

**Umweltbundesamt
Referat Z 6
Dessau-Roßlau**



**Fachgutachten:
„Methanemissionen aus der Ablagerung von mechanisch-
biologisch behandelten Abfällen“**

Vorhaben Z 6 – 30533/3

FKZ 360 16 036

**IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft
Prof. R. Stegmann und Partner
Schellerdamm 19 - 21
21079 Hamburg**



27. April 2012

Fachgutachten:

„Methanemissionen aus der Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen“

Vorhaben Z 6 – 30533/3, FKZ 360 16 036

Inhalt

- 1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise**
 - 1.1 Aufgabenstellung
 - 1.2 Vorgehensweise

- 2 Situation der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung in Deutschland**
 - 2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen
 - 2.2 MBA-Anlagen in Deutschland
 - 2.3 Deponierung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Teilströmen

- 3 Methanbildungspotenzial mechanisch-biologisch behandelter Abfälle**
 - 3.1 Grundlagen / Literaturlauswertung
 - 3.1.1 Grundlagen – Testverfahren und Ablagerungsbedingungen
 - 3.1.2 Deponiegaszusammensetzung und Methankonzentrationen
 - 3.1.3 Literaturlauswertung zur Deponiegaszusammensetzung und –produktion von MBA-Abfällen- Laborversuche und Lysimeter
 - 3.2 Ergebnisse aus Überwachungswerten in MBA-Anlagen
 - 3.3 Ergebnisse von Überwachungsmaßnahmen und Untersuchungen an MBA-Deponien und Versuchsfeldern
 - 3.4 Abschätzungen und Plausibilitätsbetrachtungen zu Methanemissionen
 - 3.5 Bewertung der Ergebnisse, Ableitung von Vorschlagswerten zur Quantifizierung des Methanbildungspotenzials



4 Halbwertzeit bzw. Reaktionskonstanten zur Methanbildung aus abgelagerten MBA-Abfällen

- 4.1 Grundlagen
- 4.2 Ergebnisse aus Laborversuchen
- 4.3 Ergebnisse bzw. Rückschlüsse von Überwachungsmaßnahmen und Untersuchungen an MBA-Deponien
- 4.4 Ableitung von Vorschlagswerten zur Quantifizierung der Halbwertzeit bzw. Reaktionskonstanten

5 Biologische Methanoxidation bei der Ablagerung von MBA-Abfällen

- 5.1 Grundlagen der biologischen Methanoxidation
- 5.2 Beeinflussungsfaktoren der biologischen Methanoxidation
 - 5.2.1 Temperatur
 - 5.2.2 Bodenwassergehalt / Wasserhaushalt
 - 5.2.3 Luftdruckänderungen / Wind
- 5.3 Bodenphysikalische Eigenschaften
 - 5.3.1 Physikalische Eigenschaften
 - 5.3.2 Chemische Eigenschaften
 - 5.3.3 Organische Materialien
- 5.4 Methanoxidationskapazität von Böden und MBA-Abfall
 - 5.4.1 Literaturlauswertung
 - 5.4.2 Veränderungen über die Zeit, Funktionsdauer
 - 5.4.3 Erkenntnisse des BMBF-Vorhabens „MiMethox“
- 5.5 Methanoxidation und Gasemissionen über bevorzugte Fließwege, Erfahrungen von MBA-Deponien
 - 5.5.1 Erfahrungen im Rahmen des BMBF-Vorhabens „MiMethox“
 - 5.5.2 Erfahrungen von MBA-Deponien
 - 5.5.3 Schlussfolgerungen zur Wirksamkeit der biologischen Methanoxidation bei MBA-Deponien mit einer aktiven oder einer passiven Entgasung
- 5.6 Ableitung von Werten zur Quantifizierung der biologischen Methanoxidation



6 Prüfung des First Order Decay Modells

- 6.1 Darstellung und Erläuterung des First Order Decay Modells
- 6.2 Prüfung und Anpassung des First Order Decay (FOD) Modells zu Methanemissionen von MBA-Deponien
 - 6.2.1 Daten zu abgelagerten Abfallmengen
 - 6.2.2 Emissionsfaktoren
- 6.3 Beurteilung der Unsicherheiten
- 6.4 Fazit zum FOD-Ansatz bei MBA-Deponien und zu den Eingangswerten

7 Abschätzung zu Methanemissionen aus MBA-Deponien

- 7.1 Gasprognoserechnungen, Vorgaben und Annahmewerte
- 7.2 Abschätzung und Beurteilung der Methanemissionen eines MBA-Deponieabschnitts
- 7.3 Abschätzung und Beurteilung derzeitiger Gesamtemissionen aller MBA-Deponien in Deutschland

8 Schlussfolgerungen

- 8.1 Schlussfolgerungen zu Methanemissionen von MBA-Abfällen
- 8.2 Schlussfolgerungen zum Betrieb von MBA-Deponien
- 8.3 Schlussfolgerungen zu Überwachungsmaßnahmen von MBA-Deponien

9 Zusammenfassung

10 Literaturverzeichnis

1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Kyoto-Protokolls sowie des Genfer Luftreinhalteabkommens ist Deutschland zur Emissionsberichterstattung verpflichtet, wobei die vorgegebenen Anforderungen der Klimarahmenkonvention zu erfüllen sind. Die Berichterstattung erfolgt dabei unter anderem nach den Regularien des IPCC (International Panel on Climate Change), die insbesondere für die Ermittlung der Emissionen aus so genannten Hauptquellgruppen bestimmte Berechnungsmethoden vorsehen. Trotz erheblicher Minderung in den letzten Jahren sind Methanemissionen aus Deponien auf absehbare Zeit eine dieser Hauptquellgruppen für Treibhausgasemissionen. Die Berechnung der Methanemissionen erfolgt auf Grundlage der IPCC Guidelines nach der First Order Decay (FOD) Methode. Bislang werden Restgasemissionen aus der Ablagerung mechanisch-biologisch behandelter Abfälle in aktiv oder passiv entgasen Deponien bei der Berechnung und Emissionsberichterstattung nicht speziell betrachtet, da diese gegenüber der Gesamtemission aus Deponien noch gering sind. Informationen zu den tatsächlich umgesetzten organischen Substanzen und die damit verbundene Methanbildung sowie deren Halbwertszeit beruhen bisher nur auf groben Schätzungen.

Des Weiteren wird in Deutschland mit der Ablagerung größerer Mengen mechanisch-biologisch behandelter Abfälle, dem verstärkten Einsatz passiver Entgasungsverfahren und einem weiteren Rückgang der Emissionen aus alten Hausmülldeponien der prozentuale Anteil der Methanemissionen aus der Ablagerung von MBA-Abfällen und aus passiv entgasen Deponien kontinuierlich steigen. Mittelfristig sollen auch diese Emissionen in der Emissionsberichterstattung berücksichtigt werden.

Aufgabenstellung und Ziel dieses Fachgutachtens ist es daher, die fachlichen Grundlagen für die Berechnung der Methanemissionen aus der Ablagerung von MBA-Abfällen auf aktiv und passiv entgasen Deponien zu erarbeiten.

In diesem Zusammenhang sind u.a. folgende Teilaufgaben zu erfüllen:

- Beschreibung des Methanbildungspotenzials mechanisch-biologisch behandelte Abfälle unter realen Deponiebedingungen
- Prüfung, ob die Methanbildung auf Deponien mit MBA-Abfällen mit dem First Order Decay (FOD) Modell beschrieben werden kann oder ob für diese Abfälle Ergänzungen oder Modifikationen des Modellansatzes erforderlich sind, bei Bedarf Modifizierung des FOD Modells
- qualifizierte Schätzung der Halbwertszeit bzw. Reaktionskonstanten zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Methanbildung und -emissionen aus abgelagerten MBA-Abfällen nach dem First Order Decay (FOD) Modell
- qualifizierte Schätzung der Wirksamkeit der biologischen Methanoxidation in offenen Einbaubereichen bei der Ablagerung von MBA-Abfällen
- qualifizierte Schätzung der Wirksamkeit der biologischen Methanoxidation einer aktiven Entgasung (nicht gefasste Restemissionen) oder einer passiven Entgasung bei der Ablagerung von MBA-Abfällen

1.2 Vorgehensweise

Zur Bearbeitung wurden schwerpunktmäßig Forschungsergebnisse und Praxiserfahrungen der letzten Jahre ausgewertet. Dazu wurden deutschsprachige und ergänzend internationale Quellen herangezogen, insbesondere folgende Tagungsbeiträge, Dissertationen, Forschungsberichte und Fachveröffentlichungen:

- Methanemissionen aus passiv entgasten Deponien und der Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen - Emissionsprognose und Wirksamkeit der biologischen Methanoxidation -, Schlussbericht erstellt von Kühle-Weidemeier, M. und Bogon, H., im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ: 360 16 015, Dezember 2008
- Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Abfallwirtschaft, Förderkennzeichen (UFOPLAN) 204 34 327, Schlussbericht erstellt von Stegmann, R., Heyer, K.-U., Hupe, K., Willand, A., im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2006



- Fachbeiträge aus dem laufenden BMBF-Vorhaben „MiMethox“ (Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten)
- Fachbeiträge nationaler und internationaler Fachtagungen wie das „Sardinia Landfill and Waste Management Symposium“ 2009 und 2011

Zur Erhebung aktueller Daten, Praxiserfahrungen, Überwachungsergebnisse und Untersuchungen an Deponien wurden zusätzlich angefragt:

- ASA e.V., Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung
- Ca. 25 Betreiber von MBA-Deponien in Deutschland
- Universitäten und Forschungseinrichtungen, u.a. TU Darmstadt, Universität Trier, TU Braunschweig, TU Hamburg-Harburg, BOKU Wien
- Deutsche und österreichische Fachbehörden

Grundlage der Aufbereitung und Prüfung des First Order Decay (FOD) Modells bildeten die IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories:

- IPCC, 2006:
IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
Volume 1, General Guidance and Reporting
Chapter 3 – Uncertainties
- IPCC, 2006:
IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
Volume 5, Waste
Chapter 3 – Solid Waste Disposal



2 Situation der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung in Deutschland

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Abfallbehandlung

Aufgrund der Regelungen in der früheren TA Siedlungsabfall (TASi, 1993) endete die Ablagerung von unbehandelten organischen Abfällen zum 01.06.2005. Im Anhang 2 der Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV, 2001) wurden zudem Zuordnungskriterien für die Deponierung mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle festgelegt. Die wesentlichen Regelungen sind in die Deponieverordnung, die am 16.07.2009 in Kraft trat (DepV, 2009), übernommen worden.

Damit stehen de facto die Müllverbrennung und die mechanisch-biologische Abfallbehandlung als Behandlungsoption für organikhaltige Siedlungsabfälle zur Verfügung.

Abfalldeponierung

Teilströme aus MBA-Anlagen sind gemäß der Deponieverordnung auf Deponien der Klasse II unter Einhaltung der Zuordnungswerte in Anhang 3, Tabelle 2 abzulagern. Ergänzend wurde zur Ablagerung mechanisch-biologisch behandelter Abfälle festgelegt (DepV, 2009):

- der organische Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz gilt als eingehalten, wenn ein TOC von 18 Masseprozent oder ein Brennwert (H_O) von 6.000 kJ/kg nicht überschritten wird
- es gilt im Eluat ein DOC von max. 300 mg/l
- die biologische Abbaubarkeit des Trockenrückstandes der Originalsubstanz von 5 mgO₂/g (bestimmt als Atmungsaktivität-AT₄) oder von 20 l/kg (bestimmt als Gasbildungsrate im Gärtest – GB₂₁) wird nicht überschritten.

Über das dritte Kriterium wird folglich geregelt, dass im abzulagernden Abfall noch ein gewisses Methanbildungspotenzial zulässig ist, das im Deponiekörper zu einer Deponiegasbildung führen kann.



Die Deponieentgasung wird in der Deponieverordnung wie folgt definiert: Erfassung des Deponiegases in Fassungelementen und dessen Ableitung mittels Absaugung (aktive Entgasung) oder durch Nutzung des Druckgradienten an Durchlässen im Oberflächenabdichtungssystem (passive Entgasung) (DepV, 2009).

Hinsichtlich einer passiven Entgasung und Gasbehandlung über eine Methanoxidationsschicht wird im Anhang 1 unter 2.3.1.2 ausgeführt (DepV, 2009): „Soll die Rekultivierungsschicht zugleich Aufgaben einer Methanoxidation von Restgasen übernehmen, sind zusätzliche Anforderungen an die Schicht mit der zuständigen Behörde abzustimmen. Wechselwirkungen der Methanoxidation und des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschicht sind zu bewerten.“

Weitere Anforderungen an die Gaserfassung und die Überwachung von Deponiegasemissionen sind im Anhang 5 der Deponieverordnung geregelt. Dort heißt es unter 7. Deponiegas: „Entsteht auf einer Deponie auf Grund biologischer Abbauprozesse Deponiegas in relevanten Mengen, hat der Betreiber einer Deponie der Klasse I, II oder III dieses Deponiegas schon in der Ablagerungsphase zu fassen und zu behandeln, nach Möglichkeit energetisch zu verwerten. Deponiegaserfassung, -behandlung und -verwertung sind nach dem Stand der Technik durchzuführen. Quantität und Qualität des Deponiegases sind nach Nummer 3.2 Tabelle Nummer 2.4 zu untersuchen. Abweichend von Satz 1 kann der Deponiebetreiber mit Zustimmung der zuständigen Behörde auf die Fassung geringer Restemissionen an Deponiegas verzichten. In diesem Fall hat er gegenüber der zuständigen Behörde nachzuweisen, dass das im Deponiegas enthaltene Methan vor Austritt in die Atmosphäre weitestgehend oxidiert wird.“

Vor diesem Hintergrund erfolgt auf MBA-Deponien in der Regel keine aktive Erfassung und Behandlung eventuell entstehender Deponiegase. Folglich werden auch keine Überwachungsmaßnahmen zur Deponiegasemissionen gemäß der Tabelle Nummer 2.4 ergriffen. Im Vorgriff auf die weiteren Ausführungen ist festzuhalten, dass im Zuge der Gutachtenerstellung nicht erkennbar wurde, inwieweit der Nachweis gegenüber der zuständigen Behörde, dass das im Deponiegas enthaltene Methan vor Austritt in die Atmosphäre weitestgehend oxidiert wird, erbracht wird. In der Fußnote 2 zur Tabelle Nummer 2.5 (Wirksamkeitskontrollen der Entgasung) wird

hierzu ausgeführt: „Organoleptische Kontrollen sind an noch offenen Deponieabschnitten wöchentlich vom Deponiebetreiber durchzuführen. An temporär oder endgültig abgedeckten oder abgedichteten Deponieabschnitten oder Deponien hat der Deponiebetreiber die Wirksamkeit einer eventuellen Entgasung oder der Restgasoxidation halbjährlich mittels Messungen mit Flammenionisationsdetektor, Laser-Adsorptionsspektrometrie oder mittels anderer gleichwertiger Verfahren auf der Deponieoberfläche und an Gaspegeln im näheren Deponieumfeld zu kontrollieren.“

2.2 MBA-Anlagen in Deutschland

Die mechanisch-biologische Abfallbehandlung besteht je nach Verfahrenstechnik und Verfahrenskombinationen unter anderem aus mechanisch-physikalischen Schritten (Siebung, Zerkleinerung, Windsichtung, Infrarot-Sortierung, Magnetabscheidung, Wirbelstromabscheidung etc.) und einer oder mehreren biotechnologischen Stufen mit (Rotte) oder ohne (Vergärung) Sauerstoff-/Luftzufuhr. Durch diese Vorbehandlung werden viele Sekundärrohstoffe (Schrott, Nichteisenmetalle) abgetrennt, heizwertreiche Fraktionen für die thermische Abfallbehandlung sowie heizwertarme Fraktionen zur Deponierung generiert.

Von der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung ASA e.V. werden 60 Anlagen zur mechanischen und mechanisch-biologischen Abfallbehandlung in Deutschland aufgeführt, von denen im Jahr 2008 46 als mechanisch-biologische Anlagen ausgewiesen wurden (ASA, 2011, Ketelsen et al., 2010). Sie weisen eine Gesamtkapazität von ca. 5.8 Mio. Mg/a auf. In einer Studie von 2010 des ifeu und Ökoinstituts werden für das Jahr 2006 folgende Angaben zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung MBA gemacht (ifeu et al, 2010):

Anlieferungsmenge 2006: 3,19 Mio. Mg, die folgendermaßen behandelt wurden:

- 69% in 21 Anlagen mit aerober Behandlung
- 31% in 10 Anlagen mit anaerober/aerober Behandlung

Seitdem sind einige MBA-Anlagen mit Anaerobbehandlungsstufen nachgerüstet worden. So werden von Ketelsen et al., 2011, folgende Angaben gemacht:

- Mechanisch-biologische Vorbehandlungsanlagen mit biologischer Stabilisierung (Produktion eines Teilstroms zur Deponierung): 30
 - davon reine Rotteanlagen: 18
 - davon mit Vergärungsstufe: 12Behandlungskapazität: 3,4 Mio. Mg/a
- Mechanisch-biologische Vorbehandlungsanlagen mit thermischer oder biologischer Trocknung: 13
- Mechanisch-physikalische Vorbehandlungsanlagen: 3

Vom Statistischen Bundesamt werden für das Jahr 2009 folgende Angaben gemacht (DESTATIS, 2011):

Anzahl mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen:	51
Behandlungskapazität insgesamt:	4,676 Mio. Mg
Behandelte Abfallmenge 2009:	3,958 Mio. Mg

- davon in 4 Anlagen mit einer Behandlungskapazität < 10.000 Mg behandelt 0,014 Mio. Mg
- davon in 11 Anlagen mit einer Behandlungskapazität 10.000 – 50.000 Mg behandelt 0,347 Mio. Mg
- davon in 14 Anlagen mit einer Behandlungskapazität 50.000 – 100.000 Mg behandelt 0,956 Mio. Mg
- davon in 22 Anlagen mit einer Behandlungskapazität > 100.000 Mg behandelt 3,359 Mio. Mg

2.3 Deponierung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Teilströmen

Im Hinblick auf die Deponierung der mechanisch-biologisch vorbehandelten Fraktion aus MBA-Anlagen sowie von Teilfraktionen anderer mechanischer Vorbehandlungsanlagen werden für das Jahr 2006 die in Tabelle 2.1 aufgeführten Daten angegeben (ifeu et al, 2010). Danach wurde ein mechanisch-biologisch vorbehandelter Teilstrom von ca. 1,019 Mio. Mg deponiert.

Tab. 2.1: Stoffstromdaten zu MBA, MBS, MPS und MA für 2006 (ifeu et al, 2010)¹

	MBA	MBS/MPS	MA	Summe	
	t/a	t/a	t/a	t/a	%
Input	3.187.087	1.794.984	2.258.310	7.240.381	100
Verluste*	768.618	484.345	429.445	1.682.408	23,2
Deponie	1.019.327	207.717	457.997	1.685.042	23,3
NE-Metalle	5.722	3.223	4.055	13.000	0,2
Fe-Metalle	84.129	47.382	59.613	191.124	2,6
MVA	108.713	122.998	269.786	501.498	6,9
heizwertreiche Frakt.	1.200.577	929.319	1.037.414	3.167.310	43,7

* Trocknung und biologischer Abbau
MBA mechanisch-biologische Abfallbehandlung
MBS mechanisch-biologische Stabilisierung
MPS mechanisch-physikalische Abfallbehandlung
MA mechanische-Abfallaufbereitung

2009 gab es noch 183 Deponien der Deponieklasse II (DESTATIS, 2011). Auf etwa 40 Deponien wurden Behandlungsrückstände aus MBA-Anlagen abgelagert.

Nach Angaben des Statistischen Bundesamts lag der Output aller 51 mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen im Jahr 2009 bei 3,253 Mio. Mg, wovon 1,913 Mio. Mg einer Verwertung und 1,257 Mio. Mg einer Beseitigung zugeführt wurden (DESTATIS, 2011). Es wurde allerdings nicht angegeben, ob neben der Deponierung noch andere Beseitigungspfade genutzt wurden. Wenn davon ausgegangen wird, dass die ausgeschleusten brennbaren Abfälle (Brennstoffe aus Abfällen, EAV 191210) von 0,182 Mio. Mg nicht deponiert wurden, so liegen die abgelagerten Outputmaterialien in der gleichen Größenordnung wie bei der Zusammenstellung in Tabelle 2.1. Für die weitere Betrachtung des Methanbildungspotenzials „unter realen Deponiebedingungen“ wird daher von ca. 1,0 Mio. Mg deponiertem Outputmaterial pro Jahr mit biologisch verfügbaren organischen Anteilen ausgegangen.

¹ In der Studie von 2010 des ifeu und Ökoinstituts wurde bei der Deponierung eine Restemission von umgerechnet lediglich 3,4 kg CO₂-Äq/Mg Inputmaterial angesetzt, wobei sich dieser Wert auf die gesamte Inputmasse aus MBA, MBS/MPS und MA von 7.240 Mio. Mg/a bezog. Dieser Annahmewert ist für den deponierten Teilstrom von MBA-Anlagen als zu gering einzustufen.



3 Methanbildungspotenzial mechanisch-biologisch behandelter Abfälle

3.1 Grundlagen / Literaturlauswertung

3.1.1 Grundlagen – Testverfahren und Ablagerungsbedingungen

Das Gasbildungsverhalten von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen im anaeroben Milieu, wie es auf der Deponie vorliegt, ist von besonderem Interesse. Es kann durch Gärtests ermittelt werden. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der in der Deponieverordnung festgelegte Standardtest zur Gasbildungsrate über 21 Tage (GB_{21}) nicht das vollständige Gasbildungspotenzial (über sehr lange Zeiträume) abbildet. Dieses kann bei vorbehandelten Abfällen um den Faktor 1,5 – 3 höher liegen und, neben Untersuchungen an MBA-Deponien, z.B. in Langzeittests in so genannten „Deponiesimulationsreaktoren“ ermittelt werden (Soyez et al., 2000, Leikam, 2002, Binner, 2003).

Die Kinetik der biologischen Abbauprozesse unter anaeroben Milieubedingungen wird im Vergleich des Standardtests zu realen Deponiebedingungen hauptsächlich von folgenden Randbedingungen geprägt:

- Im Standardtest erfolgt eine Animpfung des zu beprobenden MBA-Outputmaterials, um die biologischen Abbauprozesse zu beschleunigen. Der Wassergehalt und die Temperaturen sind standardisiert und auf optimierte anaerobe Milieubedingungen ausgerichtet.
- Auf der Deponie erfolgt dagegen ein verdichteter Einbau, was u.a. einen reduzierten Wasserzutritt und eine eingeschränkte Wasserbewegung zum Transport gelöster organischer Bestandteile (Substrat) zum Mikroorganismus zur Folge haben kann.
- Die fehlende Animpfung, der Wassergehalt, die Temperaturbedingungen und die Verdichtung beim Einbau wirken gegenüber dem Labortest limitierend auf die biologischen Abbauprozesse der noch vorhandenen bioverfügbaren Restorganik. Dieses drückt sich u.a. in deutlich größeren Halbwertzeiten gegenüber dem Standardtest im Labor aus.

3.1.2 Deponiegaszusammensetzung und Methankonzentrationen

Die biologischen Abbauprozesse laufen unter Beachtung der o.g. Randbedingungen grundsätzlich ähnlich ab wie bei herkömmlichen Siedlungsabfalldponien. Die Abbauprozesse verlaufen in unterschiedlichen Phasen, von denen die Deponiegas- und Sickerwasserbeschaffenheit geprägt wird. Die Deponiegasproduktion und Deponiegasbeschaffenheit kann in Phasen unterteilt werden, wobei die mittel- und langfristige Entwicklung des Gashaushalts mit den Phasen IV bis IX charakterisiert wird (Abb. 3.1, nach Rettenberger et al. 1992).

Nach der mechanisch-biologischen Vorbehandlung sind die leicht und mittel abbaubaren organischen Abfallbestandteile weitgehend abgebaut und tragen folglich nicht mehr zur Deponiegasproduktion bei. Das kann insbesondere bei verdichtetem Abfalleinbau eine quantitative Reduzierung wie auch zeitliche Verkürzung gerade der ersten 4 Phasen zur Folge haben.

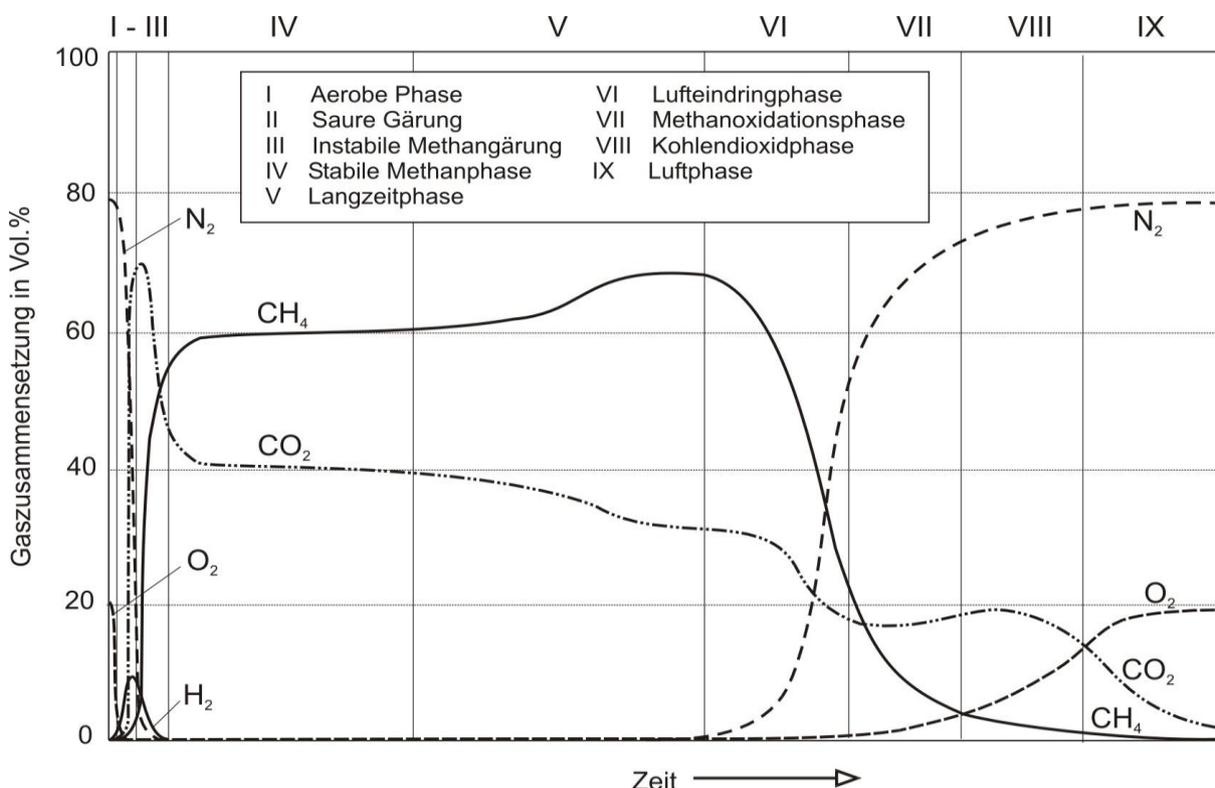


Abb. 3.1: Hauptkomponenten im Deponiegas, Konzentrationsverläufe während der Abbauphasen im Deponiekörper (nach Rettenberger et al., 1992)

So wurden von IFAS an einer MBA-Deponie (MBA-Deponie A) unmittelbar nach dem Einbau Gaszusammensetzungen mit CO₂-Konzentrationen bis 63 Vol.-% bei geringen Methankonzentrationen bestimmt, die den Phasen II und III zuzuordnen sind. Ähnliches wurde bei Untersuchungen an anderen MBA-Deponien festgestellt (Reinert et al., 2007)

Mittel- und langfristig entwickeln sich in den meisten MBA-Deponien Gaszusammensetzungen, die denen der Phasen IV und V entsprechen. Bei vermutlich geringer Deponiegasproduktion, auf die im Folgenden noch näher eingegangen wird, treten erhöhte Methangehalte bei abnehmenden Kohlendioxidgehalten auf. In Abbildung 3.2 sind beispielhaft die Methan- und Kohlendioxidgehalte eines temporär abgedeckten Böschungsbereichs der MBA-Deponie A im Zeitraum 11/2007 – 11/2010 aufgetragen.

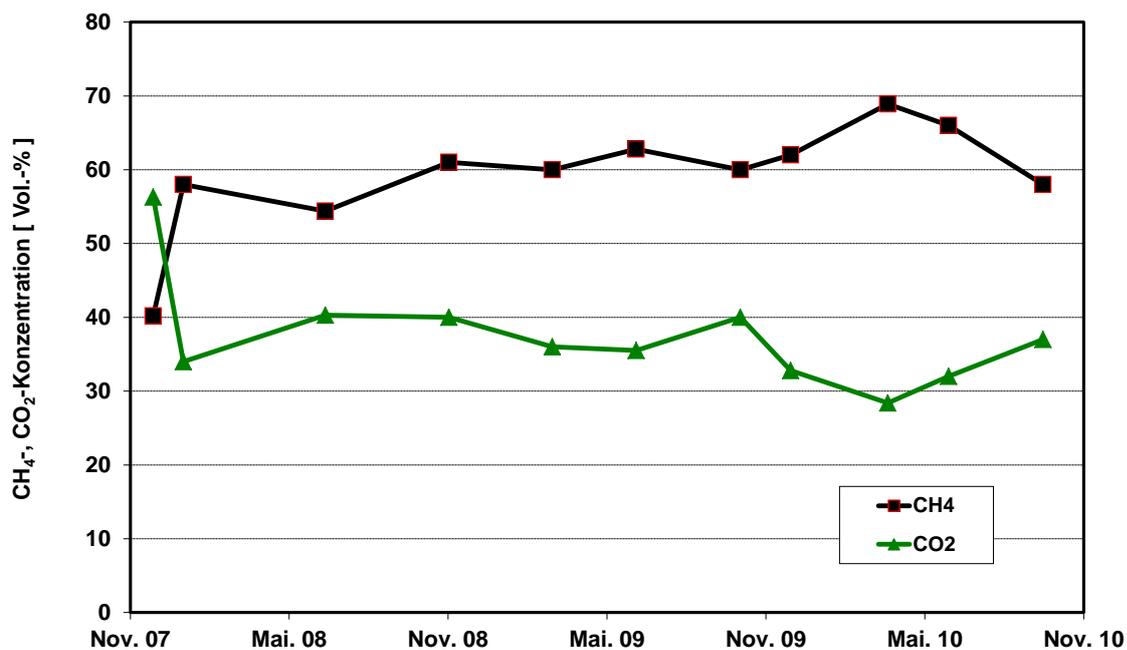


Abb. 3.2: Methan- und Kohlendioxidgehalte im Deponiegas der MBA-Deponie A, Böschungsbereich im Zeitraum 11/2007 – 11/2010

Ähnliche Ergebnisse wurden bei weiteren Deponien in Niedersachsen auch bei früheren Messungen festgestellt (zit. in Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008):

Deponie Wiefels:	CH ₄ : 45 Vol.-%	CO ₂ : 52 Vol.-%
Deponie Bassum:	CH ₄ : 70 Vol.-%	CO ₂ : 22 Vol.-%
Deponie Lüneburg:	CH ₄ : 60 Vol.-%	CO ₂ : 37 Vol.-%

3.1.3 Literaturlauswertung zur Deponiegaszusammensetzung und –produktion von MBA-Abfällen- Laborversuche und Lysimeter

Da bisher erst relativ wenig Überwachungsergebnisse und Erfahrungen von MBA-Deponien vorliegen, werden im Folgenden die Deponiegaszusammensetzung und –produktion von MBA-Abfällen aufgrund von Untersuchungen im Labormaßstab und technischen Maßstab beschrieben.

Dazu werden die Ergebnisse der Studie „Methanemissionen aus passiv entgasten Deponien und der Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen – Emissionsprognose und Wirksamkeit der biologischen Methanoxidation“ von Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008, zusammengefasst und mit aktuellen Ergebnissen ergänzt.

Großlysimeter Allerheiligen, Österreich (Raninger et al., 2001)

AT₄ Inputmaterial: 3,0 – 11,9 mgO₂/gTS, Mittelwert 6,6 mgO₂/gTS

Gasbildung nach 800 Tagen:

Ohne Bewässerung: 11,5 Nm³/MgTS

Mit Bewässerung: 18,2 Nm³/MgTS

Gaszusammensetzung:

Ohne Bewässerung: CH₄ anfangs 55 Vol.-%, abnehmend auf 35 Vol.-%

Mit Bewässerung: CH₄ anfangs 55 Vol.-%, abnehmend auf 45 Vol.-%

Ergänzende Hinweise, Kommentar IFAS:

Einfluss der Bewässerung ist deutlich zu erkennen, aber

- bei Option „ohne Bewässerung“ erfolgte Abkapselung mit Austrocknungsprozessen, die auf MBA-Deponien über der offenen Einbaufäche so nicht eintreten, allenfalls später nach endgültiger Abdichtung
- bei Option „mit Bewässerung“ erfolgte eine sehr hohe Wasserzugabe, die deutlich über der klimatischen Sickerwasserbildung offener Einbaufächen liegt, was so ebenfalls nicht eintritt



Deponiesimulationsreaktoren TU Darmstadt (Bockreis et al., 2004)

AT₄ Inputmaterial: 2,1 – 2,7 mgO₂/gTS

Gasbildung nach 2.500 Tagen: 4,1 – 23,8 Nm³/MgTS

Methanbildung nach 2.500 Tagen: 1,0 – 9,7 Nm³CH₄/MgTS

Ergänzende Hinweise, Kommentar IFAS:

- Die Gasproduktion in den meisten DSR setzte erst nach einer Lag-Phase ein.
- Ferner wurde der Einfluss von Temperatur und Wassergehalt auf die Deponie-gasproduktion untersucht:
 - Bei einem Wassergehalt von 15% der Feuchtmasse FM blieb die Gaspro- duktion bei unterschiedlichen Temperaturen von 18 – 40°C sehr gering (< 2 Nm³/MgTS).
 - Bei einem Wassergehalt von 18% FM stieg die Gasproduktion bei erhöh- ter Temperatur von 40°C deutlich an (ca. 8,5 Nm³/MgTS).
 - Bei einem Wassergehalt von 35% FM, der in dieser Größenordnung in MBA-Deponien zu erwarten ist, betrug die Gasproduktion mit wachsender Temperatur von 18 - 40°C zwischen 6 und 18 Nm³/MgTS.
- Temperaturen im mesophilen und thermophilen Bereich wurden auch an weite- ren MBA-Deponien festgestellt:
 - Versuchsfeld MBA-Deponie Erbenschwang mit 40 – 50°C über mehrere Jahre (Hertel et al., 2001).
 - Messungen IFAS auf MBA-Deponie A: Einbautemperaturen von 30 – 50°C, teilweise kurzzeitig bis zu 70°C, wenn der MBA-Abfall vergleichbar einer offenen Nachrotte auf der offenen Ablagerungsfläche zwischen- lagerte, bevor es verdichtet eingebaut wurde.



Deponiesimulationsreaktoren Fraunhofer Institut (Hennecke, 1999)

AT₄ Inputmaterial: 1,4 – 5,5 mgO₂/gTS

Gasbildung nach 1 Jahr: 7,1 – 38,0 Nm³/MgTS

Gasbildung nach 2 Jahren: 12,1 – 48,2 Nm³/MgTS

Ergänzende Hinweise, Kommentar IFAS:

- Der Einbauwassergehalt betrug 38,4 – 44,5% FM. Es wurde kein Wasser zugegeben oder rezirkuliert (Simulation eines abgedichteten Deponieabschnitts).
- Die Einbautrockendichte lag nach verdichtetem Einbau bei 0,71 – 0,77 MgTS/m³.
- Die Reaktortemperaturen lagen bei 23 – 30°C.
- Untersuchungen zum Einfluss eines Gaseinstaus auf die Gasproduktion zeigten, dass Überdrücke bis zu 75 mbar zu einer reduzierten Gasproduktion um ca. 30% führten.
- Von Hennecke, 1999, wurde aus seinen Untersuchungen eine lineare Abhängigkeit zwischen der Atmungsaktivität (AT₄) des eingebauten MBA-Abfalls und der Gasproduktion im 1. Ablagerungsjahr (G_{1. Jahr}) abgeleitet:

$$G_{1. \text{ Jahr}} = 7,53 \cdot AT_4 - 3,46$$

mit G_{1. Jahr} Gasproduktion im 1. Jahr der Ablagerung [m³/Mg TS]

Diese Korrelation führt zu relativ hohen abgeschätzten Gasproduktionsraten. Eine Lag-Phase sowie die Auswirkungen der Verdichtung, der Temperatur und des Wasserhaushalts fließen nicht in diese Abschätzung ein. Das Gesamtgaspotenzial liegt zudem um mindestens 50% höher als die Gasproduktion im 1. Jahr.



Deponiesimulationsreaktoren TU Hamburg-Harburg (Leikam, 2002)

Versuchsreihe 1:

AT₄ Inputmaterial: 2,0 – 6,5 mgO₂/gTS

Gasbildung zum Versuchsende (658 – 718 Tage): 4 – 32 Nm³/MgTS

Versuchsreihe 2:

AT₄ Inputmaterial: 2,6 – 5,0 mgO₂/gTS

Gasbildung zum Versuchsende (1.593 – 1.613 Tage): 28,4 – 39,3 Nm³/MgTS

Prognostiziertes Gesamtgasbildungspotenzial: 32 – 41 Nm³/MgTS

Ergänzende Hinweise, Kommentar IFAS:

Von Leikam, 2002, wurde der Einfluss der Verdichtung und des Einbauwassergehalts auf die Deponiegasbildung bei der simulierten Ablagerung von MBA-Abfall untersucht:

- Bei geringen bis durchschnittlichen Einbaudichten von 0,4 – 0,8 MgTS/m³ war eine Abhängigkeit der Gasbildung von der Einbaudichte nicht erkennbar.
- Hingegen zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der Gasproduktion vom Einbauwassergehalt:
 - Oberhalb von 35% Wassergehalt (bezogen auf die Feuchtmasse FM) wurde bei unterschiedlichen Versuchsansätzen in etwa das gleiche Gasbildungspotenzial festgestellt. Mit steigendem Wassergehalt von 35% FM bis 50% FM liefen die anaeroben Abbauprozesse zunehmend intensiver ab, d.h. die Halbwertszeit verkürzte sich.
 - Bei Wassergehalten unter 35% FM wurde auch langfristig nicht das gesamte Deponiegaspotenzial freigesetzt, und die Halbwertszeiten verlängerten sich mit abnehmendem Wassergehalt.

Ergebnisse weiterer Untersuchungen:

- Aus Lysimetern der Uni Essen wurden nach 8 Jahren simulierter Ablagerung Abfallfeststoffproben entnommen, die noch einen relativ hohen AT₄ von 3,3 – 5,7 mgO₂/gTS bei Gasbildungsraten GB₂₁ von lediglich 0,2 – 1,7 Nm³/MgTS aufwiesen (Felske et al., 2003).



- Auf dem MBA-Versuchsfeld Erbenschwang wurden vorbehandelte Abfälle eingebaut, die mit einem AT_4 von ca. $20 \text{ mgO}_2/\text{gTS}$ nicht repräsentativ für aktuelle Ablagerungsbedingungen sind (Hertel et al., 2001). Die dort mit einem aktiven Gaserfassungssystem erfassten Gasmengen waren hinsichtlich des Erfassungsgrades so gering, dass sie keinen belastbaren Rückschluss auf die Gasproduktion in der MBA-Versuchsdeponie erlaubten.
- Höring et al., 1998, schätzten das Gasbildungspotenzial über Extrapolationsrechnungen bei stabilisierten Abfällen (AT_4 $3,5 - 6,5 \text{ mgO}_2/\text{gTS}$, GB_{21} $7 - 20 \text{ NI/kgTS}$) auf $20 - 40 \text{ m}^3/\text{MgTS}$ ab.

3.2 Ergebnisse aus Überwachungswerten in MBA-Anlagen

Die zur Verfügung stehenden Daten von MBA-Anlagen zeigen, dass die Anforderungswerte an die Atmungsaktivität und/oder das Gasbildungspotenzial weitgehend eingehalten werden.

MBA-Anlage zu MBA-Deponie A: Überwachungswerte

So zeigen die Überwachungswerte der vorbehandelten Siedlungsabfälle, die auf der MBA-Deponie A eingebaut werden, dass die Anforderungen der früheren Abfallablagereungsverordnung und aktuell der Deponieverordnung im Zeitraum 2005 – 2011 überwiegend erfüllt werden, insbesondere in den letzten Jahren, wenn nicht nur die Einzelwerte, sondern auch der Median und das 80%-Perzentil betrachtet werden. In Abbildung 3.3 sind diesbezüglich die Einzelwerte für die Parameter Atmungsaktivität, TOC im Eluat und TOC im Feststoff aufgetragen.

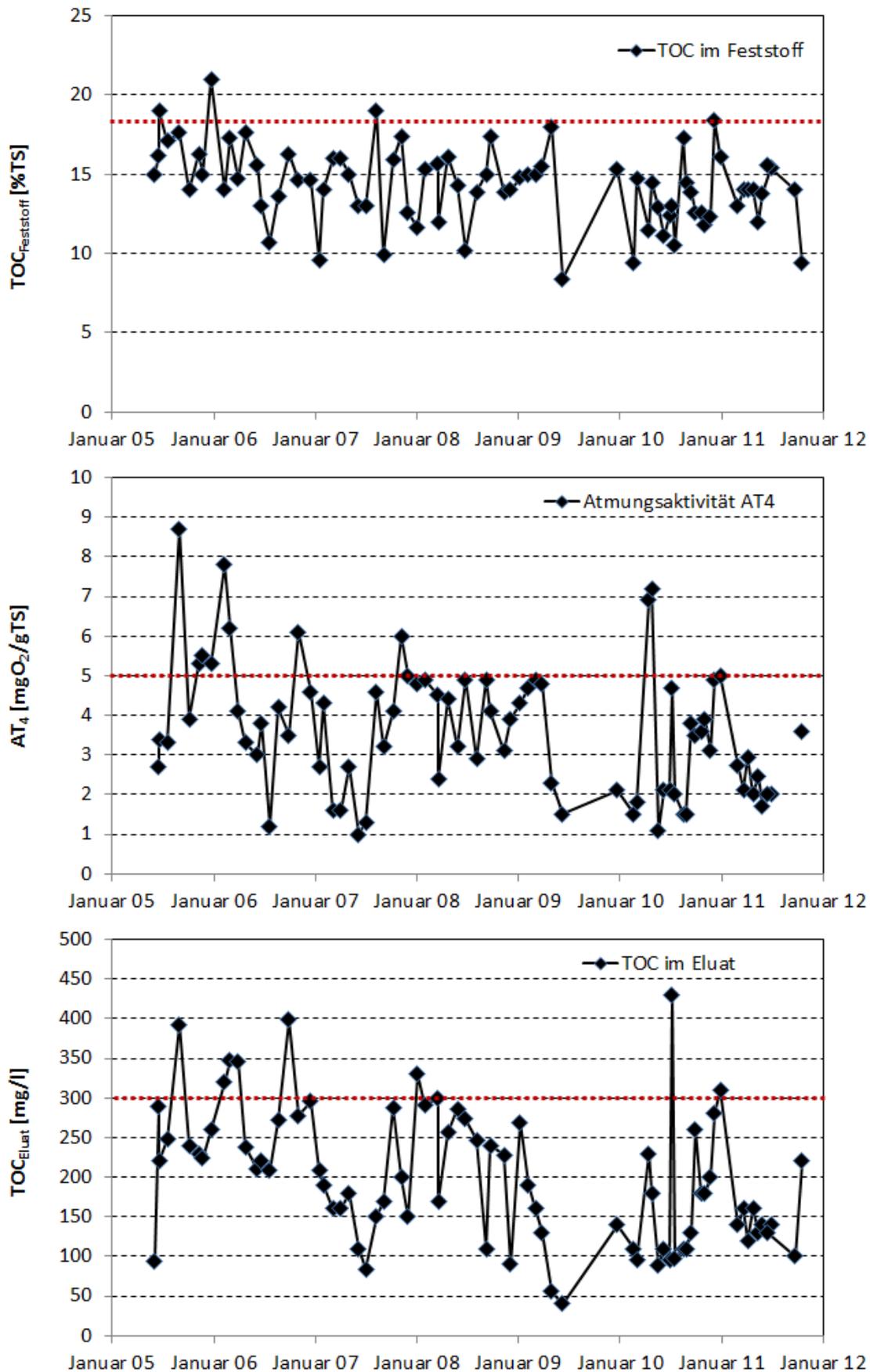


Abb. 3.3: Einzelwerte Atmungsaktivität AT₄, TOC im Eluat und TOC im Feststoff im Anlieferungsmaterial der MBA-Deponie A im Zeitraum 2005 – 2011



Wenn in erster Näherung der Verhältniswert zwischen Atmungsaktivität AT_4 und Gasbildungsrate GB_{21} von 4 angesetzt wird (analog zu den Anforderungswerten gemäß DepV), deutet dies auf Gasbildungsraten GB_{21} im Bereich von 5 bis 35 NI/kgTS, durchschnittlich etwa 10 - 20 NI/kgTS hin. Unter Berücksichtigung des Sachverhalts, dass das langfristige Gasbildungspotenzial etwa das 1,5 – 3 fache der Gasbildungsrate über 21 Tage ausmachen kann, weist dies auf theoretische Restgaspotenziale von 15 – 60 m³/MgTS bzw. einem Methanbildungspotenzial von 9 – 36 m³CH₄/MgTS (bei durchschnittlich 60 Vol.-% CH₄ im Deponiegas) hin. Hierzu ist festzuhalten, dass es sich um theoretische maximale Gasbildungspotenziale handelt, da

- sich die Gasbildung über sehr lange Zeiträume von mehreren Jahrzehnten erstrecken kann,
- ein gewisser Anteil des bioverfügbaren Kohlenstoffs zunehmend unter aeroben Milieubedingungen (Gasaustauschprozesse mit der Atmosphäre) abgebaut werden wird und folglich nicht zur Methanbildung beiträgt,
- Methanoxidationsprozesse den Methananteil, der in die Atmosphäre entweicht, zusätzlich reduzieren.

Diesen drei Einflussfaktoren wird bei der weiteren Abschätzung der Methanemissionen von MBA-Deponien Rechnung getragen.

MBA-Abfall Abfallwirtschaftszentrum Rhein-Lahn-Kreis (Bohn und Jager, 2011)

Mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle des Abfallwirtschaftszentrums Rhein-Lahn-Kreis wiesen zur Ablagerung und Untersuchung in Lysimetern und einem MBA-Testfeld folgende Eigenschaften auf (Bohn und Jager, 2011):

- Wassergehalt: 21,5 – 34,5%
- Gasbildungsrate GB_{21} : 6,5 – 18,3 NI/kgTS
- Atmungsaktivität AT_4 : 3,4 – 4,3 mgO₂/gTS
- DOC_{Eluat}: 214 – 277 mg/l
- TOC_{Feststoff}: 12,9 – 18,1 Masse-%

MBA-Abfall für ein MBA-Versuchsfeld (Reinert, 2010)

Mechanisch-biologisch behandelte Abfälle, die in einem MBA-Versuchsfeld abgelagert wurden, zeigten folgende Mittelwerte der Anlieferungsanalysen auf (Reinert, 2010):

- Wassergehalt: 35 – 40%
- Atmungsaktivität AT_4 : 2,0 – 3,0 mgO₂/gTS
- TOC_{Eluat}: 151 – 227 mg/l
- TOC_{Feststoff}: 16,9 – 17,2 Masse-%



3.3 Ergebnisse von Überwachungsmaßnahmen und Untersuchungen an MBA-Deponien und Versuchsfeldern

MBA-Testfeld Abfallwirtschaftszentrum Rhein-Lahn-Kreis der TU Darmstadt (Lo et al., 2011)

Seit Sommer 2007 wird ein Testfeld mit mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen betrieben, das mit einer Kapillarsperre abgedeckt wurde. Im November 2010 wurde Abfallfeststoffproben aus zwei Deponiebereichen aus ca. 3 m Tiefe entnommen:

- aus dem oberen Bereich des geneigten Testfelds (Hangkopf)
- aus dem unteren Bereich des geneigten Testfelds (Hangfuß)

Es wurden folgende Ergebnisse angegeben (Tabelle 3.1).

Tab. 3.1: Abfallfeststoffbeschaffenheit MBA-Abfall bei der Ablagerung und nach ca. 3,5 Jahren im Testfeld (Lo et al., 2011)

Parameter	MBA-Abfall bei Testfeldeinbau	Feststoffprobe (MU) aus Hangfuß	Feststoffprobe (BO) aus Hangkopf
TOC _{Eluat} [mg/l]	-	51,5	80,2
TOC _{Feststoff} [Masse-%]	12,9	4,7	8,4
AT ₄ [mgO ₂ /gTS]	3,6	1,4	1,9
GB ₂₁ [NI/kgTS]	14,9	0,5	2,3

Ergänzende Hinweise, Kommentar IFAS:

- In den 3,5 Jahren Ablagerung hat ein nennenswerter weiterer Abbau der biologisch verfügbaren Restorganik stattgefunden, der gemessen am TOC im Feststoff und am AT₄ bei 35 – 64% liegt und beim GB₂₁ sogar noch höher wäre.
- Aus den AT₄-Werten könnte eine relativ kurze Halbwertszeit von 3 – 4 Jahren abgeleitet werden.
- Wenn die bioverfügbare Restorganik vollständig anaerob abgebaut worden wäre, so weisen die Gasbildungsraten GB₂₁ auf Gaspotenziale im Bereich von 20 - 30 Nm³/MgTS hin.



- Die Abfallfeststoffprobe aus dem unteren Hangbereich (MU) zeigte bereits einen intensiveren Abbau als jene aus dem Hangkopf (BO). Im unteren Hangbereich war die Abfalldurchfeuchtung aufgrund der Auswirkung der Kapillarsperre offenbar intensiver als im oberen Bereich.
- Eine geringe Gasbildung ab 2009/2010 im Testfeld wurde auf zunehmend fehlende Feuchtigkeit zurückgeführt. Zudem war die obere Abfalllage gut durchlüftet, so dass dort eine intensive Sauerstoffversorgung für aerobe Abbau- und Methanoxidationsprozesse gegeben war (gute Luftzuführung und Verteilung über Kiesblock der Kapillarsperre).
- Die Methanemissionen aus dem Abfallkörper wurden über Gasmessboxen in der Kapillarschicht ermittelt. Sie lagen im Zeitraum August 2008 bis Mai 2010 bei durchschnittlich $0,7 \pm 0,8 \text{ l CH}_4 / \text{m}^2 \cdot \text{h}$ mit abnehmender Tendenz (Schwankungsbereich $0,6 - 3,5 \text{ l CH}_4 / \text{m}^2 \cdot \text{h}$, Bohn und Jager, 2011).

MBA-Versuchsfeld, wissenschaftlich begleitet von der Universität Trier (Reinert, 2010)

Im Zeitraum 2004 – 2007 wurden wissenschaftliche Untersuchungen an einem MBA-Versuchsfeld (15 m * 35 m, Ablagerungsmächtigkeit 6 m) durchgeführt. Dazu wurden folgende Ergebnisse und Schlussfolgerungen präsentiert (Reinert, 2010):

- Es wurden überwiegend Temperaturen von 16 – 25°C und nur in einem tieferen Bereich erhöhte Temperaturen bis 41°C festgestellt.
- Zu Beginn der Ablagerung wurden Kohlendioxidgehalte bis zu 82 Vol.-% bestimmt, die der instabilen Methanphase (siehe Abb. 3.1) zugeordnet wurden. Ein Methan- zu Kohlendioxidverhältnis von 60:40, wie es der Langzeitphase entspricht, hatte sich nach 100 – 150 Tagen Ablagerungsdauer eingestellt. Relevante Gasdrücke waren im Deponiekörper nicht messbar.
- Bereits nach 550 Tagen Ablagerung wurde eine mittlere Gasbildungsrate von 25 NI/kgTS ermittelt. Abfallfeststoffproben, die dem Versuchsfeld nach 2 Jahren Ablagerungsdauer entnommen wurden, zeigten allerdings nur eine geringfügige Abnahme des TOC im Feststoff.
- Für die Gasemissionen über die Oberfläche wurde über Gasmessboxen eine mittlere Methanemission von $0,51 \text{ l CH}_4 / \text{m}^2 \cdot \text{h}$ angegeben, wobei keine Aussage über die Bandbreite oder Hot Spots getroffen wurde.



Überwachungsmaßnahmen auf der MBA-Deponie B 2008 - 2011

Auf der MBA-Deponie B werden regelmäßig halbjährliche FID-Begehungen gemäß DepV, 2009, vorgenommen. Die Ergebnisse der FID-Begehungen und ergänzender Deponiegasuntersuchungen im Zeitraum 2008 – 2011 zeigen:

- Die Methanemissionen über die offene Deponieoberfläche sind überwiegend sehr gering (< 10 ppm), nur in wenigen Bereichen (Hot Spots) sind höhere Ausgasungen festzustellen. Die dort bestimmten Methanemissionen heben den Mittelwert im Verhältnis zum Medianwert deutlich an.
- Die Bandbreite der Methanemissionen liegt zwischen 0 und 1.900 ppm.
- Bedingt durch die zunehmende Ablagerung des MBA-Abfalls ist es zu einer Erhöhung der Methanausgasungen über die Oberfläche gekommen, wie es die nachfolgenden Durchschnittswerte der halbjährlichen Messungen und die daraus abgeleiteten flächenbezogenen Methanvolumenströme (Berechnungsansatz siehe unten) zeigen:
 - 2008: FID 0,2 – 0,3 ppm Methanvolumenstrom ca. 0,1 – 0,2 l/m²*h
 - 2009: FID 3,1 – 8,3 ppm Methanvolumenstrom ca. 0,4 – 0,7 l/m²*h
 - 2010: FID 5,6 – 20 ppm Methanvolumenstrom ca. 0,6 – 1,1 l/m²*h
 - 2011: FID 16,8 – 20,7 ppm Methanvolumenstrom ca. 1,0 – 1,1 l/m²*h
- In Bereichen, wo erhöhte Methanemissionen festgestellt wurden, wurden ergänzend Deponiegasproben aus ca. 1 m Ablagerungstiefe entnommen. Die Methangehalte schwankten dort zwischen 0,01 und 61,2 Vol.-% CH₄. Auch hier ist eine tendenzielle Zunahme der Methankonzentrationen über die Zeit festzustellen.

Überwachungsmaßnahmen auf der MBA-Deponie C 2008 - 2011

Auf der MBA-Deponie C werden jährliche FID-Begehungen vorgenommen. Die Ergebnisse der FID-Begehungen im Zeitraum 2008 – 2011 zeigen:

- Die FID-Messungen unterliegen bei den jährlichen Begehungen erheblichen Schwankungen, was sich auch an den daraus abgeleiteten flächenbezogenen Methanvolumenströmen zeigt:
 - 2009: 0 – 850 ppm, durchschnittlicher Methanvolumenstrom $1,7 \text{ l/m}^2\cdot\text{h}$
 - 2010: 0 – 2.400 ppm, durchschnittlicher Methanvolumenstrom $2,1 \text{ l/m}^2\cdot\text{h}$
 - 2011: 0 – 37 ppm, durchschnittlicher Methanvolumenstrom $0,3 \text{ l/m}^2\cdot\text{h}$Dies bestätigt, dass FID-Messungen stets kritisch zu hinterfragen sind, was sowohl die Konzentration als auch ggf. daraus abgeleitete Methanvolumenströme anbelangt. Luftdruckschwankungen, die Wassersättigung der Oberfläche und die Fläche bevorzugter Gasaustritte (Hot Spots) im Verhältnis zur Gesamtoberfläche können erheblichen Einfluss auf das Messergebnis ausüben.
- Die Gasemission über die Oberfläche erfolgt auch hier ungleichmäßig, vornehmlich über Bereiche bevorzugter Gaswegigkeit (Hot Spots).

Überwachungsmaßnahmen auf der MBA-Deponie D 2010 - 2011

Auf der MBA-Deponie D werden die MBA-Abfälle auf einem älteren Hausmüllbereich abgelagert. Im MBA-Ablagerungsbereich befinden sich 4 Gasbrunnen, so dass dort eine aktive Gaserfassung sowohl aus dem unteren älteren Hausmüllbereich als auch aus dem MBA-Abfallkörper erfolgt. Weiterhin werden halbjährliche FID-Begehungen vorgenommen. Die mittleren Gaszusammensetzungen und Absaugraten an den 4 Gasbrunnen im Zeitraum 2010 – 2011 zeigen (Tabelle 3.2):

- Im zentraleren MBA-Ablagerungsbereich um GB 4 und GB 10 sind die Methangehalte höher als zum Rand der Ablagerung (GB 11 und GB 12). Dort wirkt sich der Übersaugungseffekt über die Gasbrunnen bzw. der Gasaustausch über die Oberfläche noch stärker aus, was auch an den Stickstoffgehalten zu erkennen ist.
- Sauerstoff wird nahezu vollständig verbraucht, was sich auch am Methan- zu Kohlenstoffdioxidverhältnis insbesondere am Randbereich zeigt.



- Die Methan- und Kohlenstoffdioxidgehalte haben sich von 2010 zu 2011 etwas reduziert, was vermutlich an leicht erhöhten Absaugraten an 3 der 4 Gasbrunnen liegt. Der abgesaugte Deponiegasanteil (unter Berücksichtigung der Stickstoffgehalte) hat sich dagegen von 16,6 auf 18,6 m³/h erhöht.
- Eine Quantifizierung des Deponiegasanteils aus den älteren unteren Hausmüllbereichen gegenüber dem überlagernden MBA-Abfallkörper ist nicht möglich.

Tab. 3.2: Mittlere Gaszusammensetzungen und Absaugraten an 4 Gasbrunnen im MBA-Ablagerungsbereich der Deponie D im Zeitraum 2010 – 2011 (Deposerv, 2012)

Gasbrunnen	CH ₄ [Vol.-%]	CO ₂ [Vol.-%]	CH ₄ [Vol.-%]	N ₂ [Vol.-%]	Absaugrate [m ³ /h]
Mittelwerte 2010					
GB 4* / GB 10	45,2	28,0	0,2	26,6	18,6
GB 11	32,9	24,3	0,2	32,6	8,1
GB 12	21,4	21,5	0,0	57,1	2,6
Mittelwerte 2011					
GB 4* / GB 10	41,9	26,7	0,2	31,2	23,8
GB 11	28,6	23,1	0,4	47,9	10,2
GB 12	18,1	19,7	0,0	62,2	2,0

GB 4 und GB 10 werden über eine Absaugleitung entgast, Installation GB 4 erfolgte 08/2010

Die halbjährlichen FID-Begehungen der MBA-Ablagerungsoberfläche haben zu folgenden Ergebnissen geführt:

1. Halbjahr 2010 – keine Emissionsauffälligkeiten an der Deponieoberfläche
 2. Halbjahr 2010 – keine Emissionsauffälligkeiten an der Deponieoberfläche
 1. Halbjahr 2011 – keine Emissionsauffälligkeiten an der Deponieoberfläche
 2. Halbjahr 2011 – Emissionen von 3 – 200 ppm in 7 von 18 Messbereichen (Raster 25 m, Deposerv, 2012)
- Die erstmalig im 2. Halbjahr 2011 festgestellten Gasemissionen über die Oberfläche lassen darauf schließen, dass sie hauptsächlich aus dem MBA-Bereich stammen, da die Gasemissionen des unteren älteren Hausmüllbereichs eher



abnehmen sollten, während sie bei der kontinuierlichen Ablagerung von MBA-Abfall anwachsen.

- Die höchsten Emissionen treten in einer größeren Entfernung zu den 4 Gasbrunnen auf, was den Einfluss der Gasbrunnenabsaugung im MBA-Abfallkörper aufzeigt. Zudem erfolgt die Gasemission über die Oberfläche auch hier ungleichmäßig.
- Der Durchschnittswert der Ausgasung über die MBA-Ablagerungsfläche im 2. Halbjahr 2011 liegt bei der Bandbreite von 0 – 200 ppm bei etwa 11 ppm, woraus sich theoretisch ein durchschnittlicher Methanvolumenstrom von $0,84 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h}$ ableiten ließe.

Überwachungsmaßnahmen auf der MBA-Deponie E 2008

Auf der Deponie E erfolgt die Ablagerung von MBA-Abfall auf einem älteren Siedlungsabfallbereich, so dass eine Beeinflussung des Gashaushalts durch die unterlagernden älteren Siedlungsabfälle möglich ist. Es wurde bereits vor 2005 MBA-Abfall abgelagert. Von der MBA-Deponie E wurde eine FID-Begehung aus dem Jahr 2008 zur Verfügung gestellt. Das Ergebnis zeigte hier:

- Es wurden lediglich leichte Ausgasungen an Methan festgestellt. Die Bandbreite über die MBA-Ablagerungsfläche lag bei 0 – 210 ppm und der Durchschnittswert bei etwa 5,6 ppm, woraus sich theoretisch ein durchschnittlicher Methanvolumenstrom von $0,59 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h}$ ableiten ließe.
- Die Gasemission über die Oberfläche erfolgte auch hier ungleichmäßig.

3.4 Abschätzungen und Plausibilitätsbetrachtungen zu Methanemissionen

Die rechnerische Ableitung von Methanemissionen aus den Ergebnissen von FID-Begehungen ist wie erläutert mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Dennoch soll eine derartige Betrachtung für die MBA-Deponien B - E vorgenommen werden, um zumindest die Größenordnung der Methanemissionen abzuschätzen. Dazu werden folgende drei Vorgehensweisen gewählt:

Abschätzung über FID-Konzentration (Weber, 2011)

$$q_A = f \cdot \text{FID}^{0,5}$$

mit

q_A Deponiegasemission [$\text{l}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]

f Faktor zur Oberflächenbeschaffenheit (0,3 für Tonboden, 1,6 für kiesigen Sand, gewählt 0,5 für offene MBA-Ablagerungsfläche nach verdichtetem Einbau) [-]

FID Messwert mit FID-Gerät [ppm]

Abschätzung über FID-Konzentration (Rettenberger, zit. in Schreier, 1999)

$$q_{\text{ACH}_4} = 5,78 \cdot 10^{-5} \cdot \text{FID}$$

mit

q_{ACH_4} Methangasemission [$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]

$5,78 \cdot 10^{-5}$ empirischer Faktor, der die Ansaugfläche des FID-Geräts (gerätespezifisch unterschiedlich) berücksichtigt

FID Messwert mit FID-Gerät [ppm]

Gasprognoserechnung nach Ansatz 1. Ordnung

Die Gasproduktion errechnet sich aus der Superposition der jährlichen Ablagerungsmengen und deren spezifischer Gasproduktionsrate P_t zum Zeitpunkt t :

$$P_t = G_0 \cdot k \cdot e^{-k \cdot t}$$



mit

- P_t spezifische Deponiegasproduktion [m^3 Gas/MgTS·a]
 G_0 Gesamtgasmenge [m^3 /MgTS deponierter MBA-Abfall]
 k Reaktionskoeffizient ($k = \ln 2/H$) [$1/a$]
 t Ablagerungsdauer (Reaktionszeit) [a]
 H Halbwertszeit = Zeit, in der 50% der Gasmenge produziert wird [a]

Die Ergebnisse der Ansätze nach Weber und Rettenberger für die stündliche Gasemissionsrate (theoretisch nach Reduzierung durch Methanoxidation bei Passieren der oberen Ablagerungsschicht) der MBA-Deponien B - E sind in Tabelle 3.3 aufgetragen, wobei der Bezug zu Deponiegas mit der Annahme, dass der durchschnittliche Methangehalt 50 Vol.-% beträgt, gewählt wurde.

Tab. 3.3: Stündliche Deponiegasemissionsrate abgeschätzt aus FID-Messungen mit Ansätzen nach Weber und Rettenberger

Jahr	MBA-Deponie B		MBA-Deponie C		MBA-Deponie D	
Jahr	Ansatz Weber [m^3/h]	Ansatz Rettenberger [m^3/h]	Ansatz Weber [m^3/h]	Ansatz Rettenberger [m^3/h]	Ansatz Weber [m^3/h]	Ansatz Rettenberger [m^3/h]
2008	10	1	60	69	-	-
2009	50	29	33	112	-	-
2010	72	59	98	624	0	0
2011	87	87	14	6	17	13

Jahr	MBA-Deponie E					
Jahr	Ansatz Weber [m^3/h]	Ansatz Rettenberger [m^3/h]				
2008	70	39				
2009	-	-				
2010	-	-				
2011	-	-				

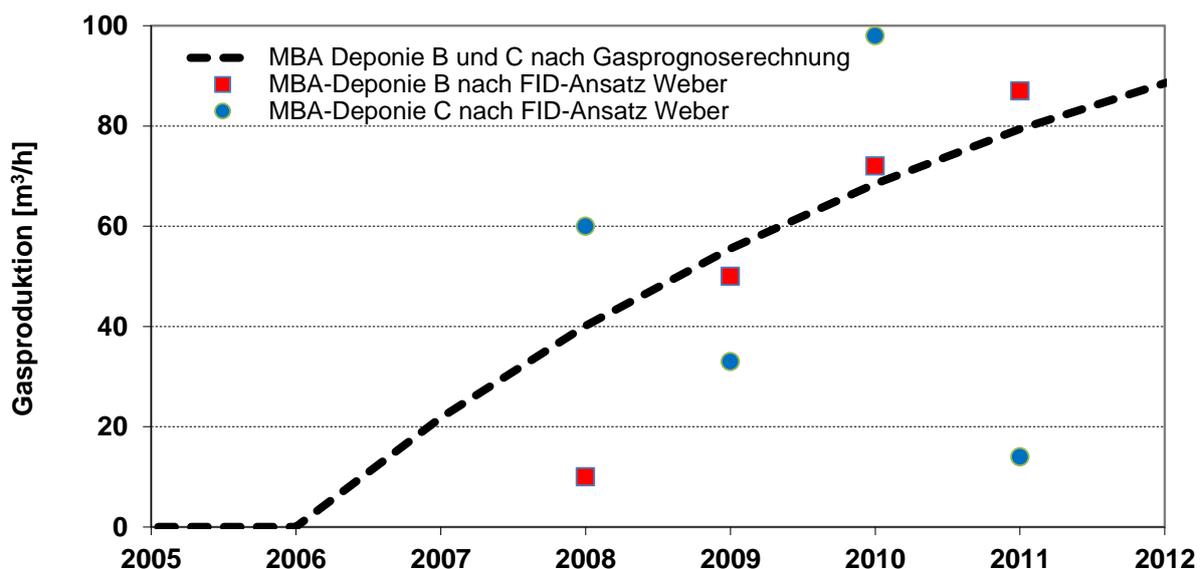
Offene Ablagerungsfläche Deponie B: ca. 4 ha
 Offene Ablagerungsfläche Deponie C: ca. 2,4 ha
 Offene Ablagerungsfläche Deponie D: ca. 1 ha
 Offene Ablagerungsfläche Deponie E: ca. 6 ha

* 2. Halbjahr 2011



Beide Ansätze ergeben bei Methankonzentrationen am FID von 10 – 30 ppm für die Deponie B, D und E vergleichbare Größenordnungen der Deponiegasemission von 40 – 90 m³/h bzw. 13 - 17 m³/h. Bei der Deponie C würde die Deponiegasproduktion nach dem Ansatz von Rettenberger in einigen Fällen zu hoch abgeschätzt werden, da sich hier hohe Einzelwerte überdurchschnittlich auswirken. Sie repräsentieren eher kleinflächige Hot Spots als größere Rasterflächen von 25 m, in die die Deponieoberfläche häufig zur FID-Begehung eingeteilt wird.

Auch die Gasprognoserechnung nach dem Ansatz 1. Ordnung deutet auf eine Größenordnung der Deponiegasproduktion hin, die bei den MBA-Deponien B und C 2010 – 2011 im Bereich von 70 – 80 m³/h liegen kann (Abbildung 3.4).



Randbedingungen zur Gasprognoserechnung für die MBA-Deponien B und C:

- Ablagerung von ca. 30.000 MgTS/a seit 2005
- Gesamtgaspotenzial G_0 des MBA-Abfalls 40 m³/MgTS
- Halbwertszeit H in erster Ablagerungsphase 4 Jahre

Abb. 3.4: Vereinfachte Gasprognoserechnung zur Deponiegasproduktion der MBA-Deponien B und C, Vergleich mit Gasemissionen abgeleitet aus FID-Begehungen 2008 - 2011

Bei einer vergleichbaren Gasprognoserechnung für die Deponie D würde die derzeitige Gasproduktion im Bereich von 20 - 30 m³/h liegen. Nach den dort gemessenen durchschnittlichen Absaugraten an den Gasbrunnen würden davon maximal 16 –

19 m³/h aktiv erfasst werden und etwa 13 - 17 m³/h über die Oberfläche entweichen (abgeschätzt über FID-Begehung im 2. Halbjahr 2011).

Bei der Deponie E würde die rechnerisch prognostizierte Gasproduktion für 2008 im Bereich von 60 - 80 m³/h liegen. Nach der FID-Begehung wären dort in diesem Zeitraum Gasemissionen von ca. 40 – 70 m³/h über die Oberfläche entwichen.

Insgesamt zeigt die Betrachtung, dass FID-Begehungen nur sehr bedingt geeignet sind, um Methanemissionen aus MBA-Deponien belastbar abzuschätzen. Andererseits geben diese Auswertungen und Betrachtungen zumindest plausible Größenordnungen der Gasproduktion und der Gasemissionen der MBA-Deponiebereiche wider.²

² Auch in den IPCC-Guidelines wird auf die Schwierigkeit verwiesen, aus Emissionsmessungen an der Deponieoberfläche auf die Gesamtmethanemissionen einer Deponie zu schließen. So wird u.a. angeführt, dass es noch keine allgemein anerkannten und standardisierten Methoden gibt. Es werden die unterschiedlichen Einflüsse auf das Messergebnis wie Luftdruckschwankungen, Niederschläge, jahreszeitlich bedingte Veränderungen der biologischen Aktivität etc. genannt. Aufgrund der bevorzugten Fließwege werden auch dort kleinflächige Variationen der Ausgasungen um mehr als den Faktor 1000 angeführt (IPCC, 2006, Chapter 3, Kap. 3.3)



3.5 Bewertung der Ergebnisse, Ableitung von Vorschlagswerten zur Quantifizierung des Methanbildungspotenzials

Wie schon das Gutachten von Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008, zeigte, werden erst mit zunehmender Deponierung von MBA-Abfall allmählich Daten zum Gashaushalt und zur Gasproduktion von MBA-Deponien verfügbar. So konnten einige aktuelle Messergebnisse auf MBA-Deponien und MBA-Testfeldern in die Auswertung einbezogen werden, die u.a. nach Anfragen bei der ASA e.V. (Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung) wie auch bei etwa 25 Betreibern von MBA-Deponien in Deutschland im November und Dezember 2011 zur Verfügung gestellt wurden. Zur Beurteilung dieser ersten aktuellen Ergebnisse wurden die wesentlichen Ergebnisse früherer Untersuchungen und Forschungsarbeiten, die häufig im Labormaßstab und in Großlysimetern erfolgten, aufgegriffen.

Die Auswertung wie die zusammenfassende Übersicht in Tabelle 3.4 bestätigen die allgemein bekannte Tatsache, dass die mechanisch-biologische Abfallbehandlung zu einer deutlichen Reduzierung des verbleibenden Deponiegas- bzw. Methanbildungspotenzials in einer Größenordnung von 80 – 90% führt.

Die Freisetzung des verbleibenden Deponiegas- bzw. Methanbildungspotenzials sowohl in der Höhe wie auch der zeitlichen Entwicklung wird maßgeblich vom Einbauwassergehalt und den Temperaturen im Deponiekörper beeinflusst. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass bei abnehmenden Wassergehalten unter 35% FM das Gasbildungspotenzial nicht mehr vollständig freigesetzt wird und sich die Abbauprozesse zunehmend verlangsamen (anwachsende Halbwertszeit). Oberhalb eines Einbauwassergehalts von 35%FM und einer weiteren Durchfeuchtung z.B. durch Niederschlagseintrag über die offene oder temporär abgedeckte Oberfläche wird das Gasbildungspotenzial langfristig vollständig freigesetzt, und die Halbwertszeiten nehmen mit höherem Wassergehalt ab.

Aus den Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur ist zu schließen, dass bei anwachsender Ablagerungsmächtigkeit eines MBA-Abfallkörpers die Wärmeabfuhr über Wärmestrahlung tendenziell abnimmt und die Durchschnittstemperatur ansteigt, was wiederum anaerobe Abbauprozesse begünstigt.

Bei Trockeneinbaudichten bis $0,8 \text{ Mg/m}^3$ wurde kein nennenswerter Einfluss der Verdichtung auf die Deponiegasbildung festgestellt, bei höheren Verdichtungen kann es zu Limitierungen der anaeroben Abbauprozesse kommen.

Die Auswertung weist ferner darauf hin, dass bei ausreichend vorbehandelten Abfällen ($\text{AT}_4 \leq 5 \text{ mgO}_2/\text{gTS}$, $\text{GB}_{21} \leq 20 \text{ NI/kgTS}$) ein Gesamtgaspotenzial im Bereich von **30 – 40 Nm^3/MgTS** zu erwarten ist. Bei einem durchschnittlichen Methangehalt von 60 Vol.-% würde dies folglich einem Methanbildungspotenzial von **18 - 24 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{MgTS}$** entsprechen. Ergebnisse von FID-Begehungen auf MBA-Deponien und ergänzende Plausibilitätsbetrachtungen weisen ebenfalls auf diese Größenordnung hin.

Es ist nochmals zu erwähnen, dass das Deponiegasbildungspotenzial nicht mit einem Wert, der für alle MBA-Anlagen gilt, sondern nur mit einer Bandbreite abgeschätzt werden kann. Unterschiedliche Ausgangszusammensetzungen des Siedlungsabfalls, unterschiedliche mechanische Aufbereitungstechniken und insbesondere unterschiedliche biologische Vorbehandlungsverfahren führen zu unterschiedlichen Qualitäten des Teilstroms, der abschließend zur Deponierung gelangt.

Neben den oben genannten Einflüssen bei der Deponierung werden die Bildung des Methans und die Emission in die Atmosphäre insbesondere von folgenden Bedingungen bestimmt:

- In der oberen Abfalllage einer offenen MBA-Deponie laufen bis in eine Tiefe von ca. 1 m auch aerobe Abbauprozesse ab. Je nach Schüttgeschwindigkeit eines Deponieabschnitts kann demnach ein Teil des bioverfügbaren Kohlenstoffs noch aerob umgesetzt werden, so dass er nicht mehr zur Methanbildung beiträgt. In der Abschätzung der Methanemissionen von MBA-Deponien in Kapitel 7 wird diesem Sachverhalt Rechnung getragen, in dem in einem Szenario angenommen wird, dass auf diese Weise in der Verfüllphase bis zu 20% des bioverfügbaren Kohlenstoffs aerob umgesetzt werden.
- Bei nachlassender Gasproduktion nehmen aerobe Abbauprozesse zu und reduzieren folglich Bildung und Konzentration des Methans, sofern ein Gasaustausch mit der Atmosphäre stattfindet.

- Es erfolgen zusätzlich Methanoxidationsprozesse, wenn das Deponiegas die obere Abfalllage einer offenen MBA-Ablagerungsfläche oder die Rekultivierungsschicht einer Oberflächenabdichtung passiert.

Auf diese Einflussfaktoren wird bei der Beschreibung der Abbaukinetik (Halbwertszeit) im Folgenden näher eingegangen.

Tab. 3.4: Einbauqualität (AT₄ und GB₂₁) und Deponiegasbildungspotenzial in Langzeituntersuchungen (L) und MBA-Versuchsdeponien (V), Vergleich mit unbehandelten Siedlungsabfällen

L - Langzeituntersuchung V - MBA-Versuchsdeponie D – frühere Siedlungsabfalldeponie	AT ₄ - Einbaumaterial [mgO ₂ /gTS]	GB ₂₁ - Einbaumaterial [NI/kgTS]	Gasproduktion 1. Jahr [m ³ /MgTS]	Gesamtgasproduktion Versuchsende [m ³ /MgTS]	Gesamtmethanproduktion Versuchsende [m ³ CH ₄ /MgTS]	Quelle
L	3,0 – 11,9 MW 6,6		10 - 13	11,5 – 25,1 MW 18,2	MW ca. 9,1	Raninger et al., 2001
L	2,1 – 2,7		1 - 15	4,1 – 23,8	1,0 – 9,7	Bockreis et al., 2004
L	1,4 – 5,5		7,1 - 38	12,1 – 48,2		Hennecke, 1999
L	3,5 – 6,5	7 - 20		20 - 40		Ehrig et al., 1998
L	5			30 - 40		Leikam, 2002
V	3,6	14,9		20 - 30		Lo et al., 2011
Zum Vergleich: unbehandelter Siedlungsabfall						
L	50 - 100		20 - 40	120 - 250	60 - 150	Leikam, 2002
L	50			197		Leikam, 2002
L	15,5 - 50	60 - 125		100 - 200		Höring et al., 1998
D			1 – 25*			Krümpelbeck et al., 1999

MW Mittelwert

* Wertebereich für erfasste Gasmengen von Deponieabschnitten im 1. Jahr nach Abschluss der Verfüllung, d.h. nicht direkt vergleichbar, da Gaserfassungsgrad < 100% und abgelagerte Abfälle z.T. schon älter sind.



4 Halbwertzeit bzw. Reaktionskonstanten zur Methanbildung aus abgelagerten MBA-Abfällen

4.1 Grundlagen

Mit der Halbwertzeit H wird die Abbaukinetik der organischen Fraktion im Abfall beschrieben. Sie wird neben der Ausgangszusammensetzung des Abfalls sowohl von der Art der Vorbehandlung als auch den deponiespezifischen Randbedingungen bestimmt.

Die organischen Bestandteile können nach leicht, mittel und schwer bzw. nicht abbaubaren Anteilen unterschieden werden. Für leicht abbaubare Anteile wie Nahrungsmittelreste werden bei der Deponierung Halbwertzeiten von wenigen Monaten bis zu 2 Jahren angegeben, während mittel und schwer abbaubare Anteile wie z.B. Pappe oder Holz unter anaeroben Milieubedingungen Halbwertzeiten von mehreren Jahren bis zu einigen Jahrzehnten aufweisen können (Literaturwerte dazu siehe Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008, Heyer, 2003). Herkömmliche Kunststoffabfälle unterliegen keinen biologischen Abbauprozessen und verbleiben auf unbestimmt lange Zeit im Deponiekörper.

Wenn die Gasbildung als eine Reaktion 1. Ordnung beschrieben wird, verhält sich die Umsatz- bzw. Abbaugeschwindigkeit proportional zur aktuell vorhandenen Substratkonzentration, d.h. in diesem Fall der bioverfügbaren Restorganik nach der biologischen Vorbehandlung. Die Proportionalität wird mit dem Reaktionskoeffizienten k beschrieben:

$$k = \ln 2 / H$$

k Reaktionskoeffizient [1/a]

H Halbwertzeit = Zeit, in der 50% der Gasmenge produziert werden [a]

Bei der Deponierung von biologisch vorbehandelten Teilströmen aus MBA-Anlagen können die nachfolgenden Aspekte die Kinetik der biologischen Abbauprozesse beeinflussen.



Aspekte, die auf eine mögliche Verlängerung der Halbwertzeit schließen lassen:

- Im Resthausmüll nimmt der Anteil der nativ organischen Fraktion wie Küchen- und Gartenabfälle mit der Ausweitung der Biotonne tendenziell weiter ab.
- In der biologischen Vorbehandlung werden insbesondere die leicht und mittel abbaubaren organischen Fraktionen biologisch abgebaut. Demzufolge sollte eine Verschiebung der Anteile von leicht und mittel zu den schwer abbaubaren Anteilen mit wachsender Halbwertzeit erfolgen.
- Der verdichtete Einbau sollte zu einem reduzierten Niederschlagseintrag in den MBA-Abfall auch bei offener Ablagerungsfläche beitragen (Oberflächenabfluss und/oder erhöhte Verdunstung), so dass fehlende Feuchtigkeit und reduzierte Wasserbewegung im Deponiekörper limitierend auf die biologischen Abbauprozesse wirken. Das reduzierte gas- und wasserwegige Porenvolumen (insbesondere reduzierte Makroporen) reduziert die Wasserbewegung zusätzlich.

Aspekte, die auf eine mögliche Verkürzung der Halbwertzeit schließen lassen:

- Durch die mechanische Vorbehandlung wird ein nennenswerter Anteil der Stoffe ausgeschleust, die unter anaeroben Milieubedingungen als mittel und schwer abbaubar gelten und folglich hohe Halbwertzeiten aufweisen, z.B. Papier und Pappe, Holz, Leder. Sie werden mit Kunststoffen etc. als heizwertreiche Fraktion ausgetragen. Folglich wird die im Restabfall enthaltene leicht und mittel abbaubare Organik in dem Teilstrom, der in die biologische Behandlung geleitet wird, aufkonzentriert.
- Der mit Organik angereicherte Teilstrom zur biologischen Vorbehandlung ist bei der anschließenden Ablagerung sehr gut aufgeschlossen. Der Organikanteil, der vorher noch nicht bzw. nicht vollständig umgesetzt wurde, ist demnach auch für anaerobe Mikroorganismen gut verfügbar. Vergleichbare Effekte wurden bei der aeroben in situ Stabilisierung von Altdeponien durch die Deponiebelüftung festgestellt. Deponiebereiche, die eine Atmungsaktivität von ca. 5 – 8 mgO₂/gTS, aufwiesen, wurden innerhalb kurzer Zeit (Tage) anaerob und produzierten wieder Deponiegas, wenn dort die Belüftung bzw. Sauerstoffversorgung unterbrochen wurde.
- Durch die biologische Vorbehandlung ist der zu deponierende MBA-Abfallteilstrom insgesamt sehr viel homogener und gleichmäßiger durchfeuchtet



als früher unvorbehandelt deponierter Siedlungsabfall, so dass trotz verdichtetem Einbau zumindest anfänglich günstige Reaktionsbedingungen bestehen.

- Mit zunehmender Ablagerungsdauer wächst die Ablagerungsmächtigkeit des MBA-Deponiekörpers an. Der oberflächennahe Anteil des Deponats, in dem noch aerobe Abbauprozesse stattfinden, nimmt bezogen auf das Gesamtvolumen stetig ab. Gleichzeitig wird die Wärmeabstrahlung über das Verhältnis Oberfläche (gleichbleibend) zu Deponiekörpervolumen (anwachsend) reduziert. Die allmähliche Temperaturerhöhung steigert die Stoffwechselprozesse der Mikroorganismen.

4.2 Ergebnisse aus Laborversuchen

Aus den Laboruntersuchungen zur simulierten Ablagerung von MBA-Abfall, die in Kapitel 3.1.3 dargestellt wurden, lassen sich folgende Ergebnisse zur Halbwertszeit zusammenfassen (siehe auch Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008):

- In Labor- und Großlysimetern entwickelt sich eine Gasproduktion mit daraus abgeleiteten Halbwertszeiten, die deutlich kürzer sind als jene, von denen bei der Deponierung ausgegangen wird. Hier wirken sich die Versuchsbedingungen wie der homogene Einbau, die Verdichtung, Temperatur, Feuchtegehalt und Wasserzugabe bzw. Prozesswasserrezirkulation und auch die Versuchsdauer erheblich aus.
- So weisen die Ergebnisse in Tabelle 4.1 auf Halbwertszeiten von wenigen Monaten bis zu 2 Jahren hin. Mit wachsender Versuchsdauer sind die Halbwertszeiten abgeleitet aus den Gasproduktionsverläufen tendenziell angestiegen. Dies lässt darauf schließen, dass zu Beginn der Langzeitversuche die Gasproduktion noch von Restanteilen leicht und mittel abbaubarer Organik geprägt wurde. Mit zunehmender Versuchsdauer wurde die verbleibende Gasproduktion geringer, aber langanhaltender, d.h. von mittel und schwer abbaubarer Restorganik mit höheren Halbwertszeiten bestimmt.
- Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Laborversuchen und realen Deponiebedingungen besteht in einer häufig erhöhten Wasserzugabe und Prozesswasserrezirkulation. Die Prozesswasserrezirkulation soll der Beschleunigung

physikalischer Prozesse zur Beschreibung der langfristigen Sickerwasseremissionen dienen. Sie führt aber auch zu einer Optimierung und damit Beschleunigung der biologischen Abbauprozesse, für die von unterschiedlichen Institutionen ein Beschleunigungsfaktor von 3 – 10 abgeschätzt wurde (Ehrig et al., 1998, Leikam, 2002).

- Andererseits bewirken ein reduzierter Wasserdurchsatz oder Austrocknungsvorgänge eine Reduzierung der anaeroben Abbauprozesse mit einer Verlängerung der Halbwertszeit. So wurde in Laborversuchen von Leikam, 2002, ein Anwachsen der Halbwertszeit bei Wassergehalten < 32% FM bis zu einer Verdoppelung gemessen.

Tab. 4.1: Übersicht zu abgeleiteten Halbwertszeiten von MBA-Abfällen bei der simulierten Deponierung in Labor- und Großlysimetern

Versuchsart	Halbwertszeit	Anmerkungen	Quelle
Großlysimeter Allerheiligen	180 – 205 d	ohne Bewässerung	Raninger et al., 2001
Großlysimeter Allerheiligen	87 - 509 d	mit Bewässerung	Raninger et al., 2001
Deponiesimulationsreaktoren Fraunhofer Institut	71 – 550 d		Hennecke, 1999
Deponiesimulationsreaktoren TU Darmstadt	103 – 620 d		Bockreis et al., 2004
Deponiesimulationsreaktoren TU Hamburg-Harburg	365 – 462 d	Höherer Wasserdurchsatz als in Deponie, hoher Stabilisierungsgrad	Leikam, 2002
Deponiesimulationsreaktor TU Hamburg-Harburg	86 d	Höherer Wasserdurchsatz als in Deponie, niedrigerer Stabilisierungsgrad	Leikam, 2002
Deponiesimulationsreaktor BUGH Wuppertal	381 d	Höherer Wasserdurchsatz als in Deponie	Ehrig et al., 1998

Bei der Übertragung dieser Ergebnisse auf reale MBA-Deponien und weiteren modellhaften Betrachtungen wird von deutlich längeren Halbwertszeiten ausgegangen, wie es die nachfolgende Aufzählung zeigt:

- 15 Jahre (Danhamer, 2002)
- 3 – 10 Jahre (Reinert et al., 2007, Scheelhaase et al., 1999)
- 15 – 30 Jahre (Rettenberger, 1997, Ehrig et al., 1998)
- 8 – 15 Jahre bei Wassergehalten > 35% FM (Leikam, 2002)
- 16– 30 Jahre bei Wassergehalten < 32% FM (Leikam, 2002)



Neben den erläuterten unterschiedlichen Randbedingungen zwischen Labor- und Lysimeterversuchen einerseits und realen Deponiebedingungen andererseits wird dieses von den o.g. Autoren in der Regel mit dem dominierenden Einfluss der mittel und schwer abbaubaren organischen Anteile auf die Deponiegasproduktion begründet.

4.3 Ergebnisse bzw. Rückschlüsse von Überwachungsmaßnahmen und Untersuchungen an MBA-Deponien

Von Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008 werden mündliche Mitteilungen von Weber angeführt, nach denen auf MBA-Deponietestfeldern eine anfängliche hohe Deponiegasbildung festgestellt wurde, obwohl die Anforderungswerte an das vorbehandelte Material eingehalten wurden. Es werden anfängliche Emissionsraten von 2,5 und 3 l Deponiegas/m²*h angegeben und aus dem zeitlichen Verlauf der Gasproduktion kurze Halbwertszeiten von lediglich 8 – 9 Monaten abgeschätzt.

Aus den Ergebnissen der Abfallfeststoffprobenahme im MBA-Testfeld des Abfallwirtschaftszentrums Rhein-Lahn-Kreis kann anhand der Reduzierung des Atmungsaktivitätswerts innerhalb von 3,5 Jahren Ablagerungsdauer grob abgeschätzt werden, dass der Umsatz der biologisch verfügbaren Restorganik dort mit einer relativ kurzen Halbwertszeit von 3 – 4 Jahren erfolgte. Auch hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass es sich um ein Einzelergebnis abgeleitet aus wenigen Feststoffproben handelt. Der Abbau kann teilweise auch unter aeroben Bedingungen erfolgt sein.

Bei den Untersuchungen der Universität Trier an einem MBA-Versuchsfeld wurde bereits nach 550 Tagen Ablagerungsdauer eine Gasbildungsrate von ca. 25 NI/kgTS ermittelt (Reinert, 2010). Daraus ist zu schließen, dass ein beträchtlicher Anteil der bioverfügbaren Organik mit einer kurzen Halbwertszeit von 1 – 2 Jahren anaerob umgesetzt wurde.

Untersuchungen zum Einbaubetrieb auf der MBA-Deponie A haben in den letzten 5 Jahren ergeben, dass die Wassergehalte überwiegend im Bereich von 30-40% FM liegen, ein Wasserzutritt über die offene Ablagerungsfläche möglich ist und die

Einbautrockendichten im Bereich von 0,6 – 0,9 MgTS/m³ liegen. D.h. weder vom Wasserhaushalt noch vom verdichteten Einbau sind nennenswerte Limitierungen der biologischen Abbauprozesse zu erwarten, die sich negativ bzw. verlängernd auf die Halbwertszeit auswirken. So zeigen dort die Deponiegaskonzentrationen überwiegend ausgeprägte anaerobe Milieubedingungen an (Abb. 3.2).

Die Entwicklung der Deponiegasemissionen, abgeleitet aus den Ergebnissen der FID-Begehung, verlief auf der Deponie B im Zeitraum 2008 – 2011 sehr intensiv, was auf eine Halbwertszeit von etwa 2 Jahren in dieser ersten Phase der Ablagerung hindeuten könnte. Der Anstieg der Gasemission nach der Gasprognoserechnung mit einer angenommenen Halbwertszeit von 4 Jahren verlief deutlich langsamer, wie es in Abbildung 3.4 zu erkennen ist. Auch hier handelt es sich um ein Einzelergebnis, dass mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. So ist aus den Gasemissionsmessungen per FID auf den Deponien C und D die Ableitung einer Halbwertszeit nicht möglich.

Trotz der wenigen verfügbaren Angaben zu den Gasemissionen und den geschilderten Unsicherheiten ist dennoch der Umstand bemerkenswert, dass die groben Abschätzungen an den „jungen“ MBA-Deponien bzw. Testfeldern auf relativ kurze Halbwertszeiten von 0,75 – 4 Jahren hinweisen. Sie sind deutlich kleiner als die Halbwertszeiten, die aufgrund von Labor- und Lysimeteruntersuchungen abgeleitet wurden.

4.4 Ableitung von Vorschlagswerten zur Quantifizierung der Halbwertszeit bzw. Reaktionskonstanten

Aus der Literaturlauswertung und den ersten Ergebnissen von MBA-Deponien kann festgehalten werden:

- Während der biologischen Vorbehandlung findet ein Abbau insbesondere der leicht und mittel abbaubaren organischen Anteile statt, was sich u.a. im deutlichen reduzierten Gasbildungspotenzial (bestimmt über die Gasbildungsrate GB_{21}) oder auch den TOC/DOC im Eluat zeigt.
- Dennoch weisen die verfügbaren Ergebnisse darauf hin, dass sich nach Abschluss der biologischen Vorbehandlung noch ein gewisser Restanteil an leicht und mittel abbaubaren organischen Verbindungen im MBA-Abfallteilstrom zur Deponierung befindet.
- Ferner werden in der Ablagerungspraxis nicht so ungünstige Bedingungen für biologische Abbauprozesse geschaffen, wie es mit den Vorgaben in der AbfAbIV und nachfolgenden DepV, 2009, ursprünglich beabsichtigt war. Bei der Deponierung weist der MBA-Abfall eher günstige Randbedingungen für das Einsetzen bzw. Weiterlaufen biologischer Abbauprozesse auf (Homogenität, Feuchte). Je nach Einbautechnik, was Dünnschichteinbau, Verdichtung, Überschüttung und Aufbaugeschwindigkeit anbetriift, können sich so nochmals aerobe gefolgt von anaeroben Abbauprozessen einstellen. Demnach könnte die Gasbildung in den ersten Jahren der Ablagerung von den verbliebenen leicht und mittel abbaubaren Anteilen und gut aufgeschlossenen bzw. verfügbaren organischen Anteilen dominiert werden.
- Mit zunehmender Ablagerungsdauer wird die Deponiegasbildung von den schwer abbaubaren organischen Anteilen bestimmt, womit eine Zunahme der Halbwertszeit in Bereiche von 10 – 30 Jahren, wie sie häufig in der Fachliteratur genannt werden, verbunden ist. D.h. es ist eine niedrige Gasproduktionsrate, die nur noch geringfügig abnimmt, über sehr lange Zeiträume von einigen Jahrzehnten zu erwarten. Hier können sich zudem die Verdichtung auch durch Auflasterhöhung, ein reduzierter Wasserzutritt (Oberflächenabdichtung) und eine reduzierte Gaswegigkeit auswirken.

- Obwohl der MBA-Abfall nach der biologischen Behandlung ein vergleichsweise homogenes Material ist, handelt es sich folglich weiterhin um ein Stoffgemisch aus zahlreichen unterschiedlich gut abbaubaren Einzelverbindungen.

Von daher liegt es nahe, zur Quantifizierung der Methanemissionen eine Differenzierung des MBA-Abfalls nach leicht, mittel und schwer abbaubaren Anteilen mit entsprechend unterschiedlichen Halbwertzeiten vorzunehmen (Dreiphasenmodell). Im First Order Decay (FOD) Modell der IPCC, das ebenfalls auf der Abbaukinetik 1. Ordnung basiert, ist diese Option möglich. Für den zu deponierenden MBA-Teilstrom ist es aufgrund der Homogenität allerdings nicht mehr notwendig bzw. sinnvoll, nach den Ausgangsstoffen wie Nahrungsmittel, Gartenabfälle, Textilien, Papier/Pappe, Windeln etc. zu differenzieren.

Auf der Ebene 3 (Tier 3) des FOD-Modells können (landesspezifische, in diesem Fall vorbehandlungsspezifische) Schlüsselparameter und Messergebnisse berücksichtigt werden, was beim MBA-Abfall insbesondere das Methan- bzw. Deponiegasbildungspotenzial und die Halbwertzeit wären.

Mit diesem Multiphasenmodell ist gegenüber dem so genannten Einphasenmodell zwar eine bessere Prognosemöglichkeit der zu erwartenden Methanemissionen möglich. Die Auswertung hat jedoch gezeigt, dass erst wenige Messergebnisse vorliegen, die noch nicht belastbar und verallgemeinerbar sind. Folglich sind die anzusetzenden Eingangparameter noch mit einer größeren Unschärfe und Unsicherheit behaftet, so dass der Vorteil des Dreiphasenmodells erst in Verbindung mit weiteren Ergebnissen von MBA-Deponien und ergänzenden Untersuchungen zum Tragen kommt.

Im Dreiphasenmodell kann der MBA-Teilstrom anteilig den drei Kategorien leicht, mittel und schwer abbaubar zugeordnet werden. Aufgrund der Literaturlauswertung und den ersten Ergebnissen von MBA-Deponien werden für die Halbwertzeiten des zu deponierenden MBA-Teilstroms folgende Wertebereiche vorgeschlagen:

- leicht abbaubarer Anteil: $H = 3 \pm 2$ Jahre, d.h. $k = 0,23$ (0,14 – 0,35)
- mittel abbaubarer Anteil: $H = 10 \pm 5$ Jahre, d.h. $k = 0,07$ (0,05 – 0,14)
- schwer abbaubarer Anteil: $H = 25 \pm 10$ Jahre, d.h. $k = 0,03$ (0,02 – 0,05)



Zum Vergleich werden die Vorgabewerte und Bereiche der IPCC Guidelines zu den Halbwertzeiten für gemäßigte Breiten und humides Klima aufgeführt:

- gemischter Siedlungsabfall, unbehandelt: 7 Jahre (6 – 9 Jahre)
- leicht abbaubar (z.B. Nahrungsmittel, Klärschlamm): 4 Jahre (3 – 6 Jahre)
- mittel abbaubar (z.B. Garten-/Parkabfälle): 7 Jahre (6 – 9 Jahre)
- schwer abbaubar (z.B. Papier, Textilien): 12 Jahre (10 – 14 Jahre)
- sehr schwer abbaubar (z.B. Holz, Gummi): 23 Jahre (17 – 35 Jahre)

Damit liegen die Halbwertzeiten, die aus der Literatur und den Ergebnissen von MBA-Deponien abgeleitet werden, in den gleichen Bereichen wie die IPCC-Vorgabewerte oder die vorgeschlagenen Werte von Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008. Im Rahmen der bestehenden Unsicherheiten bestätigen sich die Ergebnisse und Annahmen und können folglich als Eingangswerte für die Prognose der Methanemissionen genutzt werden.

Abschätzung der Deponiegasemissionen eines MBA-Deponieabschnitts

Basierend auf den Ergebnissen stellt sich zur Abschätzung der Methanemissionen die Frage, welcher Anteil der Gesamtorganik als leicht, mittel oder schwer abbaubar quantifiziert wird bzw. welcher Anteil des Gesamtgasbildungspotenzials mit kurzen, mittleren und langen Halbwertzeiten freigesetzt wird.

Die vorliegenden Ergebnisse weisen darauf hin, dass ein nennenswerter Anteil der Organik im MBA-Abfallteilstrom biologisch gut verfügbar (leicht abbaubar) ist und daher nach der Ablagerung in relativ kurzer Zeit biologisch umgesetzt wird. Weitere organische Anteile sind als mittel und schwer abbaubar einzustufen. Im nachfolgenden Beispiel wird eine Gasprognoserechnung für einen MBA-Deponieabschnitt für folgende Annahmen durchgeführt:

- Gesamtgaspotenzial von $40 \text{ m}^3/\text{MgTS}$, Gasbildung mit einer durchschnittlichen Halbwertzeit von 15 Jahren, wie sie oft in der Literatur genannt wird (Einphasenmodell)
- Gesamtgaspotenzial von $40 \text{ m}^3/\text{MgTS}$, Gasbildung mit differenzierten Halbwertzeiten abgeleitet aus der Auswertung (Dreiphasenmodell):
 - 60% des Gaspotenzials wird mit einer Halbwertzeit von 3 Jahren gebildet

- 20% des Gaspotenzials wird mit einer Halbwertszeit von 10 Jahren gebildet
- 20% des Gaspotenzials wird mit einer Halbwertszeit von 25 Jahren gebildet
- Randbedingungen zum MBA-Deponieabschnitt:
 - Ablagerungsfläche 2 ha
 - Ablagerung von 20.000 MgTS/a im Zeitraum 2005 - 2020
 - Ablagerungstrockendichte $0,8 \text{ Mg/m}^3$, d.h. mittlere Schüttgeschwindigkeit 1,25 m/a

Die Verläufe der Gasproduktion bei dem Einphasen- und dem Dreiphasenmodell sind in Abbildung 4.1 oben dargestellt. Der Ansatz mit dem Dreiphasenmodell wird wie erläutert dem mehrfach beobachteten Sachverhalt gerecht, dass in den ersten Jahren der Ablagerung die anaeroben Abbauprozesse noch relativ intensiv ablaufen. In der unteren Abbildung wird der Anteil der leicht, mittel und schwer abbaubaren Organik an der Gasproduktion dargestellt. Bezogen auf die Randbedingungen des MBA-Abschnitts ist auf der rechten Y-Achse die maximale Methanemission über die Oberfläche (ohne aktive Gaserfassung) aufgetragen, die wie auf den MBA-Deponien B - D bis zu $2,2 \text{ ICH}_4/\text{m}^2\cdot\text{h}$ betragen kann.

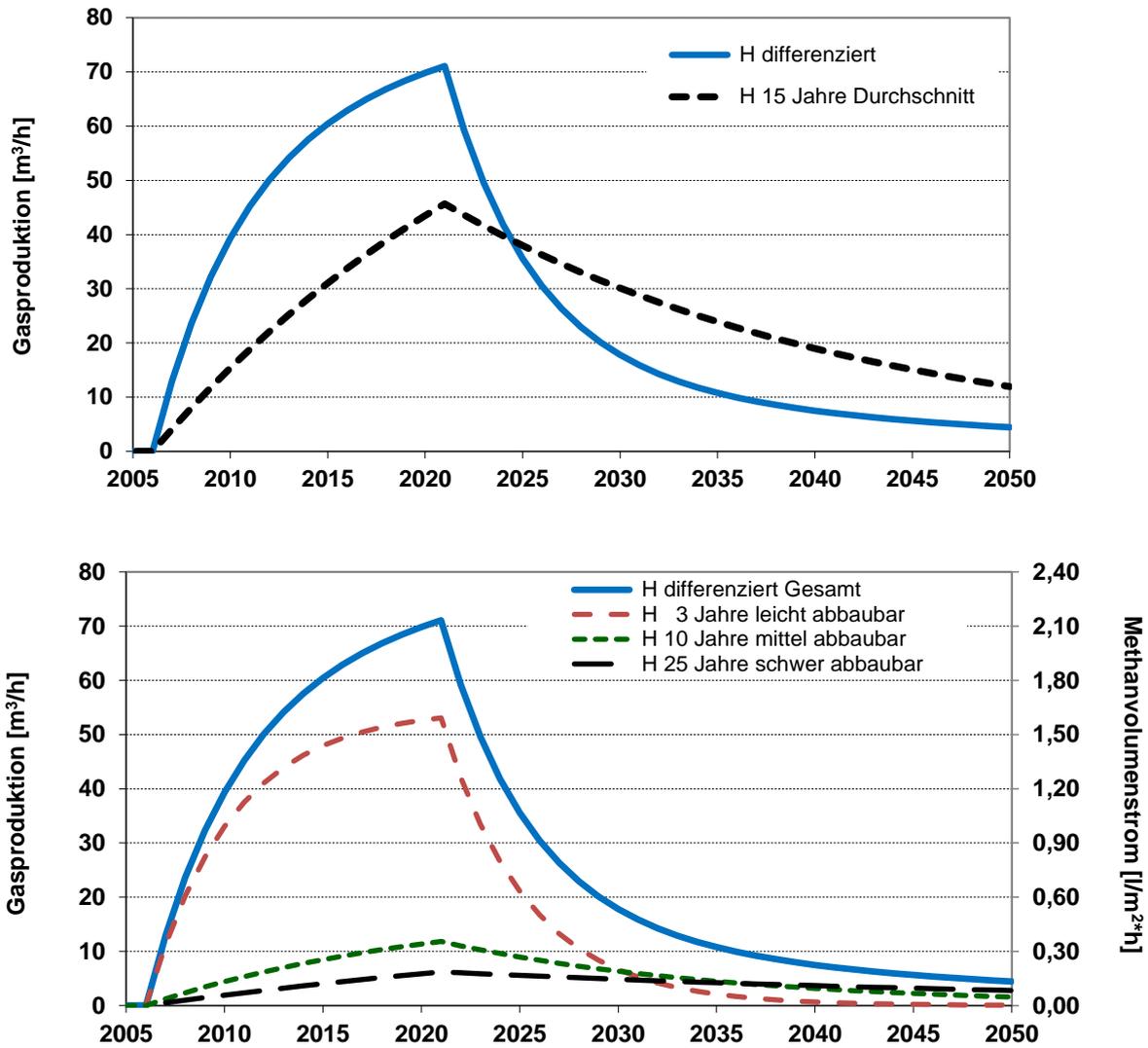


Abb. 4.1: Gasprognoserechnung für Einphasenmodell und Dreiphasenmodell (oben), Anteil leicht, mittel und schwer abbaubarer Organik an Gasproduktion im Dreiphasenmodell (unten)

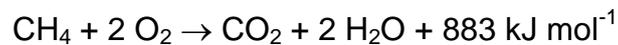


5 Biologische Methanoxidation bei der Ablagerung von MBA-Abfällen

5.1 Grundlagen der biologischen Methanoxidation

Die mikrobielle Oxidation von Methan in Abdeckschichten, Gasfenstern oder Biofiltern wurde im Bericht des IPCC als eine Schlüsseltechnologie zur Behandlung deponiebürtiger Methanemissionen aufgeführt (Bogner, 2007). Auch die Deponieverordnung greift erstmals Methanoxidationsschichten zur Reduzierung von Restgasemissionen auf.

Bei der mikrobiellen Methanoxidation wird Methan unter Vorhandensein von Sauerstoff von speziellen Mikroorganismen (so genannten methanotrophen oder methanabbauenden Bakterien) unter Energiegewinn und Wärmeabgabe (exothermer Prozess) zu Wasser und Kohlenstoffdioxid sowie mikrobieller Biomasse umgebaut. Der komplexe Vorgang mit zahlreichen Zwischenschritten kann vereinfacht mit der Summenformel für die Veratmung des Methans zusammengefasst werden:



Für die Oxidation eines Moleküls Methan sind zwei Moleküle Sauerstoff notwendig, wobei maximal ein gasförmiges Molekül entsteht, nämlich Kohlenstoffdioxid (Kohlenstoff wird teilweise in Biomasse umgewandelt). Die daraus resultierende Volumenreduktion fördert bei ausreichender Porosität des Abdeckmaterials (oder der obersten MBA-Ablagerungsschicht) das Nachströmen von Luftsauerstoff auch in größere Tiefen.

Methanotrophe Bakterien kommen in praktisch allen natürlichen Lebensräumen vor und sind dort besonders häufig vertreten, wo Methan in Kontakt mit Luftsauerstoff kommt. Dies ist unter anderem auch in Deponieabdeckschichten der Fall, wo immer wieder Methanoxidationsraten gemessen werden, die um ein Vielfaches höher sind als in natürlichen Umgebungen (Gebert et al., 2009). Die Umsetzungsraten von Methan zu Kohlenstoffdioxid variieren jedoch stark in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen und den Eigenschaften der Abdeckschicht, zum Beispiel der Temperatur, dem Wassergehalt, der Bodenstruktur und Durchlüftung sowie der Stabilität und damit der Sauerstoffzehrung der organischen Substanz.

Obwohl das Potenzial der mikrobiellen Methanoxidation vielfach belegt ist, fehlen bislang Empfehlungen für den technischen Aufbau sowie ein Methoden-Set zur Quantifizierung der Methanoxidationsleistung. Dieses wird derzeit im BMBF-Vorhaben „MiMethox“ erarbeitet. In Europa liegen einzig aus Österreich mit dem „Technischen Leitfaden Methanoxidationsschichten“ des Österreichischen Vereins für Altlastenmanagement (ÖVA, 2008) erste Hinweise zu Potenzial und Gestaltung solcher Systeme vor.

Als Kriterium für die Entlassung aus der Nachsorge wurde ein maximaler Methanvolumenstrom von $0,5 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h}$ vorgeschlagen (Stegmann et al., 2006), mit der eine Abdeckschicht beaufschlagt werden sollte. Es wird davon ausgegangen, dass diese Fracht selbst in nicht optimierten Abdeck- oder Filtersystemen auch unter ungünstigen Witterungsbedingungen mikrobiell weitgehend abgebaut werden kann. Systeme, die hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften optimiert und entsprechend des erwartbaren Methanvolumenstroms dimensioniert sind, können diese Leistung jedoch um ein Vielfaches übertreffen. So wird im „Technischen Leitfaden Methanoxidationsschichten“ des ÖVA davon ausgegangen, dass in gut ausgeführten Methanoxidationsschichten bis zu $4 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h}$ vollständig oxidiert werden können.

Je nach Art der Anwendung (temporäre oder langfristige Abdeckung) und Infrastruktur (Abdichtung, Entgasungssystem) können zur mikrobiellen Oxidation deponiebürtigen Methans verschiedene Systeme zur Anwendung kommen (Gebert et al., 2011):

- Biofilter als Methanoxidationsfilter
- Methanoxidationsfenster, auch Deponiegasfenster, jeweils mit geringerem Flächenbedarf
- Methanoxidationsschichten, die als optimierte Abdeckschichten eine größere oder die gesamte Fläche der Deponie abdecken können

Darüber hinaus soll die Möglichkeit betrachtet werden, ob und ggf. in welchem Maße eine Methanoxidation in der obersten Lage eines nicht abgedeckten MBA-Deponiebereichs stattfindet.

5.2 Beeinflussungsfaktoren der biologischen Methanoxidation

Unter realen Deponiebedingungen haben die ständig wechselnden Randbedingungen wie jahreszeitlich veränderliche Witterungsbedingungen, Veränderungen im Bewuchs und der Durchwurzelung, allmähliche Verdichtung oder Auflockerung des Bodens etc. einen erheblichen Einfluss auf die biologische Methanoxidation. Viele Messungen auf der offenen Ablagerungsoberfläche wie an Bodenabdeckungen zeigen, dass das Deponiegas sehr ungleichmäßig über die Oberfläche entweicht. Es gibt bevorzugte kleinflächige Fließwege und Austrittsstellen (Hot Spots), über die der größte Teil des Deponiegases entweicht. Dort ist keine nennenswerte Methanoxidation zu erwarten. Der Idealfall einer gleichmäßigen Anströmung der Oxidationszone mit Methan bei guter Sauerstoffversorgung unter optimalen Feuchte- und Temperaturbedingungen wird eher die Ausnahme als die Regel darstellen.

5.2.1 Temperatur

Wie jede biochemische Reaktion ist auch die Methanoxidation stark temperaturabhängig, so dass sich die natürlichen Temperaturschwankungen im Boden auf die Stoffwechselprozesse der Bakterien auswirken. Zum Temperatureinfluss auf die Methanoxidation lässt sich zusammenfassen (siehe Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008):

- Die meisten methanotrophen Bakterien vermehren sich zwischen 20 und 37°C, die optimale Temperatur für diese mesophilen Organismen liegt oberhalb von 30°C.
- Verschiedene Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass auch in anderen Temperaturbereichen methanotrophe Bakterien ausreichende bis optimale Bedingungen vorfinden können:
 - thermophile Organismen im Temperaturbereich von 37 – 62°C
 - psychrophile Organismen, die noch bei Temperaturen von 6 – 10°C Stoffwechselprozesse zeigen

Die Anpassung der methanotrophen Bakterien an tiefere oder höhere Temperaturen kann durch eine Verschiebung der Spezieszusammensetzung erfolgen. Unklar ist,

über welchen Zeitraum eine Temperaturverschiebung eine Anpassung der Bakterien bewirkt. Bodentemperaturen ändern sich insbesondere mit zunehmender Tiefe relativ langsam im Jahresverlauf.

Die Methanoxidationszone im Boden oder der oberen Abfalllage bewegt sich im Bereich von 0 – 1 m Tiefe, so dass unter durchschnittlichen regionalen Bedingungen im ersten Jahresquartal die oberflächennahen Bodentemperaturen nahe dem Gefrierpunkt liegen und im Sommer bis auf etwa 18°C ansteigen können. Sofern im Deponiekörper noch nennenswert Wärme freigesetzt wird, kann diese sich positiv auf die Mikroorganismenaktivität auswirken.

Bei so genannten Gas-Push-Pull-Tests wurden in Abdeckdeckschichten von 5 Altdeponien bei Temperaturen oberhalb von 10°C Methanoxidationsraten von 0 – 150 gCH₄/m³_{Bodenluft}*h ermittelt. Bei Bodentemperaturen unter 10°C lagen die Oxidationsraten in den meisten Fällen zwischen 0 und 10 gCH₄/m³_{Bodenluft}*h (Streese-Kleeberg et al., 2010).

5.2.2 Bodenwassergehalt / Wasserhaushalt

Der Bodenwassergehalt übt in mehrerlei Hinsicht Einfluss auf die Mikroorganismen und ihre Oxidationsleistung aus. Ein ausreichender Feuchtegehalt ist für die Mikroorganismenaktivität unabdingbar. Über das Verhältnis des wasser- zum gasgefüllten Porenvolumen wird die Gasbewegung im Boden stark beeinflusst, sowohl die diffusive und konvektive Deponiegasbewegung aus dem Deponiekörper Richtung Oberfläche als auch in entgegengesetzter Richtung der Lufteintrag in die oberste Boden- bzw. Abfallschicht.

Häufig wurden optimale Methanabbauraten bei einem Bodenfeuchtegehalt von 20% festgestellt (Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008). Auch von Streese-Kleeberg et al. (2010) wird betont, dass insbesondere das Luftporenvolumen und der Bodenwassergehalt einen großen Einfluss auf die Methanoxidationsrate haben. Für hohe Methanoxidationsraten müssen also sowohl die Bodenfeuchtigkeit als auch das freie Luftporenvolumen ausreichend hoch sein, was eine hohe Gesamtporosität erfordert, um beide Anforderungen gleichzeitig erfüllen zu können.



5.2.3 Luftdruckänderungen / Wind

Untersuchungen zum Einfluss des Luftdrucks von Gebert (2004) können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Es besteht ein ausgeprägter Zusammenhang zwischen Luftdruckänderungen, dem resultierenden Differenzdruck zum Deponiekörper, dem Volumenstrom von Deponiegas und Lufteintrag sowie der Gaszusammensetzung.
- Mit zunehmendem Differenzdruck steigt auch der Volumenstrom.
- Differenzdruck: Ein Unterdruck in der Deponie gegenüber der Atmosphäre induziert einen Luftstrom in die Deponie, ein Überdruck bewirkt die verstärkte Emission von Deponiegasen durch die obere Abfall- / Boden- / Biofilterschicht in die Atmosphäre.
- Die Strömungsrichtung des Deponiegases ändert sich häufig. In einem Untersuchungszeitraum von etwa 2 Wochen wurden beispielsweise 14 Wechsel der Strömungsrichtung festgestellt.
- Die Durchlässigkeit des Boden-/Filtermaterials begrenzt das pro Zeiteinheit austauschbare Gasvolumen.
- Mit der Änderung von Volumenstrom und Strömungsrichtung erfolgt auch eine stetige Änderung von Sauerstoff- und Methangehalten in der Bodenschicht. Der Methanoxidationshorizont kann sich über die Höhe verändern. Es gibt kaum Phasen gleichbleibender Methankonzentration.
- Damit ist eine konstante Flächenbelastung über die Zeit nicht gegeben. Die Phasen mit sehr geringem Methananteil sowie die Phasen mit Emissionsspitzen (und Sauerstoffmangel) führen zu einer gegenüber einer theoretischen Methanoxidationskapazität stark verminderten tatsächlichen Leistung. Unter Gewichtung der verschiedenen Phasen ergab sich bei Gebert (2004) eine mittlere, frachtbezogene Methanabbauleistung von 58%.
- Lufttemperaturen und Windverhältnisse zeigten keinen nennenswerten Einfluss auf die Deponiegasemission. Es können jedoch kurzzeitige, windbedingte Druckschwankungen vorkommen, die sich jedoch nur bedingt auf die Methanoxidation auswirken.

5.3 Bodenphysikalische Eigenschaften

5.3.1 Physikalische Eigenschaften

Materialien, die zur biologischen Gasbehandlung eingesetzt werden, sollten folgende Eigenschaften aufweisen und physikalische Anforderungen erfüllen (Gebert et al., 2011):

- **Langzeitstabilität** gegenüber biologischem Abbau: Um die Gaspermeabilität und damit die Funktionstüchtigkeit methanoxidierender Systeme langfristig aufrechtzuerhalten, sollten die verwendeten Substrate durch mineralische Komponenten geprägt sein. Natürliche organische (humose) Anteile, insbesondere im oberflächennahen Bereich, sind jedoch unter den Aspekten des verbesserten Nährstoffhaushalts, eines günstigen Bodengefüges und damit der Belüftung und der Eignung als Pflanzenstandort notwendig.
- **Hohe Luftkapazität:** Die Diffusivität und damit der für die Methanoxidation notwendige Eintrag atmosphärischen Sauerstoffs hängen direkt mit dem Anteil des für den Gastransport verfügbaren, also wasserfreien Porenvolumens (Groporen > 50 µm Äquivalentdurchmesser) zusammen. Dieser sollte auch nach ergiebigeren Niederschlägen, also bei Feuchtigkeit über der Feldkapazität, hinreichend zur Oxidation der am jeweiligen Standort auftretenden Methanflüsse sein. Es ist zu beachten, dass bei gleicher Textur die Eigenschaften des Porenraums bei mechanisch beanspruchten und technisch eingebauten Böden deutlich von denen gewachsener Böden abweichen können (abhängig von der Vorgeschichte am Herkunftsort und von der gewählten Einbautechnik).
- **Nutzbare Feldkapazität:** Ist die Methanoxidationsschicht Teil der Rekultivierungsschicht oder einer Wasserhaushaltsschicht, sind die in Anhang 1 Abschnitt 2.3.1 der Deponieverordnung (DepV, 2009) aufgeführten Anforderungen zu beachten. So darf eine Rekultivierungsschicht eine Mächtigkeit von 1 m nicht unterschreiten und soll im Gesamtprofil eine nutzbare Feldkapazität (nFK) von mindestens 140 mm aufweisen. Eine Wasserhaushaltsschicht hingegen muss mindestens 1,5 m mächtig sein und eine nFK von mindestens 220 mm aufweisen. Wird ein offenes Biofilter- oder Methanoxidationsfenstersystem mit Vegetationsschicht ausgeführt, muss zu deren Wasserversorgung ebenfalls eine den jeweiligen klimatischen Bedingungen angepasste ausreichende nutzbare Feldkapazität (nFK) erhalten bleiben.



- **Geringe Verdichtungsanfälligkeit:** Beim schiebenden Einbau von Rekultivierungsböden mit schweren Kettenfahrzeugen ist eine schädliche Bodenverdichtung in der Einbaupraxis ein häufig auftretendes Problem. Eine Verdichtung vermindert insbesondere den für den Gastransport zur Verfügung stehenden Grobporenanteil (Luftkapazität) und bei lagenweisem Einbau zusätzlich die Kontinuität dieser Poren.
- **Geringe Neigung zur Rissbildung:** Setzungs- und trocknungsbedingte Risse stellen präferenzielle Fließwege dar und sind häufige Ursache hoher Deponiegasemissionen (Hot Spots). Entsprechend sind bindige Böden, die aufgrund ihres Tonanteils zur Aggregation neigen, auch aus diesem Grund zum Einsatz als Methanoxidationsschicht ungeeignet.

Unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen kommen insbesondere von der Sandfraktion dominierte Böden oder, insbesondere für Biofilter und Methanoxidationsfenster, künstliche mineralische Substrate wie z.B. Blähton in Frage.

5.3.2 Chemische Eigenschaften

Ein für die Methanoxidation günstiges Umweltmilieu sollte folgende chemische Eigenschaften aufweisen (Gebert et al., 2011):

- **Boden-pH:** 5,5-8,5 entsprechend dem pH-Optimum methanotropher Bakterien.
- Bei mineralischen Materialien: **Humusgehalt** 2 % bis 4 % zur Sicherung der Nährstoffversorgung der Vegetation und zur Verbesserung der nutzbaren Feldkapazität, ohne Verminderung der Luftkapazität.
- **Elektrische Leitfähigkeit (Salzgehalt):** < 4 mS/cm. Bei höheren Salzgehalten sinkt die methanotrophe Aktivität aufgrund der osmotischen Belastung der Mikroorganismen stark ab. Die Deponieverordnung schreibt für Rekultivierungsschichten eine Leitfähigkeit von < 0,5 mS/cm vor.
- **Ammonium:** Ammonium konkurriert mit Methan um das zentrale Enzymsystem methanotropher Mikroorganismen, der Methanmonooxygenase, und kann die Methanoxidation daher hemmen. Ammoniumhaltige Substrate sind daher zu vermeiden.



5.3.3 Organische Materialien

Häufig werden organische Materialien wie z. B. Kompost in mineralische Abdeckschichten eingearbeitet oder aber als Filterbetten für Biofilter und Methanoxidationsfenster eingesetzt. Sie zeichnen sich durch eine hohe Nährstoffversorgung und eine hohe Wasserhaltekapazität aus und besitzen aufgrund des gleichzeitig hohen Anteils an Grobporen eine geringe Wärmekapazität, isolieren also gut. Für Komposte wurden sehr hohe Methanoxidationsraten von bis zu $24 \text{ gCH}_4/\text{m}^2\cdot\text{h}$ nachgewiesen³ (Gebert et al., 2011). Nachteile ergeben sich primär aus ihrer biologischen Abbaubarkeit, wodurch es gegenüber mineralischen Materialien zu Setzungen und entsprechender Verminderung der Gaspermeabilität kommt. Die mit dem biologischen Abbau einhergehende Sauerstoffzehrung kann in Konkurrenz zum Sauerstoffbedarf methanotropher Bakterien treten. Im Technischen Leitfaden Methanoxidationsschichten des ÖVA, 2008, wird deshalb für Kompost eine Atmungsaktivität (AT_7) $< 8 \text{ mg O}_2$ pro g Trockensubstanz gefordert. Der hohe Anteil organischer Substanz begünstigt unter feuchten Bedingungen die Ausprägung anaerober Bereiche und kann damit sogar zur Bildung von Methan führen. Kompostbasierte Systeme erfordern daher eine kontinuierliche Überwachung und müssen ggf. bearbeitet (Lockerung) oder ausgetauscht werden. Für mineralische Materialien werden in der Regel geringere Methanoxidationsraten nachgewiesen, jedoch zeichnen sie sich durch eine langfristige Strukturstabilität aus und können zusätzlich Funktionen als Pflanzenstandort, Wasserhaushaltsschicht und als Fläche zur Nachnutzung erfüllen (Gebert et al., 2011).

³ 1 Mol $\text{CH}_4 = 16 \text{ g CH}_4 = 22,414 \text{ l CH}_4$ unter Normbedingungen. Die genannten Methanoxidationsraten von bis zu $24 \text{ gCH}_4/\text{m}^2\cdot\text{h}$ entsprechen demnach etwa $33,6 \text{ lCH}_4/\text{m}^2\cdot\text{h}$



5.4 Methanoxidationskapazität von Böden und MBA-Abfall

5.4.1 Literaturlauswertung

Im Folgenden werden die Methanoxidationskapazitäten unterschiedlicher Materialien bei unterschiedlichen Randbedingungen in Labor- und Feldversuchen zusammengestellt. Es werden hauptsächlich die Ergebnisse einer Literaturübersicht von Stegmann et al. (2006), des „Technischen Leitfadens Methanoxidationsschichten“ des Österreichischen Vereins für Altlastenmanagement (ÖVA, 2008) und aktueller Untersuchungen herangezogen (Tabelle 5.1 und 5.2).

Bei qualitativ hochwertig ausgeführten Methanoxidationsschichten treten kaum Restemissionen auf bzw. liegen in der gleichen Größenordnung wie Emissionsraten aus natürlichen Ökosystemen (wie Sümpfe etc.).

Tab. 5.1: Literaturangaben zur Methanoxidation in Böden und Deponieabdeckungen (Übersicht und zugehörige Literaturangaben u.a. in Stegmann et al., 2006 sowie Aktualisierungen)

Quelle	Randbedingungen	Oxidationsrate [l CH ₄ /(m ² *h)]
Czepiel et al. (1996)	Deponieabdeckung, 5°C	1,34
	Laborversuch, 21°C	5,38
Whalen et al. (1990)	Deponieabdeckung, 5°C	0,35
	Laborversuch, 30°C	1,23
Stegmann et al. (1991)	Deponieabdeckung Rekultivierungsschicht, Laborversuch	0,64
Börjesson et al. (1997)	Deponieabdeckung Laborversuch	1,61
	Deponieabdeckung Laborversuch	3,56
	Maximum bei WG 20%	6,72
Bender (1992)	Deponieabdeckung, Laborversuch, Raumtemperatur	16,8
Kightley & Nedwell (1994)	Tondichtungsschicht Laborversuch	6,35
	nährstoffreicher, grobkörniger Sand Laborversuch	9,7
Dach et al. (1996)	Deponieabdeckung	0,1 - 4,2
Croft & Emberton (1989)	sandig-toniger Deponieabdeckboden	7,2
	Laboruntersuchung	20
Hoeks (1983)	Rekultivierungsschicht	0,57 - 2,85
Figueroa (1998)	Mutterboden Rekultivierungsschicht, 20°C, Laboruntersuchung;	0,06 – 5,24
	Geschiebemergel Rekultivierungsschicht, 20°C, Laboruntersuchung	0,06 – 3,59
Hupe et. al., 2007	Versuchsfelder Kuhstedt 3 Oberflächenabdeckungen	0,2 – 4,0
Lechner et al. (2000)	mineralischer Mutterboden, 18°C Labor	ca. 3
	Gartenerde, 18°C, Labor	ca. 8
	bindiger Deponieabdeckboden, 18°C, Labor	ca. 6
Gebert und Pfeiffer, (2010)	Maximale Methanoxidationsraten an 5 Abdeckschichten von Altdeponien (BMBF-MiMethox)	2 – 135



In Feldversuchen mit optimal aufgebauter Methanoxidationsschicht konnten z.B. die Restemissionen gemittelt über das ganze Jahr und die gesamte Versuchsfläche auf $< 0,006 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\cdot\text{h}$ reduziert werden (ÖVA, 2008). Das entsprach einer Emissionsreduktion von mehr als 99% im Vergleich zu einer unabgedeckten Deponieoberfläche (Referenzfläche) am selben Standort (Huber-Humer, 2004). Die Methanemissionen aus natürlichen Ökosystemen wie aus Sümpfen, Feuchtgebieten etc. liegen in der Größenordnung von etwa $0,001 - 0,023 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\cdot\text{h}$ (ÖVA, 2008). Als Referenzgröße und Bewertungskriterium für die Funktionstüchtigkeit einer Methanoxidationsschicht kann dieser Wertebereich der Methanemissionen aus natürlichen Systemen herangezogen werden (ÖVA, 2008).

Im „Technischen Leitfaden Methanoxidationsschichten“ des (ÖVA, 2008) werden weiterhin Methanoxidationskapazitäten für „Müllkomposte“ angegeben, die hinsichtlich des TOC-Gehalts im Feststoff und der Atmungsaktivität gut mit MBA-Abfall zur Deponierung vergleichbar sind (Tabelle 5.2). Ein untersuchter MBA-Abfall wies noch eine etwas erhöhte Atmungsaktivität auf. Aus diesen Untersuchungsergebnissen ist abzuleiten, dass auch der MBA-Abfall selbst eine nennenswerte Methanoxidationskapazität aufweist. Die unteren Werte des Oxidationsgrads stellen vorwiegend die Oxidationsraten während der Adaptionphase (lag-Phase) zu Beginn der Untersuchungen dar, was auch am Median zu erkennen ist.

Tab. 5.2: Methanoxidationskapazitäten für „Müllkomposte“ gemäß „Technischem Leitfaden Methanoxidationsschichten“ (ÖVA, 2008)

Material	TOC	AT ₇	Luftporenvolumen [Vol.-%]	CH ₄ -Zufuhr [l/m ² ·h]	Oxidationsgrad	
	[%TS]	[mgO ₂ /gTS]			[%]	Median
Müllkompost 1	16,8	-	31	9,6	55 – 100	95
Müllkompost 2	14	9,8	27	10,4	13 – 100	53
Müllkompost 3	12,2	4,5	26	10,4	43 – 100	100
Müllkompost 4	14,8	6,8	32	12,5	62 – 100	98
Müllkompost 5	16,3	7,1	29	10,4	62 – 100	100
MBA-Abfall < 20 mm	17,3	15,9	19	11,7	60 – 80	71

5.4.2 Veränderungen über die Zeit, Funktionsdauer

Die Langzeitfunktion zur Methanoxidationskapazität kann gegenüber den vorgeannten Werten deutlichen Veränderungen unterliegen. Bei einer Kompostzugabe zur methanabbauenden Schicht oder im MBA-Abfall kann sich die Methanoxidationsleistung deutlich reduzieren, wenn die organischen Anteile allmählich abgebaut werden und sich das Luftporenvolumen und die Gaswegigkeit entsprechend reduzieren.

Weitere pedogene Prozesse wie Lösungs- und Ausfällungsvorgänge, Feststoffumlagerungen, eine allmähliche Verdichtung können ebenfalls die Methanoxidationskapazität beeinträchtigen.

5.4.3 Erkenntnisse des BMBF-Vorhabens „MiMethox“

Aus dem Projekt MiMethox heraus wurden von Gebert und Pfeiffer (2010) folgende Ergebnisse zusammengefasst, die größtenteils die bisher vorgestellten Ergebnisse und Schlussfolgerungen bestätigen:

- Mechanisch-biologisch behandelte Abfallteilströme sind keinesfalls inert, sondern produzieren nach der Ablagerung ebenfalls noch erhebliche Mengen an Methan. *„Es besteht damit deutlicher Handlungsbedarf, diese Emissionen sowohl aus Gründen des Klimaschutzes als auch der Sicherheit zu behandeln“.*
- In Abhängigkeit von der Exposition mit Methan bilden sich in Deponieabdeckungsschichten sehr aktive methanotrophe Populationen aus, die eine beträchtliche Methanoxidationskapazität aufweisen können (siehe Übersicht Tab. 5.1).
- Natürliche Böden sind grundsätzlich in der Lage, in Altdeponien und MBA-Deponien entstehende Methanemissionen weitgehend zu vermindern. Voraussetzung ist eine gleichmäßige Verteilung der Methanfracht in der Fläche. Werden ungeeignete Böden und Systemaufbauten gewählt, kann das Deponiegas ungleichmäßig bzw. konzentriert und ohne wesentliche Oxidation über bevorzugte Fließwege (Hot Spots) in die Atmosphäre entweichen.
- Der Gashaushalt (Gasbildung, Transport, Oxidation, Emission) wird durch den Bodentemperatur- und Bodenwasser- bzw. Lufthaushalt beeinflusst und ist

damit auch abhängig von Textur und Verdichtungsgrad. Bodengaszusammensetzung und Emissionen unterliegen einer starken saisonalen Variabilität.

5.5 Methanoxidation und Gasemissionen über bevorzugte Fließwege, Erfahrungen von MBA-Deponien

Zur Beurteilung der tatsächlichen Methanoxidation in der offenen und abgedeckten Deponieoberfläche ist von besonderer Bedeutung, inwieweit das Deponiegas die obere Abfalllage und/oder die Bodenabdeckung gleichmäßig oder auf bevorzugten Fließwegen durchströmt.

5.5.1 Erfahrungen im Rahmen des BMBF-Vorhabens MiMethox

Bei fünf Altdeponien im Rahmen des BMBF-Vorhabens MiMethox wurde auf allen untersuchten Flächen festgestellt, dass das Methan stets über kleine begrenzte Flächen (Hot Spots) und nicht über die Gesamtoberfläche entweicht. Hot Spots treten da auf, wo entweder Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche (Abdeckung) bevorzugte Austrittswege schaffen oder wo eine erhöhte Gasproduktion im Deponiekörper stattfindet. In beiden Fällen wird der diffusive Eintrag von atmosphärischem Sauerstoff eingeschränkt oder sogar verhindert.

Bodengasprofile zeigten, dass am Hot Spot hohe Methankonzentrationen über die gesamte Tiefe der Abdeckschicht auftraten, so dass dort praktisch keine Methanoxidation zu erkennen war. Weiterhin war zu erkennen, dass immer die gleichen Oberflächenbereiche erhöhte Methanemissionen aufwiesen, wobei deren Konzentration über den Jahresverlauf schwankte. In der Regel kommt es zu einer Zunahme in der kälteren Jahreszeit und einer Abnahme im Frühjahr. Neben den erläuterten Einflüssen bestimmen die aktuellen Witterungsbedingungen das Emissionsverhalten. So ist die Emission über die Oberfläche bei gefrorener Oberfläche, geschlossener Schneedecke oder nach Regenereignissen gering, während sie mit einer Abtrocknung der Oberfläche anwächst. Bei Austrocknung kommt es zu Rissbildung im Boden und einer „Schlotbildung“, was zu den Hot Spots führt. Diese Vorgänge

führen auch zu jahreszeitlichen Veränderungen des Methanoxidationshorizonts, der im Sommerhalbjahr tiefer liegt als im Winterhalbjahr (Rachor et al., 2010).

Selbst unter günstigsten Bedingungen kann eine vollständige Oxidation nur erfolgen, wenn die Abdeckschicht bezüglich Art, Mächtigkeit und Einbau sehr homogen aufgebaut ist, so dass keine Bereiche erhöhter Diffusion und Konvektion auftreten. Im Projekt MiMethox wird derzeit geprüft, inwieweit sich bestehende Abdeckungen mit Hot Spots dahingehend ertüchtigen lassen. Im technischen Leitfaden der ÖVA (2008) werden Angaben zur technischen Gestaltung einer Rekultivierungsschicht gemacht und ein Überwachungsprogramm zum Nachweis der ausreichenden Methanoxidation vorgeschlagen.

Die bisherigen Erkenntnisse weisen im Umkehrschluss darauf hin, dass es bei offenen Ablagerungsflächen kaum möglich ist, eine gleichmäßige Gasbewegung und Methanoxidation einzustellen.

5.5.2 Erfahrungen von MBA-Deponien

MBA-Deponietestfeld mit Kapillarsperre und Rekultivierungsschicht (TU Darmstadt)

Auf das MBA-Deponietestfeld des Abfallwirtschaftszentrums Rhein-Lahn Kreis (Deponie Singhofen) wurde eine Kapillarsperre als Oberflächenabdichtung aufgebracht, um u.a. die Methanoxidationsleistung dieses Abdichtungssystems zu untersuchen.

Bei einer Kapillarsperre ist sowohl die Methan- als auch die Sauerstoffversorgung grundsätzlich gegeben, so dass hier Methanoxidationsprozesse stattfinden können.

Bei der Untersuchung der Bodenfeuchtigkeit hat sich allerdings die Ausbildung eines Haftwassersaums am Übergang vom Sand (Kapillarschicht) zum Rekultivierungsboden gezeigt. Durch die größtenteils wassergefüllten Poren wurde der vertikale Deponiegasanstrom von unten in eine lateral hangaufwärts gerichtete Strömung

gezwungen, welche durch die ungesättigten und dadurch wesentlich gasgängigeren Eigenschaften der Kapillarsperre unterstützt wurden. Das Deponiegas floss so in einem präferenziellen Fließweg zum oberen Testfeldrand und entwich dort aufgrund des hohen advektiven Drucks (Bohn, 2011). An Stellen, wo die lokalen Gasaustritte erhöht sind (Hot Spots), hat die flächenbezogene Gasfracht die Methanoxidationskapazität der Abdeckschicht häufig deutlich überschritten. Abbildung 5.1 zeigt Messungen an solch einem Hotspot. Hier wurden zeitweise Emissionen von bis zu $65 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\cdot\text{h}$ beobachtet. Das Nachlassen der Methanemissionen am Hotspot im Winter 2009/10 geschah zeitgleich zu einem allgemeinen Rückgang der Deponiegasbildung im gesamten Bereich der MBA-Deponie (Lo et al., 2011).

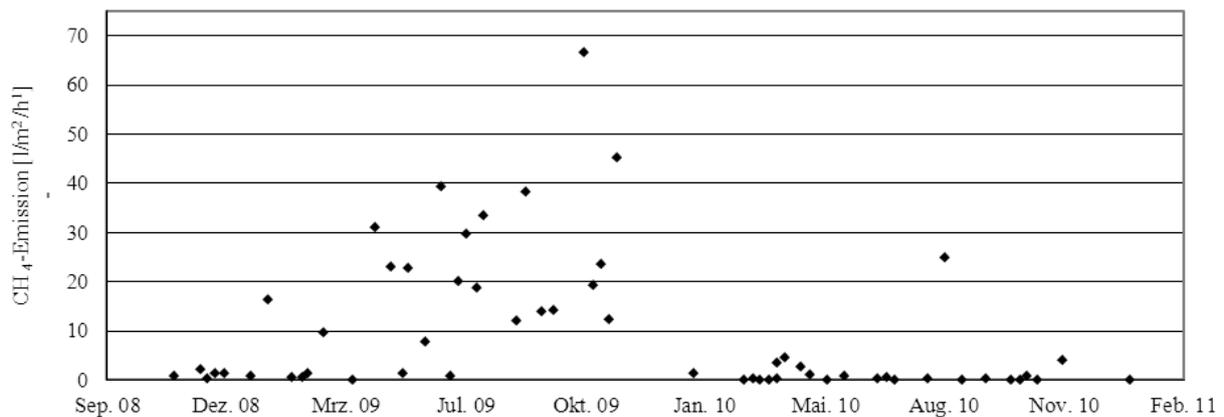


Abb. 5.1: Methanemissionen an der Oberfläche eines Hot Spots der Oberflächenabdichtung des MBA-Deponietestfelds Deponie Singhofen (Lo et al., 2011)

Abschätzungen und Plausibilitätsbetrachtungen zur Methanoxidation an den offenen Ablagerungsflächen der MBA-Deponien B - E

Direkte Untersuchungen zur Methanoxidation an den offenen Ablagerungsflächen der MBA-Deponien B - E wurden nicht durchgeführt. Mit der FID-Messung wird theoretisch die Methanemission über die Oberfläche nach der Methanoxidation bei Passieren der oberen Abfalllage bestimmt.

Die FID-Begehungen in Kap. 3.3 wurden unter folgenden Aspekten ausgewertet:

- Maximalwert
- Durchschnittlicher FID-Wert der oberen 10% aller Messwerte
- Anteil der oberen 10% aller Messwerte an den Methanemissionen
- Durchschnittlicher FID-Wert der übrigen 90% aller Messwerte
- Anteil der übrigen 90% aller Messwerte an den Methanemissionen

Die Auswertungsergebnisse sind für 5 FID-Begehungen der offenen Ablagerungsfläche im Zeitraum 2008 – 2011, d.h. nach einigen Jahren Ablagerungsbetrieb, in Tabelle 5.3 aufgetragen.

Tab. 5.3: FID-Begehungen auf den MBA-Deponien B - D, Verteilung der Methanemissionen

Beprobung	Maximalwert [ppm]	FID-Durchschnitt obere 10% [ppm]	Anteil an Gesamtemission [%]	FID-Durchschnitt übrige 90% [ppm]	Anteil an Gesamtemission [%]
MBA-Deponie B					
04/2011	1.900	140	67	7,6	33
11/2011	1.100	143	88	2,2	12
MBA-Deponie C					
09/2009	850	398	95	2,4	5
09/2010	1.900	1.560	74	61	26
MBA-Deponie D (mit aktiver Gaserfassung in Teilbereichen)					
08/2011	200	65	63	4,8	37
MBA-Deponie E					
10/2008	210	75	76	1,6	24

Die Ergebnisse der FID-Begehungen ermöglichen einige Abschätzungen und Rückschlüsse:

- Über lediglich 10% der beprobten Punkte werden etwa 63 – 95% des gesamten Methanemissionsvolumens freigesetzt, also ein überdurchschnittlich großer Anteil. Bei den meisten dieser beprobten Gasaustrittspunkte ist zu vermuten, dass dort keine nennenswerte Methanoxidation erfolgt.
- Weniger die Maximalwerte als vielmehr die Durchschnittswerte der oberen 10% aller Messwerte zeigen, dass deutliche Unterschiede zwischen den MBA-Deponien, aber auch zwischen den Messungen an einem Standort auftreten können. Der geringere Durchschnittswert der oberen 10% aller Messwerte auf der Deponie D steht ggf. im Zusammenhang mit der aktiven Gaserfassung in Teilbereichen des MBA-Abschnitts.
- Bei 4 von 5 ausgewerteten FID-Begehungen zeigen die übrigen 90% aller Messwerte eine relativ geringe durchschnittliche Konzentration von 2 – 8 ppm. Diese Werte weisen darauf hin, dass über etwa 90% der Oberfläche keine nennenswerten Methanemissionen auftreten, weil:
 - ein relativ kleiner und gleichmäßiger Methanvolumenstrom aus dem Deponiekörper in der oberen Abfalllage sehr weitgehend oxidiert wird oder
 - die Gaswegigkeit in den meisten Bereichen deutlich geringer ist als in den 10% der Fläche, in denen bevorzugte Fließwege bzw. bevorzugte Gasaustrittsflächen und damit Hot Spots vorhanden sind.
- Die in Kapitel 3.3 aus den FID-Begehungen prognostizierten Methanvolumenströme weisen im Verhältnis zur vermutlichen Gasproduktion dieser MBA-Deponien darauf hin, dass nur ein relativer kleiner Anteil des Methans per Methanoxidation abgebaut wird, bevor es die Atmosphäre erreicht. **Die Auswertung bestätigt folglich die Vermutung, dass auf nicht abgedeckten MBA-Deponien der größte Anteil des Deponiegases den Deponiekörper über bevorzugte Gasaustrittsflächen ohne nennenswerte Methanoxidation verlässt.**
- Bedingt durch den Einbaubetrieb unterliegen die MBA-Deponien stetigen Veränderungen. Daher sind einige bevorzugte Gasaustrittsstellen stets im gleichen Bereich zu finden, während sich andere im Zuge der Überschüttung verändern.

5.5.3 Schlussfolgerungen zur Wirksamkeit der biologischen Methanoxidation bei MBA-Deponien mit einer aktiven oder einer passiven Entgasung

Die Aufgabenstellung, die Wirksamkeit der biologischen Methanoxidation bei MBA-Deponien bei einer aktiven oder einer passiven Entgasung zu beschreiben, ist in den vorhergehenden Kapiteln 5.1 – 5.5 bearbeitet worden und kann mit folgenden Schlussfolgerungen zusammengefasst werden:

- Biologische Methanoxidation während der Ablagerung bei offener Ablagerungsfläche ohne aktive Gaserfassung (passive Entgasung):
Diese Situation ist derzeit bei den meisten MBA-Deponien gegeben. Bisher liegen erst wenige Betriebserfahrungen und Überwachungsergebnisse vor, die noch keine belastbaren bzw. verallgemeinerbaren Aussagen erlauben. Wie im vorherigen Kapitel erläutert, weisen die verfügbaren Ergebnisse allerdings darauf hin, dass auf nicht abgedeckten MBA-Deponien der größte Anteil des Deponiegases den Deponiekörper über bevorzugte Gasaustrittsflächen ohne nennenswerte Methanoxidation verlässt (ca. 63 – 95% des gesamten Methanemissionsvolumens).
- Biologische Methanoxidation während der Ablagerung bei offener Ablagerungsfläche mit aktiver Gaserfassung:
Diese Betriebssituation ist bei den meisten MBA-Deponien nicht gegeben. Im Zuge der Anfrage an MBA-Deponien für dieses Gutachten wurden nur von einem Standort Überwachungswerte zur Verfügung gestellt, wo in Teilbereichen eine Gaserfassung über 4 Gasbrunnen erfolgt. Von einer weiteren größeren MBA-Deponie ist bekannt, dass eine vergleichbare aktive Gaserfassung erfolgt. Bei aktiver Entgasung reduziert sich der Methanvolumenstrom theoretisch um den Anteil, der über das aktive Gasfassungssystem erfasst wird. Die Datenlage ist noch zu unsicher, um einen Gaserfassungsgrad abzuleiten. Bis auf den reduzierten verbleibenden Methanvolumenstrom ist die weitere Methanoxidation qualitativ identisch. Ein geringer Übersaugungseffekt würde den Sauerstoffeintrag aus der Atmosphäre in den Deponiekörper zum aeroben Abbau der bioverfügbaren Restorganik und zur Methanoxidation begünstigen.
- Biologische Methanoxidation in einer Rekultivierungsschicht / Oberflächenabdichtung mit / ohne aktive Gaserfassung:

Für diese Situation liegen umfangreiche Untersuchungsergebnisse von Labor- und Freilandversuchen vor, die in der Literaturlauswertung zusammenfassend aufbereitet wurden. Allerdings gibt es auch hier wenige Erfahrungen aus der betrieblichen Praxis der Abdeckung bzw. Stilllegung und Nachsorge von MBA-Deponien, insbesondere was die Methanoxidationsleistung über einen längeren Zeitraum und die möglichen Veränderungen anbetriift.

Die Untersuchungen zeigen, dass auf der einen Seite sehr weitgehende und hohe Methanoxidationsraten erreicht werden können, wenn eine entsprechend bemessene und hochwertig ausgeführte Rekultivierungsschicht aufgebracht wird. Auf der anderen Seite lassen bevorzugte Fließwege und die Ausbildung von „Hot Spots“ eine deutliche Einschränkung der Methanoxidationsfunktion einer Rekultivierungsschicht erwarten. Erste Hinweise zur Gestaltung, zur Unterhaltung und zur Überwachung liegen aus Österreich mit dem „Technischen Leitfaden Methanoxidationsschichten“ des Österreichischen Vereins für Altlastenmanagement (ÖVA, 2008) vor. Im BMBF-Verbundvorhaben „MiMethox“ werden diese Aspekte weiter bearbeitet und vertieft.

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden Werte zur Quantifizierung der biologischen Methanoxidation bei unterschiedlichen Randbedingungen abgeleitet.

5.6 Ableitung von Werten zur Quantifizierung der biologischen Methanoxidation

Gemäß IPCC Guideline 2006/2007 wird die Methanoxidation folgendermaßen in der Bilanz berücksichtigt:

$$\text{CH}_4\text{-Emission} = (\text{CH}_4\text{-Bildung} - \text{CH}_4\text{-Verwertung}) * (1-\text{OX})$$

(Anmerkung: Bei einer aktiven Gas erfassung auf einer MBA-Deponie wäre nicht von einer Verwertung, sondern eher von einer Erfassung und Behandlung auszugehen.)

Der Methanoxidationsfaktor beziffert danach den Anteil des produzierten und nicht aktiv erfassten Methans, der in der oberen MBA-Abfalllage oder der Deponieabdeckung oxidiert wird. Der Wert ist einerseits als Mittelwert zu betrachten. Da er andererseits nicht jährlich oder auf veränderte Randbedingungen angepasst werden kann, ist der Methanoxidationsfaktor OX letztlich als langjähriges Mittel der Methanoxidationsleistung aufzufassen.

Für den Methanoxidationsfaktor OX werden von der IPCC folgende Vorgabewerte gegeben:

- | | |
|----------|--|
| OX = 0 | Geordnete, ungeordnete oder unkategorisierte Deponie ohne Abdeckung mit methanoxidierendem Material |
| OX = 0,1 | Geordnete Deponie mit Abdeckung aus methanoxidierendem Material, z.B. Boden, Kompost, entsprechende Gemische |

Auf der einen Seite erscheinen diese Vorgabewerte viel zu gering, wenn die hohen Methanoxidationskapazitäten vieler Böden und Substrate im Laborversuch und teilweise bei den Freilanduntersuchungen herangezogen werden (Tab. 6.1 und 6.2).

Auf der anderen Seite sind die beeinflussenden, eher limitierenden Faktoren auf die Methanoxidation zu berücksichtigen:

- räumliche und zeitliche Belastungsspitzen
- zu hohe oder zu niedrige Feuchtegehalte, tendenziell zu niedrige Temperaturen für optimale Stoffwechselprozesse der methanotrophen Bakterien



- ungünstige Verhältnisse von Methan zu Sauerstoff, die sich im Gegenstromprinzip im Methanoxidationshorizont ausbilden
- pedogene Veränderungen der Bodenstruktur, Nachverdichtung, bevorzugte Fließwege infolge Durchwurzelung
- Alterung und Abbau der Kompostzugabe, Sauerstoffverbrauch durch aeroben Abbau der Kompostzugabe, ggf. fehlende Wartung und Ertüchtigung der Methanoxidationsschicht
- Am Bedeutendsten wird in diesem Zusammenhang die überwiegende Gasbewegung auf bevorzugten Fließwegen und der Austritt über kleinflächige Bereiche, Risse, Fehlstellen etc. betrachtet. In diesen Hot Spots, über die etwa 63 – 95% des Gesamtmethanvolumenstroms emittiert werden kann, ist nahezu keine Methanoxidation zu erwarten, weil der Methan- bzw. Deponiegasvolumenstrom in diesen Zonen nach den Praxiserfahrungen sehr viel höher ist als die Methanoxidationskapazität.⁴

Bei offenen MBA-Deponieabschnitten konnte in der Verfüllphase aufgrund der ersten Überwachungsergebnisse nicht erkannt werden, dass die Gasemission bei niedriger Gasproduktion gleichmäßiger über die Oberfläche erfolgt und dann höhere Methanoxidationsraten auftreten.

Daher wird der Methanoxidationsfaktor OX bei offenen MBA-Ablagerungen unabhängig vom Methanvolumenstrom als Abschätzung zur sicheren Seite zu 0,1 vorgeschlagen. Diese Emissionssituation sollte sich durch die Aufbringung einer Boden- oder Rekultivierungsschicht, die auch auf Methanoxidation ausgelegt wird, verbessern. Bislang fehlen allerdings noch Langzeiterfahrungen qualifizierter Bodenabdeckungen, die die langfristige Methanoxidationskapazität unter den o.g. Bedingungen und limitierenden Einflüssen belegen.

⁴ Von Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008, wurde im Gutachten „Methanemissionen aus passiv entgasten Deponien und der Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen“ angenommen, dass die Bedingungen für eine Methanoxidation für eine offene, noch nicht abgedeckte MBA-Deponie tendenziell besser sind als für eine mit Boden abgedeckte Deponie, da günstige Voraussetzungen für eine Methanoxidation unterstellt wurden. Diese Vermutung kann aufgrund der bisher aufbereiteten Überwachungsergebnisse an MBA-Deponien nicht bestätigt werden.



Nach den Ergebnissen der Literaturstudie und den Angaben im „Technischen Leitfaden Methanoxidationsschichten“ des ÖVA, 2008) wird davon ausgegangen, dass in gut ausgeführten Methanoxidationsschichten bis zu $4 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\cdot\text{h}$ vollständig oxidiert werden können. Alle bisher vorliegenden Ergebnisse und Abschätzungen weisen darauf hin, dass dieser Methanvolumenstrom über die Oberfläche bei den meisten MBA-Deponien als Durchschnittswert nicht erreicht oder überschritten wird.

Als Abschätzung zur sicheren Seite sollen für Vorschläge zu den Vorgabewerten Methanvolumenströme bis zu 50% des o.g. Wertes, also $2 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\cdot\text{h}$ und solche bis zu $4 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\cdot\text{h}$ unterschieden werden. Als weiterer Grenzwert kann der Wert von $0,5 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\cdot\text{h}$ herangezogen werden, bei dem davon auszugehen ist, dass die Methanoxidation in Relation zum geringen Methanvolumenstrom noch ausgeprägter ist und sie auch langfristig ohne größeren Unterhaltungsaufwand der Bodenschicht sehr weitgehend abläuft (Stegmann et al., 2006).

Bei abnehmenden Methanvolumenströmen werden tendenziell günstigere Methanoxidationsprozesse angenommen, weil z.B. das Verhältnis von Methan zu Sauerstoff in der Methanoxidationszone sich zunehmend zum Sauerstoff verschiebt. Ferner wird angenommen, dass sich der Anteil der Gasbewegung auf bevorzugten Fließwegen weiter reduziert bzw. dort der Anteil des oxidierten Methans (relativ zum Methanvolumenstrom „im Schlot“) ansteigt.

Dennoch wird auch bei derart qualifizierten Bodenabdeckungen auf MBA-Deponien von mehreren der o.g. limitierenden Bedingungen ausgegangen. Ferner werden weiterhin bevorzugte Fließwege unterstellt, die sich unweigerlich ausbilden werden, weil es technisch kaum möglich ist, das Deponiegas derart gleichmäßig horizontal in einer gaswegigen Ausgleichsschicht unter der Rekultivierungsschicht zu verteilen und sicherzustellen, dass es dann auch entsprechend gleichmäßig vertikal in die Rekultivierungsschicht eindringt.

Daher werden in Analogie zum Vorgehen von Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008, die Werte als Abschätzung zur sicheren Seite herangezogen, die sich aus dem o.g. Leitfaden aus Österreich, den bisherigen Ergebnissen im MiMethox-Vorhaben und der Literatur ableiten lassen. Dabei wird für MBA-Deponien von qualifiziert ausge-

legten und technisch ausgeführten Bodenschichten zur Methanoxidation ausgegangen, die regelmäßig gewartet und repariert werden und auf denen entsprechende Überwachungsmaßnahmen durchgeführt werden, um die Funktion nachzuweisen und eventuelle Schadstellen schnell zu erkennen und zu reparieren (Vorschläge dazu siehe Leitfaden der ÖVA). Mit dieser Abschätzung zur sicheren Seite werden auch die kritischen Bereiche wie vertikale Einbauten und Durchdringungen der Oberflächenabdichtung, Hangbereiche, Böschungskanten oder der Anschluss der Drainageschicht unter der Rekultivierungsschicht an die Abführung des Drainagewassers berücksichtigt. Die „System-Methanoxidationskapazität“ ist folglich deutlich geringer als die „Material-Methanoxidationskapazität“.

Die aus diesen Betrachtungen abgeleiteten Vorschlagswerte zur „System-Methanoxidationskapazität“ sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Dabei wird davon ausgegangen, dass keine aktive Gaserfassung erfolgt. Ferner wird der Unsicherheitsbereich abgeschätzt.

Tab. 5.4: Vorschläge für Vorgabewerte des Methanoxidationsfaktors OX in Abhängigkeit des emittierten Methanvolumenstroms und der Abdeckungssituation von MBA-Deponien

Deponiephase / Abdeckungssituation	OX bei durchschnittlicher Flächenbelastung < 4 l CH ₄ /m ² *h [-]	OX bei durchschnittlicher Flächenbelastung < 2 l CH ₄ /m ² *h [-]	OX bei durchschnittlicher Flächenbelastung < 0,5 l CH ₄ /m ² *h [-]
Ablagerungsphase offene Ablagerungsfläche	0,1 ± 0,1	0,1* ± 0,1	0,2* ± 0,1
Ablagerungs-/Stilllegungsphase temporäre Abdeckung mit humosem Boden**	0,15 ± 0,1	0,3 ± 0,2	0,45 ± 0,2
Stilllegungs-/Nachsorgephase technisch optimierte Methan- oxidationsschicht mit Monitoring und Wartung/Reparaturen	0,6 ± 0,2	0,7 ± 0,2	0,75 ± 0,2

* vorläufige Annahmewerte, vorbehaltlich weiterer Ergebnisse und Auswertungen von Überwachungsmaßnahmen an MBA-Deponien

** in Anlehnung an Vorschlag von Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008



6 Prüfung des First Order Decay Modells

6.1 Darstellung und Erläuterung des First Order Decay Modells

Grundlage der Aufbereitung und Diskussion des First Order Decay (FOD) Modells im Hinblick auf die Abschätzung von Methanemissionen aus MBA-Deponien bilden die IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories:

- IPCC, 2006: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 1, General Guidance and Reporting, Chapter 3 – Uncertainties
- IPCC, 2006: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5, Waste, Chapter 3 – Solid Waste Disposal

Im Folgenden sollen einige wesentliche Grundlagen des Volume 5, Chapter 3 – Solid Waste Disposal, aufgegriffen werden, um daraufhin die Methodik im Hinblick auf die Abschätzung der Methanemissionen von MBA-Deponien zu erläutern und anzupassen. Abschließend werden die grundsätzlichen und derzeit noch bestehenden Unsicherheiten diskutiert.

Die IPCC Methodik zur Abschätzung von Methanemissionen⁵ von Deponien basiert auf einem Ansatz 1. Ordnung, dem First Order Decay (FOD) Modell.

Es gibt drei Rangstufen („Tier 1 – Tier 3“), mit der die Qualität der Abschätzung eingeordnet wird. Das Fachgutachten wurde so angelegt, dass zukünftig die höchste Rangstufe (Tier 3) erreicht werden kann, wenn noch mehr Überwachungsergebnisse von MBA-Deponien vorliegen. Tier 3 basiert

- auf einer guten Qualität landesspezifischer Daten z.B. zu den abgelagerten Abfallmengen (siehe Angaben des Statistischen Bundesamts und der Fachliteratur in Kap. 2)
- auf der Anwendung des FOD-Ansatzes mit landesspezifisch abgeleiteten Schlüsselparametern, die auf Messungen und daraus abgeleiteten Abschätzungen aufbauen (z.B. differenzierte Gasbildungspotenziale des abzulagernden MBA-Abfalls, Halbwertzeiten und Methanoxidationsraten, Kap. 3 - 5)

⁵ Die Kohlenstoffdioxidanteile im Deponiegas werden nicht berücksichtigt, da sie aus dem biologischen Abbau der biogenen Organik stammen und damit als klimaneutral eingestuft werden.



Die Methanemissionen eines Jahres infolge anaerober Abbauprozesse bei der Deponierung können nach Gleichung 6.1 abgeschätzt werden (IPCC, 2006, Kap. 3.2.1.1):

$$\text{CH}_4\text{-Emissionen} = (\sum \text{CH}_4 \text{ gebildet}_{x,T} - R_T) * (1 - \text{OX}_T) \quad (\text{Gl. 6.1})$$

mit:

CH ₄ -Emissionen	emittiertes Methan im Jahr T [Mg oder Gg]
T	Inventarjahr
x	Abfallkategorie bzw. hier MBA-Abfall
R _T	gefasstes Methan im Jahr T [Mg oder Gg]
OX _T	Oxidationsfaktor im Jahr T [-]

Die Methanemission resultiert aus dem anaeroben Abbau der organischen bioverfügbaren Abfallbestandteile. Ein Teil des gebildeten Methans kann per Methanoxidation abgebaut oder kontrolliert gefasst werden.

Das Methanbildungspotenzial kann nach IPCC aus dem bioverfügbaren organischen Anteilen (DDOC_m) abgeleitet werden. Für den MBA-Abfall wurde es in diesem Fachgutachten direkt aus den Überwachungswerten des MBA-Teilstroms, der nach der biologischen Behandlung deponiert wird, in Verbindung mit wissenschaftlichen Untersuchungen abgeleitet, insbesondere über die Parameter Atmungsaktivität AT₄ und Gasbildungsrate GB₂₁ (Kap. 3). Das Methanbildungspotenzial L₀ steht nach dem IPCC-Ansatz mit dem bioverfügbaren organischen Kohlenstoffanteil in folgendem Verhältnis (Gleichung 6.2):

$$L_0 = \text{DDOC}_m * F * 16/12 \quad (\text{Gl. 6.2})$$

mit:

L ₀	Methanbildungspotenzial [Mg oder Gg CH ₄]
DDOC _m	Masse des biologisch abbaubaren Kohlenstoffs [Mg oder Gg]
F	Methananteil im Deponiegas (Volumenanteil)
16/12	Verhältnis Molekulargewicht CH ₄ /C [-]



Die Abnahme der Masse des biologisch abbaubaren Kohlenstoffs wird unter anaeroben Bedingungen in der Deponie nach einem Ansatz 1. Ordnung abgeschätzt (Gleichung 6.3):

$$\text{DDOC}_m = \text{DDOC}_{m_0} \cdot e^{-k \cdot t} \quad (\text{Gl. 6.3})$$

mit:

DDOC _m	Masse des biologisch abbaubaren Kohlenstoffs, der unter anaeroben Bedingungen über die Zeit t abgebaut wird [Mg oder Gg]
DDOC _{m₀}	Deponierte Ausgangsmasse des biologisch abbaubaren Kohlenstoffs zur Zeit 0, wenn die Abbauprozesse beginnen [Mg oder Gg]
k	Abbaukonstante = ln2/H [1/a]
H	Halbwertszeit
t	Zeit [a]

Beim biologisch abbaubaren Kohlenstoff ist zu beachten, dass ein Teil des abgelagerten Abfalls anfänglich oder oberflächennah auch länger aerob abgebaut werden kann. Dieses wird in der IPCC-Methodik mit dem „Methane Correction Factor“ (MCF) berücksichtigt. Ferner ist der Zeitversatz zwischen der Ablagerung und dem Zeitpunkt des Einsetzens intensiver anaerober Abbauprozesse zu berücksichtigen („time delay“).

Das *IPCC Waste Model* erlaubt zwei Vorgehensweisen zur Abschätzung der Methanemissionen:

- Das Einphasenmodell, wo nur eine Abfallart mit Kennwerten festgelegt wird.
- Das Multi-Phasenmodell, wo unterschiedliche Abfallfraktionen berücksichtigt werden.

Für den MBA-Abfall wurde in Kapitel 4.4 das Multiphasenmodell gewählt, um mit der Unterteilung in leicht, mittel und schwer abbaubare bzw. verfügbare organische Anteile mit den entsprechend abgeleiteten Halbwertszeiten sowohl die Methanemissionen von Deponien realitätsnah zu beschreiben als auch im Sinne der IPCC-Vorgaben sicherzustellen, dass die Emissionen nicht unterschätzt werden.



6.2 Prüfung und Anpassung des First Order Decay (FOD) Modells zu Methanemissionen von MBA-Deponien

Die Prüfung des First Order Decay (FOD) Modells vor dem Hintergrund der Überwachungsergebnisse zum Gashaushalt von Deponien und wissenschaftlichen Untersuchungen zeigt, dass es keine Veranlassung gibt, grundsätzlich von einem Ansatz 1. Ordnung abzuweichen.⁶ Es stellt sich eher die Frage, inwieweit die IPCC-Vorgaben und die „Default“-Werte mit den Ergebnissen der Auswertung für die Deponierung von MBA-Abfällen angepasst bzw. erweitert werden können, um die Methanemissionen von MBA-Deponien realitätsnah abzuschätzen.

Die wesentlichen IPCC-Vorgaben und diesbezüglichen Ergebnisse des Fachgutachtens werden hier nochmals zusammenfassend aufgegriffen.

6.2.1 Daten zu abgelagerten Abfallmengen

Daten zur Abfallentstehung und zu den abgelagerten Abfallmengen werden als „activity data“ bezeichnet (IPCC, 2006, Kap. 3.2.2). In Kapitel 2 wurden Angaben zu MBA-Behandlungskapazitäten, zu den jährlich behandelten Abfallmengen und zum deponierten Teilstrom sowohl aus der Fachliteratur als auch vom Statistischen Bundesamt zusammengestellt. Danach ist von einer guten Qualität der Eingangsdaten für die Abschätzung auszugehen. Die derzeit abgelagerten MBA-Abfallteilströme zur Deponierung liegen in Deutschland bei etwa 1 Mio. Mg Feuchtmasse, was ca. 0,7 Mio. Mg Trockenmasse entspricht.

⁶ Untersuchungen zur langfristigen Deponiegasbildung mechanisch-biologisch behandelter Abfälle an der BOKU Wien haben dort zu dem Schluss geführt, dass mit dem Exponentialansatz das Gasbildungspotenzial in Deponien geringfügig, aber systematisch unterschätzt wird (Tintner et al., 2011). Langfristig erfolgt eine geringe Restgasbildung, die mit einem Exponentialansatz nicht adäquat abgebildet wird, sondern eher mit einer so genannten Log-Normal Verteilung. Mit dem Log-Normal Modell werden etwa 10 – 15% höhere Restgaspotenziale abgeschätzt. Als Grund wird genannt, dass der einfache Ansatz erster Ordnung die vielschichtigen Reaktionen und Transportprozesse in der Abfallmatrix des Deponiekörpers nicht hinreichend genau wiedergibt.

Diesem Sachverhalt ist in Kapitel 4.4 insoweit Rechnung getragen worden, als dass mit dem Dreiphasenmodell eine langfristige Restgasproduktion aus mittel und schwer abbaubaren organischen Anteilen mit hohen Halbwertzeiten berücksichtigt wird. Daher ist die Abweichung zu einem Log-Normal Modell sehr gering, so dass auch aus pragmatischen Gründen die IPCC-Methodik mit dem exponentiellen Ansatz als Dreiphasenmodell beibehalten werden kann.



6.2.2 Emissionsfaktoren

Die Auswahl und Festlegung der Emissionsfaktoren beziehen sich gemäß IPCC auf (IPCC, 2006, Kap. 3.2.3):

- Bioverfügbare organischer Kohlenstoff (DOC) und Anteil der unter Deponiebedingungen abbaubaren Fraktion (DOC_f), alternativ Methanbildungspotenzial (L_0)
- „Methane Correction Factor“ (MCF), um den Anteil aerob abgebauten Kohlenstoffs zu quantifizieren
- Methananteil im produzierten Deponiegas (F)
- Oxidationsfaktoren (OX)
- Halbwertzeiten ($t_{1/2}$ oder H)
- Anteil des gefassten Methans (R) über ein technisches Gaserfassungssystem
- Verzögerungszeit (Zeitintervall von der Ablagerung bis zum Einsetzen intensiver anaerober Abbauprozesse)

Bioverfügbare organischer Kohlenstoff (DOC), Methanbildungspotenzial (L_0)

Im Fachgutachten wurde aufgrund der wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, der Anforderungswerte gemäß Deponieverordnung und der Überwachungsergebnisse von MBA-Deponien hauptsächlich das Methanbildungspotenzial (L_0) betrachtet. Es kann unter durchschnittlichen Bedingungen zu $L_0 = 18 - 24 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{MgTS}$ abgeschätzt werden. Im Kapitel 3 wurde erläutert, welche Faktoren das Methanbildungspotenzial beeinflussen, u.a. der Anteil der bioverfügbaren Organik, deren unterschiedliche Abbaubarkeit, der Wassergehalt bei der Deponierung und der Wasserhaushalt im Deponiekörper, Temperaturbedingungen etc. Die verfügbaren Daten und daraus abgeleiteten Eingangparameter sind im Sinne der IPCC-Kriterien als ausreichend bis gut zu bezeichnen. Die Qualität und „Repräsentativität“ der abgeleiteten Emissionsfaktoren wird zukünftig noch ansteigen, wenn weitere Überwachungsergebnisse zum Gashaushalt von MBA-Deponien vorliegen.

Abweichend von den IPCC-Guidelines werden der bioverfügbare Kohlenstoff und das Methanbildungspotenzial im Fachgutachten wie in Deutschland üblich stets auf die Trockenmasse bezogen. Damit wird die Unsicherheit infolge unterschiedlicher Wassergehalte vermieden.



„Methane Correction Factor“ (MCF)

Mit dem „Methane Correction Factor“ (MCF) wird der Anteil des oberflächennah aerob abgebauten Kohlenstoffs abgeschätzt. MBA-Deponien verfügen im Verfüllungsbetrieb häufig über eine größere offene Ablagerungsfläche und werden erst nach Abschluss der Verfüllung abgedeckt. Die Schüttgeschwindigkeit bzw. Ablagerungsmächtigkeit, resultierend aus relativ geringen Ablagerungsmengen im Verhältnis zur Deponiefläche, ist häufig eher gering, so dass auch darüber ein längerer Gasaustausch über die Oberfläche mit der Atmosphäre besteht. Andererseits sollte der verdichtete Einbau den Sauerstoffeintrag in die oberflächennahen Abfalllagen begrenzen.

Von der IPCC werden je nach Deponiekubatur und Betriebsführung Korrekturfaktoren von 0,4 bis 1 (d.h. aerober Abbau von 0 – 60% der bioverfügbaren Organik) genannt. Für deutsche MBA-Deponien wird aufgrund der bisher vorliegenden Ergebnisse als Abschätzung zur sicheren Seite ein Bereich von $MCF = 0,8 - 1$ (d.h. aerober Abbau von 0 – 20% der bioverfügbaren Organik bzw. Reduzierung von L_0) vorgeschlagen.

Methananteil im produzierten Deponiegas (F)

Die Auswertungen haben gezeigt, dass der Methananteil im produzierten Deponiegas u.a. von der Intensität der anaeroben Abbauprozesse und dem Gasaustausch mit der Atmosphäre abhängt. Die gemessenen Methankonzentrationen liegen häufig im Bereich von 40 – 70 Vol.-%. Von der IPCC wird als Vorgabewert 50 Vol.-% genannt. Aufgrund der Ergebnisse in Kap. 3 und als Abschätzung zur sicheren Seite wird für MBA-Deponien ein Methananteil von 60 Vol.-% vorgeschlagen, zumal laut IPCC weitere Einflüsse wie z.B. die höhere Wasserlöslichkeit von CO_2 nicht in diesen Wert mit einfließen sollten. Auch dieser Annahmewert kann noch konkretisiert werden, wenn weitere Überwachungsergebnisse von MBA-Deponien vorliegen.

Oxidationsfaktoren (OX)

Die Oxidationsfaktoren wurden auf der Grundlage einer Übersicht zum aktuellen Stand des Wissens zur Methanoxidation und erster Überwachungsergebnisse von MBA-Deponien abgeleitet. Die IPCC-Vorgaben berücksichtigen nur eine sehr geringe Oxidationsrate im Bereich von 0 – 0,1. Wie die Auswertungen in Kapitel 5 gezeigt haben, sind deutlich größere Methanoxidationsraten möglich, wenn der Methanvolumenstrom abnimmt und insbesondere die Ausbildung bevorzugter Fließwege (Hot Spots) durch die Ausbildung technisch hochwertiger Methanoxidationsschichten deutlich reduziert wird.

Unter diesen Voraussetzungen wurden in Tabelle 5.4 Methanoxidationsfaktoren OX für offene MBA-Deponien, einfache temporäre Bodenabdeckungen und hochwertige, zur Methanoxidation ausgelegte Rekultivierungsschichten abgeleitet. Die ebenfalls ausgewiesenen Schwankungsbereiche weisen darauf hin, dass noch größere Unsicherheiten bestehen, so dass die Methanoxidationsfaktoren mit weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen und Überwachungsergebnissen von MBA-Deponien weiter abgesichert und konkretisiert werden sollten.

Halbwertzeiten ($t_{1/2}$ bzw. H)

Von der IPCC wurden differenzierte Vorgabewerte zur Quantifizierung der Halbwertzeit zusammengestellt. Sie berücksichtigen die biologische Abbaubarkeit der organischen Bestandteile und die wesentlichen klimaabhängigen Milieubedingungen wie Niederschläge, Verdunstung und Temperaturen.

Die Auswertungen und Abschätzungen zur Halbwertzeit in Kapitel 4 haben gezeigt, dass auch bei dem zu deponierenden MBA-Abfallteilstrom nach der unterschiedlichen biologischen Verfügbarkeit differenziert werden sollte. Ein nennenswerter Anteil leicht verfügbarer Organik scheint mit einer relativ kurzen Halbwertzeit abgebaut zu werden, während ein kleinerer Anteil mit anwachsenden Halbwertzeiten zu einer langfristigen Restgasproduktion führt.

Vor diesem Hintergrund wurden für MBA-Deponien Halbwertzeiten vorgeschlagen, die mit denen der IPCC-Guidelines für gemäßigte Breiten und humides Klima vergleichbar sind (Tabelle 6.1). Die Bandbreiten bei den MBA-Deponien berücksichtigen nicht nur die bestehenden Unsicherheiten, sondern auch den Umstand, dass die MBA-Abfälle noch unterschiedliche Ablagerungsqualitäten aufweisen können und auch die klimatischen Rahmenbedingungen in Deutschland regional verschieden sind. Nicht zuletzt kann die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung zu Austrocknungsprozessen im Deponiekörper führen, was die biologischen Abbauprozesse limitiert und so zu einem Anwachsen der Halbwertzeiten beiträgt.

Tab. 6.1: Vorschläge zu Mittelwerten und Bandbreiten für Halbwertzeiten für unterschiedlich bioverfügbare Anteile des MBA-Teilstroms zur Deponierung, Vergleich mit IPCC-Vorgabewerten

Biologische Verfügbarkeit / Abbaubarkeit	Halbwertzeit MBA-Deponien [a]	Halbwertzeit IPCC-Vorgaben* [a]
Leicht abbaubar bzw. gut verfügbar	3 2 - 5	4 3 – 6
Mittel abbaubar	10 5 - 15	7 6 – 9
Schwer abbaubar	25 15 - 35	12 10 - 14
Sehr schwer abbaubar		23 17 - 35

* IPCC Guidelines: Halbwertzeiten für gemäßigte Breiten und humides Klima (IPCC, 2006, Kap. 3.2.3, Table 3.4)

Anteil des gefassten Methans (R)

Die IPCC-Guidelines geben als Default-Wert zur Methanerfassungsrate $R = 0\%$ vor. Nur wenn Gaserfassungssysteme bestehen und Ergebnisse zur Deponiegaserfassung vorliegen, kann der Wert heraufgesetzt werden, wofür für herkömmliche Siedlungsabfalldeponien ein Default-Wert von 20% in einer Bandbreite von 10 - 85% genannt wird.

Bei den meisten MBA-Deponien in Deutschland erfolgt derzeit keine aktive Gaserfassung und Beseitigung/Verwertung. Bei einigen MBA-Deponien wird über Gasbrunnen ein Teil des produzierten Deponiegases erfasst, sofern der MBA-Abfall auf einen bestehenden älteren Deponieabschnitt, wo vorher unvorbehandelte Siedlungsabfälle abgelagert wurden, aufgebracht wird. Die bisher verfügbaren Ergebnisse erlauben noch keinen Rückschluss auf den Gaserfassungsgrad, so dass als Abschätzung zur sicheren Seite der Methanerfassungsgrad R aller deutschen MBA-Deponien bis auf Weiteres bei 0% belassen werden kann.

Verzögerungszeit

Mit der Verzögerungszeit („Delay time“ oder Lagphase) wird das Zeitintervall von der Ablagerung bis zum Einsetzen intensiver anaerober Abbauprozesse quantifiziert. Es wird von der IPCC mit sechs Monaten und einer Schwankungsbreite von mindestens 2 Monaten angegeben.

Durch die biologische Vorbehandlung und die Ergebnisse zum Gashaushalt von MBA-Deponien ist davon auszugehen, dass schon kurz nach der Ablagerung und dem Abklingen oberflächennaher aerober Abbauprozesse wieder anaerobe Abbauprozesse einsetzen. Daher wird für MBA-Deponien eine Verzögerungszeit von 6 – 12 Monaten vorgeschlagen. Auch bei diesem durchschnittlichen Vorgabewert besteht noch eine gewisse Unsicherheit, die sich allerdings nur geringfügig auf die Höhe der abgeschätzten Methanemissionen auswirkt.

6.3 Beurteilung der Unsicherheiten

Nach den IPCC-Guidelines sind zur Beurteilung der Unsicherheiten bei der Abschätzung von Methanemissionen zwei Bereiche anzusprechen:

- die Methodik des FOD-Ansatzes
- die Eingangsdaten (Abfallmassen und Emissionsparameter)

Die Unsicherheiten beider Bereiche wurden in den vorangegangenen Kapiteln bereits angesprochen und soweit wie möglich quantifiziert.

Weitere Aspekte zur Unsicherheit der FOD-Methodik können sein:

- Letztlich laufen in einem Deponiekörper sehr unterschiedliche chemische, physikalische und biologische Prozesse ab, die mit dem FOD-Ansatz nur vereinfacht wiedergegeben werden. So können sich z.B. Austrocknungsvorgänge oder auch Hemmungen durch Inhibitoren auf die Mikroorganismen und die Kinetik der biologischen Abbauprozesse auswirken.
- Weiterhin sind unterschiedliche Abbaubedingungen über die Deponiehöhe zu erwarten, weil es auflastbedingt zu einer zunehmenden Verdichtung im unteren Deponiebereich kommt. Es werden jedoch nur durchschnittliche Mittelwerte über die Höhe für alle MBA-Deponien unabhängig von ihrer Ablagerungsmächtigkeit und Schüttgeschwindigkeit abgeleitet.

Die größeren Unsicherheiten gegenüber der Methodik sind jedoch eher über die Auswahl der Eingangsparameter zu erwarten, wie es bei der Auswertung der verfügbaren Ergebnisse insbesondere von MBA-Deponien deutlich wurde. So tendiert das Deponiegasbildungspotenzial von 30 – 40 m³/MgTS als durchschnittlicher Bereich eher zur sicheren Seite. Ggf. kann er zukünftig um mehr als 20%, d.h. deutlich nach unten korrigiert werden, wenn weitere Überwachungsergebnisse von MBA-Deponien oder von MBA-Anlagen vorliegen, deren Teilstrom zur Deponierung von vornherein eine deutlich geringere Gasbildungsrate (GB₂₁) aufweist. In Tabelle 6.2 sind diese Unsicherheiten zusammenfassend aufgeführt.

Tab. 6.2: Beurteilung der Unsicherheiten der Eingangsdaten zur Abschätzung der Methanemissionen MBA-Deponien vor dem Hintergrund der IPCC Angaben (IPCC, 2006)

Eingangsdaten	IPCC- Angaben zu Unsicherheiten*	MBA-Deponien in Deutschland
Ablagerungsmassen (mit biologisch verfügbarem Anteil)	± 10% für Länder mit Daten hoher Qualität	Für MBA-Deponien gegeben (Angaben Statistisches Bundesamt, Überwachungswerte)
Methanbildungspotenzial L_0 (analog zu Anteil des biologisch verfügbaren Kohlenstoffs)	± 20% als Default-Wert ± 10 % für Länder mit Messergebnissen über einen längeren Zeitraum	+ 20% als Default-Wert derzeit akzeptabel, bis -40% bei Vorliegen weiterer Ergebnisse. Anschließend ± 10 % bei Auswertung weiterer Überwachungsergebnisse von MBA-Deponien über einen längeren Zeitraum möglich
Methane Correction Factor MCF 1,0 0,8	Für IPCC-Default-Werte: - 10%, + 0% ± 20%	IPCC-Angaben können übernommen werden (siehe Kap. 6.2)
Anteil Methan im Deponiegas $F = 0,5$	Für IPCC-Default-Wert: ± 5%	$F = 0,6$ + 5%, - 10%
Methan-/Deponiegas-erfassungsrate R $R = 0$ $R > 0$	- ± 10% bei messtechnischer Überwachung ± 50% ohne messtechnische Überwachung	$R = 0$ bei den meisten MBA-Deponien Bei $R > 0$ (einige MBA-Deponien) Gaserfassungsgrad und Unsicherheitsbereich noch nicht quantifizierbar
Oxidationsfaktor OX	Abschätzung zur Unsicherheit erforderlich, wenn $OX > 0$	Faktoren OX und Unsicherheitsbereiche gemäß Tab. 5.4
Halbwertszeit $t_{1/2}$ bzw. H	Unsicherheitsbereiche gemäß Vol. 5, Chapter 3, Table 3.4	Unsicherheiten bzw. Bandbreiten gemäß Tabelle 6.1, weitgehend vergleichbar zu IPCC-Angaben
Verzögerungszeit (Lagphase)	6 Monate ± 2 Monate	9 Monate ± 3 Monate

* IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5, Chapter 3, Table 3.5, 2006



6.4 Fazit zum FOD-Ansatz bei MBA-Deponien und zu den Eingangswerten

Das FOD-Modell beruht auf wissenschaftlich-fachlichen Grundlagen, da mit einem exponentiellen Ansatz 1. Ordnung mikrobielle Abbauprozesse wie der anaerobe Abbau unter Deponiebedingungen beschrieben werden können. Von daher haben auch die Auswertungen zum Gashaushalt von MBA-Deponien keinen Anlass gegeben, das FOD-Modell grundsätzlich in Frage zu stellen. Es ging vielmehr darum, aufgrund der Mess- und Überwachungsergebnisse eine Validierung und damit Anpassung des Modells auf das Emissionsverhalten von MBA-Deponien vorzunehmen. Mit diesem Fachgutachten soll dokumentiert werden, auf welcher Grundlage die landesspezifischen Eingabewerte für MBA-Deponien abgeleitet wurden.

Die bisher verfügbaren Ergebnisse zum Gashaushalt von MBA-Deponien reichen noch nicht aus, um über qualifizierte statistische Auswertungen wie Regressionsrechnungen die Repräsentativität der abgeleiteten Eingangswerte weiter abzusichern. Dieses wäre folglich eine zukünftige Aufgabe, wenn weitere Ergebnisse von MBA-Deponien zur Verfügung stehen.

Trotz dieser Einschränkungen und Unsicherheiten können die erhobenen und abgeleiteten Daten im Sinne der IPCC-Guidelines als recht umfassend und vollständig eingestuft werden, um die Methanemissionen von MBA-Deponien abzuschätzen. Sie können nun fortlaufend mit den jährlichen Ablagerungsmassen (u.a. Angaben des Statistischen Bundesamts) und den weiteren Überwachungsergebnissen von MBA-Deponien aktualisiert werden (siehe auch IPCC, 2006, Kap. 3.5 und 3.6).

7 Abschätzung zu Methanemissionen aus MBA-Deponien

7.1 Gasprognoserechnungen, Vorgaben und Annahmewerte

Auf der Grundlage der Auswertung zum Methanbildungspotenzial von MBA-Abfällen, den Halbwertzeiten, der Methanoxidation, den deponietechnischen Randbedingungen etc. sollen abschließend betrachtet werden:

- Methanemissionen und entsprechend resultierende Belastung der Atmosphäre mit Kohlenstoffdioxidäquivalenten für einen (fiktiven) MBA-Deponieabschnitt in der Verfüll-, Stilllegungs- und Nachsorgephase
- Derzeitige Gesamtemissionen an Kohlenstoffdioxidäquivalenten aller MBA-Deponien in Deutschland

Es handelt sich dabei um vorläufige Abschätzungen zur sicheren Seite, die bei Vorliegen und Auswertung weiterer Überwachungsergebnisse von MBA-Deponien, genaueren Eingangsdaten zu den abgelagerten Massen, neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen etc. entsprechend angepasst werden können.

Annahmen zur Deponiegasbildung:

- Gesamtgasbildungspotenzial (L_0) von $40 \text{ m}^3/\text{MgTS}$, Gasbildung mit differenzierten Halbwertzeiten abgeleitet aus der Auswertung (Dreiphasenmodell):
 - 60% des Gaspotenzials wird mit einer Halbwertzeit von 3 Jahren gebildet
 - 20% des Gaspotenzials wird mit einer Halbwertzeit von 10 Jahren gebildet
 - 20% des Gaspotenzials wird mit einer Halbwertzeit von 25 Jahren gebildet
- Anteil Methan im produzierten Deponiegas (F): 60 Vol.-%, d.h. in $40 \text{ m}^3/\text{MgTS}$ Deponiegas sind $24 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{MgTS}$ bzw. $17,14 \text{ kgCH}_4/\text{MgTS}$ enthalten.
- Als ein Szenario wird zudem betrachtet, welche Auswirkungen aerobe Abbauprozesse in der Verfüllphase an der offenen MBA-Ablagerungsfläche auf das Gasbildungspotenzial und die resultierenden Emissionen haben können. Dazu wird davon ausgegangen, dass je nach Einbautechnik (Schüttgeschwindigkeit, Verdichtungsgrad) noch bis zu 20% der bioverfügbaren Organik aerob umgesetzt werden können (MCF = 0,2).

Randbedingungen für einen MBA-Deponieabschnitt:

- Ablagerungsfläche des Deponieabschnitts 2 ha (Kubatur quaderförmig)
- Ablagerung von 20.000 MgTS/a im Zeitraum 2005 – 2020, d.h. insgesamt 300.000 MgTS
- Ablagerungstrockendichte 0,8 Mg/m³, d.h. mittlere Schüttgeschwindigkeit 1,25 m/a
- Keine aktive Gaserfassung (R = 0)

Randbedingungen für alle MBA-Deponien in Deutschland:

- Jährliche Ablagerungsmasse ca. 1.000.000 Mg Feuchtmasse FM mit einem durchschnittlichen Einbauwassergehalt von 30%, d.h. ca. 700.000 Mg Trockenmasse TS (gemäß Angaben in Kap. 2.3)
- Derzeit alle MBA-Deponien noch in der Verfüllphase, nahezu alle ohne aktive Gaserfassung und mit offener Einbaufläche als Annahme zur sicheren Seite (R = 0)

Annahmen zu Methanoxidationsraten OX:

Es wird davon ausgegangen, dass ein Deponieabschnitt gleichmäßig verfüllt und anschließend sofort mit einer endgültigen Oberflächenabdichtung, die auch zur Methanoxidation ausgelegt wird, versehen wird.

Tab. 7.1: Annahmen zum Methanoxidationsfaktor OX in Abhängigkeit des emittierten Methanvolumenstroms und der Abdeckungssituation

Deponiephase / Abdeckungssituation	OX bei durchschnittlicher Flächenbelastung < 4 l CH ₄ /m ² *h [-]	OX bei durchschnittlicher Flächenbelastung < 2 l CH ₄ /m ² *h [-]	OX bei durchschnittlicher Flächenbelastung < 0,5 l CH ₄ /m ² *h [-]
Ablagerungsphase offene Ablagerungsfläche	0,1	0,1	0,2
Stilllegungs-/Nachsorgephase technisch optimierte Methanoxidationsschicht mit Monitoring und Reparaturen	0,6	0,7	0,75

Umrechnungsfaktor von Methan zu Kohlenstoffdioxidäquivalenten: 25

Die Gasprognoserechnung erfolgt als Ansatz 1. Ordnung wie in Kap. 3.3 und Kap. 6 erläutert.



7.2 Abschätzung und Beurteilung der Methanemissionen eines MBA-Deponieabschnitts

Unter den Annahmen und Vorgabewerten gemäß Kap. 7.1 ergeben sich eine Gasproduktion und, nach Abminderung durch die Methanoxidation, resultierende Emissionen in die Atmosphäre wie in Abbildung 7.1 aufgetragen.

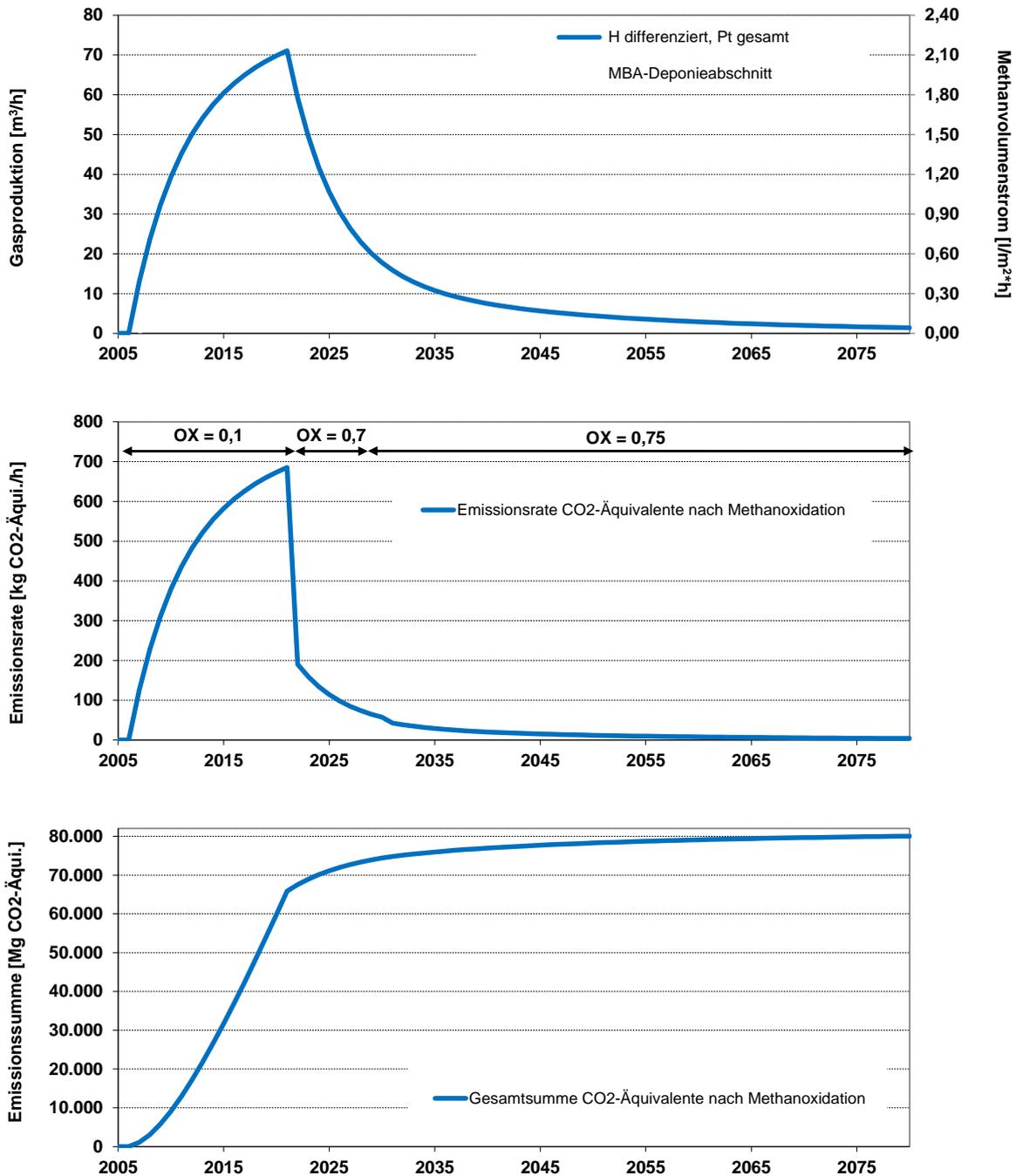


Abb. 7.1: Deponiegasproduktion und verbleibende Methanemissionen in die Atmosphäre in Kohlenstoffdioxidäquivalenten nach Methanoxidation



Die Abschätzung zeigt, dass die wesentliche Gasproduktion bereits während der Verfüllphase und in den ersten Jahren der Stilllegungs-/Nachsorgephase erfolgt. Da gerade in dieser Phase bei einer offenen Ablagerungsfläche nur von einer geringen Methanoxidation an der Deponieoberfläche auszugehen ist ($OX = 0,1$), werden in diesem Zeitraum auch die intensivsten Emissionen in die Atmosphäre erwartet. Sie reduzieren sich deutlich mit Aufbringung der zur Methanoxidation ausgelegten Oberflächenabdichtung.

Bei den gewählten Annahmen würden aus der Ablagerung von 300.000 Mg MBA-Abfall über 15 Jahre Verfüllung langfristig insgesamt etwa 80.000 Mg CO_2 -Äq. in die Atmosphäre emittiert werden, was umgerechnet 266 kg CO_2 -Äq./MgTS an abgelagertem MBA-Abfall entspricht. Weiterhin zeigt die Summenkurve, dass bereits in der Verfüllphase etwa 65.000 Mg CO_2 -Äq. oder 81% der Gesamtemissionsfracht freigesetzt werden würde. Die langfristigen Emissionen wären ca. 10 – 15 Jahre nach Abschluss der Verfüllung und Aufbringung der Oberflächenabdichtung aufgrund der Methanoxidation vernachlässigbar.

Es handelt sich bei den gewählten Annahmen wie eingangs dargestellt eher um Annahmen zur sicheren Seite. Reduzierungen sind in folgenden Bereich möglich:

- Das Deponiegasbildungspotenzial ist von vornherein geringer als die angesetzten $40 \text{ m}^3/\text{MgTS}$ und liegt z.B. bei $30 \text{ m}^3/\text{MgTS}$.
- Es findet z.B. auch aufgrund der relativ geringen Schüttgeschwindigkeit von $1,25 \text{ m/a}$ noch ein nennenswerter aerober Abbau der bioverfügbaren Organik an der offenen Ablagerungsfläche statt, die demzufolge nicht mehr anaerob umgesetzt wird, z.B. bis zu 20% aerober Abbau.
- Die Methanoxidation an der offenen Deponieoberfläche stellt sich aufgrund des verdichteten Einbaus doch etwas günstiger dar als mit $OX = 0,1$ angesetzt, z.B. $OX = 0,1 - 0,3$ in der Verfüllphase. Gerade hier bestehen noch größere Unsicherheiten bei den Annahmen aufgrund weniger Ergebnisse von MBA-Deponien.

Wenn diese Einflüsse bzw. Unsicherheiten berücksichtigt werden, ergeben sich deutlich geringere Emissionen in die Atmosphäre, die zum Vergleich in Tabelle 7.2 zusammengefasst sind.

Tab. 7.2: Deponiegasproduktion und verbleibende Methanemissionen in die Atmosphäre in Kohlenstoffdioxidäquivalenten nach Methanoxidation, Abschätzung für einen MBA-Deponieabschnitt mit Annahmen zur sicheren Seite und bei günstigeren Bedingungen

Parameter	Annahmen zur sicheren Seite	Günstigere Annahmen
Maximale Gasproduktion zum Verfüllende 2020 [m ³ /h]	70	40
Deponiegasemissionen gesamt [Mg CO ₂ -Äq.]	80.000	40.000
Deponiegasemissionen pro Mg [kg CO ₂ -Äq./Mg TS]	266	133
Anteil Emission in Verfüllphase [% der Gesamtemission]	81	68
Restgasproduktion < 0,5 l CH ₄ /m ² *h im Jahr	2030	2028
Annahmewerte:		
Gasbildungspotenzial [m ³ /MgTS]	40	30
Aerober Abbau oberflächennah (MCF) [% der Organik]	0	20
Methanoxidationsfaktor OX in Verfüllphase [-]	0,1	0,3
Randbedingungen MBA-Deponieabschnitt:		
Ablagerungsmasse [MgTS/a]	20.000	
Ablagerungsdauer	2005 - 2020	
Ablagerungsfläche [ha]	2	
Schüttgeschwindigkeit [m/a]	1,25	

Der Vergleich zeigt, dass sich bei den günstigeren Annahmen die Emissionen in etwa halbieren würden und nur noch 133 kg CO₂-Äq./MgTS in die Atmosphäre gelangen würden. In diesem Fall würden etwa 68% bereits in der Verfüllphase emittiert werden.

7.3 Abschätzung und Beurteilung derzeitiger Gesamtemissionen aller MBA-Deponien in Deutschland

In Analogie zur Betrachtung eines MBA-Deponieabschnitts kann die Gesamtemission aller MBA-Deponien in Deutschland abgeschätzt werden. Dazu wird wie erläutert vereinfachend davon ausgegangen, dass seit 2005 etwa 700.000 MgTS an MBA-Abfall pro Jahr deponiert wird, nahezu keine aktive Gasfassung erfolgt und die Ablagerungsbereiche überwiegend noch offen sind.

Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in Tabelle 7.3 mit günstigeren und ungünstigeren Annahmen zur sicheren Seite zusammengestellt.

Tab. 7.3: Deponiegasproduktion und verbleibende Methanemissionen in die Atmosphäre in Kohlenstoffdioxidäquivalenten nach Methanoxidation, Abschätzung für alle MBA-Deponien in Deutschland mit Annahmen zur sicheren Seite und bei günstigeren Bedingungen⁷

Parameter	Annahmen zur sicheren Seite	Günstigere Annahmen
Aktuelle Gasproduktion [m ³ /h]	1.600	1.200
Deponiegasemissionen derzeit [Mg CO ₂ -Äq. im Jahr 2011/2012]	135.000	60.000
Deponiegasemissionen pro Mg [kg CO ₂ -Äq./Mg TS]	266	133
Annahmewerte:		
Gasbildungspotenzial [m ³ /MgTS]	40	30
Aerober Abbau oberflächennah (MCF) [% der Organik]	0	20
Methanoxidationsfaktor OX in Verfüllphase [-]	0,1	0,3
Randbedingungen MBA-Deponieabschnitt:		
Ablagerungsmasse [MgTS/a]	700.000	
Ablagerungsdauer	ab 2005	

⁷ Die Abschätzungen der Methanemissionen und der resultierenden CO₂-Äquivalenten erfolgten sowohl nach dem „IPCC-Waste-Model“, das als Excel-Datei von der IPCC zu den IPCC-Guidelines 2006 zur Verfügung gestellt wird, als auch nach einer IFAS-internen Berechnung. Beide Berechnungen führten zu quasi identischen Ergebnissen.



Die Abschätzung ergibt letztlich eine große Bandbreite an aktuellen Methanemissionen in die Atmosphäre von 60.000 – 135.000 Mg CO₂-Äq. Sie könnten in den nächsten Jahren bei einer weiteren Ablagerung von MBA-Abfällen in der bisherigen Größenordnung auf etwa 90.000 – 210.000 Mg CO₂-Äq./a anwachsen.

Zum Vergleich:

Von Ketelsen (2011) werden Deponiegasemission von MBA-Deponien prognostiziert, die bei etwa 34 kg CO₂-Äq./Mg Inputmaterial liegen. Wenn dies auf die jährliche Inputmenge von 3,2 Mio. Mg bezogen wird (siehe Tab. 2.1), so würden sich daraus (maximale) aktuelle Methan- bzw. Deponiegasemissionen von ca. 110.000 Mg CO₂-Äq. ergeben.



8 Schlussfolgerungen

8.1 Schlussfolgerungen zu Methanemissionen von MBA-Abfällen

Schlussfolgerungen zu Methanemissionen von deponierten MBA-Abfällen :

- MBA-Anlagen werden gemäß der Vorgaben der Deponieverordnung so betrieben, dass der zu deponierende Abfallteilstrom eine biologische Restaktivität und korrespondierende Deponiegasbildung nicht überschreitet. Dieses wird über die Parameter $AT_4 \leq 5 \text{ mgO}_2/\text{gTS}$, und / oder $GB_{21} \leq 20 \text{ NI/kgTS}$ nachgewiesen.
- Einerseits wird damit eine Reduktion der gasförmigen Emissionen von ca. 80 – 90% gewährleistet, was eine wesentliche Verbesserung gegenüber der früheren Praxis der Ablagerung unvorbehandelter Siedlungsabfälle bedeutet.
- Andererseits kann der MBA-Abfall zum Zeitpunkt der Ablagerung mit etwa 30 – 40 Nm^3/MgTS ein Deponiegasbildungspotenzial aufweisen, wie es auf früheren Siedlungsabfalldeponien nach etwa 10 – 20 Jahren Ablagerungsdauer festzustellen ist.

8.2 Schlussfolgerungen zum Betrieb von MBA-Deponien

Schlussfolgerungen zum Einbaubetrieb:

- In der Praxis des Abfalleinbaus weist der MBA-Abfall eher günstige Ausgangsbedingungen für das Einsetzen bzw. Weiterlaufen biologischer Abbauprozesse auf (Homogenität, Feuchte). Oft gehen weder vom verdichteten Einbau noch vom Wasserhaushalt nennenswerte Limitierungen der biologischen Abbauprozesse aus.
- Untersuchungen an MBA-Deponien weisen darauf hin, dass ein nennenswerter Anteil des abgelagerten MBA-Abfallteilstroms biologisch gut verfügbar ist und in den ersten Jahren der Ablagerung relativ intensiv abgebaut wird. Das bedeutet für die Gasprognose mit dem Dreiphasenmodell, dass ein größerer Anteil des Gesamtgaspotenzials mit einer kurzen Halbwertszeit gebildet wird. Daraus ist wiederum zu schließen, dass ein beträchtlicher Anteil der Gasemissionen bereits in der Ablagerungsphase emittiert. Um dieses verifizieren zu können, sind weitere Überwachungsergebnisse und ergänzende Untersuchungen an



verschiedenen Standorten mit unterschiedlichen Randbedingungen (Art der biologischen Vorbehandlung, Wassergehalt und Verdichtung beim Einbau etc.) erforderlich.

8.3 Schlussfolgerungen zu Überwachungsmaßnahmen von MBA-Deponien

Schlussfolgerungen zu Überwachungsmaßnahmen:

- Auswertungen von FID-Messungen auf MBA-Deponien im Vergleich zur prognostizierten Restgasproduktion weisen darauf hin, dass FID-Begehungen nur sehr bedingt geeignet sind, um Methanemissionen aus MBA-Deponien belastbar abzuschätzen. FID-Messungen werden zu sehr von Randbedingungen wie Luftdruckschwankungen, Wassersättigungsgrad der Oberfläche und bevorzugten Austrittsflächen (Hot Spots) beeinflusst. Selbst wenn diese Randbedingungen dokumentiert werden, z.B. gemäß VDI-Richtlinie 3860, Blatt 3, 2008, ist die Interpretation des Messergebnisses mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.
- Die Datenlage zu gasförmigen Emissionen aus MBA-Deponien verbessert sich aufgrund von regelmäßigen Überwachungsmaßnahmen erst allmählich, da erst in den letzten Jahren größere Mengen an MBA-Abfällen nach den geltenden Anforderungen deponiert werden. Die Anforderungen an die Überwachung von Deponiegasemissionen sind im Anhang 5 der Deponieverordnung festgelegt. Die Auswertungen zeigen, dass schon kurz nach der Ablagerung in der dann meistens noch offenen Ablagerungsfläche Methanemissionen entstehen können. Deshalb wären gerade in dieser Phase Messungen zur Methanemission empfehlenswert.
- Über die Überwachungsmaßnahmen und Nachweise gemäß den Anforderungen der DepV hinaus wäre ein wissenschaftliches Untersuchungsprogramm zum Emissionsverhalten von MBA-Deponien sinnvoll, um viele Aussagen und daraus abgeleitete Werte und Prognosen zur Methanentstehung (Methanbildungspotenzial und Halbwertszeiten) und zur Freisetzung in die Atmosphäre (Methanoxidation) abzusichern. Dieses Untersuchungsprogramm könnte folgende Schritte umfassen:

- Abfallfeststoffprobenahme aus einigen MBA-Deponien in gewissen zeitlichen Abständen und aus mehreren MBA-Deponien unterschiedlicher Ablagerungsdauer, Ablagerungsmächtigkeit, Abdecksituationen etc. mit der Bestimmung u.a. von:
 - Wassergehalt, da der Wasserhaushalt die Prozesse im Deponie und die resultierenden Emissionen maßgeblich bestimmt.
 - TOC im Eluat, TOC im Feststoff, um die Veränderung dieser Parameter während der Ablagerungsdauer zu ermitteln
 - Atmungsaktivität- AT_4 und/oder Gasbildungsrate im Gärtest GB_{21} , um die Veränderung dieser Parameter während der Ablagerungsdauer zu ermitteln
 - Ggf. Langzeitversuche zur Restgasbildung und geschlossenen Bilanzierung in Lysimetern
- Gaspegel im MBA-Deponiekörper zur Bestimmung der Gaszusammensetzung und, ggf. in Verbindung mit Absaugversuchen, zur Deponiegasentstehung sowie zum Verhältnis von aeroben zu anaeroben Abbauprozessen in der oberflächennahen Ablagerungsschicht.
- Ergänzend FID-Begehungen der Deponieoberfläche oder temporären Abdeckung, ggf. auch Laser-Adsorptionsspektrometrie, Haubenmessungen zur Bestimmung der Gasemissionen über die Oberfläche und zum Einfluss der Methanoxidation.

9 Zusammenfassung

Aufgabenstellung und Ziel dieses Fachgutachtens ist es, zur Emissionsberichterstattung die fachlichen Grundlagen für die Berechnung der Methanemissionen aus der Ablagerung von MBA-Abfällen zu erarbeiten.

Zur Bearbeitung wurden schwerpunktmäßig Forschungsergebnisse und Praxiserfahrungen der letzten Jahre, insbesondere von Überwachungsmaßnahmen zum Gashaushalt auf MBA-Deponien ausgewertet:

- Mittel- und langfristig treten in den meisten MBA-Deponien Gaszusammensetzungen auf, die denen der stabilen Methanphase und der Langzeitphase entsprechen.
- Die Auswertung weist darauf hin, dass bei ausreichend vorbehandelten Abfällen ($AT_4 \leq 5 \text{ mgO}_2/\text{gTS}$, $GB_{21} \leq 20 \text{ NI}/\text{kgTS}$) ein Gesamtgasbildungspotenzial im Bereich von 30 – 40 Nm^3/MgTS zu erwarten ist. Bei einem durchschnittlichen Methangehalt von 60 Vol.-% entspricht dies einem Methanbildungspotenzial von 18 - 24 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{MgTS}$.
- Höhe und zeitlicher Verlauf der Gasbildung werden u.a. beeinflusst vom Einbauwassergehalt und der Temperatur im Deponiekörper, dem Anteil aerober Abbauprozesse sowie Methanoxidationsprozessen an der Ablagerungs Oberfläche bzw. in der Bodenabdeckung.
- Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich zum Zeitpunkt der Deponierung noch ein gewisser Restanteil an leicht und mittel abbaubaren und zudem gut verfügbaren organischen Verbindungen im MBA-Abfall befindet. Bei der Deponierung weist der MBA-Abfall eher günstige Randbedingungen für das Einsetzen bzw. die Fortsetzung biologischer Abbauprozesse auf. Daher werden für die Anteile der biologischen Verfügbarkeit und für die Halbwertzeiten (H) des zu deponierenden MBA-Abfallteilstroms folgende Wertebereiche zur Emissionsabschätzung vorgeschlagen:
 - gut verfügbare / abbaubare Organik: ca. 60% mit $H = 3 \pm 2$ Jahre
 - mittel verfügbare / abbaubare Organik: ca. 20% mit $H = 10 \pm 5$ Jahre
 - schwer verfügbare / abbaubare Organik: ca. 20% mit $H = 25 \pm 10$ JahreDiese Halbwertzeiten liegen in den gleichen Bereichen wie die IPCC-Vorgabewerte.

Der Ansatz mit differenzierten Halbwertzeiten („Dreiphasenmodell“) und die abgeleiteten Restgasbildungspotenziale geben damit die ersten Überwachungsergebnisse an MBA-Deponien wider, die zeigen, dass in den ersten Jahren der Ablagerung die anaeroben Abbauprozesse noch relativ intensiv ablaufen.

Die mikrobielle Oxidation von Methan als passive Gasbehandlungsmaßnahme wurde vom IPCC als eine Schlüsseltechnologie zur Behandlung deponiebürtiger Methanemissionen angeführt. Zur Quantifizierung wurde der Methanoxidationsfaktor OX eingeführt.

Auf der einen Seite wurden hohe Methanoxidationskapazitäten vieler Böden und Substrate im Laborversuch und teilweise in Freilanduntersuchungen nachgewiesen. Messungen auf MBA-Deponien und Altdeponien weisen andererseits darauf hin, dass insbesondere auf nicht abgedeckten MBA-Deponien der größte Anteil des Deponiegases den Deponiekörper über bevorzugte Gasaustrittsflächen ohne nennenswerte Methanoxidation verlässt.

Weitere eher limitierende Faktoren auf die Methanoxidation sind räumliche und zeitliche Belastungsspitzen, stark schwankende Feuchtegehalte, tendenziell zu niedrige Temperaturen für optimale Stoffwechselprozesse der methanotrophen Bakterien und ungünstige Verhältnisse von Methan zu Sauerstoff im Methanoxidationshorizont.

Vor diesem Hintergrund werden weiterhin eher geringe Methanoxidationsfaktoren für die offene und ggf. temporär abgedeckte MBA-Ablagerung abgeleitet. Höhere Methanoxidationsleistungen erfordern eine Bemessung der Boden-/Rekultivierungsschicht zur Methanoxidation, eine entsprechende Bodenauswahl und hochwertige bauliche Ausführung bei der Aufbringung sowie ein Überwachungsprogramm, so dass der abgeleitete Methanoxidationsfaktor die „System-Methanoxidationskapazität“ abbildet.

Aufbauend auf der Auswertung und Ableitung von Vorgabewerten zur Abschätzung von Methanemissionen aus MBA-Deponien erfolgte die Prüfung und Anpassung des First Order Decay (FOD) Modells der IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Die IPCC-Methodik basiert auf einem Ansatz 1. Ordnung, dem First Order Decay (FOD) Modell. Es gibt drei Rangstufen („Tier 1 – Tier 3“), mit der die Qualität der Abschätzung in Abhängigkeit von den Eingangsdaten eingeordnet wird. Das Fachgutachten wurde so angelegt, dass zukünftig die höchste Rangstufe (Tier 3) erreicht werden kann, wenn noch mehr Überwachungsergebnisse von MBA-Deponien vorliegen.

Die Prüfung des FOD-Modells in Verbindung mit den Auswertungen zum Gashaushalt von MBA-Deponien zeigt, dass es keinen Anlass gibt, es grundsätzlich in Frage zu stellen. Es erfolgte daher eine Validierung und damit Anpassung des Modells auf das Emissionsverhalten von MBA-Deponien für folgende Daten und Emissionsfaktoren:

- abgelagerte MBA-Abfallmengen
- Methanbildungspotenzial (L_0)
- „Methane Correction Factor“ (MCF)
- Methananteil im produzierten Deponiegas (F)
- Oxidationsfaktoren (OX)
- Halbwertzeiten ($t_{1/2}$ oder H)
- Anteil des gefassten Methans (R) über ein technisches Gaserfassungssystem
- Verzögerungszeit (Zeitintervall von der Ablagerung bis zum Einsetzen intensiver anaerober Abbauprozesse)

Die bisher verfügbaren Ergebnisse zum Gashaushalt von MBA-Deponien erlauben zwar noch keine statistischen Auswertungen. Dennoch können die erhobenen Daten und abgeleiteten Emissionsfaktoren im Sinne der IPCC-Guidelines als recht umfassend und vollständig eingestuft werden, um die Methanemissionen von MBA-Deponien abzuschätzen. Mit einer fortlaufenden Aktualisierung der Abschätzung werden die ausgewiesenen Unsicherheiten bei mehreren Emissionsfaktoren wie der Halbwertzeit oder der Methanoxidationsrate zunehmend reduziert.

Auf der Grundlage der Auswertung zum Methanbildungspotenzial von MBA-Abfällen, den Halbwertzeiten, der Methanoxidation und den deponietechnischen Randbedingungen werden die Methanemissionen und die entsprechenden resultierenden Belastungen der Atmosphäre mit Kohlenstoffdioxidäquivalenten abgeschätzt.

Die Gasprognoserechnung erfolgt mit den abgeleiteten Annahme- und Vorgabewerten weiterhin über einen Ansatz 1. Ordnung. Die Abschätzung zeigt, dass die wesentliche Gasproduktion bereits während der Verfüllphase und in den ersten Jahren der Stilllegungs-/Nachsorgephase erfolgt. Da gerade in dieser Phase bei einer offenen Ablagerungsfläche nur von einer geringen Methanoxidation an der Deponieoberfläche auszugehen ist, können in diesem Zeitraum die intensivsten Emissionen in die Atmosphäre auftreten. Sie reduzieren sich mit der Aufbringung der zur Methanoxidation ausgelegten Oberflächenabdichtung.

Bei den gewählten Annahmen werden als Abschätzung zur sicheren Seite bis zu 266 kg CO₂-Äq./MgTS an abgelagertem MBA-Abfall emittiert, davon bis zu etwa 80% dieser Gesamtemissionsfracht bereits in der Verfüllphase. Die langfristigen Deponiegasemissionen wären ca. 10 – 15 Jahre nach Abschluss der Verfüllung und Aufbringung der Oberflächenabdichtung mit Methanoxidationsfunktion vernachlässigbar.

Wenn zur Abdeckung der Schwankungsbereiche und Unsicherheiten günstigere Annahmen zum Deponiegasbildungspotenzial, zum aeroben Abbau der abgelagerten Organik und zur Methanoxidation an der offenen Deponieoberfläche gewählt werden, reduzieren sich die Emissionen um ca. 50%.

Die Abschätzung der aktuellen Gesamtgasemissionen aller MBA-Deponien in Deutschland ergibt letztlich eine große Bandbreite von 60.000 – 135.000 Mg CO₂-Äq./a. Sie können in den nächsten Jahren bei einer durchschnittlichen jährlichen Ablagerung in der bisherigen Größenordnung von ca. 1 Mio. Mg MBA-Abfallfeuchtmasse auf etwa 90.000 – 210.000 Mg CO₂-Äq./a anwachsen.

In der Auswertung werden die Unsicherheiten zu den abgeleiteten Emissionsfaktoren, auf denen die Emissionsprognose beruht, aufgezeigt, insbesondere die erst in geringem Umfang verfügbaren Überwachungsergebnisse zum Gashaushalt von MBA-Deponien. Neben den Schlussfolgerungen zur Ablagerung mechanisch-biologisch behandelter Abfälle und zu weiter führenden Untersuchungen ist daher eine Fortschreibung der Emissionsprognose mit den zukünftigen Überwachungsergebnissen anzustreben.

10 Literaturverzeichnis

- ASA, 2011: Steckbriefe zu MBA-Anlagen. www.asa-ev.de
- Binner, E., 2003: The Impact of Mechanical-Biological Pretreatment on the Landfill Behavior of Solid Wastes. Proceedings of Workshop „Biological Treatment of Biodegradable Waste – Technical Aspects“, Brussels, 8. - 10.04.2002, EUR 20517 EN, 2003
- Bockreis, A., Steinberg, I., 2004: Emissionen mechanisch-biologisch behandelter Abfälle bei der Deponierung – eine Bilanz aus Langzeitversuchen. In: Kühle-Weidemeier, M.: Abfallforschungstage 2004. Tagungsband, Cuvillier Verlag
- Bogner, J., Abdelrafie Ahmed, M., Diaz, C., Faaij, A., Gao, Q., Hashimoto, S., Mareckova, K., Pipatti, K., Zhang, T., 2007: Waste Management, In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Bohn, S.; Jager, J., 2011: Potential of the Microbial Methan Oxidation to Mitigate Low Gas Emissions of Mechanically and biologically Treated Waste. In M. Kühle-Weidemeier (Ed.): Waste to resources 2011. Mechanisch-biologische Abfallbehandlung und automatische Abfallsortierung; Tagungsband ; 24. - 26. Mai 2011. Internationale Tagung MBA und Sortieranlagen 2011, Hannover, Cuvillier Verlag, pp. 419–431
- Danhamer, H., 2002: Emissionsprognosemodell für Deponien mit mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen – Schwerpunkt: Modellierung des Gashaushalts. Schriftenreihe WAR, Band 138, TU Darmstadt
- Deposerv, 2012: Ergebnisse zum Gashaushalt der MBA-Deponie D, Zusammenstellung für 2010 – 2011, unveröffentlicht
- DepV, 2009: Verordnung über Deponien und Langzeitlager - Deponieverordnung – DepV - vom 27. April 2009, BGBl. I S. 900, zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 17. Oktober 2011 (BGBl. I Nr. 52, S. 2066), in Kraft getreten am 1. Dezember 2011
- DESTATIS, 2011: Umwelt, Abfallentsorgung 2009, Fachserie 19, Reihe 1 des Statistischen Bundesamts, Juli 2011, S. 29, S. 31, S. 92

- Ehrig, H.-J., Höring, K., Helfer, A., 1998: Anforderungen an und Bewertung von biologischen Vorbehandlungen für die Ablagerung. Abschlussbericht Teilvorhaben 3/4 zum BMBF-Verbundvorhaben „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, BUGH Wuppertal, Dezember 1998
- Gebert, J., 2004: Mikrobielle Methanoxidation im Biofilter zur Behandlung von Restemissionen bei der passiven Deponieentgasung. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 55, 2004
- Gebert, J., Singh, B.K., Pan, Y., Bodrossy, L., 2009: Activity and structure of methanotrophic communities in landfill cover soils. Environmental Microbiology Reports 1 (5): 414-423
- Gebert, J., Pfeiffer, E.-M., 2010: Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten: Das Projekt MiMethox. In: Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 63, 2010
- Gebert, J., Melchior, S., Streese-Kleeberg, J., 2011: Methanoxidation zur passive Restgasbehandlung. Müllhandbuch (Hrsg. Bilitewski, Schnurer, Zeschmar-Lahl). Kz. 4383, Erich Schmidt Verlag, März 2011
- Hennecke, D., 1999: Deponieverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen. Entwicklung eines Parametersatzes und Risikoanalyse. Dissertation am Fraunhofer Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Schmallenberg. Shaker Verlag, Aachen
- Hertel, M., Hoppenheidt, K., Kottmair, A., Krist, H., Muecke, W., Rommel, W., Roth, U., Ziegler, C., Baumann, J, Huber, W., 2001: Wissenschaftliche Begleitung der MBA Erbenschwang. Endbericht zum Forschungsvorhaben B30 im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen
- Heyer, K.-U., 2003: Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge. Hamburger Berichte Band 21, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart
- Hupe, K., Heyer, K.-U., Lüneburg, R., Becker, J.-F., Stegmann, R., 2007: Methanoxidation an alternativen Oberflächenabdichtungen – Erfahrungen mit Testfeldern auf der Altdeponie Kuhstedt. In: Stilllegung und Nachsorge von Deponien – Schwerpunkt Deponiegas 2007 (Hrsg.: G. Rettenberger, R. Stegmann), Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft, 14, Verlag Abfall *aktuell*, Stuttgart, 145-164
- Ifeu, Ökoinstitut e.V., 2010: Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz. FKZ 3708 31 302. Im Auftrag des UBA, BMU, BDE, Januar 2010

- IPCC, 2006: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 1, General Guidance and Reporting, Chapter 3 – Uncertainties
- IPCC, 2006: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5, Waste, Chapter 3 – Solid Waste Disposal
- Ketelsen, K., 2010: Energieeffizienz von Kombinationsverfahren mit MBA und deren Beitrag zum Klimaschutz. Internationale 8. ASA Abfalltage 2010
- Ketelsen, K., Kanning, K., Cuhls, C., 2011: Optimisation of MBT considering energy efficiency and protection of resources and climate. Waste to resources 2011. Mechanisch-biologische Abfallbehandlung und automatische Abfallsortierung; Tagungsband ; 24. - 27. Mai 2011. Internationale Tagung MBA und Sortieranlagen 2011, Hannover, Cuvillier Verlag
- Kühle-Weidemeier, M., Bogon, H., 2008: Methanemissionen aus passiv entgasten Deponien und der Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen - Emissionsprognose und Wirksamkeit der biologischen Methanoxidation -, Schlussbericht erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ: 360 16 015, Dezember 2008
- Leikam, K., 2002: Bilanzierung der Stickstoff- und Kohlenstoffemissionen bei der biologischen Restabfallbehandlung und der Deponierung der Rotteendprodukte. Hamburger Berichte 19, Verlag Abfall aktuell, 2002
- Lo, H., Bohn, S., Jager, J., 2011: Mikrobielle Methanoxidation in Deponieabdeckungsschichten zur Eliminierung von Schwachgasemission – Feldstudien auf einer MBA-Deponie. Karlsruher Altlastenseminar 2011. Seminarband
- ÖVA, Österreichischer Verein für Altlastenmanagement (2008): Leitfaden Methanoxidationsschichten, Oktober 2008
- Raninger, B., Nelles, M., Hofer, M., Schulik, J., Lorber, K.E., Neff, A., Ragoßnig, A., 2001: Deponieverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen. Teil II Modelldeponie Allerheiligen. Schriftenreihe Umwelt und Energie. ISBN 3-936190-01-1
- Reinert, P., Rettenberger, G., Wagner, J.-F., 2007: Gasbildung in stabilisierten Deponien am Beispiel einer MBA-Deponie. Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 17, Verlag Abfall aktuell, 2007
- Reinert, P., 2010: Langzeitverhalten des Deponiekörpers bei Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Siedlungsabfällen und den damit verbundenen Auswirkungen der Deponieverordnung auf Materialeinbau und Deponiebetrieb.



- Dissertation Universität Trier, Fachbereich VI, Geographie/Geowissenschaften, 2010
- Rettenberger, G., Mezger, H., 1992: Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen – Leitfaden Deponiegas –. Materialien zur Altlastenbearbeitung, 10, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
- Rettenberger, G., 1997: Emissionsverhalten hochverdichteter Abfälle – Erfahrungen aus dem Rückbauprojekt Deponie Burghof. Tagungsband zum 2. Statusseminar zum BMBF-Verbundvorhaben „Deponiekörper“, Wuppertal, 1997
- Scheelhasse, T., Maile, A., Bidlingmaier, W., 1999: Langzeitverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmüll auf der Deponie. Abschlussbericht Teilvorhaben 3/1 zum BMBF-Verbundvorhaben „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, Universität GH Essen 1999
- Schreier, W., 1999: Wirksamkeitskontrolle der Deponieentgasung durch FID-Begehungen und Sondenmessungen. Deponiegas '99. Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 12, Verlag Abfall aktuell, 1999
- Soyez et al., 2000: Mechanisch-biologische Abfallbehandlung: Technologien, Ablagerungsverhalten und Bewertung, Gesamtdarstellung der wissenschaftlichen Ergebnisse des Verbundvorhabens „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 120, Hrsg. Soyez, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2000
- Stegmann, R., Heyer, K.-U., Hupe, K., Willand, A., 2006: „Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge“, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Abfallwirtschaft, Förderkennzeichen (UFOPLAN) 204 34 327, im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2006
- Streese-Kleeberg, J., Gebert, J., Tadesse, Y., Stegmann, R., 2010: Gas-Push-Pull-Tests – Ein neues Verfahren zur Quantifizierung der Methanoxidation in situ. In: Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 63, 2010
- Tintner, J., Kühleitner, M., Binner, E., Brunner, N., Smidt, E., 2011: Modeling the final phase of landfill gas generation from long-term observations. In: Biodegradation, Springer Verlag, veröffentlicht on-line, November 2011
- VDI 3860, Blatt 3, 2008: Messen von Deponiegas, Messungen von Oberflächenemissionen. Berlin, Beuth Verlag

VKS, 2011: Angaben zur Abfallbehandlung unter

<http://www.vku.de/abfallwirtschaft/abfallbehandlung/aufbereitung-und-vorbehandlung.html>

Weber, B., 2011: FID-Begehung der MBA-Deponie C, Ergebnisbericht, unveröffentlicht

Gutachten erstellt von:

Dr.-Ing. Kai-Uwe Heyer

Tel.: 040 / 77 11 07 42

Dr.-Ing. Karsten Hupe

Tel.: 040 / 77 11 07 41

Prof. Dr.-Ing. Rainer Stegmann

Tel.: 040 / 77 11 07 41

IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

Fax: 040 / 77 11 07 43

Prof. R. Stegmann und Partner

Schellerdamm 19 - 21

21079 Hamburg

e-mail: heyer@ifas-hamburg.de

<http://www.ifas-hamburg.de>

