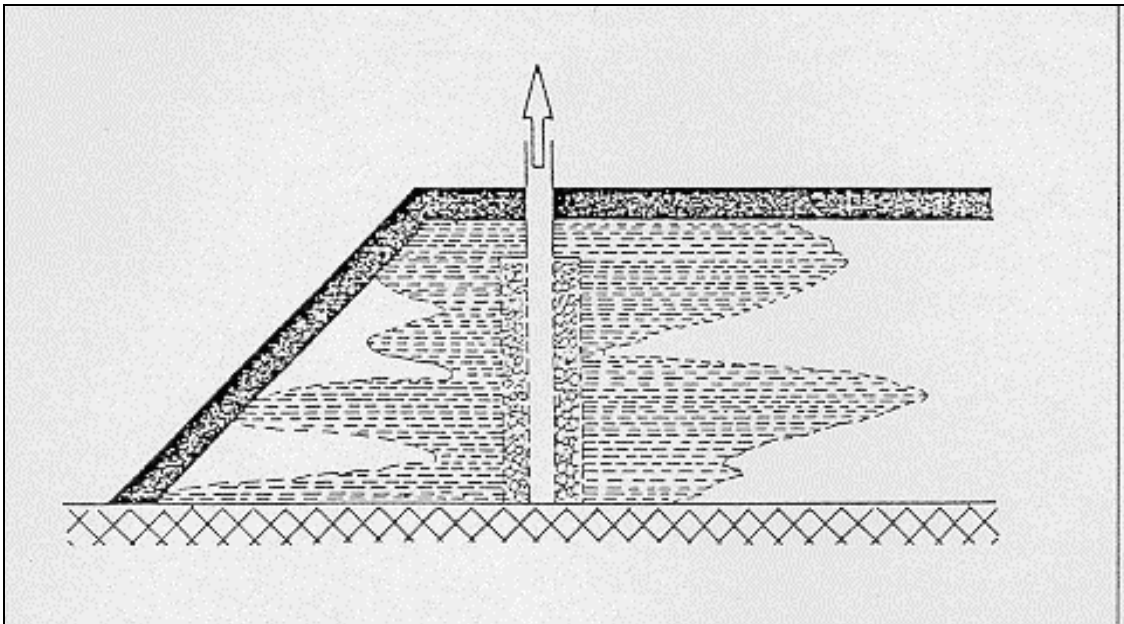


Abb. 11 Prinzipieller Verlauf von Einzugsbereichen an Kollektoren

#### Durchführung:

#### Gasentnahmestellen:

Sie sind zentral auf der Altablagerung anzuordnen, um verbliebene anaerobe Bereiche zu erfassen und zu beproben. Zentral kann heißen:

- Bereich mit der größten Schütthöhe
- Bereich im geographischen Zentrum
- Bereich mit Oberflächenabdichtung
- Bereiche, in die zuletzt geschüttet wurde

Als Entnahmestellen sind **Sonden** oder **Gaskollektoren** geeignet. Aufgrund der ganz unterschiedlichen Bauweise (Durchmesser, Filterstrecke etc.) sind Gaskollektoren für höhere Absaugraten am besten geeignet. Grundsätzlich ist die Absaugleistung der Gasentnahmestelle anzupassen, d.h., aufgrund des Durchmessers, der Filterstrecke etc. ergibt sich eine geeignete Durchsatzrate, die ein Ansaugen von Außenluft durch zu großen Unterdruck in der Apparatur unterbindet.

An stationären Gasmessstellen (Ausbaudurchmesser DN 40, 1 m Filterstrecke) am Modellstandort Mannheim konnte mit einer Absaugleistung zwischen 20 - 30 m<sup>3</sup>/h Gas aus einem Bereich im Radius von 25 m um die Entnahmestelle erfaßt werden.

#### Beobachtungsstellen:

Sie sind nur erforderlich, wenn eine Abgrenzung von einzelnen Bereichen angestrebt wird. Dann sollten sie kreisförmig um die Entnahmestellen angeordnet sein. Die Entfernungen sind je nach Dimensionierung des Absaugversuchs auszuwählen. Es können durchaus Reichweiten von 25 m und mehr angesetzt werden. Als Beobachtungsstellen sind z.B. temporäre Gasmessstellen geeignet (Abbildung 9).

**Absaugeinrichtung/Fördereinrichtung:**

Für Absaugversuche haben sich Radialgebläse sehr gut bewährt. Sie arbeiten mit gutem Wirkungsgrad entweder mit Direktantrieb oder über Riemenantrieb. Bei letzterem können mittels Regelscheiben die Gebläse auf verschiedenste Betriebsbedingungen eingestellt werden.

Membrankompressoren sind für geringere Durchsatzmengen konstruiert. Auch muß beachtet werden, daß die Membrane gegen die aggressiven Kondensate beständig sein muß. Membrankompressoren sind nur beschränkt regelbar. Sie können nur durch Bypassleitungen abgedrosselt werden.

**Meßtechnische Einrichtung:**

Folgende Parameter sind bei einem Absaugversuch zu erfassen:

- Volumenstrom
- Gaskomponenten CH<sub>4</sub>, (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>)
- (Druck in der Anlage)
- (Gastemperatur an der Entnahmestelle)
- (Gastemperatur in der Anlage)
- (Unterdruck an den Beobachtungsstellen)

Parameter in ( ) sind für eine Plausibilitätskontrolle zu erfassen.

**Versuchsdauer:**

Der Porenraum des Einzugsbereiches sollte mindestens siebenmal ausgetauscht werden, um eine repräsentative Probe zu erhalten. Da bei der Abschätzung des Einzugsbereiches die oben genannten Schwierigkeiten berücksichtigt werden sollten, kann eine Versuchsdauer von 5 Tagen angesetzt werden. Im folgenden wird eine stark vereinfachte Berechnung für die abzusaugende Gasmenge an einem Pegel mit siebenfachem Austausch des Porenraumes vorgestellt:

- Radius  $r = 10$  m um Entnahmestelle
- Filterstrecke 2 m
- erfaßbares Porenvolumen 30 %
- Pumpenleistung 30 m<sup>3</sup>/h

ergibt:

Porenvolumen $\pi \times r^2 \times$ Filterstrecke $\times$ Porenvolumen =	188 m <sup>3</sup>
Siebenfacher Austausch	1316 m <sup>3</sup>
Dauer der Absaugung bei genannter Pumpenleistung	44 Stunden

Diese Berechnung ist nur als Anhaltswert zu verstehen. Soll der Einzugsbereich einer Gasentnahmestelle genau festgestellt werden, so sind Untersuchungen vor Ort durchzuführen.

**Kosten:**

Die Kosten für die Gasentnahmestelle sind im Kapitel Sondenmessungen angeführt.

Mobile Verdichter- und Fackelanlagen lassen sich bei entsprechenden Firmen mieten. Als Anhaltswert für die Wochenmiete sind DM 6000.- (ohne Bedienungspersonal) zu veranschlagen. Kosten für Probenahme und Analytik sind ebenfalls zu berücksichtigen.

**Bewertung und Anwendung der Methode:**

Nur mit einem Absaugversuch läßt sich ein größerer Bereich einer Altablagerung auf Deponiegas beproben. Sinn und Zweck ist es, verbliebene anaerobe Bereiche aufzuspüren und entsprechende "vagabundierende Gase" zu erfassen. Sondenmessungen mit ähnlich hoher Aussagekraft müssen in einem engen Raster ausgeführt werden und sind mit ähnlichen oder höheren Kosten verbunden. Altablagerungen, die sich laut "Typisierung" in einem fortgeschrittenen Abbaustadium (Phase V und VI) befinden, sind mit dieser Vorgehensweise eindeutig zuzuordnen.

**Erfahrungen an den Modellstandorten:**

Das Ziel des Gasabsaugversuchs am **Modellstandort Osterhofen** war, Aufschluß über die tatsächliche Gasproduktion (Gasmenge) zu erlangen, besonders da die Sondenmessungen hohe Deponiegaskonzentrationen erkennen ließen. Durch Druckmessungen im Umfeld der Gasentnahmestellen sollte eine Aussage über die Reichweite der Gasentnahmestellen ermöglicht werden.

Der Aufbau des Versuchs war wie folgt: zwei Gaskollektoren im Zentrum der Altablagerung als Gasentnahmestellen, Druckmessungen an temporären Sonden in 10 bis 25 m Entfernung. Absaugung mittels einer mobilen Verdichter- und Fackelanlage (Absaugung von 100 - 110 m<sup>3</sup>/h). Die Absaugdauer betrug 3 Tage. Insgesamt wurden 2400 m<sup>3</sup> Deponiegas abgesaugt.

<b>Gaskonzentration in Vol %</b>	<b>Kollektor 1 Beginn</b>	<b>Kollektor 1 Ende</b>	<b>Kollektor 2 Beginn</b>	<b>Kollektor 2 Ende</b>
CH <sub>4</sub>	61,1	59,5	65,6	65,5
CO <sub>2</sub>	38,1	29,1	33,3	33,1
N <sub>2</sub>	0,8	11,4	1,1	1,3
O <sub>2</sub>	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

**Tab. 6 Gaskonzentrationsmessungen vor und nach dem Absaugversuch am Modellstandort Osterhofen**

Eine wesentliche Konzentrationsänderung ist während des Absaugversuches bei Methan nicht eingetreten. Jedoch zeigte Kollektor 1 deutlich Luftbestandteile am Ende der Absaugung (Anstieg von N<sub>2</sub>). Als Einzugsbereich konnte ein Bereich bis 30 m Entfernung um den Gaskollektor durch Druckmessungen erkannt werden. Durch die Absaugung kam es in den Brunnen zu einer Temperaturerniedrigung von bis zu 5° Celsius (siehe Kapitel 3.2.3.3., Temperaturmessungen).

**Schlußfolgerung:**

Geht man davon aus, daß der Einzugsbereich der beiden Gaskollektoren nur ein Teil des Ablagerungskörpers darstellt, sind die genannten Mengen sehr vorsichtig zu interpretieren. Aufgrund der Druckmessungen zur Einzugsbereichsbestimmung kann angenommen werden, daß 2/3 des Ablagerungskörpers erfaßt wurden. Ob nach so kurzer Zeit der erforderliche stationäre Zustand erreicht war (abgesaugte Menge entspricht der im Einzugsbereich produzierten Gasmenge), ist nicht genau zu sagen. Nimmt man zusätzlich die Gasprognose (siehe Ende Kap. 2.3.2.3) hinzu, so ist die Menge als tatsächlich produzierte Gasmenge anzusehen.

Am **Modellstandort Mannheim** wurde ein Absaugversuch an zwei unterschiedlichen Bereichen der Altablagerung durchgeführt. Zum einen wurde ein Bereich mit durch Sondenmessungen nachgewiesenen hohen Methanwerten, zum anderen ein Bereich mit geringen Methanwerten ausgewählt. Dabei konnte gezeigt werden, daß sich bei Erhöhung der Absaugrate zwei Effekte überlagern: der Einzugsbereich wird erhöht und es tritt in der Gasprobe vermehrt Luft auf. Je nach spezifischen Gegebenheiten (hier Gasproduktion und Gaswegsamkeiten) werden sich bei hohen Absaugraten diese Effekte in unterschiedlich ausgeprägter Form zeigen. Im Bereich mit geringen Methanwerten war während der Absaugung im Gas ein Anteil an Sauerstoff nachzuweisen. Im Bereich mit hohen Methanwerten konnte dies auch durch eine hohe Absaugrate nicht erreicht werden. Rückschlüsse auf die Gasproduktion sind aufgrund der kurzen Versuchsdauer jedoch problematisch. In Anlage 8 ist die graphische Auswertung der Druckverhältnisse während des Absaugversuches im Bereich hoher Methanwerte mit einer Absaugrate von 33 m<sup>3</sup>/h Deponiegas dargestellt.

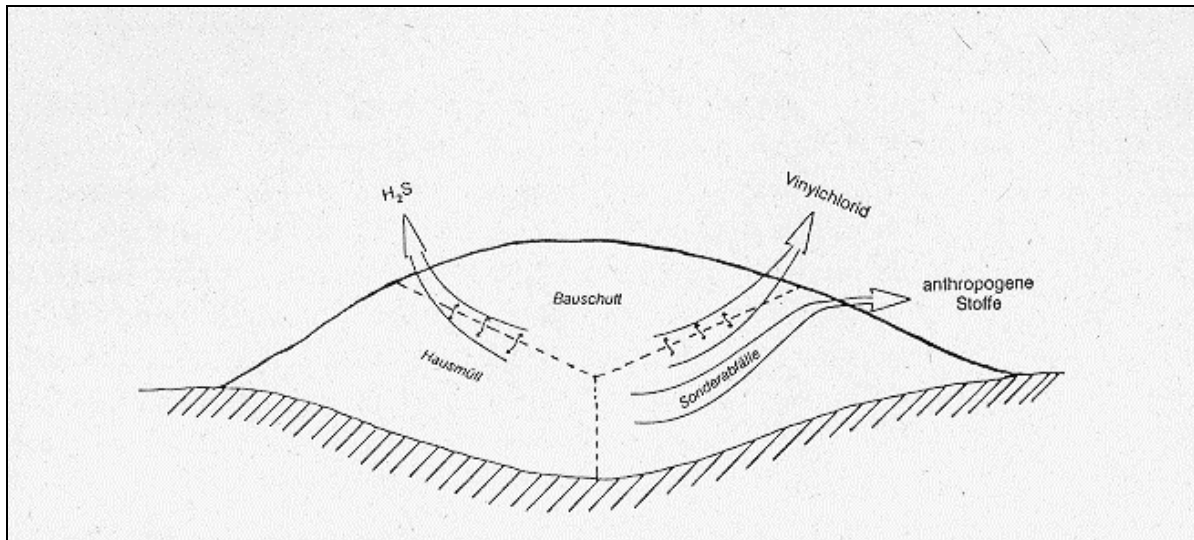
**3.2.1.3. Deponiegasspurenstoffe****Theoretischer Hintergrund/Zielsetzung**

Es sind Deponiegasspurenstoffe bekannt, die in Konzentrationen zwischen der jeweiligen Nachweisgrenze bis ca. 1 g/m<sup>3</sup> Gas gefunden werden. Die Summe der organischen Kohlenwasserstoffverbindungen bewegt sich typischerweise zwischen 500 und 1500 mg/m<sup>3</sup> Gas und die Summe der Halogen - Kohlenwasserstoffe zwischen 10 und 250 mg/m<sup>3</sup> Gas. Ausnahmen mit extrem höheren Konzentrationen können lokal und temporär auftreten.

Nach POLLER, 1990 ist eine Verringerung des Gehalts von Spurenstoffen im Deponiegas mit fortschreitendem Deponiealter festzustellen. Bedingt durch z.T. hohe Flüchtigkeit emittieren die Spurenstoffe hauptsächlich in der Anfangsphase der Müllablagerung. Nach einigen Jahren ist das begrenzte Potential von z.B. LCKW/FCKW im Ablagerungsgut weitgehend gasförmig ausgetragen und es finden sich nur noch geringe Konzentrationen im Deponiegas. Damit lassen sich viele Spurenstoffe im Gas nicht mehr nachweisen. Lediglich im Kondensat können durch Anreicherung Spurenstoffe detektiert werden (Kapitel Sonderuntersuchungen).

Stoffe, die im Ablagerungsgut enthalten sind, müssen bestimmte Bedingungen erfüllen, um ins Deponiegas zu gelangen:

- geringe Wasserlöslichkeit (entsprechend geringe Polarität)
- hohe Octanol - Wasser - Verteilungskoeffizienten<sup>8</sup>
- hoher Dampfdruck bzw. niedriger Siedepunkt
- geringe Neigung zur Adsorption an Feststoffen (unpolare Stoffe mit hohen Siedepunkten werden am organischen Anteil des Mülls und des Bodens adsorbiert, z.B. sind Polychlorierte Biphenyle (PCB) nur in sehr geringen Mengen im Deponiegas nachzuweisen).



**Abb. 12 Schematische Darstellung der Herkunft und Entstehung von Spurenkomponenten im Deponiegas**

Aus Abbildung 12 ist die Herkunft und Entstehung von Deponiegasspurenstoffen ersichtlich. Danach lassen sich zwei Gruppen unterscheiden:

1. Anthropogene Spurenstoffe und deren Abbauprodukte
2. Spurenstoffe, die durch Neubildung aus anderen Stoffen entstehen.

Zu 1.: Praktisch alle Stoffe, die die chemische Industrie hergestellt hat und die obengenannte Eigenschaften besitzen, lassen sich im Deponiegas nachweisen. Dies ist auf den Sondermüllanteil zurückzuführen, der in früheren Jahren im Hausmüll enthalten war. Die einzelnen Stoffgruppen lassen sich wie folgt einteilen:

- **Aromatische Kohlenwasserstoffe:**  
Benzol, Toluol und Xylol (BTX) sind als Lösungs- und Reinigungsmittel verwendet worden und finden sich im Deponiegas wieder.  
Benzol wird in der Gefahrstoffverordnung eindeutig als krebserzeugender Stoff eingestuft.
- **Halogenierte Kohlenwasserstoffe:**  
HKW bzw. CKW können z.B. in halogenhaltigen, organischen Lösungsmitteln, Abbeizmitteln, Schädlingsbekämpfungsmitteln, Pflanzenbehandlungsmitteln, Saatgutbehandlungsmitteln, Isoliermaterialien, Fensterrahmen, Kunstharzen, Bauschutzmitteln und Kaltreinigern enthalten sein.

<sup>8</sup> ein Maß für die Sorptionseigenschaft von Stoffen (CHIOU et al. 1977)

- In diese Gruppe fallen auch die FCKW, die in Kühlschränken als Kältemittel und in Schaumstoffen und Spraydosen als Treibmittel verarbeitet wurden und noch werden. Vinylchlorid wird anaerob aus den vorhandenen Lösungsmitteln Trichlorethen und Tetrachlorethen gebildet. Es ist in der Gefahrstoffverordnung als eindeutig krebserzeugender Stoff eingestuft.

Zu 2.: Neben einer Reihe von Stoffen, die als Zwischenprodukte des biochemischen Abbaus der Biomasse zu Methan / Kohlendioxid in der Anfangsphase entstehen (z.B. Alkohole, Ester), interessieren bei Altablagerungen nur Stoffe, die auch noch nach Jahren in gewissen Mengen im Deponiegas auftreten. Hier ist Schwefelwasserstoff anzuführen, der in allen Deponiegasen in sehr unterschiedlichen Konzentrationen zu finden ist. Schwefelwasserstoff wird durch sulfatreduzierende Bakterien gebildet, wenn Hausmüll zusammen mit gipshaltigen Abfällen (Bauschutt) abgelagert wird. Er gehört mit zu den toxikologisch bedenklichsten Bestandteilen des Deponiegases.

Bestimmte Sonderabfälle reagieren bei der oberirdischen Ablagerung unter dem Einfluß der Deponiefeuchte bzw. des Niederschlagswassers (Wasserreaktivität). Hier sind in erster Linie Abfälle aus der Aluminiumindustrie, z.B. leichtmetallhaltige Stäube, Krätzen, Salzschlacken, Tiegel- und Ofenausbrüche aus der Schmelzelektrolyse, aber auch Stäube und Schlacken aus der eisenschaffenden und -verarbeitenden Industrie, welche Hochtemperatur-Reaktionsprodukte enthalten, anzuführen. Je nach Art und Gehalt des Abfalls können sich hierbei erhebliche Mengen an Wasserstoffgas aber auch Methan, Ammoniak, Schwefelwasserstoff oder Phosphin bilden. Darüber hinaus kann eine erhebliche Wärmemenge freigesetzt werden (THOMANETZ, 1991).

Bei Altablagerungen wird sich nur in sehr seltenen Fällen eine Relevanz in bezug auf die Wasserreaktivität ergeben, da diese Reaktionen in den ersten Jahren nach der Ablagerung ablaufen. Aufgrund von Konservierungseffekten kann es aber auch noch nach vielen Jahren zu einer Gasbildung kommen.

Sind Hinweise auf die Ablagerung solcher Sonderabfälle bekannt, ist dies bei der Spurenstoffanalytik zu berücksichtigen.

Da Spurenstoffe teilweise extreme örtliche Konzentrationsunterschiede innerhalb einer Altablagerung zeigen, muß die Probenahmestrategie darauf abgestimmt werden. Es kann aufgrund der historischen Erkundung der Verdacht bestehen, daß in bestimmten Bereichen Sondermüll abgelagert wurde und somit eine räumliche Eingrenzung dieser Bereiche notwendig wird. Dies ist nur mit rasterförmigen Sondenmessungen möglich.

Bei anderen Fällen kann eine generelle Belastung des Deponiegases mit Spurenstoffen für die Bestimmung der Stoffgefährlichkeit entscheidend sein und somit ist eine Probenahme, repräsentativ für einen größeren Deponiebereich, anzustreben.

### **Durchführung:**

Wesentlich für die Qualität und Aussagekraft der analytischen Untersuchungen der Deponiegasspurenstoffe ist die Güte der Probenahme. Auch bei der Auswahl der Probenahmestellen ist sorgfältig vorzugehen.

Folgende Probenahmestellen kommen bei Spurenstoffuntersuchungen in Betracht:

- Gassonden
- Gaskollektoren
- Gasboxen

Als Ausbaumaterialien sollten Edelstahl oder PE - HD zur Anwendung kommen, um eine Spurenstoffanalyse nicht zu verfälschen. Weniger geeignet ist PVC, da eine Freisetzung von im PVC enthaltenen Stoffen (z.B. Weichmacher) nicht ausgeschlossen werden kann.

Je nach Zielsetzung (räumliche Abgrenzung - repräsentative Probe) ist die Probenahme mit geringer Entnahmemenge oder mit längerer Absaugung durchzuführen.

Bei Probenahmebehältnissen stellt sich die Frage nach möglichen Wandeffekten (Absorption, Adsorption, Durchlässigkeit), was sich in der Wiederfindungsrate ausdrückt. Nach Untersuchungen (JANSON, 1988) ergaben sich bei den verschiedenen Materialien aber auch bei den verschiedenen Gasen höchst unterschiedliche Werte. Folgende Behältnisse wurden untersucht und sind hier in absteigender Reihenfolge ihrer Eignung aufgezählt:

Polyvinylfluoridbeutel ("Tedlarbeutel")		
Aluminium - Kunststoff - Folienkombination		abnehmende
Polytrifluorethenbeutel ("Lindebeutel")		Eignung
Polyethenterephthalatbeutel ("Halarbeutel")		
Bratfolie		
Glas.	V	

Eine Lagerzeit der Proben von 6 Tagen sollte nicht überschritten werden. Wichtig ist, daß die Probenahmebedingungen (Gastemperatur, Außentemperatur) und die Lagerzeit im Protokoll festgehalten werden.

Bei der Beutelentleerung muß die Gastemperatur höher sein als bei der Probenahme.

Je nach Fragestellung bzw. bei Verdacht aus der historischen Erkundung sind die Parameter für den Einzelfall festzulegen:

CKW:	Dichlormethan, Trichlorethen, Tetrachlorethen, 1,1,1- Trichlorethan, Trichlormethan, cis-, trans- 1,2- Dichlorethan, Vinylchlorid
HKW allgemein:	Halogenbenzole, Halogenphenole, Halogennaphtaline und PCB
FCKW (Freone):	Trichlorfluormethan, Dichlorfluormethan, Trifluortrichlorethan
Aromaten:	Benzol, Toluol, Xylol, Ethylbenzol

**Kosten:**

Die Kostenabschätzung bei Spurenstoffuntersuchungen ist schwierig, da die Kosten für die Analyse einzelner Parameter sehr unterschiedlich zu Buche schlagen.

Beispiele:

Bestimmung CKW	DM 120.- bis 200.-
Bestimmung Vinylchlorid	DM 200.- bis 300.-
Bestimmung HKW	DM 200.- bis 800.-
Bestimmung FCKW	DM 150.- bis 250.-
Bestimmung Aromaten	DM 120.- bis 150.-

Probenahme (je nach Verfahren) je Probe bis DM 80.

**Bewertung und Anwendung der Methode:**

Spurenstoffe im Deponiegas tragen zu einem erheblichen Teil zur Erhöhung der Stoffgefährlichkeit bei Altablagerungen bei. Aus diesem Grund ist bei entsprechenden Hinweisen aus der historischen Erkundung auf abgelagerten "Sondermüll" der Anteil der Deponiegasspurenstoffe zu erfassen.

Da für die Höhe von gasförmigen Spurenstoff - Emissionen allein der Volumenstrom des Deponiegases entscheidend ist, sind Rückschlüsse von Deponiegasemissionen auf Spurenstoffemissionen zulässig. Finden keine Deponiegasemissionen mehr statt, sind auch keine gasförmigen Spurenstoffemissionen in relevanten Mengen zu erwarten (siehe auch Kapitel 2.2.2. Gesundheitsgefahren durch Deponiegasspurenstoffe).

Aus toxikologischer Sicht sind als Richtwerte für Emissionen aus Altablagerungen und kontaminierten Standorten die Immissionsdaten zu berücksichtigen. Besondere Beachtung ist dabei den als krebserzeugend angesehenen oder eingestuften Substanzen zu widmen.

Unter dem Aspekt der Arbeitsplatzüberwachung (MAK - Werte) sind, bezogen auf das unverdünnte Gas, Überschreitungen durchaus denkbar. Beispiele hierfür sind Dichlormethan, Toluol und insbesondere Schwefelwasserstoff.

**Erfahrungen an den Modellstandorten:**

Am **Modellstandort Mannheim** konnte gezeigt werden, daß die Zusammensetzung des "Trärgases" (Methan-, Stickstoff-, Kohlendioxidgehalt) keinen Rückschluß auf Spurenstoffe zuläßt. Fast überall im Deponiekörper wurden in relativ geringen Konzentrationen Aromaten und chlorierte Kohlenwasserstoffe nachgewiesen. Die Gehalte an Aromaten (Summe) lagen mit 5 - 33 mg/m<sup>3</sup> in dem für Hausmülldeponien üblichen Bereich. Die Summe der CKW war mit 1 mg/m<sup>3</sup> als sehr gering zu bezeichnen.



Am **Modellstandort Osterhofen** wurden Spurenstoffanalysen nach verschiedenen Methoden durchgeführt:

- "Air-Tox" - Methode (Adsorption an XAD<sub>4</sub> - Harz)  
Parameter: LCKW/BTX/R113  
Analyse mit GC/ECD/FID
- Probe in Gasbeutel abgefüllt  
Parameter: Vinylchlorid; Analyse GC/MS  
Parameter: H<sub>2</sub>S; Analyse photometrische Bestimmung nach Absorption an Zinkacetat

Die Probenahme erfolgte sowohl an Gaskollektoren als auch an Gassonden und an Gasboxen (Kapitel 3.2.2.1. Gasmengenmessung mit der Gasbox). Erwartungsgemäß waren die Meßergebnisse in den Gasboxen, die im Umfeld der Gaskollektoren installiert waren, sehr viel geringer als in den Gaskollektoren. Eine Übersicht ist in Tabelle 7 gegeben. Die tiefendifferenzierten Gassonden zeigten ähnliche Werte wie die Gaskollektoren, wobei ein Trend zu höheren Werten in den tieferen Entnahmehorizonten gegeben war.

Die gemessenen Werte für Deponiegasspurenstoffe am Modellstandort Osterhofen liegen im Bereich der in der Literatur für Hausmüldeponien angegebenen Konzentrationen.

Eine Zusammenstellung der in der Literatur genannten Konzentrationen für Deponiegasspurenstoffe ist in RETTENBERGER, 1991 wiedergegeben.

Auffällig war, daß einzelne Stoffe nach mehrtägiger Absaugung fast unverändert nachgewiesen werden konnten bzw. daß einzelne Stoffe sogar erhöhte Werte zeigten. Dies veranschaulicht, daß bei Absaugungen physikalisch - chemische Gleichgewichte im Boden (Deponiekörper) verändert werden und eine Mobilisierung der Spurenstoffe bewirken.

Parameter	Sondenmessung Meßpunkt 68 in mg/m <sup>3</sup>	nach Absaugung an Gaskollektor 2 im mg/m <sup>3</sup>	Gasbox mit höchsten Spurenstoffwerten in mg/m <sup>3</sup>
Benzol	1,5	<0,5	<0,5
Toluol	83,0	50,6	<0,5
Ethylbenzol	41,8	15,5	0,8
m-, p-, o-Xylol	71,9	27,9	1,8
Vinylchlorid	2,5	6,5	<1
cis- 1,2- Dichlorethan	8,0	4,6	<0,1
Trichlorethen	0,9	1,2	0,18
Tetrachlorethen	0,4	0,7	0,13

**Tab. 7 Spurenstoffkonzentrationen bei Sondenmessung, nach dem Absaugversuch und in einer Gasbox am Modellstandort Osterhofen; (TECHNOLOGIEBERATUNG GRUNDWASSER UND UMWELT: Modellstandort Osterhofen, Bericht 1990)**

## 3.2.2. Gasemissionsmessungen

### 3.2.2.1. Gasmengenmessungen mit Gasbox

#### Theoretischer Hintergrund/Zielsetzung

Zur Messung der Oberflächenemissionen haben sich die sogenannten "Boxen" bewährt. Dieses Verfahren wurde vom Verfasser entwickelt und ging unter dem Namen "Lemberger Box" in die Literatur ein (RETTENBERGER, 1982b).

Mit den Boxen läßt sich der austretende Gasvolumenstrom messen und somit kann die Deponiegasemission quantifiziert werden. Jedoch besitzen Boxenmessungen lediglich punktförmige Gültigkeit.

Die Box wird mit einem definierten Gas gefüllt und danach dessen Verdrängung durch das einströmende Deponiegas beobachtet. Aus der Einströmzeit des Deponiegases und der gemessenen Gaszusammensetzung kann auf die aus der Altablagerungsoberfläche austretende Deponiegasmenge geschlossen werden.

Da Emissionen stark vom Abbaugrad der Altablagerung (Phase) sowie untergeordnet von meteorologischen Faktoren und der Oberflächenbeschaffenheit abhängen, kann mit fest installierten Boxen das Emissionsgeschehen erfaßt werden.

Durchführung:

Zunächst sollten geeignete Flächen mittels Gasspürgerät mit FID (Kapitel 3.2.2.2.) ausgewählt werden. Deponiegasemissionen finden nicht flächig, sondern an einzelnen Schwachstellen in der Oberflächenabdeckung statt. Ein FID - Meßsignal von 100 ppm kann als Untergrenze für den Standort einer Gasbox betrachtet werden.

Als Boxen können handelsübliche Kunststoffbehälter mit einem möglichst großen Verhältnis Grundfläche zu Volumen eingesetzt werden (z.B. Abmessung L x B x H = 60 x 40 x 40 cm). Sind Deponiegasspurenstoffuntersuchungen mit Hilfe der Box vorgesehen, sollte darauf geachtet werden, daß kein PVC verwendet wird. Als geeignete Materialien sind hier PE - HD oder Polypropylen einzusetzen.

Um einen Windeinfluß zu verhindern, werden die Boxen am Standort z.B. in Mörtelfurchen eingebettet (Abbildung 13). Um keinen Überdruck (bei starker Sonnenbestrahlung) bzw. keinen Unterdruck (bei der Probenahme) zu erzeugen, muß ein Druckausgleich zur Atmosphäre möglich sein. Dies kann durch einen perforierten Kunststoff - Schlauch (auf Material achten), der ins Innere der Box ragt, erreicht werden. Dieser Schlauch kann dann auch zum Einbringen von Spülgas und zur Entnahme von Gasproben benutzt werden.

Bei Versuchsbeginn wird die Gasbox mit einem definierten Gas gefüllt (z.B. Helium). Anschließend wird die Verdrängung dieses Gases beobachtet, indem in bestimmten Zeitabständen Proben entnommen werden (z.B. Probenahme im 30 Minuten - Intervallen). Erfahrungswerte zeigen, daß nach 5 Stunden keine weitere wesentliche Änderung der Gaszusammensetzung zu erwarten ist.

Die Auswertung erfolgt nach dem bekannten Ansatz:

$$C_t = C_0 \times e^{-t/t_{\text{quer}}} \quad \text{mit } t_{\text{quer}} = V / Q$$

$$Q = V / -t \times \ln C_t / C_0$$

dabei ist

$C_t$	=	Konzentration zum Zeitpunkt t
$V$	=	Volumen der Gasbox
$Q$	=	Volumenstrom
$t$	=	Zeit
$C_0$	=	Anfangskonzentration des Tracers
$t$	=	rechnerische Aufenthaltszeit

Eine vereinfachte Versuchsdurchführung kann ohne Spülgas vorgenommen werden. Es wird lediglich die Gaszusammensetzung beim Austritt aus der Deponie gemessen. Quantitative Aussagen sind hier nicht möglich.

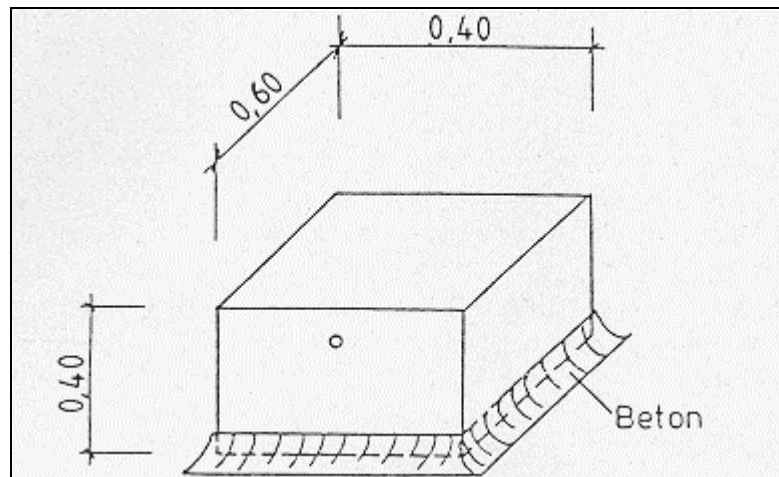


Abb. 13 Schematischer Aufbau einer Lemberger Box (RETTENBERGER, 1982b)

Die Beprobung kann sowohl durch Vor-Ort-Analyse als auch durch Befüllen von Gassammelbehältern und Laboranalyse durchgeführt werden. Es muß aber berücksichtigt werden, daß mit jeder Probenahme eine Störung des Gasgleichgewichts stattfindet. Deshalb sollte nur eine geringe Menge (max. 1 l) mit einer geringen Absaugrate (max. 5 l/min) entnommen werden.

#### Kosten:

Als Zeitbedarf zur Installation einer Gasbox werden 2 Stunden veranschlagt.

Materialkosten        DM 70.- bis 100.-

Probenahme und Analytik siehe Sondenmessung Kapitel 3.2.1.1.

#### Bewertung und Anwendung der Methode:

Mit Gasboxen lassen sich die Oberflächenemissionen an einzelnen Punkten recht genau ermitteln. Eine Übertragung auf die gesamte Altablagerungsoberfläche ist allerdings schwierig

und ungenau. Boxenmessungen sind für längerfristige Beobachtungen der Emissionssituation geeignet. Durch Berücksichtigung der meteorologischen Gegebenheiten lassen sich Emissionen quantifizieren (Minimal-, Maximalwert). Boxenmessungen sollten durch Begehungen mit dem Gasspürgerät mit FID (Kapitel 3.2.2.2.) ergänzt werden, die die flächige Emissionssituation besser erfassen.

Wie aus Kapitel 2.5. zu ersehen ist, sind gasförmige Emissionen nur bei solchen Altablagern zu erwarten, die sich in Phase I bis III befinden.

### **Erfahrungen an den Modellstandorten:**

Am **Modellstandort Mannheim** wurden die Gasboxen an Stellen mit deutlichem FID - Meßsignal (500 ppm) installiert. Zu Beginn des Versuchs wurde mit Helium inertisiert und in 30 Minuten - Intervallen beprobt, um die Verdrängung des Inertgases durch Deponiegas und somit einen quantitativen Volumenstrom zu errechnen. Mittels Membranpumpe wurden Probebeutel (0,5l) befüllt und anschließend im Labor auf die Hauptkomponenten CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> analysiert. Dieses aufwendige Probennahme- und Analyseverfahren war aufgrund des Versuchsablaufs notwendig:

- möglichst geringes Probenvolumen, um den Zustand der Boxen nicht zu stören,
- Analyse der 4 Hauptkomponenten, um den Helium - Anteil rechnerisch ermitteln zu können.

Der Deponiegas - Anteil in der Box wurde nach folgendem Verfahren errechnet:

$$\begin{aligned} & 100 \\ ./.\quad & \text{Luftanteil (als gemessene O}_2\text{- und errechnete N}_2\text{- Menge, Verhältnis 1:4 ent-} \\ & \text{sprechend der Zusammensetzung von Luft mit ca. 20 Vol\% O}_2\text{ und 80 Vol\%} \\ & \text{N}_2\text{).} \\ ./.\quad & \text{Heliumanteil} \\ = & \text{Deponiegasanteil} \end{aligned}$$

Folgende Ergebnisse sind für die Versuchsdurchführung relevant:

Nach 2 - 5 Stunden befinden sich die Boxen im "Endzustand" (= maximale Verdrängung des Inertgases).

Es lassen sich für die Boxen Volumenströme errechnen (zwischen 29 und 201 l/h pro m<sup>2</sup>).

Die Emissionen finden nicht flächig über die Oberfläche sondern an bestimmten Punkten (abhängig von der Oberflächenabdeckung) statt.

Emissionen unterliegen starken zeitlichen und lokalen Schwankungen. An fest installierten Gasboxen, die während zweier Jahre beprobt wurden, ließ sich erkennen, daß Emissionsstellen nicht über längere Zeiträume erhalten bleiben. An Boxen, die sich 1989 durch erhebliche Deponiegaskonzentrationen auszeichneten, konnte 1990 kein Deponiegas nachgewiesen werden.

Weiter konnte gezeigt werden, daß die Gaszusammensetzung in der Box eng mit meteorologischen Parametern korrespondiert. Bei sinkendem Luftdruck sind hohe Deponiegaskonzentrationen und hohe Volumenströme festgestellt worden während bei steigendem Luftdruck das

Deponiegas verdünnt wird und geringere Volumenströme zu messen sind. Dies kann die Berechnung für Deponiegas - Emissionen sehr stark beeinflussen. Am Modellstandort Mannheim wurde eine Bilanzierung der Deponiegasemissionen vorgenommen. Die Werte für das aus der Altablagerung austretende Deponiegas können sich bei unterschiedlichen Wetterlagen um den Faktor 10 unterscheiden.

Am **Modellstandort Osterhofen** wurden die Gasboxen lediglich eingegraben und mit Ton abgedichtet. Eine Verbindung zur Außenluft wurde jedoch nicht hergestellt (wichtig für Druckausgleich und Verdrängung der Atmosphärenluft). Nach einer Anreicherungszeit von 22 Stunden wurde mittels Direktkopplung GC - Gasbox beprobt. Die Auswahl der Boxen - Standorte erfolgte aufgrund von FID - Meßergebnissen. Die FID - Meßergebnisse ließen sich nicht mit den Meßergebnissen der Boxen korrelieren. Dies ist auf meteorologische Einflüsse, rasch wechselnde Gaswegsamkeiten (z.B. Feuchtigkeitsgehalt der Oberflächenabdeckung), unzureichende Abdichtung der Box oder zu kurze Standzeit ohne Druckausgleich zurückzuführen.

### 3.2.2.2. Begehung mit dem Gasspürgerät mit FID

#### Theoretischer Hintergrund/Zielsetzung

Ursprünglich dienten Gas - Messungen mit dem **Flammen - Ionisations - Detektor (FID)** dazu, Leckagen von städtischen Gasverteilungsnetzen an der Geländeoberfläche ohne Sondierungen zu erkennen. Beim **Gasspürgerät** mit FID handelt es sich um ein tragbares Gerät mit eigener Stromversorgung, das die Gasprobe mittels Pumpe ansaugt und auf Kohlenwasserstoffe analysiert (Abbildung 14).

Die Problematik bei der Erfassung und Quantifizierung des Emissionsgeschehens an Deponien und Altablagerungen ist bekannt (siehe Kapitel 3.2.2.1. Gasmengenmessung mit Gasbox). Hierbei spielen der Probenahmeort (schon innerhalb kleiner Bereiche können differierende Meßergebnisse auftreten, z.B. wenn sich die Bodenbeschaffenheit ändert bzw. bei nicht homogener Abdeckschicht), die Durchlässigkeit des Bodens (Porenvolumen) und die Bodenfeuchte ebenso eine Rolle, wie die Temperatur, der Luftdruck und die Windverhältnisse.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer möglichst vollständigen Beprobung der Oberfläche einer Altablagerung. Dies ist durch ein enges Raster und Berücksichtigung von bevorzugten Emissionsstellen mit einem Gasspürgerät mit FID näherungsweise möglich. Schächte, Sickerwasserkanäle, Risse (z.B. bei Setzungen), Deponieböschungen etc. sind als Emissionsstellen zu beproben. Hinweise auf Gasaustritte können auch Vegetationsschäden/ -beeinträchtigungen darstellen.

### Meßprinzip:

Es werden Ionen nachgewiesen, die bei der Verbrennung organischer Moleküle durch thermische Ionisation entstehen. Dazu wird eine "Wasserstoff-Flamme" durch das Brenngas ( $H_2/N_2$ -Gemisch) und den in der angesaugten Gasprobe enthaltenen Sauerstoff gespeist. Die reine "Wasserstoff-Flamme" hat eine geringe elektrische Leitfähigkeit. Bei hinzutretendem kohlenwasserstoffhaltigem Gas steigt die Leitfähigkeit stark an. Der Ionenstrom ändert sich dabei näherungsweise proportional der Zahl der C - Atome im Molekül pro Zeiteinheit. Mit Hilfe einer elektronischen Verstärkerschaltung werden kleinste KW - Spuren angezeigt. Nachweisbar sind Gaskonzentrationen  $> 1 \text{ ppm KW}$ . Da Deponiegas überwiegend aus Methan und  $CO_2$  (wird vom Gasspürgerät nicht detektiert) besteht, kann die Kalibrierung auf Methan bezogen werden. Bei max. 1 Vol% KW erlischt die Wasserstoffflamme.

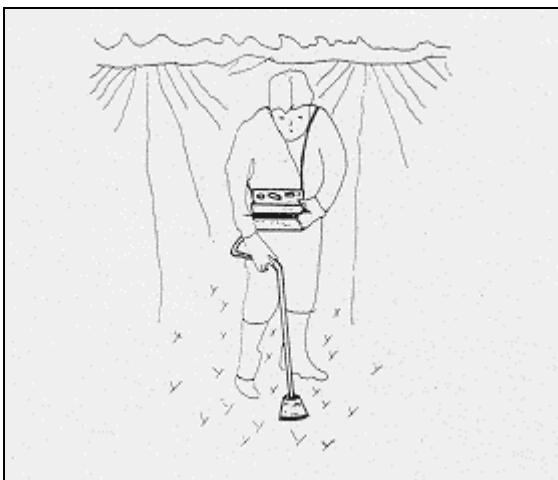


Abb. 14 Gasspürgerät mit FID im Feldeinsatz

### Durchführung:

Begehungen mit dem Gasspürgerät mit FID werden i.a. als Flächenkartierung durchgeführt. Als Meßraster sollten 10 m Rasterweite angestrebt werden. Es können gezielt Gasaustrittsstellen (z.B. Risse etc.) beprobt werden. Bei deutlich erhöhten Meßwerten (100 ppm) sollte das Meßraster verdichtet werden.

Zweckmäßig ist es, Markierungspunkte auf der Ablagerung anzubringen. Von einem Meßpunkt ausgehend wird die Ansaugglocke des Gasspürgerätes langsam dicht über die Oberfläche geführt und die jeweiligen Werte notiert.

Ein entscheidender Aspekt ist die Berücksichtigung der meteorologischen Gegebenheiten. Ideale Bedingungen für eine Emissionskartierung bestehen z.B. nach längerer trockener Witterung und fallendem Luftdruck. Der Feuchtigkeitsgehalt der Oberflächenabdeckung hat einen entscheidenden Einfluß auf das Emissionsgeschehen. Während und nach längeren Regenperioden sind Messungen mit dem Gasspürgerät wenig aussagekräftig.

Eine solche Messung kann auch mittels stationärer Gasspürgeräte erfolgen. Die Gase werden über eine Teflonleitung von den Meßstellen angesaugt, von Kondensat mittels einer Kühleinrichtung befreit und dem Gasspürgerät zugeführt.

**Kosten:**

Der Zeitbedarf für die Kartierung von 1 ha im 10 m Raster beträgt für 2 Personen ca. 4 Stunden.

Miete für tragbares Gasspürgerät mit FID/Tag      DM 200.- bis 300.-

**Bewertung und Anwendung der Methode:**

Die Begehung mit dem Gasspürgerät mit FID liefert bei sorgfältiger Ausführung einen raschen Überblick über Gasemissionen. Angaben über die gesamten gasförmigen Emissionen sind aber immer von meteorologischen Parametern abhängig. Deshalb sind Luftdruck und evtl. Lufttemperatur im Meßprotokoll genau zu vermerken. Ebenso muß eine Beurteilung der Oberflächenabdeckung erfolgen.

Der Vorteil der Begehung mit dem Gasspürgerät liegt bei der schnellen Meßwertermittlung und der Handlichkeit des Geräts. Der technische und finanzielle Aufwand ist gering. Dadurch sind diese Messungen auch als erste orientierende Untersuchungen an Altablagerungen geeignet, um sowohl einen Anhaltswert über Gasemissionen zu erhalten, als auch gegebenenfalls geeignete Arbeitsschutzmaßnahmen bei weiteren Erkundungen anzuordnen. Durch die hohe Empfindlichkeit gegenüber Kohlenwasserstoffen läßt sich das Gerät auch zu orientierenden Raumlufmessungen einsetzen.

Es ist zu beachten, daß das Gasspürgerät eine potentielle Zündquelle darstellt. Gebäude, umschlossene Bereiche und Gräben dürfen mit dem Gasspürgerät mit FID nicht ohne vorherige Absicherung mit einem zugelassenen Gaswarngerät (explosionsgeschützt) begangen werden.

Ausgehend vom Gashaushalt (Kapitel 2.3.) ist nur bei bestimmten Altablagerungen mit gasförmigen Emissionen zu rechnen. Begehungen mit dem Gasspürgerät mit FID sollten nur bei Altablagerungen der Phasen I und II durchgeführt werden. Bei Altablagerungen in Phase III sind gasförmige Emissionen stark von meteorologischen Parametern abhängig und entsprechend schwer zu erfassen. Bei Altablagerungen in Phase IV - VI sind keine gasförmigen Emissionen zu erwarten. Im Zweifelsfall sind Begehungen mit dem Gasspürgerät mit FID als Negativ - Nachweis heranzuziehen (Kapitel 4., Handlungsanweisung).

**Erfahrungen an den Modellstandorten:**

Am **Modellstandort Mannheim** wurden an Flächen mit hoher Deponiegaskonzentration im Untergrund (durch Sondenmessungen ermittelt) Begehungen mit dem Gasspürgerät mit FID durchgeführt. Dabei konnten von 400 Meßpunkten nur 17 Meßwerte zwischen 10 und 2500 ppm erzielt werden. Die Rastereinteilung war mit 5 m festgelegt. Deponiegas - Emissionsstellen ließen sich jeweils auf eine Fläche von ca. 1 m<sup>2</sup> eingrenzen. Besonders zu erwähnen ist, daß im Umfeld bestehender Gaspegel und im Bereich ehemaliger Sondierlöcher fast immer Deponiegasemissionen detektiert werden konnten.

Weiter konnte ein Zusammenhang zwischen Flächen mit Vegetationsschäden und Deponiegasemissionsstellen festgestellt werden. An Stellen mit Vegetationsbeeinträchtigungen konnten wesentlich häufiger Meßwerte mit dem Gasspürgerät erzielt werden als über den aufgrund der Sondenmessungen ausgewählten Kartierflächen.

Am **Modellstandort Osterhofen** wurde ein 10 m Raster gewählt und auch das Umfeld der Altablagerung beprobt. Auch hier zeigte sich, daß bei Auffälligkeiten von der strikten Einhaltung des Meßrasters abzuweichen und verdächtige Stellen zu überprüfen sind. Es konnten deutliche Emissionsbereiche ermittelt werden:

- Rand der Altablagerung, wo Vegetationsschäden /-beeinträchtigungen erkennbar waren
- Böschungsbereich
- Bereiche neben einer asphaltierten Straße (unterschiedliche Gaswegsamkeit, Gasstau).

Am Modellstandort Herten wurden Begehungen mit dem Gasspürgerät mit FID im 10 m Raster durchgeführt. Auch hier zeigte sich, daß die Rastereinteilung nur als Orientierungshilfe heranzuziehen und bei Bedarf das Raster kleinflächig enorm zu verdichten ist (1 - 2 m).

Die Oberflächenabdeckung an der Altablagerung Herten besteht aus bindigem Material, das weitgehend wasserundurchlässig ist. Dadurch kommt es zu Staunässe, bei der nur geringe Gasaustritte möglich sind. An vereinzelt trockenen Stellen und besonders im Böschungsbereich konnten aber bevorzugte Emissionsstellen kartiert werden. Die gemessenen Emissionen wurden in 3 Gruppen unterteilt:

- geringe Emissionen 25 - 50 ppm
- mittlere Emissionen 50 - 100 ppm
- außergewöhnlich hohe Emissionen 100 - 2000 ppm.

### 3.2.2.3. Begehung mit dem Gasspürgerät mit PID

#### Theoretischer Hintergrund/Zielsetzung

Emissionsmessungen mit dem **Gasspürgerät mit Photo - Ionisations - Detektor (PID)** werden dann eingesetzt, wenn organische Stoffe wie Alkohole, Ester, CKW, aliphatische Kohlenwasserstoffe (Mineralöl, Benzin) und aromatische Kohlenwasserstoffe aufgespürt werden sollen. Methan sowie die Hauptkomponenten der Luft (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und Edelgase) werden nicht detektiert. Sehr empfindlich ist das Gasspürgerät mit PID außerdem bei einigen geruchintensiven Verbindungen wie H<sub>2</sub>S und NH<sub>4</sub>. Eine Zuordnung zu den einzelnen Stoffen ist nicht möglich, der Meßwert ist also ein Summenparameter. Eine Eichung auf bestimmte Stoffe ist möglich und kann z.B. auf Toluol erfolgen. Als Meßgröße werden dann Milligramm Toluoläquivalente je Kubikmeter Luft (mg/m<sup>3</sup> Toluoläquivalente) angegeben. Die Nachweisgrenze des Gasspürgerätes mit PID gegenüber Toluol liegt bei ca. 0,1 mg/m<sup>3</sup>.

Die einzusetzenden Geräte sind tragbar, und es können ähnlich wie bei Begehungen mit Gasspürgeräten mit FID Flächen kartiert werden. Die Geräte sind mit einer Ansaugpumpe ausgestattet und besitzen eine eigene Stromversorgung.

Begehungen mit Gasspürgeräten mit PID sind nur sinnvoll zusammen mit Meßergebnissen einer Begehung mit FID- Gasspürgeräten, da Methan nicht detektiert wird. Sie stellen also bei Emissionsmessungen nur eine Ergänzung der FID - Meßwerte um den Anteil Deponiegasspurenstoffe dar. Die einzelnen Stoffe lassen sich aber nicht identifizieren. Die Meßwerte können nur als Hinweis für weiterführende Deponiegasspurenstoffanalysen dienen (Kapitel 3.2.1.3.).



Im Bereich Arbeitsschutz bei der Altlastenerkundung und -sanierung ist das Gasspürgerät mit PID jedoch inzwischen unverzichtbar. Um Arbeitsplatzüberwachungen durchzuführen, haben sich solche Geräte bewährt. Ebenso lassen sich bei der Ansprache von Materialproben organische Belastungen nachweisen.

### **Meßprinzip:**

Durch Bestrahlung mit Photonen (Lichtquanten) können Gase ionisiert werden. Die Ionisierbarkeit eines Gases ist abhängig von dessen Eigenpotential und von der Energie der Photonen. Bei PIDs werden UV - Lampen als Photonenquelle eingesetzt. Es werden von den Herstellern jeweils UV - Lampen mit unterschiedlich starker Ionisierungsenergie angeboten. Grundsätzlich gilt, daß die energiereichsten Photonenquellen (11,7 eV - Lampen) die größte Anzahl von Gasen erfassen können. Gase mit einem höheren Ionisierungspotential als 11,7 eV, wie Methan, Kohlendioxid oder Stickstoff werden nicht detektiert. Kommen diese Gase jedoch in hohen Konzentrationen in der angesaugten Probe vor, kann die PID - Anzeige beeinflusst werden ("Quenching - Effekt"). Dieser Effekt bewirkt einen negativen Ausschlag am Meßgerät. Durch Eichung des Gasspürgerätes mit einem entsprechendem Eichgas, das Anteile dieser "Störgase" enthält, kann dieser Effekt ausgeschaltet werden.

Proben werden durch ein Ansauggebläse in die Ionisierungskammer transportiert. Der Meßwert wird von einem analogen Anzeigelinstrument abgelesen oder aber bei programmierbaren Geräten gespeichert.

### **Durchführung:**

Begehungen mit dem Gasspürgerät mit PID können ähnlich wie Begehungen mit dem FID - Gasspürgerät in Rasterform durchgeführt werden.

Einzelmessungen können bei Überwachungen von Schadstoffkonzentrationen am Arbeitsplatz sinnvoll sein.

### **Kosten:**

Der Zeitbedarf für die Kartierung von 1 ha im 10 m Raster beträgt für 2 Personen ca. 4 Stunden.

Miete für tragbares Gasspürgerät mit PID/Tag      DM 200.- bis 500.-

### **Bewertung und Anwendung der Methode:**

Begehungen mit dem Gasspürgerät mit PID haben im Zusammenhang mit Deponiegasmessungen nur einen begrenzten Aussagewert. Sie können jedoch einen ersten Hinweis auf Spurenstoffe geben. Eine quantitative Messung einzelner Substanzen ist nicht möglich.

Analog zu der Begehung mit FID - Gasspürgerät ist die Begehung mit PID - Gasspürgerät nur bei Alttablagerungen sinnvoll, die sich in Phase I und II befinden. Allerdings ist hier der "Quenching - Effekt" zu berücksichtigen und das Gerät entsprechend zu eichen. Bei Alttablagerungen in Phase III - VI sind keine gasförmigen Emissionen zu erwarten. Besonders der hier relevante Anteil an Deponiegasspurenstoffen ist in diesen Phasen sehr gering.

Im Bereich Arbeitsschutz bei der Altlastenerkundung und -sanierung erfüllen Messungen mit dem Gasspürgerät mit PID eine wichtige Funktion bei der Überwachung von Schadstoffkonzentrationen am Arbeitsplatz.

### **Erfahrungen an den Modellstandorten:**

Am **Modellstandort Herten** wurden parallel zu den Emissionsmessungen mit dem Gasspürgerät mit FID im gleichen Raster PID - Emissionsmessungen durchgeführt. Dabei zeigten sich insgesamt sehr niedrige PID - Meßwerte trotz einer hohen Methanemission. Die Meßwerte lagen zwischen 0,1 bis 0,3 mg/m<sup>3</sup> Toluoläquivalente. Als höchste Konzentration konnten 2,0 mg/m<sup>3</sup> Toluoläquivalente detektiert werden.

Am **Modellstandort Mannheim** wurden Messungen mit dem PID - Gasspürgerät bei der Abfallprobenahme hinzugezogen. Um die Auswahl der zu analysierenden Proben nicht nur auf organoleptische Befunde (visueller Eindruck, Geruch, Konsistenz) zu stützen sowie aus Arbeitsschutzgründen, sollten Spurenstoffe summarisch erfaßt werden. Durch PID`s konnten sinnlich wahrnehmbare Gerüche nur bei 55% der Proben detektiert werden. PID - Meßwerte konnten nur in solchen Fällen ermittelt werden, die sich auch durch deutlichen Geruch auszeichneten. Die Meßwerte lagen zwischen 2 und 600 ppm.

## **3.2.3. Sonderuntersuchungen**

### **Vorbemerkung**

**Sonderuntersuchungen** sind nur dort einzusetzen, wo die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungsmethoden nicht zum gewünschten Erfolg führen, bzw. wo Unstimmigkeiten zwischen "Typisierung" und Meßergebnissen bestehen. Mit den Sonderuntersuchungen werden Methoden aufgeführt, die nur zusätzlich zu Gaskonzentrationsmessungen und Gasemissionsmessungen heranzuziehen sind.

### **3.2.3.1. Kondensat- und Sickerwasseranalytik**

#### **Theoretischer Hintergrund/Zielsetzung**

Hinweise auf den Zustand und weiteren Verlauf der Gasentwicklung lassen sich durch Untersuchung des Sickerwassers bzw. des Kondensats gewinnen. Wasserhaushalt, Gasbildung und Sickerwasserinhaltsstoffe sind gekoppelte Größen (EHRIG, 1982), wie aus Abbildung 15 zu ersehen ist. Dadurch kann im Sickerwasser und Kondensat eine Störung oder der Abbruch der Gasproduktion durch spezifische Parameter nachgewiesen werden.

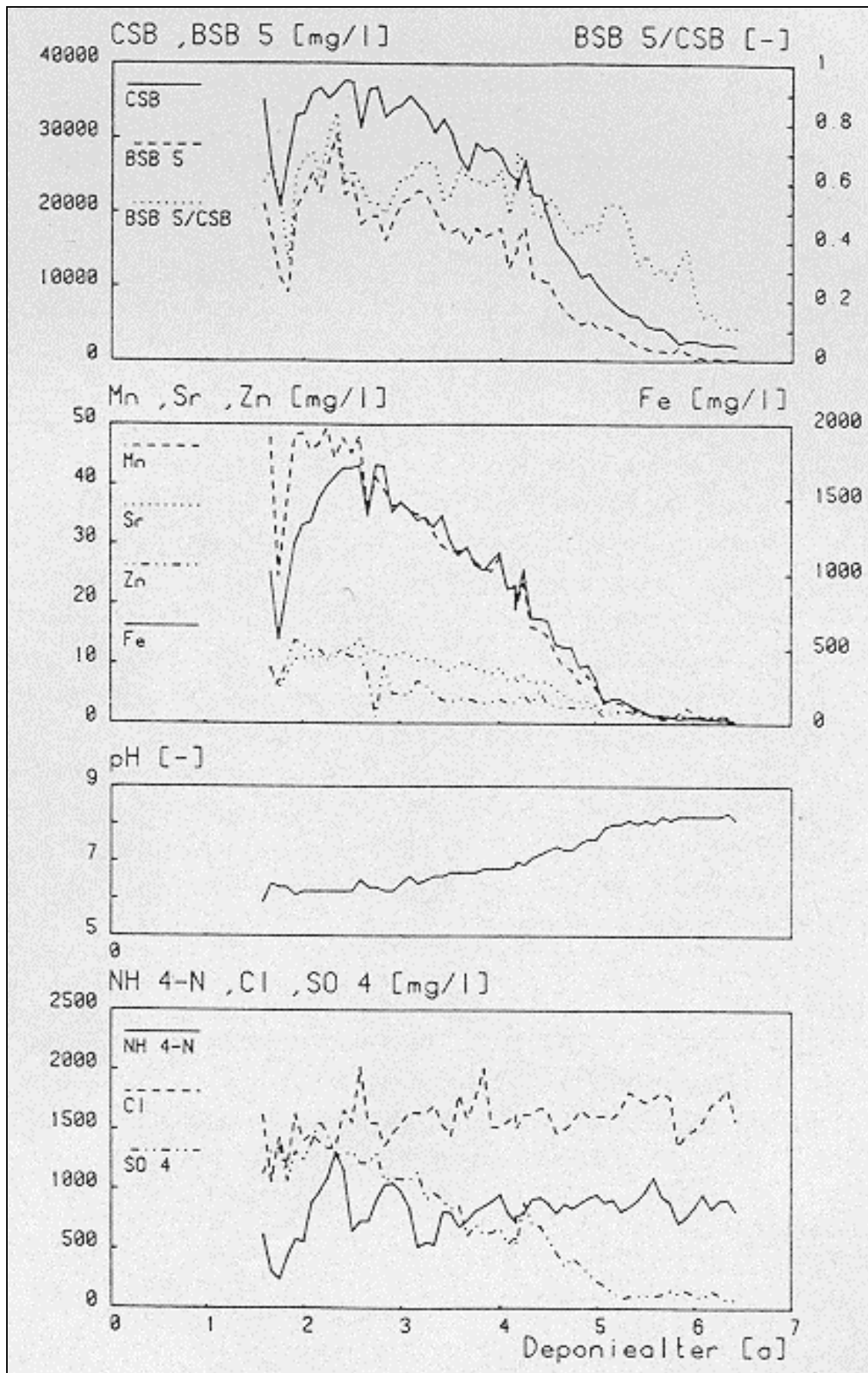


Abb. 15 Charakteristische Konzentrationsverläufe ausgewählter Sickerwasserinhaltsstoffe (EHRIG, 1982)

Kondensatuntersuchungen sind auch geeignet, toxikologisch relevante, organische Inhaltsstoffe nachzuweisen, die im Deponiegas nur unterhalb der Nachweisgrenze vorliegen. Sie stellen eine Ergänzung der Spurenstoffanalytik (Kapitel 3.2.1.3.) dar.

Wie sich der Gehalt an Sickerwasserinhaltsstoffen mit dem Abbauvorgang verändert und welche Parameter charakteristisch sind, soll im folgenden aufgezeigt werden:

Während der "sauren Gärung" nach FARQUHAR et al. 1973 (Kapitel 2.3.) ist die organische Sickerwasserbelastung hoch. Dies drückt sich in hohen BSB<sub>5</sub> - und CSB - Werten aus. Die im Sickerwasser enthaltenen organischen Säuren bewirken eine pH - Absenkung. Dadurch sind auch anorganische Komponenten in Lösung z.B. Eisen, Zink und Calcium.

In der stabilen Methanphase (Stufe IV) geht die organische Sickerwasserbelastung zurück, da dieser Anteil durch die biochemischen Prozesse in die Gasphase umgewandelt wird. Dadurch sinkt der Quotient BSB<sub>5</sub>/CSB. Es kommt zu einem Anstieg des pH - Wertes, der dann zwischen 7 und 8 liegt. Der Austrag von anorganischen Komponenten geht zurück.

Über die Zusammensetzung des Sickerwassers nach Abklingen der Methanphase sind bisher wenig Daten bekannt. Jedoch kommt es wieder zu einem Absinken des pH - Wertes und somit zu einem Anstieg des Austrags von anorganischen Komponenten. Bei der Schlammfäulung unter Laborbedingungen konnte bei sehr langen Aufenthaltszeiten ein Anstieg des Ammonium - Stickstoffanteils relativ zum Gesamtstickstoff erkannt werden (KAPP, 1988).

Deponiegas ist, da in der Deponie Feuchtigkeit vorhanden ist, wasserdampfgesättigt. Dies bedeutet, daß z.B. bei einer Gastemperatur von 40°C bis zu 60 g Wasserdampf in einem Kubikmeter Gas mitgeführt wird, der sich bei Abkühlung entsprechend als Kondensat niederschlägt. Kondensat enthält ca. 400 mg/l Trockensubstanz. Die Hälfte davon sind organische Stoffe (RETTENBERGER, 1982b).

### **Durchführung:**

Die Analyse von Sickerwasser und Kondensat sollte nach einheitlichen Verfahren durchgeführt werden und orientiert sich deshalb im folgenden an der TA Abfall, Anhang B.

Bei der Gewinnung von Kondensat kann eine Fraktionierung durch unterschiedliche Kühltemperatur (0°/-50°C) durchgeführt werden (ARENDDT, 1991).

### Analysenparameter

pH-Wert: DIN E 38 414 T. 5 (DEV, S 5)

Niedere pH-Werte weisen auf einen Abbauzustand hin, der durch eine Endproduktanhäufung niederer Fettsäuren gekennzeichnet ist. Dies ist ein Indiz für eine Störung oder Beendigung der Abbauprozesse.

Leitfähigkeit: DIN E 38 404 C8

Die Leitfähigkeit des Sickerwassers wird von der Art und Menge der verschiedenen Inhaltsstoffe bestimmt. Beispiele von Inhaltsstoffen, die die Leitfähigkeit beeinflussen, sind der Gehalt an Chlorid-, Ammonium-, Kalium- und Natriumionen. Aber auch der Gehalt an niederen Fettsäuren und anderen organischen Inhaltsstoffen, soweit dissoziiert, tragen zur Leitfähigkeit bei. Von EHRIG, 1989 wurde bei älteren Deponien ein geringeres Wertespektrum als bei jüngeren gemessen.

Organische Inhaltsstoffe:

Biochemischer Sauerstoffbedarf	DEV H 5/A
Chemischer Sauerstoffbedarf	DIN 38 409 H 41
Total Organic Carbon (TOC) wie DOC gemessen	DIN 38 409 H 3

Die organische Belastung von Sickerwässern läßt sich durch BSB<sub>5</sub>, CSB und TOC charakterisieren. Die organischen Inhaltsstoffe in Sickerwässern aus Deponien in der Methanphase bestehen überwiegend aus Humin- und Fulvosäure.

Die biochemische Stabilisierung einer Deponie und das Ende der stabilen Methanphase wird dadurch angezeigt, daß im Sickerwasser der Quotient BSB<sub>5</sub>/CSB einen Wert unter 0,1 annimmt. In diesem Fall sind weniger als 10 % der organischen Stoffe biologisch abbaubar.

Toxikologisch relevante organische Inhaltsstoffe:

Bestimmung mit Gaschromatograph /Massenspektrometer

Ein Teil der Deponiegasspurenstoffe findet sich in höheren Konzentrationen im Gaskondensat wieder. Dabei handelt es sich um "leichtflüchtige" Verbindungen, die im Kondensat angereichert werden und um "schwerflüchtige" Verbindungen, die in der Gasphase nur in sehr geringer Konzentration vorkommen und ebenfalls angereichert werden. Hier sind besonders schwerflüchtige Komponenten wie polychlorierte Biphenyle (PCB) und einige der höheren polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) zu nennen (ARENDDT, 1991).

#### **Kosten:**

Die Anzahl der Analysenparameter ist für diese Untersuchungsmethode entscheidend. Werden Einzelverbindungen aus der Gruppe der toxikologisch relevanten Inhaltsstoffe analysiert, kann dies zu einer überproportionalen Verteuerung führen.

#### **Bewertung:**

Sickerwasser- und Kondensatuntersuchungen sind immer nur als begleitende Maßnahmen zur Untersuchung des Deponiegasgeschehens zu sehen. Sie können Hinweise auf eine Störung von biochemischen Prozessen in einer Altablagerung geben.

Durch Erweiterung des Analyseumfangs können im Kondensat toxikologisch relevante organische Inhaltsstoffe nachgewiesen werden, die im Deponiegas unterhalb der Nachweisgrenze vorliegen.

### Erfahrungen an den Modellstandorten:

Am **Modellstandort Mannheim** wurden Spurenstoffanalysen durch Originalproben (Tedlarbeutel) und Kondensatuntersuchungen durchgeführt (Tabelle 8). Das Kondensat wurde bei einem Absaugversuch gewonnen. Dabei zeigte sich, daß Spurenstoffe, die im Abfall enthalten sind, aber im Deponiegas nur unterhalb der Nachweisgrenze vorkommen, im Kondensat angereichert werden und somit nachgewiesen werden können. Weiter konnte gezeigt werden, daß die Konzentrationen besonders von BTX im Deponiegas und Kondensat korrelieren. Deshalb sollte bei eingehenden Spurenstoffuntersuchungen das Kondensat berücksichtigt werden.

Parameter	Deponiegas [mg/m <sup>3</sup> ] Pegel H3	Deponiegas [mg/m <sup>3</sup> ] Pegel IJ2	Kondensat [µg/l] Pegel H3	Kondensat [µg/l] Pegel IJ2
Benzol	6,1	0,2	35	2
Toluol	0,7	0,2	5	4
Ethylbenzol	87,3	0,5	283	2
m+p-Xylol	204,9	1,4	715	6
o-Xylol	27,3	0,5	152	3
Vinylchlorid	2,3	0,1	1	<1
1,1- Dichlorethen	<0,1	<0,1	3	33
cis- 1,2- Dichlorethan	0,2	<0,1	<1	16

**Tab. 8 Konzentrationen von BTX und LCKW/FCKW im Deponiegas und Kondensat von zwei ausgewählten Gasentnahmestellen am Modellstandort Mannheim; (RÖVER & Partner/TAUW Infra Consult: Erkundung des Modellstandorts Mannheim, Bericht Okt. 1990)**

### 3.2.3.2. Gasdruckmessungen

#### Theoretischer Hintergrund/Zielsetzung

Gasdrücke in Deponien sind die Folge des biochemischen Abbaus von Biomassen. Die Höhe der Drücke ist abhängig von der Intensität der Gasproduktion und von der Möglichkeit des Gases, aus dem Müllkörper zu entweichen. Bei der Messung der Gasdrücke im Müllkörper konnte BOGNER, 1986 Bodengasdrücke von 97,5 - 101,5 kPa absolut (975 - 1015 mbar) feststellen.

Nach FARQUHAR et al., 1982 liegen die max. Gasdrücke zwischen 2 - 2,5 kPa (20 - 25 mbar) und nach RETTENBERGER, 1979 stellt sich bei abgedeckten Deponien im Deponiekörper ein Druck von bis zu 5 mbar ein.

Mit fortschreitendem Abbaugrad und somit abnehmender Gasproduktion werden auch die Drücke im Müllkörper abnehmen. Berücksichtigt man, daß die Druckverhältnisse in der oberen Bodenschicht stark auf barometrische Veränderungen, aber auch auf Feuchtigkeitsveränderungen der oberen Deckschicht reagieren, so wird eine Beurteilung von Gasdruckmessungen zusätzlich erschwert.

Bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden - Württemberg laufen zur Zeit Untersuchungen mit dem Ziel, einen Zusammenhang zwischen der Gaskonzentration und dem Gasdruck herzustellen.

### **Durchführung:**

Die Messungen lassen sich mit Schrägrohr - Manometern an Gasmessstellen durchführen. Flüssigkeitsmanometer mit einem Meßbereich von -50 mbar bis 50 mbar eignen sich zur Durchführung ebenso wie Digital - Manometer (ca. 0,01 mbar Meßunsicherheit).

### **Kosten:**

Ohne Meßstellenerichtung (wird für Gaskonzentrationsmessungen, Kapitel 3.2.1., bereits bestehen)

Schrägrohrmanometer        DM 200.-

Digitalmanometer        DM 1500.-

### **Bewertung:**

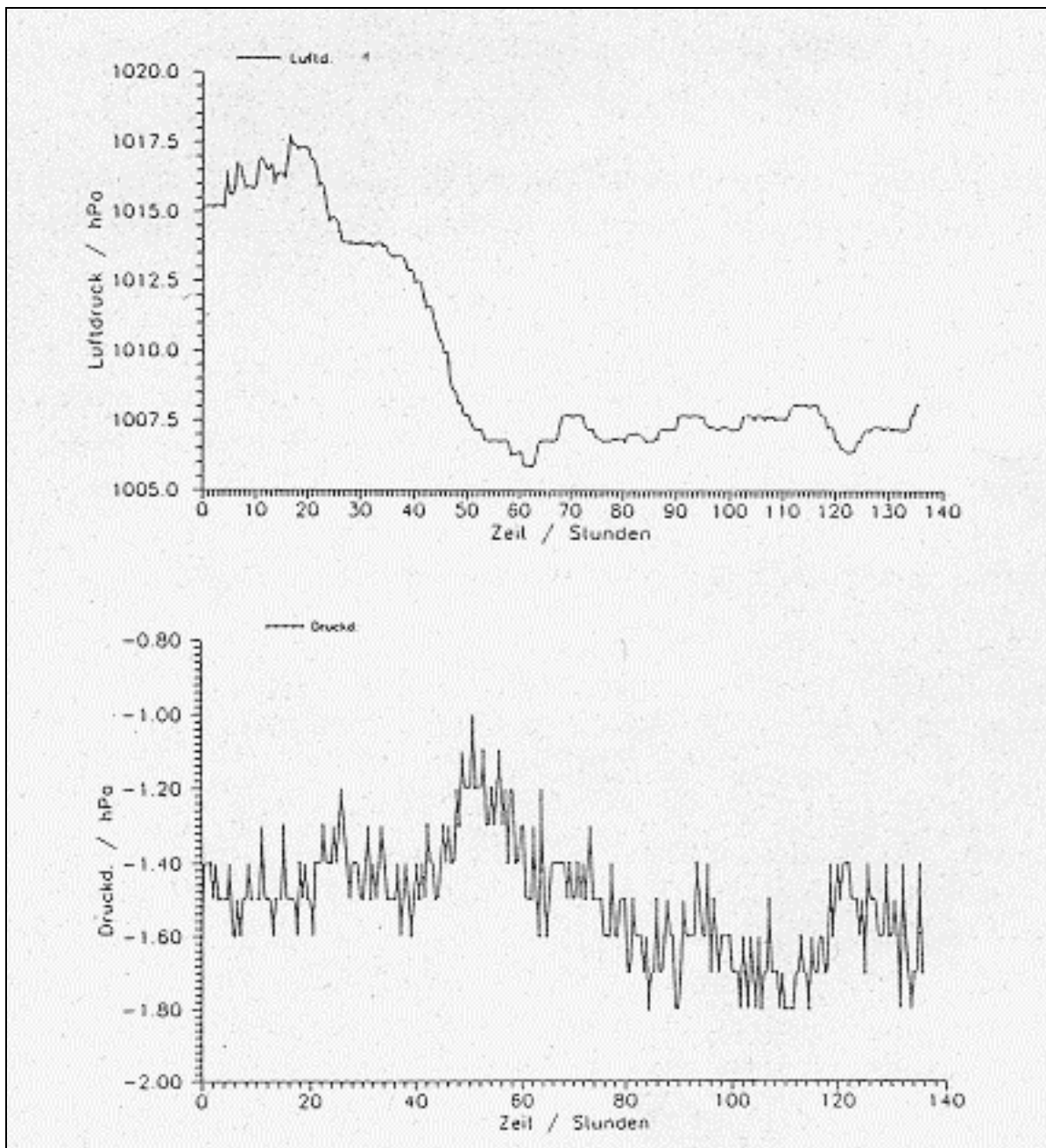
Zur Beurteilung der Deponiegasproduktion können Druckmessungen herangezogen werden. Da ein direkter Zusammenhang zwischen Deponiegasproduktion und Druck im Deponieinneren besteht, kann die Druckmessung ein Anhaltspunkt für die Intensität der Deponiegasproduktion sein. Die Bewertung ist allerdings sehr schwierig, da die Meßergebnisse von verschiedenen äußeren Faktoren wie Deponieabdeckung und Luftdruck beeinflusst werden.

Altablagerungen, die sich in Phase III - VI befinden, weisen sehr geringe Drücke im Deponiekörper auf. Gasdruckmessungen werden hier so stark von äußeren Faktoren beeinflusst, daß Messungen nicht mehr sinnvoll sind. Werden an Altablagerungen in Phase I und II Gasdruckmessungen durchgeführt, sollten diese immer zusammen mit Luftdruckmessungen vorgenommen werden, da der Druck im Deponiekörper auf Luftdruckänderungen reagiert.

Druckmessungen werden auch bei Absaugversuchen durchgeführt, um den Einzugsbereich von Gasbrunnen abzuschätzen. Dabei wird an Beobachtungsstellen, die im Umfeld der Gasentnahmestelle angeordnet werden, die Druckveränderung gemessen (siehe Kapitel 3.2.1.2. Absaugversuch).

### **Erfahrungen an den Modellstandorten:**

Am **Modellstandort Mannheim** konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen Depo- niedruck und atmosphärischem Druck aufgezeigt werden (Abbildung 16). Immer wenn der atmosphärische Druck absinkt, steigt der Depo- niedruck; eine Folge davon sind stärkere gas- förmige Emissionen. Mit zunehmendem atmosphärischem Druck verlagert sich die Methanoxidation in die Tiefe aufgrund der tiefer eindringenden Atmosphärenluft.



**Abb. 16 Vergleich von atmosphärischem Druck und Deponiedruck gemessen am Modellstandort Mannheim (RÖVER & Partner/TAUW Infra Consult Modellstandort Mannheim, Bericht 1990)**

Weiter konnte am Modellstandort Mannheim bei einem Absaugversuch der Einzugsbereich von Gaskollektoren durch Druckmessungen an Beobachtungsstellen eingeschätzt werden. Durch den Einsatz von Schrägröhrmanometern konnte an den Beobachtungsstellen Druckdifferenzen bis 4,5 mbar in 10 m Entfernung zur Gasentnahmestelle gemessen werden (siehe graphische Darstellung, Anlage 8).

Am Modellstandort Osterhofen wurden während eines Absaugversuchs begleitende Druckmessungen an Gassonden durchgeführt. Dabei konnten Druckdifferenzen bis maximal 2 mbar in 30 m Abstand zur Gasentnahmestelle ermittelt werden (siehe Kapitel 3.2.1.2.).



### 3.2.3.3. Temperaturmessungen

#### Theoretischer Hintergrund/Zielsetzung

Die **Bodentemperatur** wird von 3 Energiequellen beeinflusst.

1. durch die Sonneneinstrahlung
2. durch die Erdwärme
3. durch die Reaktionswärme, die beim mikrobiellen Abbau der organischen Substanz im Boden frei wird.

Hier ist nur die 3. Energiequelle zu betrachten. Bei mikrobiellen Vorgängen kommt es zu einer Wärmeentwicklung, die beim anaeroben Abbau etwa 10% der im Deponiegas enthaltenen Energie entspricht.

Bei ausreichenden Wachstumsbedingungen für die Methanbakterien sind Erwärmungen um 15 °C möglich, in der aeroben Phase sogar eine Zunahme der Temperatur bis zu 30 °C. Die Erwärmungen sind also abhängig von der Art und Intensität der biologischen Prozesse. Die Abweichungen der im Deponiekörper vorgefundenen Temperaturen von der Hintergrundbodentemperatur kann daher ein Hinweis auf biologische Aktivitäten sein.

Anaerobe Prozesse laufen im mesophilen Bereich (10 - 45°C) ab, wobei die größte Aktivität bei 30 - 37°C stattfindet. Werden Temperaturen unter diesen Werten gemessen, ist von einer Hemmung bzw. der Beendigung der biologischen Prozesse auszugehen. In Ausnahmefällen sind Temperaturerniedrigungen durch andere Prozesse zu berücksichtigen (Grundwasserzutritte etc.). Witterungseinflüsse machen sich in Mitteleuropa bis in maximal 2 m Tiefe bemerkbar. Die Temperatur in 2 m Tiefe ist ungefähr gleich dem Jahresmittel der Lufttemperatur von 8 - 10°C.

#### Durchführung:

Altablagerungen zeigen je nach Abbaugrad Temperaturen zwischen 10 und 30 °C.

Temperaturmessungen können bei Sondenmessungen mit wenig Aufwand durchgeführt werden. Es ist zu beachten, daß Metallsonden aufgrund der guten Wärmeleitung für Temperaturmessungen nicht geeignet sind.

Weiter ist bei Temperaturmessungen auch darauf zu achten, daß der Einfluß durch Einbauarbeiten etc. so gering wie möglich gehalten wird und eine Wartezeit vor der ersten Messung eingehalten wird.

Zur Messung eignen sich Temperaturfühler (Widerstandsthermometer Pt 100). Der Durchmesser des Meßfühlers beträgt 12 mm und läßt sich so problemlos in Sondierbohrungen einbringen. Er läßt sich bei Anschluß in Dreileiterschaltung an einen Schreiber oder an einen Data - Logger anschließen. Die Genauigkeit des Systems ist besser als + 1 %. Meßwiderstände reagieren vergleichsweise langsam, für Ganglinienmessungen aber immer noch schnell genug. Problematisch ist ohne Zweifel die Langzeitdrift. Eine Nullpunktjustierung bzw. eine Eichung ist daher in regelmäßigen Abständen erforderlich.

Eine einfache Möglichkeit zur Temperaturmessung besteht mit Analog- oder Digital - Handmeßgeräten mit Thermistorfühler. Diese Geräte haben eine Meßgenauigkeit von  $\pm 0,5^\circ \text{C}$  und ihre Einstellzeit liegt bei ca. 15 s. Durch eine entsprechende Kabellänge können die Fühler auch in größere Tiefen abgelassen werden.

**Kosten:**

Der Zeitaufwand bei Temperaturmessungen ist gering und mit einfachen Meßgeräten an Sonden durchzuführen. Es entstehen nur geringe Mehrkosten.

**Bewertung und Anwendung der Methode:**

Die Temperaturen im Müllkörper von Betriebsdeponien bewegen sich zwischen  $15 - 30^\circ \text{C}$ . Da die Hintergrundtemperatur in Mitteleuropa in 2 m Tiefe zwischen  $8 - 10^\circ \text{C}$  liegt, kann durch die biologischen Prozesse auch noch bei Altablagerungen eine höhere Temperatur als die Hintergrundtemperatur gemessen werden. Je nach Abbaugrad wird sich die Temperatur der Hintergrundtemperatur angleichen. Auffällig hohe Temperaturen ( $> 30^\circ \text{C}$ ) sind als Hinweis auf aerobe Prozesse zu werten.

Somit erlauben Temperaturmessungen zusammen mit Gaskonzentrationsmessungen Aussagen über den Abbaugrad bzw. die Intensität der biologischen Prozesse.

Bei Altablagerungen in Phase III - VI werden die Temperaturen zwischen  $10 - 15^\circ \text{C}$  liegen. Messungen sind hier von geringem Aussagewert.

**Erfahrungen an den Modellstandorten:**

Am **Modellstandort Osterhofen** wurde während eines viertägigen Absaugversuchs die Temperatur an den Gaskollektoren in 3 m Tiefe mit Thermistorfühler gemessen und stündlich abgelesen. Es kam an beiden Kollektoren zu Temperaturniedrigungen (hier von  $14,6^\circ \text{C}$  auf  $11^\circ \text{C}$  bzw.  $14,4^\circ \text{C}$  auf  $12,4^\circ \text{C}$ ; Abbildung 17), die sich darauf zurückführen lassen, daß Gas aus tiefen Bereichen (grundwassernah) angesaugt wurde.

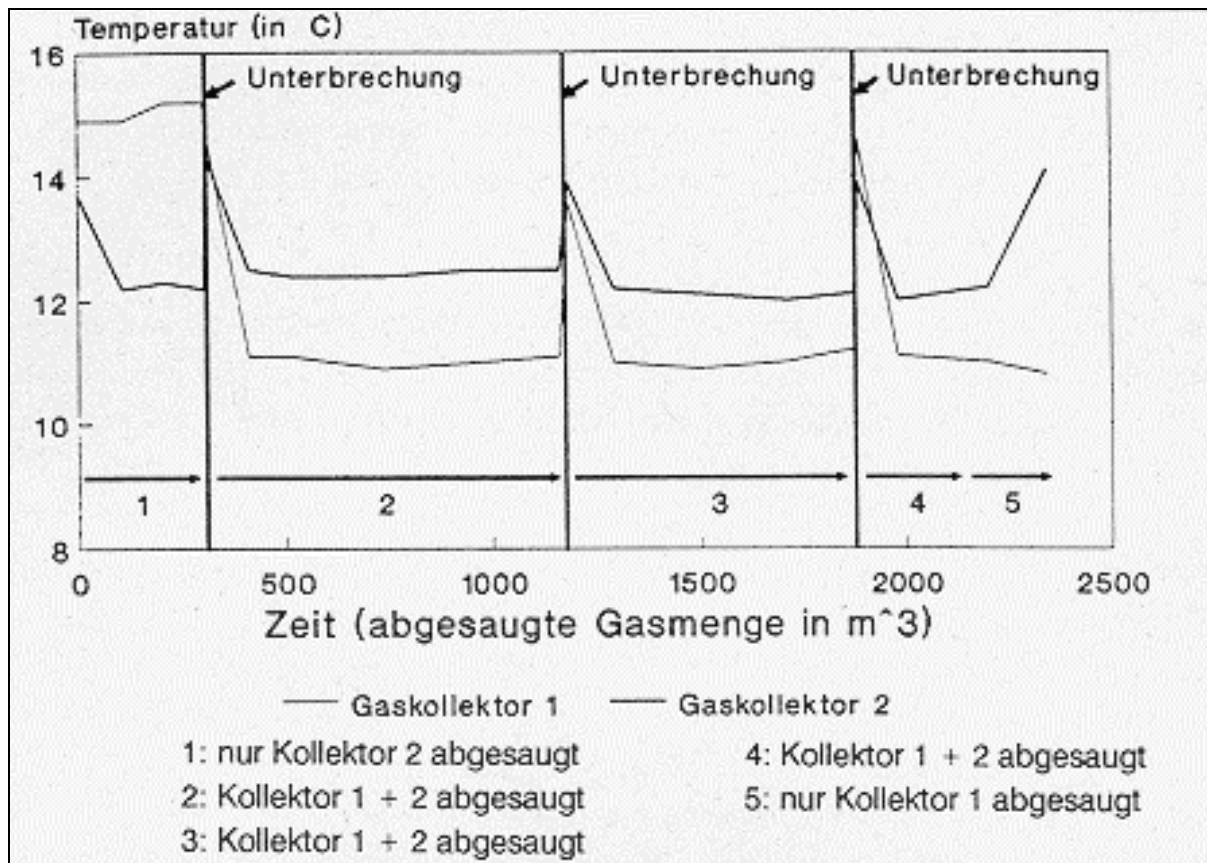


Abb. 17 Temperaturverlauf in den Gaskollektoren während des Absaugversuchs am Modellstandort Osterhofen; (TECHNOLOGIEBERATUNG GRUNDWASSER UND UMWELT: Modellstandort Osterhofen, Bericht 1990)

### 3.2.3.4. Materialuntersuchungen

#### Theoretischer Hintergrund/Zielsetzung

Die Kenntnis des Anteils an abbaubarem organischem **Material** (bzw. dem verbliebenen Rest) im Ablagerungsgut von Altdeponierungen ist eine wesentliche Voraussetzung zur Abschätzung der Gasproduktion. Weiterhin interessiert der Wassergehalt des Ablagerungsgutes, da eine Hemmung der Gasproduktion durch zu geringen Wassergehalt vorliegen kann. Diese als Milieubedingungen im Kapitel 2.4. beschriebenen Faktoren sind meßtechnisch nur sehr schwer repräsentativ für eine Altdeponierung zu ermitteln. Um diese Fragen dennoch zu klären kann es sinnvoll sein, Materialuntersuchungen durchzuführen. Die Bestimmung der organischen Substanz, des Wassergehalts oder die Durchführung eines Faulversuchs kann dann eine geeignete Untersuchungsmethode darstellen. Beachtet werden muß, daß eine repräsentative Probenahme kaum möglich ist, und eine Aussage allenfalls halbquantitativ bewertet werden kann.

Je nach Fragestellung sind verschiedene Untersuchungen durchzuführen:

1. Ermittlung des Wassergehalts:  
Aus der zerkleinerten Menge (Hammermühle) werden mehrere Proben von ungefähr 1 kg Gewicht entnommen und im Trockenschrank bei 105°C getrocknet.
2. Bestimmung der organischen Substanz:  
Diese Bestimmung kann näherungsweise durch Bestimmung des Glühverlustes durchgeführt werden. Jedoch ist hierbei die Trennung von "wirksamer" oder "abbaubarer" organischer Substanz von der gesamten organischen Substanz nicht möglich.
3. Faulversuch:  
Zu diesem Versuch sind bisher keine einheitlichen Versuchsanordnungen bekannt. Die Schwierigkeit bei solchen Versuchen besteht darin, ein anaerobes Milieu zu schaffen, in dem die Gasproduktion aufrecht erhalten wird<sup>9</sup> Dieser Versuch kann nur von erfahrenen Instituten durchgeführt werden.

### **Durchführung:**

Proben können durch großkalibrige Sondierungen, Bohrungen oder Schürfe gewonnen werden. Grundsätzlich sind nur Proben geeignet, die Hausmüll enthalten. Der Anteil des Hausmülls sollte bei der Probenahme geschätzt, bzw. durch Aussortieren festgelegt werden. Besonders zur Gewinnung von Proben für Faulversuche sollte darauf geachtet werden, daß anaerobe Bedingungen bestehen bleiben. Dies ist schwierig und läßt sich nur mit Schlauchkernbohrungen optimal verwirklichen. Beim Probentransport sollten keine großen Temperaturunterschiede herrschen, um die Beibehaltung des Wassergehalts zu gewährleisten.

### **Kosten:**

Glührückstandsbestimmungen und Wassergehaltsbestimmungen sind kostengünstig und werden bei Analysen von Abfallproben routinemäßig ermittelt.

Kosten für Faulversuche sind aufgrund der langen Versuchsdauer (ca. 4 Wochen) hoch. Anhaltswert DM 8000.- incl. Bericht.

Die Proben können durch Bohrungen gewonnen werden. Von Schürfen ist aus Arbeitsschutzgründen abzuraten. Generell ist bei der Probenahme den Arbeitsschutzmaßnahmen besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die dabei entstehenden Kosten sind zusätzlich zu berücksichtigen.

### **Bewertung und Anwendung der Methode:**

Materialuntersuchungen sind nur bei besonderen Fragestellungen als Untersuchungsmethode anzuwenden. Da die Gewinnung von repräsentativen Proben kaum möglich ist, kann das Ergebnis der einzelnen Proben nicht auf die gesamte Ablagerung bezogen werden.

Materialuntersuchungen können für die Beurteilung des Deponiegasgeschehens dennoch äußerst wichtige Daten liefern. Sie sind aber immer nur als Ergänzung zu anderen Methoden zu betrachten. Um über den Abbaugrad der organischen Substanz in der Ablagerung eine ge-

---

<sup>9</sup> Dies kann im Labor entweder durch Zugabe von Methan (Deponiegas) oder durch "Animpfen" der Probe mit Klärschlamm geschehen

nauere Aussage zu machen, kann näherungsweise die Bestimmung des Glühverlustes herangezogen werden. Faulversuche liefern die verlässlichsten Ergebnisse in bezug auf Deponiegas bzw. Gaspotential. Sie sind jedoch aufwendig und können nur von einem erfahrenen Institut durchgeführt werden.

Eine mengenmäßige Abschätzung des Gaspotentials bei Altablagerungen in Phase I - III kann durch Faulversuche erreicht werden.

#### **Erfahrungen an den Modellstandorten:**

Am **Modellstandort Mannheim** wurden Untersuchungen zur Faulfähigkeit von Ablageungsgut durchgeführt (Anlage 9). Dabei sollte eine Abschätzung des Gaspotentials ermöglicht werden. Der Faulversuch fand unter Laborbedingungen statt. Es konnte gezeigt werden, daß das Material noch ein geringes Gaspotential besitzt und daß die Ergebnisse zusammen mit der Bestimmung des Glühverlustes und anderen Versuchsansätzen (Gaskonzentrationsmessungen) zu einer besseren Einschätzung des verbleibenden Gaspotentials führen.

### **3.2.4. Raumlufmessungen**

#### **Theoretischer Hintergrund/Zielsetzung**

Im Freien verdünnen sich ausgasende Stoffe sehr rasch (Faktor 100-10.000 in 2 m Abstand von der Oberfläche). Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Luftbewegung. Ist der Austausch mit der Atmosphäre eingeschränkt, wie z.B. in geschlossenen Räumen, kann Deponiegas unverdünnt auftreten und somit eine Gefahr darstellen. Die Auswirkungen von Deponiegas sind in Kapitel 2.2. beschrieben. Da Gefährdungen auch außerhalb von Altablagerungen durch Migrationen entstehen können, sind bei Raumlufmessungen mehrere Fragen zu klären:

- Ist ausgehend von der Stoffgefährlichkeit eine Gefährdung möglich?
- Ist der Transport zum betreffenden Schutzgut (hier Raumluf) möglich?
- Ist eine Wirkung möglich (bewohnt, keine Belüftungsmaßnahmen etc.)?

Gefahren gehen nicht allein von explosiven Gasgemischen aus, es kann auch zur Anreicherung von Kohlendioxid (Erstickungsgefahr) oder toxikologisch bedenklichen Deponiegasspurenstoffen (Langzeitwirkung) kommen. Insbesondere in Kellerräumen, aber generell auch in Räumen, wo Gase durch Risse, Ritzen, über Leitungen, längs Kabeldurchführungen, Abwassersystemen etc. eindringen können, sind bedenkliche Schadstoffkonzentrationen in der Luft nachgewiesen worden. Ein konkreter Hinweis auf diese Gefahren kann das Auftreten von Geruchsbelästigungen und/oder der Nachweis von Methan und Kohlendioxid in Räumen von Gebäuden auf Altablagerungen oder im Umfeld von solchen sein.

Durch den ständigen Aufenthalt von Bewohnern in diesem Bereich kann eine erhebliche Aufnahme an toxikologisch bedenklichen Stoffen gegeben sein.

#### **Durchführung:**

Bei Raumlufmessungen ist der Schutz vor explosiven Gasgemischen vorrangig. Um fundierte Entscheidungen über die Notwendigkeit und den Umfang von Messungen treffen zu können, sind detaillierte Vorbereitungsarbeiten durchzuführen.

Durch Information der betroffenen Bewohner ist sicherzustellen, daß die Maßnahmen Unterstützung finden. Deshalb sollte auch für eine umfangreiche Aufklärung der Bewohner über mögliche Schäden durch Deponiegas gesorgt werden. Eine Einbeziehung der Anwohner durch Befragung (besondere Vorkommnisse, Geruchsbelästigungen etc.) ist in jedem Fall positiv zu beurteilen und kann die Durchführung von Maßnahmen zur technischen Erkundung wesentlich erleichtern.

Da zunächst durch die Messungen ermittelt werden soll, ob Explosionsgefahren bestehen, werden als Meßgeräte tragbare Ex - Warngeräte bzw. Combi - Warngeräte eingesetzt, die die Anwesenheit von brennbaren Gasen anzeigen und bei Überschreiten einer fest eingestellten Schwelle akustisch und optisch Alarm geben. Die Geräte sind auf bestimmte Methankonzentrationen (meist 0 - 100 % UEG = Untere Explosions-Grenze) geeicht. Eine Geräte- und Herstellerliste ist in den Explosionsschutz - Richtlinien wiedergegeben (HAUPTVERBAND DER GEWERBLICHEN BERUFSGENOSSENSCHAFTEN, 1989).

Die Explosions-Warnschwelle kann bei 10 % UEG, entsprechend 0,5 Vol % Methan, eingestellt werden. Das Combi - Warngerät mißt darüber hinaus kontinuierlich den Sauerstoffgehalt und warnt bei Absinken des Gehalts unter 17 Vol %.

Beim ersten Betreten der zu untersuchenden Räume ist größtmögliche Sicherheit für alle Beteiligten anzustreben:

- Zündquellen sind auszuschließen. Nur Warngeräte mit entsprechender Zulassung sind zu verwenden (kein Gasspürgerät mit FID verwenden).
- Es ist, wie generell bei allen Untersuchungen an Abt lagerungen, ein Verbot von Alleinarbeit auszusprechen.

Ist durch diese Vorkehrungen gewährleistet, daß keine akute Gefahr besteht, kann gezielt ein Raum/ Gebäude untersucht werden. Folgende Meßorte kommen, je nach Bebauung, in Frage:

- Wohnräume, Arbeitsräume, Sozialräume und andere Räume, die ständig belegt werden;
- Keller, Abstellräume, Garagen und andere Räume, die weniger oft und nur kurzzeitig begangen werden;
- Entwässerungsanlagen (z.B. Hausanschlußleitungen, Kontrollschächte), Schächte aller Art (z.B. für Dränagesysteme und Fernmeldeeinrichtungen).

In Räumen sollte besonders auf Risse und Fugen in Fußböden und Wänden geachtet und dort gemessen werden. Hier ist auch der Einsatz eines Gasspürgerätes mit FID anzuraten. Mit der Saugglocke können Bereiche wie z.B. unter/ hinter Möbeln, in Schächten usw. beprobt werden, in denen sich Deponiegas auch nach einer Belüftung (offene Türen, Fenster) nachweisen läßt. Es sollten Bereiche in unterschiedlichen Höhen des Raumes beprobt werden.

Nach diesem systematischen Absuchen ist eine Dokumentation der Meßorte mit den Ergebnissen zu erstellen und die Messung an einem zweiten Meßtermin mit geänderten Bedingungen (Luftdruck, gefrorener Boden, Tageszeit etc.) zu wiederholen.

Werden Gase nachgewiesen, sollten **Sofort-Maßnahmen** ergriffen werden. Solche Maßnahmen können je nach Gefährdungsgrad wie folgt aussehen:

- Verbot des Gebrauchs von Zündquellen (offenes Feuer, Rauchen, nicht ex-geschützte Motoren, aber auch Lichtschalter usw.)
- für Luftaustausch sorgen (Öffnen von Fenstern, Schachtabdeckungen etc. und evtl. künstliche Belüftung mit ex-geschützten Ventilatoren)
- provisorisches Verschließen von Rissen und Fugen
- Evakuieren der Bewohner
- Betretungsverbot.

Nach diesen Messungen sollte eine Dokumentation der Meßorte mit den Ergebnissen erstellt werden. Diese Dokumentation dient bei den weiteren Maßnahmen als Entscheidungsgrundlage. Eine schematische Übersicht zum Vorgehen bei Raumlufmessungen ist in der auf der folgenden Seite wiedergegebenen Tabelle 9 dargestellt.

Unter bestimmten Umständen ist ein Versuchsaufbau über einen längeren Zeitraum anzustreben (Installation einer stationäre Gasmessanlage und automatische Aufzeichnung der Meßwerte). Darüber hinaus ist zu prüfen, ob ein sicherheitstechnisches Gutachten anzufordern ist.

Ob Deponiegasspurenstoffe in Räumen gemessen werden sollen, hängt von verschiedenen Informationen ab:

- Aus der historischen Erkundung sind Hinweise auf toxikologisch relevante Stoffe bekannt,
- Meßergebnisse auf der Altablagerung deuten auf toxikologisch relevante Stoffe hin,
- Deponiegas ist in relativ hohen Konzentrationen in Wohnräumen und Kellern vorhanden.

Bei der Auswahl der Meßgeräte ist entscheidend, ob auf einzelne Verbindungen (durch gaschromatographische Laboranalyse zu detektieren) überprüft werden soll, oder ob ein Summenparameter (mittels Gasspürgerät mit PID) für die Beurteilung ausreicht. Um den Aufwand bei der Untersuchung der Vielzahl von Einzelsubstanzen auf ein vertretbares Maß zu reduzieren, beschränkt man sich häufig auf sogenannte Leitparameter. Dieses Vorgehen ist auch aus toxikologischer Sicht akzeptabel, wenn dabei besonders gefährliche Stoffe vorrangig erfaßt werden. Häufig sind dies die krebserzeugenden Stoffe, also z.B. Benzol, Vinylchlorid und andere Chlorkohlenwasserstoffe.

#### **Vorbereitungsarbeit: Welche Altablagerungen sind zu überprüfen?**

Bei bebauter Altablagerung	Bei randlicher Bebauung
grundsätzlich alle Altablagerungen mit Hausmüllanteil; Ausnahme: Bei Bebauung wurde Deponiegasgefahr berücksichtigt bzw. Altablagerung durch Bodenaustausch saniert	Altablagerungen in Phase I - IV "Typisierung" durch technische Erkundung bestätigt/ korrigiert
ggf. <b>Sofortmaßnahmen:</b> Überprüfen von Räumen, die	a. begehbar b. mit dem Untergrund in Verbindung stehen (z.B. Kellerräume)

**Maßnahmen**

Bei bebauter Altablagerung	Bei randlicher Bebauung
Berücksichtigung von: - Art der Bebauung (Planungsunterlagen: gasdichtes Fundament, Versorgungsleitungen gasdicht angeschlossen) - Befragung von Bewohnern	Berücksichtigung von - Art des umgebenden Gesteins (Lockergestein, grobkörnig); - Hinweisen, die auf Migrationen schließen lassen (nachträglich aufgebrachte Oberflächenabdeckung etc.)
Ergebnis: Meßort festlegen	Ergebnis: Festlegen der Größe des Meßgebietes; direkte Messung in Gebäuden oder Feststellen von Migrationen durch Sondenmessungen

**Information der betroffenen Bewohner****Durchführung**

Meßgeräte:	Ex - Warngeräte bzw. Combi - Warngeräte, danach Gasspürgerät mit FID
Meßort:	vorrangig bewohnte Räume, aber grundsätzlich alle begehbaren Räume besonders achten auf: Schächte aller Art, Hausanschlußleitungen, Risse, Fugen im Fundament und Mauerwerk
Bedingungen:	2 Meßtermine mit unterschiedlichen äußeren Bedingungen (Luftdruck, gefrorener Boden, Tageszeit)
Meßprotokoll:	Randbedingungen sind zu dokumentieren (Raum belüftet, Witterungsverhältnisse etc.)

**Schlußfolgerungen/Sicherungsmaßnahmen**

Maßnahmen	abhängig von Gefährdungsgrad z.B. Belüftungsmaßnahmen, Warnschilder, Sperrung von Gebäuden, festinstallierte Gaswarneinrichtung evtl. Sicherheitstechnisches Gutachten
-----------	---

**Tab. 9 Schematische Übersicht zum Vorgehen bei Raumlufmessungen****Bewertung und Anwendung der Methode:**

Aus der Historischen Erkundung sind Daten über die Altablagerung bekannt, und durch die "Typisierung" kann ein gasförmiger Stoffaustrag abgeschätzt werden. Altablagerungen, die sich in Phase V und VI befinden, werden i.a.R. keine Gefahr für das Schutzgut Raumluf darstellen. In Phase V kann es aber u.U. zur Anreicherung von Kohlendioxid in Räumen kommen.

In Phase I - IV steht die Gefährdung durch explosible Gasgemische im Vordergrund. Raumlufmessungen werden hier durchgeführt, um den Schutz vor explosiven Gasgemischen sicherzustellen. Werden Deponiegase nachgewiesen, kann auch die Bestimmung von Spurenstoffen angezeigt sein. Die Bewertung von Meßwerten ist problematisch, da die verschiedenen Grenzwerte von sehr unterschiedlicher Qualität, aber auch von sehr unterschiedlicher Verbindlichkeit sind. Sogenannte Richtwerte, z.B. die Luftqualitätsleitlinien der WHO, haben



lediglich den Charakter von Empfehlungen. Maximale Arbeitsplatz - Konzentrationswerte (MAK-Werte) sind nur für eine täglich achtstündige Exposition konzipiert und zwar für gesunde Erwachsene unter ständiger ärztlicher Überwachung (in Anlage 10 sind Richt- und Grenzwerte für Deponiegasinhaltstoffe dargestellt).

Eine Risikoabschätzung allein anhand von Meßwerten beinhaltet nach Meinung von Medizinern erhebliche Unsicherheiten. So ist es nicht möglich, die individuellen Bedingungen einer Exposition zu berücksichtigen. Insbesondere die summarische Erfassung aller tatsächlich auf den Menschen einwirkenden Einflüsse ist allein auf der Basis einer Risikoabschätzung nicht durchführbar (EIKMANN, 1988). Als eine mögliche Methode ist deshalb die direkte spezifische Untersuchung der betroffenen Personen und Bevölkerungsgruppen anzusehen. Dieses "Biological Monitoring" ist als die Abschätzung einer internen Exposition des Organismus zu einer chemischen Substanz definiert. Die Veranlassung bzw. Durchführung solcher Untersuchungen sind Aufgabe der staatlichen Gesundheitsverwaltung.

#### **Erfahrungen an den Modellstandorten:**

Am **Modellstandort Bitz** wurden als Vorabmaßnahme Raumlufmessungen durchgeführt. In drei im Umfeld der Deponie gelegenen Wohngebäuden wurden Untersuchungen an Schächten und in den Kellergeschossen durchgeführt. Wie sich im Zuge weiterer Untersuchungen ergab, ist am Modellstandort Bitz mit keinen Deponiegasgehalten zu rechnen (Phase VI). Deshalb ergaben auch Raumlufmessungen mit Massenspektrometer und Gaschromatograph auf Spurenstoffe (CKW) keine auffälligen Ergebnisse.

### **3.2.5. Gasanalytik**

#### **Theoretischer Hintergrund/Zielsetzung**

Wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt, sind Gasproben je nach Zielsetzung in den verschiedensten Bereichen von Altablagerungen zu entnehmen. Es ist somit eine zielorientierte analytische Vorgehensweise inklusive der Beprobung notwendig. Nicht vernachlässigt werden sollte dabei die Dokumentation der Vorgehensweise, weil nur dadurch ein Vergleich von Meßwerten möglich ist. Im Hinblick auf die Repräsentanz des Analysenergebnisses ist zu beachten, daß auch die genaueste Messung im Labor sinnlos ist, wenn die Fehler bei der Probenahme und/oder der Probenaufbereitung wesentlich größer sind als der Fehler bei der Messung.

#### **Probenahme:**

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von Proben:

- unbehandelte Originalprobe
- modifizierte Gasprobe

Üblicherweise werden Gaskonzentrationsmessungen an unbehandelten Originalproben durchgeführt. Dabei besteht die Möglichkeit der direkten Koppelung des Meßgerätes an die Gasquelle oder das Abfüllen einer Probe in ein Probenbehältnis und das Verbringen in ein Labor.

Als Probenbehältnisse eignen sich:

aluminiumkaschierte Polyethylenbeutel

- Beutel aus Tedlar
- Glasgefäße (1 - 20 l Inhalt)
- Edelstahlbehälter
- gasdichte Glasspritzen 5 - 10 ml Volumen
- Glasampullen.

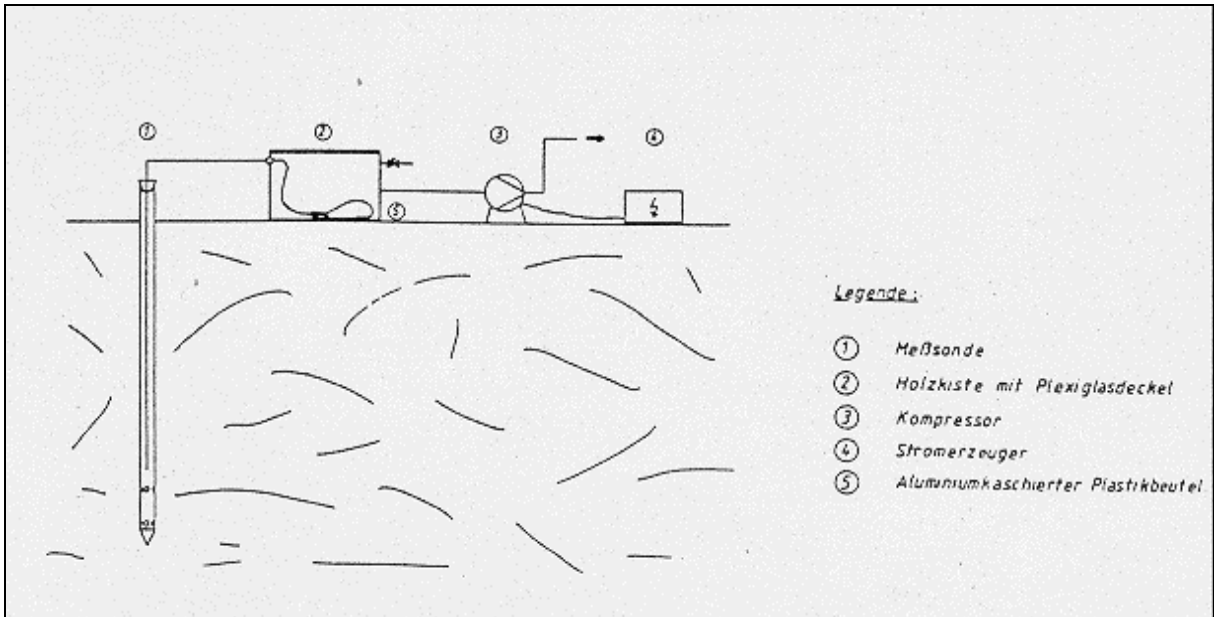
Bei Probenbehältnissen ist entscheidend, daß durch entsprechend gewählte Materialien Wandeffekte so gering wie möglich gehalten werden. Verschiedene Materialien, aber auch verschiedene Gase verhalten sich ganz unterschiedlich. Das Wesentliche in bezug auf Probenahme und Probenbehältnisse ist im Kapitel Deponiegasspurenstoffe, Kap. 3.2.1.3 bzw. in JANSON, 1988 dargestellt.

Das Probenahmenvolumen soll so groß sein, daß Mehrfachanalysen vorgenommen werden können. Für Gasproben werden i.a.R. Probenbehältnisse, in denen zwischen 0,5 und 2,5 l gespeichert werden können, bevorzugt. Für bestimmte Analysemethoden sind größere Probenmengen erforderlich (z.B. 20 l bei der photometrische Bestimmung von H<sub>2</sub>S nach Absorption an Zinkacetat).

Bei der Probengewinnung ist vor allem bei Spurenstoffbestimmungen darauf zu achten, daß die Probe durch das erforderliche Schlauch- bzw. Pumpenmaterial nicht verändert (Adsorptionseffekt) oder verunreinigt wird. Zweckmäßigerweise sollten neue bzw. gespülte Teflonschläuche zur Anwendung kommen.

Können die Proben mit Überdruck gewonnen werden, ist lediglich darauf zu achten, daß bei Beuteln das Totvolumen möglichst gering ist bzw. bei spülbaren Behältnissen das Volumen wenigstens siebenmal ausgetauscht wird.

Sofern die Probe angesaugt werden muß, ist bei spülbaren Behältnissen die Pumpe auf der der Entnahmestelle abgewandten Seite anzuordnen, so daß die Probe nicht mit der Pumpe in Berührung kommt. Bei Beuteln hat sich folgende Methode bewährt (Abbildung 18): der Beutel wird in einen Kasten eingebracht, der evakuiert wird. Dabei bläht sich der Beutel auf und saugt die Probe an (Methode der indirekten Absaugung).



**Abb. 18 Probenentnahme durch indirekte Absaugung**

Bei Nachweis von Deponiegasspurenstoffen kann die Entnahme einer modifizierten **Gasprobe** sinnvoll sein. Hierbei werden die zu messenden Stoffe an einem Adsorbens angereichert und im Labor durch Lösungsmittel oder Wärme desorbiert, je nach den zu analysierenden Stoffen bzw. Stoffgruppen (KANITZ, 1985).

Übliche Verfahren sind:

- Anreicherung an Aktivkohle
- Anreicherung an Tenax
- Anreicherung an XAD-Harzen

Die genaue Vorgehensweise bei der Entnahme von modifizierten Gasproben ist in den "Verfahrensempfehlungen für die Probenahme und Analytik von Bodenluft, Landesanstalt für Umweltschutz Baden - Württemberg, 1990" dargestellt.

In den folgenden Tabellen sind die Meßverfahren für die Gasanalyse zusammengestellt. Es sind die gebräuchlichen Verfahren für die Hauptkomponenten berücksichtigt.

**Meßverfahren für die Gasanalyse: Methannachweis**

Art	Meßprinzip	Einsatzgebiet	Anwendungskriterien
Meßröhrchen	Gasspezifische Indikatorsubstanz	orientierende Untersuchung mit ja/nein - Option oder halbquantitativ	Abstimmung auf Probenahmenvolumen erforderlich; Querempfindlichkeit beachten (org. KW-Verbindungen)
Gasspürgerät mit FID	katalytische Verbrennung	Flächenkartierung	siehe Kapitel 3.2.2.2.
Methanometer	katalytische Verbrennung	Raumluftmessung Arbeitsplatzüberwachung	Querempfindlichkeit beachten (brennbare Gase wie Propan, Butan, H <sub>2</sub> )
IR - Geräte	Infrarotabsorption	Vor-Ort-Messung quantitative Untersuchungen	Probenahmemenge auf Sondiertechnik abstimmen
Gaschromatograph	Gaschromatographisches Verfahren mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor, Flammenionisationsdetektor	i.d.R. Laborverfahren, aber auch Vor-Ort-Messung; Quantitative Gasbestimmung	Probenahmemenge auf Sondiertechnik abstimmen

**Meßverfahren für die Gasanalyse: Kohlendioxidnachweis**

Art	Meßprinzip	Einsatzgebiet	Anwendungskriterien
Meßröhrchen	Gasspezifische Indikatorsubstanz	Arbeitsplatzüberwachung auch quantitativ	Abstimmung auf Probenahmenvolumen erforderlich; Querempfindlichkeit beachten (z.B. H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> )
Gasanalysator	Infrarotabsorption	quantitativer CO <sub>2</sub> - Nachweis	Probenahmemenge auf Sondiertechnik abstimmen
Gasanalysator	Orsat - Verfahren	quantitativer CO <sub>2</sub> - Nachweis diskontinuierliche Messung	
Gaschromatograph	Gaschromatographisches Verfahren mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor	quantitativer CO <sub>2</sub> - Nachweis	Probenahmemenge auf Sondiertechnik abstimmen

**Meßverfahren für die Gasanalyse: Sauerstoffnachweis**

<b>Art</b>	<b>Meßprinzip</b>	<b>Einsatzgebiet</b>	<b>Anwendungskriterien</b>
Meßröhrchen	gasspezifische Indikatorsubstanz	Arbeitsplatzüberwachung	Abstimmung auf Probenahmevermögen erforderlich; Querempfindlichkeit beachten (evtl. Halogenkohlenwasserstoffe)
Sauerstoffanalysator	Paramagnetismus	kontinuierliche Arbeitsplatzüberwachung, quantitative O <sub>2</sub> -Bestimmung	Probenahmemenge auf Sondiertechnik abstimmen
kombinierte Geräte	wie Methanometer mit zusätzlicher elektrochemischer Zelle zur Sauerstoffbestimmung	Arbeitsplatzüberwachung Raumluftmessung	Querempfindlichkeit beachten (wie Methanometer)
Sauerstoffanalysator	Orsat - Verfahren	diskontinuierliche Messung	
Gaschromatograph	Gaschromatographisches Verfahren mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor	quantitative O <sub>2</sub> -Bestimmung	Probenahmemenge auf Sondiertechnik abstimmen

**Meßverfahren für die Gasanalyse: Stickstoffnachweis**

<b>Art</b>	<b>Meßprinzip</b>	<b>Einsatzgebiet</b>	<b>Anwendungskriterien</b>
Gaschromatograph	Gaschromatographisches Verfahren mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor	quantitative N <sub>2</sub> -Bestimmung	Probenahmemenge auf Sondiertechnik abstimmen

## 4. Handlungsanweisung für den Anwender

Das Kapitel **Handlungsanweisung** enthält neben Empfehlungen zur stufenweisen Erkundung auch bewertungsrelevante Fragestellungen, die von der Landesanstalt für Umweltschutz eingebracht wurden.

### 4.1. Erkundungsstrategie

Die bisherige **Erkundungsstrategie** gemäß Altlastenhandbuch, die nach der historischen Erkundung zuerst eine orientierende Erkundung  $E_{1-2}$ , dann die nähere Erkundung  $E_{2-3}$  vorsieht, wird für die Erkundung des Schutzgutes Luft wie folgt modifiziert:

Für den Luftpfad werden die technischen Erkundungsschritte  $E_{1-2}$  und  $E_{2-3}$  zu einem Erkundungsschritt  $E_{1-3}$  zusammengefaßt (Abbildung 19). Ziel ist es, den Luftpfad umfassend zu erkunden, um eine Gefährdung des Menschen ausreichend beurteilen zu können. Diese Zielsetzung erfordert es, die technische Erkundung in einem Schritt durchzuführen, um den Betroffenen schnell und umfassend Auskunft geben zu können.

Mit den Daten aus der historischen Erkundung ("Typisierung") ist es nun möglich, eine altlastverdächtige Fläche für das Schutzgut Luft bereits vor der technischen Erkundung zu beurteilen.

Folgende generelle Vorgehensweise wird empfohlen (Abbildung 19):

1. "Typisierung" durchführen
2. Prüfen, ob Phase VI vorliegt; wenn ja, Einstufung nach A = Archivieren bzw. B = Belassen auf Wiedervorlage vornehmen. Damit wird die Erkundung für den Luftpfad als beendet betrachtet. In Zweifelsfällen sollte bei der "Typisierung" die Phase V angesetzt werden.
3. Die "Typisierung" hat eine Phase zwischen I und V ergeben:  
Prüfen, ob Schutzgut Luft (Raumluft/Atmosphäre) aufgrund der durch "Typisierung" ermittelten Phase (Stoffgefährlichkeit) betroffen ist. Wenn nein, wird die altlastverdächtige Fläche für das Schutzgut Luft auf B = Belassen eingestuft. In Zweifelsfällen sollte die Entscheidung in der Bewertungskommission herbeigeführt werden.
4. Die Bewertung für das Schutzgut Luft ergab Handlungsbedarf ( $E_{1-3}$ ):  
je nach ermittelter Phase wird mit der entsprechenden Erkundungsmethode (Kapitel 4.2) die Phase überprüft. Aufgrund der gemessenen Konzentrationen wird die Phase ggf. korrigiert.
5. Prüfen, ob Schutzgut Luft betroffen ist. Wenn ja, werden die schutzgutbezogenen Erkundungsschritte eingeleitet. Ergibt die Prüfung nein, wird die Erkundung abgebrochen.
6. Bewertung auf BN 3 durch die Bewertungskommission.

**Schutzgut Raumluft** ist betroffen, wenn sich z. B. Gebäude auf bzw. in der Nähe der altlastverdächtigen Fläche befinden.

**Schutzgut Atmosphäre** ist betroffen, wenn z. B. die altlastverdächtige Fläche als Kleingartenanlage, Grill-, Zelt- oder Sportplatz genutzt wird.

#### *Historische Erkundung (E<sub>0-1</sub>)*

**Maßnahmen:** Auswertung von deponiegasrelevanten Daten aus der E<sub>0-1</sub>  
(Alter, Höhe, Größe, Einbauart und Zusammensetzung der Deponie)  
Durchführung der "Typisierung" mit Plausibilitätskontrolle  
Zuordnung zu einer Phase  
Feststellung der Gefährdung des betroffenen Schutzgutes Luft  
(Atmosphäre/Raumluft)  
und ggf. Sofortmaßnahmen

**Ziel:** Stoffgefährlichkeit (r<sub>0</sub>)  
Gefährdungsabschätzung (m<sub>I</sub> - m<sub>IV</sub>)  
Handlungsbedarf (A, B, E<sub>1-3</sub>) ermitteln

#### *Technische Erkundung (E<sub>1-3</sub>)*

**Erster Schritt:** Stoffgefährlichkeit (Phase) überprüfen

**Maßnahmen:** Abhängig von Ergebnis E<sub>0-1</sub> (FID, Gasmeßstellen, Absaugversuch)

**Ziel:** Entscheidung, ob Schutzgut betroffen ---> zweiter Schritt

**Zweiter Schritt:** Maßnahmen zur Durchführung der Gefährdungsabschätzung für das Schutzgut Luft

**Maßnahmen:** Schutzgutbezogene Maßnahmen (z. B. Raumluftmessungen)

**Ziel:** Abschließende Gefährdungsabschätzung  
Handlungsbedarf (B, C oder E<sub>3-4</sub>) ermitteln

#### *Eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/ Sanierungsvorplanung (E<sub>3-4</sub>)*

**Maßnahmen:** Gegenüberstellung der Sicherungs- und Sanierungsalternativen in Abhängigkeit von den Sanierungszielen, Kosten- Wirksamkeits- Abschätzung

**Ziel:** Sanierungsempfehlung  
Herbeiführen der Sanierungsentscheidung

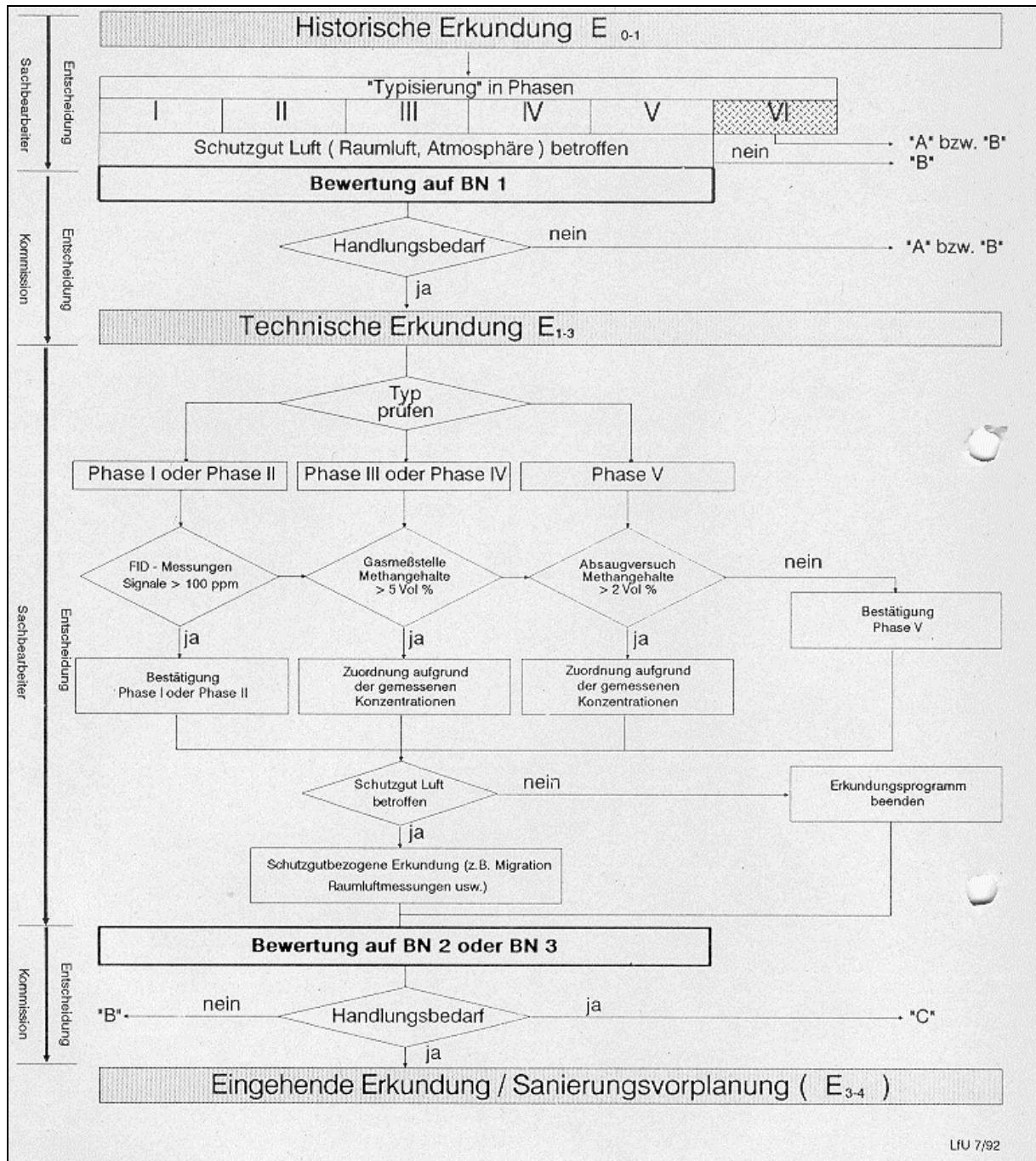


Abb. 19 Ablaufschema der Erkundung des Deponiegaspfades

#### 4.1.1. Stoffgefährlichkeit $r_0$ nach historischer Erkundung

Die aus Abbildung 20 abgeleitete **Stoffgefährlichkeit  $r_0$**  entspricht dem Gefährdungspotential von Gas ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ), das in einer Altablagerung noch vorhanden ist. Die maximale Stoffgefährlichkeit für Deponiegas ohne Spurenstoffe leitet sich aus frischem Hausmüll ab. Diese entspricht nach heutiger Definition  $r_0 = 3,0$ .

Bei Altablagerungen mit Anteilen an Gewerbe- bzw. Industrieabfällen ist ein Zuschlag für die Stoffgefährlichkeit aufzuschlagen. Die Höhe des Zuschlags richtet sich nach der Zusammen-



setzung der abgelagerten Stoffe. Die folgenden Prozentangaben beziehen sich auf Industrie- bzw. Gewerbemüll, der folgendes Kriterium erfüllt:

- enthält gasförmige, toxische Spurenstoffe.

Je ein Volumenprozent Industrie-/Gewerbemüll der Altablagerung erhöht den  $r_0$ -Wert um 0,1.

Zum Beispiel:

Müllanteile	70 % Hausmüll	6 % Industriegemüll (mit gasförmigen, toxischen Spurenstoffen)	
	24 % Erdaushub		
	Bauschutt		
$r_0$	3,0	+ 0,6	= 3,6

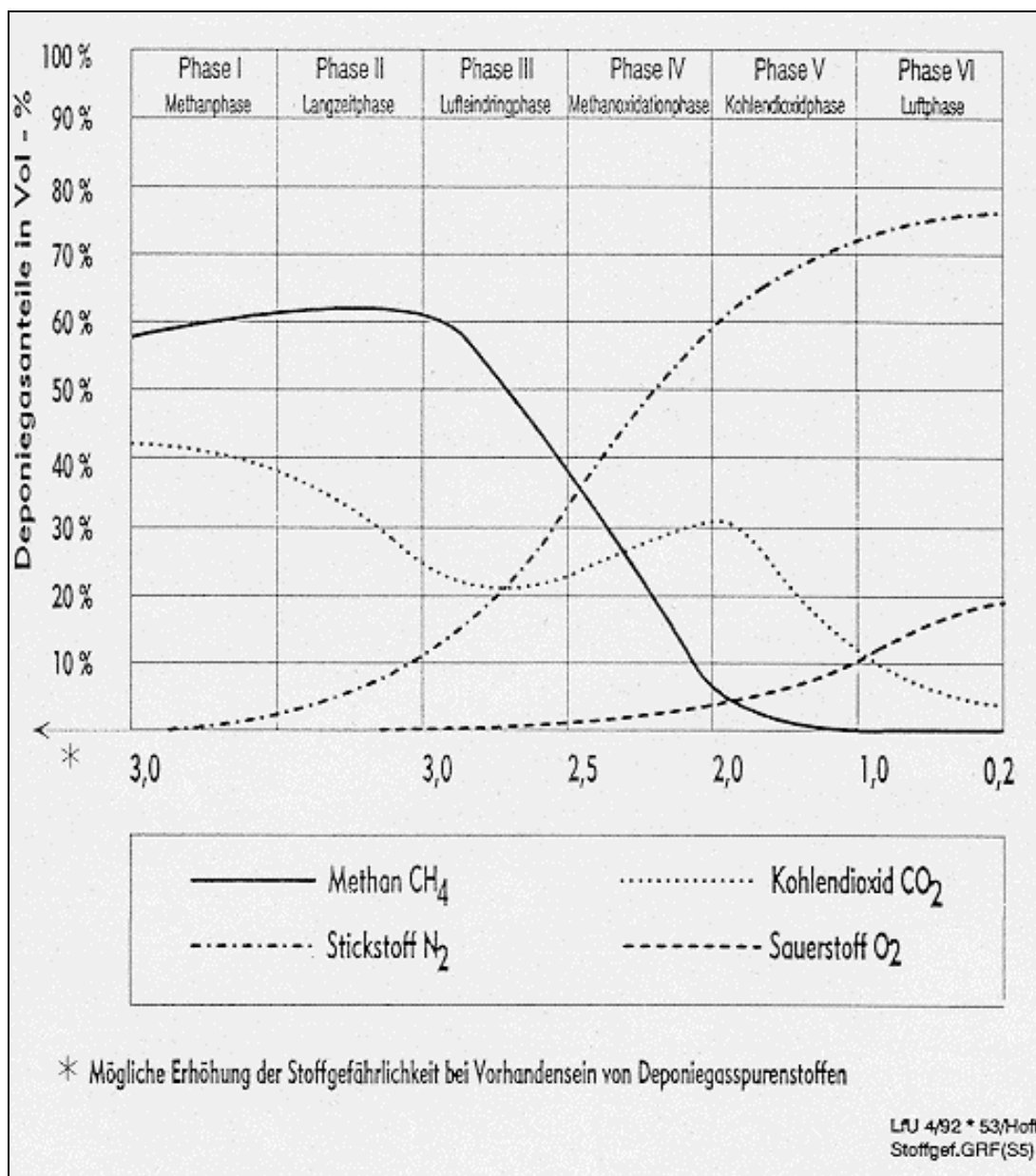


Abb. 20 Stoffgefährlichkeit  $r_0$  in Abhängigkeit von der Phase bzw. vom Konzentrationsverhältnis des Deponiegases

## 4.1.2. Stoffgefährlichkeit $r_0$ nach technischer Erkundung

Aufgrund der Meßergebnisse aus der technischen Erkundung wird die Phase aus Abbildung 20 überprüft und der  $r_0$ -Wert ggf. korrigiert. Sind Meßwerte von Spurenstoffkonzentrationen vorhanden, kann der Zuschlag mit Hilfe der nachfolgenden Stoffliste (Tabelle 10) ermittelt werden. Die Vorgehensweise für die Bestimmung des Zuschlags ist:

1. Die Meßergebnisse aus den verschiedenen Gasmeßstellen werden in drei Gruppen unterteilt. Eine Gruppe sollte ca. 1/3 der Meßpunkte beinhalten.
2. Für jede Gruppe wird jetzt der maßgebende Spurenstoff ermittelt; dies ist derjenige Spurenstoff, der aus Tabelle 10 den größten Zuschlag ergibt.
3. Die Zuschläge aus den einzelnen Gruppen werden zu einem Gesamtzuschlag addiert.

Ergänzung zu dem Beispiel aus Kapitel 4.1.1.:

Die Meßergebnisse zur Überprüfung der Phase ergab, daß die Deponie sich in Phase II befindet ( $\text{CH}_4$  ca. 55 Vol%,  $\text{CO}_2$  ca. 40 Vol%). Die Gruppeneinteilung ergab eine Gruppe mit Trichlorethen-Konzentrationen von ca.  $120 \text{ mg/m}^3$  und die Gruppen 2 u. 3 mit Tetrachlorethen-Konzentrationen von ca.  $100 \text{ mg/m}^3$  als maßgebender Spurenstoff.

Stoffkonzentration	55 Vol% $\text{CH}_4$ 40 Vol% $\text{CO}_2$	Trichlorethen ( $120 \text{ mg/m}^3$ ) Tetrachlorethen ( $100 \text{ mg/m}^3$ )	1 x 0,2 2 x 0,1	
$r_0$	3,0		+ 0,4	=3,4

Nach Festlegung des  $r_0$  - Wertes werden die ortsbezogenen Faktoren  $m_1 - m_{IV}$  bestimmt (Anlage 11).

Stoff	Konzentrationsbereich mg/m <sup>3</sup>			Zuschlag
Dichlormethan	100	< x <	150	+0,1
	150	< x <	250	+0,2
	250	< x <	350	+0,3
	350	< x		+0,5
Trichlormethan	5	< x <	15	+0,1
	15	< x <	30	+0,2
	30	< x <	50	+0,3
	50	< x		+0,5
1,1-Dichlorethan	1	< x <	3	+0,1
	3	< x <	5	+0,2
	5	< x <	8	+0,3
	8	< x		+0,5
Trichlorethen	50	< x <	100	+0,1
	100	< x <	200	+0,2
	200	< x <	250	+0,3
	250	< x		+0,5
Tetrachlorethen	100	< x <	150	+0,1
	150	< x <	250	+0,2
	250	< x <	350	+0,3
	350	< x		+0,5
Trichlorfluorethan	3000	< x <	4000	+0,1
	4000	< x <	5000	+0,2
	5000	< x <	6000	+0,3
	6000	< x		+0,5
Dichlorfluormethan	5	< x <	15	+0,1
	15	< x <	30	+0,2
	30	< x <	50	+0,3
	50	< x		+0,5
Trichlortri- fluormethan	1500	< x <	2500	+0,1
	2500	< x <	3500	+0,2
	3500	< x <	4000	+0,3
	4000	< x		+0,5
Dichlor- tetrafluorethan	1500	< x <	2500	+0,1
	2500	< x <	3500	+0,2
	3500	< x <	4000	+0,3
	4000	< x		+0,5
Tetrachlormethan	5	< x <	15	+0,1
	15	< x <	30	+0,2
	30	< x <	50	+0,3
	50	< x		+0,5
1,2 - Dichlorethen (cis oder trans)	200	< x <	400	+0,1
	400	< x <	600	+0,2
	600	< x <	800	+0,3
	800	< x		+0,5
Vinylchlorid	1	< x <	2	+0,1
	2	< x <	3	+0,2
	3	< x <	5	+0,3
	5	< x		+0,5
1,1,1-Trichlorethan	400	< x <	600	+0,1
	600	< x <	800	+0,2
	800	< x <	1000	+0,3
	1000	< x		+0,5
Schwefelwasserstoff	1	< x <	5	+0,1
	5	< x <	10	+0,2
	10	< x <	15	+0,3
	15	< x		+0,5
Mercaptane	0,1	< x <	0,3	+0,1
	0,3	< x <	0,6	+0,2
	0,6	< x <	1,0	+0,3
	1,0	< x		+0,5

**Tab. 10: Zuschläge für Spurenstoffe zur Ermittlung der Stoffgefährlichkeit  $r_0$**

### 4.1.3. Sofortmaßnahmen

Da Deponiegas eine akute Gefährdung von Personen darstellen kann, ist es in bestimmten Fällen angezeigt, **Sofortmaßnahmen** einzuleiten.

Art und Umfang der Sofortmaßnahmen sind abhängig von dem betrachteten Schutzgut (Raumluft/Atmosphäre).

Es ist bei der Erkundung fortlaufend zu prüfen, ob Sofortmaßnahmen zur Risikominderung zu treffen sind.

Bei allen Erkundungsmaßnahmen sind die entsprechenden Arbeitsschutzvorschriften zu beachten.

Nutzungsart	Schutzgut	Sofortmaßnahmen
Grillplatz/ Sportplatz/ Spielplatz/ Zeltplatz usw.	Atmosphäre	Unterrichtung der Nutzer (Hinweisschilder)/ Betretungsverbot/ Nutzungseinschränkungen
Wohnbebauung	Raumluft	Betretungsverbot/ Nutzungseinschränkungen/ Sicherungsmaßnahmen (Raumbelüftung, Gaswarneinrichtungen, Abdichten)
Sonstige Bauwerke	Atmosphäre/ Raumluft	wie Wohnbebauung

**Tab. 11 Beispiele für Sofortmaßnahmen bei der Erkundung des Schutzgutes Luft**

### 4.1.4. Sofortmaßnahmen aufgrund von Meßergebnissen

Werden bei Messungen Konzentrationen in folgender Größenordnung gefunden:

außerhalb und direkt am Gebäude

- Methan 20 - 40 Vol %
- Spurensstoffe > 0,5 x MAK-Wert

innerhalb von Gebäuden

- Methan > 0,5 Vol %
- Spurensstoffe > 0,1 x MAK-Wert

sind unabhängig von den Bewertungsziffern **Sofortmaßnahmen** zu veranlassen.

## 4.2. Vorgehensweise bei der Erkundung

### 4.2.1. Historische Erkundung ( $E_{0-1}$ )

Die hier angeführten Maßnahmen beziehen sich auf die Erkundung des Einzelstandortes. Die allgemeine Vorgehensweise bei der historischen Erkundung ist im Altlastenhandbuch, Teil I, dokumentiert (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG 1988).

Mit den Daten der **historischen Erkundung** ist die "Typisierung" durchzuführen. Die Vorgehensweise für die "Typisierung" ist im Kapitel 3.1, geschildert.

Für die "Typisierung" sind folgende 5 Merkmale heranzuziehen

- Alter
- Größe
- Höhe
- Zusammensetzung und
- Einbau

Nach der "Typisierung" ist festzustellen, ob das Schutzgut Luft (Atmosphäre/Raumluft) betroffen ist (Kapitel 4.1.).

Ergibt sich bei dieser Prüfung Handlungsbedarf, wird wie folgt beschrieben verfahren, ansonsten wird an dieser Stelle abgebrochen:

Aus Abbildung 20 ist aufgrund der durch die "Typisierung" festgestellten Phase die Stoffgefährlichkeit  $r_0$  zu ermitteln. Bei relevanten Industrie- bzw. Gewerbemüllanteilen ist  $r_0$  gemäß Kapitel 4.1.1. zu erhöhen.

Mit den Informationen über den Ist-Zustand der Altablagerung ist eine Plausibilitätskontrolle durchzuführen:

1. Treten bei Phase IV - VI (Ergebnis "Typisierung") **Vegetationsbeeinträchtigungen** durch Gasaustritte auf, wird die Zuordnung zu Phase III vorgenommen. Dies ist im Bericht zu vermerken. Ursachen dieser Diskrepanz können in der Datenqualität bzw. in der Besonderheit der Deponie liegen.
2. **Geruchsbelästigungen** durch eine Altablagerung lassen darauf schließen, daß nachträglich eine Müllablagerung (wild) erfolgte. Hier wird empfohlen, die historische Erkundung zu überprüfen. Die Phasenzuordnung ist gegebenenfalls zu überprüfen.
3. **Vorhandene Erkenntnisse**, die auf Deponiegas schließen lassen, die z.B. bei früheren durchgeführten Baumaßnahmen gewonnen wurden, sind mit dem Ergebnis der "Typisierung" zu vergleichen. Im günstigsten Fall liegen Ergebnisse von Deponiegasmessungen vor und sind in die "Typisierung" miteinzubringen.
4. **Besondere Merkmale**, wie z.B. Schwarzbelag oder dichte Oberflächenabdeckung, können den natürlichen Austausch- bzw. Mineralisierungsprozess behindern. Aufgrund dessen ist eine andere Phase zu erwarten, als sich durch die "Typisierung" ergeben hat.

## 4.2.2. Technische Erkundung (E<sub>1,3</sub>)

Die **technische Erkundung** des Luftpfades führt vom Beweismiveau 1 nach 3 mit folgender Zielsetzung:

- Schritt 1 Abschätzung der Stoffgefährlichkeit durch Bestätigung bzw. Korrektur der Zuordnung zu einer Phase  
Schritt 2 Gefährdungsabschätzung Schutzgut Luft

Als Grundlage für die Untersuchungsstrategie in dieser Erkundungsstufe dient die historische Erkundung. Abhängig von der Phase sind spezielle Meßverfahren und Geräteinsatzstrategien anzuwenden, die

- besonders aussagekräftig in Bezug auf die Deponiegassituation sind und
- der Erkundungsstufe entsprechend mit angepaßtem technischen Aufwand durchgeführt werden können.

Deponiegasspurenstoffe werden je nach vermuteten Inhaltsstoffen in das Analysenprogramm mitaufgenommen.

Es wird davon ausgegangen, daß eventuell notwendige Sofortmaßnahmen bereits durchgeführt wurden, bzw. es ist bei der Erkundung fortlaufend zu prüfen, ob Sofortmaßnahmen zur Risikominderung zu treffen sind.

Zu Schritt 1: Abschätzung der Stoffgefährlichkeit =  $r_0$  durch Bestätigung bzw. Korrektur der Zuordnung zu einer Phase

a) Historische Erkundung ergibt Phase I oder II

Aufgrund der hier zu erwartenden Emissionen über die Ablagerungsfläche ist als Untersuchungsmethode für oben angeführte Fragestellung eine Begehung mit dem **Gasspürgerät (FID)** sinnvoll.

Ergeben sich hier FID-Meßwerte

$$> 100 \text{ ppm} = 0,015 \text{ Vol \% CH}_4$$

an mindestens 10 Prozent der Meßpunkte auf der Ablagerungsfläche (25 zufällig ausgewählte Punkte pro Hektar), so ist dies eine Bestätigung von Phase I und II.

Werden bei der Begehung Meßwerte  $> 100$  ppm an weniger als 10 Prozent der Meßpunkte festgestellt, so ist wie bei b ("Typisierung" ergibt Phase III und IV) zu verfahren.

b) Historische Erkundung ergibt Phase III oder IV

Zur Überprüfung der Stoffgefährlichkeit ( $r_0$ ) werden drei **tiefendifferenzierte Gasmeßstellen** auf der Altablagerung eingerichtet und auf die Komponenten CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> beprobt. Die genaue Anzahl der Gasmeßstellen richtet sich nach der Fläche der Altablagerung:

Bis 2 Hektar sind drei tiefendifferenzierte Gasmeßstellen und je angefangenen weiteren Hektar ist eine weitere tiefendifferenzierte Gasmeßstelle erforderlich.

Die Tiefe der einzelnen Entnahmehorizonte ist abhängig von der Oberflächenabdeckung. Durch Erstellen von Schichtenverzeichnissen kann eine spätere Kontrolle durchgeführt werden, ob Hausmüll angetroffen wurde.

Bei 1 m mächtiger Oberflächenabdeckung werden Entnahmehorizonte bei

1,5 m, 3 m und 4,5 m empfohlen (siehe Kapitel 3.2.1.1.).

Werden an einem oder mehreren Punkten folgende Konzentrationsverhältnisse der Deponiegashauptkomponenten gemessen

CH <sub>4</sub>	5	< x <	50 Vol %
CO <sub>2</sub>	20	< x <	30 Vol %
N <sub>2</sub>	10	< x <	60 Vol %

so ist dies eine Bestätigung von Phase III und IV.

Bei abweichenden Konzentrationverhältnissen ist die Zuordnung der Phase gemäß Abbildung 20 neu festzulegen und ggf. das Meßverfahren entsprechend anzupassen.

c) Historische Erkundung ergibt Phase V

Zur Überprüfung von  $r_0$  wird ein **Absaugversuch** durchgeführt. Die Durchführung ist im Kapitel 3.2.1.2 beschrieben. Ziel ist die Beprobung des Porenraumes der Altablagerung und der Nachweis der Hauptkomponenten (CH<sub>4</sub> und eventuell CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>).

Die Konzentrationsverhältnisse sind entsprechend Abbildung 6 bzw. Abbildung 20 zu überprüfen und ggf. die Zuordnung zu einer Phase neu festzulegen.

Als nächste Maßnahme wird geprüft, ob eine Gefährdung des Schutzgutes Luft aufgrund der Meßergebnisse und Zuordnung der Phase vorhanden ist. Wenn ja, wird Schritt zwei ausgeführt. Wenn nein, wird die Erkundung abgebrochen.

Zu Schritt 2: Gefährdungsabschätzung Schutzgut Luft

Aufgrund von Schritt 1 ergibt sich ein Handlungsbedarf zur Erkundung der Atmosphäre/Raumluft (Phase I-V)

Das Schutzgut Luft umfaßt folgende Bereiche:

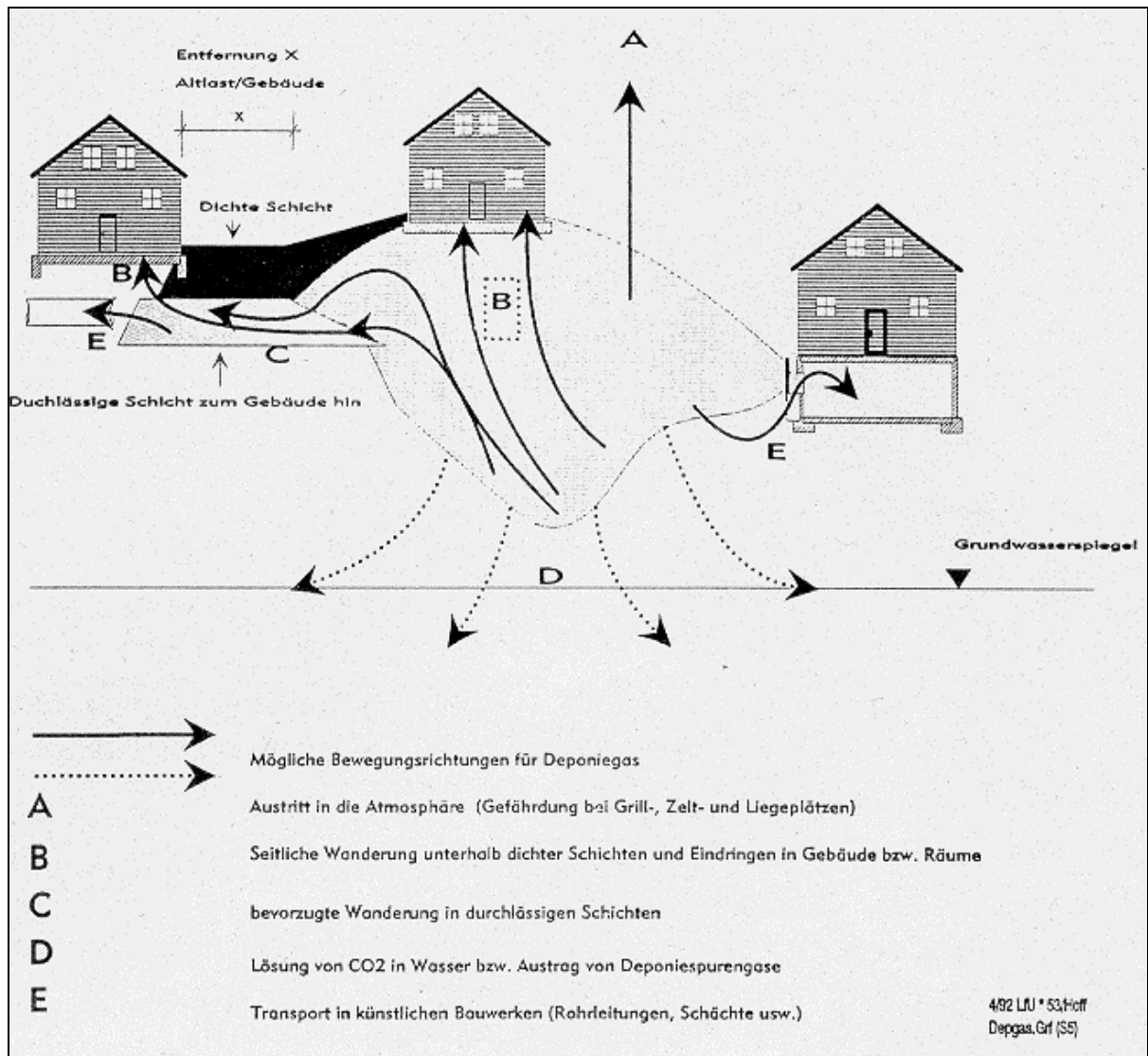
- freie Atmosphäre (Grill-, Spielplätze, Kleingarten- und Sportanlagen)
- Raumluft (Gebäude mit begehbaren Räumen, Schächte)

Eine schematische Darstellung dieser durch Deponiegas gefährdeten Bereiche zeigt Abbildung 21.

Aufgrund der historischen Erkundung ist zu prüfen, welche Bereiche betroffen sein können. Diese Erkenntnisse führen zu einem Erkundungsprogramm, das schutzgutbezogen und auf die

Phasen abgestimmt ist. Die einzelnen Untersuchungsmethoden sind in Abhängigkeit von der Phase und dem Bereich (Atmosphäre/Raumluft) festzulegen. Dies kann nur für den jeweiligen Einzelfall geschehen (siehe Fallbeispiele, Kapitel 4.3).

Die Durchführung, Bewertung und Anwendung der einzelnen Methoden ist in Kapitel 3.2. Untersuchungsmethoden dargestellt.



**Abb. 21 Mögliche Ausbreitungswege für Deponiegas zum Schutzgut Atmosphäre, Raumluft und Grundwasser bei unterschiedlicher Gründungsart und Lage zur Altlast**

Eine wesentliche Aufgabe besteht in der kritischen Beurteilung der Meßverfahren und Meßergebnisse, d. h. die Meßergebnisse auf Plausibilität, Sensitivität und Qualität hin zu überprüfen und evtl. weitere Messungen anzuregen.

Im Kapitel "Untersuchungsmethoden" wird z. B. an verschiedenen Stellen darauf hingewiesen, daß Gaskonzentrations- und Gasemissionsmessungen von äußeren Faktoren beeinflusst werden (Luftdruck, Feuchtigkeitsgehalt der Oberflächenabdeckung u.ä.).



Außerdem muß überprüft werden, ob die Dokumentation der Randbedingungen bei den einzelnen Maßnahmen ausreichend und nachvollziehbar ist.

Nach Auswertung der Ergebnisse sollen verschiedene Fragestellungen beantwortet werden können:

- Welche Phase liegt vor ?
- Besteht für die Schutzgüter Atmosphäre/Raumluft eine unmittelbare Gefährdung für die derzeitige Nutzung ?
- Sind Nutzungseinschränkungen notwendig ?
- Ist eine Gasmigration zum Schutzgut vorhanden ?

Hierzu kann es notwendig sein, zusätzlich zu den vorliegenden Meßergebnissen eine Gasprognose zu erstellen, um den Gashaushalt und die daraus resultierende Gefährdung bewerten zu können.

Nach der Bewertung auf BN 1 ist vom Gutachter in Abstimmung mit den Fachbehörden ein Untersuchungsprogramm zu erstellen.

Für die Beurteilung der aus der technischen Erkundung resultierenden Meßergebnisse können als Orientierung bekannte Richt- und Grenzwerte herangezogen werden (TA Luft, WHO- Air Quality Guidelines für Europe, MIK-, TRK- und MAK-Werte) (Anlage 10).

Die Beurteilung des Gaspotentials bzw. der möglichen aktuellen Gasproduktion ist schwierig. Anhaltswerte sind im theoretischen Teil (Kapitel 2) bzw. in der Informationsschrift LAGA 1983 wiedergegeben.

### **4.2.3. Eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/ Sanierungsvorplanung (E<sub>3-4</sub>)**

Die **eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/ Sanierungsvorplanung (E<sub>3-4</sub>)** wird durchgeführt, falls auf Beweisniveau BN 3 ein entsprechender Handlungsbedarf festgestellt wurde. Sie hat die Aufgabe, die Sanierungsziele festzulegen, um darauf hin die in Frage kommenden Sanierungsalternativen (Sicherungs- und Dekontaminationsverfahren) zu erarbeiten, sie nach monetären und nicht-monetären Bewertungskriterien den Sanierungszielen gegenüberzustellen und damit auf Beweisniveau BN 4 die Grundlagen für eine Sanierungsentscheidung bereitzustellen.

Auf der Grundlage des Ergebnisses der eingehenden Erkundung/ Sanierungsvorplanung erfolgt die Sanierungsentscheidung auf BN 4. Falls eine fachtechnische Kontrolle nicht ausreicht, schließt sich die Ausführungsplanung und Durchführung der Sanierung an.

## 4.3. Fallbeispiele

Anhand mehrerer Beispiele soll gezeigt werden, wie die Vorgehensweise zur Durchführung von Deponiegasuntersuchungen und die Bewertung aussehen kann.

### 4.3.1. Beispiel einer Altablagerung ohne Bebauung, keine Nutzungsänderung vorgesehen

*Historische Erkundung (E<sub>0.1</sub>)*

Die Altablagerung befindet sich in einem ehemaligen Kalktuffsteinbruch und wurde als "Verfüllplatz" einer Gemeinde in den 60er und Anfang der 70er Jahre betrieben. Der Abschluß der Verfüllung fiel in das Jahr 1972.

Aufgrund der Kartenauswertung und Zeugenberichten wird eine maximale Müllmenge von 30 000 m<sup>3</sup> errechnet.

Die Schütthöhe beträgt maximal 2 m, wobei durch Zeugen und entsprechende topographische Karten ein Bereich im Zentrum der Altablagerung mit dieser maximalen Schütthöhe identifiziert werden kann.

Die Angaben über die Zusammensetzung der abgelagerten Stoffe sind ungenau; es wird aber deutlich, daß neben erheblichen Mengen Erdaushub und Bauschutt auch mehrere Jahre lang Hausmüll der Gemeinde verfüllt wurde.

Zeugen bestätigen, daß es am Verfüllplatz oft tagelang gebrannt hat.

Anhand dieser Informationen läßt sich die "Typisierung" durchführen:

- Altersklasse 4
- Größenklasse 2
- Höhenklasse 2
- Zusammensetzung 2
- Einbau 2

Aus dieser Merkmalskombination ergibt sich eine Zuordnung aufgrund der "Typisierung" zu Phase V.

Die Plausibilitätskontrolle ergibt keine zusätzlichen Hinweise auf die vorgenommene Einstufung.

Die Prüfung, ob das Schutzgut Luft (Raumluft bzw. Atmosphäre) betroffen ist, ergab keinen Handlungsbedarf. Die Altablagerung wird dem Handlungsbedarf "B" zugeordnet.

### 4.3.2. Beispiel einer Altablagerung mit Randbebauung

#### *Historische Erkundung ( $E_{0-1}$ )*

Die Altablagerung befindet sich in einer ehemaligen Kiesgrube. Sie wurde von 1969 bis 1976 auf einer Fläche von 4 ha betrieben und mit Hausmüll und geringem Anteil von Bauschutt verfüllt.

Die maximale Schütthöhe beträgt 9 m.

Der Abbau erfolgte bis das Grundwasser erreicht wurde.

Als Menge der abgelagerten Stoffe werden aus der Fläche und der Schütthöhe 300 000 m<sup>3</sup> errechnet.

Vom Betreiber wird angegeben, daß der Einbau und die Verdichtung mit einem schweren Arbeitsgerät erfolgte. Eine weitere Vorbehandlung des Abfalls wurde nicht durchgeführt.

Die Deponie wurde mit bindigem Material (ca. 3 m stark) abgedeckt.

Das Einzugsgebiet der Altablagerung ist wie folgt zu umschreiben: Gemeinde mit wenig kritischem Gewerbe und Industriebesatz. Der Anteil an kritischem Industriemüll beträgt ca. 3% und stammt aus der Metallverarbeitung (Metalloberflächenbehandlung mit CKW).

Die Gebäude am Rande der Altlast (ca. 50 m entfernt) sind unterkellert. Es bestehen unterirdische Leitungsverbindungen.

Die Kellerräume werden nach Auskunft der Anwohner selten begangen.

Anhand dieser Angaben läßt sich die "Typisierung" durchführen:

Altersklasse 3  
Größenklasse 4  
Höhenklasse 4  
Zusammensetzung 3  
Einbauart 2

Als Zahlenwert wird 2,6 ermittelt, was durch Rundung eine Zuordnung zur Phase III ergibt.

Die Prüfung, ob ein Schutzgut (Atmosphäre/Raumluft) betroffen ist, ergab, daß die Raumluft maßgebendes Schutzgut ist.

Die Stoffgefährlichkeit  $r_0$  setzt sich wie folgt zusammen:

Phase III (2,6)	--->	2,7 (Abbildung 20)
3 x 0,1 (3%)	--->	0,3
$r_0$	--->	3,0

Die ortsbezogenen Faktoren  $m_I - m_{IV}$  ergaben sich wie folgt:

Art	Grundwert	Zuschlag	$m_I$ -Wert
Höhenklasse 3 Naß und Volumen > 100 000 m <sup>3</sup>	1,1	-	1,1
			$m_{II}$ -Wert
Abdeckung 3 m, bindig unterkellert mit Gaswegsamkeiten Abstand 50 m	1,0	+ 0,5 - 0,1	1,4
			$m_{III}$ -Wert
Räume mit geringem Luftaustausch	1,3	-	1,3
			$m_{IV}$ -Wert
begehbarer Raum	1,3	-	1,3

$r_I - r_{IV}$  ergeben sich zu:

$$r_I = m_I \times r_0 = 1,1 \times 3,0 = 3,3$$

$$r_{II} = m_{II} \times r_I = 1,4 \times 3,3 = 4,6$$

$$r_{III} = m_{III} \times r_{II} = 1,3 \times 4,6 = 6,0$$

$$r_{IV} = m_{IV} \times r_{III} = 1,3 \times 6,0 = 7,8$$

Das handlungsbestimmende Risiko ergibt sich zu  $r_{III} = 6,0$  und das prioritätsbestimmende Risiko zu  $r_{IV} = 7,8$

Als Handlungsbedarf wird  $E_{1-3}$  ermittelt.

Die Plausibilitätskontrolle ergab, daß im Randbereich der Altablagerung auf einem landwirtschaftlich genutzten Feld seit Jahren Vegetationsschäden auftraten und auch während der Durchführung der Erkundung erkennbar sind. Dies deutet darauf hin, daß Gasemissionen in den Untergrund stattfinden.

### Technische Erkundung ( $E_{1-3}$ )

Schritt 1: Überprüfung der Stoffgefährlichkeit  $r_0$

Es werden 5 tiefendifferenzierte Gasmeßstellen auf der Altablagerung auf die Komponenten CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und LCKW beprobt. Die Tiefe der einzelnen Entnahmehorizonte ist durch eine 3 Meter mächtige Oberflächenabdeckung auf 4,5 m, 6 m und 7,5 m festgelegt.

Die Meßergebnisse zeigen ein hohes Methan-Kohlendioxid-Konzentrationsverhältnis in 3 Gasmeßstellen, insbesondere in den tiefen Entnahmehorizonten. Dadurch ist eine Korrektur der Phase von III auf II vorzunehmen.

Als Deponiespurengase werden Tetrachlorethen (150 mg/m<sup>3</sup>) und Trichlorethen (100 mg/m<sup>3</sup>) in 3 Gasmessstellen gemessen. Dies bestätigt die Vermutung, daß Industrieabfälle in der Altablagerung enthalten sind. Als maßgebender Spurenstoff wird Tetrachlorethen bestimmt. Die Konzentrationsverhältnisse in den Gasmessstellen liegen an der oberen bzw. unteren Grenze des Zuschlagbereichs. Die Konzentrationen wurden in ca. 2/3 der Messstellen gefunden. Aus der Stoffliste wird der Zuschlag von 0,2 abgelesen und verdoppelt. Die Stoffgefährlichkeit ergibt sich dann zu

Phase II (3,0)	--->	3,0 (Abbildung 20)
2 x 0,2	--->	0,4 (Stoffliste, Tabelle 10)
r <sub>0</sub>	--->	3,4

## Schritt 2: Gefährdungsabschätzung Schutzgut Luft

Für schutzgutbezogene Fragestellungen sind folgende Sachverhalte zu überprüfen:

- ist Schutzgut Raumlufte,
- ist Schutzgut freie Atmosphäre betroffen?

Die Prüfung ergab, daß das Schutzgut Raumlufte maßgebend ist.

Für das Schutzgut Raumlufte bietet sich folgendes Vorgehen an:

Prüfen, ob Gasmigrationen in Richtung Gebäude vorhanden sind. Hierfür werden unmittelbar am bzw. vor dem Gebäude Sondenmessungen durchgeführt.

Die Sondenmessungen ergaben keine Hinweise auf CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> und LCKW. Zur Kontrolle wurden auf halber Strecke zwischen Altablagerung und Gebäude Messungen durchgeführt. Auch diese Messungen ergaben keine Hinweise.

Die Erkundung wird an dieser Stelle beendet und die Bewertung auf BN 3 durchgeführt.

Die Stoffgefährlichkeit r<sub>0</sub> ist durch die Meßergebnisse korrigiert worden (r<sub>0</sub>=3,4).

Die ortsbezogenen Faktoren m<sub>I</sub>-m<sub>IV</sub> verändern sich wie folgt:

Art	Grundwert	Zuschlag	m <sub>I</sub> -Wert
Höhenklasse 3 Naß und Volumen > 100 000 m <sup>3</sup>	1,1	-	1,1
			m <sub>II</sub> -Wert
Abdeckung 3 m, bindig CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> n.n. Trichlorethen n.n. Tetrachlorethen n.n.	1,0	-0,6	0,4
			m <sub>III</sub> -Wert
kein Eintrag zum Schutzgut	1,0	-	1,0
			m <sub>IV</sub> -Wert
begehbarer Raum	1,3	-	1,3

$r_I - r_{IV}$  ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} r_I &= m_I \times r_0 &&= 1,1 \times 3,4 = 3,7 \\ r_{II} &= m_{II} \times r_I &&= 0,4 \times 3,7 = 1,5 \\ r_{III} &= m_{III} \times r_{II} &&= 1,0 \times 1,5 = 1,5 \\ r_{IV} &= m_{IV} \times r_{III} &&= 1,3 \times 1,5 = 2,0 \end{aligned}$$

Aufgrund der Meßergebnisse ergab sich für das Schutzgut Raumlufte kein weiterer Handlungsbedarf.

Zur Überprüfung des Schutzgutes Atmosphärenluft wird ebenfalls eine Bewertung durchgeführt.

Die Stoffgefährlichkeit  $r_0$  und  $m_I$  wird von oben übernommen.

Art	Grundwert	Zuschlag	$m_I$ -Wert
Höhenklasse 3 Naß und Volumen > 100 000 m <sup>3</sup>	1,1	-	1,1
			$m_{II}$ -Wert
Abdeckung 3 m, bindig	0,8	-	0,8
			$m_{III}$ -Wert
kein Eintrag zum Schutzgut	1,0	-	1,0
			$m_{IV}$ -Wert
begehbarer Raum	1,3	-	1,3

$r_I - r_{IV}$  ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} r_I &= m_I \times r_0 &&= 1,1 \times 3,4 = 3,7 \\ r_{II} &= m_{II} \times r_I &&= 0,8 \times 3,7 = 3,0 \\ r_{III} &= m_{III} \times r_{II} &&= 1,0 \times 3,0 = 3,0 \\ r_{IV} &= m_{IV} \times r_{III} &&= 1,0 \times 3,0 = 3,0 \end{aligned}$$

Für die Atmosphärenluft besteht bei der jetzigen Nutzung keine Gefährdung.

Empfindliche Nutzungen wie Sport-, Grill-, Kinderspielplätze und Kleingartenanlagen müssen als Nutzungsmöglichkeiten für die Fläche durch entsprechende Einschränkungen ausgeschlossen werden.

Zur Vervollständigung des Beispiels wird jetzt davon ausgegangen, daß die Messungen aus **Schritt 2** eine Migration zu den Gebäuden ergeben haben:

Es wurden 20 Vol % CH<sub>4</sub> und 10 Vol % CO<sub>2</sub> unmittelbar am Gebäude in 2 m Tiefe gemessen. Tetrachlorethen wurde in Konzentrationen von 100 mg/m<sup>3</sup> und Trichlorethen in Konzentrationen von 150 mg/m<sup>3</sup> gemessen.

Aufgrund der Meßergebnisse sind Raumlufte messungen bzw. andere Maßnahmen wie folgt durchzuführen:

- Information der betroffenen Bewohner. Einsehen von Bauplänen, um die Meßorte und die Lage der Versorgungsleitungen bestimmen zu können.
- Prüfen mit einem Combi-Warngerät (kein FID verwenden: Lebensgefahr!), ob in den betroffenen Räumen akute Explosions- oder Erstickungsgefahr besteht.
- Bei Explosions- oder Erstickungsgefahr sind Sofortmaßnahmen einzuleiten (Zwangsentlüftung, Betretungsverbot). Außerdem sind z. B. darübergelegene Räume auf Schadstoffe zu überprüfen.
- Besteht keine Explosionsgefahr mehr, werden mit dem FID die Gaseintrittstellen gesucht (Risse, Schächte usw.).
- Ist keine akute Gefährdung festzustellen, ist mit Langzeitmessungen (min. 2 Tage lang entsprechende Geräte Vorort installieren) zu überprüfen, ob eine Anreicherung von CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> und Tetrachlorethen/Trichlorethen möglich ist.

Die Messungen mit dem Kombi-Warngerät ergaben keine unmittelbare Explosionsgefahr. Im Keller wurden bis zu 2 Vol % CH<sub>4</sub> gemessen. Als Sofortmaßnahme wurde eine Langzeitmessung eingeleitet.

Die Langzeitmessung über 4 Tage ergab eine maximale Konzentration von 4 Vol % CH<sub>4</sub> und 3 Vol % CO<sub>2</sub>. Trichlorethen und Tetrachlorethen wurden nicht nachgewiesen.

Nachdem die lokalisierten Undichtigkeiten abgedichtet waren, ergab eine zweite Langzeitmessung eine max. Belastung von 0,05 Vol % CH<sub>4</sub>.

Zusätzlich wird der Migrationspfad erkundet, um Fragestellungen der Sanierung in der nächsten Bearbeitungsstufe, der eingehenden Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/ Sanierungsvorplanung (E<sub>3,4</sub>) beantworten zu können.

BN 3 ist nun erreicht und es folgt die Bewertung des Standortes.

Die Stoffgefährlichkeit  $r_0$  ist durch die Meßergebnisse korrigiert worden ( $r_0=3,4$ ).

Die ortsbezogenen Faktoren  $m_I$ - $m_{IV}$  verändern sich wie folgt:

Art	Grundwert	Zuschlag	$m_I$ -Wert
Höhenklasse 3 Naß und Volumen > 100 000 m <sup>3</sup>	1,1	-	1,1
			$m_{II}$ -Wert
Abdeckung 3 m, bindig CH <sub>4</sub> 20 Vol%, CO <sub>2</sub> 10 Vol% Trichlorethen/Tetrachlorethen CH <sub>4</sub> 4 Vol% im Raum	0,8  +0,3	-  +0,2  +0,6	0,8   2,1
			$m_{III}$ -Wert
geringer Luftaustausch	1,3	-	1,3
			$m_{IV}$ -Wert
begehbarer Raum	1,3	-	1,3

$r_I - r_{IV}$  ergeben sich zu:

$$r_I = m_I \times r_0 = 1,1 \times 3,4 = 3,7$$

$$r_{II} = m_{II} \times r_I = 2,1 \times 3,7 = 7,8$$

$$r_{III} = m_{III} \times r_{II} = 1,3 \times 7,8 = 10,1$$

$$r_{IV} = m_{IV} \times r_{III} = 1,3 \times 10,1 = 13,1$$

Die Altlast ist durch die getroffenen Maßnahmen gesichert, bis die übrigen Schutzgüter entsprechend erkundet worden sind. Die eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/ Sanierungsvorplanung wird für die Altlast für *alle Schutzgüter*, die betroffen sind, durchgeführt.



## 5. Literaturübersicht

- ARENDDT, G.; 1991:  
"Schwerflüchtige Kohlenwasserstoffe in Deponiegas und Kondensat"; in Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 2, Economica Verlag
- BOGNER J.E.; 1986:  
"Understanding natural and induced gas migration through landfill cover materials". Proceedings of the 21th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. "Advancing Towards Technology Breakout in Energy Conversion" San Diego, CA p. 199 - 204
- CHIOU, C.T., FREED, V.G., SCHMEDDING, D.W., KOHNERT, R.L.; 1977:  
"Partition Coefficient and Bioaccumulation of Selected Organic Chemicals". Env. Sci. & Techn. Vol. 11, No. 5
- CHRISTENSEN, Th. H., KJELDSSEN, P.; 1989:  
"Basic Biochemical Processes in Landfills"; in: Christensen, Cossu, Stegmann (Hrsg.): Sanitary Landfilling, Process, Technology and Environmental Impact, Academic Press
- DERNBACH, H.; 1982:  
"Versuche zur Abschätzung des Gaspotentials einer Deponie anhand von Müllproben", in: Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig, Heft 33 S. 447 - 470
- DERNBACH, H.; 1988:  
"Gasproblematik bei Altdeponien"; in: Deponiegasnutzung, Hamburger Berichte zur Abfallwirtschaft 1
- DUARTE, A.C. & ANDERSON, G.K.; 1983:  
"Modellrechnungen für die Hemmung der anaeroben Abbauprozesse". 11. IAWPR - Konferenz Kapstadt, Südafrika. Mitteilungen der Oswald - Schulze - Stiftung Heft 2
- DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e.V.):  
Arbeitsblatt G 260/1, April 1983
- EHRIG H.-J.; 1982:  
"Auswirkungen der Deponietechnik auf die Umsetzungsprozesse im Deponiekörper", in: Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig, Heft 33 S.125 - 144
- EHRIG H.-J.; 1982:  
"Ergebnisse von Abbauuntersuchungen in Lysimetern", in: Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig, Heft 33 S. 65 - 82
- EHRIG, H.-J.; 1989:  
"Sickerwasser aus Hausmülldeponien, Menge und Zusammensetzung"; in: Müllhandbuch, Kennziffer 4587
- EHRIG, H.-J.; 1991:  
"Gasprognose bei Restmülldeponien"; in: Deponiegasnutzung, Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 2, Economica Verlag
- EIKMANN, Th.; 1988:  
"Allgemeine Gesundheitsrisiken durch Altlasten"; in Franzius: Handbuch der Altlastensanierung

- FARQUHAR, G.J. & ROVERS, F.A.; 1973:  
"Gas production during refuse decomposition". Water, Air and Soil Pollution, 2 p. 483 - 495
- FARQUHAR, G.J., SOYUPAK, S., CONSTABLE, T.W., IYKES, D.F.; 1980:  
"Grundlagen der Gasentstehung". Abfallwirtschaft an der TU Berlin, Band 5, herausgegeben von B. Jäger und K. Wiemer, Berlin 1980
- FRANZIUS, V.; 1982:  
"Gashaushalt von Deponien - Einführung in die Thematik", in: Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig, Heft 33 S. 301 - 306
- HAM, R.K.; 1982:  
"Einflußfaktoren auf die Gasproduktionsrate von Proben aus Mülldeponien", in: Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig, Heft 33 S. 419 - 446
- HAUPTVERBAND DER GEWERBLICHEN BERUFGENOSSENSCHAFTEN, FACHAUS-  
SCHUSS "CHEMIE":  
Richtlinien für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung - Explosionsschutz - Richtlinie (EX - RL), Ausgabe Nov. 1989
- JANSON, O.; 1988:  
"Analytik, Bewertung und Bilanzierung gasförmiger Emissionen aus anaeroben Abbauprozessen unter besonderer Berücksichtigung der Schwefelverbindungen"; in: Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 32
- KANITZ, J.; 1985:  
"Erkundung von Schadstoffausbreitung durch Bodenluftuntersuchungen". Vortrag beim Seminar Altlasten und kontaminierte Standorte, Ruhr - Universität Bochum
- KAPP, H.; 1984:  
"Schlammfäulung mit hohem Feststoffgehalt"; in: Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft; Band 86
- LAGA, 1983:  
Informationsschrift "Deponiegas" Nr. 6 der Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA); Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin, 1983, veröffentlicht im Müllhandbuch, Kennziffer 4720
- LOFY, R.J.; 1982:  
"Einflußzonen des Vakuums in der Umgebung von Gasabzugsbrunnen" in: Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig, Heft 33
- MANCINELLI, R.L. & McKAY, C.P.; 1985:  
"Methane Oxidising Bacteria in Sanitary Landfills" in: A.A. Antonopoulos, Ed., Biotechnological Advances in Processing Municipal Wastes for Fuels and Chemicals, Argonne National Laboratory Report
- MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN WÜRTTEMBERG 1988:  
Altlastenhandbuch Teil I + II
- POLLER, Th.; 1990:  
"Hausmüllbürtige LCKW/FCKW und deren Wirkung auf die Methangasbildung"; Hamburger Berichte 2; Economica - Verlag
- RETTENBERGER, G. & TABASARAN, O.; 1982:  
Forschungsbericht 103 02 207 Teil I: Untersuchung zur Entstehung, Ausbreitung und Ableitung von Zersetzungsgasen in Abfallablagerungen. Texte des Umweltbundesamtes 12/1982

- RETTENBERGER, G.; 1978:  
"Entstehung, Folgen, Erfassung und Verwertung von Deponiegas"; Abfallwirtschaft an der TU Berlin, "Aktuelle Probleme der Deponietechnik", Band 3, Hrsg.: B. Jäger, R. Kayser, S. 234 - 260
- RETTENBERGER, G.; 1979:  
"Forschungsergebnisse zum Gashaushalt von Deponien"; in: Müll und Abfall 11 (1979), Heft 5, S. 126 - 131
- RETTENBERGER, G.; 1982a:  
"Beeinflussung des Gashaushaltes durch externe Vorgänge", in: Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig, Heft 33 S. 377 - 392
- RETTENBERGER, G.; 1982b:  
Forschungsbericht 103 02 207 Teil II: Untersuchung zur Entstehung, Ausbreitung und Ableitung von Zersetzungsgasen in Abfallablagerungen. Texte des Umweltbundesamtes 13/ 1982
- RETTENBERGER, G.; 1991:  
Die Bedeutung der Methan-Kohlendioxid- und HKW-Emissionen von Deponien für die Atmosphäre; in: Deponiegasnutzung, Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 2, Economica Verlag
- RICHTER, J.; 1986:  
"Der Boden als Reaktor", Enke Verlag
- RÖVER & Partner/ TAUW Infra Consult:  
Modellstandort Mannheim, Friesenheimer Insel. Technische Erkundung, Berichte Nov. 1989/ Okt. 1990
- SCHARF W.; 1982:  
"Untersuchungen zur gemeinsamen Ablagerung von Müll und Klärschlamm im Labormaßstab" in: Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig, Heft 33 S. 83 - 98
- SCHLEGEL & Partner:  
Modellstandort Herten: Zwischenbericht 1989
- SPENDLIN, H.H.; 1991:  
"Untersuchungen zur frühzeitigen Initiierung der Methanbildung bei festen Abfallstoffen"; in: Hamburger Berichte 4, Economica Verlag
- STEGMANN, R., EHRIG H.-J.; 1980:  
"Entstehung von Gas und Sickerwasser in geordneten Deponien"; Müll und Abfall 2/80, S. 41 - 51
- TABASARAN, O.; 1976:  
"Überlegungen zum Problem Deponiegas", Müll und Abfall, Heft 7 S. 204
- TABASARAN, O., RETTENBERGER, G.; 1987:  
"Grundlagen zur Planung von Entgasungsanlagen"; in: Müllhandbuch, Kennziffer 4547
- TECHNOLOGIEBERATUNG GRUNDWASSER UND UMWELT (TGU):  
Modellstandort Osterhofen: Zwischenberichte 1989 und 1990
- THOMANETZ, E.; 1991: Wasserreaktivität von Abfällen, Relevanz und Bestimmungsmöglichkeiten; in: Kurzfassung des 2. Workshop Abfall- und Altlastenanalytik am 28.11.1991 beim Institut für Siedlungswasserbau und Wassergüte- und Wasserwirtschaft der Universität Stuttgart
- VEDEWA: Modellstandort Bitz: Zwischenbericht Mai 1989

## Anlagen

### Anlage 1: Kurzbeschreibungen Modellstandorte

#### Anlage 1.1: Kurzbeschreibung Modellstandort Mannheim

Name/ Bezeichnung:	ehem. Schutt- und Müllablageplatz Scheidhorst, Mannheim, Friesenheimer Insel
Stoffinventar:	55 % Hausmüll 35 % Bauschutt 10 % Klärschlamm
Ablagerungsvolumen:	ca. 1 600 000 m <sup>3</sup>
Ablagerungszeitraum:	1956 - 1967
Schütthöhe:	ca. 5 m
Fläche:	28 ha
Einbauart:	über Kippkante
Geologie:	fluviatile Kiese und Sande (Rheinebene)
Art der Oberflächenabdeckung:	kulturfähiger Boden, ca. 0,5 m
Zuordnung nach technischer Erkundung:	Phase II - III

#### Anlage 1.2: Kurzbeschreibung Modellstandort Osterhofen

Name/ Bezeichnung:	ehem. Deponie Osterhofen
Stoffinventar:	70 % Hausmüll 25 % Bauschutt 10 % Sperrmüll
Ablagerungsvolumen:	ca. 300 000 m <sup>3</sup>
Ablagerungszeitraum:	1969 - 1976
Schütthöhe:	ca. 9 m
Fläche:	4 ha
Einbauart:	über Kippkante
Geologie:	eiszeitliche Kiese und Sande (Alpenvor- land)
Art der Oberflächenabdeckung:	bindiges Material ca. 0,5 m
Zuordnung nach technischer Erkundung:	Phase II

### Anlage 1.3: Kurzbeschreibung Modellstandort Herten

Name/ Bezeichnung:	ehem. Deponie Rheinfeldern - Herten
Stoffinventar:	Hausmüll, Gewerbemüll, Sperrmüll Bauschutt, Aushub, Kehricht
Ablagerungsvolumen:	ca. 300 000 m <sup>3</sup>
Ablagerungszeitraum:	1969 - 1986
Schütthöhe:	max. 10 m
Fläche:	4,5 ha
Einbauart:	schichtweiser Einbau, mit Radlader verdichtet zerkleinert
Geologie:	fluviatile Kiese und Sande (Rheintal)
Art der Oberflächenabdeckung:	mit bindigem Material
Zuordnung nach technischer Erkundung:	Phase I - II

### Anlage 1.4: Kurzbeschreibung Modellstandort Bitz

Name/ Bezeichnung:	ehem. Müllplatz Bitz "Halde"
Stoffinventar:	überwiegend Erdaushub (ca. 80 - 90 %) Hausmüll, Sperrmüll sowie Selbstanlieferungen aus den Bereichen Handwerk, Gewerbe und Industrie
Ablagerungsvolumen:	ca. 100 000 m <sup>3</sup>
Ablagerungszeitraum:	1959 - 1975
Schütthöhe:	max. 20 m
Fläche:	5 ha
Einbauart:	ungeordnet, Brände während des Einbaus
Geologie:	Malm, Karsthochfläche
Art der Oberflächenabdeckung:	Erdabdeckung
Zuordnung nach technischer Erkundung:	Phase VI

## Anlage 2: Entwicklung des Verfahrens der "Typisierung"

### Merkmale von Altablagerungen

#### Vorbemerkung

Um Daten von möglichst vielen Altablagerungen zu erhalten, wurde von der Ingenieur - Gruppe RUK ein Datenblatt zur Erfassung erstellt (Anlage 3), das möglichst alle Merkmale von Altablagerungen, die den Gashaushalt beeinflussen, berücksichtigt. Es war zu erwarten, daß viele Merkmale nicht bekannt sind bzw. nur abgeschätzt werden können, um die Altablagerungen einzuordnen. So mußten die Mindestanforderungen der Daten über Betrieb, Standort- und Rahmenbedingungen und Meßprogramm zusehens zurückgenommen werden, um überhaupt eine gewisse Anzahl in das Vorhaben einzubringen. Die Qualität der Daten war bei vielen Gutachten und Bewertungen unzureichend, da es oft grobe Schätzungen sind. Dies zeigt sich z.B. bei der Größe der Altablagerung und besonders bei der Müllzusammensetzung. Eine Ausnahme bildet der Schüttungszeitraum, der in fast allen Fällen bekannt war. Dies rechtfertigt auch die Vorgehensweise, daß die Typisierung im wesentlichen auf den Altersklassen basiert.

Auf die einzelnen Merkmale wird im folgenden näher eingegangen.

### Betrieb der Deponie

#### Schüttungszeitraum:

Hier wurde der Beginn und das Ende der Schüttung aufgenommen. Bei einigen Altablagerungen war nur das ungefähre Ende der Schüttung bekannt oder aber nur eine ungefähre Angabe des Schüttungszeitraumes (z.B. 60er Jahre). Hier wurde dann das Ende der Schüttung im Jahre 1961 angenommen. Hier wie bei allen anderen Angaben wurde im Zweifelsfall stets der auf der sicheren Seite liegende Wert angenommen. Aus den Angaben über den Schüttungszeitraum läßt sich aber auch ersehen, ob die Deponie schnell oder langsam geschüttet wurde, was sich ebenfalls auf die mögliche Gasproduktion auswirkt.

Das Alter einer Deponie wurde immer aus der Differenz:

Jahr der Durchführung des Meßprogrammes - Jahr der letzten Schüttung ermittelt.

#### Menge der abgelagerten Stoffe:

Die Angaben werden in m<sup>3</sup> gemacht. Es hat sich gezeigt, daß fast alle Angaben errechnete Werte aus der (oftmals nicht genau bekannten) Fläche und der (ebenfalls nicht genau bekannten) Schütthöhe sind. Da die Altablagerungen in 5 Größenklassen eingeteilt wurden, erscheint die genaue Menge der abgelagerten Stoffe als nicht so entscheidend für das Deponiegasgeschehen. Desweiteren wäre die Dichte, die sich bei Altablagerungen zwischen 0,8 - 1,4 t/m<sup>3</sup> bewegen kann, ebenso zu berücksichtigen. Dies rechtfertigt eine Zuordnung zu den 5 Größenklassen zusätzlich.

#### Fläche:

Die genaue flächenhafte Ausdehnung ist bei rekultivierten oder bebauten Altablagerungen meist nicht mehr zu rekonstruieren. Für den Deponiegashaushalt ist die flächenhafte Ausdehnung aber insofern wichtig, da über sie ein Hauptteil der Emissionen stattfindet. Zusammen mit weiteren Angaben (Schütthöhe, Mulden- Haldendeponie, Oberflächenabdeckung, Bebauung etc.) kann der Austausch mit der Atmosphäre abgeschätzt werden.

#### Schütthöhe:

Die Schütthöhe hat einen wichtigen Einfluß auf die Deponiegasproduktion. So ist bekannt, daß bei mächtigen Müllkörpern ( $> 10$  m) eine stabile anaerobe Phase eintritt und den Luftzutritt und somit Methanoxidation verhindert. Die Schütthöhe wird oft durch Sondierungen ermittelt oder ergibt sich aus der ehemaligen Nutzung (Kies- und Sandabbau, Tongrube) mit Angabe des Abbaus unter GOK.

#### Müllzusammensetzung:

Hier werden nur die "klassischen" Müllarten

- Hausmüll (hohes Gaspotential)
- Bauschutt (kein Gaspotential)
- Klärschlamm (hohes Gaspotential) erfaßt.

Nur bei besonders verdächtigen Gasproduzenten wie z.B. Abfälle aus der Lebensmittelindustrie, Pflanzenreste etc. wird dies gesondert aufgeführt.

#### Einzugsbereich:

Hier wird zwischen städtischem und ländlichem Einzugsbereich unterschieden, wobei die Überlegung zugrunde liegt, daß der Anteil von organischem Kohlenstoff im städtischen Müll höher ist als im Müll aus ländlichen Gegenden. Zusätzlich dient der Hinweis auf ein städtisches Einzugsgebiet auf eine mögliche Einlagerung von Industrieabfällen.

#### Einbau:

Hier sind alle Informationen, die die Behandlung und die Einbauart des Mülls betreffen, gesammelt. Wurde der Müll vorbehandelt, z.B. durch Vorrotte, so ist das Gaspotential gering, ebenso bei Bränden auf der Deponie oder bei lockerem Einbau.

#### Technische Anlagen:

Hier sind solche Maßnahmen aufgeführt, die sich auf die Gasproduktion auswirken. Durch Sickerwasserkreislaufführung läßt sich z.B. der Wassergehalt der Deponie optimieren, was zu einer höheren Gasproduktion führt.

## Standort- und Rahmenbedingungen

Lage zum Grundwasser:

Die Angaben erfolgen als Flurabstand. Ist damit zu rechnen, daß die Altablagerung "im Grundwasser" liegt, so kann dies eine Optimierung des Wasserhaushalts darstellen und somit eine Erhöhung der Gasproduktion bewirken.

Sohlabdichtung:

Eine Sohlabdichtung scheint sich in zweierlei Hinsicht auf den Deponiegashaushalt auszuwirken. Dabei ist zum einen eine indirekte Beeinflussung über den Wasserhaushalt gegeben. Die andere Beeinflussung ist über eine Hemmung der Transportvorgänge sowohl des Wassers als auch der Gasphase gegeben.

Oberflächenabdichtung:

Eine Beeinflussung des Gashaushaltes ergibt sich wiederum auf 2 Wegen. Zum einen über eine Beeinträchtigung der Emissionen und zum anderen indirekt über den Wasserhaushalt.

anstehendes Gestein und Gaswegsamkeiten:

Hier wurde in erster Linie an vorhandenes Migrationsgeschehen und an eine Beeinflussung des Wasserhaushaltes gedacht.

Wasserhaushalt:

In zahlreichen Versuchen ist gezeigt worden, daß der Wassergehalt von Müll der wichtigste Faktor für die Methanbildung ist. Im Normalfall ist der zu geringe Wassergehalt ein ständig limitierender Faktor bei der Methanproduktion. Genaue Aufschlüsse über den Wassergehalt des Mülls einer Deponie sind meist nicht zu bekommen. Selbst aufwendige Materialuntersuchungen können diesen Sachverhalt nicht erschöpfend klären. Bei der vorliegenden Untersuchung wurde versucht, den Wasserhaushalt über bestimmte Angaben grob zu umreißen. So sind Sickerwasseraustritte als Hinweise auf Stauwasser zu verstehen. Stauhorizonte können z.B. bei Sondierungsarbeiten angetroffen werden und sind dann meist auch im Meßprotokoll vermerkt.

Verhältnis Oberfläche zu Volumen:

Je größer die Oberfläche im Verhältnis zum Volumen einer Deponie, desto größer ist der Austausch mit der Atmosphäre. So ist die Methanoxidation bei einer Haldendeponie sicher größer als bei einer Muldendeponie.

Gasmigrationen:

Hier sind in erster Linie Migrationen ins Umfeld (z.B. Keller von Gebäuden in der Nähe der Altablagerung) oder auch festgestellte Vegetationsschäden aufgrund von Deponiegaseinwirkungen aufgeführt. Migrationen sind oft ein Hinweis auf eine intakte Gasproduktion bei Altablagerungen.



## Ergänzende Angaben

Vegetationsschäden:

Oft lassen sich Vegetationsschäden nicht eindeutig Deponiegaseinwirkungen zuordnen. Sie können aber ein Hinweis auf vorhandene Emissionen sein.

Geruchsbelästigungen:

Länger anhaltende Geruchsbelästigungen deuten auf mikrobiologische Aktivität hin.

besondere Vorkommnisse:

Hier wurde in erster Linie an Unfälle im Zusammenhang mit Deponiegas (Verpuffungen bei Bauarbeiten, Explosionen in Gebäuden etc.) gedacht.

Meßprogramm:

Hier sind die Durchführung der Messungen, der Zeitpunkt der Messungen, die benutzten Analysegeräte und die verschiedenen Parameter aufgeführt. An den dargestellten Altablagerungen wurde im überwiegenden Teil die Deponiegasuntersuchungen mittels Sondierungen durchgeführt. Weiterhin kamen als Untersuchungsmethoden Absaugversuche, FID - Kartierungen, Raumluftmessungen und Messungen an bestehenden Entgasungsanlagen in betracht. Über die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden läßt sich folgendes sagen:

- eine Vergleichbarkeit im statistischen Sinne wäre nur bei genau abgestimmten Meßvorgängen (Ausführung, Analysegeräte, Wetterlage etc.) gegeben.
- durch die Einteilung in Klassen (Gasphasen) wird der Effekt der unterschiedlichen Meßstrategien einigermaßen ausgeglichen.

## Untersuchung

Es wurden insgesamt 84 Altablagerungen mit dem Erfassungsbogen (Anlage 3) erfaßt. Von jeder Altablagerung wurde ein Datenblatt erstellt. Aus Gründen des Datenschutzes wurden alle Angaben über Lage, Betreiber, untersuchende Behörde und Ing.- Büros usw. gelöscht und die Altablagerungen mit laufenden Nr. versehen. Eine Übersicht über alle Altablagerungen mit Alter, Größe, Höhe, Gas in Vol - %, Material und Einzugsbereich ist in Anlage 4 gegeben.

Diese Merkmale wurden in Klassen eingeteilt (Anlage 5). Die nach Phasen geordneten Altablagerungen zeigt Anlage 6.

## Einfaktorielle Varianzanalyse:

Mit diesen Merkmalen wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse für alle 8 unabhängigen Merkmale durchgeführt. Charakteristisch für die einfaktorielle Varianzanalyse ist, daß untersucht wird, ob ein unabhängiges Merkmal (z.B. Alter) sich auf die Phase auswirkt, und wie stark diese Auswirkung auf die Phase relativ zu den anderen unabhängigen Merkmalen ist. Als Maßzahl dafür ist der F - Wert anzusehen, der Werte zwischen  $F > 0$  und  $F = \text{unendlich}$  annehmen kann. Als Rechenvorgang wird dabei der Anteil der Unterschiedlichkeit aller Meßwerte (hier Phase) bestimmt, der auf die verschiedenen Merkmalsstufen zurückzuführen ist. Es wird davon ausgegangen, daß die Merkmalsstufen die einzige "varianz - generierende Quelle" darstellen. Diesem Anteil wird der Fehlervarianzanteil gegenübergestellt.

Ergebnis:

Von den 8 unabhängigen Merkmalen bestehen bei 6 Merkmalen signifikante Zusammenhänge zur Phase. Der engste Zusammenhang ist zwischen Größe und Phase anhand des F - Wertes abzuleiten. Ein weiterer enger Zusammenhang besteht bei Merkmal Einbau, Einzugsgebiet, Alter, Höhe und Zusammensetzung jeweils zur Phase. Diese Ergebnisse müssen noch genauer betrachtet werden:

Phase und Größe:

Die Mittelwerte in den einzelnen Größenklassen zeigen folgende Zuordnung

Größenklasse	Phase
1	5.333
2	4.673
3	3.690
4	2.789
5	2.167

Der F - Wert beträgt 19.012 / P - Wert 0.000

Man sieht, daß in den einzelnen Größenklassen deutliche Unterschiede zu beobachten sind (stetig abnehmende Phase bei größer werdenden Altablagerungen).

Phase und Einbau:

Die Mittelwerte zeigen in den einzelnen Einbau - Klassen folgende Verteilung:

Einbau	Phase
1	5.00
2	3.635
3	2.042

Der F - Wert beträgt 14.634 / P - Wert 0.000

Es läßt sich eine deutliche Abstufung der Phasen erkennen.

#### Phase und Einzugsgebiet:

Die Nachteile der Varianzanalyse zeigen sich bei diesem Merkmal. Ein hoher F - Wert läßt auf eine starke Beeinflussung dieses Merkmals auf die Phase schließen. Betrachtet man die Mittelwerte in den 3 Klassen, so ergibt sich, daß die Gasproduktion bei ländlich - städtischem Einzugsgebiet höher ist als bei städtischem Einzugsgebiet. Es wäre hier ein Wert zwischen dem des ländlichen und des städtischen Einzugsgebiet zu erwarten. Hier besteht also nur der formale Zusammenhang: "Auswirkung auf die Phase". Ein logischer Zusammenhang kann nicht hergestellt werden.

Der F - Wert beträgt 13.560 / P - Wert 0.000

#### Phase und Alter:

Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Alter und Phase. Durch die Einteilung in 7 Altersklassen sind die Unterschiede der Mittelwerte allerdings gering. Es läßt sich aber ein deutlicher Trend erkennen.

Altersklasse	Phase
1	1.634
2	2.583
3	3.559
4	3.976
5	3.969
6	4.409
7	4.500

Der F - Wert beträgt 5.176 / P - Wert 0.000

#### Phase und Höhe:

Ein Zusammenhang besteht auf 0,4 % igem Signifikanzniveau.

Höhenklasse	Phase
1	6.0
2	4.333
3	4.306
4	3.300
5	3.000

Der F - Wert beträgt 4.244 / P - Wert 0.004

#### Phase und Zusammensetzung:

Ein Zusammenhang besteht auf 3,8 % Signifikanzniveau.

Zusammensetzung	Phase
1	4.714
2	3.769
3	3.196

Der F - Wert beträgt 3.384 / P Wert 0.038

### Zusammenfassung:

Durch die einfaktorielle Varianzanalyse konnte gezeigt werden, bei welchen Merkmalen ein Zusammenhang mit der Phase besteht. Dabei konnten von 8 unabhängigen Merkmalen 5 Merkmale herausgefiltert werden. Als Stärke der Beeinflussung kann der F - Wert angesehen werden. In der Reihenfolge der Stärke der Beeinflussung sind dies:

- Größe
- Einbau
- Alter
- Höhe
- Zusammensetzung

Für das weitere Vorgehen muß angenommen werden, daß die in der Umfrage erfaßten Altablagerungen repräsentativ für alle Altablagerungen sind. Da die Anzahl der eingebrachten Altablagerungen für eine mehrfaktorielle Fragestellung nicht ausreicht, können die Interaktionen zwischen den einzelnen Merkmalen nicht aufgedeckt werden. Ebenso konnten nur bestimmte Merkmale aufgrund der Datenlage in die einfaktorielle Varianzanalyse aufgenommen werden.

Anmerkung: Die Computerausdrücke "Einfaktorielle Varianzanalyse" sind in der WWW-Version des Berichts nicht verfügbar!

## Anlage 3: Erfassungsbogen: "Typisierung von Altablagerungen"

### Betrieb der Deponie

Schüttungszeitraum	
Menge der abgelagerten Stoffe	
Fläche	
Schütthöhe	
Müllzusammensetzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hausmüll</li> <li>• Bauschutt</li> <li>• Klärschlamm</li> <li>• sonstige</li> </ul>
Einzugsbereich	
Einbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorbehandlung</li> <li>• Verdichtung</li> <li>• besondere Einbauart</li> <li>• Brände während des Einbaus</li> <li>• sonstiges</li> </ul>
techn. Anlagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entgasungsmaßnahmen</li> <li>• Sickerwasserkreislaufführung</li> <li>• sonstiges</li> </ul>
Ergänzung	

### Standort- und Rahmenbedingungen

Lage zum GW	
Sohlabdichtung	
Art der Oberflächenabdichtung	
anstehendes Gestein	
Gaswegsamkeiten (Risse, Spalten)	
Wasserhaushalt Hangwasserzutritt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stauwasser</li> <li>• Stauhorizonte innerhalb der Deponie</li> <li>• Niederschlagsdaten</li> <li>• Verdunstung/Transpiration</li> <li>• sonstiges</li> </ul>
Verhältnis Oberfläche zu Volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muldendeponie</li> <li>• Haldendeponie</li> <li>• sonstige</li> </ul>
Gasmigrationen	

**Ergänzende Angaben**

Vegetationsschäden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• auf der Deponie</li> <li>• im Umfeld</li> </ul>
Geruchsbelästigung	
besondere Vorkommnisse	

**Meßprogramm****Betrieb der Deponie**

Schüttungszeitraum	
Menge der abgelagerten Stoffe	
Fläche	
Schütthöhe	
Müllzusammensetzung	Hausmüll Bauschutt Klärschlamm sonstige
Einzugsbereich	
Einbau	Vorbehandlung Verdichtung besondere Einbauart Brände während des Einbaus sonstiges
techn. Anlagen	Entgasungsmaßnahmen Sickerwasserkreislaufführung sonstiges
Ergänzung	

**Standort- und Rahmenbedingungen**

Lage zum GW	
Sohlabdichtung	
Art der Oberflächenabdichtung	
anstehendes Gestein	
Gaswegsamkeiten (Risse, Spalten)	
Wasserhaushalt Hangwasserzutritt	Stauwasser Stauhorizonte innerhalb der Deponie Niederschlagsdaten Verdunstung/Transpiration sonstiges
Verhältnis Oberfläche zu Volumen	Muldendeponie Haldendeponie sonstige
Gasmigrationen	

**Ergänzende Angaben**

Vegetationsschäden	auf der Deponie im Umfeld
Geruchsbelästigung	
besondere Vorkommnisse	

**Meßprogramm**

## **Anlage 4: Übersicht über die 84 untersuchten Altablagernungen**



Nummer	Alter in Jahren	Größe	Höhe in m	Phase	Zusamm. s	Einzugsbereich
1	1	4	<10	3	HM / BS	s
2	1	4	15	1	HM	s
3	2	4	6	1 - 2	HM	l-s
4	3	4	10	1 - 2	HM / BS	l-s
5	22	5	5	2 - 3	HM / BS	s
6	14	4		2	HM	l
7	14	5	6	3	HM / BS	s
8	6	5	18	1 - 2	HM / BS	s
9	4	5	7	1 - 2	HM	s
10	2	4	4	1 - 2	HM / BS	l-s
11	12	3	5	4	HM	l
12	15	5	8	2	HM	s
13	21	4	5 - 20	6	BS / (HM)	l
14	16	2	5 - 20	5	HM	l
15	18	3	3	4	HM / BS	l-s
16	27	2	3	2 - 3	HM / BS	l
17	34	2	1 - 3	5	BS / HM	l
18	14	3	4	3	HM / BS	l-s
19	30	1	2	5	BS / HM	l
20	14	4	10	1 - 2	HM	s
21	14	3	7 - 16	5	HM / BS	l
22	12	5	15	2	HM	l-s
23	20	3	1,4 - max. 4	2	HM / BS	s
24	14	4	3 - 4	5	HM / BS	s
25	25	4	3 - 4	5	HM / BS	s
26	15	4	2 - 10	5	HM / BS	l
27	31	3	4	4	BS / HM	l
28	18	2	8 - 9	5	HM / BS	l
29	13	4	15 - 18	2	HM / BS	s
30	16	4	2,5 - 10	4	HM / BS	s
31	18	2	3 - 4	6	HM / BS	l
32	25	2	3 - 5	5	HM / BS	l
33	18	2		4	HM	l
34	29	3	5 - 12	3	HM / BS	s
35	25	5		3	HM	s
36	24	3	7 - 10	3	HM	s
37	8	5	> 20	2	HM	s
38	22	5	max. 11	2	HM	s
39	31	3	10	5	HM	s
40	26	4	7	4	HM	s
41	19	3	max. 5,7	4	KS	s
42	31	4		4	HM / BS	s
43	27	3	2 - 3	5	HM / BS	s
44	26	5	max. 25	3	HM / BS	s
45	25	4	max. 18	2	HM / BS	s
46	22	3	10 - 15	3	HM / BS	s
47	18	4	8	3	HM / BS	s
48	21	3	9 - 14	3	HM / BS	l
49	16	2	5	3	HM	s
50	20	2	3 max. 5	4	HM / BS	s
51	26	1	1	6	HM / BS	l-s
52	11	1	4	5	HM / BS	l
53	15	2	7 max. 12	6	HM / BS	l
54	16	2	4 - 10	5	HM / BS	l
55	23	3	10 max. 13	5	HM / BS	s
56	18	1	1,5	5	HM	l
57	15	2	9	5	HM / BS	l
58	25	2		5	HM	s
59	20	2	3 - 5	5	HM / BS	s
60	25	2	4	5	HM / BS	s
61	25	2	3	5	HM	s

Nummer	Alter in Jahren	Größe	Höhe in m	Phase	Zusamm.s	Einzugsbereich
62	25	2	2	3	HM	s
63	18	3	4	4	HM / BS	l
64	28	2	5	5	HM / BS	s
65	20	3	10	2 - 3	HM/BS	s
66	10	2	3	5	HM/BS	l - s
67	2	5	50	1 - 2	HM/BS	s
68	15	3	6	2	HM/BS	s
69	20	5	13	2	HM/BS	s
70	26	2	10	5	HM/BS	s
71	18	2	3	6	HM/BS	l
72	7	4	8	2	HM/BS	l - s
73	7	3	4	3	HM/BS	l - s
74	18	3	10	4	HM/BS	l - s
75	17	2	6	3	HM/BS	l
76	11	1	5	6	HM/BS	l
77	26	2	5	6	HM/BS	l
78	15	4	8	2	HM/BS	s
79	26	2	6	5	BS/ (HM)	l
80	24	1	4,5	5	BS/HM	l
81	51	3	5	5	HM/BS	s
82	31	3	3	4	HM/BS	s
83	28	2	3	3	HM/BS	s
84	6	4	13	2	HM/BS	l - s
			BS=Bauschutt	HM=Hausmüll	KS=Klärschlamm	
				l=ländlich	s=städtisch	

## Anlage 5: Die Klasseneinteilung der 8 Merkmale

<b>Altersklasse</b>		<b>Größenklasse</b>	
1	0 - 5 Jahre	1	bis 10 000 m <sup>3</sup>
2	6 - 10 Jahre	2	bis 50 000 m <sup>3</sup>
3	11 - 15 Jahre	3	bis 150 000 m <sup>3</sup>
4	16 - 20 Jahre	4	bis 500 000 m <sup>3</sup>
5	21 - 25 Jahre	5	über 500 000 m <sup>3</sup>
6	26 - 30 Jahre		
7	über 30 Jahre		
<b>Höhenklasse</b>		<b>Zusammensetzung</b>	
1	bis 1 m	1	30 % HM/KS
2	bis 2 m	2	50 % HM/KS
3	bis 5 m	3	100 % HM/KS
4	bis 10 m	HM = Hausmüll KS = Klärschlamm	
5	über 10 m		
<b>Einzugsbereich</b>		<b>Morphologie</b>	
1	ländlich	1	Mulde/Grube
2	ländl.-städtisch	2	Übergang
3	städtisch	3	Halde
<b>Einbau</b>		<b>Schüttgeschwindigkeit</b>	
1	Brände, Vorrotte	1	in 5 Jahren
2	Kippkante	2	5 bis 15 Jahre
3	Lagenweise	3	länger 15 Jahre

## Anlage 6: Die 84 Altablagerungen mit den klassierten Merkmalen, geordnet nach Phasen

Phase	Alter	Größe	Höhe	Zusam	Einz.b	Morph	Einbau	Schüttg	Nummer
1	1	4	5	3	3	1	3	2	2
1 - 2	1	4	4	3	2	3	3	2	3
1 - 2	1	4	4	2	2	1	3	3	4
1 - 2	2	5	5	2	3	3		2	8
1 - 2	1	5	4	3	3	3	3	3	9
1 - 2	1	4	3	2	2	2	2	3	10
1 - 2	3	4	4	3	3	1	3	3	20
1 - 2	1	5	5	2	3	1	2	3	67
2	3	4		3	1	2	2	2	6
2	3	5	4	3	3		3	2	12
2	3	5	5	3	2	3	2	3	22
2	4	3	3	2	3	1	2	2	23
2	3	4	5	3	3	1	2	1	29
2	2	5	5	3	3	3	3	1	37
2	5	5	5	3	3	2	3	1	38
2	5	4	5	2	3	3		1	45
2	3	3	4	2	3	1	2	1	68
2	4	5	5	2	3	1	2	1	69
2	2	4	4	2	2	1	3	3	72
2	3	4	4	2	3	1		1	78
2	2	4	5	2	2	1	2	2	84
2 - 3	5	5	3	2	3	2	2	2	5
2 - 3	6	2	3	2	1	1	3	2	16
2 - 3	4	3	4	2	3	1		1	65
3	1	4	4	1	3			3	1
3	3	5	4	2	3	1	2	3	7
3	3	3	3	2	2	3	1	2	18
3	6	3	5	2	3	3		2	34
3	5	5		3	3	3		1	35
3	4	3	4	3	3	1	3	2	36
3	6	5	5	2	3	2		2	44
3	5	3	5	2	3	1		3	46
3	4	4	4	2	3	1		3	47
3	5	3	5	2	1	1		2	48
3	4	2	3	3	3	1		3	49
3	5	2	2	3	3	1		2	62
3	2	3	3	2	2	1		3	73
3	4	2	4	2	1	2		1	75
3	6	2	3	2	3	2		1	83
4	3	3	3	3	1		2	1	11
4	4	3	3	2	2	1	3	2	15
4	7	3	3	1	1	1	2	2	27
4	4	4	4	2	3	1	2		30
4	4	2		3	1		2	2	33
4	5	4	4	3	3			1	40
4	4	3	4	3	3	1		1	41
4	7	4		2	3	1		1	42
4	4	2	5	2	3	1		2	50
4	4	3	3	2	1				63
4	4	3	4	2	2	1		2	74
4	7	3	3	2	3	2	1	3	82
5	4	2	5	3	1	1	1	3	14
5	7	2	3	1	1	1	2	3	17

Phase	Alter	Größe	Höhe	Zusam	Einz. b	Morph	Einbau	Schüttg	Nummer
5	6	1	2	1	1	3		1	19
5	3	3	5	2	1	3	2	3	21
5	3	4	3	2	3	1	2		24
5	5	4	3	2	3	1	2		25
5	3	4	4	2	1	1	2	3	26
5	4	2	4	2	1	2	2		28
5	5	2	3	2	1	2	2		32
5	7	3	4	3	3	1		2	39
5	6	3	3	2	3	1		2	43
5	3	1	3	2	1	1	1	2	52
5	4	2	4	2	1	1	1		54
5	5	3	5	2	3	1		3	55
5	4	1	2	3	1	1	1	3	56
5	3	2	4	3	1	2	2	2	57
5	5	2		3	3	1			58
5	4	2	3	3	3	1			59
5	5	2	3	2	3	1		2	60
5	5	2	3	3	3	1			61
5	6	2	3	2	3	1		1	64
5	2	2	3	2	2	1	2	2	66
5	6	2	4	2	3	1			70
5	6	2	4	1	1	1		2	79
5	5	1	3	1	1	1			80
5	7	3	3	2	3	2	2	2	81
6	5	4	5	1	1	2	1	2	13
6	4	2	3	2	1	1	2		31
6	5	1	1	2	2	2		2	51
6	3	2	5	2	1	3	1		53
6	4	2	3	2	1	3	1		71
6	3	1	3	2	1	2		3	76
6	6	2	3	2	1	1			77

## Anlage 7: Ermittlung eines repräsentativen Rasters bei Sondenmessungen

Vorgehensweise:

Für die statistische Auswertung von Meßergebnissen in Bezug auf die Rasterweite wurden die **Sondenmessungen** am Modellstandort Osterhofen des Jahres 1989 herangezogen. Dabei handelt es sich um die Meßreihe im 30 m - Raster und in 3 m Teufe. Diese Meßreihe umfaßt 125 Meßwerte (siehe TECHNOLOGIEBERATUNG GRUNDWASSER UND UMWELT: Zwischenbericht 1989 II). Davon wurden 100 Meßwerte, die auf der Altablagerung ermittelt wurden, in das Verfahren einbezogen.

Ausgehend von den Meßergebnissen für Methan konnten mittels Zufallszahlen Mittelwerte für bestimmte Stichproben ermittelt werden und mit den Mittelwerten aus der gesamten Meßreihe verglichen werden.

Ergebnis

Anzahl der Meßwerte	Mittelwert Vol % CH <sub>4</sub>	Standardabweichung
100	36,7	31,22
50	41,97	32,0
30	33,66	30,41
20	41,4	33,57
10	30,8	32,9

Daraus ergibt sich, daß schon mit sehr wenig Messungen ein ähnliches Ergebnis in Bezug auf den Methangehalt zu erzielen ist. Dies zeigt sich auch an der Standardabweichung, die ähnliche Werte in den einzelnen Gruppen aufweist.

Aus diesem Sachverhalt ist zu schließen, daß zur Deponiegaserkundung mittels Sonden ein sehr grobes Raster ausreicht, um den Methangehalt im Deponiekörper zu ermitteln. Dies ist aber in entscheidendem Maße abhängig vom Zustand der Altablagerung. Der Modellstandort Osterhofen wurde in Phase II eingeordnet. Dies entspricht einer aktiven gasproduzierenden Phase. Bei Sondenuntersuchungen konnten nur in sehr geringem Maße Bereiche mit unterschiedlicher Gaszusammensetzung eingegrenzt werden. D.h., die Porengaszusammensetzung ist im gesamten Deponiebereich ähnlich. Dies zeigt auch dieser Versuchsansatz mit unterschiedlichen Stichprobenumfängen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	0	100	1,5	10	0,2	20	0	30	70	50			
2	3,7	56,686	55,6	30,79	0	41,475	75,6	33,66	28,1	41,97			
3	0	31,217	46,2	32,918	22,9	33,568	0	30,407	75,6	31,994			
4	0		70,8		0		0		0,1				
5	8,9		0		76,2		17,8		72,9		A = 100 Methanwerte		
6	73,1		0		1,6		0		74,9		B = Anzahl, Mittelwert, Standardabweich		
7	72,7		61		0		0		75,6		C = 10 Methanwerte		
8	40,9		72,6		73,1		23,7		0		D = Anzahl, Mittelwert, Standardabweich		
9	82,3		0		65,4		66,9		0		E = 20 Methanwerte		
10	46,2		0,2		69		28,3		0		F = Anzahl, Mittelwert, Standardabweich		
11	0				28,3		72,9		22,6		G = 30 Methanwerte		
12	51				3,7		67,4		70,8		H = Anzahl, Mittelwert, Standardabweich		
13	0				0		23,9		66,2		I = 50 Methanwerte		
14	68,1				70,4		68,5		22,9		J = Anzahl, Mittelwert, Standardabweich		
15	67,1				72,6		70		76,2				
16	74,9				72,7		27,6		0				
17	72,6				68,5		0		55,6				
18	75,1				68,1		67,6		43,9				
19	17,2				61,9		0		0				
20	70				74,9		0		0				
21	28,1						3,7		48,7				
22	75,6						68,1		72,6				
23	0,1						54,2		75,5				
24	72,9						22,6		1,5				
25	74,9						68,6		0,2				
26	75,6						17,8		50,7				
27	0						65,4		65,8				
28	0						23,9		71,5				
29	0						74,9		68,1				
30	22,6						0,4		65,7				
31	70,8								69				
32	66,2								0				
33	22,9								3,7				
34	76,2								0				
35	0								0				
36	55,6		Fort A						8,9				
37	43,9		64,5						73,1				
38	0		65						72,7				
39	0		66,9						40,9				
40	48,7		17,8						82,3				
41	72,6		0						46,2				
42	75,5		0						0				
43	1,5		0						51				
44	0,2		0						0				
45	50,7		0						68,1				
46	65,8		65,4						67,1				
47	71,5		68,6						74,9				
48	68,1		66,6						72,6				
49	65,7		67,9						75,1				
50	69		61,9						17,2				
51	23,7		58,1										
52	0		53,1										
53	0,2		30,7										
54	1,6		0										
55	68		0										
56	67,4		57,6										
57	27		45										
58	56,9		0										
59	0		61										
60	0		23,9										
61	70,4		67,6										
62	0,4		65,2										
63	0,1		54,2										
64	2,7		28,3										
65	0,4		0										
66	27,6		0										
67	65,9		0										
68	68,5		0										

Abb. 21 Tabellarische Darstellung: Ermittlung eines repräsentativen Rasters bei Sondenmessungen

## Anlage 8: Auswertung von Druckmessungen bei einem Absaugversuch

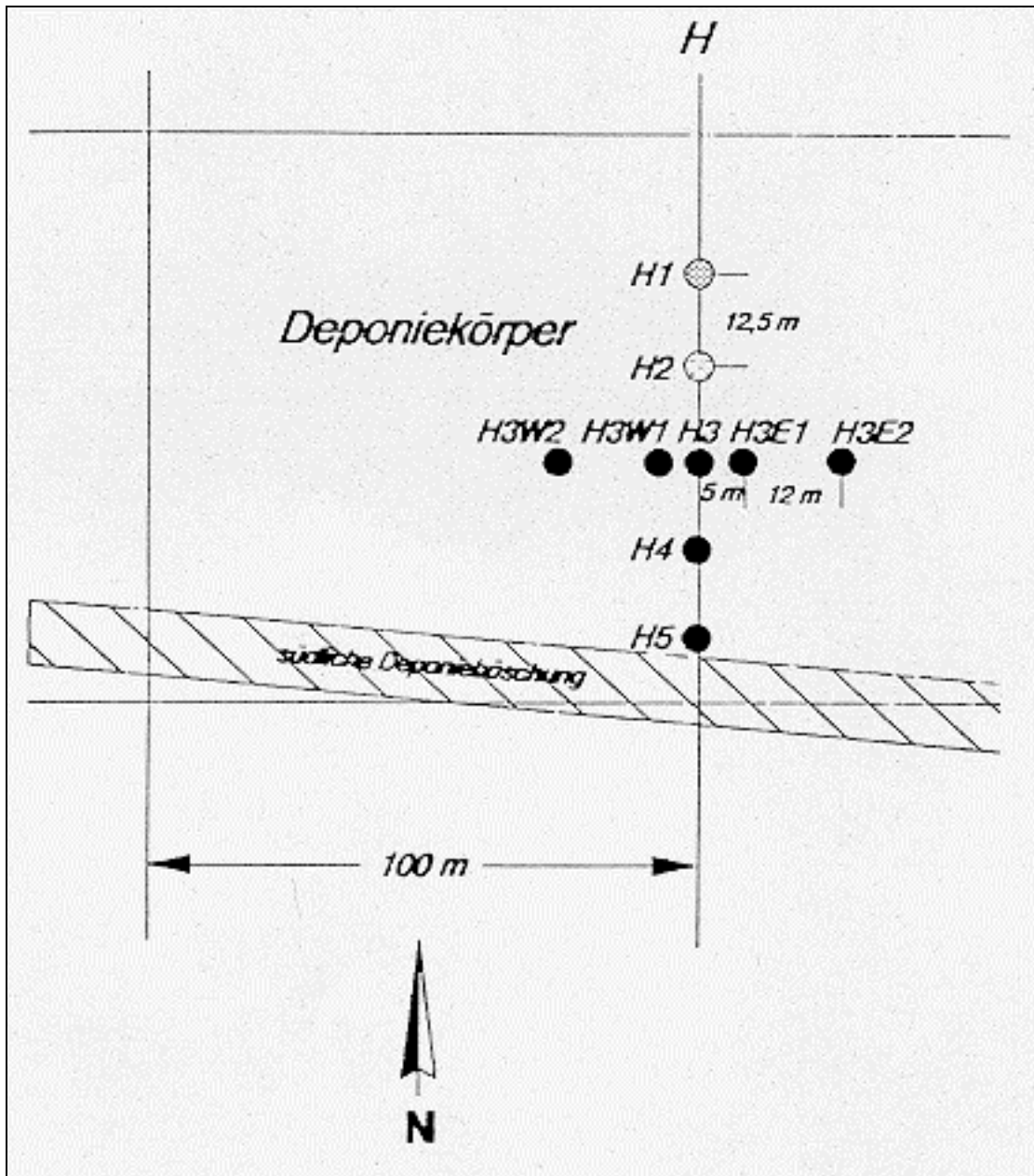


Abb. 23 Modellstandort Mannheim, Lage der Gasentnahmestelle und der Beobachtungsstellen

Die Absaugrate betrug  $33\text{ m}^3/\text{h}$

- |              |  |
|--------------|--|
| $H3$         | = Gasentnahmestelle                              |
| $H3W1, H3E1$ | = Beobachtungsstellen in $5\text{ m}$ Abstand    |
| $H2, H4$     | = Beobachtungsstellen in $12,5\text{ m}$ Abstand |
| $H3W2, H3E2$ | = Beobachtungsstellen in $17\text{ m}$ Abstand   |
| $H1, H5$     | = Beobachtungsstellen in $25\text{ m}$ Abstand   |



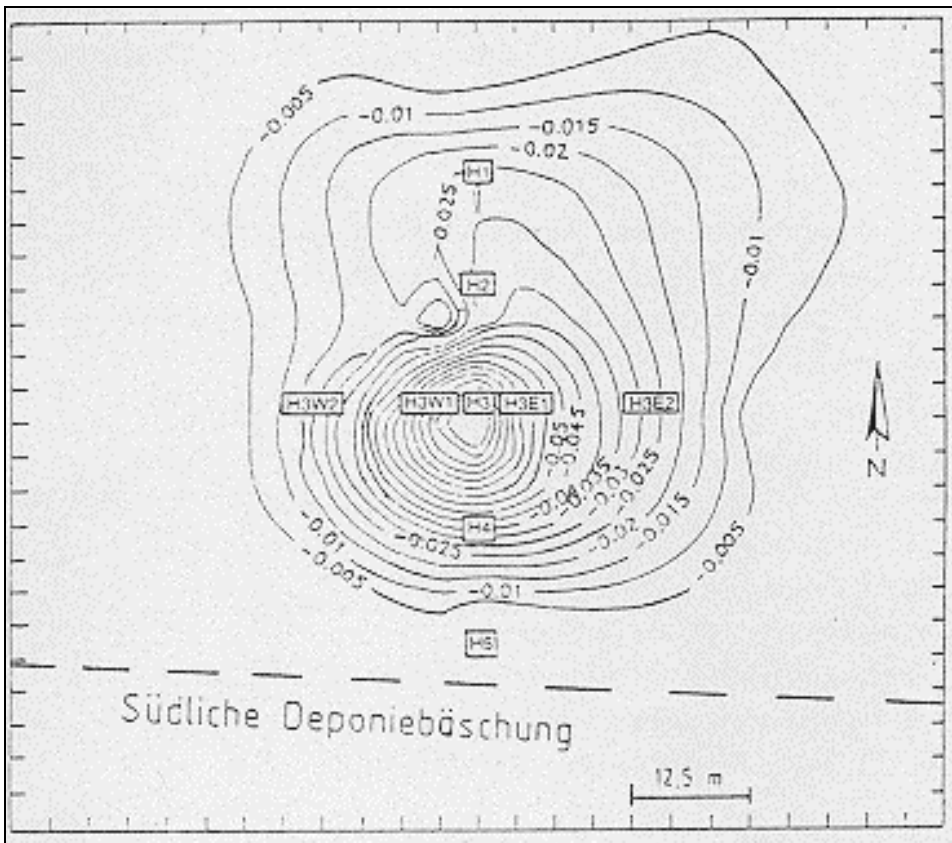


Abb. 24 Isolinien - Darstellung der an den Manometern in [m] abgelesenen Druckdifferenzen

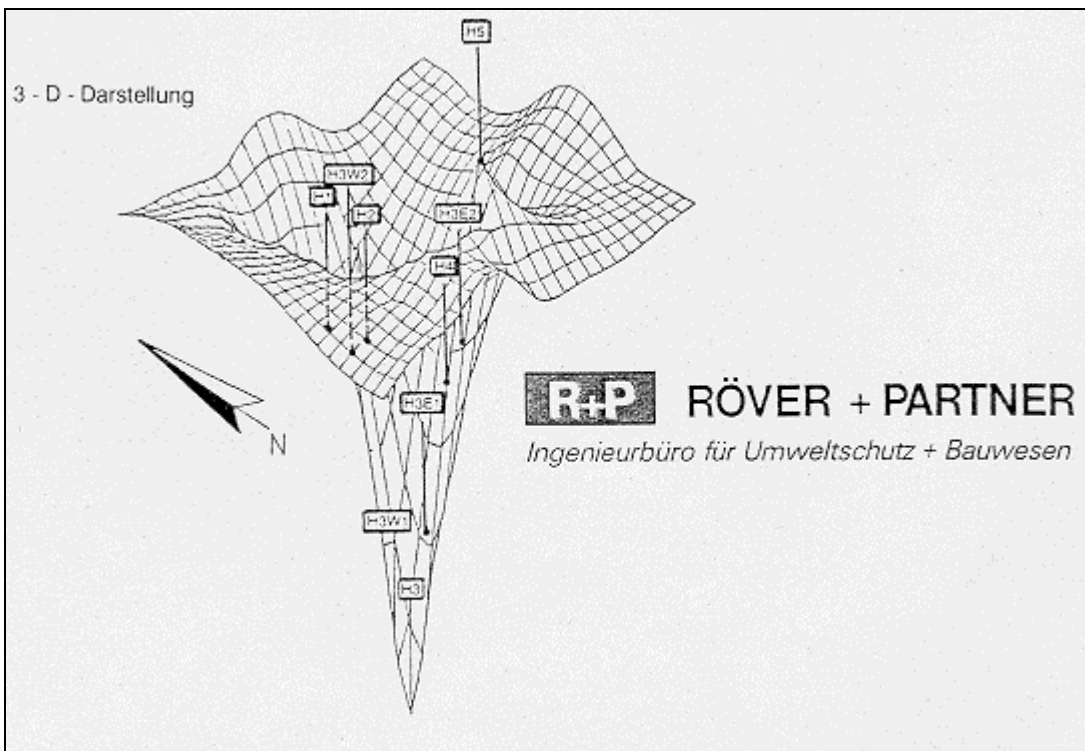


Abb. 25 3 - D - Darstellung

## Anlage 9: Durchführung von Faulversuchen mit Materialproben vom Modellstandort Mannheim

Die Versuche wurden am Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart durchgeführt.

### Probenahme:

An zwei 10 m voneinander entfernten Stellen der Altablagerung wurden Abfallproben aus einer Tiefe von 0,7 bis 4,7 m entnommen und zu einer Mischprobe von ca. 25 l vermengt. Das Material wurde luftdicht verpackt und zur Untersuchung gebracht. Im Labor wurde mittels Hammermühle eine Zerkleinerung vorgenommen.

### Durchführung:

Um den Faulprozess schnell in Gang zu setzen, wurde das Ablagerungsgut mit Faulschlamm aus einem Klärwerk vermischt. Damit wurde gleichzeitig der Wassergehalt eingestellt.

Angesetzt wurden folgende Varianten:

- V1. Faulschlamm allein als Vergleich
- V2. 1000g Ablagerungsgut mit Faulschlamm auf 8 l aufgemischt
- V3. 2000g Ablagerungsgut mit Faulschlamm auf 8 l aufgemischt
- V4. 4000g Ablagerungsgut mit Wasser auf 8 l aufgemischt

Die Faulversuche wurden in Glaskolben mit 10 l Fassungsvermögen durchgeführt (siehe Abbildung). Das Substrat wurde ständig gerührt. Das sich entwickelnde Gas wurde abgeleitet und mengenmäßig über eine Gasuhr erfaßt. Gasproben wurden gaschromatographisch auf die Hauptkomponenten Methan, Kohlendioxid, Stickstoff und Sauerstoff analysiert.

Alle Versuche erfolgten im Dreifachansatz. Im folgenden sind nur die Mittelwerte dargestellt.

### Ergebnisse:

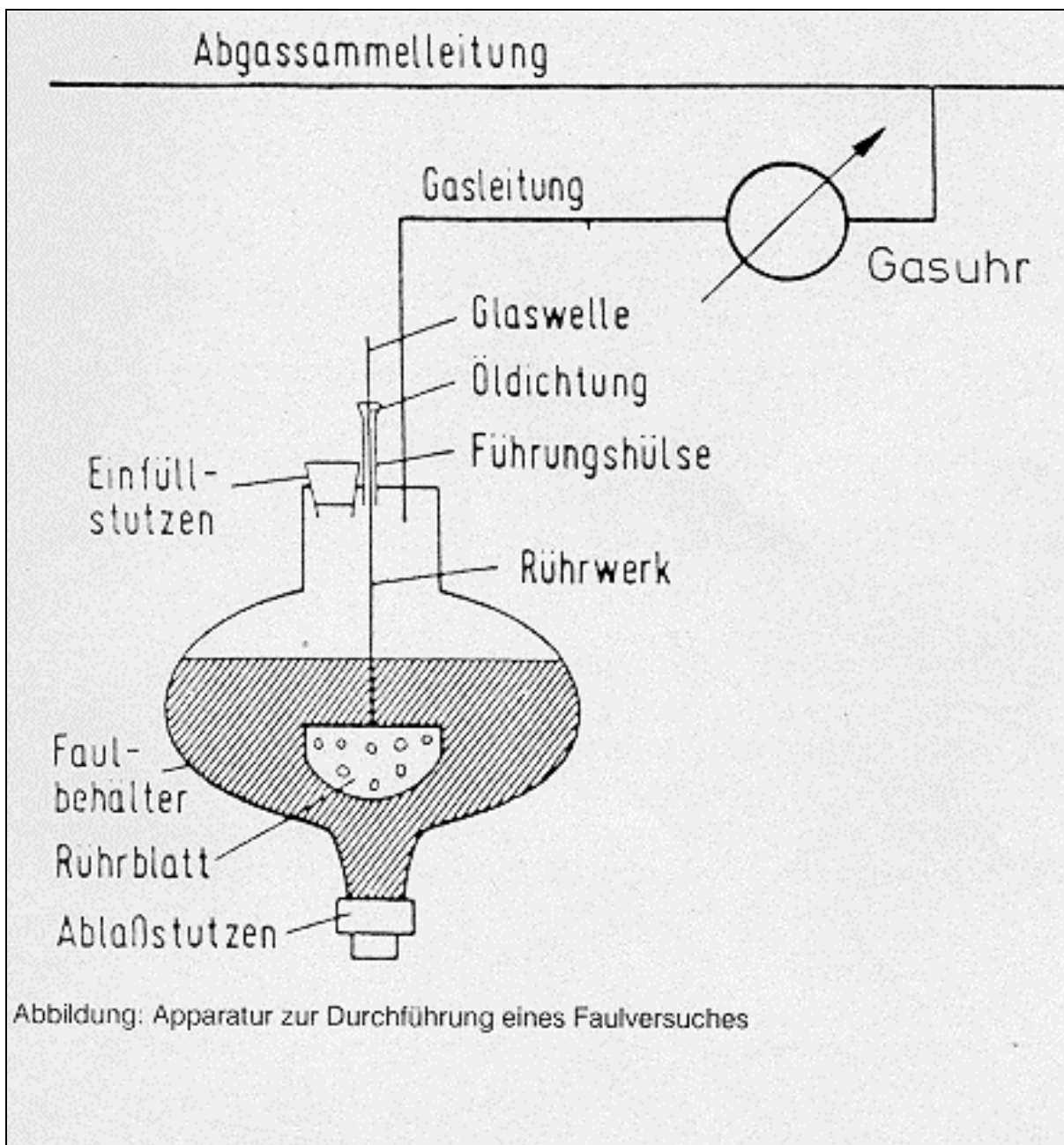
Das Ausgangsmaterial wies folgende Werte für die Parameter Wassergehalt (WG) und Glühverlust (GV) auf:

	WG in %		GV in %	
	vorher	nachher	vorher	nachher
V1	94,2	95,2	57,0	55,4
V2	83,0	84,0	48,6	43,6
V3	71,9	73,1	43,5	41,2
V4	59,4	60,2	21,4	20,1

Bezogen auf die obigen Parameter ergibt sich für

	Deponiegas in l/kg org.Substanz	Deponiegas bezogen auf Standardwerte nach IMHOFF in %
V1	57,9	12,9
V2	42,0	9,3
V3	41,6	9,2
V4	13,0	2,9

Das Material zeigt sich zwar grundsätzlich faulfähig, ergibt jedoch nur eine sehr geringe Gasausbeute. Darauf läßt auch der geringe Glühverlust des Ausgangsmaterials mit 21,4% schließen.



**Abb. 26** Apparatur zur Durchführung eines Faulversuches

## Anlage 10: Erläuterung zur Richt- und Grenzwerttabelle

Die folgende Tabelle ist eine Zusammenstellung gebräuchlicher Daten für das Schutzgut Luft. Es wurde versucht, Vergleichsdaten aus verschiedenen Quellen aufzunehmen. Ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht nicht.

Folgende Abkürzungen sind enthalten:

MAK 88 = Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen 1988

MAK 86 = Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen 1986

MIK k = Maximale Immissionskonzentrationen 1974, kurzfristig

MIK d = Maximale Immissionskonzentration 1974, dauernd

TRK = Technische Richtkonzentration für kanzerogene Stoffe

TLV = Threshold Limit Value/Timeweighted Average 8 Std.

STEL = Threshold Limit Value/Short - Term

Zitiert nach:

KOCH, R. (1986 und 1989) Referenzwerte für durchschnittliche Luftbelastung und MAK, UdSSR

MIK: - Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) - Richtlinien 2306, 2310

WHO: - Air Quality Guidelines for Europe, WHO Regional Publications, European Series No. 23

Neue Datenblätter für gefährliche Arbeitsstoffe nach der Gefahrstoffverordnung - WEKA - Fachverlag

BARKOWSKI, G. (1990): Altlasten. 2. Auflage, Verlag C.F.Müller

Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein - Westfalen:

Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten, Band 2;

Anwendbarkeit von Richt- und Grenzwerten aus Regelwerken anderer Anwendungsbereiche bei der Untersuchung und sachkundigen Beurteilung von Altablagerungen und Altstandorten.

Quelle	Grenzwertart	Methan	Schwefelwasserstoff	Benzol	Toluol	Xylol	Phenol	P-Dichlorbenzol	Hexachlorbenzol	Nitrobenzol
	MAK 88	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
	MAK 86	15	10 (*)	5	380	4,40	19	450		5
	MIK k				200	50	0,3			30
	MIK d				60	60	55			0,75
VDI				3	20	20	20			0,15
WHO	Immissionswert		0,15		8					
	Geruchsschwelle		0,007		1					
USA	ländlich			<0,01				<0,17	<0,002	
	städtisch			<0,05				<0,6	>57	
	Umfeld spez. Produktion			<10						
	TLV (8 Std.-Mittel)				375		19			5
	STEL (Maximal)				560		38			10
* = TRK-Wert										
Quelle	Grenzwertart	Vinylchlorid	Benzo (a) pyren	Anthräcen	Fluoranthen	Dichlor-methan	Trichlor-methan	Tetrachlor-methan	1,2-Dichlor-ethan	1,2-Dichlor-ethen
	MAK 88	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
	MAK 86	8*)				360	50	65	400	790
	MIK k	30				55	50	65	80	
	MIK d					20	30	10	25	
VDI						3	10	3	8	
WHO	Immissionswert									
	Geruchsschwelle									
USA	ländlich	<0,001	<0,002		<0,0002					
	städtisch	ca. 11	ca. 0,04	ca. 0,0007	ca. 0,46					
	Umfeld spez. Produktion						50			
	TLV (8 Std.-Mittel)	ca. 250					225			
	STEL (Maximal)	10								

Abb. 27 Richt- und Grenzwerttabelle

## Anlage 11: Allgemeine Hinweise zu den ortsbezogenen Faktoren

Bei der Ermittlung der Zu- und Abschläge ist der jeweilige Stand der Erkundung (entweder die historische Erkundung oder die technische Erkundung) maßgebend; d.h. die Zu- und Abschläge aus den einzelnen Erkundungsstufen dürfen nicht addiert werden.

Zu Beginn, während und nach der Deponiegasmessung ist der Luftdruck festzuhalten. Das Steigen bzw. Fallen des Luftdrucks ist bei der Bewertung zu berücksichtigen. Gegebenenfalls sind die Gasmessungen bei anderen Witterungsverhältnissen zu wiederholen.

### Ortsbezogene Faktoren $m_I$ - $m_{IV}$

#### 1. Schadstoffaustrag $m_I$

Für die Betrachtung der Faktoren, die den Gasaustrag erhöhen bzw. vermindern werden 4 Höhenklassen der Auffüllung zugrunde gelegt.

Höhenklasse 1	=	bis 2 m
Höhenklasse 2	=	2 - 5 m
Höhenklasse 3	=	5 - 10 m
Höhenklasse 4	=	> 10 m

Tabelle zur Ermittlung von  $m_I$

Volumen	< 10 000 m <sup>3</sup>				10 000-100 000 m <sup>3</sup>				> 100 000 m <sup>3</sup>			
trocken	0,5	0,6	0,7	0,8	0,6	0,7	0,8	0,9	0,7	0,8	0,9	1,0
feucht	0,6	0,7	0,8	0,9	0,7	0,8	0,9	1,0	0,8	0,9	1,0	1,1
naß	0,7	0,8	0,9	1,0	0,8	0,9	1,0	1,1	0,9	1,0	1,1	1,2
Höhenklasse	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4

Für  $m_I$  sind keine Zu- und Abschläge vorgesehen.

#### 2. Schadstoffeintrag/Transport $m_{II}$

##### a) Schadstofftransport zu einem Gebäude (Raumluft)

Lage des Gebäudes auf bzw. am Rand der Altlast

Abdeckung mit bindigem Material (Lehm, Schluff usw.)

> 5 m	--> $m_{II}=0,9$
2 - 5 m	--> $m_{II}=1,0$
< 2 m	--> $m_{II}=1,1$

Abdeckung mit rolligem Material (Kies, Sand usw.)

> 5 m	--> $m_{II}=0,7$
2 - 5 m	--> $m_{II}=0,8$

< 2 m -->  $m_{II}=0,9$

### Zu- und Abschläge aufgrund der Lage und Art der Gebäude nach historischer Erkundung

#### Gründungsart:

Aufgestellt, Flachgründung und Ringdrainagen aus gut durchlässigem Material	+0,0
- Flachgründung ohne Ringdrainagen	+0,1
- Streifenfundament	+0,2
- Fundament mit Keller	+0,3
- Keller mit Gaswegsamkeiten (z.B. Naturstein oder Boden)	+0,5

#### Abstand Gebäude zu Altlast:

- ≤ 50 m	-0,1
- ≤ 100 m	-0,2
- > 100 m	-0,3

### Zu- und Abschläge aufgrund der Meßergebnisse (aus technischer Erkundung E<sub>1-3</sub>)

#### Methan-/Kohlendioxid- Konzentration außerhalb und unmittelbar an Gebäuden/Räumen

- n.n.	-0,6
- < 2 Vol %	-0,2
- 2 - 5 Vol %	-0,1
- 5 - 10 Vol %	+0,1
- 10 - 20 Vol %	+0,2
- 20 - 40 Vol %	+0,3
- Methan > 40 Vol %	+0,5
- Spurengaskonzentration ca. 0,5 x MAK-Wert	+0,3
- Spurengaskonzentration ca. MAK-Wert	+0,5
- Spurengaskonzentration > MAK-Wert	+0,7

#### Methan-/Kohlendioxid- Konzentration innerhalb von Gebäuden/Räumen

- n.n.	-0,6
- < 0,5 Vol %	+0,1
-0,5 - 2 Vol %	+0,3
-2 - 5 Vol %	+0,6
-> 5 Vol %	+0,7
- Spurengaskonzentration ca. 0,1 x MAK-Wert	+0,3
- Spurengaskonzentration ca 0,5 x MAK-Wert	+0,5
- Spurengaskonzentration > MAK-Wert	+0,7

#### b) Schadstofftransport in die Atmosphärenluft

#### Abdeckung mit bindigem Material:

- > 5 m	--> $m_{II}=0,7$
-2 - 5 m	--> $m_{II}=0,8$
-< 2 m	--> $m_{II}=0,9$

## Abdeckung mit rolligem Material

-> 5 m	--> $m_{II}=0,9$
- 2 - 5 m	--> $m_{II}=1,0$
- < 2 m	--> $m_{II}=1,1$

## Zu- und Abschläge

Die nachfolgend genannten Meßwerte beziehen sich auf Methan.

- Geländeoberfläche mit Rissen oder Spalten	+0,1 bis 0,3
- Geländeoberfläche mit Versiegelungsgrad > 50 %	+0,2

**Oberflächennahe Meßergebnisse aus der technischen Erkundung  $E_{1,3}$  (FID):**

- n.n.	- 0,3
- < 100 ppm	- 0,1
- 100 - 1000 ppm	+0,1
- 1000 - 3000 ppm	+0,2
- > 3000 ppm	+0,5

3. Schadstoffwirkung  $m_{III}$ 

## a) Schadstoffwirkung in einem Gebäude (Raumluft)

- Ergeben die Gasmessungen keinen Eintrag	--> $m_{III}=1,0$
- gut belufte Räume (Holzschuppen,Zwangsbelufung usw.) oder Gaswarngeräte installiert	--> $m_{III}=1,0$
- Räume mit ständigem Luftaustausch durch bauliche Beschaffenheit (undichte Fenster usw.)	--> $m_{III}=1,1$
- Räume mit geringem Luftaustausch (wenig Fenster, selten genutzt usw.)	--> $m_{III}=1,3$

## b) Schadstoffwirkung in der Atmosphärenluft

- breitflachiger Austritt in die Atmosphäre mit geringer Verteilungsmoglichkeit (Muldenlage)	--> $m_{III}=1,0$
- breitflachiger Austritt in die Atmosphäre mit Verteilungsmoglichkeit (ebene Lage)	--> $m_{III}=0,9$
- breitflachiger Austritt in die Atmosphäre mit guter Verteilungsmoglichkeit (exponierte Lage)	--> $m_{III}=0,8$

## 4. Bedeutung des Schutzgutes

## a) Schutzgut Raumluft

- alle "begehbaren Räume" Schächte, Kriechkeller	--> $m_{IV}=1,3$
---	------------------

## b) Schutzgut Atmosphärenluft

- vom Menschen genutzte Flächen (Sportanlagen, Grill-, Zeltplatze, vergleichbare Anlagen und Kleingartenanlagen)	--> $m_{IV}=1,3$
- keine vom Menschen genutzte Fläche	--> $m_{IV}=1,0$



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Zusammensetzung des Deponiegases während der einzelnen Abbaustufen (FARQUHAR et al., 1973) .....	6
Abb. 2 Gasprognose für eine Altablagerung mit 10 000 t für 2 Parameterkombinationen. Es sind nur die Werte für die Gasproduktion in m <sup>3</sup> /h nach Deponieabschluß berücksichtigt .....	14
Abb. 3 Abhängigkeit der austretenden Gasmenge vom Luftdruck, gemessen an einer künstlich geschaffenen Gasaustrittsöffnung (RETTENBERGER et al., 1982) .....	21
Abb. 4 Charakteristische Temperaturprofile eines Bodens im Februar und August (RICHTER, 1986) .....	22
Abb. 5 Abbaugeschwindigkeit verschiedener Stoffe .....	24
Abb. 6 Deponiegas - Langzeitkonzentrationsverlauf bei Altablagerungen .....	27
Abb. 7 Beispiel eines Porengasgradienten an einer in Betrieb befindlichen Deponie (RETTENBERGER et al., 1982) .....	34
Abb. 8 Temporäre tiefendifferenzierte Gasmessstelle - Standardausbau mit Vorsondierung ...	37
Abb. 9 Temporäre Gasmessstelle - Standardausbau mit Vorsondierung .....	38
Abb. 10 Beeinflussung der Porengaskonzentration in unterschiedlichen Tiefen durch Luftdruckschwankungen am Modellstandort Mannheim (RÖVER & Partner/TAUW Infra Consult: Modellstandort Mannheim, Bericht Oktober 1990) .....	42
Abb. 11 Prinzipieller Verlauf von Einzugsbereichen an Kollektoren .....	44
Abb. 12 Schematische Darstellung der Herkunft und Entstehung von Spurenkomponenten im Deponiegas .....	48
Abb. 13 Schematischer Aufbau einer Lemberger Box (RETTENBERGER, 1982b) .....	54
Abb. 14 Gasspürgerät mit FID im Feldeinsatz .....	57
Abb. 15 Charakteristische Konzentrationsverläufe ausgewählter Sickerwasserinhaltsstoffe (EHRIG, 1982) .....	62
Abb. 16 Vergleich von atmosphärischem Druck und Deponiedruck gemessen am Modellstandort Mannheim (RÖVER & Partner/TAUW Infra Consult Modellstandort Mannheim, Bericht 1990) .....	67
Abb. 17 Temperaturverlauf in den Gaskollektoren während des Absaugversuchs am Modellstandort Osterhofen; (TECHNOLOGIEBERATUNG GRUNDWASSER UND UMWELT: Modellstandort Osterhofen, Bericht 1990) .....	70
Abb. 18 Probenentnahme durch indirekte Absaugung .....	78
Abb. 19 Ablaufschema der Erkundung des Deponiegaspfadens .....	83
Abb. 20 Stoffgefährlichkeit $r_0$ in Abhängigkeit von der Phase bzw. vom Konzentrationsverhältnis des Deponiegases .....	84
Abb. 21 Mögliche Ausbreitungswege für Deponiegas zum Schutzgut Atmosphäre, Raumluft und Grundwasser bei unterschiedlicher Gründungsart und Lage zur Altlast .....	91
Abb. 21 Tabellarische Darstellung: Ermittlung eines repräsentativen Rasters bei Sondenmessungen .....	122
Abb. 23 Modellstandort Mannheim, Lage der Gasentnahmestelle und der Beobachtungsstellen .....	123
Abb. 24 Isolinien - Darstellung der an den Manometern in [ml] abgelesenen Druckdifferenzen .....	124
Abb. 25 3 - D - Darstellung .....	124
Abb. 26 Apparatur zur Durchführung eines Faulversuches .....	126
Abb. 27 Richt- und Grenzwerttabelle .....	128

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Gesamtgasproduktionspotential von Hausmüll, Ergebnisse aus Laborversuchen .....	8
Tab. 2 Zuordnung der Merkmale zu den Klassen.....	30
Tab. 3 Wertetabelle für die Typisierung.....	31
Tab. 4 Wertetabelle für die Typisierung des Modellstandortes Osterhofen bezogen auf das Jahr 1991 .....	32
Tab.5 Übersicht über verschiedene Gasmessstellen .....	39
Tab. 6 Gaskonzentrationsmessungen vor und nach dem Absaugversuch am Modellstandort Osterhofen .....	46
Tab. 7 Spurenstoffkonzentrationen bei Sondenmessung, nach dem Absaugversuch und in einer Gasbox am Modellstandort Osterhofen; (TECHNOLOGIEBERATUNG GRUNDWASSER UND UMWELT: Modellstandort Osterhofen, Bericht 1990) .....	52
Tab. 8 Konzentrationen von BTX und LCKW/FCKW im Deponiegas und Kondensat von zwei ausgewählten Gasentnahmestellen am Modellstandort Mannheim; (RÖVER & Partner/TAUW Infra Consult: Erkundung des Modellstandorts Mannheim, Bericht Okt. 1990).....	65
Tab. 9 Schematische Übersicht zum Vorgehen bei Raumlufmessungen .....	75
Meßverfahren für die Gasanalyse: Methannachweis.....	79
Meßverfahren für die Gasanalyse: Kohlendioxidnachweis .....	79
Meßverfahren für die Gasanalyse: Sauerstoffnachweis.....	80
Meßverfahren für die Gasanalyse: Stickstoffnachweis.....	80
Tab. 10: Zuschläge für Spurenstoffe zur Ermittlung der Stoffgefährlichkeit $r_0$ .....	86
Tab. 11 Beispiele für Sofortmaßnahmen bei der Erkundung des Schutzgutes Luft.....	87

## Indexverzeichnis

<b>A</b>		Typisierung .....28, 105, 112
aromatische Kohlenwasserstoffe (BTXE-Aromaten)		Vegetationsbeeinträchtigungen ..... 88
Deponiegas ..... 48		Zusammensetzung..... 6
<b>D</b>		Deponiegasentstehung
Deponiegas		aerobe Phase.....6
aromatische Kohlenwasserstoffe (BTXE-Aromaten)..... 48		Allgemeines ..... 6
Atmosphäre..... 5		Gasmengenabschätzung ..... 8
Ausbreitungswege..... 91		Gaspotential ..... 8
Definition..... 3		Gasprognose..... 11, 14
eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/ Sanierungsvorplanung (E3-4) ..... 92		Gesamtgasproduktionspotential ..... 8
Erfassungsbogen ..... 112		instabile Methanphase.....7
Erkundungsstrategie ..... 81		Kohlendioxidphase ..... 26
Erstickungsgefahr ..... 4		Langzeitkonzentrationsverlauf..... 26
Explosionsgefahr ..... 3		Langzeitphase..... 24
Fallbeispiele..... 31, 93, 94		Langzeitverhalten ..... 23
Faulversuch..... 125, 126		Lufteindringphase ..... 25
Gasprobe ..... 78		Luftphase..... 26
Gefährdungsabschätzung ..... 28		Methanoxidationsphase..... 25
Geruchsbelästigungen ..... 88		reale Deponien ..... 7
Gesundheitsgefahren..... 4		saure Gärung ..... 7
halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW, CKW) ..... 48		stabile Methanphase..... 7, 24
historische Erkundung ..... 88		Deponiegaserkundung
Langzeitkonzentrationsverlauf ..... 26		Ablaufschema..... 82
Literatur ..... 100		Absaugeinrichtung/Fördereinrichtung 45
Modellstandort Bitz ..... 76, 104		Absaugversuch ..... 43, 123
Modellstandort Herten ..... 61, 104		Beobachtungsstellen..... 44
Modellstandort Mannheim40, 41, 47, 51, 55, 58, 61, 65, 66, 72, 103, 123, 125		besondere Merkmale ..... 88
Modellstandort Osterhofen31, 40, 46, 52, 56, 59, 69, 103		Bodenluftabsaugung..... 43
ortsbezogene Faktoren ..... 129		Deponiegaspfad..... 82
Probenahme ..... 76		Deponiegasspurenstoffe ..... 47, 48
Richt- und Grenzwerttabelle..... 127		Druckmessung..... 123
Schutzgut Atmosphäre..... 91		Erfassungsbogen ..... 112
Schutzgut Grundwasser ..... 91		FID ..... 57
Schutzgut Raumluft ..... 91		Flammenionisationsdetektor (FID) .... 56
Sofortmaßnahmen..... 74, 87		Gasanalytik..... 76
Spurenstoffe..... 4		Gasbox ..... 50, 53
Stoffgefährlichkeit r0..... 83, 84, 85		Gasdruckmessung ..... 65
technische Erkundung..... 89		Gasemissionsmessung..... 33
		Gasentnahmestelle ..... 44
		Gaskollektor ..... 44, 50
		Gaskonzentrationsmessung..... 34
		Gasmengenmessung ..... 53
		<u>Gasmeßstelle</u> ..... 36
		Gassonde ..... 50
		Gasspürgerät..... 56, 57, 59
		Handlungsanweisung ..... 81

Kondensat- und Sickerwasseranalytik	61	Druckmessung.....	123
Materialuntersuchung .....	70	Erfassungsbogen .....	112
Meßtechnische Einrichtung .....	45	FID .....	57
Photoionisationsdetektor (PID) .....	59	Flammenionisationsdetektor (FID) .....	56
Porengaskonzentrationsmessung .....	33	Gasanalytik.....	76
Raumluftmessung .....	72, 74	Gasbox .....	50, 53
Schutzgut Atmosphäre.....	82	Gasdruckmessung .....	65
Schutzgut Raumluft .....	81	Gasemissionsmessung.....	33
Sonden .....	44	Gasentnahmestelle .....	44
Sondenmessung .....	34, 121	Gaskollektor.....	44, 50
Sonderuntersuchung .....	33, 61	Gaskonzentrationsmessung.....	34
Temperaturmessung.....	68	Gasmengenmessung.....	53
Untersuchungsmethoden .....	33	<u>Gasmeßstelle</u> .....	36
Versuchsdauer .....	45	Gassonde .....	50
vorhandene Erkenntnisse .....	88	Gasspürgerät.....	56, 57, 59
Deponiegashaushalt		Handlungsanweisung .....	81
Abdichtung - Abdeckung.....	22	Kondensat- und Sickerwasseranalytik	61
Aufbau des Deponiekörpers .....	20	Materialuntersuchung.....	70
Außentemperatur .....	21	Meßtechnische Einrichtung.....	45
externe Faktoren .....	20	Photoionisationsdetektor (PID).....	59
Gasableitung .....	15	Porengaskonzentrationsmessung .....	33
Gasabsorption .....	16	Raumluftmessung .....	72, 74
Gasadsorption .....	16	Schutzgut Atmosphäre .....	82
Gasumwandlung .....	16	Schutzgut Raumluft .....	81
Grundwasserstand - Wasserzutritte ....	22	Sonden.....	44
Luftdruck und Wind .....	20	Sondenmessung.....	34, 121
Methanoxidation.....	16	Sonderuntersuchung.....	33, 61
Milieubedingungen .....	17	Temperaturmessung .....	68
Nährstoff- und Substratangebot.....	19	Untersuchungsmethoden.....	33
Niederschlag .....	21	Versuchsdauer .....	45
pH - Wert, Puffersystem .....	19	vorhandene Erkenntnisse .....	88
Temperatur.....	18	Erstickungsgefahr.....	4
toxische Stoffkonzentrationen .....	19	Explosionsgefahr.....	3
Wassergehalt.....	17	<b>F</b>	
Wassertransport .....	18	Fallbeispiele	
Deponiegasspurenstoffe.....	47, 48	Deponiegas.....	31, 93, 94
<b>E</b>		FID .....	56
eingehende Erkundung für		Flammenionisationsdetektor (FID) ...	56, 57
Sanierungsmaßnahmen/		<b>G</b>	
Sanierungsvorplanung (E3-4)		Gasableitung.....	15
Deponiegas .....	92	Gasabsorption .....	16
Erkundung Deponiegas		Gasadsorption .....	16
Ablaufschema .....	82	Gasanalytik	
Absaugeinrichtung/Fördereinrichtung	45	Allgemeines .....	76
Absaugversuch.....	43, 123	Kohlendioxid.....	79
Beobachtungsstellen .....	44	Methan .....	79
besondere Merkmale.....	88	Sauerstoff .....	80
Bodenluftabsaugung .....	43	Stickstoff .....	80
Deponiegaspfad .....	82	Gasbox .....	50, 53
Deponiegasspurenstoffe.....	47, 48	Gasdruckmessung .....	65

Gaskollektor.....	50	Allgemeines .....	61, 104
Gasmengenmessung .....	53	Deponiegas.....	61, 104
Gassonde.....	50	Modellstandort Mannheim	
Gasspürgerät .....	56, 57	Allgemeines	47, 51, 55, 58, 61, 65, 66, 72, 103, 123, 125
Gasumwandlung .....	16	Deponiegas	40, 41, 47, 51, 55, 58, 61, 65, 66, 72, 103, 123, 125
<b>H</b>		Modellstandort Osterhofen	
Halarbeutel.....	50	Allgemeines ..	31, 46, 52, 56, 59, 69, 103
halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW, CKW)		Deponiegas	31, 40, 46, 52, 56, 59, 69, 103
Deponiegas .....	48	<b>P</b>	
historische Erkundung		Probennahme	
Deponiegas .....	88	Deponiegas.....	76
<b>L</b>		<b>R</b>	
Lemberger Box .....	54	Raumluftmessung .....	72, 74
Lindebeutel .....	50	Richt- und Grenzwerttabelle	
Literatur		Deponiegas.....	127
Deponiegas .....	100	<b>T</b>	
<b>M</b>		technische Erkundung	
Methanoxidation.....	16	Deponiegas.....	89
Modellstandort Bitz		Tedlarbeutel .....	50
Allgemeines .....	76, 104		
Deponiegas .....	76, 104		
Modellstandort Herten			