

**Leitfaden**

## **Methanoxidationsschichten**

Erstellt im Rahmen der ÖVA-Arbeitsgruppe  
„Leitfaden Methanoxidationsschichten“

Wien, Oktober 2008

Leitfaden

# Methanoxidationsschichten

Leitung: Marion Huber-Humer

Autoren (in alphabetischer Reihenfolge): Andreas Amann, Tobias Bogolte, Maria Dos Santos, Isolde Hagenauer, Marion Huber-Humer, Wolfgang Pauliny, Thomas Reichenauer, Andrea Watzinger, Bernhard Wimmer

Beiträge von (in alphabetischer Reihenfolge): Friedrich Gartner, Christian Gikopoulos, Günter Gretzmacher, Peter Lechner, Robert Philipp

## Kurzzinhalt:

In diesem Leitfaden wird der derzeitige Stand des Wissens und der Technik, basierend auf aktuellen Forschungsergebnissen wie auch bereits vorhandenen Praxiserfahrungen, für die Anwendung, den technischen Aufbau und das Monitoring von Methanoxidationsschichten auf Altablagerungen dargestellt.

## Vorwort

Die Vielfalt der Anforderungen an die Sanierung von Altlasten generiert einen Bedarf an innovativen technischen Verfahren bzw. erfordert eine Adaptierung etablierter Betriebsweisen. Voraussetzung für den Einsatz von neuen Technologien ist jedoch die Demonstration und Dokumentation ihrer Funktion sowie der dazugehörigen Einsatzbedingungen. Fehlende praktische Erfahrung sowie mangelhafte technische Beschreibung von Neuentwicklungen wirken sich üblicherweise prohibitiv auf die Anwendung von innovativen Verfahren aus.

Das vorrangige Ziel von ÖVA-Leitfäden ist deshalb die Beurteilung und Dokumentation des Entwicklungsstandes von Sanierungsverfahren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Einsatzgrenzen um damit einer erfolgreichen Anwendung den Weg zu ebnet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf innovativen, kosteneffizienten und nachhaltigen Sanierungsverfahren.

Hier wird ein Leitfaden präsentiert, der weltweit erstmalig den Stand der Technik zur Erstellung von Methanoxidationsschichten fasst und Anwendungsrichtlinien einem interessierten Fachpublikum international zugänglich macht. Damit wird ein wesentlicher Grundstein zur Emissionsreduktion dieses hochwirksamen Treibhausgases gelegt und somit ein Beitrag zur Verminderung einer der größten Bedrohungen unserer fragilen Umwelt geleistet.

Tulln, 4. Dezember 2008  
Andreas P. Loibner  
Leitung Technische Leitfäden

# INHALTSVERZEICHNIS

## ABKÜRZUNGEN UND UMRECHNUNGSFAKTOREN

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>BEGRIFFSBESTIMMUNGEN</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>WISSENSCHAFTLICHE – TECHNISCHE - RECHTLICHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>3</b>
3.1	Grundlagen der Methanoxidation.....	3
3.2	Entwicklungsstand / Stand der Technik .....	3
3.3	Bestehende Normen und Verordnungen .....	4
<b>4</b>	<b>BESTANDSAUFNAHME DER ALTABLAGERUNG</b> .....	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>EINSATZBEREICHE UND EINSATZRANDBEDINGUNGEN (ERB)</b> .....	<b>6</b>
5.1	Eigenschaften der abgelagerten Abfälle – Gasbildungspotential .....	7
5.2	Geometrie und Standort der Ablagerung .....	7
5.3	Verfahrenskombinationen .....	8
<b>6</b>	<b>VORVERSUCHE</b> .....	<b>9</b>
6.1	Ziel der Vorversuche .....	9
6.2	Untersuchung der Methanoxidationskapazität eines Substrates im Labor.....	9
6.3	Untersuchung der Luftdurchlässigkeit von Methanoxidationsschichten im Labor .....	10
6.4	Erhebung der Gasemissionssituation der Ablagerung .....	10
<b>7</b>	<b>VERFAHRENSBESCHREIBUNG</b> .....	<b>12</b>
7.1	Aufbau und Ausführung von Methanoxidationsschichten .....	12
7.2	Anforderungen an die Gasverteilungsschicht .....	13
7.3	Anforderungen an die Oxidationsschicht .....	13
7.3.1	<i>Anforderung an das Substrat</i> .....	13
7.3.2	<i>Dimensionierung und Aufbau</i> .....	14
7.4	Empfehlungen für die Ausführung kritischer Bereiche.....	15
7.5	Instandhaltungsmaßnahmen.....	16
7.6	Bepflanzung und Erosionsschutz.....	16
7.7	Sanierungsdauer .....	17
7.8	Erreichbare Restemissionen .....	17
7.9	Qualitätssicherung .....	17
7.9.1	<i>Qualitätssicherung bei der Herstellung</i> .....	17
7.9.2	<i>Folgemonitoring</i> .....	18
7.10	Kosten.....	19
<b>8</b>	<b>MONITORING</b> .....	<b>20</b>
<b>9</b>	<b>NUTZUNG / NACHNUTZUNG</b> .....	<b>22</b>
9.1	Nutzungspotentiale während der Sanierung / Sicherung .....	22
9.2	Nutzungspotentiale nach der Sanierung / Sicherung .....	22
9.3	Beispiele für erfolgreichen Einsatz.....	22
<b>10</b>	<b>AUSBLICK - INTERNATIONALE ANWENDBARKEIT</b> .....	<b>23</b>

<b>11</b>	<b>REFERENZEN .....</b>	<b>24</b>
<b>12</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>27</b>
12.1	Laborversuch zur Bestimmung der Methanabbaukapazität von Substraten .....	27
12.2	Bestimmung des luftgefüllten Porenvolumens innerhalb der Versuchssäulen (LPV) .....	30
12.3	Bestimmung der Luftdurchlässigkeit bzw. Luftpermeabilität .....	30
12.4	Dimensionierungsbeispiel zu Kapitel 7.1 .....	31
12.5	Information zur Bepflanzung von Methanoxidationschichten und –fenster (Kapitel 7.6) ....	32
12.6	Tabelle AH-2: Erreichbare Restemissionen .....	33
12.7	Tabelle AH-3: Österreichische Anwendungsbeispiele und Kosten .....	34
12.8	Abbau und Bildung von Spurengasen in Methanoxidationsschichten .....	36
12.9	Überlegungen zum optionalen Feststoffmonitoring des Abfallkörpers .....	37

## ABKÜRZUNGEN UND UMRECHNUNGSFAKTOREN

AT <sub>4</sub> bzw. AT <sub>7</sub>	Atmungsaktivität gemessen in 4 bzw. 7 Tagen
BTX	Benzol, Toluol, Xylol
ERB	Einsatzrandbedingungen
FID	Flammen-Ionisations-Detektor
FM	Feuchtmasse
FT-IR	Fourier Transformation-Infrarotspektrometrie
GS bzw. GS <sub>21</sub>	Gasbildung gemessen im Inkubationsversuch (bei Versuchsdauer von 21 Tagen)
GV	Glühverlust
GW	Grundwasser
HKW	Halogenkohlenwasserstoffe
KS	Klärschlamm
KSK	Klärschlammkompost
KW	Kohlenwasserstoffe
LPV	luftgefülltes Porenvolumen
M-%	Masseprozent
MOS	Methanoxidationsschicht
NDIR	nichtdispersive Infrarot-Absorbtion
NS	Niederschlag
ppm	parts per million (1 : 1 000 000)
SIWA	Sickerwasser
TOC	Total Organic Carbon (= gesamter organischer Kohlenstoff)
TM	Trockenmasse
VOC	Volatile Organic Compounds (= flüchtige organische Verbindungen)
WG	Wassergehalt
WHK	Wasserhaltekapazität

Umrechnungsfaktoren für Methan Liter ↔ Gramm:

Bei Normalbedingungen (0°C, Luftdruck 1,01325 bar): 1g CH<sub>4</sub> = 1,4 Liter; 1 Liter CH<sub>4</sub> = 0,714 g  
Bei Standardbedingungen (20°C, Luftdruck 1,01325 bar): 1g CH<sub>4</sub> = 1,5 Liter; 1 Liter CH<sub>4</sub> = 0,654 g

# 1 EINLEITUNG

Methanemissionen aus Deponien und Altablagerungen stellen weltweit eine wesentliche Treibhausgasquelle dar (EEA, 2006; US-EPA, 2006). Relevante Emissionen treten bei unzureichender Gaserfassung in der Betriebsphase von Deponien, in denen Abfälle mit hohen biologisch abbaubaren Anteilen abgelagert werden bzw. wurden, auf, besonders dann wenn noch keine adäquate Oberflächenabdeckung vorhanden ist. Die Praxis zeigt bei solchen Deponien immer wieder, dass auch in der Stilllegungs- und Nachsorgephase Entgasungs- und Fackelsysteme aufgrund der schwankenden Gasqualitäten und rückläufigen Gasproduktion oft abschalten, und dann das Deponiegas ungehindert in die Atmosphäre entweicht. Auch Altablagerungen, bei denen keine Maßnahmen zur Gaserfassung getroffen wurden, können beträchtliche Mengen Methan emittieren, hauptsächlich dann, wenn durch ungünstige Ablagerungsbedingungen die organische Substanz nicht zügig abgebaut werden konnte. Vor allem im Hinblick auf den Klimaschutz - Methan hat die 25-fache Treibhauswirksamkeit von CO<sub>2</sub> für einen Beobachtungszeitraum von 100 Jahren (IPCC, 2007) - ist in jedem Fall Handlungsbedarf gegeben.

Eine kosteneffiziente und rasch anwendbare Möglichkeit zur Emissionsminimierung stellt die Forcierung der mikrobiellen Oxidation von Methan in hierfür geeigneten Abdeckschichten (Methanoxidationsschichten) dar.

In dem vorliegenden Leitfaden wird der Stand des Wissens und der Technik von Methanoxidationsschichten dokumentiert. Der Leitfaden soll vor allem eine Entscheidungshilfe für Amt sachverständige, Planer sowie ausführende Baufirmen bieten, ob und in welcher Form Methanoxidationsschichten für einen gegebenen Anwendungsfall eine geeignete Maßnahme darstellen. Wesentliche Kriterien und wichtige technische Vorgaben wurden festgelegt. Ansonst werden Hilfestellungen in Form von Empfehlungen und Ausführungsbeispielen gegeben, damit für eine anwendungsfallorientierte und standortangepasste Ausgestaltung von Methanoxidationsschichten der notwendige Freiraum bleibt.

Dieser Leitfaden ist in erster Linie für die Anwendung von Methanoxidationsschichten auf Altablagerungen ausgerichtet. Die inhaltliche Anwendbarkeit des Leitfadens für Siedlungsabfalldeponien (bzw. derartige Deponieabschnitte), die nach dem jeweiligen Stand der Technik errichtet wurden und sich in der Stilllegungsphase bzw. Nachsorge befinden, sowie für Deponien mit mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen, ist ebenfalls gegeben, sofern den Anforderungen der Deponieverordnung 2008 entsprochen wird.

## 2 BEGRIFFSBESTIMMUNGEN

### **Abbauaktives Substrat (methane oxidising material)**

Unter „abbauaktivem Substrat“ ist ein Boden- oder Kompostsubstrat (bzw. Mischungen derselben) zu verstehen, das optimale Bedingungen für die mikrobielle Methanoxidation bietet, methanabbauende Mikroorganismen trägt, und zum Zweck des Methanabbaues aufgebracht werden kann.

### **(Alt)ablagerung (old site, dump)**

In diesem Leitfaden werden unter Altablagerungen sämtliche anthropogene Anschüttungen von Feststoffen verstanden, von denen eine mögliche Gefährdung für Mensch, Umwelt und Klima ausgehen kann. Es sind in Betrieb befindliche sowie geschlossene, unbefugt erfolgte Ablagerungen als auch dem damaligen Stand der Technik entsprechende Deponien gemeint.

### **Exopolymere (Exopolimeric substances)**

Exopolymere sind klebrige Schleimabsonderungen (hauptsächlich Zuckerverbindungen), welche von methanoxidierenden Bakterien unter Stressbedingungen, v.a. unter Sauerstoffmangel und/oder Kohlenstoffüberschuss (zu hohe Methanbelastung), ausgeschieden werden und zu einem Verkleben der Bodenporen führen. Dadurch kann es zu einer zunehmenden Verschlechterung der Lebensbedingungen (Unterbindung der weiteren Sauerstoff- bzw. Methangaszufuhr, Hitzestau, Austrocknung, etc.) für die Methanoxidierer bis hin zum völligen Erliegen der Abbauaktivität kommen.

### **Rekultivierungsschicht (recultivation layer, top cover)**

Eine Rekultivierungsschicht für Deponien und Altablagerungen besteht aus einer ausreichend mächtigen Schicht von vegetationsfähigem Boden bzw. Substrat zur Förderung der geplanten Vegetation. Über die Wahl von Boden/Substrat und Bepflanzung ist eine Steuerung der Funktion einer Rekultivierungsschicht möglich:

#### **- Wasserhaushaltsschicht (Evapotranspiration cover)**

Eine Variante der Rekultivierungsschicht, die durch hohe Wasserspeicherkapazität und hohe Evapotranspirationsleistung der Einheit Boden/Substrat und Vegetation den Eintritt von Sickerwasser in die darunter liegende Altablagerung minimiert.

#### **- Methanoxidationsschicht (MOS) (Biocover)**

Eine Variante der Rekultivierungsschicht, die an der Basis durch eine Gasverteilungsschicht ergänzt ist. Die MOS hat die Funktion aus der darunter liegenden Altablagerung ausströmendes Methan durch Oxidationsprozesse zu eliminieren bzw. die emittierten Frachten zu vermindern.

#### **- Methanoxidationsfenster (bio-windows)**

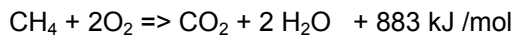
Abschnittsweise vorhandene Methanoxidationsschicht, üblicherweise in eine bestehende, meist dichte Oberflächenabdeckung eingebracht.



### 3 WISSENSCHAFTLICHE – TECHNISCHE - RECHTLICHE GRUNDLAGEN

#### 3.1 Grundlagen der Methanoxidation

Bei der mikrobiellen Methanoxidation wird Methan unter Vorhandensein von Sauerstoff von speziellen Mikroorganismen (sogenannten methanotrophen oder methanabbauenden Bakterien) unter Energiegewinn und Wärmeabgabe (exothermer Prozess) zu Wasser und Kohlenstoffdioxid bzw. mikrobieller Biomasse umgebaut (siehe folgende Summenformel für Veratmung).



Für die Oxidation eines Moleküls Methan sind zwei Moleküle Sauerstoff notwendig, es entsteht allerdings maximal ein gasförmiges Molekül, nämlich Kohlenstoffdioxid (Kohlenstoff wird teilweise in Biomasse eingebaut). Die daraus resultierende Volumenreduktion fördert das Nachströmen von Luftsauerstoff auch in größere Tiefen.

Umweltfaktoren, wie Temperatur, Feuchtegehalt der Deponieabdeckung, Methan- und Sauerstoffversorgung und das Vorhandensein von Nährstoffen (z.B. Phosphor, Stickstoff) wie auch Hemmstoffen (z.B. Ammonium oder Nitrit) können die Leistungsfähigkeit der methanotrophen Bakterien, sprich die Methanabbauraten, beeinflussen. Die Qualität des Trägersubstrates (Material der Deponieabdeckung) hat somit eine große Bedeutung für die Funktionstüchtigkeit einer Methanoxidationsschicht. Grobkörnige, gut strukturierte Materialien, die reich an stabiler organischer Substanz und Nährstoffen sind (z.B. Reifkomposte), bieten meist geeignete Lebensbedingungen für methanabbauende Mikroorganismen und somit gute Voraussetzungen für eine effiziente Methanoxidation.

In MOS können auch andere klima- und umweltrelevante Gase sowie geruchsintensive Komponenten abgebaut (z.B. H<sub>2</sub>S, VOCs) bzw. deren Bildung (z.B. N<sub>2</sub>O) eventuell begünstigt werden. Eine detailliertere Information dazu ist im Anhang zu finden (siehe Anhang 12.8).

#### 3.2 Entwicklungsstand / Stand der Technik

In den vergangenen Jahren wurden intensive Forschungsarbeiten zur Entwicklung von Methanoxidationsschichten und Biofiltern durchgeführt (z.B.: Humer und Lechner, 1999; Streese und Stegmann, 2003; Felske, 2003; Barlaz et al., 2004; Huber-Humer, 2004; Gebert und Gröngroft, 2006; Stern et. al., 2006). Mehrjährige Feldversuche und die seit einigen Jahren bestehende praktische Erfahrung im Betrieb von Methanoxidationsschichten auf einigen Deponien in Österreich (siehe Kapitel 9.3) zeigen, dass mit einem technischen Aufbau bestehend aus einer gut durchlässigen Gasverteilungsschicht und einer etwa 1,0 - 1,5 m mächtigen oxidationsaktiven Schicht auf Kompostbasis ganzjährig ein effizienter Methanabbau erreicht wird. Derzeit bestehen in Österreich einige, meist auf eine Laufzeit von 20 Jahren befristet genehmigte Methanoxidationsschichten auf Hausmülldeponien bzw. Hausmüllkompartimenten, die zusätzlich zu einer aktiven Entgasung ausgeführt wurden. Diese Oberflächenabdeckungen werden derzeit einem genauen Monitoring und einer detaillierten Dokumentation hinsichtlich Sickerwassermengen und Gasemissionen unterzogen. (Detaillierte Empfehlungen betreff des technischen Aufbaus siehe Kapitel 7.)

Internationale Untersuchungen zu Methanoxidationsschichten aus Deutschland, dem skandinavischen Raum, Kanada und den USA (z.B.: Wawra und Holfelder, 2003; Börjesson et al., 1998; Barlaz et al., 2004; Bogner et al., 2005; Zeiss, 2006; Cabral et al., 2007; Kjeldsen et al., 2007) weisen ebenso wie die österreichischen Erfahrungen darauf hin, dass ein möglichst homogener Gasfluss und eine gleichmäßige Durchlässigkeit innerhalb einer Methanoxidationsschicht eine der wichtigsten Voraussetzungen für einen effizienten Methanabbau sind.

### 3.3 Bestehende Normen und Verordnungen

Zurzeit bestehen in Österreich keine eigens auf die Ausführung von Methanoxidationsschichten ausgerichteten Normen oder Regelwerke. Den Einsatz und die Ausführung von Methanoxidationsschichten betreffende Vorgaben bzw. Einschränkungen sind allerdings in speziellen Paragraphen in einigen österreichischen Regelwerken zu finden.

Dazu zählt das **Altlastensanierungsgesetz** (ALSAG, BGBl. Nr. 299/1989 idF BGBl. I Nr. 40/2008), in dem in §2 definitiv festgehalten wird, dass bei der Ausführung von Oberflächenabdeckungen einschließlich Methanoxidationsschichten und Rekultivierungsschichten verwendete Abfälle der Altlastenbeitragspflicht unterliegen. Allerdings sind Rekultivierungsschichten und temporäre Oberflächenabdeckungen (die auch dem Zwecke der Methanoxidation dienen können) seit der Novelle 2008 von der Beitragspflicht ausgenommen, wenn sie gemäß Anhang 3, Punkt 4.5 bzw. 6.1 der Deponieverordnung 2008 (BGBl. II 39/2008) ausgeführt werden.

Auch kann unter Umständen bei der Verwendung von Komposten zur Herstellung einer Methanoxidationsschicht die in der **Kompostverordnung** (BGBl. II 292 / 2001) in §6 (3) geforderte Gesamt-Kompostaufbringungsmenge hinsichtlich Aufbringung einer Rekultivierungsschicht auf Deponien zum Tragen kommen. Dieser Fall liegt vor, wenn hochwertige, den Qualitätskriterien der Kompostverordnung entsprechende Komposte für die Herstellung von Methanoxidationsschichten eingesetzt werden, die dann nicht mehr als Abfall gelten und somit nicht dem Altlastenbeitrag gemäß ALSAG unterliegen.

In der **Deponieverordnung 2008** (BGBl. II 39/2008) sind Regelungen für temporäre Oberflächenabdeckungen, die zur Minimierung von Methanemissionen auf Deponien (oder Kompartimenten) mit biologisch abbaubaren Abfällen eingesetzt werden, sowie für Zwischenabdeckungen zu finden. So ist laut §29 (4) explizit die Verwendung von Kompost zur Herstellung von Zwischenabdeckungen, über denen planmäßig wieder Abfälle eingebaut werden sollen, nicht zulässig. Für temporäre Abdeckungen wird diese Einschränkung nur dahingehend gemacht, dass kein Kompost, der aus Restmüll hergestellt wurde, verwendet werden darf. Die Verwendung von Kompost für die Herstellung einer endgültigen Rekultivierungsschicht ist nur gemäß den Bestimmungen der Kompostverordnung zulässig. Weiters werden in Anhang 3, Punkt 6.1, Vorgaben betreffend Leistungsfähigkeit und Monitoringprogramm für temporäre Oberflächenabdeckungen gegeben. Gemäß Deponieverordnung 2008 sind gasförmige Emissionen aus dem Deponiekörper im Mittel auf  $5 \text{ kg CH}_4/\text{m}^2\text{a}$  zu begrenzen bzw. dürfen Einzelwerte bei auftretenden „hot-spots“  $10 \text{ kg CH}_4/\text{m}^2\text{a}$  nicht überschreiten.

EU-weite Vorgaben bzw. Regelungen betreff Einsatzbedingungen und Ausführung von Methanoxidationsschichten lagen zum Zeitpunkt der Leitfadenerstellung nicht vor.

## 4 BESTANDSAUFNAHME DER ALTABLAGERUNG

Die Bestandsaufnahme einer Altablagerung ist Voraussetzung für die Entscheidungsfindung, ob eine MOS an einem Standort eine zielführende Maßnahme darstellt. Der historischen Erkundung folgt – falls noch nicht aktenkundig – eine detaillierte Untersuchung des Standortes. Empfohlen werden in Abhängigkeit der Standortgegebenheiten:

- Gasuntersuchungen: Gaskonzentrationsmessungen und/oder Emissionsmessungen, Information über auftretende Gasmigrationen (z. B. Anrainerbefragung)
- Repräsentative Abfallbeprobungen<sup>1</sup>: verbleibende organische Substanz (z.B. GV oder TOC, Gasbildungspotential, Atmungsaktivität, FT-IR), Wassergehalt bzw. Wasserhaltekapazität, etc.
- Dokumentation der bestehenden Oberflächenabdeckung inklusive Vegetation
- Aufnahme der beeinträchtigten Schutzgüter und angrenzender Nutzungen

Zur Erhebung der Gassituation der Ablagerung siehe auch Kapitel 6.4. Bei bestehender Entgasungsanlage ist die Funktionstüchtigkeit der Anlagenteile (Gasbrunnen, Leitungen, etc.) zu kontrollieren, bei der Planung der MOS entsprechend zu berücksichtigen und gegebenenfalls zu adaptieren und zu ertüchtigen.

Weiters sind Daten zu den unter Kapitel 5 diskutierten Einsatzrandbedingungen zu erheben und zu prüfen (Geometrie der Ablagerung, klimatische Gegebenheiten, etc.). Auch Informationen bezüglich der Nutzung bzw. geplanten Nachnutzung des Areals sind notwendig, um fundiert die Entscheidung treffen zu können, ob eine MOS Ziel führend ist oder nicht.

---

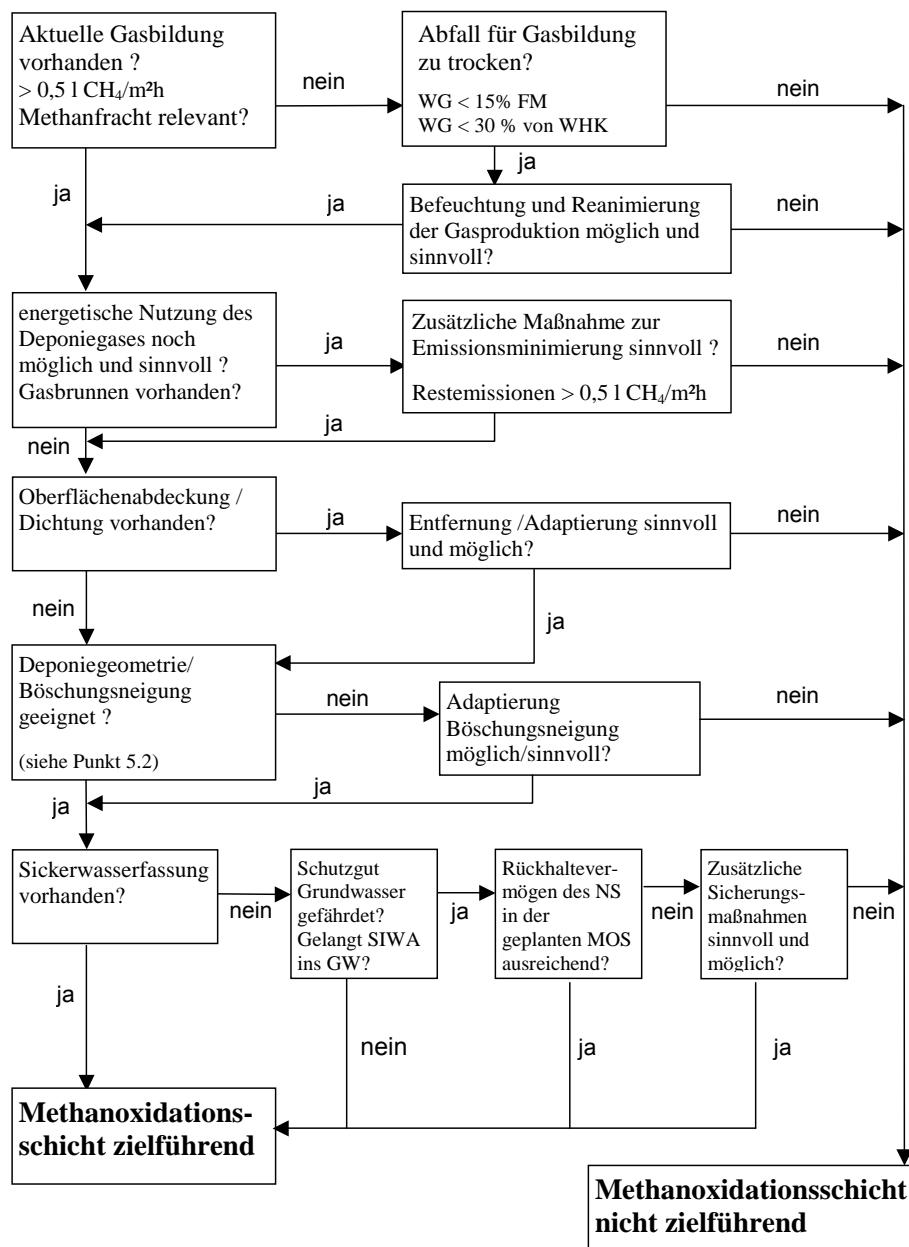
<sup>1</sup> Bei der Feststoffprobenahme ist auf die Heterogenität der Ablagerung Rücksicht zu nehmen und basierend auf Vorerhebungen (historische Daten, Gasmessdaten, etc.) der Probenahmeraster auszurichten.

## 5 EINSATZBEREICHE UND EINSATZRANDBEDINGUNGEN (ERB)

Eine Methanoxidationsschicht ist eine (Sanierungs-)maßnahme für Ablagerungen, die aufgrund des (noch) vorhandenen Gasbildungspotentials eine mögliche Gefährdung darstellen. Dies ist bei Ablagerungen mit hohem Anteil an biologisch abbaubaren Abfällen, wie z.B. Hausmüll- und hausmüllähnlichen Gewerbemüll der Fall. Darüber hinaus hängt die Entscheidung, ob dieses Verfahren an einem bestimmten Standort eingesetzt werden kann, von verschiedenen Faktoren ab (Einsatzrandbedingungen).

Generell muss für jede Ablagerung speziell geprüft und beurteilt werden, ob die Ausführung einer MOS Ziel führend ist oder nicht, vor allem im Hinblick auf betrachtete Schutzgüter und Umfeldnutzung. Ebenso spielen bei der Entscheidung die lokale Verfügbarkeit von geeigneten Konstruktionsmaterialien, die Kosten bestimmend sind, sowie mögliche „Sekundäre Treibhausgasemissionen“ durch anfallende Transportwege, die umweltrelevant sein können, eine Rolle. Die in diesem Kapitel angeführten Richtparameter und Anhaltswerte stellen eine allgemeine Entscheidungshilfe dar. Die Abfragenfolge in Abbildung 1 (Entscheidungsbaum) soll bei der Entscheidungsfindung einer prinzipiellen technischen Anwendbarkeit von Methanoxidationsschichten helfen. In den Kapiteln 5.1 und 5.2 wird auf einzelne Punkte des Entscheidungsbaumes noch detaillierter eingegangen.

Abbildung 1: Entscheidungsbaum zur Maßnahmendiskussion Methanoxidationsschicht



## 5.1 Eigenschaften der abgelagerten Abfälle – Gasbildungspotential

Zur ersten Beurteilung des Reaktions- bzw. Gasbildungspotentials einer Ablagerung und Einschätzung, ob die Ausführung einer MOS überhaupt notwendig ist, können die bereits im INTERLAND-Leitfaden „Insitu-Aerobisierung“ (<http://www.altlastenmanagement.at/>; link AK Technische Leitfäden, Leitfaden 03) angegebenen Richtwerte für den Abfallfeststoff ( $AT_4 > 2,0 \text{ mg O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ TM}$  bzw.  $GS_{21} > 3,0 \text{ NI kg}^{-1} \text{ TM}$ ) als Anhaltswerte (unter Berücksichtigung der Repräsentativität der Proben) herangezogen werden. Werden Emissionsstrommessungen auf der Ablagerung im Vorfeld der Maßnahmenentscheidung durchgeführt (vergleiche Kapitel 6.4.), so gilt als Anhaltswert ein flächenspezifischer Emissionswert von  $> 0,5 \text{ l CH}_4 / \text{m}^2\text{h}$ .

Bei der Überlegung der Relevanz dieser Maßnahme - vor allem im Hinblick auf Klimaschutz – ist auch auf die Gesamtmethanfracht der Ablagerung Rücksicht zu nehmen.<sup>2</sup> Heyer et al. (2006) empfehlen für eine Ablagerung mit rückläufiger Deponiegasproduktion bei einem Methanvolumen  $\leq 25 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$  für den gesamten Deponiestandort bzw.  $\leq 5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/(\text{h} * \text{ha})$  auf die Ablagerungsfläche bezogen eine Umstellung von aktiver Entgasung auf passive Restgasbehandlung (z.B. über Methanoxidation in der Rekultivierungsschicht).

Falls keine genaueren Wassergehaltsdaten aus einer Feststoffuntersuchung vorliegen, ist der Wasserhaushalt einer Ablagerung abzuschätzen, z.B. anhand des Zustandes der Oberflächengestaltung (vorhandenes Abdeckmaterial, Vegetation, etc.) bzw. über meteorologische Daten. Bei zu trockenen Abfällen (z.B. bei dichter Oberflächenabdeckung) wird der mikrobielle Abbau und somit die Gasproduktion gehemmt („Mumifizierung“ des Abfalls) und ein nicht mehr reaktiver Zustand vorgetäuscht. Es kann aber bei Wiederbefeuchtung des Abfalls (z. B. Undichtheiten der Abdeckung) erneut zur Gasbildung kommen. Die Untergrenze für mikrobielle Gasbildung liegt bei ca. 30 bis 35% der WHK des Abfalls (entspricht meist einem WG von ca. 15 % bezogen auf TM).

## 5.2 Geometrie und Standort der Ablagerung

Hinsichtlich Geometrie einer Ablagerung sind die Böschungsneigungen zu berücksichtigen. Die Standsicherheit von MOS in Böschungsbereichen ist vor allem von den verwendeten Materialien abhängig. Bisherige Erfahrungen mit MOS auf Kompostbasis (grob strukturierte Komposte) aus Feldversuchen und der Praxis zeigen, dass Böschungsneigungen zwischen 1:3 und 1:10 problemlos ausgeführt wurden. Deponieböschungen sind dementsprechend vor dem Aufbringen einer Methanoxidationsschicht zu profilieren. Wird eine Methanoxidationsschicht z.B. mit technischen Kapillarsperren zur Verringerung des Sickerwasseranfalles kombiniert, muss die Schichtneigung zur Ableitung des Niederschlagswassers steiler als 1:10 sein. In zunehmend steileren Böschungsbereichen muss u. U. auf eine besonders überlegte Materialwahl geachtet werden. So wurde z.B. in einem Feldversuch mit einer Böschungsneigung von 1:3 grobes, in sich gut verzahntes Kantkorn für die Gasverteilungsschicht verwendet (Huber-Humer, 2004). Die Kompostschicht bestand in diesem Fall aus grob abgeseibtem Holzhäcksel/Klärschlammkompost (Siebschnitt  $< 65 \text{ mm}$ ). Bei der Verwendung von grobstrukturierten Materialien im Böschungsbereich kann es aufgrund der guten Wasser- und Luftdurchlässigkeit auch kaum zur Ausbildung von lokalen Wassersperrschichten kommen.

Klimatische Bedingungen eines Standortes können eventuell hinsichtlich sehr geringer Winterdurchschnittstemperaturen oder extrem hoher wie auch geringer Niederschläge ein mögliches Ausschlusskriterium für die Anwendung von Methanoxidationsschichten sein. Unter den in Österreich vorherrschenden Witterungsbedingungen wird eine entsprechend ausgeführte MOS gute Abbauleistung erbringen. Bei extremen Witterungsbedingungen sind u.U. spezielle bauliche Ausführungen einer MOS zu beachten (siehe Kapitel 7).

Die langfristige Standsicherheit einer MOS im Böschungsbereich muss jedenfalls gewährleistet sein. Dabei sind vor allem der Abbau der organischen Substanz (Änderung der Materialstruktur) und

---

<sup>2</sup> So würde z.B. eine Ablagerung mit etwa  $200.000 \text{ m}^3$  Verfüllvolumen (angenommener WG = 40% TM und Ablagerungsdichte von  $1 \text{ t/m}^3$ ) und einer  $GS_{21}$  von  $3 \text{ l/kg TM}$  ein gesamtes Methanbildungspotential von ca.  $360.000 \text{ m}^3$  Methan noch beinhalten. Bzw. würde eine  $2 \text{ ha}$  große Ablagerung bei einem spezifischen Emissionswert von z.B.  $0,6 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\text{h}$  pro Tag etwa  $290 \text{ m}^3$  Methan emittieren. Als Vergleich dazu: eine Großvieheinheit produziert pro Tag in Abhängigkeit der Fütterungs- und Haltungsart etwa  $0,28 - 0,42 \text{ m}^3$  Methan (Hartung und Monteny, 2000).

Setzungsprozesse, die beide zur Veränderung der bodenphysikalischen Parameter führen können, zu beachten. Negative Auswirkungen auf die Standsicherheit aufgrund des Abbaues der organischen Substanz in Komposten bzw. Kompostmischungen wurden in Feldversuchen und bisherigen - ca. 10-jährigen - Praxiserfahrungen keine beobachtet. Vielmehr wird langfristig durch die aufkommende Vegetation ein guter Erosionsschutz und böschungsstabilisierender Effekt erzielt.

### **5.3 Verfahrenskombinationen**

Eine Methanoxidationsschicht kann auch mit anderen Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen sinnvoll kombiniert werden. So ist z.B. die Kombination mit hydraulischen Maßnahmen (Sperrbrunnen, Dichtwände, etc.) vor allem im Hinblick auf Grundwasserschutz Ziel führend. Aber auch mit In-situ Sanierungstechnologien (wie Aerobisierung) lässt sich die Ausführung einer MOS sinnvoll verknüpfen. So lassen MOS als offenes Abdecksystem einen Teil des Niederschlagswassers in den Deponiekörper zur Aufrechterhaltung des mikrobiellen Abbaues durchdringen und bauen andererseits während der In-situ Aerobisierung eventuell auftretende Restmethanemissionen ab. Weiters stellen MOS auch bei aktiv entgasten Deponie eine sinnvolle Ergänzung dar.

## 6 VORVERSUCHE

### 6.1 Ziel der Vorversuche

Vorversuche zur Methanoxidation sollen einerseits dazu dienen, eine richtige Materialwahl für die Ausführung von Methanoxidationsschichten zu treffen, und andererseits die aktuelle Gasproduktion bzw. Emissionssituation der Ablagerung zu erfassen, um die Dimensionierung und den Aufbau der Methanoxidationsschicht daraufhin abzustimmen.

### 6.2 Untersuchung der Methanoxidationskapazität eines Substrates im Labor

Für die Wahl eines geeigneten Trägersubstrates, welches den methanabbauenden Mikroorganismen optimale Lebensbedingungen und somit eine hohe Methanoxidationskapazität bieten soll, werden kontinuierlich beaufschlagte Säulenversuche im Labor unter standardisierten und vergleichbaren Bedingungen empfohlen. Die Beschreibung der genauen Durchführung dieser Vorversuche ist im Anhang (12.1) zu finden.

Ein Material kann als geeignet beurteilt werden, wenn die in derartigen Vorversuchen unter idealen Randbedingungen ermittelten Methanabbauraten nach einer etwa ein- bis zweiwöchigen Adaptionsphase möglichst konstant bei 100% liegen, d.h. das gesamte zugeführte Methan entsprechend der zu erwartenden Emissionssituation der Ablagerung sollte abgebaut werden. Bei Steigerung der Methanzufuhrmenge auf das Doppelte der vor Ort zu erwartenden Gasmenge sollten die Abbauraten 70 - 80% nicht unterschreiten.

Im Anhang 12.1 ist eine Tabelle (Tabelle AH-1) zu finden, in der einige Materialien hinsichtlich ihrer Abbauleistung und relevanter Charakterisierungsparameter (Organikgehalt, Ammoniumgehalt als möglicher Hemmer, Reifeparameter, und das LPV als ein wesentlicher physikalischer Kennwert) zusammengefasst sind. Diese Tabelle soll eine Hilfestellung zu einer ersten, raschen und übersichtlichen Einschätzung der Eignung eines Materials hinsichtlich Methanoxidationsleistung, definiert anhand der beispielhaft angeführten Parameter, dienen.

Bei der Gewinnung der Materialprobe zur Untersuchung der Methanoxidationskapazität ist auf Repräsentativität zu achten. Die Probenahme erfolgt bei Kompostmaterialien sinngemäß nach Kompostverordnung Anlage 3, Teil 1 (externe Güteüberwachung), bei anderen Substraten sind die entsprechenden rechtlichen Vorgaben, Normen und Richtlinien nach dem Stand der Technik zu berücksichtigen

Das zu testende Material ist vor bzw. auch nach Versuchsdurchführung auf folgende biologisch/chemische Parameter zu prüfen:

- Atmungsaktivität (AT<sub>4</sub> bzw. AT<sub>7</sub>, nur bei Kompostsubstraten zur Bestimmung der Reife),
- Glühverlust bzw. TOC,
- Gesamtstickstoff, Phosphor (verfügbar),
- Ammonium, Nitrat, Nitrit (im Eluat),
- pH-Wert, Leitfähigkeit (im Eluat) (zur grundlegenden Charakterisierung, v.a. bei Kompostmaterialien)

Die Bestimmung des TOC bzw. des Glühverlustes gibt Aufschluss über den Anteil der organischen Substanz, welche wesentlich die positiven Eigenschaften eines Substrates für die Methanoxidation beeinflusst. Je höher der Anteil an stabiler organischen Substanz, desto besser ist meist die Methanabbauleistung. Für Kompostmaterialien bzw. organikreiche Substrate (TOC >4%TM) ist daher auch die Erhebung der Stabilität (Reife) der organischen Substanz (AT<sub>4</sub> bzw. AT<sub>7</sub>) notwendig, da die Stabilität (Reife) der organischen Substanz einen wesentlichen Einfluss auf die Methanabbauleistung hat (Sauerstoffkonkurrenz!).

Parameter wie Gesamtstickstoff und Phosphor geben Auskunft über die Makro-Nährstoffversorgung und daher über die allgemeine Eignung eines Substrates für mikrobiologische Prozesse, während die Konzentrationen von Ammonium, Nitrat und Nitrit ein essentielles Kriterium für die Eignung zur Methanoxidation darstellen: Ammonium in höheren Konzentrationen ist ein wirksamer Hemmstoff für Methanoxidierer (siehe Kapitel 3.1) bzw. hat die mögliche Verschiebung von Nitrat zu Ammonium (und umgekehrt) eine hemmende Wirkung; Nitrit ist toxisch.

Weiters sind folgende physikalische Parameter zu erheben:

- Luftporenvolumen innerhalb der Versuchssäule (Bestimmungsmethode siehe Anhang, 12.2)
- Korngrößenverteilung (Sieblinie),
- Wasserhaltekapazität, Volumengewicht

Diese bodenphysikalischen Eigenschaften sind wesentlich für die Sauerstoff- und Methanversorgung einer Methanoxidationsschicht.

Die Bestimmung der Parameter für Kompostmaterialien (auch Mischungen) soll nach Kompostverordnung (BGBl. II/292 2001 – Anhang 5) erfolgen. Für Kultursubstrate und Böden wird das Vorgehen nach den relevanten bodenkundlichen ÖNORMEN empfohlen (vergleiche z. B. ÖNORMEN-Gruppe L 1050-1097). Beim Vergleich der Wassergehaltswerte zwischen Kompost- und Bodenmaterialien ist darauf zu achten, dass üblicherweise für Komposte der Wassergehalt in % Feuchtsubstanz angegeben wird, während für Böden auf Trockensubstanz bezogen wird.

### **6.3 Untersuchung der Luftdurchlässigkeit von Methanoxidationsschichten im Labor**

Um eine zufriedenstellende Methanoxidation in der Oberflächenabdeckung zu garantieren, muss ein über die Fläche homogenes Anströmen des Methans in die Oxidationsschicht gewährleistet sein. Einerseits soll dies durch die Gasverteilungsschicht erreicht werden und andererseits muss die Oxidationsschicht eine ausreichende Gasdurchlässigkeit aufweisen.

Die Gasverteilung in einem porösen Medium kann prinzipiell auf zwei Arten stattfinden.

- konvektiver Gastransport hervorgerufen durch Druckunterschiede (Druckgradient) in unterschiedlichen Bereichen der Abdeckschicht
- Diffusion der Gase entlang von Konzentrationsgradienten

Da in Ablagerungen durch die Methanbildung und durch Methanoxidation in der Abdeckschicht mit durchaus beträchtlichen Druckunterschieden zu rechnen ist, ist zu erwarten, dass der konvektive Gastransport eine größere Rolle für den Gasfluss spielt.

Als Maß für die Gasdurchlässigkeit bei konvektivem Transport dienen die Parameter „Luftdurchlässigkeit“ bzw. „Luftpermeabilität“. Bestimmung dieser Parameter siehe Anhang 12.3.

Als Anforderung an das Substrat für die Oxidationsschicht ist zu empfehlen, dass auch bei einem Wassergehalt von 100 % Wasserhaltekapazität eine ausreichende Gaspermeabilität gewährleistet ist. Die intrinsische Leitfähigkeit oder Luftpermeabilität des eingesetzten Materials sollte bei 100 % Wasserhaltekapazität (entspricht in etwa der Feldkapazität) nicht geringer als  $5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$  sein. Dies würde einem Luftdurchsatz von  $10 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  bei einem Druckgradienten von  $1 \text{ hPa}$  ( $=1 \text{ mbar}$ ) auf einer Bodentiefe von  $1 \text{ m}$  bedeuten.

### **6.4 Erhebung der Gasemissionssituation der Ablagerung**

Die Gasproduktion bzw. Emissionssituation der Ablagerung kann durch folgende Vorgehensweisen erhoben bzw. eingeschätzt werden:

- FID-Rasterbegehung der Ablagerung in Kombination mit Emissionsstrommessungen (z.B. Haubenmessungen, Tracermessungen) als notwendige Voraussetzung die in Abhängigkeit der Situation vor Ort mit anderen Maßnahmen kombiniert werden können, z.B.:
  - Feststoffprobenahme aus der Ablagerung und Untersuchung des Gasbildungspotentials im Inkubationsversuch im Labor (GS<sub>21</sub> gemäß ON S 2027, Teil 2)



- Bei vorhandener aktiver Entgasung mittels Gasabsaugversuchen und anhand von bereits vorliegenden Aufzeichnungen und Messergebnissen der Anlage
- Gasabsaugversuche bei nicht vorhandener Gasabsaugung mit temporären Maßnahmen
- Bei gut bekannten Abfallinputdaten und Deponiebetriebsbedingungen über Modellrechnungen

Arbeitshinweise und Anleitungen zu FID-Rastervermessung, Haubenmessung zur Emissionsstrombestimmung und Gasabsaugversuchen sind in Rettenberger (2004 – Arbeitshilfe Deponiegas; [http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/materialien/mat65/mat65\\_web.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/materialien/mat65/mat65_web.pdf)) zu finden, bzw. siehe dazu auch Kapitel 8.

## 7 VERFAHRENSBESCHREIBUNG

### 7.1 Aufbau und Ausführung von Methanoxidationsschichten

Eine Methanoxidationsschicht besteht üblicherweise aus einer Gasverteilungsschicht, welche eine hohe Gasdurchlässigkeit besitzen muss, um die aus dem Deponiekörper austretenden Deponiegasströme zu verteilen und zu homogenisieren, und einer eigentlichen Oxidationsschicht, welche die Lebensbedingungen methanoxidierender Mikroorganismen optimieren und das ganze Jahr über möglichst konstant halten soll. In Abbildung 2 ist ein einfaches Schema einer Methanoxidationsschicht dargestellt.

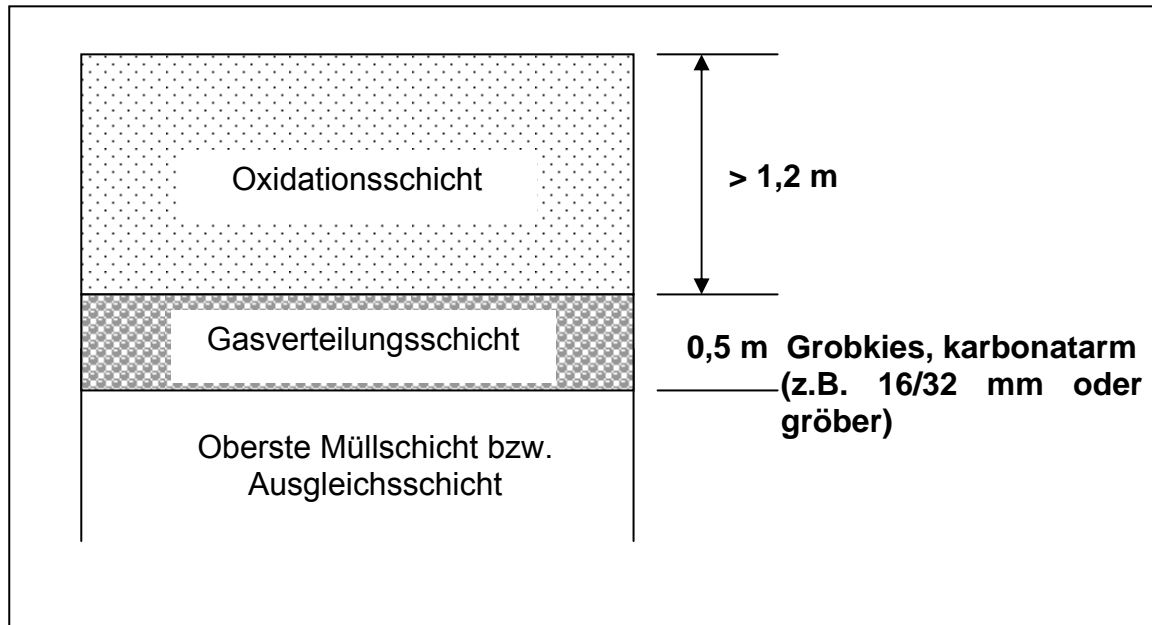


Abbildung 2. Schema einer Methanoxidationsschicht

Die hohe Effizienz einer gut ausgeführten Methanoxidationsschicht liegt darin begründet, dass durch die Größe der biofilterwirksamen Fläche und die homogenisierende Wirkung der Gasverteilungsschicht, derart geringe Methanflächenbelastungen und eine Verlangsamung der Gasströme erreicht werden, dass diese durch die Mikroorganismen problemlos abgebaut werden können. Idealerweise sollte die gesamte Oberfläche der Ablagerung mit einer Methanoxidationsschicht überdeckt werden. Ist dies aus standortspezifischen oder nutzungsbedingten Gegebenheiten nicht möglich, so sollte die methanabbauaktive Fläche zumindest so dimensioniert werden, dass die Methanflächenbelastung max. 50% der Oxidationskapazität der verwendeten Materialien (basierend auf den Vorversuchen des Substrates im Labor) beträgt (Dimensionierungsbeispiel siehe Anhang 12.4). Als Anhaltswert kann davon ausgegangen werden, dass in geeigneten Materialien eine Flächenbelastung von  $< 4 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\text{h}$  meist problemlos abgebaut werden kann. Diese Größenordnung wird auch von Rettenberger und Gröber (2003; [http://www.ruk-online.de/ruk\\_de/Aktuelles/Service/Downloads/MAYNtR.pdf](http://www.ruk-online.de/ruk_de/Aktuelles/Service/Downloads/MAYNtR.pdf)) als Anhaltswert für die Dimensionierung von passiven Entgasungs- und Oxidationssystemen angegeben.

Methanoxidationsschichten sind in der Regel „offene“ Oberflächenabdeckungssysteme ohne Dichtelement und wirken bei entsprechender Ausführung auch als Wasserhaushaltsschicht (Evapotranspirationsschicht), wodurch die Wasserbilanz einer Deponie positiv beeinflusst wird. Vor allem unter Klimabedingungen Ostösterreichs (Niederschlag  $< 700 \text{ mm/a}$ ) kann eine 1 Meter mächtige Methanoxidationsschicht auf Kompostbasis kombiniert mit einer entsprechenden Bepflanzung (z.B. Pappeln, Miscanthus) den Wassereintrag in den Deponiekörper auf  $< 10\%$  des Jahresniederschlags beschränken. In Gebieten mit höheren Jahresniederschlägen können zusätzliche technische Maßnahmen notwendig sein (z.B. Einlegen von Drainagerohren in die Gasverteilungsschicht und

Profilieren eines Gefälles auf dem Müllkörper bzw. der Ausgleichsschicht), um den Wassereintrag zu reduzieren. In Hangbereichen (Neigung >10%) kann eine Methanoxidationsschicht auch mit Kapillarsperren kombiniert werden um den Niederschlagseintrag in den Deponiekörper zu minimieren, wobei der grobkörnige Kapillarblock gleichzeitig die Funktion einer Gasverteilungsschicht übernehmen kann.

## 7.2 Anforderungen an die Gasverteilungsschicht

Die Gasverteilungsschicht muss langfristig eine hohe **Gasdurchlässigkeit** gewährleisten. Sehr gute Erfahrungen wurden bisher mit 30 - 50 cm mächtigen Gasverteilungsschichten aus karbonatarmen Grobkies gemacht. Die Körnungsgruppe 16/32 sollte dabei keinesfalls unterschritten werden, Körnungen 32/64 und gröber sind empfehlenswert. Da auf trennende Geotextilien zwischen Gasverteilungsschicht und Oxidationsschicht (Gefahr des Verschlümmens und Zuwachsens durch mikrobielle Ausscheidungen) möglichst zu verzichten ist, ist eine Schichtstärke von 50 cm zu bevorzugen. Damit wird - auch nach einem möglichen Eintrag von Feinteilen in die oberen Bereiche der Gasverteilungsschicht (was sich in mehrjährigen Feldversuchen als nicht störend erwiesen hat) – langfristig eine ausreichende Gasverteilungszone gewährleistet. In Hangbereichen ist Kantkorn zu bevorzugen.

Die **Schichtdimensionierung** kann unter bestimmten Voraussetzungen bei nur mehr schwach gasenden Altablagerungen (ermittelte maximale Methangasströme < 4 l/m<sup>2</sup>h) auf 20 – 30 cm reduziert werden bzw. können „Fensterlösungen“ (d.h., verstärkte Dimensionierung der Gasverteilungsschicht nur in Bereichen mit höheren Emissionen) in Betracht gezogen werden.

Alternativ können auch bei entsprechendem Nachweis der Funktionstüchtigkeit und Umweltrelevanz **andere Materialien**, z.B. Recyclingmaterialien, wie aufbereiteter Bauschutt mit definierter Körnung, verwendet werden. Die langfristige Stabilität im Hinblick auf Körnungsabstufung und chemische Stabilität (vor allem in CO<sub>2</sub>-reicher Atmosphäre) muss gewährleistet sein. In internationalen Untersuchungen wurden z.B. Abfallmaterialien wie geschredderte Altreifen (Barlaz et al., 2004) oder auch verschiedenartiger Glasbruch und Scherben (Bogner et al., 2005) als Gasverteilungsschicht für Methanoxidationsschichten mit unterschiedlichem Erfolg eingesetzt.

## 7.3 Anforderungen an die Oxidationsschicht

### 7.3.1 Anforderung an das Substrat

Aus allen bisherigen Untersuchungen zur Methanoxidationskapazität lässt sich ableiten, dass **grobkörnige, strukturstabile Substrate** mit hohem Anteil an stabiler organischer Substanz prinzipiell gut geeignet für eine Anwendung in Methanoxidationsschichten sind. Reifkomposte mit ausreichendem Anteil an Strukturmaterial erwiesen sich bereits vielfach als besonders geeignet. Die organische Substanz spielt dabei nicht vorrangig eine Rolle für die Nährstoffversorgung (Kohlenstoff gewinnen die Methanoxidierer aus dem Methan und viele methanotrophe Stämme können Luftstickstoff fixieren), sondern beeinflusst vor allem die notwendigen physikalischen Bedingungen positiv und bietet eine gute Gasdurchlässigkeit sowie hohe Wasserspeicherfähigkeit bei gleichzeitig ausreichend stabilem Luftporenvolumen. Für eine günstige langfristige Entwicklung einer Methanoxidationsschicht spielen auch anorganische Bodenkomponenten (wie z.B. Tonminerale zur Bildung von stabilen Ton-Humuskomplexen) eine wichtige Rolle, die entweder von Natur aus im Substrat vorhanden sind oder abgestimmt auf eine gewünschte Nachnutzung zugemischt werden können.

Folgende Mindestanforderungen bzw. Empfehlungen hinsichtlich des Substrates sind zu berücksichtigen:

- Die bereits in Kapitel 6.2 beschriebenen **Materialkriterien und die Anforderungen hinsichtlich der Oxidationskapazität** (ermittelt in Vorversuche) stellen eine Voraussetzung bei der Substratwahl dar.

- Das Substrat muss eine **ausreichende Gaspermeabilität** für Luftsauerstoff und Methan auch bei hohen Wassergehalten sicherstellen (Richtwert: Mindestanteil an luftgefüllten Poren bei 100 % WHK: 15 - 20 vol%).
- Substrate mit hohem **Anteil an organischer Substanz** lassen sich nur schwer nachhaltig verdichten und bieten aufgrund des meist hohen luftgefüllten Porenanteils auch eine gute temperaturisolierende Wirkung. Die Wärme, die bei der Methanoxidation frei wird bzw. auch vom Deponiekörper abgestrahlt wird, kann so innerhalb der Abdeckschicht gespeichert werden und ermöglicht auch unter Winterbedingungen meist ab Tiefen von 80 cm innerhalb der Abdeckschicht konstant geeignete Milieubedingungen (Temperaturen um die 15°C oder höher bei Außentemperaturen um die -5 °C) für einen effizienten Methanabbau.
- Werden **organische Abfallstoffe oder Komposte** als Trägersubstrat einer Oxidationsschicht eingesetzt, so ist vor allem auf die ausreichende Reife der organischen Substanz zu achten. Einerseits können zu hohe Ammoniumkonzentrationen bzw. der noch in stärkerem Ausmaß ablaufende Nitrifikationsprozess mit z.T. toxischen Zwischenprodukten (Nitrit) die Methanoxidation hemmen, andererseits stellt der Abbau der organischen Substanz durch heterotrophe Mikroorganismen eine zusätzliche Sauerstoffzehrung und somit Konkurrenz und „Stress-Situation“ für die Methanoxidierer dar, was zur verstärkten Bildung von sogenannten „Exopolymeren“ führen kann. Kompostmaterialien sollten daher einen Ammoniumgehalt <350 ppm, kein nachweisbares Nitrit, und eine Atmungsaktivität (AT<sub>7</sub>) < 8 mg O<sub>2</sub>/g TM aufweisen.
- **Strukturmaterialanteil:** Gute Erfahrung wurde mit der Zumischung von Holzhäcksel in der Größenordnung von etwa 30 vol% gemacht, z.B. anaerob vorbehandelte Klärschlämme, die mit grobem Holzhäcksel und Grünschnittmaterial kompostiert wurden. Diese Klärschlammkomposte wiesen folgende Kornverteilungen auf: 0,063 – 2 mm: 20 - 30 M-%; 2 – 6,3 mm: ca. 40 M-%; 6,3 - 20 mm: 20 - 40 M-%; >20 mm: ca. 10 M-%.

### 7.3.2 Dimensionierung und Aufbau

Das Substrat darf im Zuge des **Einbaues** nicht verdichtet werden, es ist lose vor Kopf zu schütten und zu profilieren; jegliche Kompaktierung und das Befahren mit schweren Arbeitsmaschinen ist weitgehend zu vermeiden. Das Substrat ist vorzugsweise bei einem mittleren Wassergehalt aufzubringen. Bei zu feuchtem Material kann es im Zuge des Aufbaues zu einer unerwünscht starken Kompaktierung kommen; bei zu trockenem Material könnten die mikrobiellen Oxidationsprozesse über längere Zeiträume (vor allem in trockeneren Regionen) gehemmt sein.

Die **Stärke der Oxidationsschicht** richtet sich hauptsächlich nach den gegebenen klimatischen Bedingungen (Frosteindringtiefe, etc.), der spezifischen Sauerstoffeindringtiefe (abhängig von der Dichte und Gasdurchlässigkeit des Materials) und nach der gewünschten Rekultivierung und Bepflanzung. Damit auch unter Winterbedingungen ein effizienter Methanabbau stattfindet, ist die Mindeststärke der Schicht so einzurichten, dass sich der Methanoxidationshorizont in frostfreier Tiefe etablieren kann. D.h. für mitteleuropäische Klimabedingungen ist eine Endschichtstärke von mind. 90 cm anzuraten. Durch natürliche Konsolidierungs- und Mineralisierungsprozesse kommt es in den ersten Jahren zu deutlichen Setzungen, die etwa 20 % der Anfangsschütthöhe ausmachen können. Dies ist bei der Planung und Dimensionierung der Schicht entsprechend zu berücksichtigen und bedeutet eine Anfangsschütthöhe von zumindest 120 cm.

Die **Maximalhöhe** hängt vor allem von der beabsichtigten Bepflanzung und der Körnung und somit Gasdurchlässigkeit des verwendeten Materials ab. Es sollte ein ausreichender Sauerstoffeintrag bis zur Gasverteilungsschicht gewährleistet sein, damit sich oberhalb der Gasverteilungsschicht selbst keine permanente anaerobe Zone aufgrund zu hoher Schütthöhe bilden kann. Erfahrungsgemäß ist die Maximalhöhe bei strukturreichen Reifkomposten mit etwa 2 – 2,5 m begrenzt, bei feinkörnigen Materialien bzw. unreifen Komposten mit höherer Sauerstoffzehrung (Atmungsaktivität) liegt sie deutlich darunter.

Da Materialien, die sich zur Methanoxidation gut eignen auch passende Bedingungen für eine Bepflanzung und Rekultivierung bieten, ist in den meisten Fällen das Aufbringen einer zusätzlichen Bodenschicht nicht notwendig. Sollte aufgrund besonderer Erfordernisse hinsichtlich einer gewünschten Nachnutzung der Fläche das Aufbringen eines spezifischen Bodensubstrates oberhalb

der Methanoxidationsschicht dennoch erforderlich sein, so ist grobkörniges Material (z.B. Sand) zu bevorzugen, dieses möglichst unverdichtet aufzubringen und darauf zu achten, dass sich durch die zusätzliche Überdeckung die Milieubedingungen für die Mikroorganismen innerhalb der oxidierenden Schicht, vor allem der Sauerstoffeintrag, Wasserhaushalt etc, nicht zum Negativen ändern.

#### **7.4 Empfehlungen für die Ausführung kritischer Bereiche**

Kritische Bereiche hinsichtlich bevorzugter Emissionsflächen bei Methanoxidationsschichten stellen einerseits vertikale Einbauten innerhalb der Methanoxidationsschicht, wie z.B. Gasbrunnen, Sickerschächte, etc. dar, zum anderen treten erhöhte Emissionen immer wieder in Hangbereichen und auf Böschungskanten bzw. im Anschlussbereich unterschiedlicher Oberflächengestaltungen von Deponieabschnitten auf. Diese Bereiche bedürfen einer besonders sorgfältigen und wohlüberlegten Planung und Ausführung. Einfache Lehmschläge oder Dichtungskeile aus bindigen Materialien rund um Einbauten haben sich in der Praxis schon mehrfach als unzureichend erwiesen. Kurzschlüsse für Gasaustritte entstehen entlang von Schwund- und Trocknungsrissen rund um die Einbauten. Im Folgenden sind einige Empfehlungen für die Ausführung von Einbauten in einer Methanoxidationsschicht zusammengefasst:

- Vertikale Rohre und Schächte sollten rundum mit ausreichend großen Folienlappen verklebt/verschweißt und diese Dichtungslappen auf Höhe der Gasverteilungsschicht in das Methanoxidationssystem eingebunden werden.

ODER: Schächte bzw. Brunnenköpfe sollen vollständig in der Oxidationsschicht versenkt und ausreichend mit oxidationsaktivem Material überdeckt werden.

- Horizontal verlaufende Sickerwasserableitungen und Drainagerohre sollten beim Übergang aus dem Deponiekörper (der Abdeckschicht) siphonartig ausgebildet werden, damit es an diesen Stellen zu einer Verringerung von Gasaustritten kommt.

Da Deponiegas immer den Weg des geringsten Widerstandes nimmt, kommt es bei schichtweise verfüllten und verdichteten Deponien bevorzugt zu horizontalen Gasbewegungen. Erfahrungsgemäß treten Gasemissionen daher auch verstärkt in Hangbereichen auf, und hier vor allem an den oberen Böschungskanten bzw. im oberen Drittel von Hangbereichen (oft durch auftretende Sogwirkung aufgrund windinduzierter Mikroturbulenzen). Folgende Maßnahmen sind zu berücksichtigen, um „Hangemissionen“ entgegenzuwirken:

- Es darf zu keinen Kurzschlüssen zwischen Gasverteilungsschicht und Atmosphäre kommen.
- Die Dimensionierung der Methanoxidationsschicht ist in solchen Bereichen anzupassen, sprich die Aufbringungshöhe des Substrates muss entsprechend verstärkt werden.
- Ziel führend kann auch das Abdecken/Dichten der Hangbereiche mit Materialien sein, die dem Deponiegas einen stärkeren Widerstand bieten als die Oxidationsschicht selbst, um so über Gasleit- und Verteilungsschichten (aus grobkörnigen Materialien) gezielt das Gas in die Methanoxidationsschicht zu leiten. Derartige „Böschungabdichtungen“ (z.B. Bentonitmatten) müssen sorgfältig (z.B. überlappend) in die Methanoxidationsschicht eingebunden werden.
- Der Übergang zu bereits bestehenden, andersartig abgedeckten Deponieabschnitten muss ebenfalls sorgfältig ausgebildet werden.

Fahrstraßen (meist dichter Aufbau als die Oxidationsschicht selbst) innerhalb der Methanoxidationsschicht sollten direkt auf der Gasverteilungsschicht (Schotter) angelegt und seitlich überlappend in die Methanoxidationsschicht eingebunden werden; d.h. die Wegränder müssen mit oxidationsaktivem Material ausreichend überschüttet werden. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass es bei derartiger Ausführung zu keinen nennenswerten Gasemissionen entlang von Fahrstraßen kommt. Trotzdem sollte die Länge des Wegenetzes innerhalb der Methanoxidationsschicht so gering wie möglich gehalten werden.

## 7.5 Instandhaltungsmaßnahmen

Bei Methanoxidationsschichten muss die Funktionstüchtigkeit über den Zeitraum der relevanten Methangasproduktion einer Ablagerung erhalten bleiben. In optimal ausgeführten Methanoxidationsschichten reguliert sich die **langfristige Abbauleistung** großteils von selbst, das heißt, dass sich das biologische System an die auftretenden - über den Jahresverlauf schwankenden - Methanbelastungen anpasst. Da die Gasproduktion einer Ablagerung, sprich die Methanfreisetzung, über die Zeit deutlich abnimmt, kann auch die Abbauleistung des Oxidationssystems mit der Zeit langsam zurückgehen, ohne dass es zu einer Einbuße der Wirkungsweise kommt. Eine langsame „Ermüdung“ des Oxidationssubstrates, d.h. natürlicher Rückgang der organischen Substanz und der Nährstoffe aufgrund von Mineralisierungs- und Auswaschungsprozessen, Abnahme (Verfeinerung) der Struktur, etc., stellt daher langfristig meist kein Problem dar.

Aus bisherigen Erfahrungen kann abgeleitet werden, dass intensive **Pflege- und Wartungsmaßnahmen** nicht notwendig sind, wenn die Methanoxidationsschicht von Beginn an gut geplant und ausgeführt wurde. Nur bei zu klein dimensionierten Anlagen (zu geringe abbauaktive Fläche wie z.B. bei Oxidationsfenstern innerhalb einer dichten Abdeckschicht, zu geringe Schichtstärke) bzw. zu starker Methanflächenbelastung aufgrund unzureichender Gasverteilungsschichten kann eine nachträgliche Ertüchtigung oder ein bereichsweises Austauschen des zu rasch ermüdeten Substrates der Oxidationsschicht notwendig werden. Bei falsch dimensionierten und daher zu stark belasteten Systemen kann es aufgrund einer lokal zu intensiven Oxidationstätigkeit und Sauerstoffzehrung zur Bildung von mikrobiellen Schleimablagerungen (Exopolymeren) kommen, die zum Verstopfen der Bodenporen, Einschränkung der weiteren Sauerstoffzufuhr und damit zu einem Versagen der Methanabbautätigkeit führen. In diesen Fällen (erkennbar durch Auftreten von Flächen mit hohen Temperaturen, Methankonzentrationen und Emissionen gemessen an der Oberfläche, Veränderung (Verhärtung, Klumpenbildung) des Bodensubstrates) ist dann eine Totalsanierung der Abdeckschicht, d.h. großflächiger Austausch des Abdecksubstrates, Erweiterung/Adaptierung der Gasverteilungsschicht bzw. die Ausdehnung der oxidationsaktiven Fläche anzuraten.

Falls eine **Vegetationspflege** notwendig ist (z.B. aufgrund behördlicher Auflagen, nutzungsbedingt, etc.), ist darauf zu achten, dass es dadurch zu keinen negativen Folgewirkungen für die Methanoxidationsleistung kommt. In ariden Klimaten kann sich eine zusätzliche Bewässerung durchaus positiv auf die Methanabbauleistung auswirken, hingegen sollte eine ständige Wassersättigung der Oxidationsschicht vermieden werden. Obwohl bisherige Erfahrungen aus der Praxis wie auch aus Drucktopfversuchen im Labor zeigen, dass sich Materialien mit hohem Anteil an organischer Substanz (z.B. Komposte) nicht nachhaltig verdichten lassen, sollte beim Hantieren mit Arbeitsmaschinen (Mähgeräte, etc.) darauf geachtet werden, dass es zu keiner Verdichtung der Abdeckschicht kommt – vor allem dann, wenn die Oxidationsschicht einen hohen Anteil an mineralischen und feinkörnigen Materialien hat. Dies ist ebenfalls beim nachträglichen Befahren der Oxidationsschicht zu Instandhaltungs- und Messzwecken an Installationen innerhalb der Methanoxidationsschicht (z.B. Gasbrunnen, Sickerschächte, Sonden) zu berücksichtigen.

## 7.6 Bepflanzung und Erosionsschutz

Der Bepflanzung kommt im Rahmen einer Methanoxidationsschicht besondere Bedeutung zu. Eine geeignete Vegetationsdecke trägt zu einer Verminderung des Sickerwassers bei (siehe INTERLAND-Leitfaden „Evapotranspirationsschichten zur Sicherung/Sanierung von Altablagerungen“; <http://www.altlastenmanagement.at/>) bei. Darüber hinaus kann die Wahl der Bepflanzung dazu beitragen, dass die Methanoxidation in der Abdeckschicht gefördert wird (Reichenauer, 2001), da sich die Bepflanzung auf die Zusammensetzung und Größe der Population von methanotrophen Bakterien auswirkt (Stralis Pavese, 2004). Bei der Rekultivierung und Festlegung der Nachnutzung von Methanoxidationsschichten ist zu beachten, dass die Abdeckung bei ungünstigen Bodenbedingungen (z.B. zu feucht) nicht mit schweren Arbeitsgeräten (z.B. Mähmaschinen) befahren werden darf (Standicherheit, Verdichtung). Bisherige Erfahrungen aus Feldversuchen und Pilotprojekten haben gezeigt, dass sich Energiegräser (z.B. Miscanthus) und Energiehölzer mit kurzer Umtriebszeit und hoher Interzeptions- und Transpirationsleistung gut zur Rekultivierung und Nachnutzung eignen (Gomiscek, 2001). Vielversprechend dürfte auch der Anbau alternativer Rohstoff- und Faserpflanzen sein.

Bei **Methanoxidationsfenstern** ist besonderes Augenmerk auf einen Oberflächenbewuchs und vor allem auf dessen Kontrolle zu legen.

Mehr Informationen zu Pflanzenarten, Pflege, Bewässerung, etc. sind im Anhang AH 12.5 zu finden.

## 7.7 Sanierungsdauer

Methanoxidationsschichten werden meist einmalig auf einer Ablagerung aufgebracht und sollen prinzipiell über den gesamten Zeitraum, in dem Methangas in der Ablagerung produziert wird, funktionstüchtig bleiben. Dies sind in Abhängigkeit der Art und des Alters der Abfälle sowie der Ablagerungsbedingungen mehrere Jahre bis Jahrzehnte. Zudem können nach Abklingen der Hauptgasproduktionsphase lokal immer wieder relevante Gasbildungen in Ablagerungen auftreten, deren zeitlicher Verlauf kaum einschätzbar ist. Eine weitgehende Erfassung dieser Emissionen kann nur dann sichergestellt werden, wenn eine Methanoxidationsschicht als **langfristige Maßnahme** eingesetzt wird.

Anzustreben ist, dass eine Methanoxidationsschicht gleichzeitig die Funktion einer Rekultivierungsschicht, die als Pflanzenstandort und dem Erosionsschutz dient, übernimmt. Somit stellt eine Methanoxidationsschicht aus funktionstechnischer Sicht eine abschließende Maßnahme auf einer Ablagerung dar.

## 7.8 Erreichbare Restemissionen

Bei gut ausgeführten Methanoxidationsschichten treten kaum Restemissionen auf bzw. liegen diese in der gleichen Größenordnung wie Emissionsraten aus natürlichen Ökosystemen (wie Sümpfe etc.). In Tabelle AH-2 im Anhang 12.6 sind einige Daten hinsichtlich Restemissionen und Emissionsreduktionsraten aus Feldversuchen und bisherigen Praxiserfahrungen mit Methanoxidationsschichten zusammengefasst.

In Feldversuchen mit optimal aufgebauter Methanoxidationsschicht konnten z. B. die Restemissionen gemittelt über das ganze Jahr und die gesamte Versuchsfläche auf  $< 0,15 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\text{d}$  ( $= 0,006 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\text{h}$ ) reduziert werden. Das entsprach einer Emissionsreduktion von mehr als 99 % im Vergleich zu einer unabdgedeckten Deponieoberfläche (Referenzfläche) am selben Standort (Huber-Humer, 2004).

Die Methanemissionen aus natürlichen Ökosystemen wie aus Sümpfen, Feuchtgebieten, etc. liegen in der Größenordnung von etwa  $0,028 - 0,56 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\text{d}$  ( $= 0,001 - 0,023 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\text{h}$ ) (Göttlich 1990; Bellisario, 1999; Sadredin et al., 1996; Bubier et al., 1995). Als Referenzgröße und Bewertungskriterium für die Funktionstüchtigkeit einer Methanoxidationsschicht kann dieser Wertebereich der Methanemissionen aus natürlichen Systemen herangezogen werden.

## 7.9 Qualitätssicherung

Bei der Herstellung der MOS ist eine entsprechende Qualitätssicherung durchzuführen, um deren sachgerechten Einbau sicher zu stellen und zu dokumentieren. Während des Betriebes der MOS ist in regelmäßigen Abständen ein Monitoringprogramm durchzuführen, um die Funktionstüchtigkeit der MOS nachzuweisen.

Probenahmen, Analytik und Bauaufsicht sind von dazu befähigtem Fachpersonal bzw. Fachanstalten durchzuführen. Untersuchungsergebnisse und Rückstellproben sind in Abhängigkeit eventueller Gewährleistungszeiträume aufzubewahren (empfohlen werden ca. 3 – 5 Jahre).

### 7.9.1 Qualitätssicherung bei der Herstellung

Die jeweiligen Normen/Verordnungen für die Materialien, die beim Bau einer MOS verwendet werden, sind - soweit vorhanden - zu berücksichtigen (z.B.: KompostVO, ÖNORMEN für Boden- und Strukturmaterial, etc.).

Folgende Parameter sind in geeigneter Weise zu kontrollieren und entsprechend zu dokumentieren:

- Eignung aller verwendeter Materialien zur Herstellung einer Methanoxidationsschicht (Gasverteilungsschicht und Schicht in der die eigentliche Methanoxidation stattfindet) (siehe Kap. 6 und Kap. 7).
- Visuelle Kontrolle der Homogenität des angelieferten Materials. Beim Lieferanten des jeweiligen Materials ist die Einhaltung der entsprechenden Normen/Verordnungen einzufordern und nach Möglichkeit zu überprüfen
- Zur Beweissicherung sind bei heterogenen Substraten je anfallender Einbaumenge von 500m<sup>3</sup> 5 Stichproben zu entnehmen. Die Probenmenge einer Stichprobe beträgt dabei jeweils ca. 5 Liter. Aus den 5 Stichproben wird eine homogene Mischprobe hergestellt und davon 1 Liter Rückstellprobe gewonnen. Bei homogenen Materialien ist eine entsprechend geringere Frequenz und Probenmenge möglich. Es ist dabei wiederum auf Repräsentativität zu achten (entsprechende rechtliche Vorgaben, Normen und Richtlinien nach Stand der Technik zur Probenahme sind zu berücksichtigen). Die Rückstellproben sind bei mindestens -18° C zu lagern und zumindest für die Zeit eines eventuellen Gewährleistungszeitraumes (3 - 5 Jahre) aufzubewahren.
- Kontrolle und nachvollziehbare Dokumentation der Einbauhöhe
- Kontrolle und nachvollziehbare Dokumentation des unverdichteten Einbaus (z. B. Fotos, Spatenprobe, Stechzylinderentnahme, Bestimmung der Trockenrohddichte mittels Volumenersatzverfahren<sup>3</sup>)

## 7.9.2 Folgemonitoring

### Gasemissionen

Ein wesentlicher Punkt zur Feststellung der Funktionstüchtigkeit der MOS betrifft die Erfassung der auftretenden Gasemissionen. Hierbei ist ein Vergleich mit der Ausgangssituation (Gasemissionen bei Bestandsaufnahme) vor Aufbringen der MOS vorzunehmen. Die Durchführung des diesbezüglichen Folgemonitorings ist in Kapitel 8 näher erläutert. Die erfolgte Erfassung der Gasemissionen ist unter Angabe der Position der einzelnen Messpunkte ausreichend zu dokumentieren. Die Untersuchungsergebnisse sind über zumindest 10 Jahre zu archivieren.

### Räumliche Dokumentation des Vegetationszustandes auf der Methanoxidationsschicht

Der Vegetationszustand ist zumindest 1 x pro Jahr während der Vegetationsperiode zu kontrollieren und zu dokumentieren. Es sind dabei folgende Parameter zu erheben:

- Art der Vegetation (häufige Pflanzenarten)
- Abschätzung des Bewuchsdichte der Bodenoberfläche
- Auftreten vegetationsfreier Zonen (Verdacht auf Deponiegasaustritt)

Um einen ausreichenden Erosionsschutz und eine hohe Evapotranspirationsleistung der Vegetationsschicht zu garantieren sind nötigenfalls Sanierungsmaßnahmen vorzusehen (Neupflanzung, Neuansaat, etc.)

### Monitoring Wasserhaushalt

Die Auswirkung der MOS auf den Wasserhaushalt der Altablagerung kann anhand einiger Parameter, wie z.B. Ermittlung von Niederschlag, Verdunstung, Sickerwasseranfall, Oberflächenabfluss, abgeschätzt werden und liefert Hinweise, ob durch das Aufbringen der MOS eine Reduktion des Sickerwasseranfalls (Kostensparnis bei Sickerwasserentsorgung bzw. geringere Belastung des Grundwassers bei Altablagerung ohne Basisdichtung) erreicht wird. Vorzugsweise sollten die Daten

<sup>3</sup> Das Volumenersatzverfahren dient zur Bestimmung der Trockenrohddichte, wenn eine Stechzylinderentnahme nicht durchführbar ist. Dabei wird aus der eingebauten Schicht Material entnommen, sodass ein gut begrenzter Hohlraum entsteht. Das Trockengewicht des entnommenen Materials wird im Labor bestimmt. Das Volumen des Hohlraums wird durch Einbringen eines geeigneten Ersatzmaterials (z.B. rieselfähiger Sand) bekannter Schüttdichte ermittelt.



für das Monitoring des Wasserhaushaltes automatisch aufgezeichnet werden und zumindest in täglicher Auflösung vorliegen. Die meteorologischen Daten können z.B. von der nächstgelegenen Messstation der Zentralanstalt für Meteorologie zu übernehmen. Niederschlag und Temperatur sollten allerdings direkt bei der Ablagerung gemessen und aufgezeichnet werden. Die Evapotranspiration ist mit Hilfe geeigneter Formeln (z.B. nach Penman-Monteith) zu berechnen. Der Oberflächenabfluss sollte außer bei Extremniederschlagsereignissen keine wesentliche Rolle in der Wasserhaushaltsbilanzierung spielen, da Methanoxidationsschichten eine gute Durchlässigkeit aufweisen sollten. Falls bei einer Ablagerung flächenmäßig große Böschungsbereiche auftreten, ist der Oberflächenabfluss zu sammeln (z.B. Auffanggräben) und zu quantifizieren.

Zur orientierenden Einschätzung des Wasserhaushaltes kann auch die im Bericht EVAPASSOLD (Heyer et al., 2005) beschriebene vereinfachte Vorgehensweise zur Abschätzung der Infiltrationsrate bzw. des Wasser/Feststoffverhältnisses herangezogen werden.

## 7.10 Kosten

Zu beachten ist, dass die hier angeführten Kosten zur Herstellung von Methanoxidationsschichten bzw. -fenstern sowie deren Betriebskosten nur grobe Richtpreise basierend auf derzeitigen Praxiserfahrungen von österreichischen Anlagen darstellen, die im Einzelfall in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen (z.B. lokale Verfügbarkeit der Baumaterialien, etc.) deutlich variieren können.

### Methanoxidationsschichten:

Erfahrungswerte für die Herstellung von Methanoxidationsschichten auf Kompostbasis (inkl. Planung, Baukosten, Bauaufsicht, Gasverteilungsschicht, Kompostherstellung und Qualitätssicherung) liegen in Abhängigkeit der abzudeckenden Fläche und der lokalen Gegebenheiten etwa zwischen 22 und 33 Euro/m<sup>2</sup>.

(Nähere Angaben betreff Investitionskosten für MOS sind im Anhang, Tabelle AH-3 zu finden).

### Methanoxidationsfenster:

Unter der Voraussetzung, dass die Ausbildung der Methanoxidationsfenster nachträglich in eine bestehende Deponieoberfläche integriert wird, ist mit Kosten von EUR 150 bis EUR 250 pro m<sup>2</sup> zu rechnen (Stand 2008). Dabei berücksichtigte Arbeiten beinhalten das

- Öffnen der Oberflächenabdeckung und der Kunststoffdichtungsbahn
- Herstellen der Randdämme (Böschungsneigung von 45° und 2m Höhe)
- Liefern und Einbringen eines Geotextiles
- Liefern und Einbringen einer 1\_m mächtigen Filtermaterialschicht (50% Gütekompost, 50% grobes Häckselmaterial)
- Liefern und Einbringen einer 0,5 m mächtigen Mulchschicht (grober Rindenmulch 0-60 mm = Gasverteilungsschicht)

Andere Praxiserfahrungen ergeben Investitionskosten von Methanoxidationsfenster (inklusive Rekultivierungsmaßnahmen) von bis zu 590 Euro/m<sup>2</sup>.

Die laufenden Betriebskosten werden vor allem vom begleitenden Monitoringaufwand (z. T. abhängig von Behördenauflagen) sowie eventuellen Pflegemaßnahmen des Bewuchses bestimmt. Bei Methanoxidationsfenstern kann auch der Austausch von ermüdetem Filtermaterial im Betrieb zusätzliche Kosten verursachen. Die Betriebskosten können in Abhängigkeit der jeweiligen Situation deutlichen Schwankungen unterliegen.

## 8 MONITORING

Die MOS ist hinsichtlich der Anforderungen an Methanemissionsminimierung detailliert auf ihre Funktionstüchtigkeit zu prüfen. Dazu ist innerhalb des ersten Jahres nach Fertigstellung der MOS mit einer Abnahmeprüfung (Erstüberprüfung der Funktionstüchtigkeit) zu beginnen. Die Abnahmeprüfung hat folgende Untersuchungen zu beinhalten und erstreckt sich etwa über ein Jahr, wobei bei der Auswahl der Messtage die meteorologische Situation zu berücksichtigen und zu dokumentieren ist:

1. Qualitative Überprüfung der gesamten relevanten Flächen in Anlehnung an die Deponieverordnung 2008 mittels FID-Rastermessungen<sup>4</sup>, mindestens einmal pro Quartal. Die Rasterpunkte sind auf augenscheinlich homogenen, ebenen Flächen in einem maximalen Abstand von 20 x 20 m zu setzen. Bei Inhomogenitäten an Böschungen und im Randbereich sowie bei offensichtlichen Schadstellen (Vegetationsschäden, „Hotspots“ etc.) ist der Messraster mit einem maximalen Rasterabstand von 10 x 10 m entsprechend zu verdichten. Einbauten, mögliche Schwachstellen und offensichtliche „Hotspots“ sind gesondert in das Messprogramm aufzunehmen. Die Dokumentation der FID-Messung hat neben der örtlichen Festlegung und dem Konzentrationswert, angegeben in ppm CH<sub>4</sub>, auch den Gasdurchfluss des Messgerätes und die Auflagefläche der Probesonde zu umfassen. Dies ist für die Orientierung über die Emissionsrate am Messpunkt wichtig.

Die Ergebnisdarstellung wird einerseits in tabellarischer Form und andererseits als Isolinienkarte empfohlen. Detaillierte Methodikbeschreibung für FID-Begehungen: Rettenberger (2004 – Arbeitshilfe Deponiegas; [http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/materialien/mat65/mat65\\_web.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/materialien/mat65/mat65_web.pdf))

2. Basierend auf den Ergebnissen der FID-Messungen sind 2 x pro Jahr zusätzlich Methan- und CO<sub>2</sub>-Massenstrom-Messungen mit einem validierten Messverfahren durchzuführen (wahlweise mittels Trichter, Messkammern oder Messtunnel). Dabei wird ein definierter Volumenstrom angesetzt (Zwangsbelüftung), wodurch bei Gaszutritt aus dem Untergrund die Bestimmung einer Flächenemissionsrate, angegeben in mg/m<sup>2</sup>\*h, möglich wird. Die Probenahmeorte sind nach den Ergebnissen der FID-Messungen auszurichten und Stellen mit erhöhten FID-Werten speziell und in jedem Fall zu beproben. Für die Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration ist eine Auflösung im ppm-Bereich erforderlich (z.B. NDIR-Detektor), wobei zwischen den Einzelmessungen die Außenluftkonzentration an CO<sub>2</sub> zu bestimmen ist.

Nach der Abnahmeprüfung ist in den Folgejahren für die laufende Kontrolle 1 x pro Jahr eine großflächige FID-Rastermessung gemäß Punkt 1 durchzuführen, wobei der maximale Rasterabstand auf homogenen ebenen Flächen auf max. 30 x 30 m erweitert werden kann. Offensichtliche Schadstellen sind auf jeden Fall aufzunehmen und Böschungsbereiche in einem entsprechend dichteren Raster zu beproben. Bei Bedarf sind basierend auf den Ergebnissen der FID-Rastermessungen Methanmassenstrom-Bestimmungen durchzuführen.

Die Abnahmeprüfung ist von einer befugten Fachperson oder Prüfstelle durchzuführen, eine laufende Qualitätssicherung der Prüfeinrichtungen ist sicherzustellen.

Kontrollpegel für tiefengestaffelte Temperatur- und Gaskonzentrationsmessungen (CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) in der Abdeckschicht an repräsentativen Punkten (eventuell in Anlehnung an die Aufstellpunkte für Massenstrombestimmung) sind empfehlenswert, da diese wichtige Anhaltspunkte für die Tiefenlage des aktiven Methanabbauhorizontes und qualitative Hinweise zum Methanabbau liefern sowie auch für die Berechnung einer Methanmassenstrombilanz hilfreich sein können.

Weiters sind auch Feststoffuntersuchungen der MOS empfehlenswert (z.B. Probenahme mittels Bodenbohrer/Schlagsonden), die alle 5 - 10 Jahre durchgeführt werden könnten, um den Mineralisierungsverlauf (GV, TOC, AT<sub>4</sub>), die Veränderung der Nährstoffsituation (N, P, K, Ca) und des Luftporenvolumens (Stechzylinder, Wassergehalt) zu dokumentieren. Diese Parameter geben einen guten qualitativen Hinweis auf die langfristige Entwicklung und prinzipielle Funktionstüchtigkeit einer MOS.

Optional kann – wenn eine Feststoffprobenahme vor dem Aufbringen einer MOS durchgeführt worden ist - auch der Abfallkörper in größeren Intervallen (ca. alle 10 - 15 Jahre) repräsentativ beprobt werden, um die Auswirkung einer MOS auf die Entwicklung der Ablagerung (Abbauzustand,

---

<sup>4</sup> FID: Flammenionisationsdetektor, misst die Summe flüchtiger organischer Verbindungen, die im ggst. Anwendungsbereich fast ausschließlich aus Methan bestehen.

Wasserhaushalt, etc.) zu erheben (detailliertere Information im Anhang 12.9). Der Probenahmeraster ist entsprechend den Ergebnissen der Erstuntersuchung auszurichten.

Für kleinere (< 1 ha) oder alte, nur mehr sehr schwach gasende Deponien ist das Monitoringprogramm verhältnismäßig zu reduzieren. Für Methanoxidationsfenster ist das intensive Monitoringprogramm der Abnahmeprüfung auf 3 Jahre auszudehnen und die Rasterpunkte an die Fenstergröße entsprechend anzupassen; zumindest sind pro Fenster 10 FID-Rasterpunkte bzw. je 1 x 1 m ein Rasterpunkt aufzunehmen, und bei Bedarf zumindest 1 Aufstellungspunkt für Emissionsstrommessungen vorzusehen. Auch die zwischen den Methanoxidationsfenstern liegende Deponieoberfläche ist mittels FID rasterförmig oder zumindest stichprobenartig auf austretendes Methangas zu überprüfen.

## 9 NUTZUNG / NACHNUTZUNG

### 9.1 Nutzungspotentiale während der Sanierung / Sicherung

Während der Sanierungszeit ist eine Nutzung der Oberfläche unter Bedachtnahme auf die Erhaltung der Funktionstüchtigkeit der Methanoxidationsschicht prinzipiell möglich. Folgende Veränderungen könnten eine nachteilige Auswirkung auf die Funktion (vor allem den Gashaushalt des Bodens) haben und sind daher im Zuge einer eventuellen Nutzung zu unterlassen:

- Verdichtung des Bodens (z.B.: durch Befahrung mit schweren Fahrzeugen und/oder bei nassem Boden)
- Zerstörung der Oberflächenstruktur (z.B.: Graben von Löchern, Umgraben)
- Aufschüttung und Ablagerung von Material
- Versiegelung (auch von Teilbereichen)

Bei jeglicher Nutzung der Oberfläche muss gewährleistet sein, dass an allen Punkten der Oberfläche eine Überprüfung der Funktionstüchtigkeit möglich ist (Zugang für FID- bzw. Kammer-Messungen).

Konkrete mögliche Nutzungen wären:

- Parkanlage mit Freizeiteinrichtungen (ohne Bodenversiegelung, zu berücksichtigen ist, dass keine explosiven Gas-Luftgemische entstehen können)
- Landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Nutzung (z.B. Anbau von Energiepflanzen und alternativen Rohstoffen mit entsprechender Bodenbearbeitung); Futter- und Nahrungsmittelproduktion ist zu unterlassen

### 9.2 Nutzungspotentiale nach der Sanierung / Sicherung

Prinzipiell ist eine Methanoxidationsschicht als eine langfristige Sicherungs-/Sanierungsmaßnahme zu betrachten, die nach heutigem Stand des Wissens über mehrere Jahrzehnte oder länger ihre Funktion erfüllen soll. Erst wenn die Ablagerung/Deponie ausreagiert ist, es also zu keiner Methanbildung mehr kommt und bereits Luft in den Abfallkörper eindringt, hat die Methanoxidationsschicht ihre Funktion erfüllt und es kann von einer erfolgten Sanierung gesprochen werden. In diesem Fall sind die in Kapitel 9.1 genannten Nutzungseinschränkungen nicht mehr zu berücksichtigen.

Mögliche Nutzungseinschränkungen können sich aber aus anderen Aspekten ergeben, etwa wenn die Methanoxidationsschicht zugleich auch als Evapotranspirationsschicht zur Verminderung des Sickerwassers betrieben wird, oder wenn andere Einschränkungen auf Grund des Sonderstandortes Deponie (z.B. Standfestigkeit von Bauwerken, Gasmigration bei unterirdischen Bauwerken) vorliegen.

### 9.3 Beispiele für erfolgreichen Einsatz

Derzeit sind in Österreich einige kleinere, in der Nachsorgephase befindliche Deponien bzw. Kompartimente temporär (meist auf ca. 20 Jahre bewilligt) mit Methanoxidationsschichten auf Kompostbasis versehen. Auch eine Altablagerung wurde bereits mit einer MOS endgültig abgedeckt. Weiters wurden in Österreich auf einigen älteren, schwach gasenden Deponien und Altablagerungen Methanoxidationsfenster errichtet. Detaillierte Angaben (inkl. Kosten) zu einigen österreichischen Anwendungsbeispielen sind in Tabelle AH-3 im Anhang zu finden.

In Dänemark ist derzeit ein großes EU-life Projekt im Laufen wo es ebenfalls um die technische Umsetzung und Anwendung von Methanoxidationsschichten und –fenstern sowie deren (wissenschaftliches) Monitoring geht (<http://biocover.er.dtu.dk/>).

## 10 AUSBLICK - INTERNATIONALE ANWENDBARKEIT

Der Einsatz von innovativen Verfahren zur Emissionsbegrenzung ist international recht gering verbreitet. Befindet sich die MOS-Technologie in den westlichen Industriestaaten zurzeit in der Validierungsphase, so findet sie in vielen Schwellen- und Entwicklungsländern, aber auch innerhalb Europas in vielen ost- und südeuropäischen Ländern, noch keine praktische Anwendung. Neben zahlreichen wilden Ablagerungen wurden in jenen Ländern zu früheren Zeiten viele Deponien z.B. in Tagebaurestlöchern eingerichtet, großteils ohne wirksame Basis- und Oberflächenabdeckung, welche nun umweltgerecht geschlossen und langzeitsicher gemacht werden müssen. Jedoch gestaltet sich die gesicherte Stilllegung solcher Deponien in vielen Ländern allein schon aus Kapazitätsgründen problematisch. So müssten z.B. allein in Rumänien, um die Umweltsituation zu entspannen, von ca. 450 großen Hausmülldeponien in den nächsten Jahren etwa 200 bis 400 geschlossen werden. Gerade im Bezug auf solche zu sichernden Altdeponiestandorte würde sich der Einsatz von Methanoxidationsschichten anbieten, da sich in vielen Fällen die Ausräumung und Umlagerung der Abfälle bzw. eine nachträgliche Installation von Gaserfassungs- und Behandlungsanlagen als Sanierungsmaßnahme vermutlich als zu kostspielig erweisen wird.

Selbst innerhalb europäischer Länder, obwohl hier eine Angleichung an die Umweltstandards der Europäischen Union angestrebt wird, existieren noch große Unterschiede in den jeweiligen Regelements. So schreibt z.B. die aktuelle technische Regelung 757/2004 für den Deponiebau in Rumänien zwar eine ausreichende Basisabdichtung vor, allerdings ist diese lediglich im Sinne eines geeigneten geologischen Untergundaufbaus am jeweiligen Standort zu verstehen. Regelungen zur Ausführung von Oberflächenabdichtung oder Deponiegaserfassung sind nicht vorgeschrieben, wodurch einer Reduzierung von klimarelevanten Gasen auch weiterhin nicht Rechnung getragen wird. Vor allem in den jüngsten Beitrittsländern wie Rumänien und Bulgarien stehen vorerst grundlegende Bestrebungen im Vordergrund, wie die gesamte Abfallwirtschaft an die Regelungen der Europäischen Union anzugleichen sowie die existierenden akuten Umweltgefahren zu beseitigen. Bis Klimaschutzaspekte in solchen Ländern Beachtung finden, wird noch längere Zeit vergehen, denn für die vollständige Implementierung der Europäische Richtlinie 99/31/EC bezüglich der Deponierung von Abfällen, hat z. B. die rumänische Regierung eine Übergangsfrist bis 2017 beantragt. Es bleibt abzuwarten, ob dann auch eine rechtliche Grundlage bereitgestellt wird, innovative Verfahren zur Emissionsbegrenzung einzusetzen.

Durch die umfangreichen Förderprogramme der EU und das Engagement westlicher Investoren werden jedoch zurzeit zunehmend neue Deponien nach dem Stand der Technik auf EU-Niveau errichtet (wie z.B. in Drobeta Turnu 2004 und in Arad 2003, wo auch österreichische Unternehmen am Bau moderner Abfalldeponien nach dem Stand der Technik beteiligt waren). Hier bestünde die Gelegenheit, über eine Einplanung von MOS in das Gesamtkonzept einer Deponie gleich von Anfang an, den Wasserhaushalt im Deponiekörper wirksam zu steuern und Restemissionen gezielt zu reduzieren.

Als eine kostengünstige Variante würden sich MOS also sowohl bei der Sicherung von Altdeponierungen als auch bei der Planung neuer Deponien zur Reduzierung von klimarelevanten Methanemissionen gerade auch in Schwellen- und Entwicklungsländern anbieten.

## 11 REFERENZEN

- Ambrosch W. (1993): Methodik zur Überprüfung der physikalischen Eigenschaften von aufbereiteten biogenen Abfällen zum Zweck der Optimierung des Rotteprozesses, Diplomarbeit am Institut für Wasserversorgung, Gewässergüte und Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, 1993.
- Barlaz, M.A., Green, R.B., Chanton, J.P., Goldsmith, C.D. and Hater, G.R. (2004): Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions. *Environmental Science and Technology*, 38, 18, 4865-4877.
- Bellisario L.M., Bubier J.L., Moore T.R. (1999): Controls on CH<sub>4</sub> emissions from a northern peatland, *Global Biochemical Cycles*, Vol 13, No. 1, p. 81 – 91.
- Bogner, J., Spokas, K., Chanton, J., Powelson, D., Fleiger, J. & Abichou, T. (2005): Modeling landfill Methane Emissions from Biocovers: A combined theoretical-empirical Approach. *Proceedings Sardinia '05 – Tenth International Waste Management and Landfill Symposium*, 3 – 7 October 2005, CISA, Cagliari, Italy.
- Börjesson, G., I. Sundh, A. Tunlid, Frostegard A., and B. H. Svensson (1998): Microbial Oxidation of CH<sub>4</sub> at high partial pressures in an organic landfill cover soil under different moisture regimes. *FEMS Microbiology Ecology* 26, 207-217.
- Börjesson, G., Sundh, I. & Svensson, B. (2004): Microbial oxidation of CH<sub>4</sub> at different temperatures in landfill cover soils. *FEMS Microbiology Ecology* 48, 305-312.
- Bubier J.L., Moore T.R., Bellisario L., Comer N.T. (1995): Ecological controls on methane emissions from a northern peatland complex in the zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada, in *Global Biochemical Cycles*, Vol 9, No. 4, p. 455 – 470.
- Cabral, A., Arteaga, K., Rannaud, D., Ait-Benichou, S., Pouet, M.-F., Allaire, S., Jugnia, L. B. & Greer, C. (2007): Analysis of methane oxidation and dynamics of methanotrophs within a passive methane oxidation barrier. *Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium*.
- European Environment Agency (EEA) (2006): Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2004 and inventory report 2006. Submission to the UNFCCC Secretariat. EEA Technical report, no. 6. 2006. ISSN 1725-2237.
- Felske, C. (2003): Minimierung von Restgasemissionen aus Siedlungsabfalldeponien durch Methanoxidation in Deponieabdeckschichten, Doctoral thesis at the University Duisburg-Essen, Fachbereich Bauwesen, Schriftenreihe Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft Universität Essen, Heft 20.
- Gebert, J. & Gröngroft, A. (2006): Performance of a passively vented field-scale biofilter for the microbial oxidation of landfill methane. *Waste Management* 26, 399-407.
- Gomiscek, T., Cepuder, P., Lechner, P. (2001): Investigation of Water Budget on a Closed Landfill With Alternative Cover Layer and Recultivated With Fuel Plants. in: *SARDINIA 2001 - Proc. of 8th International Waste Management and Landfill Symposium*, Vol. II "Leachate and Landfill Gas" CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari (ed.), p. 399 ff.
- Görtler N. (2000): Gasmessungen im Rahmen eines Feldversuches zur Ermittlung der Methanoxidation in der Abdeckschicht einer Hausmülldeponie, Diplomarbeit, erstellt zur Absolvierung des Studienganges der FH Birkefeld, Deutschland, September 2000.
- Göttlich K. (1990): *Moor- und Torfkunde*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 3. Auflage, Stuttgart 1990.
- Hartung E., Monteny G.-J. (2000): Emission von Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) aus der Tierhaltung, *Agrartechnische Forschung* 6 (2000) Heft 4, S. 62-69.
- Heyer K.U. et al. (2005): Evaluierung und Erstabschätzung von Altablagerungen (EVAPASSOLD), Grund- und Erweiterungsprojekt, Zusammenfassender Abschlussbericht Phasen I –III, April 2005; LIFE99 ENV/A/000390; (<http://www.evapassold.at/endbericht/eva.pdf>)
- Heyer K.U., Hupe K., Koop A., Stegman R., Willand A. (2006): Wann können Deponien aus der Nachsorge entlassen werden? Ergebnisse eines BMU UFOPLAN-Vorhabens. In: *Deponie- & Biogasanlagen der gemeinsame Einstieg*. Fachtagung vom 09.-10.05.2006 in Dresden. DAS – IB GmbH, Kiel.

- Huber-Humer M. (2004): Abatement of landfill methane emissions by microbial oxidation in biocovers made of compost. Doctoral Thesis at the University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna, Institute of Waste Management, Vienna 2004.
- Humer, M., & Lechner, P. (1999): Alternative Approach to the Elimination of Greenhouse Gases from Old Landfills. *Waste Management & Research* 17, 443-452.
- IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- IPCC (2007): Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Iversen, B.V. (2001): Soil Air Permeability and Saturated Hydraulic Conductivity: Scale Issues, Spatial Variability and Surface Runoff modelling. Dissertation, Aalborg University, Environmental Engineering Laboratory, Denmark, 2001.
- Kirkham, D. (1947): Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 11:93-99.
- Kjeldsen, P., Fredenslund, A. M., Scheutz, C. & Lemming, G. (2007): Engineered biocovers – passive mitigation systems for landfill gas: status of the demonstration project BIOCOVER. In: Lechner, P. (Ed.): Waste matters. Integrating views. Proceedings 2nd BOKU Waste Conference 2007, pp. 133-142.
- NUA (2002): Gasmessdaten, FID-Messungen und Emissionsstrombestimmungen von der Deponie Ameis, Niederösterreich in den Jahren 1999 – 2001, Interner Bericht, Niederösterreichische Umweltschutzanstalt, Abteilung für Luftreinhaltung, 2002.
- ÖNORM S 2023 (1986): Untersuchungsmethoden und Güteüberwachung von Komposten; Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM S 2027-1 (2002): Stabilitätsparameter zur Beurteilung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen, Teil 1: Atmungsaktivität (AT<sub>4</sub>); Österreichisches Normungsinstitut, Wien .
- ÖNORM S 2027-2 (2002): Stabilitätsparameter zur Beurteilung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen, Teil 2: Gasspendensumme im Inkubationsversuch (GS<sub>21</sub>); Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM S 2088-1 (1997): Altlasten, Gefährdungsabschätzung für das Schutzgut Grundwasser; Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM S 2091 (2006): Altlasten – Feststoffprobenahme, Entnahme von Feststoffen von Ablagerungen und Altstandorten; Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- PRANTL R., TESAR M., HUBER-HUMER M., HEISS-ZIEGLER C. (2006): In-situ Aerobisierung von Ablagerungen, Technischer Leitfaden erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes INTERLAND, Wien 2006.
- REICHENAUER, T.G. (2001): Deponiebegrünung - Entwicklung einer Pflanzendecke zur Optimierung der biologischen Methanoxidation und Minimierung der Sickerwassermengen, Endbericht OEFZS-UL-0162
- Rettenberger G., Gröbner H. (2003): Flächige Deponieentgasung mit überlappender Kunststoffdichtungsbahn an der Reststoffdeponie Weig; in: Rettenberger / Stegmann (Hrsg.): Stilllegung und Nachsorge von Deponien - Schwerpunkt Deponiegas, Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft Band 14, Verlag Abfall aktuell, 2003
- Rettenberger, G. (2004): Arbeitshilfe Deponiegas, LUA-Materialien Band 65, Herausgeber: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW); Essen, 2004, ISSN 0948-079X 0947-5206; [http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/materialien/mat65/mat65\\_web.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/materialien/mat65/mat65_web.pdf)
- Rinne, J., Pihlatie, M., Lohila, A., Thum, T., Aurela, M., Tuovinen J.-P., Laurila, T. and Vesala, T. (2005): Nitrous oxide emissions from a municipal landfill. *Environmental Science and Technology*, 39, 7790-7793.

- Sadredin C., Moosavi C., Crill P.M. (1996): Controls on CH<sub>4</sub> flux from an Alaskan boreal wetland, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol 10, No. 2, p. 287 – 296.
- Scheffer F., und Schachtschabel P. (1992): „Lehrbuch der Bodenkunde“, 13. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1992
- Scheutz, C. and Kjeldsen, P. (2005): Biodegradation of trace gases in simulated landfill cover systems. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 55, 7, 878-885.
- Scheutz, C., Mosbæk, H., Kjeldsen, P. (2004): Attenuation of Methane and Volatile Organic Compounds in Landfill Soil Covers. *Journal of Environmental Quality*, 33, 1, 61-71.
- Stralis-Pavese, N. , A. Sessitsch, A. Weilharter, T.G. Reichenauer J. Riesing, J. Csontos, J. C. Murrel and L. Bodrossy (2004): Optimization of diagnostic microarray for application in analysing landfill methanotroph communities under different plant covers. *Experimental Microbiology*, 6 (4), 347-363.
- Streese J. & Stegman, R. (2003): Microbial oxidation of CH<sub>4</sub> from old landfills in biofilters. *Waste Management* 23, 573–580.
- Sullivan, J.P., Dickinson, D. and Chase, H.A. (1998): Methanotrophs, *Methylosinus trichosporium* OB3b, sMMO, and their application to bioremediation. *Critical Reviews in Microbiology*, 24, 4, 335-373.
- Tesar M., Luschützky E., Huber-Humer M., Fritz I., Smidt E., Prantl R., Wimmer B. (2006): Alternative Monitoringmethoden für Altablagerungen, Technischer Leitfaden erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes INTERLAND, Wien 2006.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2006): US Emission Inventory 2006. Inventory of U.S. Greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2004. USEPA #430-R-06-002.
- Watzinger, A., Reichenauer, T.G., Blum, W.E.H., Gerzabek, M.H. and Zechmeister-Boltenstern, S. (2005): The effect of landfill leachate irrigation on soil gas composition: methane oxidation and nitrous oxide formation. *Water, Air and Soil Pollution*, 164, 295-313.
- Wawra, B. & Holfelder, T. (2003): Development of a landfill cover with capillary barrier for methane oxidation – the capillary barrier as gas distribution layer. In: *Proceedings of the 9th International Waste Management and Landfill Symposium*, CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy, pp. 307–308 (Electronic full text available on the Proceedings CD).
- WIMMER B., REICHENAUER T. (2006): Evapotranspirationsschichten zur Sicherung/Sanierung von Altablagerungen, Technischer Leitfaden erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes INTERLAND, Wien 2006.
- Zeiss, C. A. (2006): Accelerated methane oxidation cover systems to reduce greenhouse gas emissions from MSW landfills in cold-semi-arid regions. *Water, Air, and Soil Pollution* 176, 285-306.



## 12 ANHANG

### 12.1 Laborversuch zur Bestimmung der Methanabbaukapazität von Substraten

Folgender Versuchsablauf zur Bestimmung der Eignung von Materialien für die Herstellung von Methanoxidationsschichten wird empfohlen:

- Unter standardisierten Bedingungen wird das als Trägersubstrat in Frage kommende Material in Versuchsgefäße eingebaut. Sehr grobstückiges Material ist vor Einbau in die Versuchsgefäße auf  $\leq 20$  mm abzusieben. Am besten eignen sich Versuchssäulen, die von unten kontinuierlich mit Methan (bzw. Deponiegasgemisch) beaufschlagt werden und die Luftzufuhr (Sauerstoffversorgung) gegenläufig von oben erfolgt. Damit werden natürliche Deponiebedingungen am besten simuliert. Die Methan- bzw. Deponiegaszufuhrraten richten sich nach der Gasemissionssituation der gegenständlichen Ablagerung bzw. sollen diese auch ein Vielfaches der zu erwartenden Gasflüsse betragen, um die Leistungsgrenzen des Materials abzustecken. Die Luftversorgung soll ein Methan/Sauerstoffverhältnis von 1:2,5 nicht unterschreiten. Das heißt, bei einer Methanzufuhr von  $5 \text{ l/m}^2\text{h}$  soll die Sauerstoffzufuhr im Minimum  $12,5 \text{ l/m}^2\text{h}$  ( $= 60 \text{ l Luft/m}^2\text{h}$ ) betragen.
- Das Fassungsvermögen der Versuchssäulen sollte nicht kleiner als 5 Liter sein (entspricht bei einer Schichthöhe von ca. 60 - 70 cm in der Versuchssäule einem Säulenquerschnitt von 10 cm), bei heterogenen Materialien (wie z.B. Komposten) wird ein größerer Säulenquerschnitt (z.B. 20 cm) empfohlen, um eine entsprechende Repräsentativität zu gewährleisten. Messöffnungen in der gasdicht verschließbaren Versuchssäule müssen vorhanden sein, um Gaskonzentrations- und Temperaturprofile erstellen zu können. Ein schematischer Aufbau einer Versuchssäule ist beispielhaft in Abbildung AH-1 dargestellt. Durchsichtige Versuchssäulen (z.B. aus Acrylglas) sind empfehlenswert, da Veränderungen im Material (Feuchteveränderung, Ausbildung des Methanoxidationshorizontes, etc.) beobachtet und dokumentiert werden können.

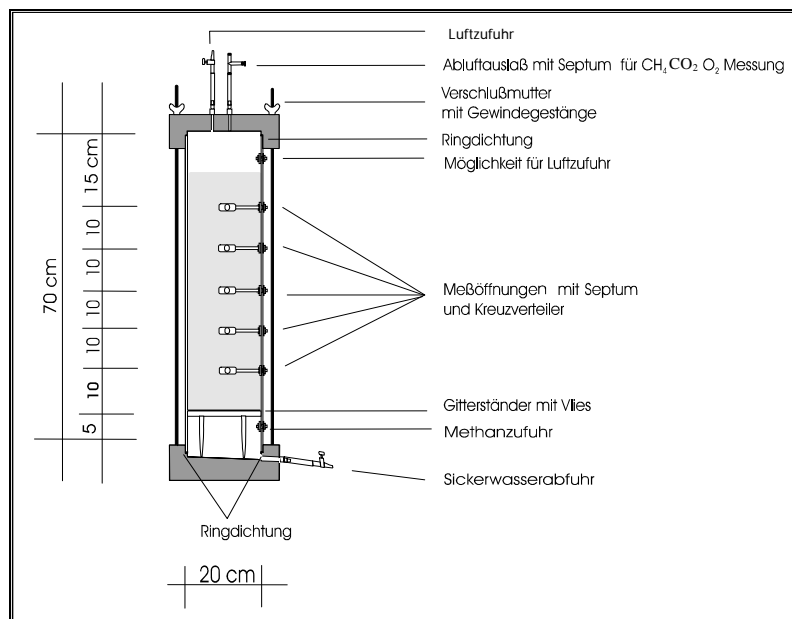


Abbildung AH-1: Beispielhafter Aufbau einer Versuchssäule zur Untersuchung der Methanoxidationskapazität eines Trägermaterials

- Die Versuche sollen bei konstanten Temperaturbedingungen ( $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ) z.B. in einer Klimakammer durchgeführt werden. Die zu untersuchenden Materialien werden in einer Schichtstärke von rund 60 - 70 cm per Hand leicht verdichtet eingebaut. Der Einbauwassergehalt entspricht etwa 40 - 60 % der maximalen Wasserhaltekapazität des Materials. Jedes Material soll zumindest in einem Doppelansatz untersucht werden. Eine empfohlene Untersuchungsdauer von 6 - 8 Wochen sollte nicht unterschritten werden, um auch „Langzeiteffekte“, wie z.B. die Bildung

von exopolymeren Substanzen, die eine negative Auswirkung auf die Methanabbauleistung haben, zu erfassen. (Exopolymere sind klebrige Schleimabsonderungen (hauptsächlich Zuckerverbindungen), welche von methanoxidierenden Bakterien v.a. unter Sauerstoffmangel und/oder Kohlenstoffüberschuss (zu hohe Methanbelastung) ausgeschieden werden und zu einem Verkleben der Bodenporen führen.)

- Über eine einfache Methanmassenbilanz (bekannte (gemessene) Methanzufuhr rate und gemessener Abluftstrom sowie Methankonzentration im Abluftstrom) werden die Abbauraten und somit die Methanoxidationskapazität ermittelt. Zusätzliche Aussagen über das Methanabbauverhalten können auch mit Hilfe der Gas- und Temperaturprofile getroffen werden bzw. über eine CO<sub>2</sub>-Bilanzierung.
- Das zu testende Material ist begleitend dazu vor bzw. auch nach Versuchsdurchführung auf folgende Parameter zu untersuchen: Atmungsaktivität (AT<sub>4</sub>, zur Bestimmung der Reife bei Kompostsubstraten), Glühverlust bzw. TOC, Gesamtstickstoff, Luftporenvolumen innerhalb der Versuchssäule (Wassereinstaumethode – siehe Anhang 12.2), Sieblinie, Wasserhaltekapazität, Volumengewicht, Phosphor, pH-Wert, Leitfähigkeit, Ammonium, Nitrat, Nitrit (siehe auch Kapitel 6.2).

Ein Material kann als geeignet beurteilt werden, wenn die auf diese Weise (also unter idealen Bedingungen) ermittelten Methanabbauraten nach einer etwa ein- bis zweiwöchigen Adaptionsphase möglichst konstant bei 100% liegen (d.h. das gesamte zugeführte Methan entsprechend der zu erwartenden Emissionssituation der Ablagerung sollte abgebaut werden). Bei Steigerung der Methanzufuhrmenge auf das Doppelte der vor Ort zu erwartenden Gasmenge sollten die Abbauraten 70 - 80 % nicht unterschreiten.

In der folgenden Tabelle sind beispielhaft einige Materialien hinsichtlich ihrer Abbauleistung und relevanter Charakterisierungsparameter (Organikgehalt, Ammoniumgehalt als möglicher Hemmer, Reifeparameter, und das LPV als ein wesentlicher physikalischer Kennwert) zusammengefasst. Die min-Werte in der Tabelle stellen vorwiegend die Oxidationsraten während der Adaptionsphase (lag-Phase) zu Beginn der Untersuchungen dar.

Tabelle AH-1: Diverse nach erwähntem Versuchsablauf auf ihre Methanoxidationskapazität untersuchten Materialien mit einigen relevanten Charakterisierungsparametern; m = Median, Min – max = Wertespanne vom kleinsten bis größten Messwert; LPV= luftgefülltes Grob-/Mittelporenvolumen ermittelt durch Wassereinstaumethode in den Versuchssäulen

Material	Zusatz-Info	TOC	NH <sub>4</sub>	AT <sub>7</sub>	LPV	Versuchs-dauer	Adap-tions-zeit	CH <sub>4</sub> – Zufuhr	Oxidation (%)	
									% TM	ppm
Müllkompost 1	--	16,8	5	--	31	22	4	230	55 - 100	95
Müllkompost 2	Frischer Kompost	14	80	9,8	27	187	Nicht erreicht	250	13 - 100	53
Müllkompost 3	Reifkompost	12,2	38	4,5	26	187	12	250	43 - 100	100
Müllkompost 4	Gute Struktur	14,8	7	6,8	32	84	5	300	62 - 100	98
Müllkompost 5	--	16,3	105	7,1	29	56	6	250	62– 100	100
KS-Kompost 1	--	12,9	56	6,9	29	45	10	250	50 - 100	100
KS-Kompost 2	Reifkompost	13,7	8	2,7	29	53	5	250	87 - 100	100
KS-Kompost 3	Hoher NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> gehalt, NO <sub>2</sub> !	16,4	1200	6,2	40	35	Nicht erreicht	130	5 - 71	35
KS-Kompost 4	Hohe CH <sub>4</sub> -Zufuhr	13,3	4	1,9	34	84	20	300	54 - 96	85
KS-Kompost 5	Gute Struktur	14,1	1	1,1	47	32	10	250	27 - 100	100
Boden 1	Sehr feinkörnig	3,3	7	0,2	12	51	10	250	35 - 47	42
Boden 2	Gartenerde hohe CH <sub>4</sub> -Zufuhr	2,6	1	0,2	27	84	15	300	51 - 100	97
Boden 3	Mineralische Deponie-abdeckung	0,9	1,1	0,3	35	36	16	60	0 -35	19
MIX 1	70% KSK1 + 30% Sand	7,7	3	4,8	26	55	32	250	50 - 100	85
MIX 2	70% KSK2 + 30% Sand	7,8	4	1,9	29	53	Nicht erreicht	250	35 - 100	75
MIX 3	60% KSK3 + 40% Boden2	10,2	451	2,5	38	35	Nicht erreicht	130	0 - 58	37
MIX 4	60% KSK4 + 40% Boden2	7,0	2	0,8	31	72	9	300	51 - 100	83
MIX 6	70%Müllkompost5 + 30% Sand	8,1	50	3,0	25	56	4	250	51 - 100	100
MBA-Material	Aerob stabilisiert, <20 mm	17,3	218	15,9	19	72	17	280	60 - 80	71
Altlasten-material 1	ca. 15 Jahre alter Müll, <20 mm abgesiebt	3,0	84	2,4	21	59	15	250	15 - 70	45
Altlasten-material 2	Altlastenmaterial 1 +30% Struktur-material	7,7	108	11,4	31	59	15	250	20 - 80	60

## 12.2 Bestimmung des luftgefüllten Porenvolumens innerhalb der Versuchssäulen (LPV)

Die Versuchssäulen werden auf einer elektronischen Waage gewogen. Danach werden die Versuchssäulen mit dem eingebauten Material (Markierung der Oberflächenhöhe) sehr langsam von unten mit Wasser eingestaut und im gefluteten Zustand wiederum gewogen. Nach ca. 24 Stunden im eingestauten Zustand (eventuell Wassernachfüllung bis zur Materialoberfläche/Markierung und nochmaliges Verwiegen notwendig) wird das Wasser langsam abgelassen und die Säulen nach 8 Stunden und ca. 24 Stunden wieder abgewogen. Aus der Differenz der Gewichtsbestimmung vor dem Einstauen mit Wasser und im gefluteten Zustand lässt sich das luftgefüllte Porenvolumen (Grob- und Mittelporen) bei Einbauwassergehalt relativ genau einschätzen. Die Differenz aus dem Gewicht der gefluteten Säule und der Säule 24 Stunden nach dem Ablassen des Wassers, lässt das Luftporenvolumen bei Wasserhaltekapazität ( $\approx$  Feldkapazität) einschätzen.

Eine weitere Möglichkeit, das Luftporenvolumen aus Routineparametern der Kompostanalytik abschätzen zu können, stellt die Berechnung nach folgender Formel dar (Ambrosch, 1993):

$$LPV = \left( 1 - \frac{\rho_{FS} \times (1 - w)}{\rho_s} - \frac{\rho_{FS} \times w}{\rho_w} \right) \times 100 \text{ [Vol \%]}$$

$\rho_{FS}$  ..... Dichte der Feuchtsubstanz [kg/l]

w ..... Wassergehalt/ 100 [-]

$\rho_s$  ..... Dichte der Festsubstanz [kg/l]

$\rho_w$  ..... Dichte von Wasser [g/cm<sup>3</sup>]

wobei die Feststoffdichte ( $\rho_s$ ) aus dem Glühverlust und der organischen und anorganischen Dichte des Materials (allgemein festgelegte Konstanten) bestimmt werden kann. Die Feststoffdichte wird nach folgender Formel berechnet:

$$\rho_s = \frac{1}{\frac{GV}{\rho_{org}} + \frac{1 - GV}{\rho_{anorg}}}$$

GV ..... Glühverlust [kg/kg TM]

$\rho_{anorg}$  ..... Dichte der anorganischen Substanz

$\rho_{org}$  ..... Dichte der organischen Substanz

$\rho_s$  ..... Feststoffdichte

Nach Scheffer und Schachtschabel (1992) beträgt die Feststoffdichte von Rohhumus, Torf bzw. reiner organischer Substanz 1,4 g/cm<sup>3</sup> und jene von Quarzsand 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Diese beiden Werte können auch als Konstanten für eine überschlagsmäßige Berechnung der Feststoffdichte von Komposten verwendet werden.

## 12.3 Bestimmung der Luftdurchlässigkeit bzw. Luftpermeabilität

Als Maß für die Gasdurchlässigkeit bei konvektivem Transport dienen die Parameter „Luftdurchlässigkeit“ bzw. „Luftpermeabilität“ die auf der Formel von Darcy beruhen:

$$q_L = k_L * \frac{\Delta p}{\Delta z}$$

$q_L$  ..... Massenfluss von Luft bzw. Gas [m<sup>3</sup>\*m<sup>-2</sup>\*s<sup>-1</sup>]

$k_L$  ..... Luftleitfähigkeit [m<sup>2</sup>\*s<sup>-1</sup>\*Pa<sup>-1</sup>]

$\frac{\Delta p}{\Delta z}$  ..... Gradient des Gasdruckes über die Bodentiefe

Unter Einbezug der dynamischen Viskosität erhält man einen vom jeweilig betrachteten Fluid unabhängigen Beiwert, welcher als „intrinsische Leitfähigkeit“ oder als Luftpermeabilität bezeichnet wird:

$$q_L = \frac{k_a}{\eta} * \frac{\Delta p}{\Delta z}$$

$k_a$ .....Luftpermeabilität [ $m^2$ ]

$\eta$ .....dynamische Viskosität des Gasgemisches [ $Pa*s$  oder  $N*s*m^{-2}$ ]

(z.B. beträgt die dynamische Viskosität der Luft  $1,8*10^{-5} Pa*s$ )

Zu beachten ist dabei, dass eine starke Abhängigkeit der Luftpermeabilität vom jeweilig vorherrschenden Wassergehalt im porösen Medium besteht. Befindet sich kein Wasser im Porenraum ist die Luftpermeabilität am höchsten. Bei voller Wassersättigung hingegen sinkt die Luftpermeabilität auf Null.

Zur Prüfung von Substraten auf ihre Luftpermeabilität bei einem gegebenen Wassergehalt dienen Anlagen, wie sie z.B. in ÖNORM S 2020 (Biofiltermaterialien auf Kompostbasis) beschrieben sind (siehe dort Bild 1: Prüfgerät zur Bestimmung des Strömungswiderstandes). Dabei wird das zu untersuchende Substrat mit definierter Rohdichte und Wassergehalt in eine Säule eingebracht und mit einem konstantem Luftstrom beaufschlagt. Gleichzeitig erfolgt die Messung des Druckes an der Zu- und an der Abstromseite der Probe. Es existieren auch Feldmethoden zur In-situ Bestimmung der Luftpermeabilität (Kirkham, 1947; Iversen, 2001).

## 12.4 Dimensionierungsbeispiel zu Kapitel 7.1

Wurde im Labor die Oxidationskapazität des Trägermaterials mit z.B.  $10 l CH_4/m^2h$  ermittelt, so sollte die in der praktischen Umsetzung angestrebte Flächenbelastung bei eingeschränkten Oxidationsflächen max.  $5 l CH_4/m^2h$  bzw. bei einem Methangehalt von ca. 60 % im Deponiegas etwa  $8,5 l Gas/m^2h$  betragen. Basierend auf den Vorerhebungen der zu erwartenden Gasproduktion der Ablagerung (siehe Punkt 6.4) wird dann die notwendige Flächenausdehnung ermittelt. Beträgt z.B. die ermittelte Gasproduktion der Ablagerung  $300 m^3/h$  und ist die Oberfläche der Ablagerung ca. 5 ha groß, so würde (gleichmäßige Gasverteilung angenommen) die Gasflächenbelastung ca.  $6 l/m^2h$  bzw. die Methanflächenbelastung bei einem Methangehalt von 60 % ca.  $3,6 l/m^2h$  betragen. Die errechnete Flächenbelastung würde somit den Vorgaben aus dem Laborversuch entsprechen. Wird allerdings nicht die gesamte Oberfläche der Ablagerung als Methanoxidationsschicht ausgebildet, so muss die Ausdehnung der Methanoxidationsschicht zumindest 3,6 ha betragen um die max. Methanbelastung von  $5l/m^2h$  nicht zu überschreiten.

## **12.5 Information zur Bepflanzung von Methanoxidationschichten und –fenster (Kapitel 7.6)**

### **Pflanzenarten**

Als wichtigste Grundlage für die Wahl der Pflanzenarten gilt, dass sie standortangepasst sein sollten, damit ein optimales Wachstum gewährleistet werden kann. Das heißt, es ist auf die klimatischen Verhältnisse Rücksicht zu nehmen. Darüber hinaus steht die Wahl der verwendeten Pflanzenarten in engem Zusammenhang mit der geplanten Nachnutzung. Aus Sicht einer maximalen und nachhaltigen Verminderung der Sickerwassermengen wäre ein Wald der optimale Endzustand der Vegetationsdecke auf einer Altablagerung. Weiters ist, um das Risiko eines Schädlingsbefalls zu vermindern, eine Kombination von verschiedenen Pflanzenarten am Standort von Vorteil.

### **Pflanzungsart (Samen, Setzlinge)**

Bei der Verwendung von Kompost als Substrat, oder Substratbeimischung für eine Methanoxidationsschicht kann mit dem Aufgang von im Kompost vorhandenen Samen (Tomate etc.) gerechnet werden. Dieser Konkurrenzdruck ist beim Ansäen bzw. Auspflanzen in jedem Fall zu berücksichtigen und bei Bedarf entsprechend zu minimieren. Im Prinzip ist das Ausbringen von Samen ebenso möglich wie die Verwendung von Stekhölzern, oder von Setzlingen – wobei der Aufwand für die Ausbringung in der genannten Reihenfolge zunimmt.

### **Pflege (Wildverbiss, Unterbindung der üblichen Sukzession)**

In Abhängigkeit von der Nachnutzung ist zu entscheiden, ob eine natürliche Sukzession am Standort sinnvoll bzw. wünschenswert ist, oder ob diese durch geeignete Maßnahmen (z.B. 2-malige Mahd pro Jahr) verhindert werden soll.

### **Bepflanzungsreihenfolge (Erosionsschutz)**

In Hinblick auf einen notwendigen Erosionsschutz ist vor allem der Zeitraum zwischen Aufbringung der Substratschicht und Bepflanzung/Saat wichtig: wenn möglicherweise eine Endbepflanzung erst später möglich/wünschenswert ist, kann zunächst ein Erosionsschutz durch Ansaat etwa von rasch keimenden Gräsern erfolgen.

### **Initiale Bewässerung**

Eine initiale Bewässerung ist vor allem bei Gehölzpflanzungen in Form von Containerpflanzen notwendig. Bei Pflanzungen von wurzelnackten Gehölzen, bzw. Stecklingen kann eine initiale Bewässerung unter Umständen entfallen, wenn auf die Jahreszeit (Auspflanzung im Herbst) und die aktuelle Witterung Rücksicht genommen wird. Bei Saaten besteht die größte Empfindlichkeit ab dem Zeitpunkt der Keimung bis ein ausreichend tiefes Wurzelsystem gebildet wurde (mehrere Wochen). Daher sollte in diesem Zeitraum die Möglichkeit einer Bewässerung (Tankwagen) gegeben sein

## 12.6 Tabelle AH-2: Erreichbare Restemissionen

Tabelle AH-2: Diverse Erfahrungswerte aus Feldversuchen und Praxisanwendungen von unterschiedlich ausgeführten Oberflächenabdeckungen und „Methanoxidationsschichten“

Aufbau der „Methanoxidationsschicht“	Referenzfläche bzw. Daten	Quelle	CH <sub>4</sub> -Restemission (l/m <sup>2</sup> d)	Emissionsreduktion (%)
0,9 m KS-Kompost 0,3 m Schotter	Referenz = selbe Deponie ohne Oberflächenabdeckung (aktive Entgasung)	Huber-Humer, 2004	0,145	>99
0,9 m Müll-Kompost 0,3 m Schotter			0,84	98
0,4 m KS-Kompost			17,6	68
0,3 m KS-Kompost 0,3 m lehmiges Material			14,6	74
1,2 m Kompost/Sand-Mix 0,3 m Sand	theoretische Gasproduktion der Deponie nach Tabasaran/Rettenberger	Görtler, 2000; NUA, 2002	0 - 9,7	ca. 75
0,4 m Kompost/Sand-Mix 0,8 m KS/Müllkompost			0 - 60	ca. 65 (7 - 100 %)
1,2 m KS/Müllkompost 0,5 m Schotter			0,4	> 96
1,0 m Grünabfallkompost 0,15 m geschredderte Altreifen 0,15 m lehmiges Material	Methanoxidationsrate bestimmt mit Isotopenmethode im Feld (bei messbaren Emissionsströmen)	Barlaz et al., 2004 „Kentucky-biocover study“	0,08 – 0,59	55% = mittlere Methanoxidationsrate
1,0 m lehmiges Material			1,7 – 600 (Risse!)	21% = mittlere Methanoxidationsrate
0,4 – 0,5 m Grünabfallkompost 0,1 m Glasscherben	Referenzfläche = selbe Deponie mit Abdeckung aus sandigem Lehm	Bogner et al., 2005 „Florida-biocover study“	0,56	ca. 90
0,4 – 1,1 m sandiger Lehm (=Referenzfläche)	---		5,6	---

## 12.7 Tabelle AH-3: Österreichische Anwendungsbeispiele und Kosten

Standort	Information - technische Ausführung / Kosten / Monitoring / Effizienz / Anmerkungen	Kontakt
<b>Niederösterreich</b>		
Deponie Tulln	<p>*) MOS: 50 cm Gasausgleichsschicht aus Grobschotter, darüber 1,2 bis 1,5 m grobgesiebter Klärschlammkompost</p> <p>Gesamtfläche 18.500 m<sup>2</sup>; Gesamtvolumen des Methanoxidationsbereiches: 280.000 m<sup>3</sup></p> <p>Kosten in €: Baukosten 308.800, Komposttransporte 55.500, Kompost Umsetzen 2.200, Planung 28.900, Bauaufsicht 24.800, Qualitätssicherung Kompost 1.900 Summe für Oberflächenherstellung: € 422.100 bzw. 22,80 / m<sup>2</sup> (zusätzlich für die Gaserfassung € 95.100).</p> <p>Monitoring: FID-Rastermessungen und Emissionsstrombestimmung mittels Haubenmessungen</p> <p>Methanumsetzungsgrad: 2002: 42%, 2003: 77% 2004: 82%, 2005: 53%, 2006: 96%, 2007: 80%.</p> <p>Anmerkung: Es traten immer wieder Probleme mit der Gaserfassung auf, sodass nur ein kleiner Anteil über die Fackel lief.</p>	<p>NUA – Abfallwirtschafts GmbH A-2514 Traiskirchen, Wr. Neustädterstr. 141-143</p> <p>Tel.: 02252/80504 eMail:office@nua.at</p>
Deponie St. Valentin	<p>*) MOS: 50 cm Gasausgleichsschicht aus Grobschotter, darüber 1,2 bis 1,5 m grobgesiebter Klärschlammkompost</p> <p>Gesamtfläche 15.000 m<sup>2</sup>; Gesamtvolumen des Methanoxidationsbereiches: 180.000 m<sup>3</sup></p> <p>Kosten in €: Baukosten 363.400 Komposttransporte 50.000 Kompost Umsetzen 3.900 Planung 35.500 Bauaufsicht 27.000 Qualitätssicherung Kompost 2.500 Summe für Oberflächenherstellung: € 482.300 bzw. 32,60 /m<sup>2</sup></p> <p>Monitoring: FID-Rastermessungen und Emissionsstrombestimmung mittels Haubenmessungen</p> <p>Methanumsetzungsgrad: 2002: 87%, 2003: 99,9% 2004: 99,5%, 2005: 98,7%, 2006: 98,6%.</p> <p>Anmerkung: Insgesamt sehr gut funktionierendes System, welches auch zeitweise Fackelabschaltungen auffangen kann</p>	



Deponie Ameis	<p>*) MOS: 50 cm Gasausgleichsschicht aus Grobschotter, darüber 1,2 bis 1,5 m grobgesiebter Klärschlammkompost</p> <p>Gesamtfläche 24.400 m<sup>2</sup>; Gesamtvolumen des Methanoxidationsbereiches: 200.000 m<sup>3</sup></p> <p>Kosten in €: Baukosten 330.800 Komposttransporte 24.200 Kompost Umsetzen 10.200 Planung 22.200 Bauaufsicht 22.500 Wiss. Begleitung (Forschungsprojekt) 220.000, Qualitätssicherung Kompost 2.200 Summe für Oberflächenherstellung: € 632.100 bzw. 25,90 / m<sup>2</sup>.</p> <p>Monitoring: FID-Rastermessungen und Emissionsstrombestimmung mittels Haubenmessungen, teilweise Sondenmessungen</p> <p>Methanumsetzungsgrad: 2002: 97%, 2003: 96% 2004: 98%, 2005: 100%, 2006: 100%.</p> <p>Anmerkung: Ein Teil der Fläche besteht aus Versuchsflächen (5400 m<sup>2</sup>) wo der Gasausgleich über Drainagegräben versucht wurde. Dort war die CH<sub>4</sub>-Umsetzung aufgrund der inhomogenen Flächenverteilung der Gasströme nicht immer befriedigend. Bei den Restflächen (durchgehende Gasausgleichsschicht) funktioniert das System sehr gut.</p>	
Deponie III Amstetten	<p>Die Deponie wurde in der Zeit von 1986 bis 1992 betrieben und dann aufgrund eines wasserrechtlichen Anforderungsbedarfes geschlossen. Schüttvolumen der Deponie III beträgt 130.000 m<sup>3</sup> und erstreckt sich auf eine Gesamtfläche von 2.4 ha.</p> <p>Methanoxidationsfenster: 14 x 10 x 10 = 1.400 m<sup>2</sup>; Das Oxidationsmaterial (Biofiltermaterial) der Entgasungsfenster wurde nach 4 Jahren Betriebsdauer im Herbst 2002 erstmal gewechselt. Seither war kein Substrattausch mehr erforderlich.</p> <p>Maßnahmenkosten: ca. € 994.237 (zuzügl. MwSt.), Wechseln der Biofiltermaterial € 43.000 (zuzügl. MwSt.)</p> <p>Monitoring: Gasmigration Überprüfung (2x jährlich), Entnahme der Probe in ca. 2 Meter Tiefe (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, HKW, KW, BTX, H<sub>2</sub>S). Niederschlagwasser wird vor der Versickerung qualitativ untersucht; Oberflächenentwässerung (2x jährlich). Bewuchs ist zumindest einmal pro Jahr zu kontrollieren. Bei Bedarf sind Nachpflanzungen vorzunehmen.</p>	<p>Ing. Rosenthaler Rathausstraße 1 A- 3300 Amstetten Telf. 07472/601-270 EMail <a href="mailto:h.rosenthaler@amstetten.at">h.rosenthaler@amstetten.at</a></p> <p>oder</p> <p>HPC Austria GmbH Schlossplatz 13/1 2361 Laxenburg</p> <p>Tel: 02236/71089830 eMail: <a href="mailto:cgikopoulos@hpc-austria.at">cgikopoulos@hpc-austria.at</a></p>
<b>Steiermark</b>		
Deponie Pausendorf	<p>Fläche 9.750 m<sup>2</sup>, Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Klärschlamm und Rechengut von 1994 – 2003, Menge 69.700 t; Gasmenge 2007: 76,9 m<sup>3</sup>/h bzw. insgesamt 673.874 m<sup>3</sup>; Gasqualität ca. 41% CH<sub>4</sub> (2004); Gasprognose bis zum Jahr 2031: Abnahme bis auf 7,69 m<sup>3</sup>/h bzw. insgesamt 67.387 m<sup>3</sup>;</p> <p>Methanoxidationsfenster: 12 Stück, Gesamtfläche 5 (8 x 8 m) und 7 (10 x 10 m) =&gt; 1.020 m<sup>2</sup>;</p> <p>Gesamtkosten (Errichtung) in €: 430.000 (Methanoxidationsfenster und Rekultivierung);</p> <p>Monitoring: In den ersten 2 Jahren nach Fertigstellung sind vierteljährlich Gasmessungen auf CH<sub>4</sub> durchzuführen, ab dem 3. Jahr halbjährlich. Grenz- oder Höchstwerte wurden nicht vorgeschrieben.</p>	<p>HPC Austria GmbH Schlossplatz 13/1 2361 Laxenburg Tel: 02236/71089830 eMail: <a href="mailto:cgikopoulos@hpc-austria.at">cgikopoulos@hpc-austria.at</a></p> <p>oder</p> <p>Abfallwirtschaftsverband Knittelfeld Anton-Regner-Str. 31 8720 Knittelfeld Tel: 03512/782641-108 eMail: helmut.underrain@knittelfeld.at</p>

<p>Altablagerung Oberaich</p>	<p>Ehemalige „Umlagerungsdeponie“; Ausdehnung ca. 12.000m<sup>2</sup>, Volumen ca. 100.000 m<sup>3</sup>, Tiefe ca. 9 m, Menge ca. 71.200 t; Gasmenge ca. 8,25 m<sup>3</sup>/h, 55% CH<sub>4</sub>;</p> <p>Methanoxidationsfenster: 6 Stück, Gesamtfläche 181,5 m<sup>2</sup>;</p> <p>Monitoring: Seit 2005 regelmäßige FID-messungen an der Oberfläche der Methanoxidationsfenster</p> <p>Nachsorge/Rekultivierung: Bepflanzung durch Chinaschilf (hohe Evapotranspirationsraten), Randwall, Einfriedung durch immergrüne Hecke, Zaun</p>	<p>UTC-Techn. Büro für Umwelttechnik u. techn. Chemie GmbH Lakeside B01 9020 Klagenfurt</p> <p>Tel. 0676/7801117 eMail: <a href="mailto:novak@utc.co.at">novak@utc.co.at</a></p> <p>oder</p> <p>Marktgemeinde Oberaich Bruckerstr. 71 8600 Oberaich eMail: <a href="mailto:oberaich@oberaich.at">oberaich@oberaich.at</a></p>
<b>Oberösterreich</b>		
<p>Altablagerung Blankenbach</p>	<p>Braunau am Inn, Hausmülldeponie 1970 – 2003; 330.000 m<sup>3</sup> Hausmüll, Bauschutt, teils gefährliche Abfälle; Keine Basisdichtung;</p> <p>gesicherte Altlast; Vertikale Umschließung (Dichtwand) und Entgasungsanlage 1997;</p> <p>Errichtung einer Methanoxidationsschicht im Jahre 2006;</p> <p>MOS: 80 – 120 cm aufbereiteter, gesiebter und mit organischem Strukturmaterial angereicherter, ca. 15 Jahre alter Hausmüll (on-site Aufbereitung), 20 - 30 cm Gasverteilungsschicht aus Schotter</p> <p>Monitoring: FID- Rastermessungen</p>	<p>Stadamt Braunau am Inn, Bauabteilung Umwelt- und Abfallberatung</p> <p>Stadtplatz 38 A-5280 Braunau</p> <p>Tel: 07722/808-343</p>

\*) Deponiertes Material: hauptsächlich Haus- und Gewerbemüll der Jahre 1990-2000

Die Methanoxidationsschichten wurden in den Jahren 1998-2000 hergestellt. Zusätzlich ist eine Gasfassung vorhanden, die aber meist nicht durchgehend läuft (unterer Schwellwert für Abfackelung häufig unterschritten). Die angegebenen Methanumsetzungsraten stellen den Summenwert dar (thermische + biologische Methanoxidation).

## 12.8 Abbau und Bildung von Spurengasen in Methanoxidationsschichten

### Einfluss auf die N<sub>2</sub>O-Emission

N<sub>2</sub>O ist auf Grund seines bis zu 296-fachen global warming potentials (GWP) im Vergleich zu CO<sub>2</sub> und einer Lebensdauer von 120 Jahren (IPPC, 2001) klimarelevanter als CO<sub>2</sub> oder CH<sub>4</sub>. N<sub>2</sub>O entsteht, wenn sowohl der Prozess der Nitrifikation (Oxidation von Ammonium zu Nitrat) als auch Denitrifikation (Reduktion von Nitrat zu Luftstickstoff (N<sub>2</sub>)) ins Stocken gerät, z.B. im Übergangsbereich zwischen aeroben und anaeroben Schichten. Durch die Methanoxidation kommt es zu einer Sauerstoffzehrung, die in unzureichend ausgeführten Abdeckschichten anaerobe Zonen schaffen kann. Vor allem in Substraten mit hohem verfügbarem Stickstoffanteil (NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>) kann eventuell eine N<sub>2</sub>O-Bildung begünstigt werden. Es wäre also möglich, dass N<sub>2</sub>O in MOS entstehen kann, d.h. eine stichprobenartige Kontrolle der N<sub>2</sub>O Emissionen erscheint sinnvoll. Forschungsbedarf ist jedenfalls gegeben, da in der Literatur kaum bzw. zum Teil sehr unterschiedliche Angaben darüber zu finden sind. Eine österreichische Untersuchung zeigt, dass in einer Methanoxidationsschicht geringere N<sub>2</sub>O Konzentrationen gemessen wurden als in einer Kontrollvariante (Watzinger et al., 2005), woraus von den Autoren abgeleitet wurde, dass N<sub>2</sub>O - sofern es in der Methanoxidationsschicht gebildet wurde - sofort zu N<sub>2</sub> reduziert wurde. Eine finnische Untersuchung räumt eventuellen N<sub>2</sub>O-Emissionen aus Deponien im Vergleich zu anderen Treibhausgasemissionen (CH<sub>4</sub>) kaum Relevanz ein (Rinne et al., 2005).

Werden tatsächlich relevante  $N_2O$ -Emissionen bei MOS detektiert, so muss die Sauerstoffversorgung in der Schicht genauer überprüft bzw. optimiert werden (Verbesserung der Materialstruktur, Änderung der Schichtstärke, etc.).

#### Einfluss auf die $H_2S$ -Emission

Eine Bildung von  $H_2S$  in der Methanoxidationsschicht in tieferen Horizonten ist möglich.  $H_2S$  wird aber, ähnlich wie  $CH_4$ , durch Mikroorganismen oxidiert (abgebaut). Dieser Abbau findet bei einem ähnlichen Redox-Potential wie die Methanoxidation statt, d.h. eine Emission von  $H_2S$  ist in einer funktionierenden Methanoxidationsschicht unwahrscheinlich, da genügend aerobe Bereiche vorhanden sind, in denen  $H_2S$  zu  $SO_4^{2-}$  oxidiert wird. Dies gilt auch für mit Deponiegas zugeführtes  $H_2S$ .

#### Einfluss auf die Emission von VOCs

Neben  $H_2S$  kommen in Deponiegasen verschiedenste flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (z.B. chloriertes oder fluoriertes Methan, - Ethan, - Ethen und aromatische Kohlenwasserstoffe) vor. Generell werden teilhalogenierte organische Kohlenwasserstoffe in der Methanoxidationsschicht mikrobiell abgebaut. Der mikrobielle Abbau erfolgt teils unter aeroben und teils unter anaeroben Bedingungen (Scheutz and Kjeldsen, 2005) und korreliert mit der Methanoxidationsrate (Barlaz et al., 2004; Scheutz et al., 2004). Höher halogenierte Aliphaten werden langsamer abgebaut als wenig halogenierte Aliphaten und Aromaten. Es wird angenommen, dass unter anderem Methanotrophe für den Abbau flüchtiger Kohlenwasserstoffe verantwortlich sind (Co-metabolisierung) (Sullivan et al., 1998).

## **12.9 Überlegungen zum optionalen Feststoffmonitoring des Abfallkörpers**

Optional kann ein weiterführendes Monitoringprogramm durchgeführt werden, um den Einfluss der Methanoxidationsschicht auf den Abfallkörper zu dokumentieren. Als diesbezügliche Monitoringmethoden werden vorgeschlagen (Details siehe INTERLAND-Leitfaden „Alternative Monitoringmethoden für Altdeponierungen“; Tesar et al., 2006):

- Feststoff Abfall: chemische Zusammensetzung, Inkubationsversuch, Atmungsaktivität, Infrarotspektroskopie, Toxizitätstests
- Sickerwasser: Bestimmung der Sickerwassermengen und -zusammensetzung falls Sickerwassererfassung vorhanden.

Es wird vorgeschlagen, diese Untersuchungen kurz vor Aufbringen der MOS und in weiterer Folge alle 5 -10 Jahre durchzuführen. Auf Repräsentativität bei der Feststoffprobennahme ist zu achten.