

Deponiegas

Beschleunigung der Abbauprozesse

Methanoxidationsfilter



Deponie Horb-Rexingen

Pilotprojekt

Verfahren zur Minimierung der Restgasemissionen von Hausmülldeponien und Altablagerungen

Teil I:

**Beschleunigung der Abbauprozesse im
Deponiekörper durch gezielte Absaugung**

Teil II:

**Behandlung der gefassten Deponiegase
mittels Methanoxidationsfilter**

- Abschlussbericht -

- Januar 2004 -

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Anhangverzeichnis	IV
1 Ausgangssituation	1
1.1 Behandlungsmöglichkeiten von Schwachgasen	2
1.2 Gasbehandlungskonzept der Deponie Horb-Rexingen	4
2 Allgemeine Angaben zur Deponie Horb-Rexingen	5
3 Kurzbeschreibung des Entgasungssystems	6
4 Teil I - Beschleunigung der Abbauprozesse im Deponiekörper durch gezielte Steigerung der Absaugung	8
4.1 Grundsätzliche Effekte einer gezielten Steigerung der Absaugung	8
4.2 Betriebserfahrungen aus der Versuchsphase I	10
4.2.1 Betriebsweise - Anlagenverfügbarkeit - Absaugmenge	10
4.2.2 Abbauraten im Deponiekörper	11
4.3 Ergebnisse der Versuchsphase II - Erhöhung der Abbauleistung im Deponiekörper	12
4.3.1 Betriebsstunden - Ausfallzeiten - Anlagenverfügbarkeit	12
4.3.2 Abgesaugte Gasmengen	14
4.3.3 Veränderung der Gaszusammensetzung	15
4.3.4 Entwicklung der Austragsfrachten	17
4.3.5 Berechneter Abbau des organischen Kohlenstoffes im Deponiekörper auf Grundlage des Sauerstoffverbrauches	19
4.3.6 Ergebnisse der Emissionsmessungen an der Deponieoberfläche	22
4.3.7 Gashaushalt der Deponie nach längerem Anlagenstillstand	26
4.3.7 Gashaushalt der Deponie nach längerem Anlagenstillstand	27
4.3.8 Berechnete Abbauraten im Deponiekörper unter Berücksichtigung des Gashaushaltes bei Nichtabsaugung	28
4.3.9 Auswirkungen auf die Sickerwasserzusammensetzung	30
5 Teil II - Behandlung der gefassten Deponiegase im Methanoxidationsfilter	31
5.1 Grundlagen	31
5.2 Verfahrenskonzept - Methanoxidationsfilter	31
5.3 Lage und Aufbau des Methanoxidationsfilters	32
5.4 Auslegungsdaten des Methanoxidationsfilters	34
5.5 Betriebsergebnisse der Versuchsphase I	36
5.6 Betriebsdaten des Methanoxidationsfilters der Versuchsphase II	36
5.7 Ergebnisse der Versuchsphase II - Abbau im nachgeschalteten Methanoxidationsfilter	37
5.7.1 FID-Messungen an der Oberfläche des Methanoxidationsfilters	37
5.7.2 Sondenmessungen am Methanoxidationsfilter	41
5.7.3 Haubenmessungen am Methanoxidationsfilter	42

5.7.4 Abbaurrate und Abbauleistung des Filters auf Grundlage der Ergebnisse der Hauben- und Sondenmessungen sowie der FID-Messungen	44
5.7.5 Untersuchung des Filtermaterials	46
5.8 Zusammenstellung der wesentlichen Betriebsdaten und der Abbau-leistung des Methanoxidationsfilters in der Versuchsphase II.....	48
5.9 Kosten des Methanoxidationsfilters	48
5.9.1 Investitionskosten	48
5.9.2 Betriebs-/Instandhaltungskosten	49
6 Diskussion der Ergebnisse des zweistufigen Verfahrenskonzeptes	50
6.1 Gesamtabbaurrate des Verfahrens	50
6.2 Vergleich des Verfahrens mit dem diskontinuierlichen Fackelbetrieb	51
6.3 Vergleich des Verfahrens mit passiven Entgasungsmaßnahmen.....	51
6.4 Restemissionsraten	52
7 Zusammenfassung.....	53
7.1 Beschleunigung der Abbauprozesse im Deponiekörper	53
7.2 Behandlung der gefassten Deponiegase mittels Methanoxidationsfilter	54
7.3 Gesamtbilanz des zweistufigen Verfahrenskonzeptes	55
8 Ausblick - zukünftiges Entwicklungs- und Anwendungspotential	55
8.1 Entwicklungs- und Optimierungspotential des Verfahrens	55
8.2 Anwendungsbereiche des Verfahrens.....	56
9 Projektdurchführung und -förderung - Danksagung	57
Literatur	59
Anhang	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Absaugmengen von 1995 - 1998	1
Abbildung 2: Lageplan.....	7
Abbildung 3: Betriebsstunden - Stillstandszeiten im Versuchszeitraum	13
Abbildung 4: Abgesaugte monatliche Deponiegasmengen im Versuchszeitraum	14
Abbildung 5: Abgesaugte jährliche Gasmengen seit Beginn der Absaugung	15
Abbildung 6: Veränderung der Gaszusammensetzung im Versuchszeitraum	16
Abbildung 7: Entwicklung der CH ₄ - u. CO ₂ -Konzentration bei Steigerung der Absaugmenge .	16
Abbildung 8: Entwicklung der fremdluftfreien CH ₄ - und CO ₂ -Konzentration.....	16
Abbildung 9: Entwicklung der Konzentrationen der Hauptkomponenten CH ₄ und CO ₂ sowie der Absaugmengen seit 1998.....	17
Abbildung 10: Entwicklung der Ausgangsfrachten von Methan und Kohlendioxid.....	18
Abbildung 11: Entwicklung der Kohlenstoffausgangsfrachten	18
Abbildung 12: Ergebnisse der Überprüfung des Gasfassungssystems.....	21
Abbildung 13: FID-Messung im Mai 2002.....	23

Abbildung 14: FID-Messung im November 2002	24
Abbildung 15: Entgasungssituation im November 2002.....	26
Abbildung 16: Aufbau des Methanoxidationsfilters	33
Abbildung 17: Ergebnisse der FID-Messungen an der Filteroberfläche	38
Abbildung 18: FID-Messung am Methanoxidationsfilter - 15. August 2002	39
Abbildung 19: FID-Messung am Filter - Darstellung als Emissionsflächen - 15. August 2002 ...	40
Abbildung 20: Gaszusammensetzung und Abbaurate in verschiedenen Schichttiefen (MP 12)	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Betriebsstunden, Stillstandszeiten und Anlagenverfügbarkeit im Versuchszeitraum	12
Tabelle 2: Erzielte Abbauraten im Deponiekörper - Berechnung auf Grundlage des Sauerstoffverbrauches.....	20
Tabelle 3: Ergebnisse der FID-Messungen - 2002.....	22
Tabelle 4: Ergebnisse der FID-Messungen von 1998 - 2002.....	25
Tabelle 5: Einteilung der Gasbrunnen nach dem Gasphasenmodell.....	27
Tabelle 6: Gegenüberstellung der ermittelten Abbauraten im Deponiekörper	28
Tabelle 7: Entwicklung ausgewählter Sickerwasserinhaltsstoffe von 1998 - 2002	30
Tabelle 8: Auslegungsdaten des Biofilters in der Versuchsphase I	35
Tabelle 9: Betriebsdaten des Biofilters in der Versuchsphase I	35
Tabelle 10: Betriebsdaten des Biofilters in der Versuchsphase II	37
Tabelle 11: Zusammenfassung der Ergebnisse der Hauben- und Sondenmessungen	43
Tabelle 12: Klassifizierung der Ergebnisse der Sonden-, Hauben- und FID-Messung - Messungen im August 2002	45
Tabelle 13: Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen des Filtermaterials	46
Tabelle 14: Investitionskosten - Methanoxidationsfilter - Versuchsphase I.....	48
Tabelle 15: Investitionskosten - Methanoxidationsfilter - Versuchsphase II.....	49
Tabelle 16: Betriebs-/Instandhaltungskosten - Methanoxidationsfilter.....	49
Tabelle 17: Zusammenstellung der erzielten Abbauraten des Verfahrens	50

Anhangverzeichnis

Anhang A:	Berechnungsansatz zur Ermittlung der Abbaurate im Deponiekörper	A 1
	Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage des berechneten Sauerstoffverbrauches - Datenbasis: sämtliche Messwerte von Nov 2001 bis Jan 2003	A 2
	Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage des berechneten Sauerstoffverbrauches - Datenbasis: Messdaten am 13. August und 11. September 2002	A 3
	Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage des berechneten Sauerstoffverbrauches - Datenbasis: Messdaten vom 11. September 2002.....	A 4
	Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage der gemessenen CH ₄ -Gehalte bei längerem Stillstand der Absaugung Datenbasis: sämtliche Messwerte von Nov 2001 bis Jan 2003	A 5
	Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage der gemessenen CH ₄ -Gehalte bei längerem Stillstand der Absaugung Datenbasis: Messdaten am 13. August und 11. September 2002	A 6
	Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage der gemessenen CH ₄ -Gehalte bei längerem Stillstand der Absaugung Datenbasis: Messdaten vom 11. September 2002.....	A 7
	Messergebnisse der Überprüfung des Gasfassungssystems vom 13. August, 11. September und 22. Oktober 2002	A 8 - A 10
Anhang B:	Ergebnisse der Sondenmessungen am 06. Mai 2002.....	B 1 - B 2
	Ergebnisse der Sondenmessungen am 13. August 2002	B 3 - B 4
	Berechnungsansatz zur Ermittlung der Abbaurate im Deponiekörper	B 5
Anhang C:	Fotodokumentation - Methanoxidationsfilter	C 1 - C 6

1 Ausgangssituation

Der Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Freudenstadt betreibt die Deponieentgasungsanlage der Hausmülldeponie Horb-Rexingen. Die Anlage wurde 1995 in Betrieb genommen und das erfasste Deponiegas zunächst mittels HTV-Fackelanlage verbrannt.

Bereits im 2. Jahr nach Inbetriebnahme der Anlage ging die erfasste und behandelte Gasmenge kontinuierlich zurück und brach innerhalb von nur 4 Jahren regelrecht ein. Der Rückgang betrug zwischen 1995 und 1998 ca. 78 %. Zurückzuführen war dies nur zu einem geringen Teil auf die rückläufigen Mengen der abgelagerten Abfälle.

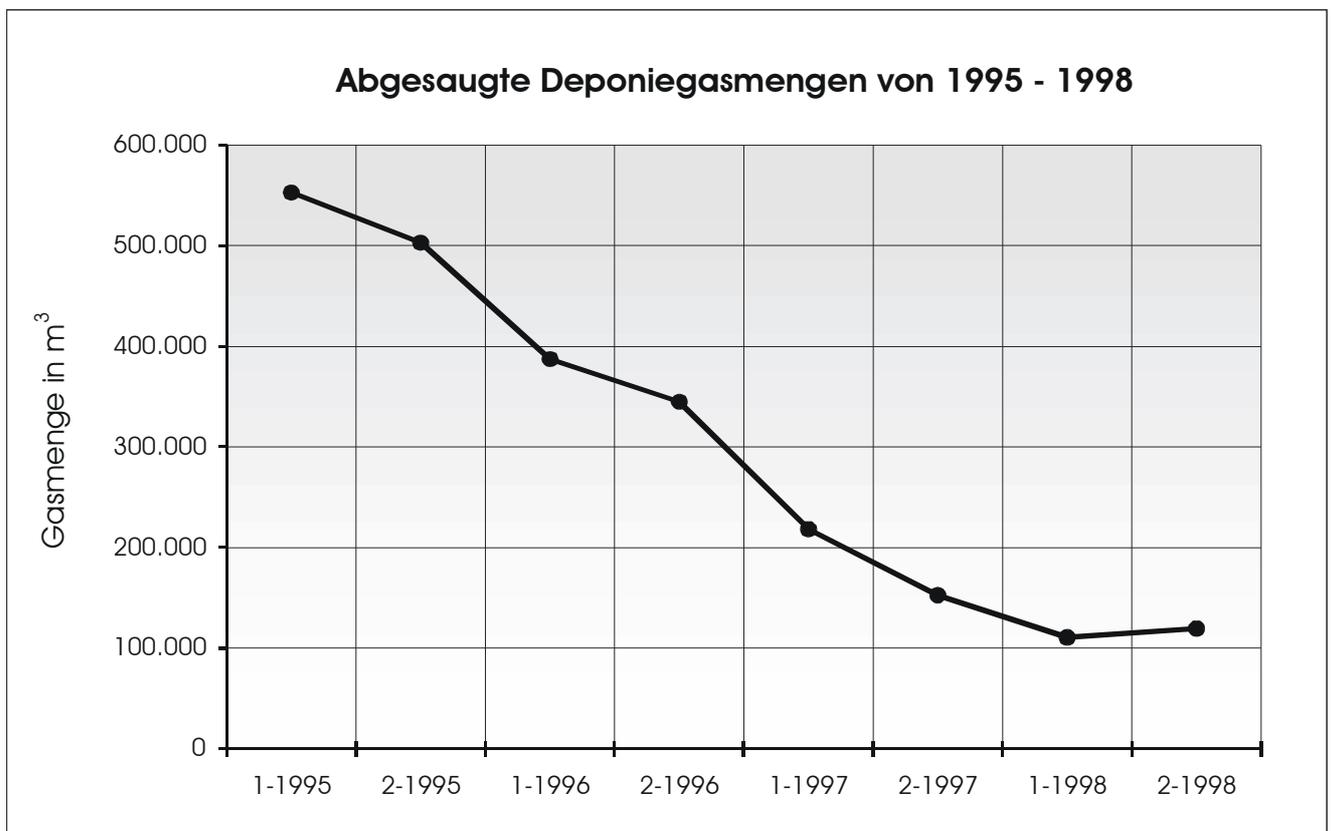


Abbildung 1: Entwicklung der Absaugmengen von 1995 - 1998

Teilbereiche des Deponiekörpers werden vielmehr durch die Absaugung selbst stark beeinflusst. Die ohne Absaugung gemessenen vergleichsweise hohen CH₄-Konzentrationen sinken im Absaugbetrieb deutlich ab. Der Gashaushalt reagiert sensibel auf den aktiven Entgasungsbetrieb.

Zudem erfolgt die Gasproduktion der Deponie Horb-Rexingen nicht ausschließlich in der stabilen anaeroben, Methan-produzierenden Phase. In Teilbereichen der Deponie wird sog. Schwachgas mit geringen CH₄-Gehalten bei gleichzeitig hohem Inertgasanteil (Stickstoff, Kohlendioxid) gebildet.

Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Methangehalte im Absaugbetrieb konnte die Entgasungsanlage mit Hochtemperaturverbrennung seit 1998 nur noch zeitweilig - in Abhängigkeit vom CH₄-Gehalt - betrieben werden. Der untere Regelbereich der Fackelanlage (Durchflussmenge $Q_{\min} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$, CH₄-Gehalt: 50 Vol.-%) und die Regel-Verbrennungstemperatur von 1.200 °C konnten nicht mehr eingehalten werden.

Nach dem Start der Anlage lief die Entgasungsanlage bei minimaler Förderleistung i. d. R. nur noch ca. 4 - 6 Stunden pro Tag und schaltete nach dem Unterschreiten eines minimalen CH₄-Gehaltes von ca. 27 Vol.-% automatisch ab. Nach längerem Anlagenstillstand „erholte“ sich der CH₄-Gehalt in Teilbereichen der Deponie wieder.

Während des Anlagenstillstandes konnte das gebildete Deponiegas unkontrolliert und unbehandelt in die Atmosphäre entweichen. Hinzu kommt, dass große Teilbereiche der Deponie auch im Absaug-Regelbetrieb der Anlage aufgrund von CH₄-Werten unterhalb des Brennbereiches nicht abgesaugt werden konnten. Dennoch steht der Deponiekörper infolge der noch stattfindenden Gasproduktion - auch in Bereichen mit geringer Methanproduktion - unter Überdruck.

Der Gesamtwirkungsgrad der Reduzierung der Gasemissionen war aufgrund der geringen täglichen Betriebszeit der Anlage sowie der geringen Anzahl tatsächlich abgesaugter Gasfassungselemente erheblich reduziert. Zusammenfassend stellte die Gasabsaugung mit anschließender thermischer Behandlung aufgrund des zu niedrigen Heizwertes nicht mehr die geeignete Möglichkeit der Gasbehandlung dar.

1.1 Behandlungsmöglichkeiten von Schwachgasen

Für die Behandlung von Schwach- und Restgasen aus Hausmülldeponien mit CH₄-Gehalten < 25 Vol.-% stehen grundsätzlich unterschiedliche Behandlungstechniken zur Verfügung.

Bisher werden Deponiegase aus Altablagerungen vorrangig mittels Biofiltern, durch eine Hochtemperaturverbrennung (Fackel) mit Stützfeuerung oder eine flammenlose nichtkatalytische Oxidation behandelt (1). Daneben werden Membranverfahren zur Aufkonzentrierung des Methangehaltes erprobt (2). Die katalytische Schwachgasbehandlung (3) sowie die stationäre Wirbelschichtfeuerung (4) befinden sich derzeit noch in der Entwicklungsphase.

Membranverfahren

Membranverfahren zur Aufkonzentrierung des Methangehaltes von Deponieschwachgasen stellen einen, der eigentlichen Behandlung, vorgeschalteten Aufbereitungsschritt

dar. Der Einsatz der Membrantechnik führt zu einem an- sowie einem abgereicherten Produktgas (2).

Das methanangereicherte Deponiegasteilstrom kann im Anschluss an die Vorbehandlung verwertet bzw. behandelt werden. Das zweite, abgereicherte Produktgas muss wiederum behandelt werden, was zusätzliche Kosten nach sich zieht. Als Alternative werden derzeit Versuche zur Rückführung des abgereicherten Permeats in den Deponiekörper durchgeführt.

Katalytische Verfahren

Verfahren zur katalytisch gestützten Behandlung von schwachmethanhaltigen Deponiegasen werden seit einigen Jahren erprobt. U. a. testet die Fa. Pro2 Anlagentechnik seit 2000 eine entsprechende Katalysatoreinheit (3). Abschließende Ergebnisse hinsichtlich der Betriebskosten, des Wirkungsgrades und der Katalysatorstandzeiten liegen noch nicht vor.

Wirbelschichtfeuerung

Bei der stationären Wirbelschichtfeuerung wird Deponierestgas und Verbrennungsluft in einem Reaktor mit Wirbelschicht, bestehend aus einem Inertstoff (z. B. Sand), zur Reaktion gebracht (4).

Für die Verbrennung von Gasen mit geringem Heizwert ist die Wirbelschichtfeuerung wegen der realisierbaren großen Verweilzeit im Bereich hoher Temperaturen prinzipiell gut geeignet. Ein weiterer Vorteil ist, dass die zur Verbrennung eingesetzten Stoffe flammenlos verbrannt werden können. Das Verfahren der stationären Wirbelschichtfeuerung befindet sich derzeit noch in der Entwicklungsphase. Bislang liegen nur Labortestergebnisse vor.

Flammenlose nichtkatalytische Verfahren

Bei der flammenlosen, nichtkatalytischen Oxidation wird durch einen regenerativen Wärmetauscher das Schwachgas soweit vorgewärmt, dass eine autotherme Verbrennung bis zu Methangehalten von 0,3 Vol.-% möglich ist (5).

Bei der sog. VocsiBox der Fa. Haase wird vorverdünntes Deponiegas beim Durchströmen eines heißen Reaktionsbettes oxidiert. Das Verfahren erfordert einen vergleichsweise hohen maschinen- und regeltechnischen Aufwand, da bei höheren Methankonzentrationen eine nicht unerhebliche Verdünnung mit Umgebungsluft erforderlich wird. Die hohen Volumenströme verursachen im Regelbetrieb nicht unerhebliche Stromkosten.

Hochtemperaturverbrennung mit Stützfeuerung

Die Hochtemperaturverbrennung von Deponiegasen mittels Fackelanlagen ist seit Jahren Stand der Technik. Für geringe Gasmengen stehen Anlagen mit einem Mindestdurchsatz von 10 - 20 m³/h zur Verfügung. Bei der Absaugung nur geringer Gasmengen sinkt der Erfassungsgrad allerdings deutlich ab.

Bei CH₄-Gehalten < 27 Vol.-% können Hochtemperaturfackelanlagen nur mit Hilfe einer Stützfeuerung (i. d. R. mit Erdgas) eingesetzt werden. Hochtemperaturverbrennung mit Stützfeuerung ist daher vergleichsweise kostenintensiv.

Biofilter

Biofilteranlagen werden zur Behandlung von Deponierestgasen bislang hauptsächlich als passive Systeme eingesetzt. Hierbei werden auf der Deponieoberfläche sog. Entgasungsfenster aus unterschiedlichen Materialien (Kompost, Holzhackschnitzel, Rindenmulch, etc.) eingerichtet. Das im Deponiekörper produzierte Restgas soll die Filterschicht aufgrund des Eigendruckes der Deponie passiv durchströmen.

Vorteile passiv betriebener Biofilter ergeben sich durch sehr niedrige Investitions- und Betriebskosten. Hinsichtlich des Wirkungsgrades der passiven Systeme zur Methanoxidation liegen allerdings nur unzureichende Untersuchungsergebnisse vor. Die Durchströmungsverhältnisse und die Sauerstoffversorgung im Filter bleiben unbeeinflusst und sind u. a. stark von den Witterungseinflüssen (Luftdruck, Temperatur, Niederschläge, etc.) abhängig.

1.2 Gasbehandlungskonzept der Deponie Horb-Rexingen

Zur Minimierung der Restgasemissionen von Hausmülldeponien und Altablagerungen bietet sich der mikrobielle Abbau der Geruchs- und Methanemissionen mittels kontrollierter Absaugung und anschließender kontrollierter Ableitung in einen Biofilter mit aktiver Durchströmung an.

Bei vorhandenem Gasfassungssystem und bestehender Gasabsauganlage lassen sich dabei zwei Abbaustufen kombinieren, die auf der Deponie Horb-Rexingen in einer ersten Versuchsbetriebsphase 1999 realisiert wurden.

Der Methanoxidationsfilter als Teil des neuen Gasbehandlungskonzeptes wurde Ende Oktober 1999 in Betrieb genommen. Nach einem ca. einjährigen Probetrieb wurde die Versuchsphase I abgeschlossen.

Nach Auswertung der Ergebnisse der Versuchsphase I wurde das Konzept weiterentwickelt. Im Vordergrund stand die weitere Erhöhung der Abbauleistung im Deponiekörper sowie die Verbesserung der Sauerstoffversorgung im Filter (Versuchsphase II).

Die aktive Luftversorgung des Methanoxidationsfilters wurde am 28. November 2001 in Betrieb genommen. Damit begann die ca. einjährige Versuchsphase II. Im vorliegenden Abschlussbericht des Projektes sind die Ergebnisse dieser Versuchsphase II zusammengefasst. Ergebnisse aus der Versuchsphase I wurden - soweit für Vergleichszwecke von Interesse - zum Teil ebenfalls in den Bericht eingearbeitet.

2 Allgemeine Angaben zur Deponie Horb-Rexingen

Geographische Lage	Topografische Karte Blatt Nr. 7517 - Höhe: 555,20 m ü NN
Art - Form - Phase der Deponie	Siedlungsabfalldeponie (Altdeponie) - Haldendeponie Verfüllung abgeschlossen, Stilllegungsphase
Deponiekapazität	Inbetriebnahme/Verfüllende: 1974/1999 gesamte Ablagerungsfläche: 6,0 ha gesamtes Verfüllvolumen (Siedlungsabfälle): 454.000 m ³ Abschnitt A I: „Altteil“ 2,3 ha, 180.000 m ³ Verfüllvolumen Abschnitt A II: „Neuteil“ 3,2 ha, 274.000 m ³ Verfüllvolumen (einschließlich Resterschließung zwischen A I und A II: 0,7 ha) Erd- und Bauschuttdeponie 0,5 ha, 35.000 m ³ Volumen
geologische Verhältnisse	Muschelkalk, verkarstet
technische Barriere	Die Barriere wurde im Abschnitt A II und im Bereich der Resterschließung/Zwischenabschnitt technisch verbessert. Aufbau im Bauabschnitt 2: Mineralische Dichtung, k-Wert: 10 ⁻⁸ m/s, Schichtmächtigkeit: 0,75 m (Lehm). Aufbau im Bereich der Resterschließung: Kombinationsdichtung k-Wert: 10 ⁻¹⁰ m/s, Schichtmächtigkeit: 0,75 m (Lehm), Kunststoffdichtungsbahn: d = 2,5 mm
Aufbau des Deponiekörpers	Abschnitt A I: Kippkante Abschnitt A II: Dünnschichteinbau
Oberflächenabdichtung/-abdeckung	Abschnitt A I: temporäre Erdabdeckung Abschnitt A II: temporäre Erdabdeckung
Rekultivierung	Abschnitt A I und A II: i. d. R. Grasbewuchs
Sickerwasserfassung	Abschnitt A I: Sickerwasserrigolen, Ableitung im freien Gefälle Abschnitt A II: System aus Sauger und Sammlern einschl. Flächenfilter, Ableitung des Sickerwasser im freien Gefälle aus dem Deponiekörper

3 Kurzbeschreibung des Entgasungssystems

☐ Entgasungssystem	"aktive Entgasung" - Absaugung des gefassten Deponiegases mittels Gebläse
☐ Inbetriebnahme	1995
☐ Gasfassungssystem	Auffüllabschnitt A I (Altteil): Gasdrainagen, seit Dez. 2000 vom Gasfassungssystem abgehängt Auffüllabschnitt A II (Neuteil) und Resterschließung (zwischen A I und A II): 14 + 5 Gasbrunnen
☐ Gassammelsystem	4 Entgasungsabschnitte - System mit 4 dezentralen Gassammelstellen (GSD) Einzelanschluss der Gasfassungselemente Anschluss der dezentralen Gassammelstellen an der zentralen Gassammelstelle über jeweils eine Gasansaugleitung
GSD 1	4 Gasbrunnen
GSD 2	5 Gasbrunnen
GSD 3	5 Gasbrunnen
GSD 4	5 Gasbrunnen im Bereich der Resterschließung, Neuanschluss der Gasbrunnen D 9 und D 10 sowie Umschluss der Gasbrunnen D 3, D 5 und D 7 (ehemals Anschluss an der GSD 1) im Dezember 2000. Die 5 Gasdrainagen des Altteiles wurden statt dessen stillgelegt
☐ Verdichterstation	1 Drehkolbengebläse - minimale Förderleistung: ca. 50 m ³ /h - maximale Förderleistung: ca. 250 m ³ /h - maximale Gesamtdruckdifferenz: ca. 200 mbar

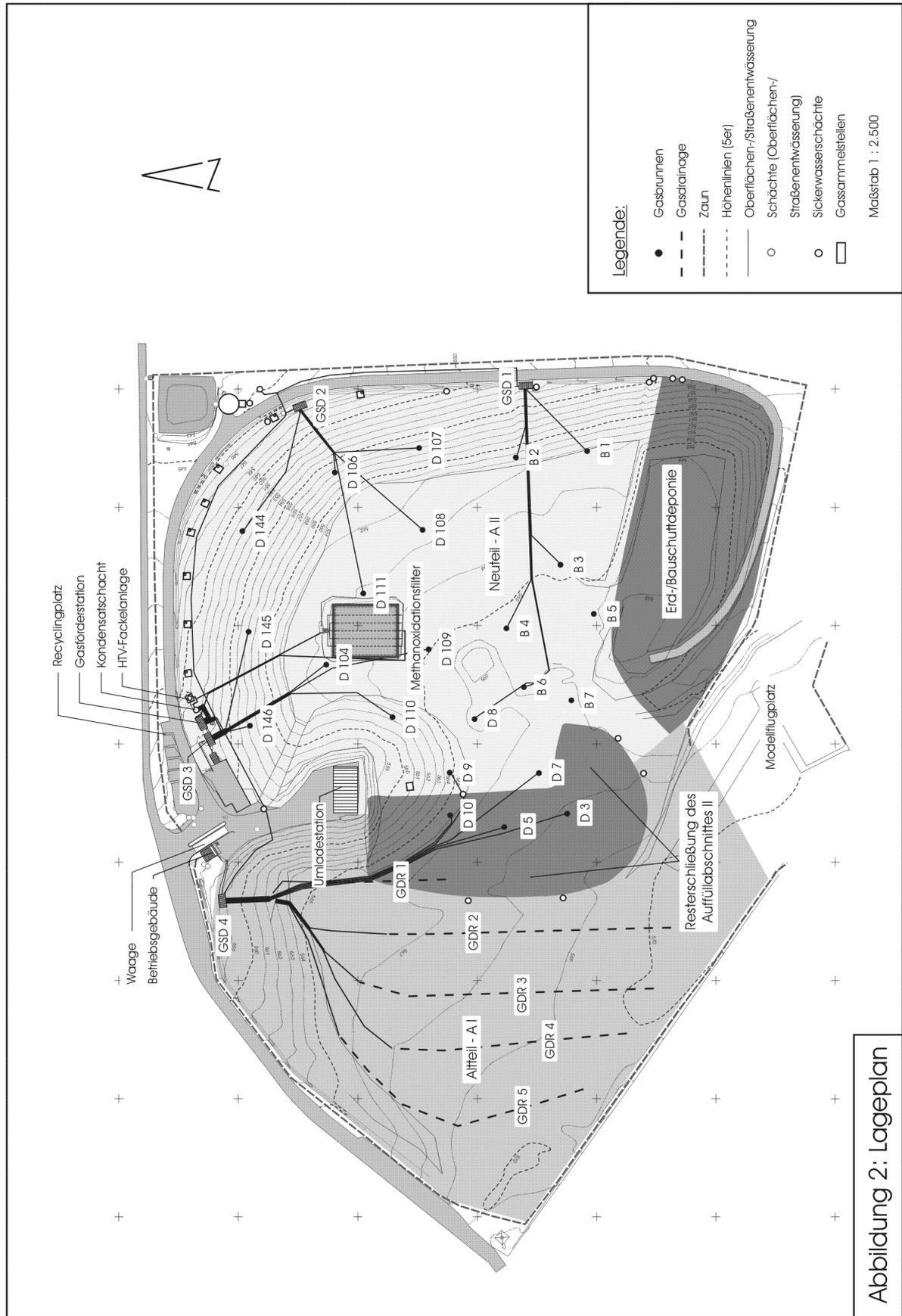


Abbildung 2: Lageplan

Die Deponie Horb-Rexingen wurde im Dezember 1999 endverfüllt. Seit Januar 2000 wurden keine Abfälle mit organischen Anteilen mehr abgelagert.

Das Gasfassungssystem besteht aktuell aus 19 angeschlossenen Gasbrunnen. Die Gasdrainagen GDR 1 - GDR 5 wurden im Dezember 2000 vom Gasfassungssystem abgehängt. Statt dessen wurden die 5 Gasbrunnen des Auffüllbereiches „Resterschließung“ an der dezentralen Gassammelstelle GSD 4 angeschlossen und in Betrieb genommen.

Von den 4 dezentralen Gassammelstellen führt jeweils eine Gasansaugleitung zur zentralen Gassammelstelle innerhalb der Gasförderstation. Von dort aus gelangt das Deponiegas mittels Gebläse zur Gasbehandlung. Der Gastransport ab der Gasförderstation erfolgt wahlweise druckseitig zur Hochtemperatur-Fackelanlage oder zum Methanoxidationsfilter.

4 Teil I - Beschleunigung der Abbauprozesse im Deponiekörper durch gezielte Steigerung der Absaugung

4.1 Grundsätzliche Effekte einer gezielten Steigerung der Absaugung

Wird eine Deponie im Unterdruckbereich zur Atmosphäre „aktiv“ entgast, so werden dadurch - je nach Intensität der Absaugung und Phase des Gashaushaltes - die Abbauprozesse im Deponiekörper unterschiedlich stark beeinflusst.

Die Beeinflussung des Gashaushaltes durch die Absaugung kann bei der Deponiegasverwertung nur bis zu einem bestimmten Maß toleriert werden. Bei Deponien der stabilen Gasphase liegt die noch akzeptierte Grenze in der Regel bei ca. 45 - 50 Vol.-% CH_4 im Hauptgasstrom. Sinkt der CH_4 -Gehalt unter den genannten Konzentrationsbereich so wird gewöhnlich die Absaugmenge - allerdings auf Kosten des Erfassungsgrades - reduziert.

Mit fortschreitendem Ablagerungsalter einer Deponie bzw. eines Deponieabschnittes nehmen die Bereiche mit stabilen anaeroben Abbauprozessen ab. Gleichzeitig reagiert der Gashaushalt zunehmend empfindlicher auf externe Einflüsse wie Luftdruckschwankungen und die Intensität der Absaugung.

Auf Deponien bzw. Deponieabschnitten, bei denen eine wirtschaftliche Betriebsweise der Gasverwertung aufgrund zu geringer Absaugmengen und zunehmend instabilem Gashaushalt nicht mehr aufrecht gehalten werden kann, rückt die Behandlung der Restemissionen zunehmend in den Vordergrund.

Gründe für die Behandlung und Minimierung der Restemissionen von Hausmülldeponien und Altablagerungen	
1. Umweltschutz	Minimierung des Treibhausgasemissionen, Minimierung der Schädigung von Flora und Fauna, Minimierung der Geruchsbelästigungen
2. Gefahrenabwehr	Minimierung des Gefährdungspotentials durch Deponiegase (Brand-, Explosions-, Erstickungs- und Vergiftungsgefahren), Vermeidung von Gasmigrationen
3. Wirtschaftlichkeit	Beschleunigung der Stabilisierung des Deponiekörpers, Verkürzung der Stilllegungs-/Nachsorgephase

Die Abbauprozesse im Deponiekörper können durch die Steigerung der Absaugung mehr oder weniger gezielt beeinflusst werden.

Durch die „aktive“ Entgasung im Bereich der abgesaugten Gasfassungselemente wird Luftsauerstoff über die Außenluft in die oberen Bodenschichten der Erdatbedeckung und den Deponiekörper transportiert. Bei entsprechend präziser Einstellung des Absaugsystems kann der angesaugte Luftsauerstoff annähernd vollständig umgesetzt werden. Dabei treten mehrere, gleichzeitig ablaufende Prozesse auf:

Beeinflussung der Abbauprozesse im Deponiekörper	
1.	Hemmung der Methanbildung durch die Veränderung der Milieubedingungen
2.	Reduktion des Methanbildungspotentials durch direkten aeroben Abbau von organischen Abfallstoffen. Induzierter aerober Abbau von Abfällen im Deponiekörper, ausgelöst durch die Absaugung und die damit verbundene Bereitstellung von Luftsauerstoff in den Abfallschichten.
3.	Beschleunigung des Abbaus der organischen Abfallstoffe durch die Schaffung aerober Milieubedingungen. Die spezifische TOC-Abbauleistung liegt beim aeroben Abbau um bis zu Faktor 5 höher als unter anaeroben Bedingungen (6).
4.	Steigerung der Methanoxidationsprozesse infolge verbesserter Sauerstoffversorgung in den oberen Abfall-/Bodenschichten

Durch die aktive Versorgung des Deponiekörpers mit Luftsauerstoff wird ein Wechsel der Milieubedingungen und damit eine Verschiebung des Verhältnisses zwischen anaeroben

und aeroben Abbauprozessen erzielt. Die Aerobisierung führt zu einer verstärkten Kohlendioxidproduktion, die insbesondere an der Veränderung des Methan/Kohlendioxidverhältnisses (CH_4/CO_2) im Gasstrom erkennbar ist (7).

Die Optimierung des Absaugbetriebes führt neben der Veränderung und Beschleunigung der Abbauprozesse darüber hinaus zu folgenden positiven Effekten:

Vorteile des optimierten Absaugbetriebes	
1.	Deutliche Steigerung des Erfassungsgrades, dadurch Reduzierung der unkontrollierten Gasemissionen an der Deponieoberfläche und der Gasmigrationen in den Untergrund bzw. das Deponieumfeld
2.	Kontrollierte Absaugung sämtlicher Gasfassungselemente und Unterdruck an den Gasfassungsstellen
3.	Kontinuierlicher Absaugbetrieb auch bei instabilem Gashaushalt möglich
4.	Anpassung der Absaugmenge an den erforderlichen Sauerstoffverbrauch, kein Sauerstoff-/Luftüberschuss dadurch keine wesentliche Temperaturerhöhung und Austrocknung des Deponiekörpers
5.	Reduzierung des Nachsorgezeitraumes für den Gaspfad. Ggf. zusätzliche positive Auswirkungen auf den Sickerwasserpfad

4.2 Betriebserfahrungen aus der Versuchsphase I

4.2.1 Betriebsweise - Anlagenverfügbarkeit - Absaugmenge

Bereits in der Versuchsphase I des Pilotprojektes wurden wichtige Betriebserfahrungen mit der Beschleunigung und Veränderung der Abbauprozesse der Deponie gesammelt. Die gesamte Deponie wurde hierbei kontinuierlich „aktiv“ entgast.

Die Einregelung und Absaugung erfolgte unter Einhaltung eines niedrigen O_2 -Gehaltes im Gesamtgasstrom. Die Absaugmenge der Gasfassungselemente richtete sich nach den jeweiligen Methan- und Sauerstoffgehalten an den einzelnen Gasfassungselementen. Im Regelbetrieb wurden alle Gasfassungselemente abgesaugt.

Während des einjährigen Versuchszeitraumes konnte die kontinuierliche Gasabsaugung sehr stabil durchgeführt werden. Längere Stillstandszeiten traten nicht auf.

Aufgrund der Ergebnisse der Wirkungskontrolle der Entgasung der Deponie Horb-Rexingen wurde eine kontinuierliche Gesamtabzugsmenge bei einem CH₄-Gehalt von ca. 20 - 25 Vol.-% von ca. 50 m³/h erwartet.

Die im Versuchszeitraum tatsächlich abgesaugte durchschnittliche Gasmenge lag mit ca. 65 Nm³/h 30 % über dem erwarteten Wert. Verantwortlich hierfür war u. a. der Abschluss der Deponie im Dezember 1999 mit der Aufbringung/Verstärkung der Erdbdeckung in Teilbereichen der Deponie und die damit verbundene Erhöhung des Gaserfassungsgrades. Der CH₄-Gehalt im Hauptgasstrom betrug ca. 24 Vol.-%. Damit wurde der aus der betrieblichen Erfahrung erwartete Zielbereich mit einem CH₄-Gehalt zwischen 20 - 25 Vol.-% und einem O₂-Gehalt: < 1 - 2 Vol.-% eingehalten.

4.2.2 Abbauraten im Deponiekörper

Der aerobe, durch die Absaugung beeinflusste Abbau des organischen Kohlenstoffes über den Gaspfad kann auf Grundlage des Sauerstoffverbrauches ermittelt werden. Hierbei wird - nach Abzug des nicht umgesetzten Fremdluftanteiles - mit Hilfe der Stickstoffkonzentration der aufgrund der Abbauprozesse im Deponiekörper verbrauchte Sauerstoff ermittelt.

Zur Ermittlung des durch die Absaugung beeinflussten, beschleunigten Abbaus organischer Kohlenstoffverbindungen im Deponiekörper lässt sich über den Sauerstoffverbrauch als Hilfsgröße ein theoretischer Methanabbau berechnen. Gemessener CH₄-Gehalt und berechneter Methanabbau ergeben eine rechnerische Anfangskonzentration, auf die die Abbaurate bezogen wird.

Durch die Absaugung werden im Deponiekörper verstärkt aerobe Abbauprozesse ausgelöst. Der Sauerstoff steht damit nicht nur für Methanoxidationsprozesse in den oberen Bodenschichten zur Verfügung sondern wird auch direkt in aeroben Abbauprozessen umgesetzt. Für die Quantifizierung der Gesamt-Abbaurate des abbaubaren Kohlenstoffes ist die Unterscheidung in Methanoxidations- und aerobe Abbauprozesse allerdings von untergeordneter Bedeutung, da nur der tatsächlich aufgrund der Sauerstoffzehrung umgesetzte organische Kohlenstoff in die Berechnung eingeht.

Die durchschnittliche Gesamt-Abbaurate im Deponiekörper lag im Versuchszeitraum der Versuchsphase I bei ca. 27 %. Dabei wurden Einzel-Abbauraten an den Gasfassungsstellen zwischen 17 und 94 % erzielt. Niedrige Einzel-Abbauraten waren auf Funktionsbeeinträchtigungen an einzelnen Fassungsstellen bzw. am Gasleitungssystem

zurückzuführen, die eine optimale Absaugung verhinderten. Sehr hohe Abbauraten wurden an Gasfassungsstellen mit nur noch geringer Gasproduktion ermittelt.

4.3 Ergebnisse der Versuchsphase II - Erhöhung der Abbauleistung im Deponiekörper

4.3.1 Betriebsstunden - Ausfallzeiten - Anlagenverfügbarkeit

Die Versuchsphase II wurde mit der Inbetriebnahme der aktiven Luftversorgung des Methanoxidationsfilters am 28. November 2001 gestartet.

In Tabelle 1 und Abbildung 3 sind die Betriebsstunden, Stillstandszeiten und die Verfügbarkeit der Entgasungsanlage für den Versuchszeitraum Dez. 2001 - Dez. 2002 zusammengestellt.

Entgasungsanlage - Deponie Horb-Rexingen			
Monat	Betriebsstunden	Stillstandszeiten	Verfügbarkeit
	h	h	%
Dez 01	744	0	100,0%
Jan 02	744	0	100,0%
Feb 02	672	0	100,0%
Mrz 02	744	0	100,0%
Apr 02	705	15	97,9%
Mai 02	701	43	94,2%
Jun 02	720	0	100,0%
Jul 02	672	72	90,3%
Aug 02	677	67	91,0%
Sep 02	576	144	80,0%
Okt 02	144	600	19,4%
Nov 02	700	20	97,2%
Dez 02	596	148	80,1%
Gesamt	8.395	1.109	88,3%

Tabelle 1: Betriebsstunden, Stillstandszeiten und Anlagenverfügbarkeit im Versuchszeitraum

Von Dezember 2001 bis einschließlich Juli 2002 lag die Verfügbarkeit der Entgasungsanlage bei annähernd 99 %.

Ab Juni bis Oktober 2002 führten hohe Druckverluste und Druckschwankungen im Bereich des saugseitigen Leitungssystems zwischen der dezentralen Gassammelstelle GSD 1 und der zentralen Gassammelstelle wiederholt zu Anlagenabschaltungen bei Absaugmengen über 200 Nm³/h.

Im Oktober 2002 blieb die Absaugung aufgrund der technischen Schwierigkeiten für insgesamt 25 Tage außer Betrieb. Ursache für den ungewöhnlich langen Anlagenstillstand

waren Ablagerungen im saugseitigen Gasleitungssystem, die erst durch eine Spülung der Leitung Ende Oktober 2002 beseitigt werden konnten.

Der längere Stillstand der Entgasungsanlage wurde unmittelbar nach Wiederinbetriebnahme der Anlage für die Bestimmung der Gaskonzentrationen an den Gasbrunnen - bei Nichtabsaugung der Deponie - genutzt.

Trotz der vorherigen intensiven Absaugung zeigten die gemessenen Gasqualitäten wieder anaerobe Abbauverhältnisse im Deponiekörper nach längerem Stillstand der aktiven Entgasung an.

Im November 2002 betrug die Anlagenverfügbarkeit wieder fast 97 %. Im Dezember 2002 traten starke Druckschwankungen - diesmal im druckseitigen Leitungssystem - auf. Die Verfügbarkeit sank im Dezember 2002 auf ca. 80 %. Ursache für die Druckschwankungen waren Wassereinstauungen im Bereich des Leitungs-/Drainagesystem des Methanoxidationsfilters aufgrund von Setzungen am Gasverteilsystem und unzureichender Bauausführung.

Die Entwässerung des Filters erfolgt im Gegenstrom zum Gasstrom in einem gemeinsamen Leitungssystem. Bei den zum Filter transportierten, relativ hohen Gasmengen konnte das Wasser nur noch unzureichend abfließen.

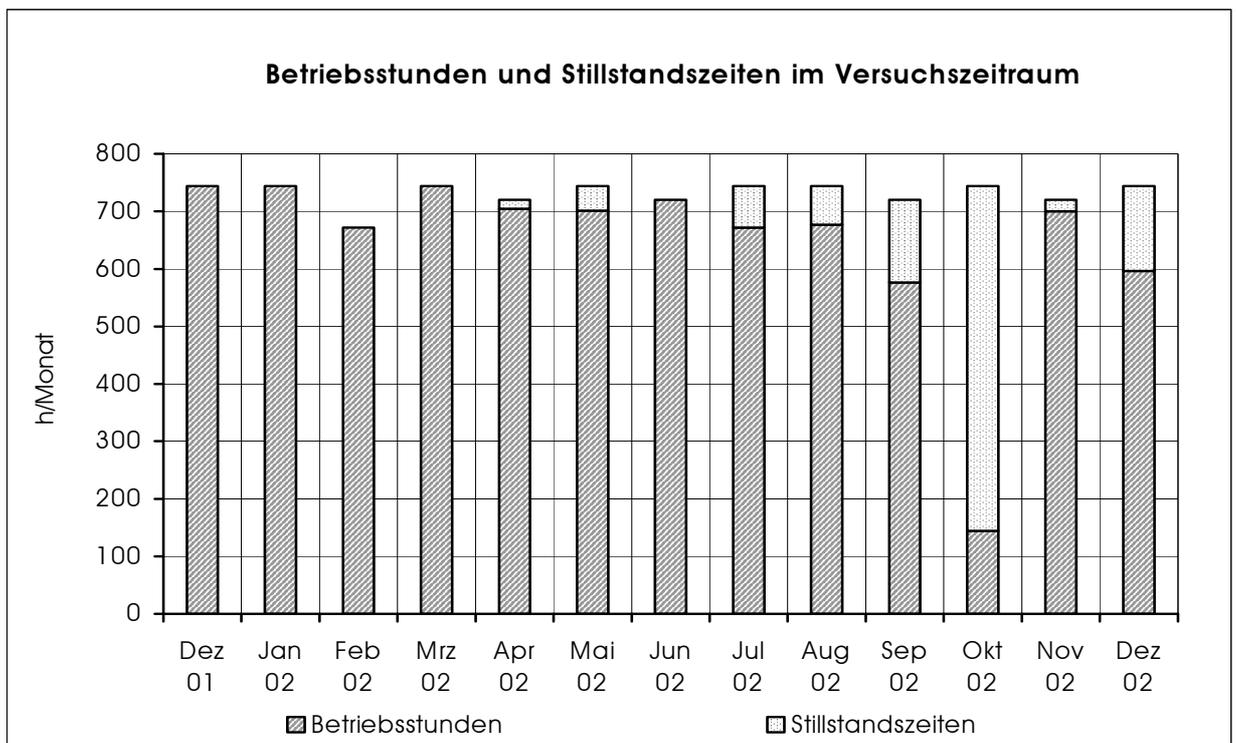


Abbildung 3: Betriebsstunden - Stillstandszeiten im Versuchszeitraum

4.3.2 Abgesaugte Gasmengen

Die im Versuchszeitraum abgesaugten monatlichen Gasmengen sind in Abbildung 4 zusammengestellt.

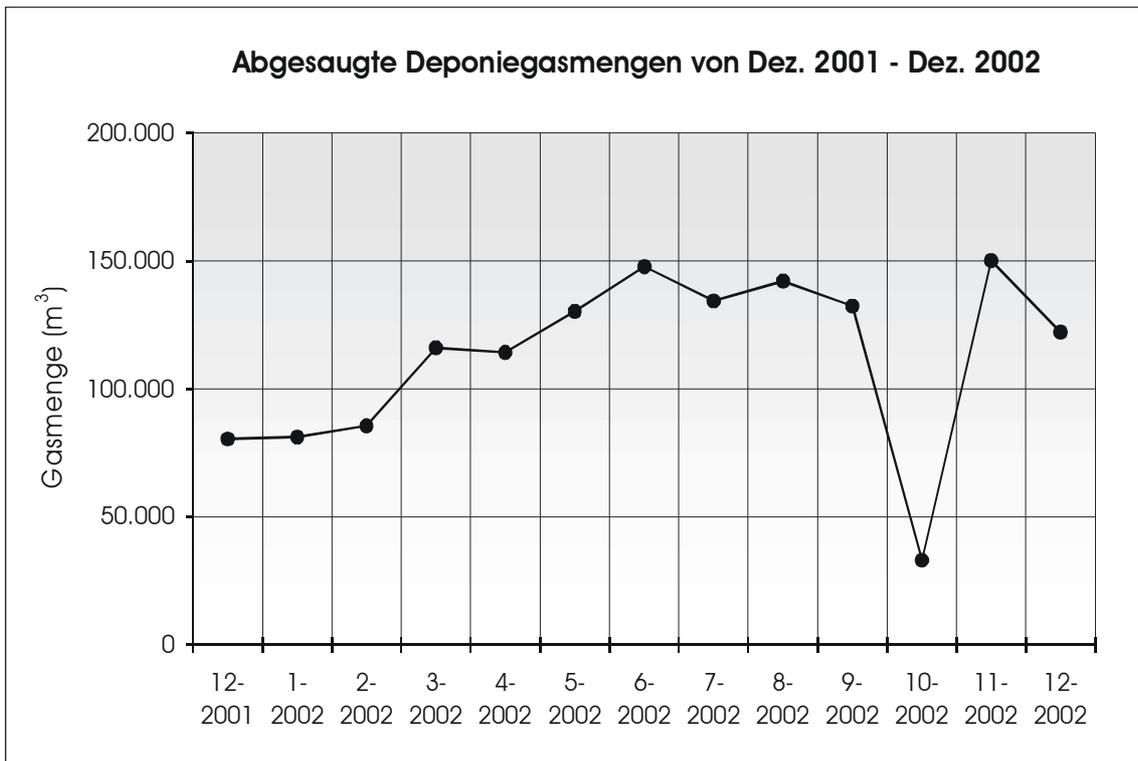


Abbildung 4: Abgesaugte monatliche Deponiegasmengen im Versuchszeitraum

Mit Beginn der Versuchsphase II im Dez. 2001 wurde die monatliche Absaugmenge von ca. 80.000 m³/Monat in den Monaten Dez. 2001 und Jan. 2002 auf ca. 130.000 - 150.000 m³/Monat in den Monaten Mai, Juni, Juli, Sept. und Nov. 2002 gesteigert. Der starke Rückgang der Absaugmenge im Oktober ist auf die lange Stillstandszeit aufgrund der o. g. technischen Probleme im Bereich der Gasfassung zurückzuführen.

Vor Beginn der Versuchsphase II lag die durchschnittliche monatliche Absaugmenge von Jan. bis einschließlich Nov. 2001 bei 46.000 m³/Monat. Die Absaugmenge wurde damit in etwa verdreifacht.

In Abbildung 5 sind die jährlich abgesaugten Gasmengen seit Beginn der Absaugung der Deponie dargestellt.

1998 betrug die bei diskontinuierlichem Fackelbetrieb abgesaugte Jahresmenge nur noch ca. 230.000 m³/a. Mit Beginn der Versuchsphase I und der kontinuierlichen Absaugung und Behandlung der gefassten Deponiegase mittels Methanoxidationsfilter konnte die

Absaugmenge in den Jahren 1999 - 2001 auf durchschnittlich ca. 550.000 m³/a gesteigert werden.

Gegenüber dem diskontinuierlichen Fackelbetrieb 1998 wurde die Absaugmenge in der Versuchsphase II um ca. 500 % gesteigert.

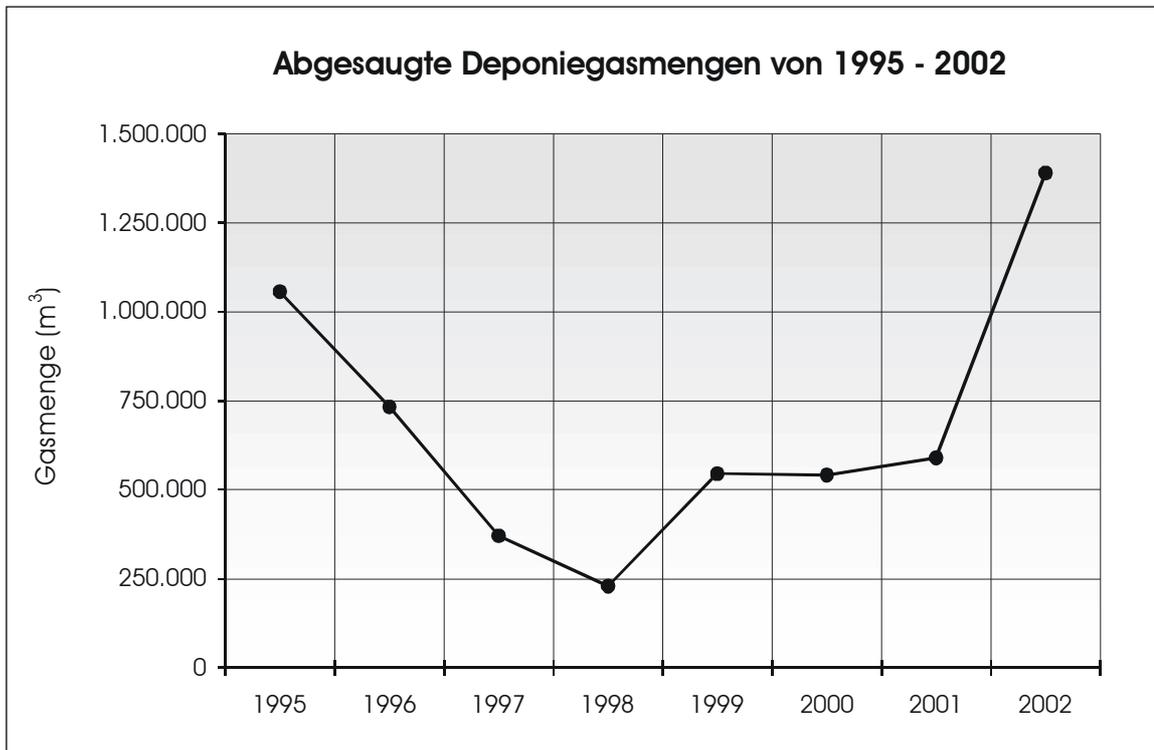


Abbildung 5: Abgesaugte jährliche Gasmengen seit Beginn der Absaugung

4.3.3 Veränderung der Gaszusammensetzung

Aufgrund der gezielten Steigerung der Absaugmenge kam es zu den in Kapitel 4.1 bereits beschriebenen Effekten.

Der CH₄-Gehalt im Hauptgasstrom sank von anfangs ca. 20 - 22 Vol.-% auf bis zu 5 - 6 Vol.-% ab. Die CO₂-Konzentration ging gleichzeitig nur von ca. 20 Vol.-% auf 17 - 18 Vol.-% zurück (vgl. Abbildung 7). Hierdurch reduzierte sich das CH₄-/CO₂-Verhältnis von ca. 0,99 im November 2001 auf bis zu 0,33 im September 2002.

Der Sauerstoff-Gehalt im Hauptgasstrom blieb während der gesamten Versuchsdauer - auch bei einer deutlich erhöhten Absaugmenge - unter 2 Vol.-%. Zu keinem Zeitpunkt wurden damit explosionsfähige Gasgemische abgesaugt.

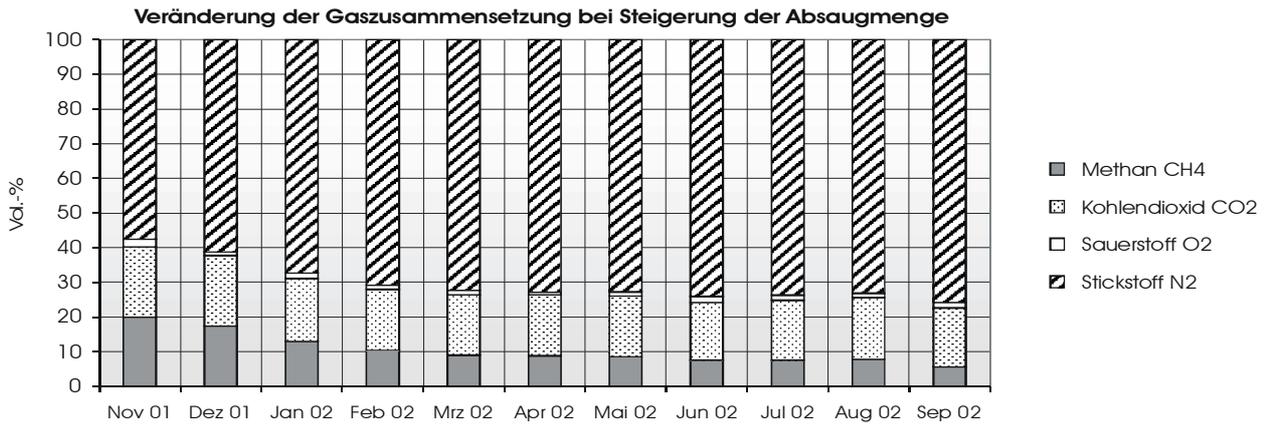


Abbildung 6: Veränderung der Gaszusammensetzung im Versuchszeitraum

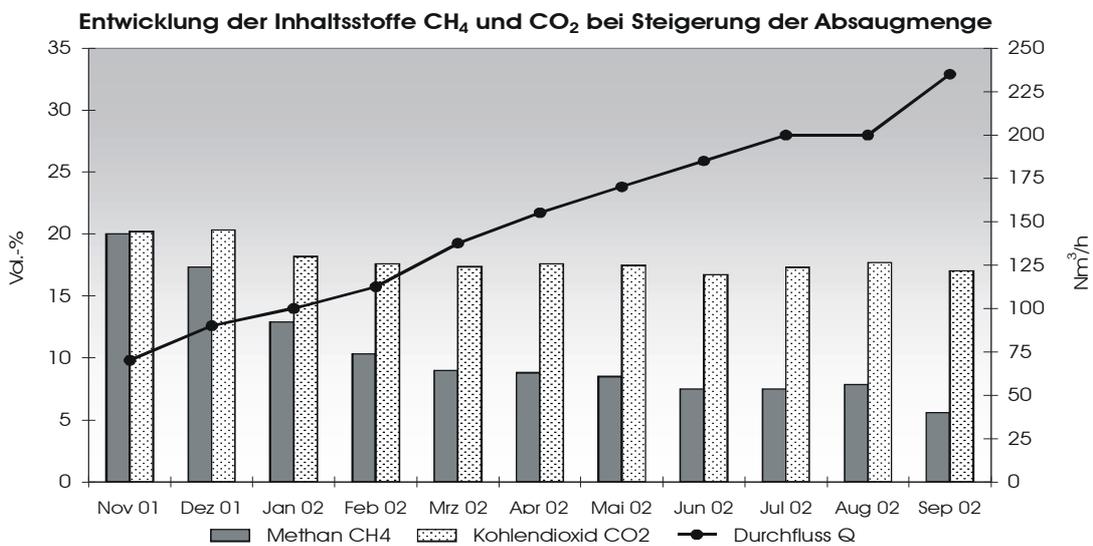


Abbildung 7: Entwicklung der CH₄- und CO₂-Konzentration bei Steigerung der Absaugmenge

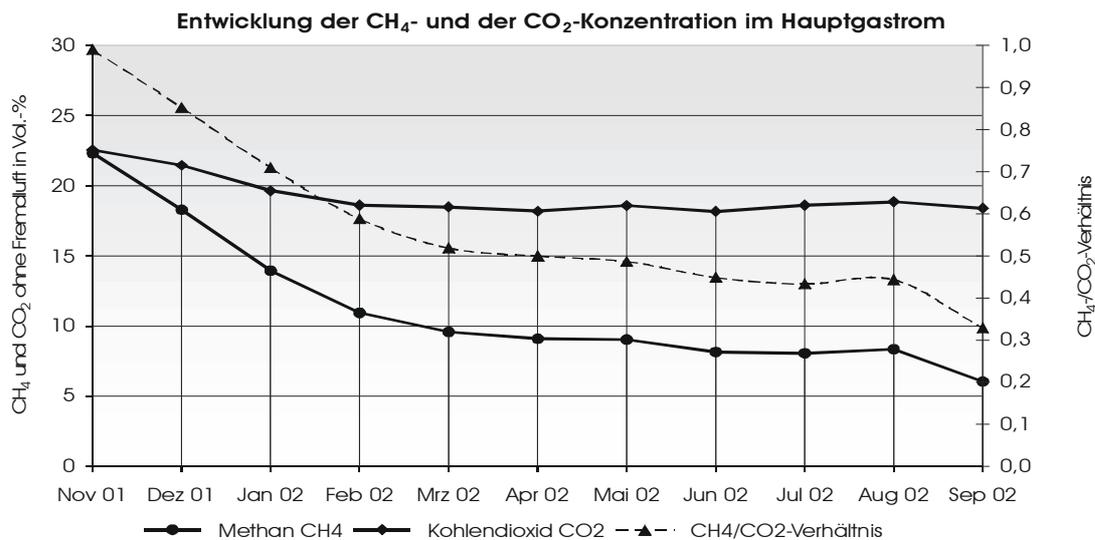


Abbildung 8: Entwicklung der fremdlufffreien CH₄- und CO₂-Konzentration

Reine Verdünnungseffekte durch eingetragene Luft wurden weitgehend verhindert. Der über den Sauerstoff-Gehalt berechnete Fremdluftanteil im Deponiegas betrug im Mittel nur ca. 6 - 7 Vol.-%. Die Umsetzung des mit Hilfe der stärkeren Absaugung in den Deponiekörper eingetragenen Luftsauerstoffes war damit sehr effektiv und führte vorwiegend zu einem Wechsel der anfänglich noch vorherrschenden anaeroben Milieubedingungen hin zu aeroben Abbauprozessen mit einer verstärkten CO₂-Produktion, erkennbar vor allem am gesunkenen CH₄-/CO₂-Verhältnis.

In Abbildung 9 ist die Entwicklung der Konzentrationen der Hauptkomponenten CH₄ und CO₂ sowie der Absaugmengen seit 1998 dargestellt. Mit Umstellung des Entgasungsbetriebes von diskontinuierlichen Fackelbetrieb auf kontinuierliche Absaugung und Behandlung des abgesaugten Deponiegases im Methanoxidationsfilter wurde die durchschnittliche Absaugmenge vervielfacht.

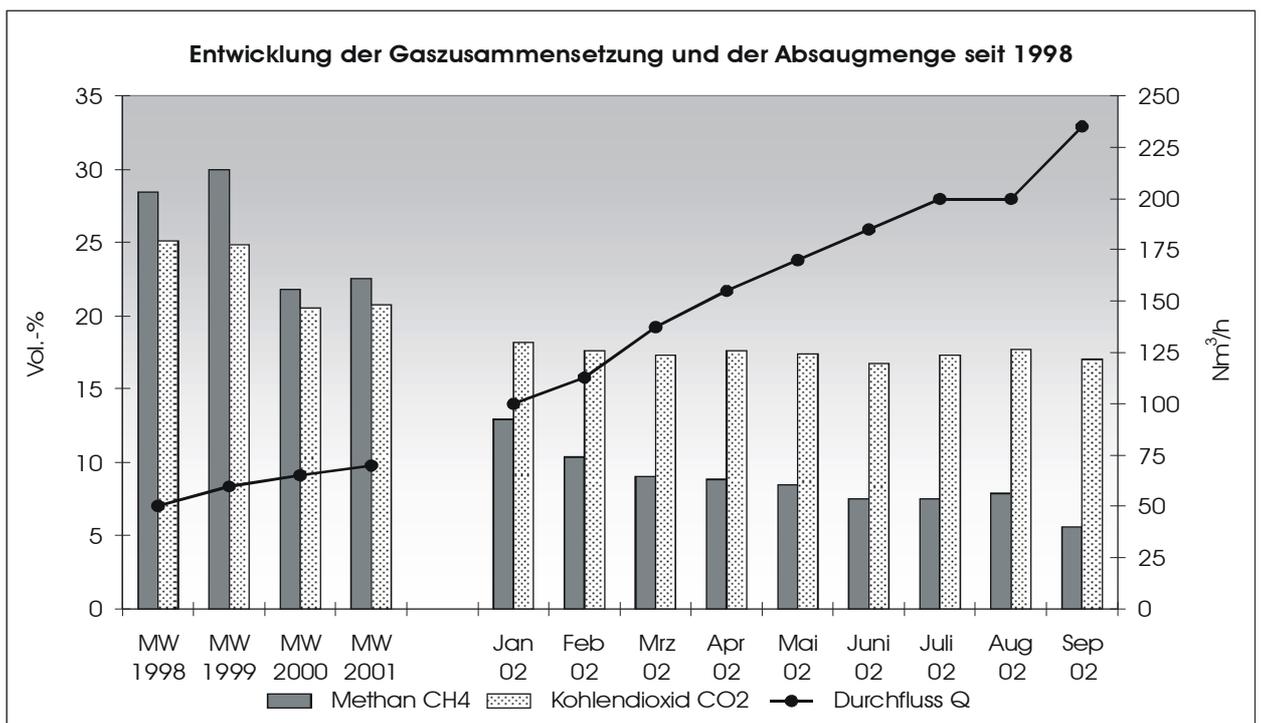


Abbildung 9: Entwicklung der Konzentrationen der Hauptkomponenten CH₄ und CO₂ sowie der Absaugmengen seit 1998

4.3.4 Entwicklung der Austragsfrachten

In Abbildung 10 und 11 sind die Entwicklungen der Ausgangsfrachten von Methan und Kohlendioxid und die der Kohlenstoffausgangsfrachten (CO₂-C und CH₄-C) im Versuchszeitraum gegenübergestellt.

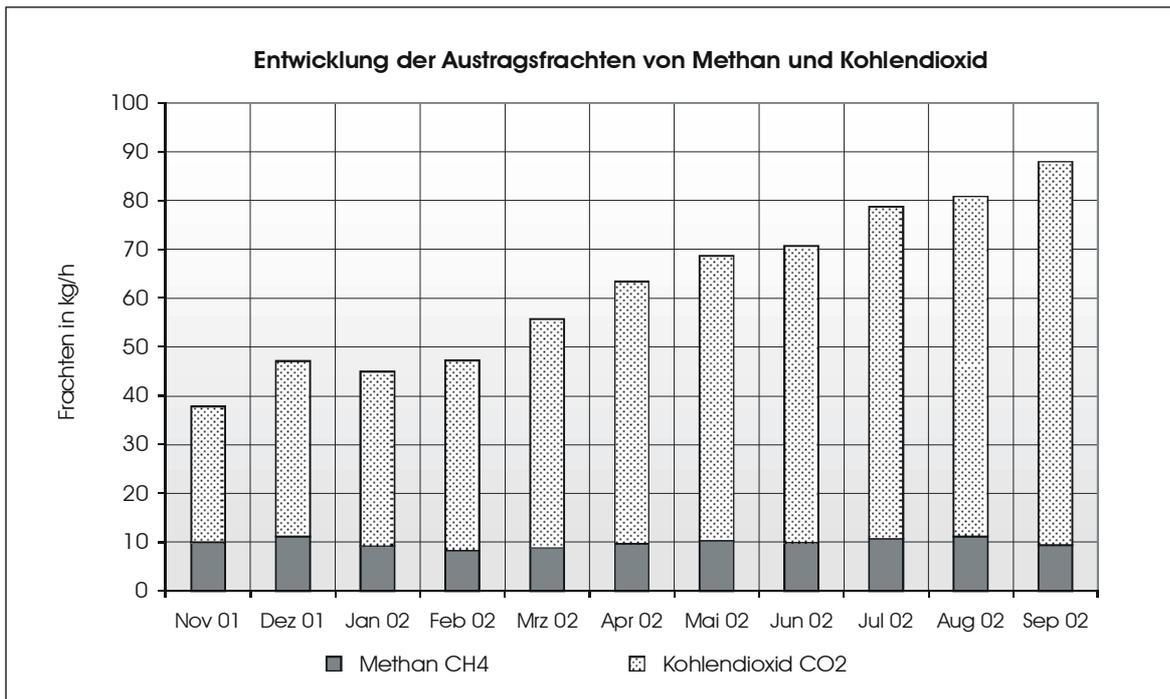


Abbildung 10: Entwicklung der Ausgangsfrachten von Methan und Kohlendioxid

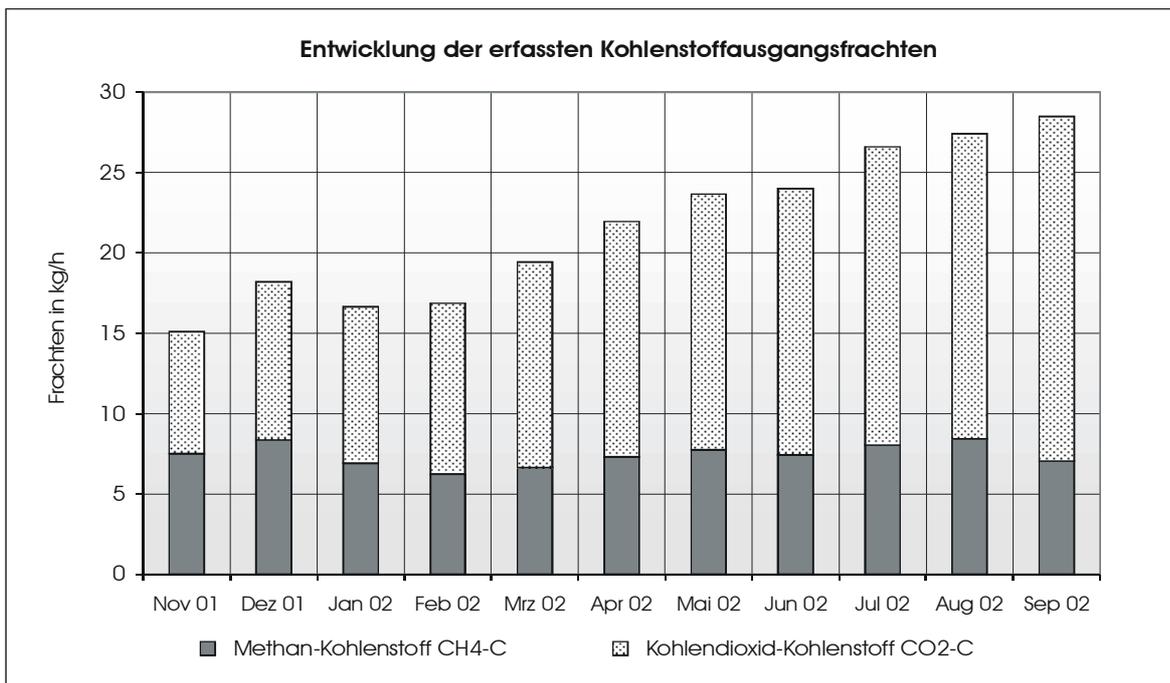


Abbildung 11: Entwicklung der Kohlenstoffausgangsfrachten

Die mit Hilfe der Absaugung erfasste CH₄-Fracht veränderte sich zwischen November 2001 (10,0 kg/h) und September 2002 (9,4 kg/h) nur unwesentlich.

Maßgeblich verantwortlich hierfür ist die Zunahme des Erfassungsgrades. Im Einzugsbereich der Gasfassungselemente wurden dabei vermutlich auch tiefere, anaerobe Abfallschichten erfasst. Die CO₂-Fracht stieg im Gegensatz zur CH₄-Fracht um

180 % von 27,8 auf 78,5 kg/h. Das CH₄-/CO₂-Frachtverhältnis ging von 0,36 auf 0,12 kg CH₄/kg CO₂ zurück.

Die CO₂-C-Kohlenstoffaustragsfracht stieg von 7,6 auf 21,4 kg/h. Das CH₄-C/CO₂-C-Frachtverhältnis nahm von 0,99 auf 0,33 kg CH₄/kg CO₂ ab. Die CH₄-C-Fracht im Bezug zur Gesamt-C-Fracht erreichte im September 2002 nur noch ca. 25 %.

4.3.5 Berechneter Abbau des organischen Kohlenstoffes im Deponiekörper auf Grundlage des Sauerstoffverbrauches

Der Abbau des organischen Kohlenstoffes über den Gaspfad kann auf Grundlage des durch die verstärkte Absaugung gesteigerten Sauerstoffverbrauches ermittelt werden (vgl. im Kap. 4.2.2). Die Berechnung des Sauerstoffverbrauches erfolgt nach Abzug des nicht umgesetzten Sauerstoff-/Fremdluftanteiles mit Hilfe des Stickstoffs im Deponiegas (detaillierter Berechnungsansatz zur Ermittlung der Abbauleistung im Deponiekörper: s. Anhang A - Blatt A 1).

Im Anhang A - Blatt A 2 sind neben den berechneten durchschnittlichen Abbauraten der Einzel-Gasströme der Gasbrunnen, die durchschnittlichen Absaugmengen und die fremdluftfreien, mittleren CH₄-Konzentrationen zusammengefasst (Datenbasis: sämtliche Messwerte im Versuchszeitraum November - Januar 2003). Aufgeführt sind außerdem die durchschnittliche Gesamtabaugmenge, die CH₄-Konzentration und die mit Hilfe der Einzel-Absaugmengen gewichtete Gesamt-Abbauraten.

Da die Auswertung sämtlicher Messwerte den Fortschritt der gezielten Steigerung der Absaugmenge nicht wiedergibt, wurden zusätzlich die Daten der beiden Messtage 13. August und 11. September 2002 und des Weiteren ausschließlich die Messdaten am 11. September 2002 ausgewertet (vgl. Anhang A - Blatt A 3 - A 4).

Die durchschnittliche Gesamt-Abbauraten im Deponiekörper betrug im Versuchszeitraum bei einer durchschnittlichen Gesamtabaugmenge von 153 Nm³/h ca. 48 %. Die Absaugmenge wurde kontinuierlich gesteigert und erreichte am 11. September 2002 einen Maximalwert von 235 Nm³/h.

Eine weitere Steigerung der Absaugmenge und damit der Abbauraten konnte aufgrund technischer Schwierigkeiten im saug- bzw. druckseitigen Leitungssystem nicht weiterverfolgt werden. Tabelle 2 fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen.

Tabelle 2: Erzielte Abbauraten im Deponiekörper - Berechnung auf Grundlage des Sauerstoffverbrauches -		
Datenbasis	Ergebnisse	
sämtliche Messwerte von November 2002 bis Januar 2003	Ø Gesamtabaugmenge: Ø CH ₄ -Konzentration (fremdluftfrei): Ø Gesamtabbaurrate:	153 Nm ³ /h 11,9 Vol.-% 48 %
Messwerte am 13. August 2002 und 11. September 2002	Ø Gesamtabaugmenge: Ø CH ₄ -Konzentration (fremdluftfrei): Ø Gesamtabbaurrate:	218 Nm ³ /h 7,0 Vol.-% 60 %
Messwerte am 11. September 2002	Ø Gesamtabaugmenge: Ø CH ₄ -Konzentration (fremdluftfrei): Ø Gesamtabbaurrate:	235 Nm ³ /h 6,3 Vol.-% 62 %

Ergebnisse der Messungen am 11. September 2002

Bei einem fremdluftfreien CH₄-Gehalt im Hauptgasstrom von Ø 6,3 Vol.-% wurde eine maximale durchschnittliche Abbaurrate von 62 % erzielt. Die Einzel-Abbauraten betragen zwischen 38 und 97 %. 6 der 18 Gasbrunnen wiesen Abbauraten < 60 % auf. Ursache für die niedrigeren Abbauraten sind hauptsächlich erhöhte Fremdluftzutritte bei stärkerer Absaugung infolge von Undichtigkeiten an bzw. im Einzugsbereich der Gasbrunnen. Dadurch überwiegen Verdünnungseffekte bei stärkerer Absaugung.

Die Messergebnisse der Überprüfung des Gasfassungssystems sind in Anhang A - Blatt-Nr. 8 - 10 - dokumentiert. Zu Vergleichszwecken sind die Messwerte vom 13. August und die Messwerte vom 22. Oktober 2002 - nach längerem Anlagenstillstand - aufgeführt. Ergänzend hierzu sind die Ergebnisse in Abbildung 12 grafisch dargestellt.

16 der 19 angeschlossenen Gasbrunnen wurden zum Zeitpunkt der Überprüfung abgesaugt. Die beiden Gasbrunnen D 8 und B 4 wurden mit zusammen ca. 147 Nm³/h am stärksten abgesaugt. Die Gasfassungselemente lassen sich nach den CH₄-gehalten wie folgt einteilen:

CH₄-Gehalte < 5 Vol.-%: 7 Gasbrunnen wiesen CH₄-Konzentrationen < 5 Vol.-% auf; Mengenanteil im Bezug zur Gesamtgasmenge: 41 % = 96,6 von 235 Nm³/h.

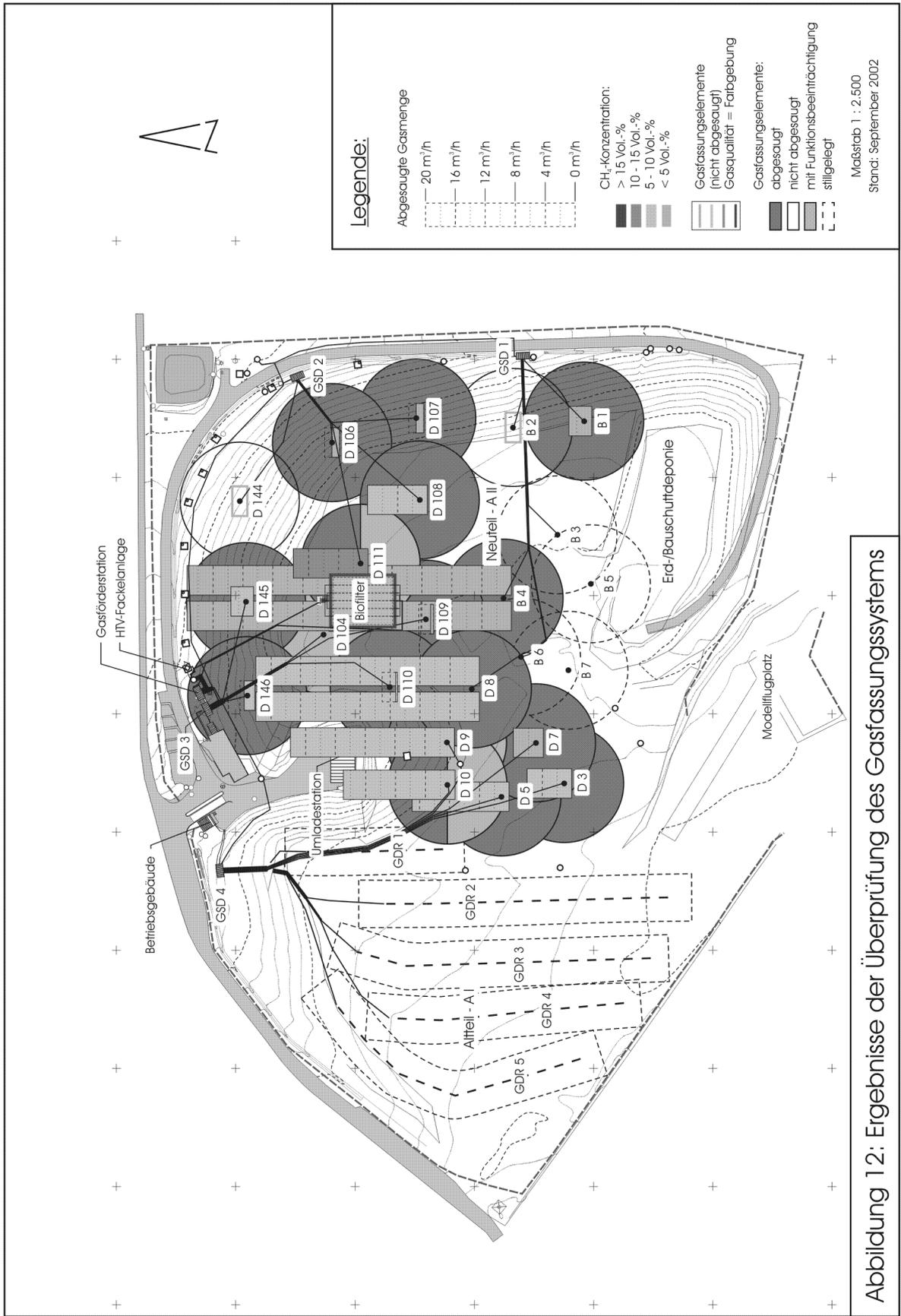


Abbildung 12: Ergebnisse der Überprüfung des Gasfassungssystems

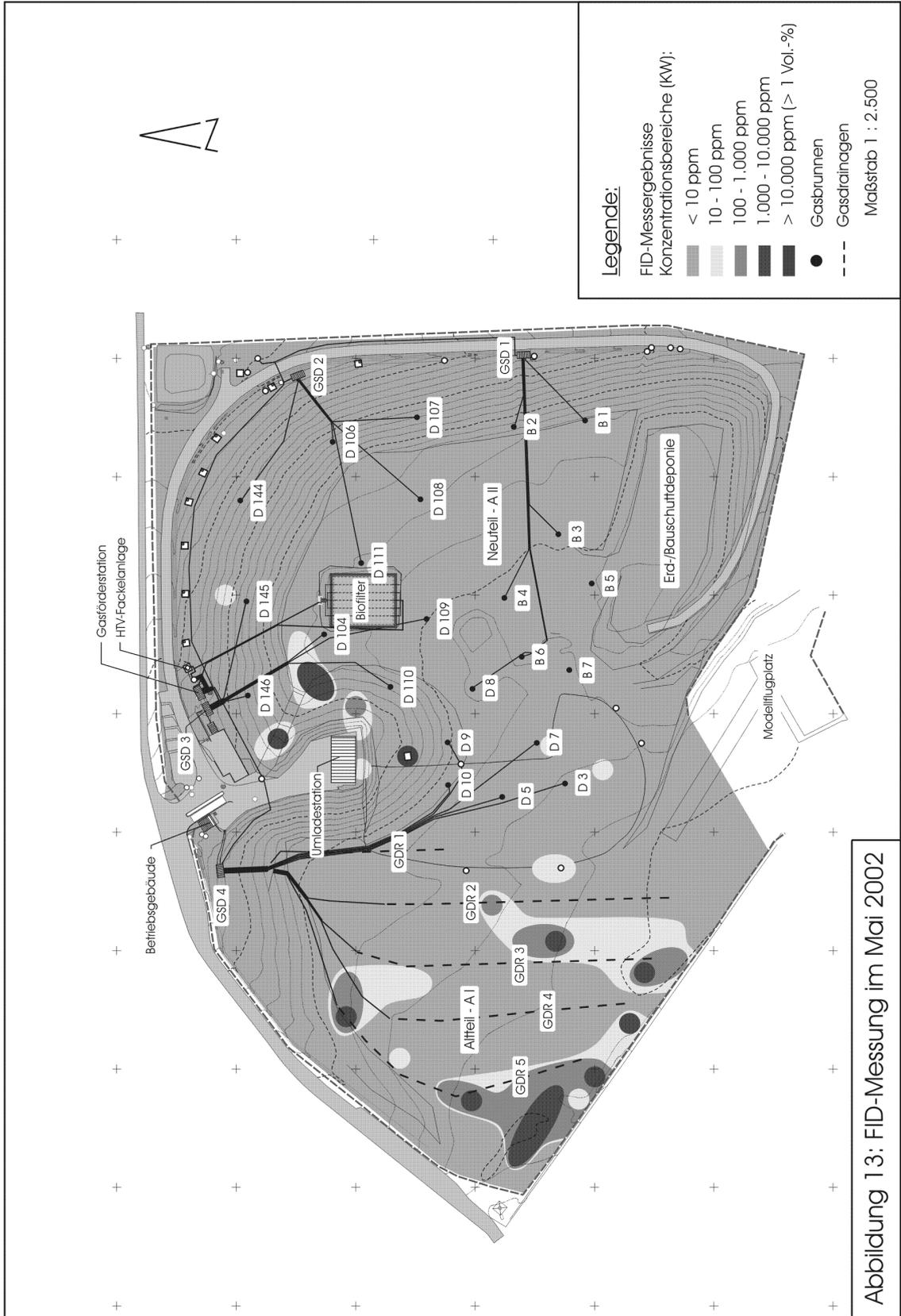


Abbildung 13: FID-Messung im Mai 2002

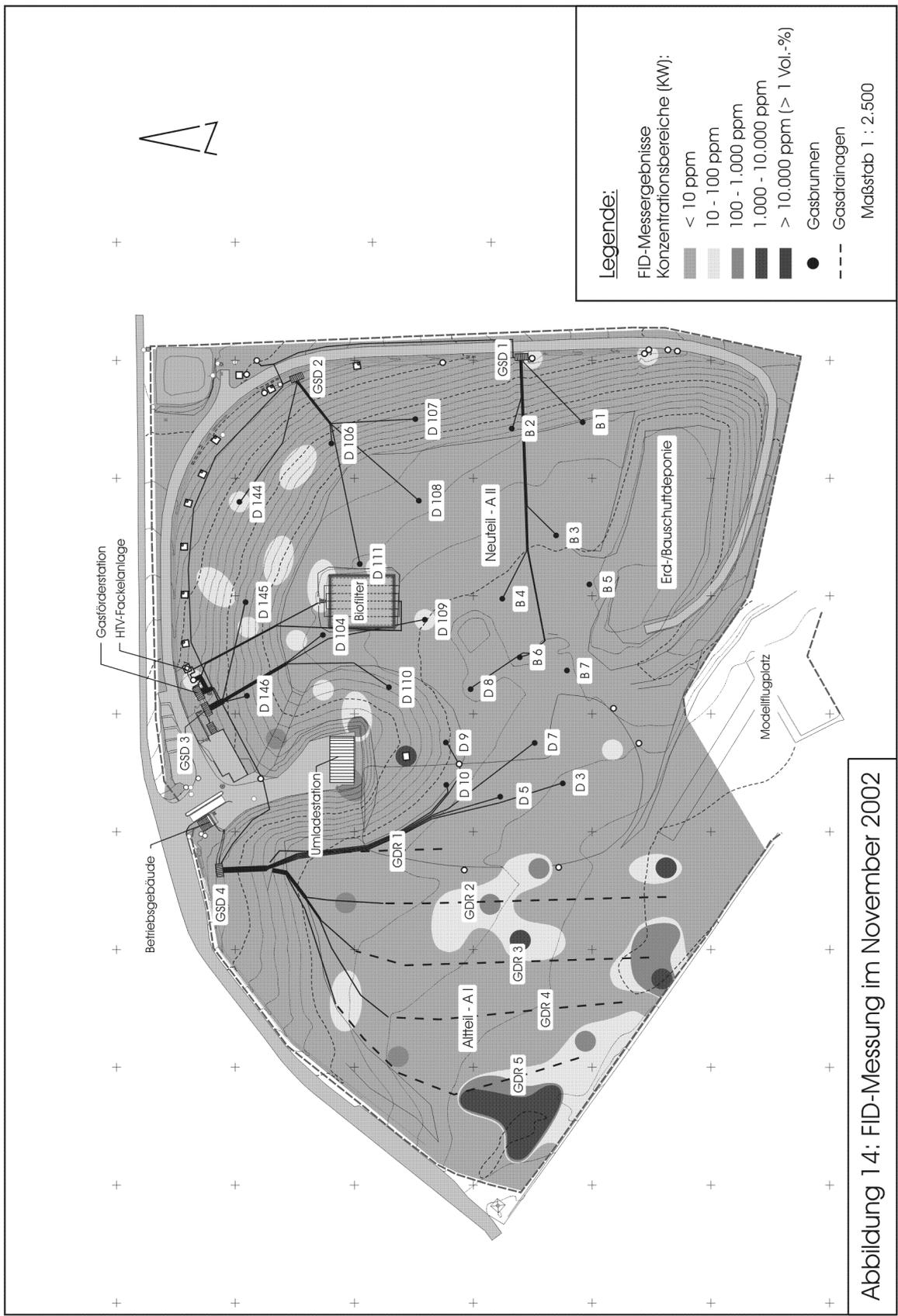


Abbildung 14: FID-Messung im November 2002

Die an der gesamten Deponieoberfläche 2002 gemessenen Kohlenwasserstoffkonzentrationen lagen zu ca. 95,6 - 95,9 % im Konzentrationsbereich < 100 ppm. Damit wurden bei beiden Messungen sehr niedrige Emissionswerte erzielt.

Erhöhte Gasaustritte wurden vor allem noch im Altteil (Auffüllabschnitt A I) gemessen. Grund: Der Altteil wird - nach Stilllegung der Absaugung der 5 Gasdrainagen im Dezember 2000 - nicht mehr entgast.

Die insgesamt niedrigen Emissionswerte auf der gesamten Deponiefläche wurden trotz der Nichtabsaugung des Deponiealtteiles erzielt. In den beiden effektiv entgasten Abschnitten „Neuteil“ (Auffüllabschnitt A II) und „Resterschließung“ (Abschnitt zwischen A I und A II) wurden kaum noch erhöhte Gasemissionen gemessen.

Zur Veranschaulichung der gesamten Entgasungssituation sind in Abbildung 15 beispielhaft die Ergebnisse der Überprüfung des Entgasungssystems und der FID-Messung im November 2002 zusammen dargestellt.

FID-MESSUNGEN VON 1998 - 2002

Die Ergebnisse der FID-Messungen von 1998 - 2002 sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

KW-Konzentration	Anzahl der Messpunkte im jeweiligen Konzentrationsbereich in % (Mittelwerte)				
	1998	1999	2000	2001	2002
☐ < 10 ppm	71,2%	74,1%	78,4%	80,8%	90,2%
☐ 10 bis 100 ppm	20,6%	19,4%	16,5%	13,7%	5,6%
☐ 100 bis 1.000 ppm	6,4%	4,8%	2,7%	3,1%	2,2%
☐ > 10.000 ppm	1,7%	1,6%	2,4%	2,4%	2,1%
☐ < 100 ppm	91,9%	93,6%	94,9%	94,5%	95,8%
☐ > 100 ppm	8,1%	6,4%	5,1%	5,5%	4,2%

Tabelle 4: Ergebnisse der FID-Messungen von 1998 - 2002

Die Emissionssituation hat sich seit 1998 fortlaufend verbessert. Während 1998 noch 8,1 % der Messpunkte im Konzentrationsbereich > 100 ppm gemessen wurden, reduzierte sich dieser Anteil auf 4,2 % im Jahr 2002.

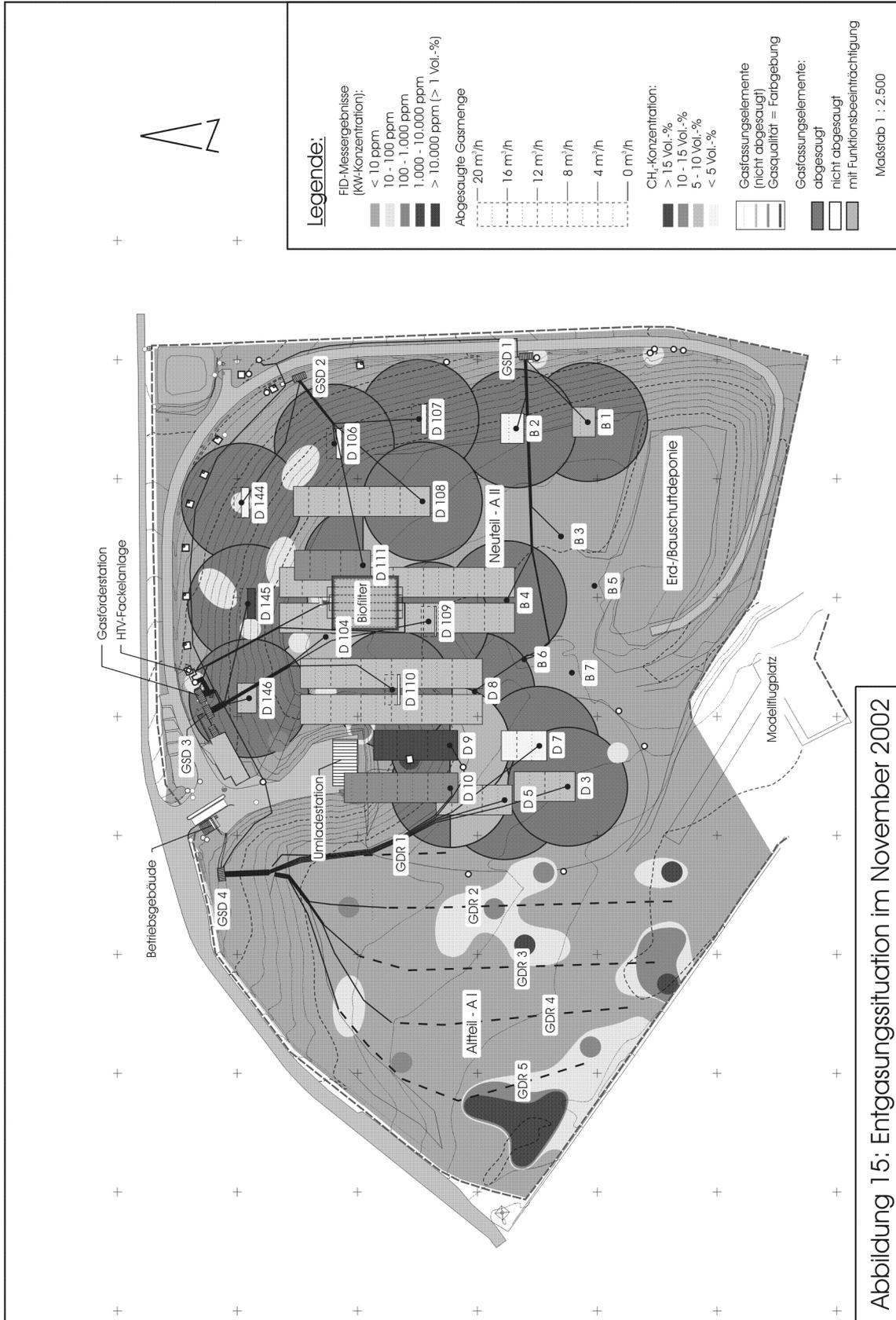


Abbildung 15: Entgassungsituation im November 2002

4.3.7 Gashaushalt der Deponie nach längerem Anlagenstillstand

Aufgrund technischer Schwierigkeiten im saugseitigen Leitungssystem musste die Absaugung der Deponie im Oktober 2002 für einen verhältnismäßig langen zusammenhängenden Zeitraum von 20 Tagen unterbrochen werden. Die Unterbrechung der Entgasung wurde für die Bestimmung der Gaskonzentrationen an den einzelnen Gasbrunnen - bei längerer Nichtabsaugung der Deponie - genutzt. Die Ergebnisse sind im Anhang A - Messprotokolle Blatt-Nr. A 8 - A 10 - dokumentiert.

Die gemessenen Gasqualitäten zeigten einen sehr deutlichen Wiederanstieg der anaeroben Abbauprozesse im Deponiekörper, ausgedrückt durch die vergleichsweise hohen CH₄-Gehalte und CH₄/CO₂-Verhältnisse.

Nachfolgend wird - in Anlehnung an einem, entsprechend neueren Erkenntnissen fortgeschriebenen Modell (8) zur Charakterisierung der Gasphasen - der Versuch unternommen, die einzelnen Gasbrunnen auf Basis ihrer Gaszusammensetzung einzuteilen.

Tabelle 5: Einteilung der Gasbrunnen nach dem Gasphasenmodell		
Phase	Gasbrunnen	Charakterisierung
Phase V - Langzeitphase	alle 5 Gasbrunnen der GSD 4 im Bereich der Resterschließung: D 3, D 5, D 7, D 9, D 10	CH ₄ -Gehalt: > 60 Vol.-% (fremdluftfrei) CH ₄ /CO ₂ -Verhältnis: 1,7 - 2,3
Phase VI - relativ weit fortgeschrittene Lufteindringphase	alle 4 Gasbrunnen der GSD 1 und 1 Gasbrunnen der GSD 3: B 1, B 2, B 4, D 8, D 146	CH ₄ -Gehalt: 40 - 50 Vol.-% CH ₄ /CO ₂ -Verhältnis: 1,5 - 1,8 Auftreten von N ₂ (ca. 25 - 35 Vol.-%), gleichzeitig O ₂ -Gehalt < 0,1 Vol.-%
Zwischenphase VI bis VII - Lufteindring-/ Methanoxidationsp hase	alle 5 Gasbrunnen der GSD 2 und 1 Gas- brunnen der GSD 3: D 106, D 107, D 108, D 111, D 144, D 145	CH ₄ -Gehalt: 10 - 30 Vol.-% CH ₄ /CO ₂ -Verhältnis: 0,6 - 1,3 N ₂ -Gehalt (ca. 45 - 65 Vol.-%), gleichzeitig O ₂ -Gehalt < 0,1 Vol.-%
Zwischenphase VII bis VIII - Methanoxidations-/ Kohlendioxidphase	2 Gasbrunnen der GSD 3: D 109 und D 110	CH ₄ -Gehalt: < 1 Vol.-% CH ₄ /CO ₂ -Verhältnis: < 0,1 N ₂ -Gehalt (ca. 80 - 85 Vol.-%), O ₂ -Gehalt 3 bzw. 12,4 Vol.-%

9 der 18 Gasbrunnen können den beiden Phasen V bzw. VI zugeteilt werden. Die Zuordnung der 5 Gasbrunnen der Resterschließung zur Phase V deckt sich mit der kurzen Ablagerungsdauer von 3 - 5 Jahren der Abfälle in diesem letzten Auffüllbereich. Unter Einbezug der Absaugmengen wurden im Versuchszeitraum 85 % der Gesamtabsaugmenge über die Gasbrunnen der beiden Phasen V und VI abgesaugt.

4.3.8 Berechnete Abbauraten im Deponiekörper unter Berücksichtigung des Gashaushaltes bei Nichtabsaugung

Die Abbauraten im Deponiekörper können - alternativ zu dem in Kap. 4.3.5 angewandten Berechnungsverfahren über den Sauerstoffverbrauch - auf Grundlage der gemessenen CH₄-Gehalte bei längerem Stillstand der Absaugung ermittelt werden.

Im Anhang A - Blatt A 5, A 6 und A 7 - sind die Messergebnisse mit dem übereinstimmenden Umfang wie in Kapitel 4.3.5 dokumentiert. In Tabelle 6 sind die unterschiedlichen Abbauraten gegenübergestellt:

Tabelle 6: Gegenüberstellung der ermittelten Abbauraten im Deponiekörper		
Datenbasis	Berechnung auf Grundlage des Sauerstoffverbrauches	Berechnung unter Berücksichtigung der Gasqualitäten bei Nichtabsaugung
Messwerte: Nov. 02 - Jan. 03	Ø Abbaurate: 48 %	Ø Abbaurate: 72 %
Messwerte: 13. Aug und 11. Sept. 02	Ø Abbaurate: 60 %	Ø Abbaurate: 83 %
Messwerte: 11. Sept. 2002	Ø Abbaurate: 62 %	Ø Abbaurate: 85 %

Für die Abbauraten der biologischen Umsetzungsprozesse im Deponiekörper ergeben sich auf Grundlage der gemessenen Gasqualitäten bei Nichtabsaugung z. T. deutlich höhere Werte im Vergleich zum Berechnungsverfahren auf Basis des Sauerstoffverbrauches.

Die durchschnittliche Gesamt-Abbaurate im Deponiekörper betrug im Versuchszeitraum auf Grundlage der gemessenen Gasqualitäten bei Nichtabsaugung ca. 72 %. Bei den im Versuchszeitraum am 11. September erzielten bestmöglichen Absaugbedingungen konnte die Abbaurate noch auf 85 % gesteigert werden.

Diskussion zu den Ergebnissen der berechneten Abbauraten im Deponiekörper

Das mit Hilfe des Sauerstoffverbrauchs berechnete, theoretische Methanabbaupotential berücksichtigt die bei gezielter Absaugung im Deponiekörper tatsächlich stattfindenden komplexen Reaktionen wie Hemmung der Methanbildung, Verbesserung der Methanoxidation und die damit verbundene Verschiebung der Abbauverhältnisse zwischen anaerob und aerob offensichtlich nur unzureichend.

Auf der anderen Seite haben die auf Grundlage der gemessenen Gasqualitäten bei Nichtabsaugung ermittelten Abbauraten den Nachteil, dass für die gemessenen Ausgangskonzentrationen keine Durchfluss- bzw. Mengenströme berücksichtigt werden. Diese können mit vertretbarem Aufwand nicht exakt bestimmt werden. Es fehlen also belastbare Daten zu den bei Nichtabsaugung der Deponie zu erwartenden Emissionsmassenströme.

In der Literatur (8) finden sich zwar Angaben wie eine durchschnittliche flächige spezifische Restemissionen zwischen 4 und 20 l/(m² x h) z. B. unter Berücksichtigung einer Schütthöhe zwischen 15 und 30 m.

Bezogen auf die Ablagerungsfläche des Abschnittes A II (Neuteil einschließlich Resterschließung zwischen A I und A II) der Deponie Horb-Rexingen von ca. 3,2 ha und Berücksichtigung der im Bereich des Abschnittes A II durchschnittlichen Schütthöhe von 8 - 9 m lassen sich Restemissionen in einer Größenordnung von ca. 50 - 250 m³/h abschätzen. Nachteilig ist, dass die Angaben nur eine sehr große Bandbreite abdecken und darüber hinaus die Gaszusammensetzung sowie zeitabhängige Faktoren nicht genügend beachten.

Gasprognosen liefern andererseits zwar Hinweise auf die zu erwartende theoretische Gasproduktion im zeitlichen Verlauf der Ablagerung, berücksichtigen jedoch vor allem die Phasenwechsel ab Phase V und die damit einhergehenden Einflüsse auf die Abbaugeschwindigkeit und die Gaszusammensetzung zu wenig.

Unserer Erfahrung nach können theoretische Gasprognosen, mit zusätzlichen Einschränkungen und Unsicherheiten, nur für die Gasphasen IV - „stabile Methanphase“ und V - „Langzeitphase“ eingesetzt werden.

Ohne weitere Überlegungen anstellen zu wollen, dürften sich die tatsächlichen Abbauraten in dem Werteband zwischen den beiden Berechnungsmethoden bewegen. Bei den im Versuchszeitraum am 11. September 2002 erzielten bestmöglichen Absaugbedingungen lag die Abbaurate danach sicher zwischen 62 und 85 %.

4.3.9 Auswirkungen auf die Sickerwasserzusammensetzung

In Tabelle 7 ist die Entwicklung ausgewählter Sickerwasserinhaltsstoffe zusammengestellt.

Entwicklung ausgewählter Sickerwasserinhaltsstoffe (Jahresmittelwerte)						
Parameter	Einheit	1998	1999	2000	2001	2002
pH-Wert	-	7,69	8,04	8,16	7,84	7,85
BSB ₅	mg/l	41	50	101	31	17
CSB	mg/l	1.136	1.038	1.059	851	457
NH ₄	mg/l	486	345	437	392	214
AOX	mg/l	1,08	0,93	0,61	0,53	0,48
Chlorid	mg/l	1.062	885	752	846	516
Leitfähigkeit	µS/cm	9.383	7.575	6.993	7.133	4.858
BSB ₅ /CSB	-	0,036	0,048	0,095	0,037	0,038

Tabelle 7: Entwicklung ausgewählter Sickerwasserinhaltsstoffe von 1998 - 2002

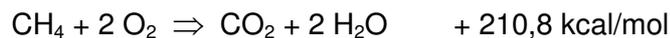
Der pH-Wert änderte sich im Vergleich zum Vorjahr nur unwesentlich. Bei den BSB₅-, CSB- und NH₄-Konzentrationen wurden im Vergleich zum Vorjahr und dem Zeitraum 1998 - 2002 wesentlich niedrigere Konzentrationen gemessen. Die AOX-Konzentration nahm dagegen nur geringfügig ab. Ebenfalls rückläufig sind die Chlorid-Konzentration und die Leitfähigkeitswerte. Der prozentuale Rückgang entspricht in etwa dem der BSB₅-, CSB- und NH₄-Konzentrationen.

2002 war ein überdurchschnittlich niederschlagsreiches Jahr. Entsprechend ausgeprägt war der Anstieg der Sickerwassermenge von 12.000 m³/a auf ca. 14.000 m³/a. Aufgrund der höheren Sickerwassermenge sind die gemessenen niedrigeren Konzentrationen im Jahr 2002 vermutlich auch auf Verdünnungseffekte zurückzuführen. Ein signifikanter Einfluss der gesteigerten Absaugung auf die Sickerwasserzusammensetzung kann daher zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht eindeutig nachgewiesen werden.

5 Teil II - Behandlung der gefassten Deponiegase im Methanoxidationsfilter

5.1 Grundlagen

Durch die Wirkung methanabbauender (methanotropher) Mikroorganismen kann Methan auf biologischem Wege abgebaut werden. Als methanotrophe Organismen werden Mikroorganismen bezeichnet, die auf Methan als alleiniger Kohlenstoff- und Energiequelle wachsen können (9). Der mikrobielle Abbau verläuft vereinfacht nach der Formel:



Pro Mol Methan werden zwei Mol Sauerstoff verbraucht und unter Wasserfreisetzung zu Kohlendioxid umgesetzt und zwar für den Fall, dass die Methanumsetzung mit den Zwischenstufen Methanol, Formaldehyd und Ameisensäure vollständig der Energiegewinnung dient (dissimilatorischer Pfad).

Beim assimilatorischen Pfad der mikrobiellen Methanoxidation findet dagegen ein Umbau zu Zellmaterial statt. Bei der Bildung der Biomasse wird damit nicht das gesamte oxidierte Methan vollständig umgesetzt. Da ein Teil des organisch gebundenen Kohlenstoffs zur Synthese von Zellsubstanz benötigt wird, beträgt der molare Sauerstoffbedarf von methanotrophen Mikroorganismen in der Praxis nicht 2 sondern bewegt sich zwischen 1,1 und 1,7 Mol O₂ pro Mol CH₄.

Neben den Eigenschaften des Substrates und der an seinem Abbau beteiligten Mikroorganismen bestimmen die Milieubedingungen im Boden bzw. Biofilter maßgeblich seine biochemische Umsetzung.

Diese mikrobielle Methanoxidation erfolgt in Bodenschichten bzw. Biofiltern unter aeroben Bedingungen. Voraussetzung für diesen biochemischen Abbau ist das Vorhandensein von Sauerstoff (10). Der Gasaustausch in Böden erfolgt im oberen Bereich durch die Einwirkung meteorologischer Faktoren wie Temperatur, Luftdruckschwankungen und Wind, in unteren Bodenschichten durch Diffusion.

5.2 Verfahrenskonzept - Methanoxidationsfilter

Das Prinzip und die Vorteile des mikrobiellen Methanabbaus können für die Minimierung der Restgasemissionen von Hausmülldeponien und Altablagerungen genutzt werden. Auf der Deponie Horb-Rexingen wurde in Kombination mit dem in Teil I beschriebenen Absaugbetrieb für die weitergehende Behandlung des abgesaugten Deponiegases ein Methanoxidationsfilter aufgebaut.

Das gefasste Deponiegas wird hierzu druckseitig zum Methanoxidationsfilter geleitet. Bei der Passage des Deponiegases durch den Filter erfolgt die weitergehende mikrobielle Umsetzung/Methanoxidation des abgesaugten Deponiegases.

Vor- und Nachteile des Einsatzes eines Methanoxidationsfilters	
Vorteile	Nachteile
- einfaches, technisch unkompliziertes Verfahren	- offenes, biologisches Verfahren, Schwankungen in der Abbauleistung
- für geringe Gasmengen geeignet	- Abhängigkeit von externen Einflüssen (Witterungsverhältnisse)
- weitergehender Abbau der abgesaugten Methanfracht	- Austrocknung/Rissbildungen bei längeren Trockenperioden
- nahezu vollständiger Abbau der Geruchsstoffe	- Sauerstoffversorgung des Filters als limitierender Faktor
- niedrige Herstell- und Betriebskosten	- begrenzte Standzeit des Filtermaterials
- geringer zusätzlicher Energieaufwand	- eingeschränkte Kontrollierbarkeit

5.3 Lage und Aufbau des Methanoxidationsfilters

Der Methanoxidationsfilter wurde als „offener Flächenfilter“ mit Durchströmung von unten nach oben konzipiert. Der Filteraufbau ist in Abbildung 16 dargestellt.

Als Standort wurde eine Teilfläche auf dem erdabgedeckten Auffüllabschnitt II ausgewählt (vgl. Lageplan, S. 5). Die Abdeckung im Bereich der Aufstandsfläche wurde um ca. 1 m verstärkt. Die Seitenflächen des Filters wurden zur Minimierung der Randgängigkeiten mit einer 0,50 - 1 m mächtigen Barriere aus bindigem Bodenmaterial aufgebaut. Die Aufstellfläche des Filters erhielt eine definierte Entwässerungsrichtung und eine 5 cm starke Ausgleichsschicht aus Sand.

Zur gleichmäßigen Beaufschlagung des Filters ist vor Eintritt in den Methanoxidationsfilter ein regelbares Gasverteilsystem vorgeschaltet. Die Verteilung des Deponiegases im Filter erfolgt durch 5 mit Kies umhüllte Gasdrainagen.

Der Biofilter selbst besteht aus einer ca. 10 cm starken Schicht aus Rindenmulch als „Anströmboden“ zur Verteilung des Gasstromes und der eigentlichen Filterfüllung. (Füllmaterial: gesiebtes Kompostmaterial mit Siebmaschenweite: ca. 10 mm, Stärke der Filterfüllung: ca. 1 m).

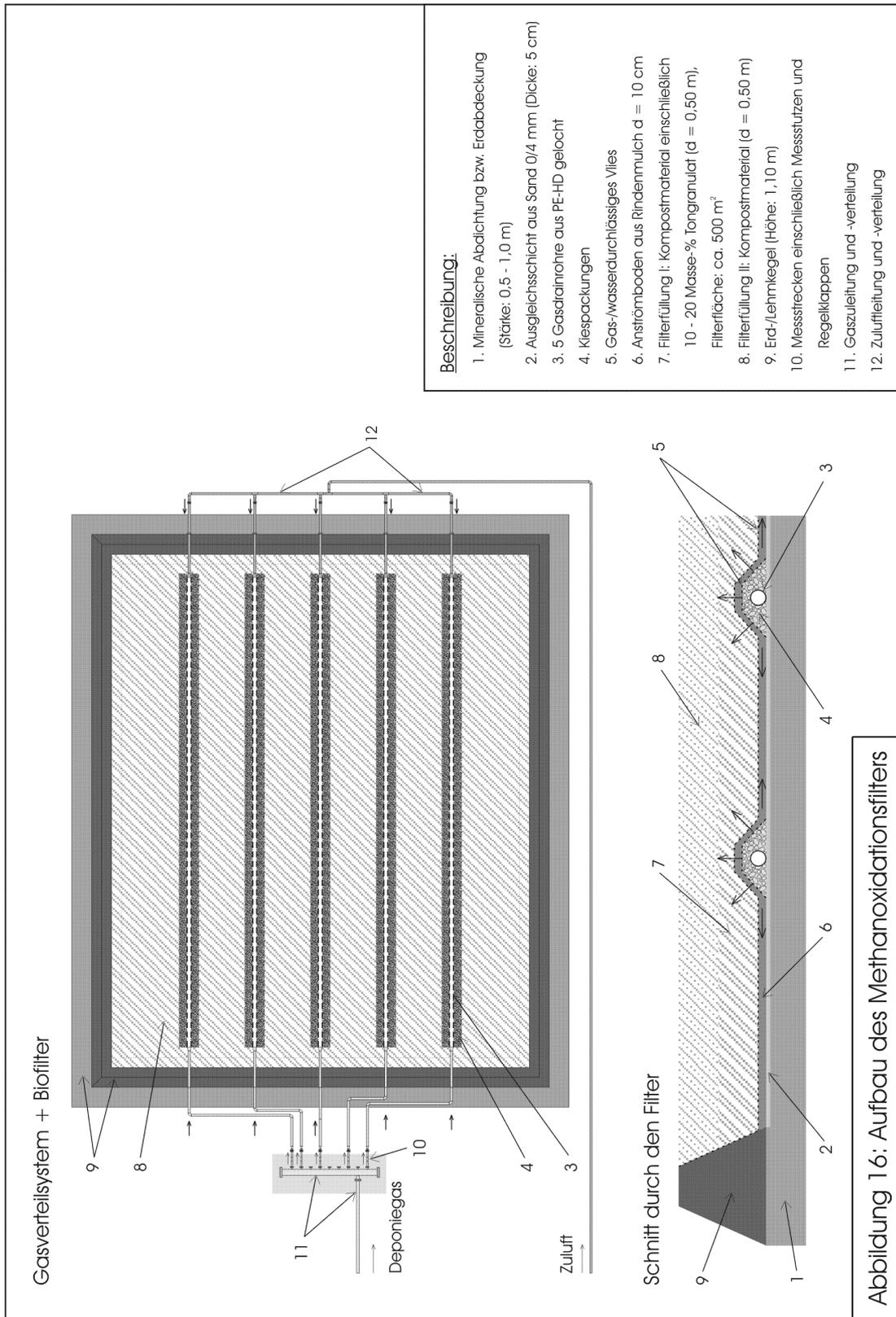


Abbildung 16: Aufbau des Methanoxidationsfilters

Dem Kompostmaterial wurde in der unteren Schicht (Stärke: ca. 0,50 m) gebrochenes Tongranulat als inerter Zuschlagsstoff zugemischt, um die Stoffaustauschfläche zu erhöhen, die Wasserhaltung zu verbessern und zusätzliche Aufwuchsflächen für Mikroorganismen zu schaffen. Das Material der Filterfüllung wurde geschichtet, möglichst ohne Verdichtung eingebaut.

Die Befeuchtung des Biofilters wurde durch natürliche Niederschläge (ca. 700 mm/a) gewährleistet. Darüber hinaus ist das einströmende Deponiegas in der Regel wassergesättigt. Der Filter wurde als Hochpunkt ausgeführt. Die Entwässerung des Filters erfolgt über die Gaszuleitung über den druckseitigen Kondensatschacht vor der Gasförderstation.

Die Zufuhr von Luftsauerstoff und der Gasaustausch mit der Atmosphäre erfolgte in der Versuchsphase I ausschließlich durch passive Einflüsse wie Wind, Temperatur- und Luftdruckschwankungen und daran anschließende Diffusionsvorgänge.

In der Versuchsphase II wurde die Sauerstoffzufuhr im Filter durch die Nachrüstung einer aktiven Luftversorgung verbessert. Hierzu wurde in der Gasförderstation ein zusätzliches Gebläse installiert. Die Luft wird dem Filter im Gegenstrom zum Gasstrom zugeführt. In der ersten Hälfte der Versuchsphase II wurden 2 der 5 Drainagen für die Zulufführung umgebaut. Diese wurde später auf sämtliche 5 Drainagen erweitert.

5.4 Auslegungsdaten des Methanoxidationsfilters

Biofilter werden üblicherweise nach den Hinweisen der VDI-Richtlinie 3477 ausgelegt, Für Methanoxidationsfilter sind diese Auslegungsgrundsätze jedoch aufgrund der nur sehr niedrigen Reaktionsgeschwindigkeiten und der damit erforderlichen langen Verweilzeiten nur eingeschränkt anwendbar.

Die wichtigste Dimensionierungsgröße für Biofilter ist die spezifische Filterbelastung - für Flächenfilter entsprechend die spezifische Flächenfilterbelastung. In der Literatur wurden für Kompost als Filtermaterial Methan-Abbauraten in einer relativ weiten Spanne von 4,5 bis 70 l CH₄/h x m² angegeben (11).

Für die Auslegung des Methanoxidationsfilters der Deponie Horb-Rexingen wurde mit einer Methan-Abbaurate = spezifische Flächenfilterbelastung von ca. 25 l CH₄/h x m² im Filter gerechnet. Bei einem prognostizierten kontinuierlichen Gasdurchsatz von 50 Nm³/h und einer durchschnittlichen Gaszusammensetzung vor dem Filter von 25 Vol.-% CH₄ wurde ein erforderliches Filtervolumen von 500 m³ ermittelt.

Die im Versuchszeitraum tatsächlich abgesaugte durchschnittliche Gasmenge lag mit ca. 65 Nm³/h ca. 30 % über den Auslegungswert. Der durchschnittliche CH₄-Gehalt im Deponiegas betrug ca. 24 Vol.-%.

Tabelle 8: Auslegungsdaten des Biofilters in der Versuchsphase I	
Ø Durchsatzmenge - Deponiegas	50 Nm ³ /h
Ø Methan/Sauerstoffgehalt	25 Vol.-% CH ₄ /1 Vol.-% O ₂
Abbauleistung P _{Abbau}	12,5 Nm ³ /h CH ₄
Flächenfilterbelastung bezogen auf Methan	25 l CH ₄ /h x m ²
Flächenfilterbelastung bezogen auf Deponiegas	100 l Rohgas/h x m ²
Filterfläche - Filtervolumen	500 m ² - 500 m ³
Verweilzeit bei 50 % Luftporenanteil	5 h
Standzeit des Filtermaterials	ca. 4 Jahre

Maßgeblich hierfür war vor allem der Abschluss der Deponie im Dezember 1999 mit Aufbringung/Verstärkung der Erdatdeckung in Teilbereichen der Deponie und die damit verbundene Erhöhung des Gaserfassungsgrades. Hierdurch resultieren die in Tabelle 9 zusammengestellten Betriebsdaten des Filters in Versuchsphase I:

Tabelle 9: Betriebsdaten des Biofilters in der Versuchsphase I	
Ø Durchsatzmenge - Deponiegas	65 Nm ³ /h
Ø Methan/Sauerstoffgehalt	24 Vol.-% CH ₄ /1 Vol.-% O ₂
Abbauleistung P _{Abbau}	15,6 Nm ³ /h CH ₄
Flächenfilterbelastung bezogen auf Methan	31 l CH ₄ /h x m ²
Flächenfilterbelastung bezogen auf Deponiegas	130 l Rohgas/h x m ²
Verweilzeit bei 50 % Luftporenanteil	3,8 h

5.5 Betriebsergebnisse der Versuchsphase I

Der Methanoxidationsfilter wurde im Oktober 1999 fertiggestellt. Anschließend begann der einjähriger Probetrieb. Während des Versuchszeitraumes wurde der Betriebszustand, die Abbauleistung sowie die Restgas-Emissionen des Filters mittels FID-, Sonden- und Haubenmessungen intensiv untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse sind nachfolgend zusammenfasst:

1. Gemäß den Ergebnissen der Sondenmessungen war der Sauerstoffgehalt im Filter der für die Methanoxidationsvorgänge limitierende Faktor. Der Methanabbau war hauptsächlich auf eine relativ dünne, oberflächennahe Schicht beschränkt. In den tieferen Filterschichten fehlte zumeist der für die Umsetzung erforderliche Sauerstoff.
2. Auf Basis der Sondenmessungen in 10 cm Tiefe wurde eine mittlere Abbauleistung des Filters von ca. 40 % ermittelt. Die Abbauleistung schwankte je nach Messstelle zwischen 0 und 90 %. Unzureichende Abbauleistungen waren vor allem bedingt durch lokale Inhomogenitäten im Filtermaterial.
3. Zwischen Abbauleistung und Durchströmungsgeschwindigkeit des Filters bestand folgender Zusammenhang: je niedriger der Volumenstrom, desto höher die Abbauleistung im Filter.
4. An der Filteroberfläche wurde ein charakteristisches Strömungsprofil festgestellt mit relativ niedrigen Emissionswerten im Zentralbereich des Filters sowie hohe, z. T. sehr hohe Emissionswerte auf der gegenüberliegenden Seite der Gaszuleitung. Auf der Grundlage der FID-Messergebnisse ist davon auszugehen, dass das Strömungsprofil im Filter und die charakteristische Verteilung der gemessenen Emissionswerte auf der Filteroberfläche bereits beim Aufbau des Filters geprägt wurde. Der Zentralbereich des Filters wurde beim Materialeinbau vermutlich zu stark verdichtet.
5. Ein Schwerpunkt weiterer Optimierungsmaßnahmen sollte in der Verbesserung der Sauerstoffversorgung im Filter liegen. Über eine damit verbundene Verbreiterung der Kontakt-/Reaktionsschicht zwischen Methan und Sauerstoff sollte sich die Abbauleistung des Filters steigern lassen. Als weitere Maßnahme sollten Materialverdichtungen durch Auflockerung/Auffräsen beseitigt und durch die Aufbringung von zusätzlichem Kompostmaterial Schwachstellen am Filterkörper reduziert werden. Die Optimierungsmaßnahmen wurden in Versuchsphase II umgesetzt.

5.6 Betriebsdaten des Methanoxidationsfilters der Versuchsphase II

Zur Verbesserung der Sauerstoffversorgung wurde der Filter durch eine aktive Luftversorgung nachgerüstet. Hierzu wurde in der Gasförderstation ein zusätzliches Zuluftgebläse mit einer maximalen Förderleistung von ca. 200 m³/h installiert. Die Luft wird dem Filter im Gegenstrom zum Gasstrom zugeführt (vgl. Abbildung 16). In der ersten Hälfte der Versuchsphase II wurden 2 der 5 Drainagen für die Zuluftführung umgebaut. Diese wurde später auf sämtliche 5 Drainagen erweitert.

Aufgrund der parallel zu den Optimierungsmaßnahmen am Filter stattfindenden Steigerung der Absaugung der Deponieentgasung, änderten sich die ursprünglichen Auslegung-/Betriebsdaten des Methanoxidationsfilters.

Tabelle 10: Betriebsdaten des Biofilters in der Versuchsphase II	
Durchsatzmenge - Deponiegas	150 - 235 Nm ³ /h
Methangehalt im Deponiegas	6 - 12 Vol.-% CH ₄
Sauerstoffgehalt im Deponiegas	1 - 2 Vol.-% O ₂
Durchsatzmenge - Zuluft	180 - 190 Nm ³ /h
Abbauleistung P _{Abbau}	14 - 18 Nm ³ /h CH ₄
Flächenfilterbelastung - Methan	28 - 36 l CH ₄ /h x m ²
Flächenfilterbelastung - Deponiegas	300 - 470 l Rohgas/h x m ²
Flächenfilterbelastung - Deponiegas + Zuluft	660 - 850 l/h x m ²
Filterfläche - Filtervolumen	500 m ² - 500 m ³
Verweilzeit bei 50 % Luftporenanteil	0,6 - 0,75 h

Die auf die Deponiegas bezogene Flächenfilterbelastung erhöhte sich um den Faktor 2,3 - 3,6; die auf Methan bezogene Flächenfilterbelastung änderte sich aufgrund des gleichzeitig niedrigeren CH₄-Gehaltes im Rohgas dagegen nur unwesentlich.

Infolge der zusätzliche Luftversorgung des Methanoxidationsfilters stieg die gesamte, dem Filter zugeführte Gasmenge Deponiegas + Zuluft auf ca. 330 bis 425 Nm³/h. Die Verweilzeit im Filter sank aufgrund der deutlich höheren Gasmenge demnach auf 0,6 bis 0,75 h ab.

5.7 Ergebnisse der Versuchsphase II -

Abbau im nachgeschalteten Methanoxidationsfilter

5.7.1 FID-Messungen an der Oberfläche des Methanoxidationsfilters

Zur Kontrolle des Betriebszustandes, der Überprüfung der Abbauleistung sowie der Rest-Gasemissionen des Filters wurden im Versuchszeitraum 3 FID-Messungen an der Filteroberfläche des Filters durchgeführt.

An der Filteroberfläche wurden 182 Messpunkte sowie im Randbereich des Filters weitere 116 Messpunkte beprobt.

Der zeitliche Verlauf der Konzentrationsverteilung der Messpunkte an der Filteroberfläche - prozentualer Anteil der Messpunkte in den Konzentrationsbereichen < 100 und > 100 ppm - seit der Inbetriebnahme des Filters im November 1999 ist in Abbildung 17 zusammengefasst.

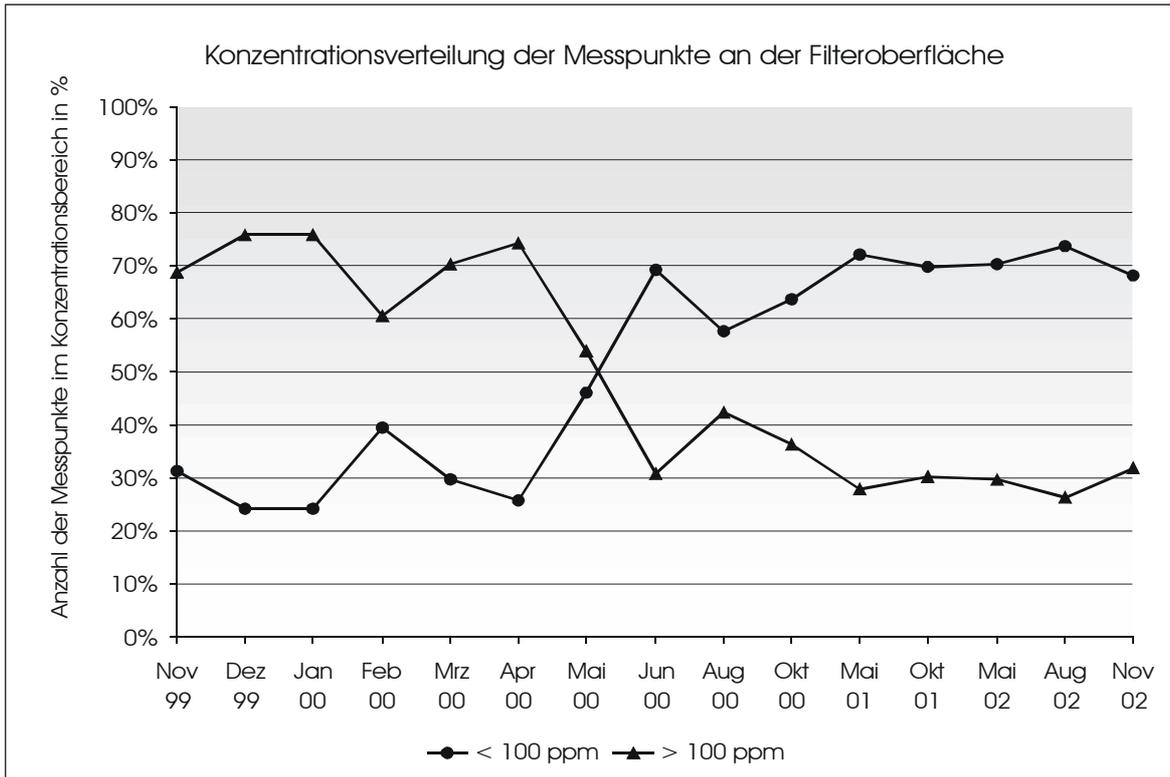


Abbildung 17: Ergebnisse der FID-Messungen an der Filteroberfläche

Die Konzentrationsverteilung der Messpunkte auf der Filteroberfläche blieb bei den 3 Messterminen im Versuchszeitraum II - Messungen im Mai, August und November 2002 - praktisch unverändert. Ca. 70 % der Messpunkte lagen jeweils im Konzentrationsbereich < 100 ppm. Gegenüber den Messwerten der Versuchsphase I - Zeitraum Nov. 1999 bis Okt. 2002 - wurden insgesamt niedrigere Werte gemessen.

Die Ergebnisse der FID-Messungen am 15. August 2002 sind in Abbildung 18 beispielhaft dargestellt. Das bereits aus der Versuchsphase I bekannte Emissionsprofil mit relativ niedrigen Emissionswerten in der Mitte des Filters und im vorderen Bereich der Deponiegaszuleitung sowie vergleichsweise hohe Emissionswerte auf der Seite der neu installierten Luftzuführung trat - wenn auch weniger stark ausgeprägt - wieder auf und konnte auch durch eine Verstärkung der Filterschicht mit zusätzlichem Kompostmaterial nicht entscheidend beeinflusst werden.

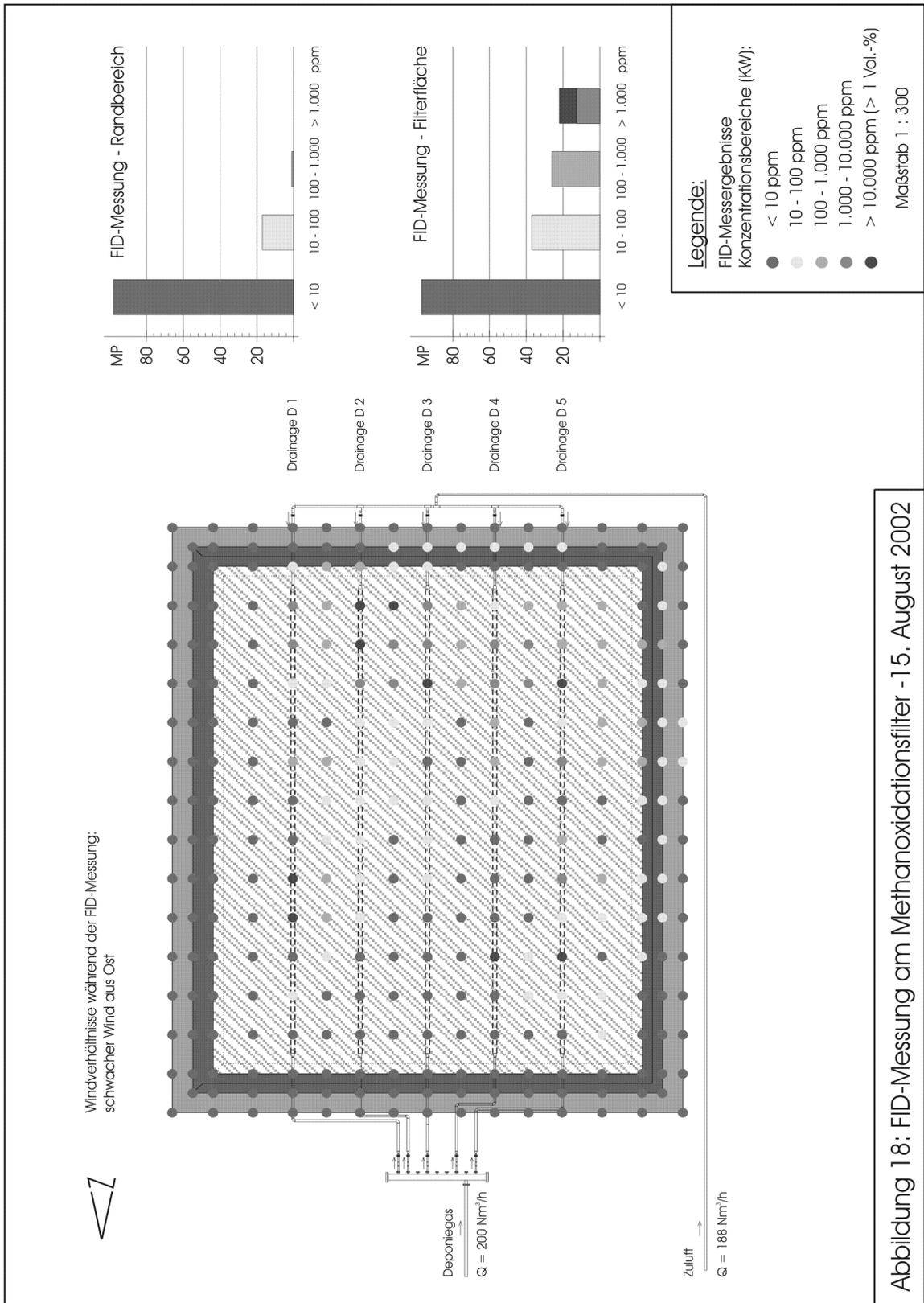
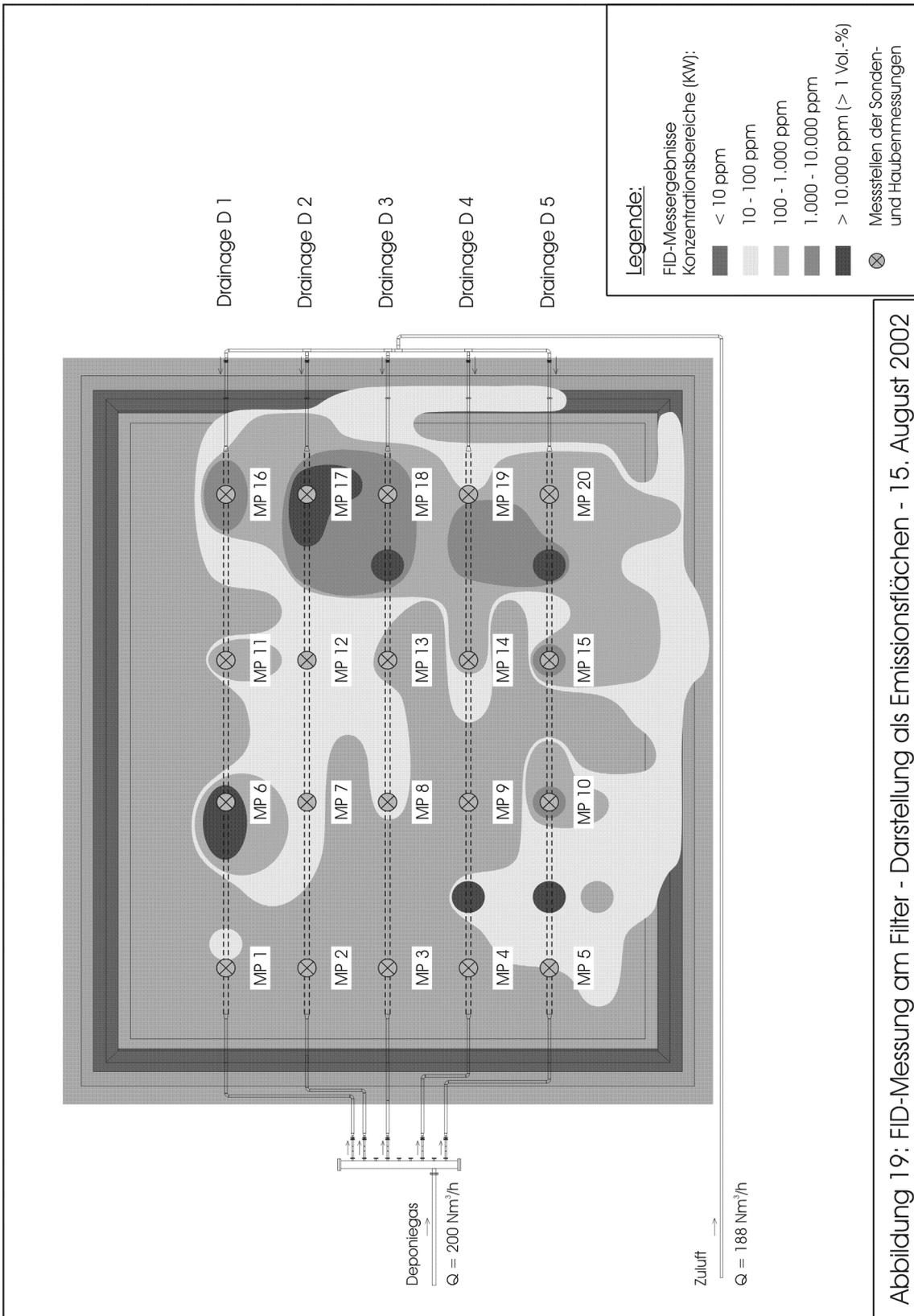


Abbildung 18: FID-Messung am Methanoxidationsfilter - 15. August 2002



5.7.2 Sondenmessungen am Methanoxidationsfilter

Zur genaueren Untersuchung der Abbauvorgänge und der Sauerstoffversorgung im Filter wurden im Mai und August 2002 an insgesamt 20 Messpunkten Sondenmessungen bis maximal 40 cm Tiefe durchgeführt.

Die Lage der Sondenmesspunkte ist in Abbildung 19 zusammen mit den als Emissionsflächen dargestellten Ergebnissen der FID-Messung vom August 2002 abgebildet. Die Messergebnisse der Sondenmessungen sind im Anhang B - Blatt-Nr. 1 - 4 - zusammengestellt.

Bei den Messungen der Versuchsphase I wurden an 7 der 9 untersuchten Messstellen bereits in 20 cm Tiefe Sauerstoffgehalte von < 1 Vol.-% gemessen. Damit waren die Methanoxidationsvorgänge hauptsächlich auf eine relativ kleine oberflächennahe Schicht beschränkt. In den tieferen Filterschichten fehlte der zur Umsetzung erforderliche Luftsauerstoff.

Die Sauerstoffversorgung des Filters hat sich in der Versuchsphase II infolge der Nachrüstung der aktiven Luftversorgung deutlich verbessert.

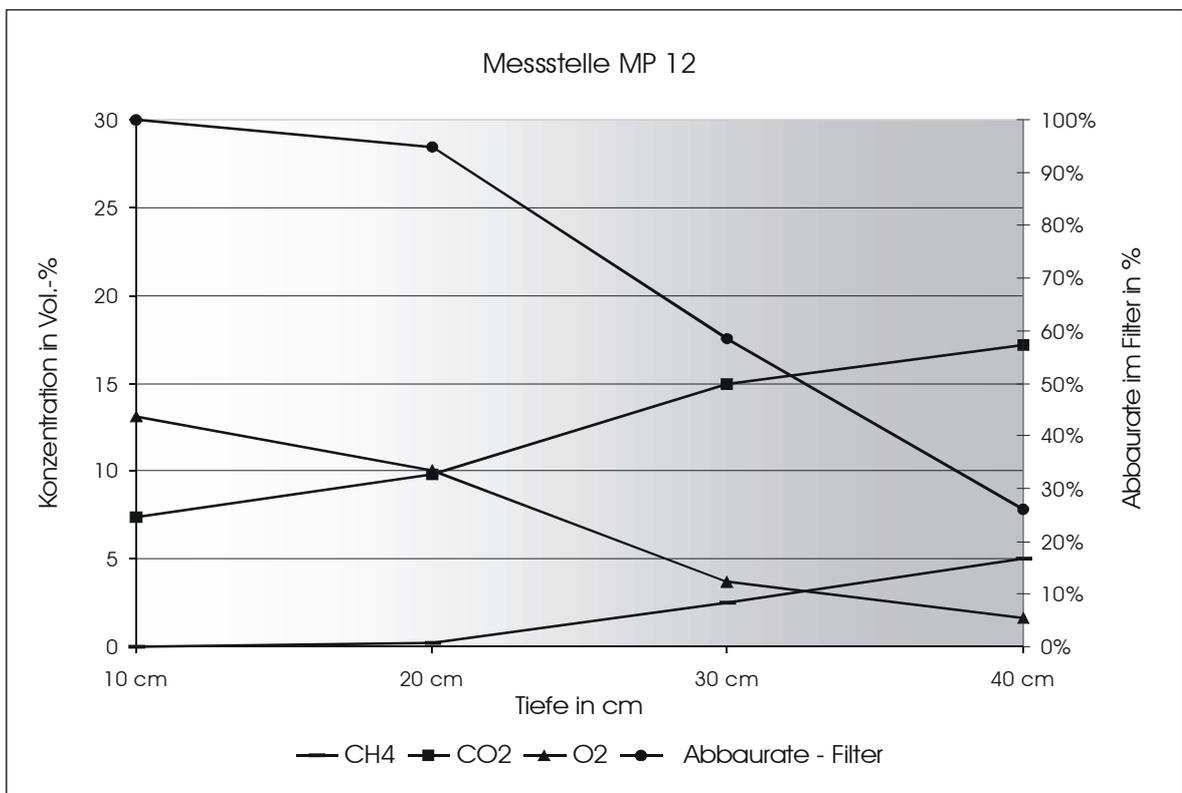


Abbildung 20: Gaszusammensetzung und Abbaurrate in verschiedenen Schichttiefen (MP 12)

Bei den Messungen im Mai und August 2002 war auch bis in 30 - 40 cm Tiefe eine ausreichende Sauerstoffversorgung des Filters an 14 bzw. 15 der 20 Messpunkte gewährleistet.

Die Abbauraten für Methan wurden auf Basis des Sauerstoffverbrauchs für die verschiedenen Schichttiefen der Sondenmessstellen berechnet (Berechnungsansatz: s. Anhang B - Blatt-Nr. 5). Abbildung 20 zeigt beispielhaft die Veränderung der Gaszusammensetzung in der Filterschicht und die für die jeweilige Schichttiefe ermittelte Abbaurate.

In 10 cm Tiefe lagen an 14 Messpunkten mit ausreichender Sauerstoffversorgung Abbauraten zwischen 90 - 100 % vor (Basis: Messwerte August 2002). An den übrigen 6 Messpunkten wurden Abbauraten zwischen 21 und 23 % ermittelt. Die durchschnittliche Abbaurate der 20 Messstellen betrug im Mai/August 2002 ca. 76 % bzw. 77 %.

5.7.3 Haubenmessungen am Methanoxidationsfilter

In Ergänzung zu den Sondenmessungen wurden an den 20 Messstellen zur Bestimmung der Durchflussmenge zusätzlich Haubenmessungen durchgeführt. Mit Hilfe der Haubenmessung können die Gasvolumenströme an der Filteroberfläche an punktuellen Stellen indirekt gemessen werden. In Verbindung mit den Ergebnissen der Sondenmessung lassen sich die an den einzelnen Messpunkten auftretenden Emissionsströme und Abbauleistungen quantifizieren.

In Tabelle 11 sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengestellt. An den 20 Messstellen ergaben sich Werte zwischen 40 und 2.300 l/h. Die Strömungsbedingungen im Filter waren nach wie vor sehr heterogen. Die durchgeführten Nacharbeiten am Filter mit Auffräsen der oberen Filterschichten zur Auflockerung der Materialverdichtungen und die partiell durchgeführte Aufbringung von zusätzlichem Kompostmaterial waren demzufolge nicht erfolgreich.

Die höchsten Volumenströme wurden bei der 1. Messung im Mai 2002 an den Messstellen MP 10, MP 16, MP 18 und MP 20 sowie bei der 2. Messung im August 2002 an den Messstellen MP 6, MP 15, MP 16, MP 17 und MP 18 gemessen. An diesen Stellen wurden aufgrund der zu geringen Verweilzeiten im Filter nur Abbauraten zwischen 15 - 30 % festgestellt. Man bewegte sich damit jenseits des Grenzbereiches der Anwendbarkeit des Filters.

Zwischen Abbauleistung und Volumenstrom im Filter besteht auf der Grundlage der Messergebnisse folgende grundsätzliche Beziehung: Je niedriger der Volumenstrom, desto höher die Abbauleistung im Filter. Abbauraten > 50 % wurden bei den zum

Zeitpunkt der beiden Messungen vorgegebenen CH₄-Konzentrationen im Rohgas von ca. 7 - 9 Vol.-% erst bei Volumenströmen < 400 l/h erzielt. Bei größeren Volumenströmen fiel die Abbaurrate relativ schnell auf Werte von nur noch ca. 20 - 25 %.

Die Strömungsverhältnisse im Filter wurden vermutlich bereits beim Aufbau des Filters weitgehend vorgegeben (s. Kap.5.5) und verstärkten sich noch durch Kanalbildungseffekte im weiteren Zeitverlauf. Darüber hinaus erfüllt die ca. 10 cm starke Rindenmulch-Schicht ihre zugedachte Funktion als Gasverteilschicht nur unzureichend. Hierdurch treten lokal begrenzt vergleichsweise hohe Flächenbelastungen und zu hohe Durchtrittsgeschwindigkeiten auf. An diesen Stellen wurden nur geringe Abbauraten festgestellt.

An den Gasdurchbruchstellen wurde zudem eine unbefriedigende Sauerstoffversorgung beobachtet. Trotz der Nachrüstung der aktiven Luftversorgung traten damit im Filter lokal begrenzte Gasdurchbruchstellen auf. An diesen Schwachstellen wurde keine nennenswerte Vermischung mit der dem Filter zugeführten Luft festgestellt.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Ergebnisse der Hauben- und Sondenmessungen		
Messkampagne	Mai 2002	August 2002
Gaszusammensetzung vor dem Filter	CH ₄ : 9,0 Vol.-% CO ₂ : 17,5 Vol.-% O ₂ : 1,5 Vol.-%	CH ₄ : 6,8 Vol.-% CO ₂ : 17,3 Vol.-% O ₂ : 1,5 Vol.-%
Gasdurchsatzmenge	170 Nm ³ /h	200 Nm ³ /h
Ergebnisse der Haubenmessungen an den 20 Messstellen		
min./max. Volumenstrom	45 - 2.332 l/h	42 - 940 l/h
mittlerer Volumenstrom	420 l/h	336 l/h
Ergebnisse der Sondenmessungen an den 20 Messstellen		
min./max. Abbaurrate in 10 cm Tiefe ab Filter-OK	17 - 100 %	21 - 100 %
Ø Abbaurrate - ohne Gewichtung des Volumenstromes	76 %	77 %
Ergebnisse der Sonden- und Haubenmessungen an den 20 Messstellen		
Ø Abbauleistung - mit Gewichtung des Volumenstromes	40 %	46 %

5.7.4 Abbaurrate und Abbauleistung des Filters auf Grundlage der Ergebnisse der Hauben- und Sondenmessungen sowie der FID-Messungen

Die durchschnittliche Abbaurrate lag - ohne Gewichtung der Messergebnisse mit den jeweiligen Volumenströmen - bei ca. 76 - 77 %.

Werden die gemessenen Volumenströme an den 20 Messpunkten in die Berechnung der Abbauleistung als Gewichtungsfaktor mit einbezogen, ergibt sich eine Abbauleistung des Filters von nur noch ca. 40 % bei der 1. Messung im Mai 2002 bzw. 46 % im August 2002. Die auf diesen Weg ermittelte Abbauleistung berücksichtigt allerdings die FID-Messergebnisse nur unzureichend.

Die Hauben-/Sondenmessungen wurden an 20 Messpunkten durchgeführt. Mit Hilfe der 20 Messpunkte wurden nur ca. 2 % der gesamten Filterfläche erfasst (Aufstandsfläche der Hauben: 0,5 m²). Bei der FID-Messung wurden an der Filteroberfläche dagegen wesentlich mehr Messstellen (182 Messpunkte) beprobt.

Abbildung 18 - Ergebnisse der FID-Messung - veranschaulicht, dass bei den 20 zufällig ausgewählten Messstellen der Hauben-/Sondenmessungen vor allem Teilflächen mit im Mittel höheren Konzentrationen bzw. vergleichsweise häufig Messstellen an Gasdurchbruchstellen beprobt wurden.

Die im August 2002 mit Hilfe der FID-Messung bestimmte durchschnittliche Kohlenwasserstoff-Konzentration an den 20 Messstellen der Hauben- und Sondenmessungen lag bei ca. 3.287 ppm/Messpunkt. Die mittlere Kohlenwasserstoff-Konzentration der FID-Rastermessung betrug zum gleichen Zeitpunkt insgesamt nur 1.724 ppm pro Messpunkt und lag somit deutlich unter den Messergebnissen der 20 Messpunkte der Sonden- und Haubenmessungen. Die Auswahl der 20 Messpunkte für die Hauben-/ Sondenmessung war daher nicht repräsentativ; es wurden überdurchschnittlich häufig Messstellen an Gasdurchbruchstellen des Filters untersucht.

Die Ergebnisse der FID-Messung an der Filteroberfläche können dessen ungeachtet für eine Hochrechnung und zuverlässigere Abschätzung der gesamten Abbauleistung des Filters herangezogen werden. Hierbei wurden zunächst die 20 Messstellen der Sonden- und Haubenmessungen in die 4 Konzentrationsbereiche < 10 ppm, 10 - 100 ppm, 100 - 1.000 ppm und > 1.000 ppm der FID-Messung klassifiziert und die jeweils durchschnittliche Abbaurrate und Durchflussmenge ermittelt.

Im Anschluss daran wurden die Messergebnisse der einzelnen Konzentrationsklassen der 20 Messstellen der Sonden-/Haubenmessungen auf die gesamte Filteroberfläche auf Basis der 182 Messstellen der FID-Messung hochgerechnet (vg. Tabelle 12).

Für die durchschnittlichen Abbauraten und die zugehörigen Volumenströme der 4 Konzentrationsklassen wurden die in Tab. 12 angegebenen, konservativen Berechnungsansätze gewählt.

Tabelle 12: Klassifizierung der Ergebnisse der Sonden-, Hauben- und FID-Messungen - Messungen im August 2002 -				
20 Messstellen der Sonden- und Haubenmessungen				
Ø Kohlenwasserstoffkonzentration der 20 Messstellen der Hauben- und Sondenmessungen			3.287 ppm/Messpunkt	
Konzentrationsbereiche der FID-Messung	< 10 ppm	10 - 100 ppm	100 - 1.000 ppm	> 1.000 ppm
Anzahl der Messpunkte	6	4	3	7
Ø Volumenstrom - Haubenmessung -	105 l/h	127 l/h	172 l/h	723 l/h
Ø Abbaurate - Sondenmessung -	100 %	100 %	100 %	36 %
Hochrechnung auf 182 Messstellen der FID-Messung auf der gesamten Filterfläche				
Ø Kohlenwasserstoffkonzentration der 182 Messstelle der FID-Messung			1.724 ppm/Messpunkt	
Konzentrationsbereiche der FID-Messung	< 10 ppm	10 - 100 ppm	100 - 1.000 ppm	> 1.000 ppm
Anzahl der Messpunkte	97	37	26	22
Ø Volumenstrom - Haubenmessung -	100 l/h	150 l/h	250 l/h	1.000 l/h
Ø Abbaurate - Sondenmessung -	100 %	95 %	90 %	30 %
Gesamte Ø Abbauleistung - mit Gewichtung des Volumenstroms Grundlage: Sonden-/Haubenmessungen einschließlich Berücksichtigung der FID-Messergebnisse			ca. 63 %	

Bezogen auf die Gesamtfläche des Filters wurde eine durchschnittliche Methanoxidationsabbauleistung von ca. 60 - 65 % ermittelt.

5.7.5 Untersuchung des Filtermaterials

Mit Abschluss der Versuchsphase II wurde das Filtermaterial des Methanoxidationsfilters im Labor untersucht. Die Probenahme erfolgte an 3 ausgewählten Stellen, die sich hinsichtlich der Intensität der Durchströmung mit Deponiegas und der Abbauraten deutlich unterschieden:

- Probe F 1: Probenahme am äußeren Rand des Filters mit nur sehr geringer Durchströmung
- Probe F 2: Probenahme im Bereich geringer bis mittlerer Durchströmung und hoher Methanoxidationsabbaurate
- Probe F 3: Probenahme an einer Gasdurchbruchstelle hoher Durchströmung und geringer Methanoxidationsabbaurate

Die Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen des Filtermaterials				
Parameter	Einheit	F 1	F 2	F 3
Allgemeine Qualitätskriterien				
Rottegrad	-	V	V	V
Rohdichte	g/l FS	810	864	756
pH-Wert (CaCl ₂ -Extrakt)	-	6,90	6,90	6,70
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	62,4	93,7	390
Salzgehalt	g/l FS	0,3	0,4	1,6
Wassergehalt	%	40,7	45,2	48,9
Gesamt-C - TC	% TS	21	21	26
Ges. organisch gebundener C - TOC	% TS	18	19	24
Ammonium-Stickstoff NH ₄ -N	mg/l FS	5,0	6,1	110
Nitrat-Stickstoff NO ₃ -N	mg/l FS	21,0	34,0	19,0
Nitrit-Stickstoff NO ₂ -N	mg/l FS	0,10	0,11	3,2

Parameter	Einheit	F 1	F 2	F 3
Gesamt-Nährstoffe				
Gesamt-Stickstoff N _{ges}	% TS	1,4	1,5	1,8
Phosphor als P ₂ O ₅	% TS	0,55	0,59	0,44
Deponiegasspezifische Spurenstoffe				
Gesamt-Chlor Cl _{ges}	mg/kg TS	476	498	456
Gesamt-Fluor F _{ges}	mg/kg TS	160	169	138
Gesamt-Schwefel S _{ges}	mg/kg TS	2.850	2.960	5.870

Alle 3 Proben des Filtermaterials wiesen einen Rottegrad V auf. Die Rohdichten betragen zwischen 756 und 864 g/l FS. Die Wassergehalte lagen zwischen 40,7 (Probe F 1) und 48,9 % (Probe F 3).

Die untersuchten Parameter der beiden Proben F 1 - Probenmaterial vom Filterrand mit nur sehr geringer Durchströmung - und F 2 - Probenmaterial im Bereich geringer bis mittlerer Durchströmung und hoher Methanoxidationsabbaurate - zeigten insgesamt nur geringe Unterschiede. Höhere Werte wurden vor allem bei den Parametern elektrische Leitfähigkeit und Nitrat-Stickstoff gemessen.

Abweichend von den beiden Proben F 1 und F 2 wies die Probe F 3 - Probenmaterial an einer Gasdurchbruchstelle mit hoher Durchströmung und geringer Methanoxidationsabbaurate - z. T. deutlich höhere Konzentrationen bei den nachfolgenden Parametern auf:

- elektrische Leitfähigkeit: Faktor 4 - 5 höher im Vergleich zu den Proben F 1 und F 2.
- Salzgehalt: Faktor 4 - 5 höher im Vergleich zu den Proben F 1 und F 2.
- Ammonium-Stickstoff: Faktor 20 höher im Vergleich zu den Proben F 1 und F 2.
- Nitrit-Stickstoff: Faktor 23 höher im Vergleich zu den Proben F 1 und F 2.
- Gesamt-Schwefel: Faktor 2 höher im Vergleich zu den Proben F 1 und F 2.

Die höheren Konzentrationen der Probe F 3 sind vermutlich auf die stärkere Beaufschlagung des Filtermaterials zurückzuführen. Andererseits wurden an der Probenahmestelle der Probe F 3 mit Beginn der Versuchsphase II zusätzliches

Filtermaterial aufgebracht. Speziell dieses Material an der Filteroberfläche wurde untersucht.

5.8 Zusammenstellung der wesentlichen Betriebsdaten und der Abbauleistung des Methanoxidationsfilters in der Versuchsphase II

Durchsatzmenge - Deponiegas	150 - 235 Nm ³ /h
Methangehalt im Deponiegas	6 - 12 Vol.-% CH ₄
Sauerstoffgehalt im Deponiegas	1 - 2 Vol.-% O ₂
Durchsatzmenge - Zuluft	180 - 190 Nm ³ /h
Flächenfilterbelastung - Methan	28 - 36 l CH ₄ /h x m ²
Flächenfilterbelastung - Deponiegas	300 - 470 l Rohgas/h x m ²
Flächenfilterbelastung - Deponiegas + Zuluft	660 - 850 l/h x m ²
Filterfläche - Filtervolumen	500 m ² - 500 m ³
Verweilzeit bei 50 % Luftporenanteil	0,6 - 0,75 h
Abbauleistung an den einzelnen Messstellen	20 - 100 %
Berechnete gesamte mittlere Abbauleistung des Filters	60 - 65 %

5.9 Kosten des Methanoxidationsfilters

5.9.1 Investitionskosten

Nachfolgend sind die Investitionskosten des Methanoxidationsfilters für die beiden Versuchs-/Ausbauphasen zusammengestellt (alle Kostenangaben netto):

Tabelle 14: Investitionskosten - Methanoxidationsfilter - Versuchsphase I	
Tiefbauarbeiten - Herstellung des Erddammes einschl. Aufbau des Filters	17.400,-- €
Gasleitungsarbeiten - Herstellung der Anschlussleitung zum Filter, des Gasverteils-/Drainagesystems	15.440,-- €
Elektroarbeiten - Umbau der Schaltanlage, Installation einer Begleitheizung am Gasverteilsystem	1.830,-- €
Genehmigung einschl. sicherheitstechnischer Überprüfung/Abnahme	1.940,-- €
Planungsleistungen einschließlich ingenieurtechnische Begleitung und Betreuung der Anlage in der Versuchs- und Einfahrphase	6.950,-- €
Summe Investitionskosten - Versuchsphase I (netto)	43.560,-- €

Tabelle 15: Investitionskosten - Methanoxidationsfilter - Versuchsphase II	
Gasleitungsarbeiten - Herstellung des Leitungssystems für die Luftzuführung	3.730,-- €
Umbauarbeiten an der Gasförderstation Installation der Luftfördereinrichtung	9.810,-- €
Planungsleistungen einschließlich ingenieurtechnische Begleitung und Betreuung der Anlage in der Versuchs- und Einfahrphase	2.450,-- €
Summe Investitionskosten - Versuchsphase II (netto)	15.990,-- €

Die gesamten Investitionskosten beider Versuchsphasen beliefen sich einschließlich Nebenkosten auf insgesamt ca. 60.000,-- € netto (reine Baukosten: ca. 48.000,-- €).

5.9.2 Betriebs-/Instandhaltungskosten

Auf Grundlage der Betriebsergebnisse des Pilotprojektes ist mit folgenden Betriebs-/Instandhaltungskosten zu rechnen:

Tabelle 16: Betriebs-/Instandhaltungskosten - Methanoxidationsfilter	
Stromverbrauch des Zuluftgebläses	ca. 2.000,-- €/a
Anteilige Wartungs-/Instandhaltungskosten des Zuluftgebläses einschl. Zuleitungssystem	ca. 500,-- €/a
Pflegemaßnahmen am Filter - Mäharbeiten, Fräsarbeiten an der Filteroberfläche	ca. 500,-- €/a
Kosten für den Austausch des Filtermaterials bei einer geschätzten Standzeit von 4 Jahren: ca. 8.000,- €	ca. 2.000,-- €/a

Die jährlichen Betriebs-/Instandhaltungskosten für den Betrieb des Methanoxidationsfilters belaufen sich demnach auf schätzungsweise ca. 5.000,-- €/a ohne MwSt.

6 Diskussion der Ergebnisse des zweistufigen Verfahrenskonzeptes

6.1 Gesamtabbaurrate des Verfahrens

Mit Hilfe des zweistufigen Verfahrens zur Minimierung der Restgasemissionen -

1. Beschleunigung der Abbauprozesse im Deponiekörper durch gezielte Absaugung und
2. anschließender Behandlung der gefassten Deponiegase mittels Methanoxidationsfilter -

wurden unter weitgehend optimalen Absaugbedingungen folgende Abbauraten erzielt:

Tabelle 17: Zusammenstellung der erzielten Abbauraten des Verfahrens	
1. Abbaurate im Deponiekörper	
Ø Abbaurate im Deponiekörper - Berechnung auf Grundlage des O ₂ -Verbrauches	ca. 60 %
2. Abbaurate des Methanoxidationsfilters	
Berechnete gesamte mittlere Abbauleistung des Methanoxidationsfilters Abschätzung auf Grundlage der Sonden-, Hauben- und FID-Messungen	ca. 60 - 65 %
Berechnete mittlere Abbaurate des Verfahrens	ca. 85 %

Die berechnete mittlere Abbaurate des gesamten Verfahrens lag bei ca. 85 %. Der weitaus größere Effekt wurde durch die 1. Stufe mit der Aerobisierung des Deponiekörpers erzielt.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass eine noch stärkere Beeinflussung der Abbauverhältnisse im Deponiekörper durch die technischen Möglichkeiten der Gasförderstation und nicht durch die Absaugbedingungen des Deponiekörpers begrenzt wurden. Mit Hilfe einer noch stärkeren Absaugung ließen sich die Abbauverhältnisse im Deponiekörper weiter optimieren.

Die Gesamtabbauleistung des Methanoxidationsfilters wiederum wurde in erster Linie durch die lokal begrenzten Gasdurchbruchstellen im Filter beeinträchtigt.

6.2 Vergleich des Verfahrens mit dem diskontinuierlichen Fackelbetrieb

Unter weitgehend optimalen Absaugbedingungen wurden bei einem CH₄-Gehalt im Hauptgasstrom von ca. 5,5 - 6,5 Vol.-% und einer Absaugmenge von 235 Nm³/h deponieseitig ca. 10 kg/h Methan erfasst und dem Filter zugeleitet. Bei einer Abbauleistung des Filters von ca. 60 - 65 % wurde die Methanfracht auf ca. 3,5 - 4 kg/h reduziert. Im Filter wurden damit täglich ca. 150 kg CH₄/d (= 55 t CH₄/a) abgebaut.

Die CO₂-Fracht vor dem Filter betrug ca. 78,5 kg CO₂/h. Unter der vereinfachten Annahme einer 100-%igen Dissimilation stieg die CO₂-Fracht aufgrund des Methanabbaus nach dem Filter auf insgesamt ca. 95 kg CO₂/h. Das CH₄-/CO₂-Frachtverhältnis ging auf ca. 0,04 kg CH₄/kg CO₂ zurück.

Für einen diskontinuierlichen Fackelbetrieb können aufgrund der Betriebsergebnisse vor Beginn der Inbetriebnahme des Methanoxidationsfilters eine tägliche Abbauleistung von ca. 90 - 100 m³ CH₄/d = 65 - 72 kg/d (= 24 - 26 t CH₄/a) abgeschätzt werden (Fackelbetrieb ca. 6 h pro Tag, 50 - 55 m³/h, CH₄-Gehalt: 30 Vol.-%).

Damit werden mit dem Methanoxidationsfilter - ohne Berücksichtigung der Beeinflussung und Veränderung der Abbauprozesse im Deponiekörper durch die stärkere Absaugung - um den Faktor 2 höhere tägliche Methanfrachten im Vergleich zum diskontinuierlichen Fackelbetrieb abgebaut.

6.3 Vergleich des Verfahrens mit passiven Entgasungsmaßnahmen

Bei rückläufigen Gasmengen werden derzeit verstärkt passive Entgasungsmaßnahmen diskutiert. Diese setzen auf die natürliche mikrobielle Umsetzung des im Deponiekörper produzierten Methans im oberflächennahen Bereich der Abdeckung bzw. Rekultivierungsschicht. Für das Methanoxidationspotential finden sich in der Literatur insgesamt unterschiedliche und z. T. sehr widersprüchliche Angaben. Dies liegt u. a. daran, dass verschiedenartige Materialien mit unterschiedlichen Gaskonzentrationen beaufschlagt wurden.

Die tatsächlichen Methanoxidationsleistungen passiver Entgasungsmaßnahmen unter Praxisbedingungen sind noch zu wenig untersucht. Auf theoretische Abschätzungen wird daher verzichtet.

Nach den hier im Rahmen der 1. Versuchsphase gewonnenen Ergebnissen dürfte der Sauerstoffversorgung in der Abdeckschicht eine zentrale Rolle zukommen. Bei passiven Entgasungsmaßnahmen kann die Sauerstoffversorgung nicht bzw. nur ungenügend beeinflusst werden. Erschwert wird die Sauerstoffversorgung über die Atmosphäre durch den nach außen gerichteten Eigendruck der Deponie.

Die Höhe der Reaktionsschicht und die damit verknüpfte Abbauleistung ist daher gering und überdies stark von den meteorologischen Verhältnissen abhängig.

Das auf der Deponie Horb-Rexingen untersuchte Verfahrenskonzept hat gegenüber passiven Entgasungsmaßnahmen entscheidende Vorteile. U. a. kann der Abbau im Deponiekörper beschleunigt und der für Methanoxidationsprozesse im Bereich der Abdeckung notwendige Sauerstoff durch die „aktive“ Absaugung bereitgestellt werden. Bei optimaler Absaugung kann praktisch der gesamte Deponiekörper unter Unterdruck gehalten werden. Dies führt zu einem hohen Erfassungsgrad und minimalen Restemissionen an der Oberfläche des Deponiekörpers. Dies wurde durch die FID-Messergebnisse bestätigt.

6.4 Restemissionsraten

Bei der Beurteilung der Wirksamkeit aktiver bzw. passiver Entgasungsmaßnahmen wird häufig mit dem in der Fachliteratur genannten Zielwert einer Restemissionsrate von 4 l Deponiegas/(m² x h) gearbeitet. Bei einer Restemissionsrate von 4 l Deponiegas pro m² x h Deponiefläche kommt es danach mit Sicherheit zu keinerlei Geruchsemissionen bzw. Pflanzenbeeinträchtigungen (12).

Die zulässige Restemissionsrate von 4 l Deponiegas/(m² x h) wurde auf Grundlage von FID-Messungen empirisch ermittelt.

Berechnungsgrundlagen/Basisdaten:

- Ø Kohlenwasserstoff-Konzentration an der Deponieoberfläche: 80 ppm
- Gaszusammensetzung des Deponiegases: 60 Vol.-% CH₄, 40 Vol.-% CO₂
- Restemissionsrate Deponiegas: 4 l Deponiegas/(m² Deponiefläche x h)
- Restemissionsrate Methan: 2,4 l CH₄/(m² Deponiefläche x h)

Für die Deponie Horb-Rexingen ergeben sich danach folgende Werte:

Restemissionsrate an der Deponieoberfläche

Die mittels zweier FID-Messungen 2002 an der Deponieoberfläche gemessene durchschnittliche Kohlenwasserstoff-Konzentration betrug im Bereich der abgesaugten Deponiefläche durchschnittlich 61 ppm.

Die Restemissionsrate lag damit bei ca. 1,83 l CH₄/(m² Deponiefläche x h) bzw. 3,05 l Deponiegas/(m² Deponiefläche x h).

Restemissionsrate an der Filteroberfläche

Für den Methanoxidationsfilter wurden Restemissionen von ca. 4,6 - 5,3 m³ CH₄/h ermittelt. Dies entspricht - bei einer Filterfläche von ca. 500 m² - einer Restemissionsrate von ca. 9,2 bis 10,6 l CH₄/(m² Filterfläche x h).

Gesamte Restemissionsrate - Deponie einschließlich Filteroberfläche

Zur Gesamtbilanzierung wird die Restemissionsrate des Filters auf die gesamte abgesaugte Deponiefläche von ca. 3,2 ha bezogen (Flächenverhältnis abgesaugte Deponiefläche : Filterfläche = 64 : 1).

Die Restemissionsrate des Filters liegt demnach pro m² Deponiefläche bei ca. 0,14 - 0,17 l CH₄/h. Dies entspricht nur ca. 6 - 7 % des in der Fachliteratur genannten Zielwertes. Die gesamte Restemissionsrate - Deponie einschließlich Filteroberfläche - lag bei ca. 2 l CH₄/(m² Deponiefläche x h) bzw. 3,3 l Deponiegas/(m² Deponiefläche x h). Davon entfielen auf die Restemissionen des Filters nur ca. 8 % der Gesamtemissionen.

Die Restemissionsrate der abgesaugten Deponiefläche einschließlich des Methanoxidationsfilters blieb damit unter dem in der Fachliteratur genannten Zielwert einer Restemissionsrate von 4 l Deponiegas/(m² x h).

7 Zusammenfassung

Vorgestellt wurde eine Verfahrenskombination zur Minimierung der Restgasemissionen von Hausmülldeponien und Altablagerungen und gleichzeitiger Beschleunigung der Abbauprozesse im Deponiekörper. Erreicht wird dies durch Kombination einer gezielten und effizienten Absaugung des Deponiekörpers und der anschließenden Behandlung der gefassten Deponiegase mittels Methanoxidationsfilter.

7.1 Beschleunigung der Abbauprozesse im Deponiekörper

Durch die „aktive“ Entgasung wird Luftsauerstoff über die Außenluft in die oberen Schichten der Erdaddeckung und den Deponiekörper transportiert. Bei entsprechend optimierter Einstellung des Absaugsystems kann der angesaugte Luftsauerstoff annähernd vollständig umgesetzt werden.

Die Aerobisierung führt zu einer verstärkten Kohlendioxidproduktion und einer Veränderung des Methan/Kohlendioxidverhältnisses. Dabei treten mehrere, gleichzeitig ablaufende Prozesse auf:

1. Hemmung der Methanbildung durch die Veränderung der Milieubedingungen

2. Reduktion des Methanbildungspotentials durch direkten aeroben Abbau von organischen Abfallstoffen.
3. Beschleunigung des Abbaus der organischen Abfallstoffe durch die Schaffung aerober Milieubedingungen.
4. Steigerung der Methanoxidationsprozesse infolge verbesserter Sauerstoffversorgung in den oberen Abfall-/Bodenschichten.

Mit der Umstellung des Entgasungsbetriebes von diskontinuierlichen Fackelbetrieb auf eine kontinuierliche Absaugung und Behandlung des abgesaugten Deponiegases im Methanoxidationsfilter wurde die Absaugmenge um den Faktor 5 gesteigert.

Der CH_4 -Gehalt im Hauptgasstrom sank bis 5 Vol.-% ab. Das CH_4 -/ CO_2 -Verhältnis reduzierte sich bis auf ca. 0,3. Die CO_2 -C-Kohlenstoffaustragsfracht stieg von 7 auf 21 kg/h. Die CH_4 -C-Fracht im Bezug zur Gesamt-C-Fracht erreichte nur noch ca. 25 %. Die Umsetzungsrate im Deponiekörper betrug - je nach Berechnungsansatz - zwischen 62 und 85 %.

7.2 Behandlung der gefassten Deponiegase mittels Methanoxidationsfilter

Für die weitergehende Behandlung des abgesaugten Deponiegases wurde ein Methanoxidationsfilter mit einer Filterfläche von 500 m² aufgebaut. Der Methanoxidationsfilter wurde als „offener Flächenfilter“ und Durchströmung von unten nach oben konzipiert. In der Versuchsphase II des Pilotprojektes betrug die spezifische Flächenfilterbelastung ca. 300 - 470 l Rohgas/(m² x h) bzw. 28 - 36 l CH_4 /(m² x h).

Die Sauerstoffversorgung des Filters konnte durch die Nachrüstung einer aktiven Luftversorgung in der Versuchsphase II deutlich verbessert werden. Die Methanoxidationsabbauleistung des Filters stieg auf ca. 60 - 65 %.

Gasdurchbruchstellen am Filter verhinderten eine höhere Abbauleistung. An den Gasdurchbruchstellen wurde eine unbefriedigende Sauerstoffversorgung festgestellt. Die Abbauraten waren entsprechend gering. Die spezifischen Strömungsverhältnisse im Filter und die spätere Ausbildung der Gasdurchbruchstellen wurde vermutlich bereits beim Aufbau des Filters weitgehend vorgegeben.

Die gesamten Investitionskosten des Methanoxidationsfilters, Gaszuleitung zum Filter, Gasverteilsystem, Luftfördereinrichtung einschl. Leitungssystem, etc., beliefen sich auf netto ca. 60.000,- € inkl. Nebenkosten. Die Betriebs-/Instandhaltungskosten für den Betrieb des Methanoxidationsfilters liegen bei schätzungsweise ca. 5.000,- € pro Jahr.

7.3 Gesamtbilanz des zweistufigen Verfahrenskonzeptes

Unter optimalen Absaugbedingungen konnte ein Gesamtwirkungsgrad von ca. 85 % erzielt werden. Die Methanreduktion beider Stufen liegt dann bei ca. 510 kg CH₄/d bzw. ca. 185 t CH₄/a.

Das Verfahren leistet damit einen positiven Beitrag zum Klimaschutz aufgrund der Minimierung der Methanemissionen von Altdeponien und Altablagerungen.

Der weitaus größere Effekt (ca. 70 %) wird durch die 1. Stufe mit der gezielten Absaugung und Aerobisierung des Deponiekörpers erzielt. Auf den Methanoxidationsfilter entfallen noch ca. 30 % der Gesamtabbauleistung. Im Filter werden täglich ca. 150 kg CH₄/d abgebaut. Für den Methanoxidationsfilter wurde eine Restemissionsrate von ca. 10 l CH₄/(m² Filterfläche x h) ermittelt.

Die gesamte Restemissionsrate - Deponie einschließlich Filteroberfläche - lag bei ca. 2 l CH₄/h x m² Deponiefläche. Davon entfielen auf die Emissionen des Filters nur ca. 8 % der Gesamtemissionen.

Die Restemissionsrate der abgesaugten Deponiefläche einschließlich des Methanoxidationsfilter blieb unter dem in der Fachliteratur genannten Zielwert von 2,4 l CH₄/(m² Deponiefläche x h). Die Restemissionen der Verfahrenskombination sind damit insgesamt sehr niedrig und liegen deutlich unter denen passiver Entgasungsmaßnahmen.

Die spezifischen Methanreduktionskosten belaufen sich unter Einbezug der Kapitalkosten in Höhe von ca. 18.800,- €/a (Abschreibungsdauer: 5 Jahre, Zinssatz: 6 %) und der Betriebs-/Instandhaltungskosten von ca. 5.000,- €/a auf ca. 100,- €/t CH₄.

8 Ausblick - zukünftiges Entwicklungs- und Anwendungspotential

8.1 Entwicklungs- und Optimierungspotential des Verfahrens

Aufbauend auf den Ergebnissen des insgesamt dreijährigen Betriebes des Methanoxidationsfilters und den erzielten Verbesserungen in der Versuchsphase II des Pilotprojektes hat die Verfahrenskombination der gezielten Absaugung des Deponiekörpers und der anschließenden Behandlung der Deponiegase mittels Methanoxidationsfilter zwischenzeitlich einen hohen Erfahrungs- und Entwicklungsstand erreicht.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Versuchsphase II kann insbesondere in den nachfolgenden Bereichen noch mit weiterem Entwicklungspotential zur Steigerung der Effizienz des Verfahrenskonzeptes gerechnet werden:

Deponiekörper

- Weitere gezielte Steigerung der Absaugmenge und damit Erhöhung der Abbauraten im Deponiekörper bei O₂-Gehalten unter 3 Vol.-%.
- Entwicklung des Gashaushaltes bei gezielter Absaugung nach Aufbringung eines qualifizierten Oberflächenabdichtungssystems.

Welche Verhältnisse sich nach Installation eines qualifizierten Oberflächenabdichtungssystems einstellen, ist derzeit nur schwer vorauszusagen. Abhängig ist dies u. a. davon, wie gasdicht die Abdichtungssysteme tatsächlich sind. Altdeponien besitzen in der Regel keine gasdichte Basis- bzw. Flankenabdichtungen. Hierdurch kann bei Nichtabsaugung Deponiegas in das Deponieumfeld migrieren. Diese Gaswegigkeiten werden bei der Absaugung umgekehrt als Lufteintragsstellen genutzt. Inwieweit Luftsauerstoff ggf. über das Entwässerungssystem angesaugt wird, ist ebenfalls offen.

- Ggf. Optimierung der Sauerstoffversorgung im Deponiekörper durch passive Lufteintragungssysteme - insbesondere bei Deponien mit qualifizierter, gasdichter Oberflächenabdichtung.

Methanoxidationsfilter

- Aufbau des Filters als 2-stufigen Etagenfilter.
- Vermischung des Deponiegases und der Zuluft vor dem Filter.
- Verbesserung der Gas-/Luftverteilung im Bereich des Filterbodens.
- Vermeidung von späteren Gasdurchbruchstellen beim Aufbau des Filters. Die Reparaturmöglichkeiten nach Aufbau des Filters sind begrenzt.
- Optimierung der Sickerwasserfassung und -ableitung im Filter.

8.2 Anwendungsbereiche des Verfahrens

Das Verfahren ist besonders geeignet für Altablagerungen und Deponien bzw. Deponieabschnitte in der Stilllegungs-/Nachsorgephase nach Beendigung der Deponiegasverwertung.

Wesentlicher Vorteil gegenüber bereits bekannten Belüftungs-/Stabilisierungsverfahren ist u. a. die Möglichkeit der weiteren Nutzung des bestehenden Entgasungssystems zur Beschleunigung der Abbauprozesse und Stabilisierung des Deponiekörpers sowie die Absaugung ohne ungenutzten Luftüberschuss. Dem Deponiekörper wird nur so viel Luftsauerstoff zugeführt, wie tatsächlich auch umgesetzt werden kann.

In modifizierter Form kann das Verfahren für Hausmülldeponien und Altablagerungen in den Gasphasen VII und VIII (Methanoxidations- bzw. Kohlendioxidphase) Anwendung finden. Dabei könnte vermutlich auf die Luftzuführung zum Methanoxidationsfilter verzichtet werden.

9 Projektdurchführung und -förderung - Danksagung

Das Pilotprojekt - Verfahren zur Minimierung der Restgasemissionen von Hausmülldeponien und Altablagerungen - Beschleunigung der Abbauprozesse im Deponiekörper durch gezielte Absaugung und anschließender Behandlung der gefassten Deponiegase mittels Methanoxidationsfilter - wurde vom Landkreis Freudenstadt auf der Deponie Horb-Rexingen realisiert.

Besonderer Dank gilt den Beschäftigten der Deponie Horb-Rexingen für Ihre tatkräftige Unterstützung und Herrn Großwendt vom Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Freudenstadt.

Die Entwicklung und ingenieurwissenschaftliche Begleitung des Vorhabens erfolgte durch die contec Ingenieurgesellschaft für Energie und Umwelttechnik GmbH.

Vom Land Baden-Württemberg - Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg - wurde das Pilotprojekt in Form einer Landeszuwendung großzügig gefördert. Dem Land Baden-Württemberg gilt daher der ausdrückliche Dank für den wesentlichen Finanzierungsbeitrag.



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR

Anschrift des Verfassers:



Joachim Lehner

contec - Ingenieurgesellschaft für Energie und Umwelttechnik mbH

Raistingener Straße 4/1

71083 Herrenberg

Tel.: 07032/2 33 66

Fax: 07032/2 33 67

email: contec-Herrenberg@t-online.de

Literatur

- (1) Schneider, R., Chwistek, M., Huber, W., Faulstich, M. 2003
Behandlung von Deponierestgasen durch passiv betriebene Biofilter -
Zwischenbericht - In: Bayerische Abfall- und Deponietage 2003.
- (2) Yüce, S., Gebel, J. 2003
Untersuchung der Schwachgasnutzung mittels Membranverfahren in der
Nachsorgephase von Hausmülldeponien. In: Deponiegas 2003 - Stilllegung und
Nachsorge von Deponien. Rettenberger/Stegmann (Hrsg.). Verlag Abfall Aktuell,
Band 14, Seite 227 ff.
- (3) Grundke, M. 2001
Katalytische Entsorgung von schwachmethanhaltigen Deponiegasen. Firmenschrift
Pro2 Anlagentechnik GmbH, Willich 2001.
- (4) Steinbrecht, D., Matzmohr, R., Wolff, H.-J., Didik, H. 2003
Entsorgung von heizwertarmen Deponie-Restgasen mit einer Wirbelschichtfeuerung.
In: Deponiegas 2003 - Stilllegung und Nachsorge von Deponien.
Rettenberger/Stegmann (Hrsg.). Verlag Abfall Aktuell, Band 14, Seite 245 ff.
- (5) Glüsing, J. 2003
Flammenlose, nichtkatalytische Oxidation in der Haase-VocsiBox. Umwelttechnik,
Heft 3, 1999.
- (6) Rettenberger, G. 2001
Gastechnische Sanierung einer Altablagerung durch In situ-Be- und Entlüftung. In:
Deponiegas 2001. Rettenberger/Stegmann (Hrsg.). Verlag Abfall Aktuell, Band 13,
Seite 178.
- (7) Heerenklage, J., Schubert, W., Moll-Jürgens, O., Stegmann, R. 2002
Gezielte Übersaugung zur Erfassung- und Behandlung der Schwachgasemissionen
auf der Altablagerung Kiel-Drachensee. In: Deponietechnik 2002. Stegmann -
Rettenberger - Bidlingmaier/Ehrig (Hrsg.). Verlag Abfall Aktuell, Band 18, Seite 161 -
172.
- (8) Handlungsempfehlung Durchführung von Deponiegasmessungen bei
Altablagerungen. Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
ISSN 1437-0158 (Bd. 34, 2001). Bearbeitung: Ingenieurgruppe RUK Rettenberger,
Urban-Kiss, Stuttgart. Redaktion: LfU Baden-Württemberg - Abteilung 4 - Wasser und
Altlasten - F. Kern, Seite 12 - 15. Die Phaseneinteilung wurde von der VDI 3790 Blatt
2: „Umweltmeteorologie, Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen
Quellen - Deponien“, Dez. 2000, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin übernommen.
- (9) Figueroa R. A. 1998
Gasemissionsverhalten abgedichteter Deponien. Economica Verlag, Bonn, 1998
(Hamburger Berichte: Bd. 13) ISBN 3-87081-048-3, Seite 141 ff.
- (10) Figueroa R. A. 1998

Untersuchungen zur mikrobiellen Methanoxidation in Rekultivierungsschichten von Abfalldeponien. Müll und Abfall 5/1998, Seite 334 ff.

(11) Quellenauszüge

Mennerich, A. (1986) Oxidation von Deponiegas auf biologischen Wege - Möglichkeiten und erste Ergebnisse aus Laborversuchen, Müll und Abfall, Nr. 7, S. 271 - 277 bzw.

Figueroa, A. (1998) Untersuchungen zur mikrobiellen Methanoxidation in Rekultivierungsschichten von Abfalldeponien, Müll und Abfall, Nr. 5, S. 340.

Die spezifischen Methan-Abbauraten sind bei Mennerich für CH₄-Gehalte von 15 - 30 Vol.-% angegeben. Bei Figueroa werden spezifische Abbauleistungen von 17,6 g CH₄/m² h = 24,6 l/CH₄/h m² bei einem CH₄-Gehalt von ca. 15 Vol.-% genannt.

Weitere in der Literatur angegebene Methanoxidationsraten:

Stegmann (1991)

Filtersubstrat: Bioabfallkompost, (70 cm) Methanabbauraten: 4,5 l/CH₄/h m²

Figueroa (1993a)

Filtersubstrat: Torf, Baumrinde, Kompost, Methanabbauraten: 15 - 70 l/CH₄/h m²

Mennerich (1996)

Filtersubstrat: Rindenkompost, (85 cm), Methanabbauraten: 15 - 41 l/CH₄/h m²

Figueroa (1993b)

Filtersubstrat: Bioabfallkompost, (30 cm), Methanabbauraten: 8 l/CH₄/h m²

Humer (1996)

Filtersubstrat: Hausmüllkompost, (60 cm), Methanabbauraten: 28 l/CH₄/h m²

(12) Urban-Kiss, S. 2003

Erfahrungen mit der passiven Entgasung von Deponien. In: Stilllegung und Nachsorge von Deponien 2003. Rettenberger/Stegmann (Hrsg.). Verlag Abfall Aktuell, Band 14, Seite 113.

Anhang

Anhang A:

Berechnungsansatz zur Ermittlung der Abbaurate im Deponiekörper	A 1
Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage des berechneten Sauerstoffverbrauches - Datenbasis: sämtliche Messwerte von Nov 2001 bis Jan 2003	A 2
Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage des berechneten Sauerstoffverbrauches - Datenbasis: Messdaten am 13. August und 11. September 2002	A 3
Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage des berechneten Sauerstoffverbrauches - Datenbasis: Messdaten vom 11. September 2002	A 4
Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage der gemessenen CH ₄ -Gehalte bei längerem Stillstand der Absaugung Datenbasis: sämtliche Messwerte von Nov 2001 bis Jan 2003	A 5
Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage der gemessenen CH ₄ -Gehalte bei längerem Stillstand der Absaugung Datenbasis: Messdaten am 13. August und 11. September 2002	A 6
Ermittlung der Abbaurate auf Grundlage der gemessenen CH ₄ -Gehalte bei längerem Stillstand der Absaugung Datenbasis: Messdaten vom 11. September 2002	A 7
Messergebnisse der Überprüfung des Gasfassungssystems vom 13. August, 11. September und 22. Oktober 2002.....	A 8 - A 10

Anhang B:

Ergebnisse der Sondenmessungen am 06. Mai 2002	B 1 - B 2
Ergebnisse der Sondenmessungen am 13. August 2002.....	B 3 - B 4
Berechnungsansatz zur Ermittlung der Abbaurate im Deponiekörper	B 5

Anhang C:

Fotodokumentation - Methanoxidationsfilter	C 1 - C 6
--	-----------