

Internationale Bio – und Deponiegas Fachtagung – DAS-IB GmbH, Bayreuth 2014



Beurteilung der Funktionsfähigkeit von Methanoxidationsschichten sowie Bewertung unterschiedlicher Systemausführungen

Dr.-Ing. A. Seyfert

SEF Energietechnik GmbH

Zwickau

Deponiegas und kein Ende?

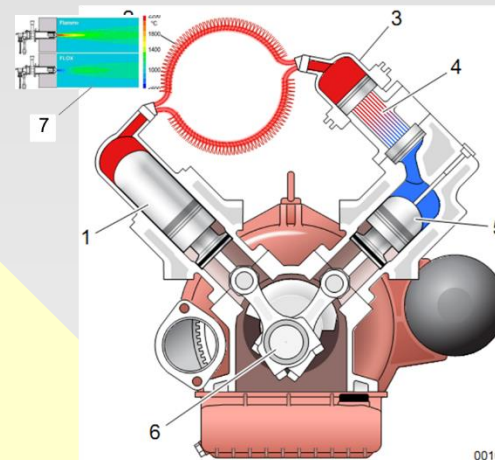
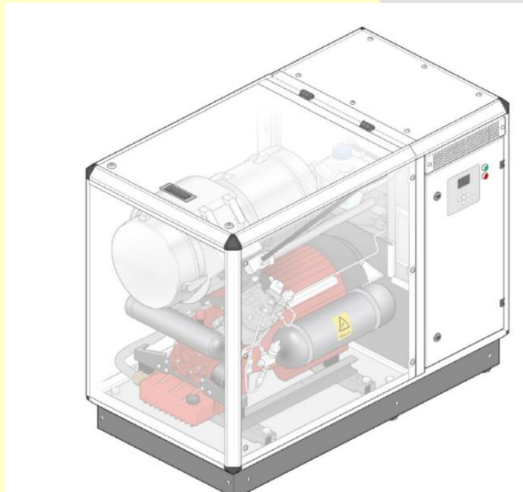
Vortragsschwerpunkte

- Neue Möglichkeiten für die Rest- bzw. Schwachgasnutzung verschieben den Zeitraum bis eine endgültige Beseitigung notwendig wird – Schwachgasfackelanlagen/Einsatz der Stirlingmotorentechnik
- Ergebnisse der LfULG-geförderten Studie zur Methanoxidation
- Aktuelle Messungen zum Deponiegas Abströmverhalten
- Neue Erkenntnisse aus den Durchströmungsversuchen
- Neue Ansätze für die Emissionsberechnung

Neue Möglichkeiten in der Rest- und Schwachgasnutzung

Die Stirlingmotorentechnik

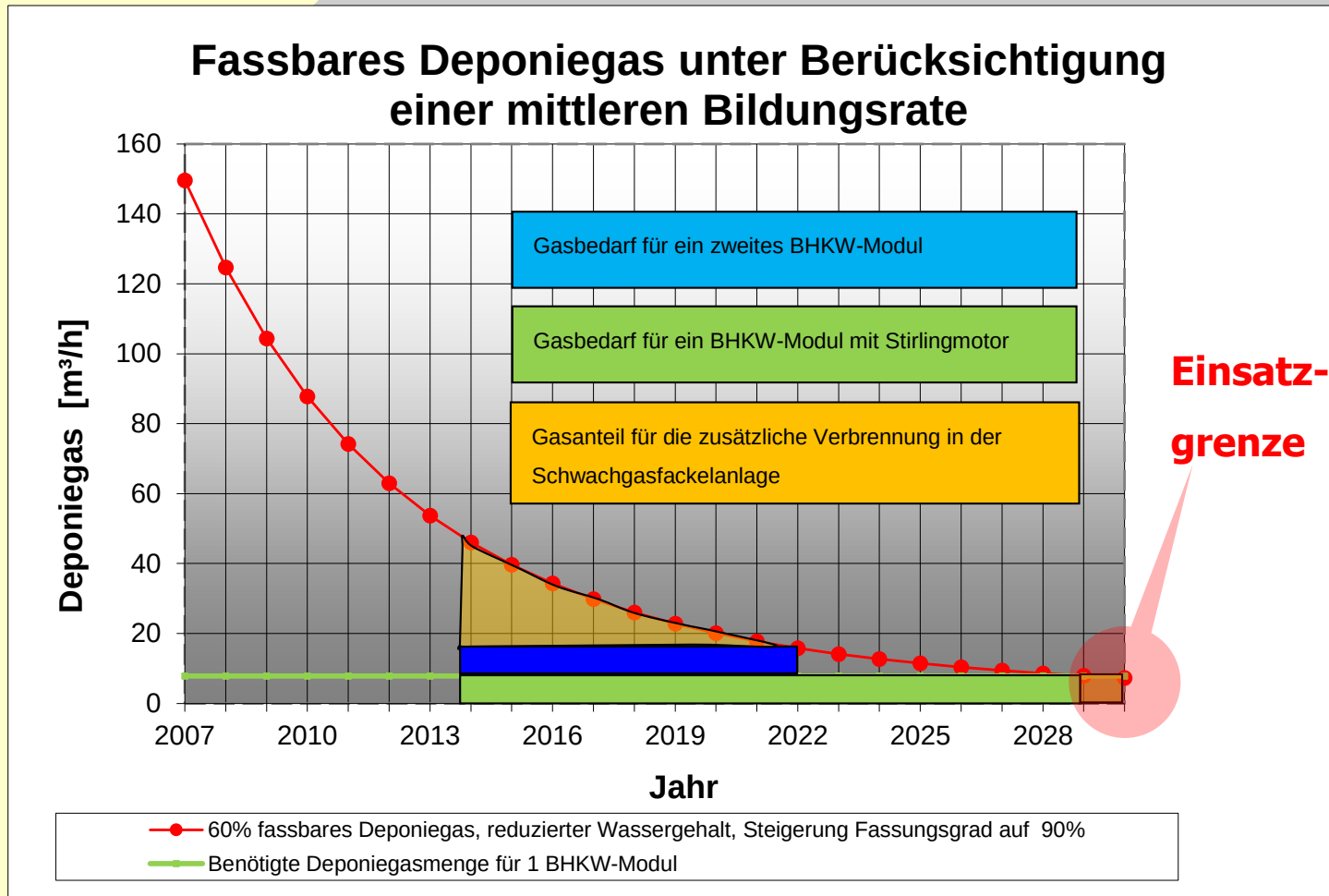
- Einsatz eines Verfahrens mit äußerer und nicht innermotorischer Verbrennung - schadstofftolerant
- Es wurde u.a. eine Brenneinheit für den Stirlingmotor adaptiert (FLOX-Brenner der Wärmeprozessestechnik GmbH), mit der Schwachgase, insbesondere auch Deponiegas, erfolgreich katalytisch und sehr schadstoffarm verbrannt werden
- Der Deponiegasbedarf des Motors beträgt **7,61 m³/h** bei 7 kW(el) und 4kWh/m³ Energiegehalt des Deponiegases ist sehr gering! Die BHKW-Kleinanlage ist modulierend mit einem Wirkungsgrad von 16-24%
- Fa. LAMBDA ist deutscher Vertriebspartner



- 1 Expansionszylinder
- 2 Erhitzer
- 3 Regenerator
- 4 Gaskühler
- 5 Kompressions-zylinder
- 6 Kurbelwelle
- 7 Heizquelle (Gas, Heizöl, Warmwasser, Dampf, usw.)

Abbildung: **BHKW-Modul mit Stirlingmotor** [cleanenergy]

Stirlingmotorentechnik - Einsatzspektrum



- Die Stirlingmotorentechnik sowie auch Schwachgasfackelanlagen verschieben die Grenzen der Notwendigkeit einer passiven Deponiegasentsorgung
- Aber auch hier gibt es Einsatzgrenzen

LfULG-Studie - Bewertungsbasis

- Ziel der Studie – Analyse und Bewertung von Ergebnissen aus der praktischen Nachweismessung, keine wissenschaftliche Abhandlung – mehr als 10 Deponien vorh.
- Bewertungsbasis – 5 Deponien mit unterschiedlichen Systemen in Form/Aufbau sowie Lage der Methanoxidationsschicht wurden in die Analyse einbezogen
- Prüfung und Wertung der bereits hergestellten und betriebenen Systeme auf Basis bodenspezifischer und gastechnischer Untersuchungen
- **LfULG gefördertes Vorhaben mit Beteiligung der DBI-EWI GmbH aus Freiberg**

Variante 1 - Gaseinleitung in die Entwässerungsschicht (30 cm Kies), Tiefenlage 1,0 m

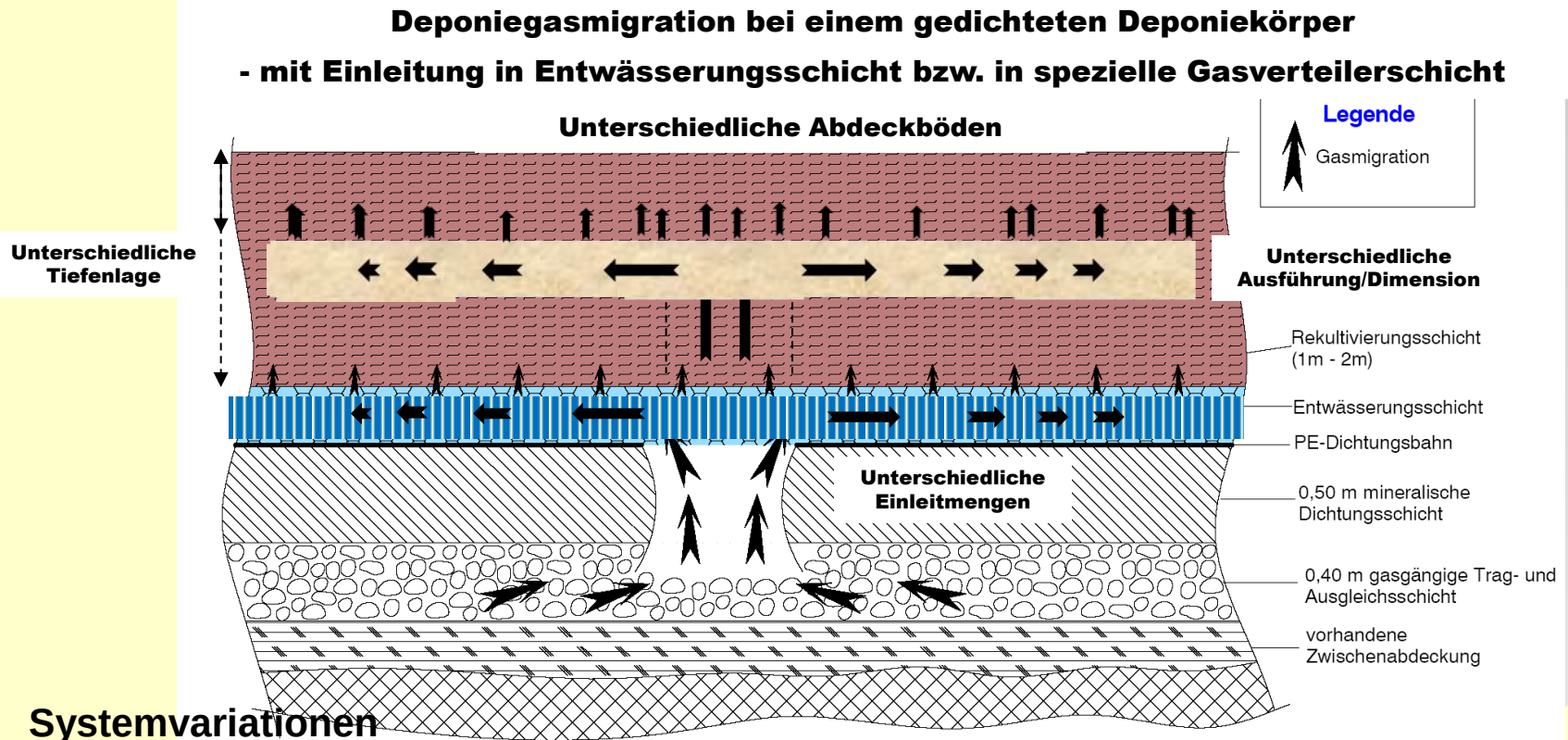
Variante 2 - Gaseinleitung in die Entwässerungsschicht (Drainagematte und im Plateaubereich + Gasverteilerschicht), Tiefenlage 1,5 m

Variante 3 - Gaseinleitung oberflächennah in flache Einzelkanäle, Tiefenlage ca. 0,3 m, zusätzliche Einleitung in die Entwässerungsschicht, Tiefenlage 1,2 m

Variante 4 - Gaseinleitung in ein Verteilerrigolensystem, Tiefenlage ca. 0,4 m, zusätzliche Einleitung in die Entwässerungsschicht

Variante 5 - Gaseinleitung in eine Gasverteilerfläche, Tiefenlage 0,4 m, zusätzliche Einleitung in die Entwässerungsschicht

LfULG Studie – untersuchte Systemvariationen



Systemvariationen

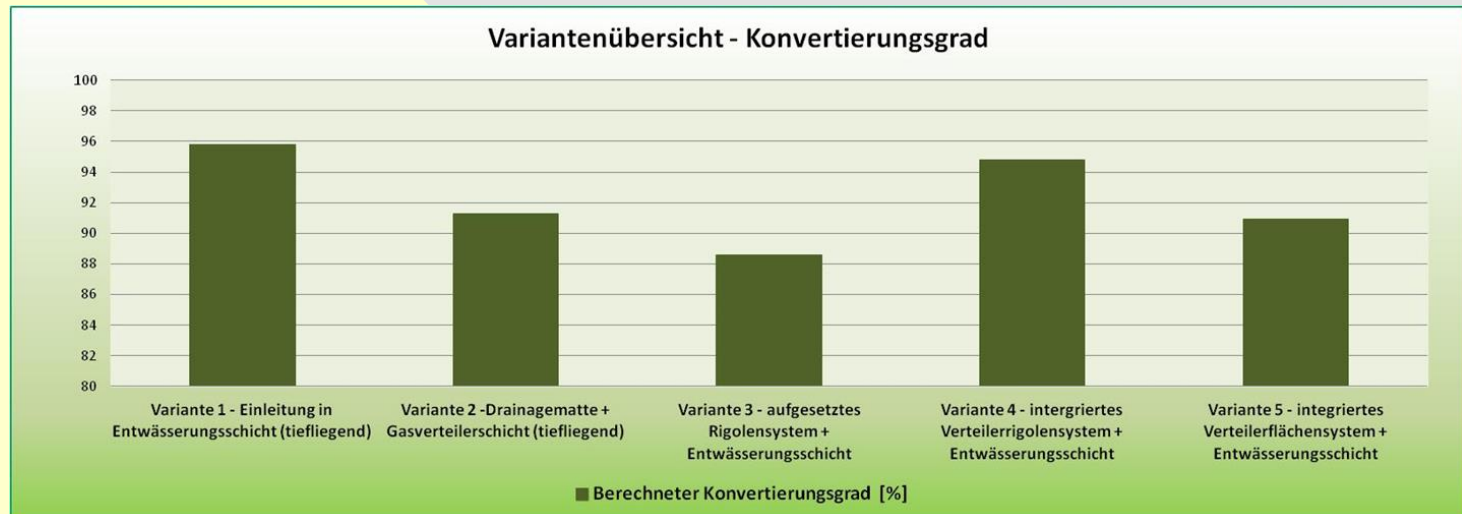
- Unterschiedliche Tiefenlage der Einleitschichten/Gasverteilerschicht sowie Art der Abdeckböden
- Unterschiedliche Ausführung und Dimensionierung der Gasverteilerschicht - separate Rigolen, Fläche oder offene Entwässerungsschicht!
- Unterschiedliche Einleitmengen (je nach Deponiegröße und Alter) - z.T. Doppeleinleitung
- große Systemvielfalt und freie Parameter, Problem oberflächengedichtete Deponien nach TASI finden in den Empfehlungen des BOS 7-3 kaum Berücksichtigung

LfULG-Studie – Aus der Bewertung der Messergebnisse gewonnene Erkenntnisse

- Die Höhe der Bodenüberdeckung über der Gasverteilerschicht hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Methanoxidationsrate, da durch die Eigenschaften der untersuchten Böden meist nur die oberste Bodenschicht für die Methanoxidation wirksam war (keine spezielle Bodenpräparation, HotSpots vorhanden, Gasverteilung)
- Systeme mit oberflächennah angeordneten Gasverteilerschichten verkürzen aber auf Grund des zyklischen Lufteintrages in diese Schicht und der damit verbundenen zeitnahen Aerobisierung der betreffenden Deponiebereiche erheblich die Zeitdauer der Restgasemission und führen zu einer verbesserten Emissionsbilanz – indirekte Deponiebelüftung. Systeme mit tiefliegender Gasverteilerschicht zeigen langfristig meist ein unverändertes Konzentrationsniveau
- Nicht die Art des eingesetzten Bodens oder der Humusgehalt entscheiden vordergründig über die Wirksamkeit eines Verfahrens zur Methanoxidation, sondern erstens die **Gasverteilung unter dieser Schicht** und zweitens der **homogene Gasdurchgang**, welcher durch die Bodendurchgangsrate bestimmt wird. Evtl. technischer Ansatz für die Gasverteilung innerhalb der Verteilerschicht – **Weitere Bodendurchlässigkeitsuntersuchungen**
- Die Methaneinleitung in die Methanoxidationsschicht ist ein stark instationärer Prozess, insbesondere bei Altablagerungen und durch besondere Wetterlagen und Wind geprägt - eine stationäre Betrachtung des Wirkmechanismus kann zu Fehlinterpretationen führen – **Untersuchungen zur Erfassung der Dynamik im Abströmverhalten**

LfULG-Studie - gewonnene Erkenntnisse

- FID-Messergebnisse aus einer groben Rastermessung (als Nachweismessung für die Emissionsfreiheit gedichteter Oberflächen) können nicht sachgerecht für die Berechnung der unkonvertierten Deponiegas-Austrittsmenge herangezogen werden – **eine neue Mess- und Bewertungsmethodik war zu entwickeln**
- Eine Begrenzung des FID-Emissionswertes auf einen zulässigen Maximalmissionswert ist bei Systemen mit Gasverteilerschicht und Methanoxidation im Oberboden nicht zielführend – trotz höherer Einzelwerte kann die Konvertierungsrate hoch sein
- Entwässerungsschichten sind nur für die Konvertierung sehr geringer Restgas-mengen einsetzbar, da eine Abstimmung durch die Doppelfunktion nicht möglich ist
- Trotz der Einschränkungen in der Wirksamkeit waren in den überschlägigen Berechnungen gute Methanoxidationsraten, bzw. Konvertierungsgrade zu verzeichnen. Jedoch war Messmethodik und Berechnungsgrundlage nicht belastbar



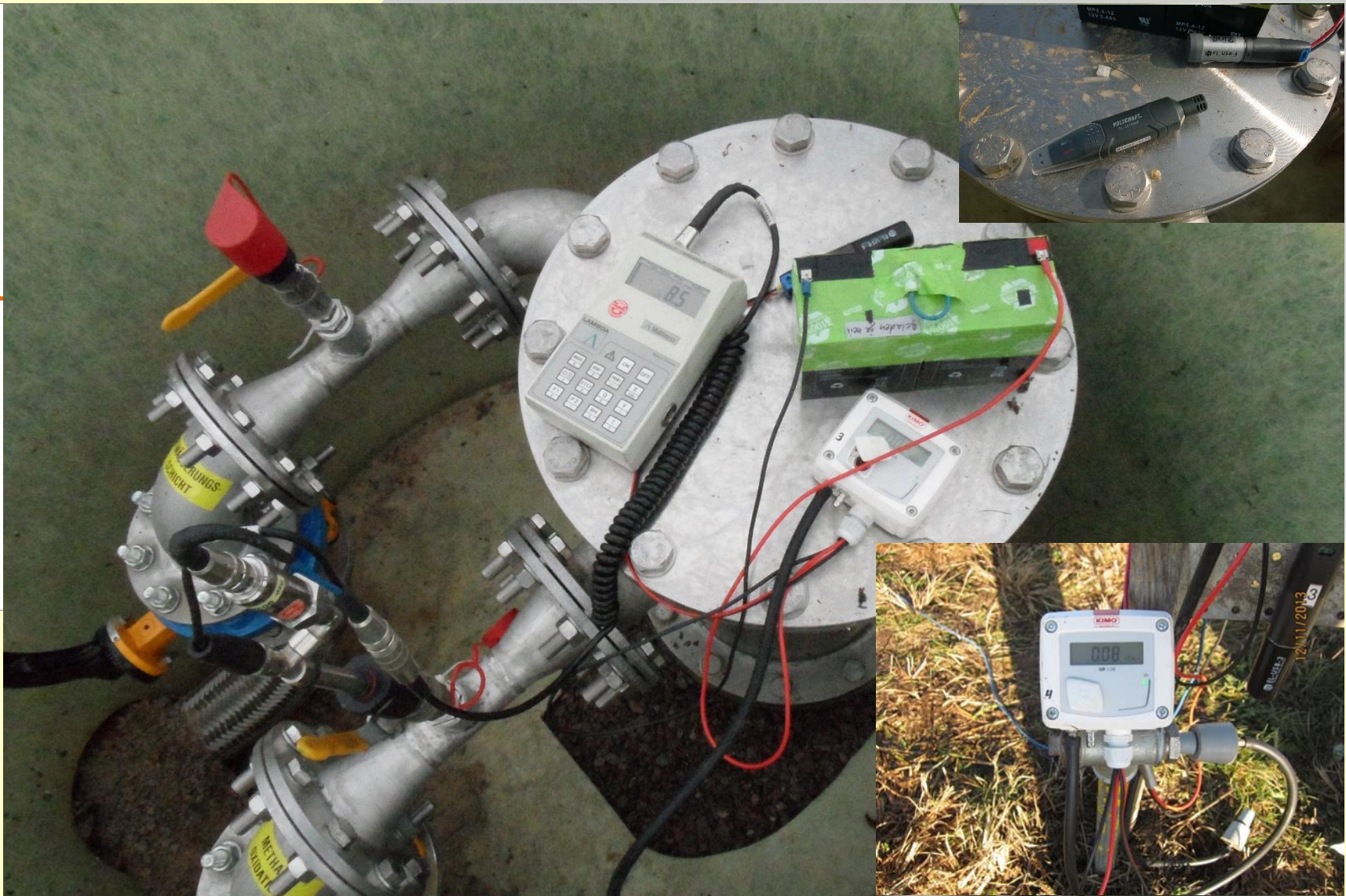
Systemvergleich unter Verwendung von Durchschnittswerten der Einzelmessungen

Variante der Deponiegaseinleitung:	Variante 1 - Einleitung in Entwässerungsschicht (tiefliegend)	Variante 2 - Drainagematte + Gasverteilerschicht (tiefliegend)	Variante 3 - aufgesetztes Rigolensystem + Entwässerungsschicht	Variante 4 - integriertes Verteilerrigolensystem + Entwässerungsschicht	Variante 5 - integriertes Verteilerflächensystem + Entwässerungsschicht
Durchschnittswerte aus allen Messungen!					
Anzahl der berücksichtigten Messungen	5	7	11	7	4
Tiefenlage der Einleitschicht [m]	1,5	1,7 (1,0 Böschung)	0,2 - 0,3	0,4	0,3
Gesamtverteilerfläche [m²]	60.000	36.000	60.000	30.000	26.500
Durchschnittliche Konzentrationen					
Mittelwert CH ₄ [%]	49,86	58,49	43,50	41,31	29,31
Mittelwert CO ₂	8,98	17,70	19,18	17,75	16,77
Durchschnittliche Einleitmengen bzw. Abströmmengen aus den Gasbrunnen/Gasdomen	tiefliegend		geringere Tiefenlage		
Einleitmenge in Gasverteilerschicht [m³/h]			10,48	8,47	4,28
Einleitmenge in Entwässerungsschicht [m³/h]	8,78	7,76	9,88	2,69	4,23
Summe Einleitmenge in Entwässerungs- und Gasverteilerschicht [m³/h]	8,78	7,76	20,36	11,16	8,51
Mengenbeaufschlagung (Methan) je m² Gesamtverteilerfläche [l _(CH₄) /m²xh]	0,073	0,126	0,148	0,154	0,094

Tabellarische Analyse von ca. 50 Messungen

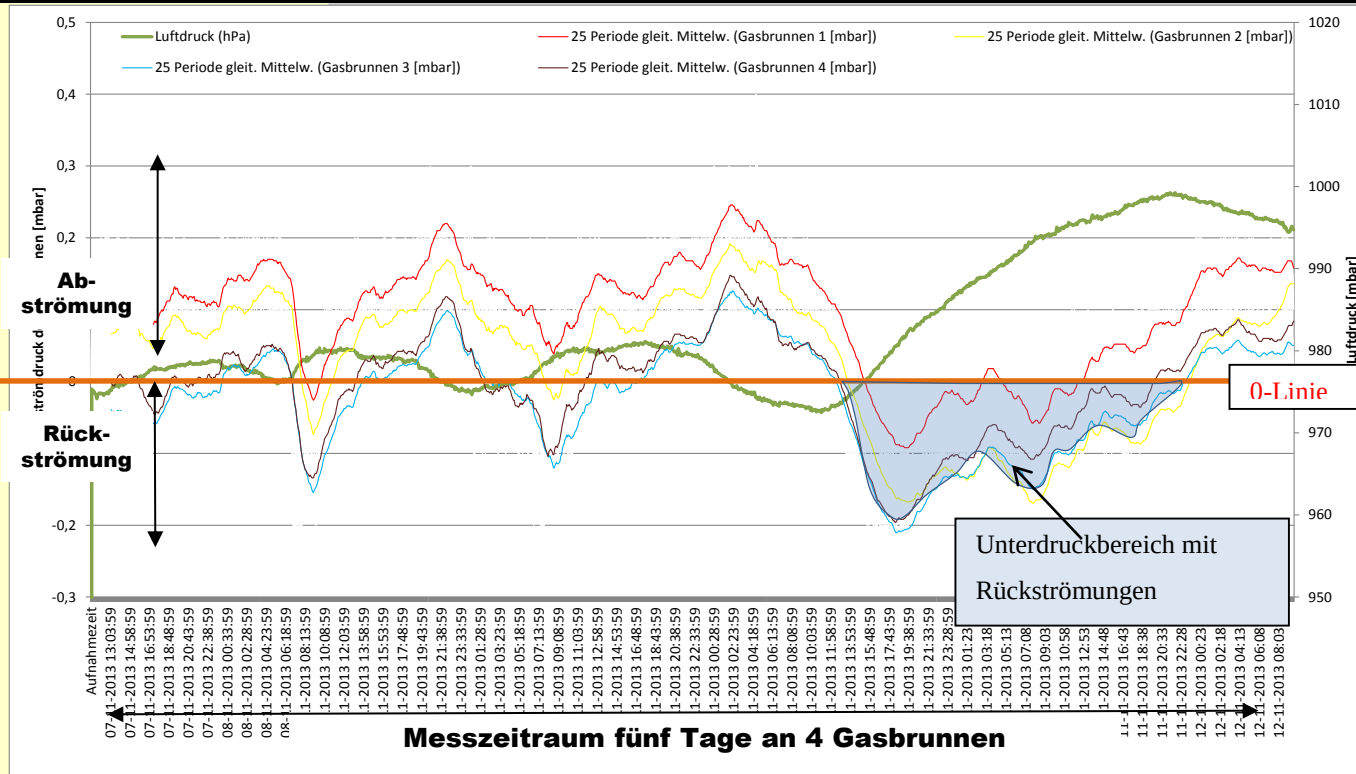
- Die Konzentration der Gas-Hauptkomponenten, insbesondere die Methankonzentration, blieb bei den untersuchten Deponien mit tiefliegender Einleitschicht (mit beschränktem Durchgangsvermögen) auf einem unverändert hohen Niveau – bei geringerer Tiefenlage der Schicht – Aerobisierung und Abkonzentration
- Die Möglichkeit des zyklischen Lufteintrages in den Deponiekörper, mit der damit verbundenen beginnenden Aerobisierung, bringt in der Gesamtbilanz der Restemissionen einen entscheidenden Vorteil, ungeachtet temporärer Mehremission

Messung des Einleitdruckes und Nachweis der Dynamik der eingeleiteten Deponiegasmengen – Druckmesstechnik



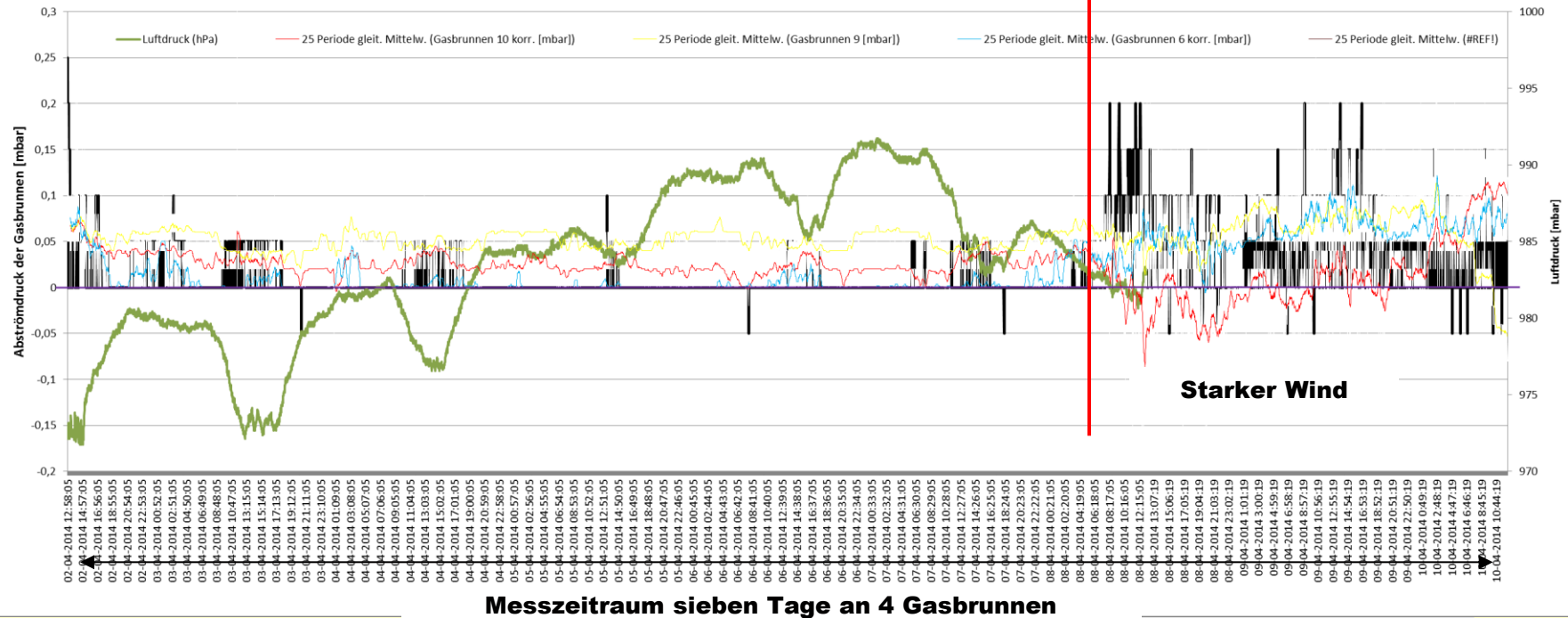
● Bilder: Druck- und Strömungsmessungen an einem Gasbrunnenkopf mit unterschiedlichen Abgängen

Messung des Einleitdruckes und Nachweis der Dynamik des abströmenden Deponiegases – abgedichteter Altdeponiekörper, tiefliegende Einleitschicht



- Der Abströmdruck und somit auch die Abströmmenge unterliegt bei älteren Ablagerungen starken Schwankungen, wodurch nicht nur Zustände des Abströmens, sondern auch des Rückströmens in den Deponiekörper auftreten (insbesondere Luftdruckeinfluss)
- Die Dynamik erschwert zudem eine eindeutige Zuordnung von gemessener Einleitmenge und zeitlich verzögerter Abströmmenge, wodurch eine exakte Berechnung erheblich erschwert wird, Einleitdruck meist sehr gering - maximal 0,5 mbar
- Generell – Einzelmessungen kaum bewertbar**

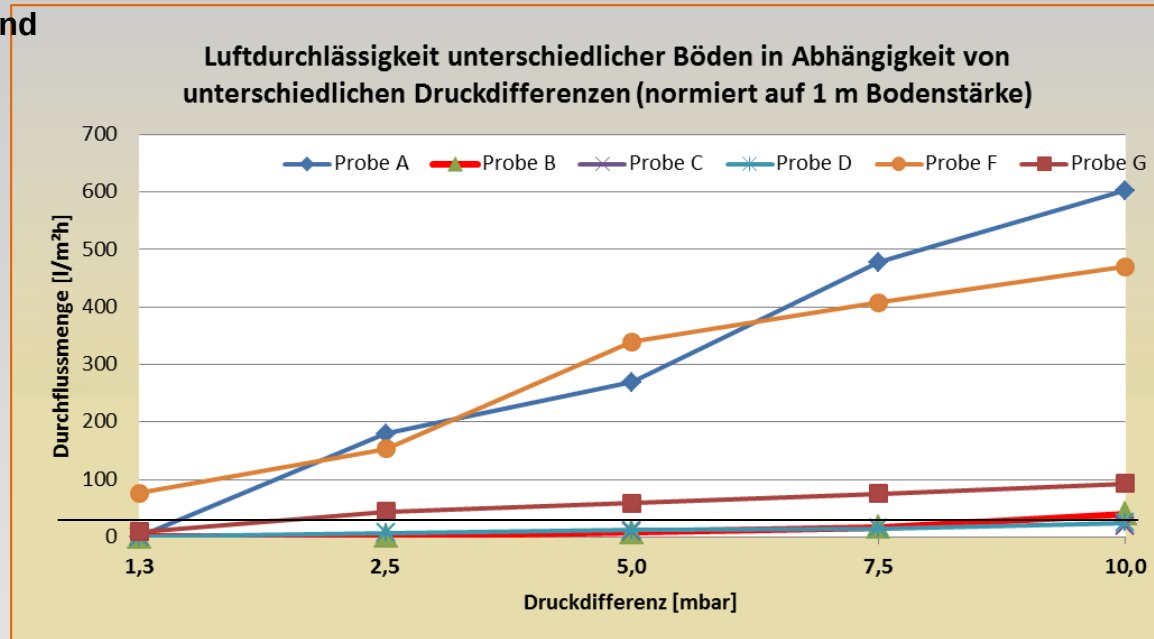
Messung des Einleitdruckes und Nachweis der Dynamik des abströmenden Deponiegases – abgedichteter Deponiekörper, geringe Tiefe der Einleitschicht, höheres Gasungspotential



- Der Abströmdruck und somit auch die Abströmmenge unterliegt bei „noch“ aktiveren Deponien keinen sehr starken luftdruckabhängigen Schwankungen
- Auf Grund der oberflächennahen Lage der Gasverteilerschicht sehr windempfindlich
- Einleitdruck meist sehr gering (auf Grund des geringeren Flächenwiderstandes) - maximal 0,3 mbar, Druck in der Gasverteilerschicht meist unter 0,1 mbar (am Messpunkt)
- Generell – Einzelmessungen gleichfalls nicht ausreichend, aber besser bewertbar**

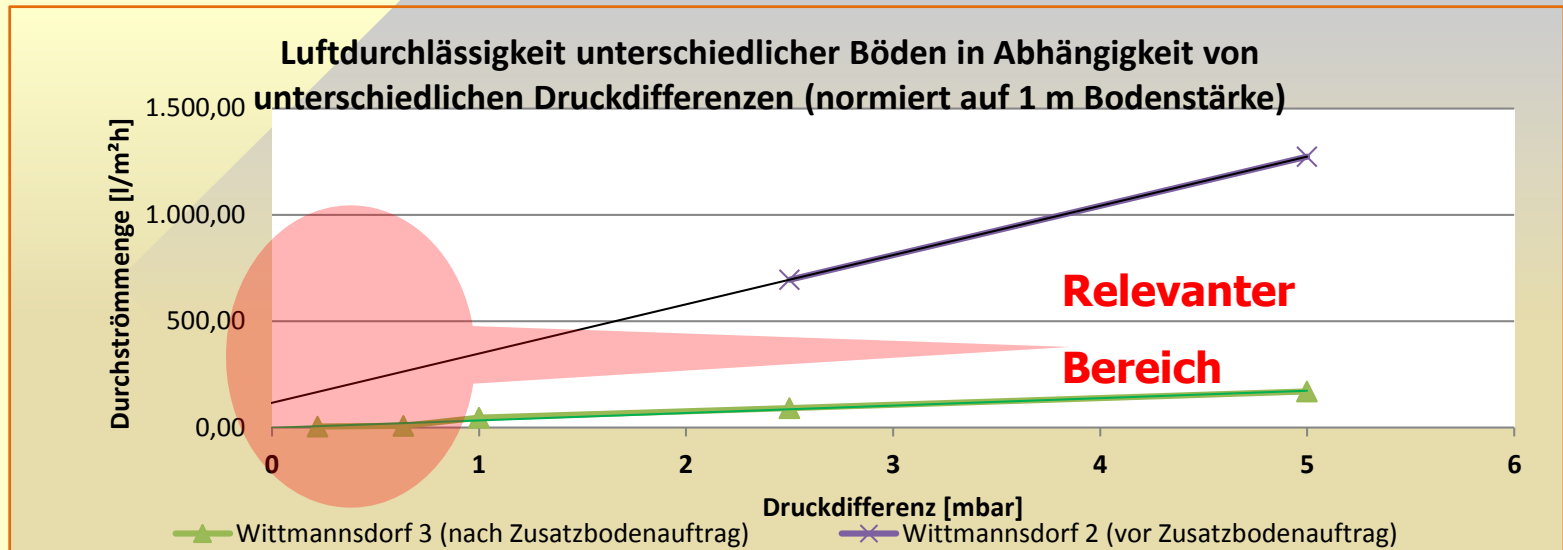
Ergebnisse der gastechnischen Untersuchungen - Durchströmversuche

Bild: Durchströmversuchsstand

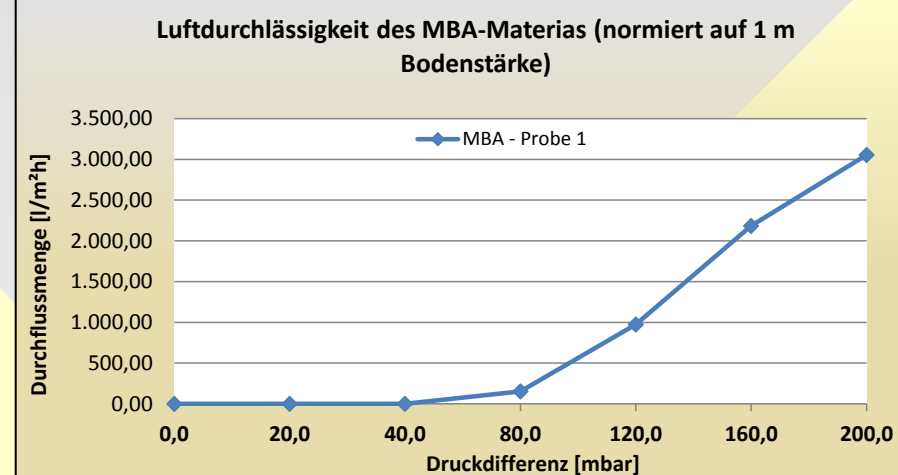
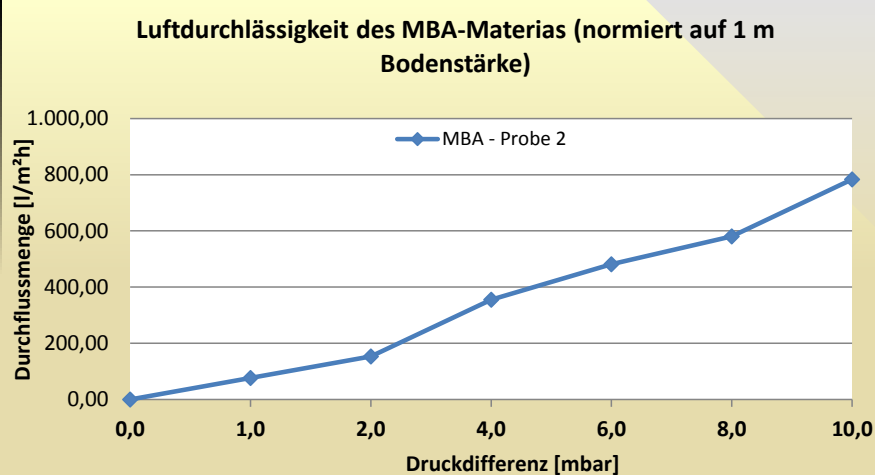


- Schlagprobe direkt von der Methanoxidationsschicht entnommen; Anlegen von geringen Luft-/Gasdrücken 0,0 bis 10,0 mbar und Abströmung in einen Messbeutel
- Trotz Auswahl eines geeigneten (nach BQS 7-3 empfohlenen) Bodens sind die Bodendurchströmraten sehr unterschiedlich
- Ohne Druckaufbau in der Gasverteilerschicht sind die Durchströmraten vieler Abdeckschichten jedoch gleichfalls zu gering um die Methanoxidationsleistung der Abdeckböden (von z.B. 4 l/m²h) zu erreichen – **Einleitung in die Entwässerungsschicht ist aber drucklos!**
- Bei lockeren Bodenschüttungen auch viel zu hohe Durchströmraten!

Neue Ergebnisse der gastechnischen Untersuchungen - Durchströmversuche



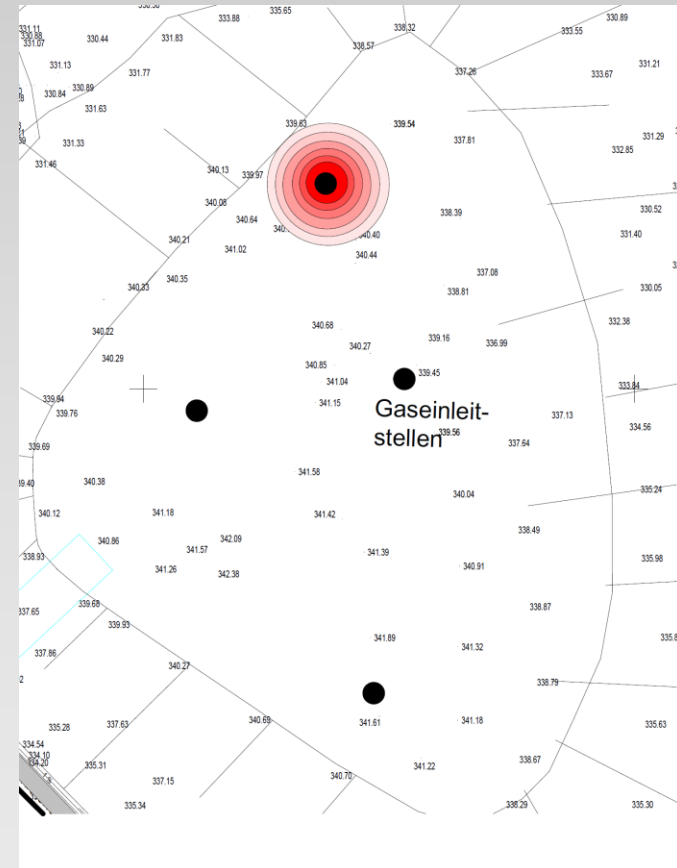
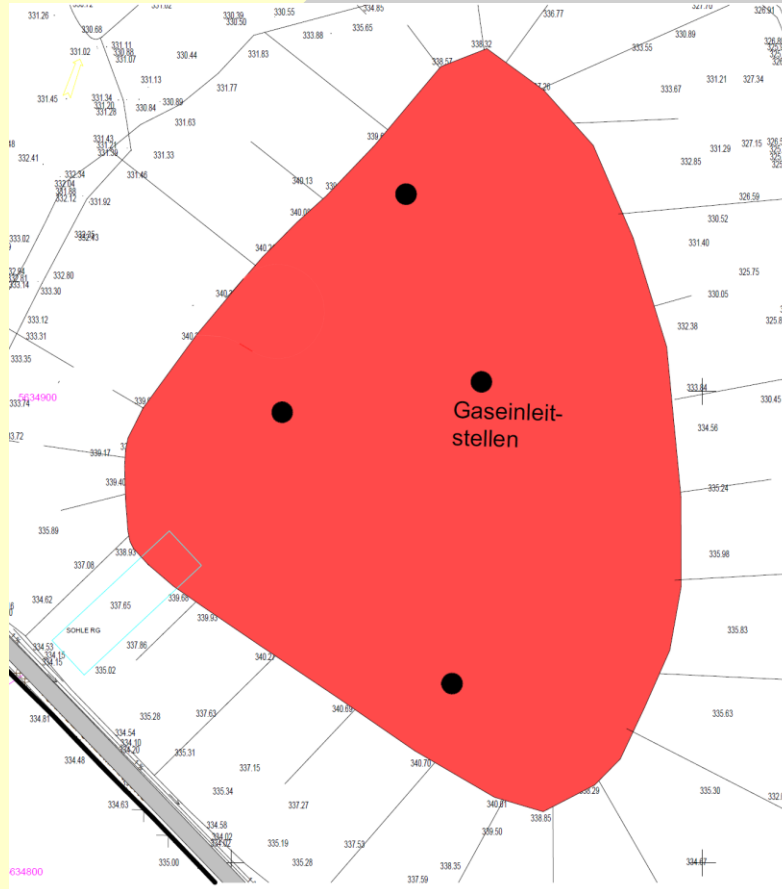
● Eine Reduzierung der Bodendurchgangsrate ist durch den Oberbodenauftrag möglich



● Großer Einfluss der Bodenfeuchte auf die Durchflussrate (extrem bei MBA-Material)

Ergebnisse der gastechnischen Untersuchungen - Gasverteilungsanalysen

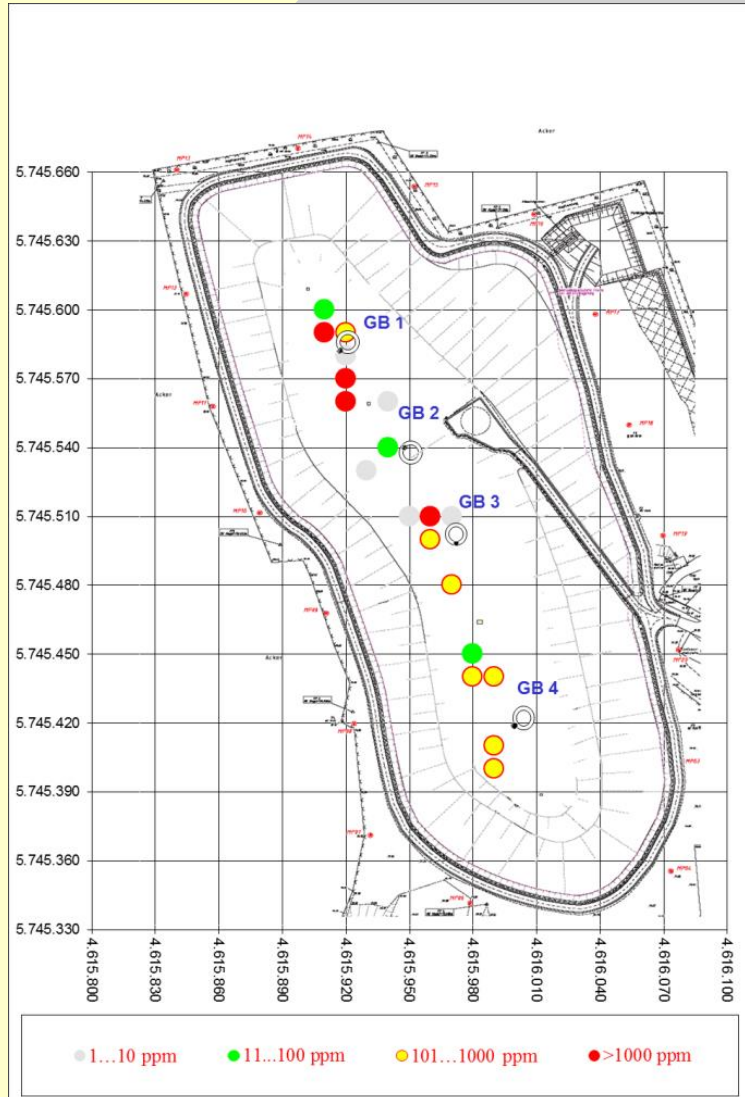
Bilder: Beispiel für eine homogene bzw. inhomogene Gasverteilung in der Gasverteilerschicht



Eine Abstimmung zwischen möglichst homogener Deponiegasverteilung in der Gasverteilerschicht und ausreichender Bodendurchlässigkeit ist sehr schwer realisierbar, auch wenn die empfohlenen Bodenarten zum Einsatz kommen. Es ist zusätzlich ein großer Einfluss des jeweiligen Bodenzustandes vorhanden – Verdichtung und Feuchtegehalt

Berechnung der freien CH-Emissionen auf Grundlage von FID Nachweismessungen

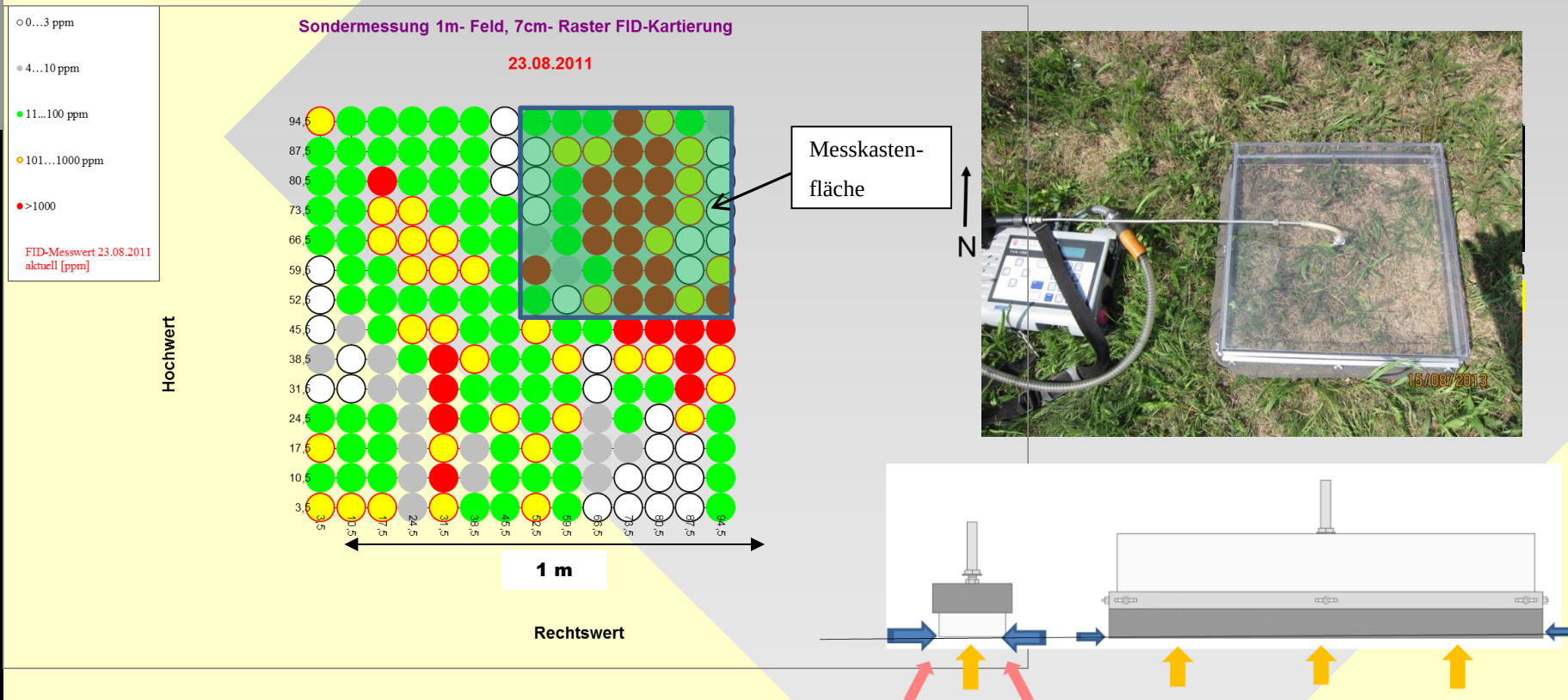
Bild: Im Rahmen einer FID-Messung auf der Methanoxidationsschicht detektierte CH-Emissionen - Beispieldeponie



- Trotz eines homogenen Boden- und Schichtaufbaus ist die Bildung von „Hot Spots“ mit erhöhten Emissionen kaum zu verhindern. Insbesondere an Durchdringungsbauwerken treten Häufungen auf
- Auch bei einer Verringerung des Messrasters (10 m) können aus FID-Messergebnissen die freigesetzten Emissionen nicht sachgerecht berechnet werden
- Vertiefte Messungen bzw. Sondermessungen sind für eine Gesamtsystemabschätzung notwendig
- Eine neue Messmethodik und Auswertung wurde erarbeitet

Ergebnisse der gastechnischen Untersuchungen – FID Nachweismessungen

● Bilder: Messungen mit einer 7 cm Saugglocke bzw. Messkasten in einem Bereich von 1 m²



- Punktmessungen mit FID-Saugglocke können schon in einem Teilgebiet von einem Quadratmeter ganz unterschiedliche Messergebnisse bringen. Zu fest aufgesetzte Saugglocke verfälscht Messergebnisse!
- Die Durchführung von Kastenmessungen mit einem Flächenanteil von 0,25 m² erbringt erst einen bewertbaren Flächenbezug

Ergebnisse der gastechnischen Untersuchungen – FID Nachweismessungen



Bild: Markierung und Absteckung eines Messgebietes

Ergebnisse der gastechnischen Untersuchungen – FID Nachweismessungen

- Tabelle: Im Rahmen einer FID-Kastenmessung mit einem Flächenanteil von 0,25 m² erhaltene Emissionswerte [ppm] auf einer stärker belasteten Teilfläche von 10 m x 10 m

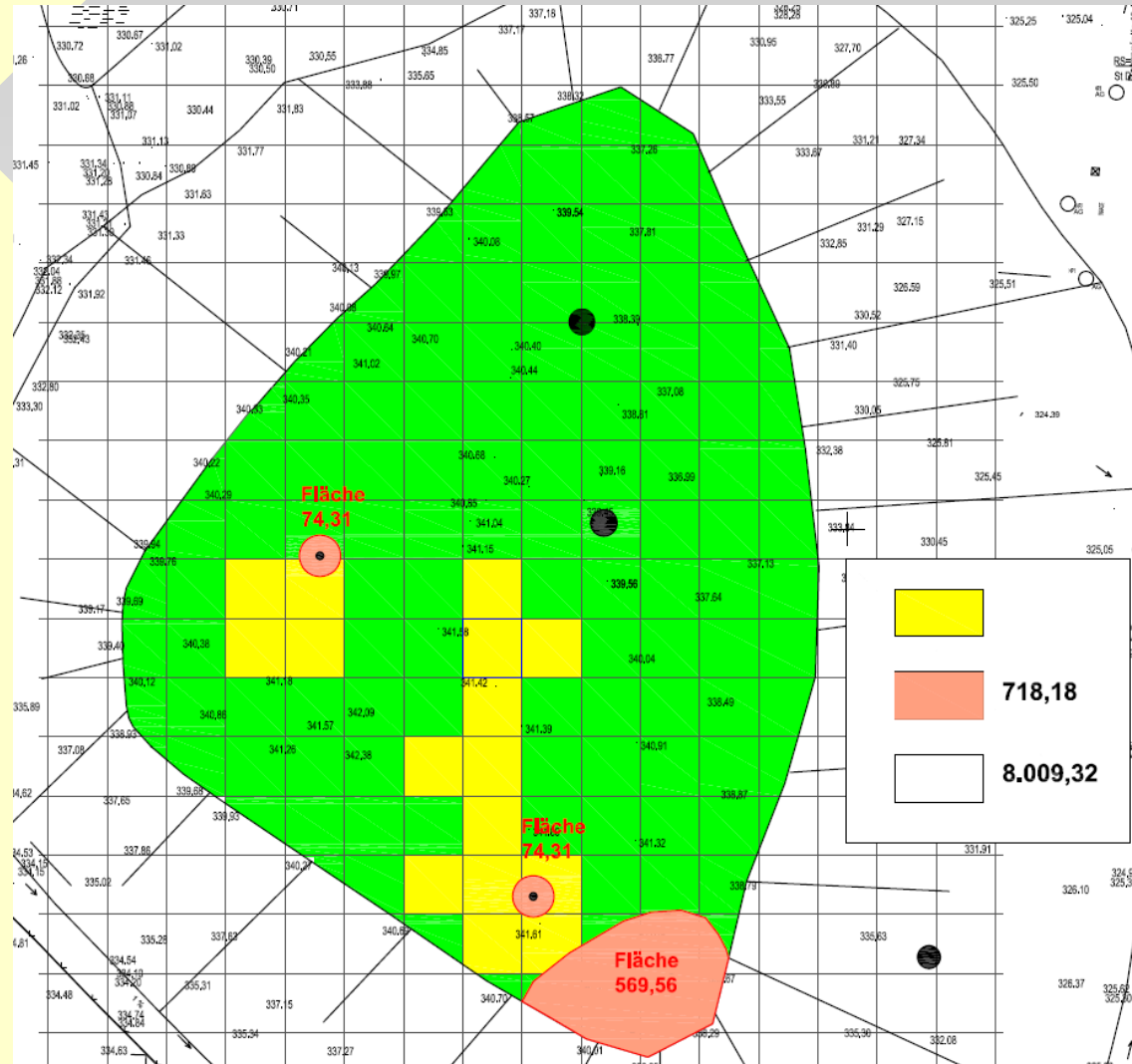
5	5	40	800	2000	2000	600	50	100	60	20	20	70	70	60	60	50	10	20	20
0	0	0	0	300	200	200	5	10	20	0	0	10	20	5	5	5	5	20	0
0	0	10	150	500	250	500	20	0	0	0	5	20	30	50	100	200	100	5	0
0	0	5	300	900	1200	400	800	40	0	0	150	200	600	2000	1000	800	5	10	10
0	10	40	500	800	800	100	40	0	5	60	50	300	400	800	3000	800	10	0	5
0	5	20	250	100	120	0	10	20	10	5	30	40	60	500	10000	50	0	0	0
0	5	10	10	50	50	0	0	0	5	0	0	0	20	100	300	30	0	0	0
5	0	0	5	20	0	0	0	5	10	20	0	0	0	10	10	10	0	0	0
20	30	10	10	60	20	30	10	0	0	10	20	150	30	10	5	15	0	10	20
50	40	60	40	200	40	50	40	10	20	20	40	300	50	30	10	20	30	30	30
20	30	50	30	20	5	20	30	0	10	10	20	50	9	0	10	0	10	20	70
10	0	0	20	10	0	0	10	15	0	200	10	0	10	0	20	0	10	0	0
0	0	0	10	10	0	50	10	20	0	100	20	800	300	500	15	0	10	10	0
0	0	0	0	20	10	10	30	40	60	800	0	150	40	20	20	0	10	5	0
5	0	0	0	20	10	60	50	100	60	100	10000	2000	500	20	10	50	10	10	0
0	10	0	0	5	10	10	30	20	300	50	300	25000	80	0	0	0	200	100	60
5	10	10	10	20	5	10	10	20	20	400	9500	9500	700	5000	10	0	20	70	500
20	20	10	10	10	10	10	10	10	20	10	5	0	10	5	10	10	10	10	5
5	10	5	5	0	0	5	0	0	20	10	10	10	5	5	0	5	0	0	5
50	5	0	0	10	0	0	10	20	10	5	10	5	5	5	10	0	5	5	5

- Aus dieser Detailvermessung lässt sich mathematisch eindeutig die Emission für die Teilfläche von 10 m x 10 m berechnen
- Abstrahierung auf Gesamtfläche lässt sich durch Einteilung in unterschiedliche Emissionszonen durchführen

Einteilung der Methanoxidationsfläche in Flächenanteile als Berechnungsvoraussetzung



Bilder: Einteilung der Deponiezonen in Flächen mit geringen, mittleren sowie höheren Emissionen, Bodentemperatur und Bewuchs bilden dabei wesentliche Anhaltspunkte



Beispiel: Ergebnisse der Berechnung der unkonvertierten Deponiegas-Austrittsmenge

Tabelle: Zonen mit höheren Emissionen

Summierter Gesamtaustritt von Deponiegas (aus Tabelle) [$\text{m}^3_{(\text{Depon})}/\text{h}$]:	0,0716
Deponiegas-Einleitmenge aus allen Gasbrunnen [$\text{m}^3_{(\text{Depon})}/\text{h}$]:	2,50
Prozentualer Anteil Einleitmenge für Emissionszonen [%] (bei erhöhtem Durchlasswert)	14,00%
Zuordenbare berechnete Deponiegas-Einleitmenge aus allen Gasbrunnen [$\text{m}^3_{(\text{Depon})}/\text{h}$]:	0,35
Berechnete Konvertierungsrate:	79,55%

Tabelle: Zonen mit geringeren Emissionen

Summierter Gesamtaustritt von Deponiegas (aus Tabelle) [$\text{m}^3_{(\text{Depon})}/\text{h}$]:	0,0252
Deponiegas-Einleitmenge aus allen Gasbrunnen [$\text{m}^3_{(\text{Depon})}/\text{h}$]:	2,50
er Anteil Einleitmenge für Zone geringer Emission [%] (bei leicht erhöhtem Durchlasswert)	22,35%
Zuordenbare berechnete Deponiegas-Einleitmenge aus allen Gasbrunnen [$\text{m}^3_{(\text{Depon})}/\text{h}$]:	0,56
Berechnete Konvertierungsrate:	95,49%

Tabelle: Zonen mit nahezu Nullemissionen und Gesamtergebnis

Summierter Gesamtaustritt von Deponiegas (aus Gesamtteilfläche Nullgas) [$\text{m}^3_{(\text{Depon})}/\text{h}$]:	0,0208
Deponiegas-Einleitmenge aus allen Gasbrunnen [$\text{m}^3_{(\text{Depon})}/\text{h}$]:	2,50
Prozentualer Anteil Einleitmenge für emissionsfreie Zone [%]	78,10%
Zuordenbare berechnete Deponiegas-Einleitmenge aus allen Gasbrunnen [$\text{m}^3_{(\text{Depon})}/\text{h}$]:	1,59
Berechnete Konvertierungsrate:	98,69%
Gesamtkonvertierungsgrad unter Berücksichtigung aller Flächenanteile der wirksamen Gasverteilerfläche	95,30%

Ergebnis: Mit entsprechender Sicherheit berechneter Gesamtkonvertierungsgrad liegt trotz punktueller Emissionsquellen bei ca. 95 %, d.h. hohe Einzelwerte bedeuten nicht zwangsläufig die Unwirksamkeit des Systems!

Die Berechnung der freien Emissionen aus den Ergebnissen von FID-Kastenmessungen kann bei größerem Messaufwand ein statistisch bewertbares Ergebnis über den unkonvertierten Methangasaustritt liefern. Notwendigkeit der Zoneneinteilung mit unterschiedlicher Nachweisintensität! Die Dynamik des Prozesses kann jedoch nur schwer Berücksichtigung finden

Die Messungen mit Messkästen bringen rechnerisch weitaus geringere Flächenbelastungen als mit Saugglocken

Bild: Messung der Temperaturverteilung im Schlagloch durch Einstechthermometer

 $+ 20.0^{\circ}\text{C}$

21

12

 $e=0.90$

Thesen – Funktionsfähigkeit von Methanoxidationsschichten

- Nicht nur die Art des eingesetzten Bodens oder der Humusgehalt entscheidet vordergründig über die Wirksamkeit einer Methanoxidationsschicht, sondern die Gasverteilung unter dieser Schicht, die durch ihre Lage sowie die Bodendurchgangsrate bestimmt wird – neuer technischer Ansatz für Gasverteilung
- Systeme mit oberflächennah angeordneten Gasverteilerschichten verkürzen auf Grund der zeitnahen Aerobisierung der betreffenden Deponiebereiche erheblich die Zeitdauer der Restgasemission und führen zu einer verbesserten Emissionsbilanz. Systeme mit tiefliegender Gasverteilerschicht zeigen langfristig meist ein unverändertes Konzentrationsniveau – indirekte Deponiebelüftung
- Die Methaneinleitung in die Methanoxidationsschicht ist ein instationärer Prozess, insbesondere bei Altablagerungen - eine stationäre Betrachtung des Wirkmechanismus oder Einzelmessungen können zu Fehlinterpretationen führen
- FID-Messergebnisse aus einer groben Rastermessung (als Nachweismessung für die Emissionsfreiheit gedichteter Oberflächen) können nicht sachgerecht für die Berechnung der unkonvertierten Deponiegas-Austrittsmenge herangezogen werden. Bessere Ergebnisse sind mit Messkästen oder ähnlichen Messmethoden zu erzielen
- Eine Begrenzung des FID-Emissionswertes auf einen zulässigen Maximalmissionswert ist bei Systemen mit Gasverteilerschicht und Methanoxidation im Oberboden nicht zielführend – trotz höherer Einzelwerte kann die Konvertierungsrate hoch sein
- Entwässerungsschichten sind nur für die Konvertierung sehr geringer Restgas-mengen einsetzbar, da eine Abstimmung durch die Doppelfunktion nicht möglich ist