

Abschlussbericht

Messtechnische Überprüfung des Erfolgs von Stabilisierungsmaßnahmen an im Rahmen der NKI geförderten Deponieprojekten – „MÜDSE“

von

Martin Reiser, Imke Wessel, Martin Kranert

Universität Stuttgart

Lehrstuhl für Abfallwirtschaft und Abluft,

Institut für Siedlungswasserbau,

Wassergüte- und Abfallwirtschaft

Förderkennzeichen: L75 18011

Laufzeit: 01.04.2018 – 31.03.2021

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung
werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

Juni 2021



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhalt

1. Hintergrund.....	4
2. Ziele	6
3. Ausgewählte Deponien.....	7
4. Messtechnische Umsetzung.....	8
4.1. Rasterbegehung mit Flammenionisationsdetektor.....	8
4.1.1. Messprinzip und Geräteaufbau	8
4.1.2. Rasterbegehung	8
4.2. CH4 Airborne Remote Monitoring	8
4.2.1. Das CH4 Airborne Remote Monitoring-System	8
4.2.2. Einsatz von CHARM auf Deponien	9
4.3. Inverse Dispersionsmodellierungsmethode.....	9
4.3.1. Laserabsorptionsspektroskopie zur Konzentrationsermittlung	9
4.3.2. Drohnenbasierte Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometrie zur Konzentrationsermittlung	10
4.3.3. Auswertung der gesammelten D-FTIR- und TDLAS-Daten durch Modellierung	12
4.4. Auswertung der gesammelten (D-)FTIR-Daten mit Hilfe der Tracer-Methode	13
5. Durchführung der Vergleichsmessungen	15
5.1. Grundsätzliches.....	15
5.2. Deponie A	17
5.2.1. Vergleichsmessungen mit TDLAS, CHARM und FID zur Emissionsermittlung im Grundzustand	17
5.2.2. Vergleichsmessungen mit TDLAS und D-FTIR an Deponie A im Urzustand und Verifizierung der Messmethode	18
5.2.3. Vergleichsmessungen mit TDLAS und D-FTIR zur Verifizierung der Stabilisierungsmaßnahme.....	19
5.3. Deponie B	20
5.3.1. Vergleichsmessungen mit TDLAS, CHARM und FID zur Emissionsermittlung im Urzustand	20

5.3.2. Vergleichsmessungen mit TDLAS und FTIR zur Verifizierung der Stabilisierungsmaßnahme	21
6. Ergebnisse der Vergleichsmessungen	23
6.1. Allgemeines.....	23
6.2. Deponie A	23
6.2.1. Bestimmung der Gesamtemission bei der Vergleichsmessung mit TDLAS und CHARM	23
6.2.2. Bestimmung der Hauptaustrittsstellen bei der Vergleichsmessung mit FID und CHARM	24
6.2.3. Emissionsermittlung bei der Vergleichsmessung mit TDLAS und D-FTIR bei gleichzeitiger Verifizierung der Messmethode.....	26
6.2.4. Bestimmung der Emissionsraten bei der Vergleichsmessung mit TDLAS und D-FTIR zur Verifizierung der Stabilisierungsmaßnahme ..	27
6.3. Deponie B	28
6.3.1. Ergebnis der Emissionsermittlung der Deponie im Urzustand mittels IDMM und CHARM	28
6.3.2. Bestimmung der Hauptaustrittsstellen der Deponie im Urzustand.....	29
6.3.3. Ergebnis der Messungen zur Verifizierung der Wirksamkeit der Stabilisierungsmaßnahme.....	30
6.3.4. Ermittlung der Hauptaustrittsstellen der Deponie in stabilisiertem Zustand	31
6.4. Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse aus der Emissionsermittlung.....	32
7. Diskussion	34
7.1. Bestimmung der Gesamtemission	34
7.2. Bestimmung der Hauptaustrittsstellen	35
7.3. Vergleich der Messverfahren	35
8. Zusammenfassung und Ausblick.....	40
Literatur	41
Anhang	41
Bericht erste Befliegung von ADLARES GmbH.....	41
FID-Messung Lottstetten (entspricht Deponie A)	41
FID-Messung Münchingen (entspricht Deponie B).....	41

1. Hintergrund

Die Konzentrationen von Treibhausgasen steigen global an. Relevant sind hierbei vor allem Kohlenstoffdioxid (CO_2), Lachgas (N_2O) mit einem global warming potential (gwp) von 265 und Methan (CH_4) mit einem gwp von 28. Das gwp bedeutet, dass beispielsweise 1 mol CH_4 während eines Zeitraums von 100 Jahren eine 28 - mal stärkere Erwärmung nach sich zieht als 1 mol CO_2 .

Seit 2005 besteht das Verbot der Ablagerung unbehandelter, organikhaltiger Abfälle auf Siedlungsabfalldeponien [DepV 2009]. Dieses Verbot hat die Reduktion von Emissionen klimarelevanter Treibhausgase, im Fall von Deponien vor allem Methan, zum Ziel. Trotz dieses Verbots werden klimarelevante Mengen Methan und anderer Gase diffus über die Deponieoberflächen emittiert. Diese Emissionen stammen von vor dem Verbot eingelagerten, abbaubare Organik enthaltenden, Siedlungsabfällen.

Aus der Abfalldeponierung stammen jährlich 11 000 Gg CO_2 -Äquivalente [UBA 2013]. Eine Reduktion dieser Emissionen um 500 bis 2 500 Gg CO_2 -Äquivalente pro Jahr durch Deponiebelüftung ist ein erklärtes Ziel der Bundesrepublik Deutschland. Eine erfolgreiche Belüftung kann zu einer Reduktion von bis zu 90 % der Methanemissionen einer einzelnen Deponie führen [BMUB 2014]. Über die nationale Klimaschutzinitiative (NKI) werden Deponiebelüftungsprojekte auf kommunaler Ebene finanziell gefördert.

Die Quantifizierung von Methanemissionen aus Siedlungsabfalldeponien erfolgt bislang über Emissionsprognosen und über gefasste Methanmengen im Gasfassungssystem, nicht jedoch mit Hilfe von Messungen, die eine Aussage über die tatsächlich emittierte Methanfracht ergeben.

Zum Erstellen einer Emissionsprognose werden einerseits Berechnungen der Deponiegasemissionen und andererseits Kontrollmessungen mittels Flammenionisationsdetektor (FID) angestellt (vgl. Abschnitt 4.1.). Deponiegasemissionen werden mit Hilfe von Berechnungen, die auf verschiedenen Annahmen bezüglich der eingelagerten Abfallmenge, der Abbaubarkeit der verschiedenen Abfallfraktionen, des Methangehalts des abgesaugten Deponiegases, des Alters der Ablagerung und des Erfassungsgrades des Deponiegasfassungssystems beruhen, ermittelt. Die Kontrollmessungen mit FID auf der Deponieoberfläche im Rahmen von regelmäßigen Rasterbegehungen dienen zur Bestätigung, dass nur geringe Methankonzentrationen feststellbar sind. FID-Messungen auf der Deponieoberfläche dienen nicht zur Ermittlung von Methanfrachten. Deponiegasemissionen werden mit dieser Methode nicht erfasst.

Die Diskrepanz zwischen berechneter Methanproduktion und tatsächlich abgesaugter Methanmenge ist jedoch erheblich. Dies wurde an 17 Deponien mit verschiedenen Modellen untersucht [Heyer et al. 2018]. Daher stellt sich die Frage nach dem Verbleib der Differenzmengen zwischen theoretisch produzierten Methanmengen und den in der Praxis absaugbaren Methanmengen. Mögliche Erklärungen für diese Differenzmengen sind Speicherung im Deponiekörper, Oxidation in der Abdeckschicht, Migration in das die Deponie umgebende Erdreich und Emission von Methanmengen. Alle vier genannten Vorgänge laufen an Deponien stets parallel ab. Dies macht die

messtechnische Überprüfung über die gesamte Deponieoberfläche notwendig, um diffus über die Oberfläche emittierte Methanmengen zu ermitteln und die Bilanz so zu vervollständigen. Im Rahmen des Projektes werden vergleichende Messungen mit verschiedenen Methoden zur Emissionsbestimmung durchgeführt.

Stabilisierungsmaßnahmen haben das Ziel die herrschenden anaeroben Bedingungen im Deponiekörper durch Einbringen von Luft oder Sauerstoff in aerobe Bedingungen umzuwandeln. Somit wird den anaerob arbeitenden, methanproduzierenden Mikroorganismen die Lebensgrundlage genommen. Die Folge ist die Ansiedlung aerober Mikroorganismen, die die eingelagerte Organik und das eventuell vorhandene Methan zu CO₂ umsetzen.

2. Ziele

Ziel des Projektes ist die Überprüfung der Wirksamkeit von Stabilisierungsmaßnahmen. Erreicht wird diese Überprüfung mit Hilfe von Vergleichsmessungen an zwei Deponien bei unterschiedlichen Deponiezuständen. Im Messplan vorgesehen ist eine Nullmessung, die Emissionen der Deponie im Urzustand ohne technische Entgasung abbildet. Eine Messung im Grundzustand zeigt die Emissionen bei einer Entgasungssituation, bei der die vorhandene Fackel ein- bis zweimal pro Woche betrieben wird. Eine durchgängige Entgasung war bei den untersuchten Deponien mit den vorhandenen Fackleinrichtungen schon seit längerem nicht mehr möglich. Die Messung nach der Installation und Inbetriebnahme der Stabilisierungsmaßnahme ermittelt die Wirksamkeit der Maßnahme.

Explizit können folgende Ziele formuliert werden:

1. Messtechnische Erfassung der diffusen Methanemissionen von Deponien in nicht entgastem Zustand.
2. Messtechnische Erfassung der diffusen Methanemissionen von Deponien bei regelmäßiger Entgasung.
3. Messtechnische Erfassung der (noch) vorhandenen diffusen Methanemissionen von Deponien während der Aktivität einer Stabilisierungsmaßnahme.
4. Vergleich der Emissionen bei den unterschiedlichen Zuständen einer Deponie.
5. Vergleich der Eignung verschiedener Messverfahren zur messtechnischen Erfassung diffuser Methanemissionen.

Vergleichspunkte der angewendeten Messverfahren waren hierbei die Genauigkeit der Bestimmung von Hauptaustrittsstellen und die Emissionsermittlung. Hauptaustrittsstellen wurden mit den Messverfahren „Rasterbegehung mit Flammenionisationsdetektor“ (Abschnitt 4.1.) und „CH₄ Airborne Remote Monitoring“ (CHARM) (Abschnitt 4.2.) ermittelt. Der Vergleich der Emissionsermittlung erfolgte zunächst mit dem CHARM-System und der Inversen Dispersionsmodellierungsmethode (IDMM) (vgl. Abschnitt 4.3.) basierend auf TDLAS-Daten. Da das CHARM-System auf Grund technischer und terminlicher Probleme nicht für die folgenden Messungen zur Verfügung stand, wurde stattdessen ein eigens entwickeltes drohnenbasiertes FTIR (Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer) kurz D-FTIR eingesetzt. Dieses wurde als Ersatz für das CHARM-System zum Vergleich zur IDMM basierend auf TDLAS-Daten hinzugezogen. Die Verifizierung der IDMM basierend auf TDLAS-Daten und D-FTIR-Daten erfolgte mit Hilfe eines Freisetzungsversuchs auf einer der ausgewählten Deponien (vgl. Abschnitt 5.2.2.).

3. Ausgewählte Deponien

Die Auswahl an welchen Deponien Messungen durchgeführt werden sollten, erfolgte in Absprache mit dem Landkreis Waldshut in Baden-Württemberg und aufgrund dort geplanter Stabilisierungsmaßnahmen. Zwei Deponien wurden ausgewählt.

Die Deponie A hat eine Fläche von 1,8 ha. Zwischen 1975 und 1992 wurden etwa 114 000 Mg Siedlungsabfälle eingelagert. Auf der Deponie befindet sich eine mineralische Oberflächenabdichtung. Im Jahr 1992 wurde eine aktive Entgasung installiert, die 2018 mit Hilfe einer VocsiBox® der Firma BMF Haase ertüchtigt wurde. Deponie A hat eine ebene Topographie mit nahezu quadratischer Geometrie.

In die Deponie B wurden zwischen 1970 und 2005 361 000 Mg Siedlungsabfälle eingelagert. Die gesamte Abfallmenge wurde 2008 auf einen Neuteil umgelagert. Die Fläche des Neuteils beträgt 1,8 ha. Eine aktive Entgasung besteht seit 2005. Die Leistung der Fackel beträgt 30 m³ Deponiegas pro Stunde. Abgedeckt wurde die Deponie nach der Umlagerung mit einer mineralischen Oberflächenabdichtung mit temporärer Folienabdeckung, die noch immer besteht. Deponie B ist haufenförmig aufgeschüttet und ragt etwa 15 m über die umgebende Oberfläche.

An beiden Deponien wird als Stabilisierungsmaßnahme die Übersaugung angewendet. Prinzip dieser Stabilisierungsmaßnahme ist, dass durch das Absaugen großer Volumenströme die Deponie in Unterdruck versetzt wird. Um diesen Unterdruck auszugleichen strömt Luft von außen nach innen in die Deponie ein. Die Bedingungen der Deponie werden somit von außen nach innen von anaeroben Bedingungen in aerobe Bedingungen umgewandelt. Durchdringt die einströmende Luft den gesamten Deponiekörper, ist die Deponie aerobisiert. Es wird kein Methan mehr gebildet. Bei weiterer Übersaugung wird der im Deponiekörper noch vorhandene Kohlenstoff aerob zu CO₂ abgebaut. Das abgesaugte Gas hat dann nur noch einen geringen Methangehalt und damit einen geringen Brennwert. Eine energetische Nutzung ist nicht möglich. Zur Entsorgung sind verschiedene Schwachgasfackeln auf dem Markt verfügbar, die eine thermische Entsorgung über eine Stützfeuerung oder Vorerwärmung des zu entsorgenden Gases gewährleisten.

4. Messtechnische Umsetzung

4.1. Rasterbegehung mit Flammenionisationsdetektor

4.1.1. Messprinzip und Geräteaufbau

Das zugrundeliegende Messprinzip des Flammenionisationsdetektors (FID) ist die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit einer Brenngasflamme, die sich zwischen zwei Elektroden befindet. Die Änderung kommt durch eine Erhöhung der Ionenanzahl durch Verbrennung von Kohlenwasserstoffen im Probengas zustande. Auf Deponieoberflächen bestehen Kohlenwasserstoffe zu 99 % aus Methan. Somit kann das Signal des FIDs direkt auf die Methankonzentration bezogen werden [VDI 3860 Blatt 3 2017].

4.1.2. Rasterbegehung

Um die Konzentrationsverteilung auf der Deponieoberfläche zu ermitteln wird eine Rasterbegehung mit Hilfe eines tragbaren FIDs mit Saugglocke durchgeführt. Über die zu untersuchende Fläche wird ein Raster mit einer maximalen Kantenlänge von 25 m auf 25 m der einzelnen quadratischen Rasterkästchen gelegt. In jedem Rasterkästchen wird an zwei zufällig ausgewählten Punkten mit einem Mindestabstand von 9 m eine Punktmessung durchgeführt. Bei erhöhten Konzentrationen von > 100 ppm an einem Messpunkt, hat in jeder Hauptrichtung im Abstand von maximal 3 m eine weitere Messung zu erfolgen. [VDI 3860 Blatt 3 2017]

4.2. CH₄ Airborne Remote Monitoring

4.2.1. Das CH₄ Airborne Remote Monitoring-System

CH₄ Airborne Remote Monitoring (CHARM) ist ein hubschrauberbasiertes Lasersystem, das zur Detektion von Methanemissionen aus Erdgasleitungen entwickelt wurde [Fix et al. 2004; Scherello 2012].

Das Messprinzip des CHARM-Systems entspricht einer Sonderform der Licht- und Abstandsmessung (engl. Light detection and ranging = Lidar), der differentiellen Licht- und Abstandsmessung (engl. Differential Absorption Lidar = DIAL). Hierbei erfolgt die gleichzeitige Aussendung zweier Laser-Strahlen, im Falle des CHARM-Systems vom Messgerät im Helikopter aus in Richtung Erdboden. Einer der Laser-Strahlen hat eine Wellenlänge, die von Methan absorbiert wird, der andere eine geringfügig andere, so dass sie nicht von Methan absorbiert wird, die sonstigen Eigenschaften jedoch gleichbleiben. Beide Laser-Strahlen treffen auf dem Boden auf und werden teilweise zurück zum Messgerät im Helikopter gestreut. Dieses Messgerät registriert zum einen den Abstand zum Boden über die Laufzeit zwischen Aussenden und Registrieren. Zum anderen wird aus der Differenz der Intensitäten die CH₄-Konzentration auf der jeweiligen Strecke zwischen Helikopter und Boden ermittelt.

Im Falle der Messungen mit dem CHARM-System basiert die quantitative Bestimmung der Gesamtemission einer Deponie auf dem Gauß'schen Integralsatz. Nach diesem ist

es ausreichend, den (Durch-) Fluss auf dem Rand eines Gebietes zu bestimmen, um die Emissionsmenge innerhalb dieses Gebietes zu berechnen. Die Bestimmung des Methanflusses erfolgt durch die Messung der Methankonzentration entlang der Randlinie sowie der Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

4.2.2. Einsatz von CHARM auf Deponien

In einem Projekt im Jahre 2016 wurde eine Einsatzprüfung und -anpassung für Methanemissionen auf Deponien durchgeführt. Partner war dabei u.a. die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und die Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg.

Es wurden drei Deponien in Baden-Württemberg befliegen und auf diesen neben einer flächigen Überprüfung auch die Gesamtemissionen bestimmt [Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg 2016]. Die im Projekt ermittelten Ergebnisse zeigen, dass das CHARM-System neben der Identifikation von Methanaustrittsbereichen auf Deponieflächen auch eine Quantifizierung der tatsächlichen Emissionsmengen in Aussicht stellt. Ausgehend vom vorgenannten Projekt wurde das Verfahren der Öffentlichkeit und in Facharbeitskreisen vorgestellt [Burkhard & Eggloffstein 2016]. Im Herbst 2016 folgte eine erneute Befliegung einer der Deponien zur Weiterentwicklung der Technologie. Im August 2017 erfolgte im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Brandenburg eine Bestimmung von Methanemissionen auf einer illegalen Müllablagerung.

Diese Erfahrungen begründeten den Unterauftrag für die Befliegungen der beiden für dieses Projekt relevanten Deponien mit dem CHARM-System.

4.3. Inverse Dispersionsmodellierungsmethode

4.3.1. Laserabsorptionsspektroskopie zur Konzentrationsermittlung

Die Inverse Dispersionsmodellierungsmethode (IDMM) besteht aus zwei Teilen. Der eine Teil sind Konzentrationsmessungen auf oder am Untersuchungsobjekt (in diesem Fall Deponien). Der andere Teil ist die computerbasierte Auswertung und Modellierung der Daten zur Ermittlung der Emissionsrate (vgl. Abschnitt 4.3.3.).

Bei den während der Projektlaufzeit durchgeführten Messungen standen zwei TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) -Systeme (zu Deutsch Laserabsorptionsspektroskopie mittels durchstimmbarer Diodenlaser) der Firma Boreal Inc. zu Verfügung. Bei den ersten Messungen, bei denen parallel zum CHARM-System gemessen wurde, wurde je ein Gerät pro Deponie verwendet (vgl. Tabelle 2). Bei den folgenden Messungen wurden beide Geräte an einer Deponie eingesetzt. Die Methankonzentration wird im Luv und im Lee der Deponie als Streckenintegral ermittelt. Dabei wird vom Messgerät ein Laserstrahl im Infrarot-Bereich mit den für Methan

spezifischen Wellenlängen zwischen 1 620 nm und 1 700 nm ausgesandt. Dieser wird von einem Retroreflektor, der sich am Ende der Messstrecke befindet, auf den Receiver im Messgerät reflektiert. Über die Absorption des Lichts wird die Methankonzentration auf der Strecke zwischen Messgerät und Retroreflektor ermittelt. Zur Qualitätssicherung kalibriert sich das Messgerät in regelmäßigen Abständen selbst.

Die Messung zur Erfassung der immissionsseitigen Methankonzentration wird im Lee der Deponie durchgeführt. Zur Erfassung der meteorologischen Randbedingungen wird ein 3D-Ultraschallanemometer verwendet. Dieses wird an repräsentativer Stelle und ohne Beeinflussung von etwaigen Hindernissen, wie Bäumen oder Gebäuden, auf oder neben der Deponie in 5 m Höhe installiert. Die Faktoren Wind, Temperatur und Luftdruck sind ausschlaggebend für die Ausbreitungssituation und somit entscheidend für die Rückrechnung auf die Emission. Das Prinzip der Messung ist in Abbildung 1 erläutert.

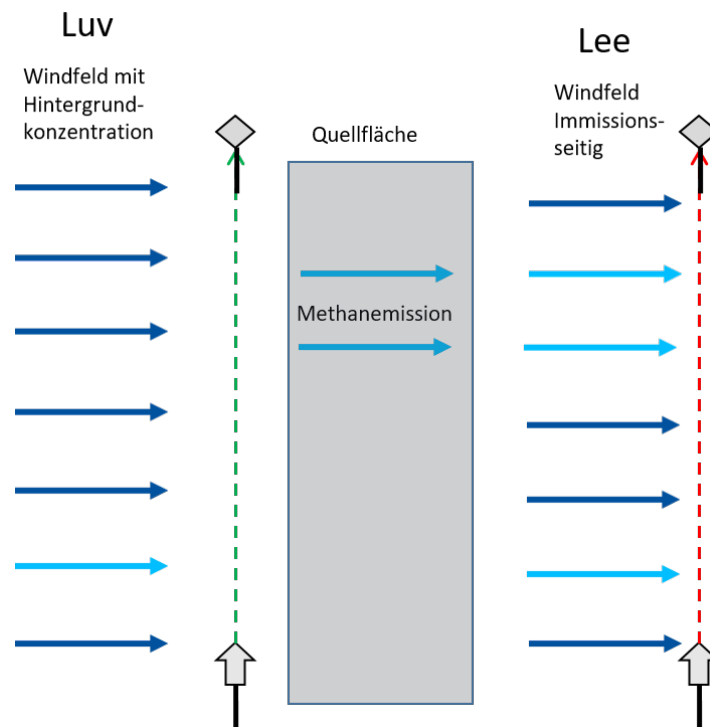


Abbildung 1: Skizze der TDLAS-Messungen für die IDMM. Die grün gestrichelte Linie stellt die Messstrecke zur Ermittlung der Hintergrundkonzentration dar, die rot gestrichelte die Messstrecke für die Ermittlung der immissionsseitigen Konzentration.

4.3.2. Drohnenbasierte Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometrie zur Konzentrationsermittlung

Das drohnenbasierte Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer (D-FTIR) wurde im Laufe der Projektlaufzeit zur Erhöhung der Flexibilität bei den Konzentrationsmessungen

und als Ersatz für das nicht mehr zur Verfügung stehende CHARM-System entwickelt. Das Ziel ist eine möglichst hoch aufgelöste Konzentrationsmessung von Hintergrundkonzentration und immissionsseitiger Konzentration. Anders als die Messung mit TDLAS, bei der keine Probenluft zur Analyse eingesaugt wird, ist dies bei der D-FTIR-Technik der Fall. Das Gerät saugt Luft in die Messzelle, in der die Konzentrationsermittlung erfolgt.

Das verwendete D-FTIR-System besteht aus einer Kombination aus dem Flugrobotersystem HD6-1500 der Firma Exabotix GmbH und dem tragbaren FTIR GT5000 Terra der Firma Gasmeter. Das FTIR erstellt mit einer Frequenz von 10 Hz ein vollständiges Infrarot-Spektrum. Das Spektrum zeigt die Absorption durch IR-aktive Moleküle innerhalb der Messzelle. Die Identifikation und Quantifizierung von bis zu 50 einzelnen Substanzen ist so möglich. Alle 5 s wird eine Messung durchgeführt und die Konzentrationen der gewählten Substanzen bestimmt.

Das D-FTIR bietet eine große Flexibilität bei der Gestaltung von Messstrecken. Neben der Zugänglichkeit von unwegsamem Gelände können mit diesem System auch, anders als beim TDLAS-System, nichtlineare Messstrecken, Runden um die Quellfläche und Messstrecken in unterschiedlichen Höhen, wo erforderlich, genutzt werden. Das System bietet zudem eine hohe Flexibilität bei nicht konstanten Windrichtungen. Messstrecken können schnell an sich verändernde Windbedingungen angepasst werden. Das Befliegen von Runden um den Deponiekörper hat den Vorteil der quasikontinuierlichen Hintergrundkonzentrationserfassung bei jeder Umrundung. Die Konzentrations- erfassung in unterschiedlichen Höhen je nach Ausbreitungssituation und die höhere Flexibilität bezüglich der Windrichtung sind weitere Gründe für den Einsatz des D-FTIR. Völlig neue Einsatzmöglichkeiten neben der CH₄-Emissionsquantifizierung an Deponien, eröffnet das D-FTIR durch die große Anzahl an quantifizierbaren Substanzen. Dies macht es möglich diese Messtechnik von der Modellierung (vgl. Abschnitt 4.3.3.) zu entkoppeln und die modellierungsunabhängige Tracer-Methode zu verwenden (vgl. Abschnitt 4.4.).

Abbildung 2 zeigt eine mögliche Messstrecke zur Konzentrationserfassung mittels D-FTIR. Die Hintergrundkonzentration wird hier bei jeder Umrundung miterfasst. Neben der Technik des Rundenfliegens („fence-line monitoring“) besteht weiterhin die Möglichkeit wie bei der TDLAS-Technik Messstrecken zu definieren und diese abzufliegen.

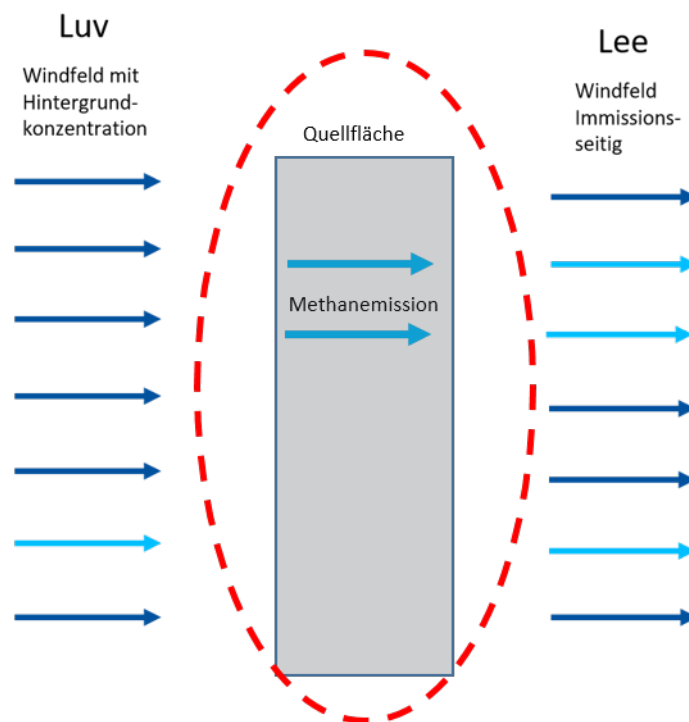


Abbildung 2: Skizze der D-FTIR-Messungen für die IDMM. Die rot gestrichelte Linie stellt eine mögliche Messstrecke des D-FTIR zur Konzentrationserfassung dar.

Neben der drohnenbasierten Variante wurde das FTIR-Messgerät während der Projektlaufzeit auch mitgeführt in einem Auto und als Rucksack verwendet. Diese Anwendungsformen erhöhen die Flexibilität des Messgeräts zusätzlich, da so keine Abhängigkeit vom zum Teil noch fehleranfälligen Drohnensystem besteht.

4.3.3. Auswertung der gesammelten D-FTIR- und TDLAS-Daten durch Modellierung

Prinzipiell erfolgt mit Hilfe des Modellierungsprogramms WindTrax von Thunderbeach Scientific eine Rückrechnung der immissionsseitig gemessenen Konzentrationen auf Emissionen von der Quellfläche. Diese Art der Modellierung wird rückwärtsgerichtete Lagrange-Modellierung genannt.

Für die Ausbreitungsmodellierung benötigt das Programm Daten der Hintergrundkonzentration, der immissionsseitigen Konzentrationen, des Windfeldes, der Temperatur und des Luftdrucks. Die Datenaufzeichnung des Laser-Systems erfolgt mit einer Frequenz von 1 Hz. Beim Anemometer beträgt die Frequenz der Datenaufzeichnung 10 Hz. FTIR-Daten werden in einem 5s-Rhythmus akquiriert. Der Luftdruck wird alle 5 Minuten gespeichert. Zur weiteren Nutzung werden alle Werte auf 10 Minuten-Mittelwerte vereinheitlicht. Diese Werte werden in das Open-Source-Programm WindTrax eingegeben, zusammen mit Informationen bezüglich Quellfläche und Messstrecke der immissionsseitigen Konzentrationsmessung mit dem TDLAS-

System oder die Anordnung mehrerer Punktkonzentrationssensoren für Messungen mit dem FTIR-System sowie der Position des Anemometers. Aus all diesen Informationen wird mit Hilfe einer rückwärtsgerichteten Lagrange-Modellierung die Emissionsrate der Deponiefläche berechnet. Abbildung 3 zeigt die Zusammenhänge bei der Ermittlung von Emissionen mit der IDMM.

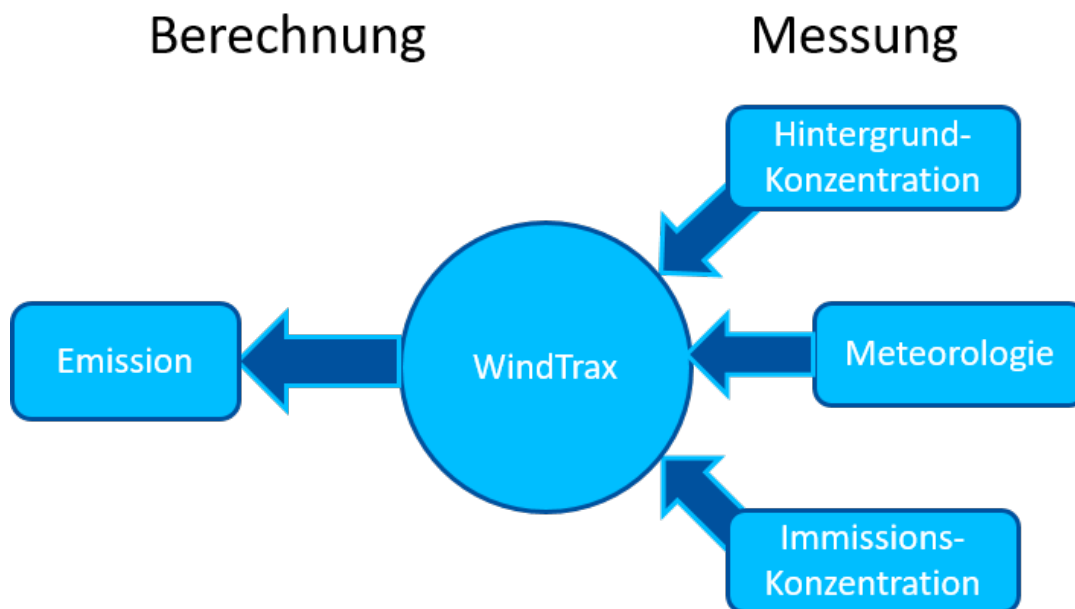


Abbildung 3: Flussdiagramm für die Durchführung der IDMM.

Sind alle Eingangsgrößen eingetragen, wird die Emission vom Computerprogramm berechnet. Dabei werden ausgehend von der eingezeichneten Messstrecke Partikel (Diese symbolisieren die CH_4 -Moleküle) in Raum und Zeit zurückverfolgt. Wenn diese Partikel eine Landung auf der Quellfläche erfahren haben, werden sie als zur „Emission zählend“ registriert und in die Berechnung der Gesamtemission einbezogen.

4.4. Auswertung der gesammelten (D-)FTIR-Daten mit Hilfe der Tracer-Methode

Bei der Tracer-Methode wird während der Datenerhebung ein gut messbares Tracer-Gas, das nicht als Emittent von Deponien vorkommt, in bekannter Menge freigesetzt. Die Datenerhebung erfolgt grundsätzlich nach dem gleichen Prinzip wie bei der IDMM. Bei den hier durchgeführten Messungen wurde Lachgas (N_2O) als Tracer-Gas verwendet. Über das Verhältnis zwischen bekannter Freisetzungsrate, gemessener Lachgaskonzentration und gemessener Methankonzentration kann bei der Datenauswertung die Methanemission gemäß Gleichung (1) berechnet werden.

$$Q_M = \frac{C_M - C_{M, \text{Hintergrund}}}{C_{\text{Tracer}} - C_{\text{Tracer, Hintergrund}}} \cdot Q_{\text{Tracer}} \quad (1)$$

Die Parameter haben dabei folgende Bedeutungen:

Q_M	Zu errechnender Emissionsmassenstrom von CH_4 in Masse pro Zeit,
C_M	gemessene CH_4 -Konzentration in ppm,
$C_{M, \text{Hintergrund}}$	gemessene CH_4 -Hintergrundkonzentration in ppm,
C_{Tracer}	gemessene Konzentration des Tracer-Gases in ppm,
$C_{\text{Tracer, Hintergrund}}$	gemessene Hintergrundkonzentration des Tracer-Gases in ppm,
Q_{Tracer}	bekannter Freisetzungsmassenstrom des Tracers in Masse pro Zeit.

5. Durchführung der Vergleichsmessungen

5.1. Grundsätzliches

Die Vergleichsmessungen an den einzelnen Deponien waren grundsätzlich als Parallelmessungen geplant. In Tabelle 1 ist das ursprünglich geplante Vorgehen aufgelistet. Alle Messungen waren als Parallelmessungen, also gleichzeitige Messungen an Deponie A und B geplant gewesen. Zudem waren zwei Verifizierungen der Messverfahren mittels einer Messung bei „kalter Fackel“ geplant. Der Zustand der kalten Fackel wird an der Deponie eingestellt, indem Gas aus der Deponie abgesaugt wird, in der Fackel jedoch keine Verbrennung stattfindet. Diese Messung wurde angestrebt, um für jede Methode eine Wiederfindungsrate zu erhalten. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht wird mit der Nullmessung der Urzustand der Deponie ohne aktive Entgasung erfasst. Für diese Messung ist es notwendig das Entgasungssystem mindestens sechs Wochen vor dem geplanten Messtermin abzuschalten. Für die Verifizierung der Messmethode, entweder per Tracer-Freisetzung oder bei kalter Fackel, ist in jedem Fall eine gefasste Quelle mit bekanntem Volumenstrom und bekannter Konzentration notwendig. Für die Emissionsermittlung bei aktiver Maßnahme ist es notwendig, dass die Entgasungsanlage gemäß der geplanten Stabilisierungsmaßnahme, hier also Übersaugung, eingestellt ist.

Tabelle 1: Ursprünglicher Messplan mit Parallelmessungen und zwei Verifizierungen der Messmethode.

Messung	Deponie	Zustand	Messverfahren
Nullmessung	A & B	Entgasungssystem seit mindestens 6 Wochen ausgeschaltet	FID, CHARM, IDMM
Verifizierung der Messmethode (kalte Fackel)	A & B	Kaltes Abblasen von Methan über die Fackel	FID, CHARM, IDMM
Aktive Maßnahme	A & B	Aktive Übersaugung	FID, CHARM, IDMM

Zunächst wegen erhöhter Kosten und später dann wegen geringer Verfügbarkeit des CHARM-Systems wurde der Versuchsplan an die real-machbaren Bedingungen angepasst.

Bei der ersten Messung wurde parallel an jeder der beiden Deponien A und B mit der IDMM basierend auf TDLAS-Daten und CHARM die Gesamtemissionen ermittelt. Mit FID-Rasterbegehung und Rasterbefliegung mit dem CHARM-System wurden Hauptaustrittsstellen und die Konzentrationsverteilung auf der Deponieoberfläche untersucht. Die Messungen fanden bei unterschiedlichen Zuständen der jeweiligen Deponie und dem zugehörigen Entgasungssystem statt. Tabelle 2 zeigt einen Überblick über die geleisteten Messungen mit den verwendeten Emissionsermittlungsverfahren bei den unterschiedlichen Zuständen der Deponien A. Die Emissionsrate der Deponie im

Urzustand, sowie die Messungen zur Verifizierung der Messmethode mit Tracer-Freisetzung, erfolgten parallel an einem Tag.

Tabelle 3 zeigt die an der Deponie B, im Urzustand und während der aktiven Maßnahme, verwendeten Emissionsermittlungsverfahren.

Ziel des Projekts war es die Wirksamkeit einer Stabilisierungsmaßnahme messtechnisch zu ermitteln. Dazu dienten Messungen im nicht entgasten Zustand der Deponie (Nullmessung = Urzustand), bei regelmäßiger Entgasung (Grundzustand) und im Zustand der Stabilisierung (Aktive Maßnahme). Als Stabilisierungsmaßnahme wurde an den beiden betrachteten Deponien die Übersaugung eingesetzt. Trotz geändertem Messplan konnten die Ziele des Projekts erreicht werden.

Tabelle 2: Übersicht der geleisteten Messungen mit den angewendeten Emissionsermittlungsverfahren an der Deponie A mit dem jeweiligen Datum der Durchführung.

Messung	Zustand	Emissionsermittlungsverfahren	Datum
Urzustand & Verifizierung Messmethode	Entgasungssystem seit 8 Wochen ausgeschaltet	D-FTIR & TDLAS mit IDMM, D-FTIR mit Tracer-Methode	19.11.2020
Grundzustand	Regelmäßige Entgasung, keine Übersaugung	FID, CHARM, TDLAS mit IDMM	11.04.2019
Aktive Maßnahme	Aktive Übersaugung	FTIR & TDLAS mit IDMM	04.03.2021

Tabelle 3: Übersicht der geleisteten Messungen mit den verschiedenen Emissionsermittlungsverfahren an der Deponie B mit dem jeweiligen Datum der Durchführung.

Messung	Zustand	Emissionsermittlungsverfahren	Datum
Urzustand	Entgasungssystem seit 6 Wochen ausgeschaltet	FID, CHARM, TDLAS mit IDMM	11.04.2019
Aktive Maßnahme	Aktive Intervall-Übersaugung	FID, FTIR & TDLAS mit IDMM	28.04.2021

Für die Nullmessung, bei der die Emissionen der nicht entgasten Deponie ermittelt werden, wird die Fackelanlage mindestens 6 Wochen vor der geplanten Messung außer Betrieb genommen. Das im Deponiekörper gebildete Gas wird nicht mehr abgesaugt und verbleibt zunächst im Deponiekörper. Wenn die Speicherkapazität des Deponiekörpers erschöpft ist, wird es diffus über die Deponieoberfläche emittiert oder das Gas migriert in angrenzende Flächen um weiter entfernt an die Oberfläche zu gelangen. Beim

Durchdringen der oberen Abdeckschichten werden Anteile des Methans zu CO_2 oxidiert. Diese Vorgänge laufen parallel an einer nicht entgasten Deponie ab.

Für die Verifizierung der Messmethode erfolgte eine Tracer-Freisetzung. Als Tracer wurde in diesem Fall Lachgas verwendet. Das Tracer-Gas wird an repräsentativer Stelle auf der Deponie freigesetzt. Durch die parallele messtechnische Erfassung des Tracer-Gases und des Emissionsgases (Methan) kann mit Hilfe der Tracer-Methode modellierungsunabhängig eine Emissionsrate quantifiziert werden (vgl. Abschnitt 4.4.).

Beim Grundzustand der Deponie handelt es sich um einen über regelmäßige Entgasung künstlich erzeugten Zustand. Dabei wird Deponiegas regelmäßig aus dem Deponiekörper entnommen. Die Fackelanlage bleibt dabei immer so lange in Betrieb, wie das abgesaugte Deponiegas eine ausreichende CH_4 -Konzentration aufweist. Diese Konzentration variiert je nach abgesaugtem Volumenstrom und eingesetzter Fackelanlage.

Bei der aktiven Maßnahme handelt es sich um den Zustand der Deponie, der sich bei aktiver Stabilisierungsmaßnahme einstellt. An den hier betrachteten Deponien wurde als Stabilisierungsmaßnahme die Übersaugung gewählt (vgl. Abschnitt 3.). Bei korrekter Umsetzung dieser Art der Stabilisierung sollte sich die Deponie in Unterdruck befinden und dementsprechend keine Emissionen feststellbar sein.

5.2. Deponie A

5.2.1. Vergleichsmessungen mit TDLAS, CHARM und FID zur Emissionsermittlung im Grundzustand

Ziel der ersten Vergleichsmessung an der Deponie A war die Ermittlung der Emissionen und der Konzentrationsverteilung auf der Deponieoberfläche im Grundzustand, also bei regelmäßiger Entgasung.

Abbildung 4 zeigt das Luftbild der Deponie A. Die Aufstellungsorte des Anemometers, des Lasers (L2) und Reflektors (R2) sind markiert. Die Messtrecke zur Emissionsermittlung ist gelb markiert. Die Hauptwindrichtung Ost-Nord-Ost ist durch einen blauen Pfeil markiert.

In Abbildung 4 ist die Flugspur des Helikopters an der Deponie A eingezeichnet (rot). Mögliche Emissionen des Absaugsystems mit Fackelanlage (VOCsiBox) wurden mit dem CHARM-System miterfasst. Es wurden 11 Umfliegungen durchgeführt. Bei jeder Umfliegung wurde luvseitig die Methanhintergrundbelastung und leeseitig die Konzentration zur Emissionsermittlung bestimmt.

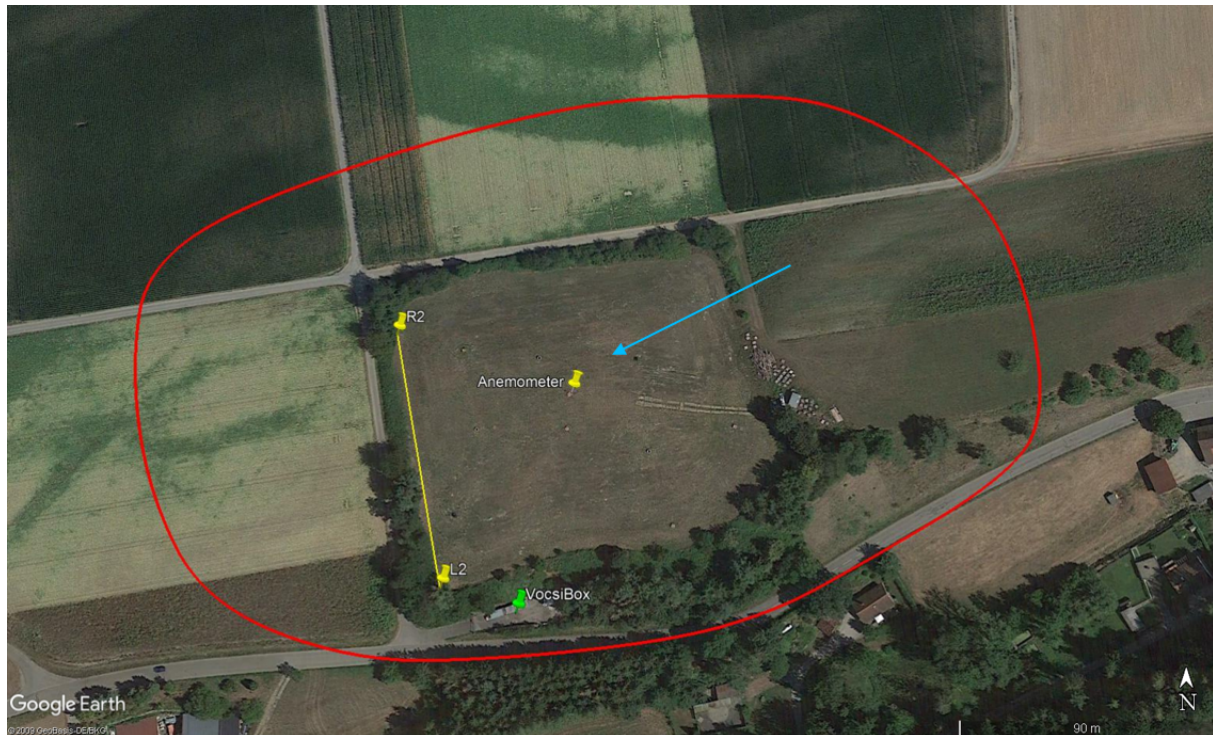


Abbildung 4: Luftbild der Deponie A mit Standort des Anemometers, des Lasers (L2), des Reflektors (R2) und der als blauer Pfeil eingezeichneten Hauptwindrichtung. In Rot ist die Messspur des CHARM-Systems eingezeichnet.

Im Anschluss an die Fenceline-Umfliegung wurde mit dem CHARM-System die flächige Überprüfung auf Austrittsstellen durchgeführt. Dabei wurde die Deponie in Streifen von Ost nach West überflogen. Durchschnittlich wurde eine Messpunktdichte von einer Messung pro Quadratmeter erreicht. Das sind circa 18 000 Messpunkte.

Die FID-Rasterbegehung inklusive Bestimmung der Gasqualität an den Gasbrunnen wurde mit 705 gemessenen Rasterpunkten durchgeführt.

5.2.2. Vergleichsmessungen mit TDLAS und D-FTIR an Deponie A im Urzustand und Verifizierung der Messmethode

Bei den Vergleichsmessungen zur Emissionsermittlung mit Hilfe der IDMM basierend auf TDLAS- und D-FTIR-Daten befand sich die Deponie im Urzustand. Die VOCsiBox war zwar schon installiert, zum Zeitpunkt der Messung aber seit 2 Monaten außer Betrieb. Zusätzlich zu den beiden Messverfahren, bei denen die Emissionsermittlung über eine Modellierung durchgeführt wird, wurde bei dieser Messung die Tracer-Methode angewendet. Dieses Vorgehen hatte zum Ziel einen Vergleich zu einem modellierungsunabhängigen Verfahren zu erhalten.

Die Konzentrationserfassung wurde bei dieser Messung entlang zweier Linien realisiert. Die Messstrecke für das TDLAS-System war entlang der östlichen Deponiegrenze aufgebaut. Die Datenerhebung durch das D-FTIR System erfolgte parallel zu dieser

Messstrecke etwa 1 m in Richtung Deponiekörper versetzt. Der Wind wehte konstant aus westlichen Richtungen. Abbildung 5 zeigt die Mess- und Flugstrecken zur Datenerhebung.

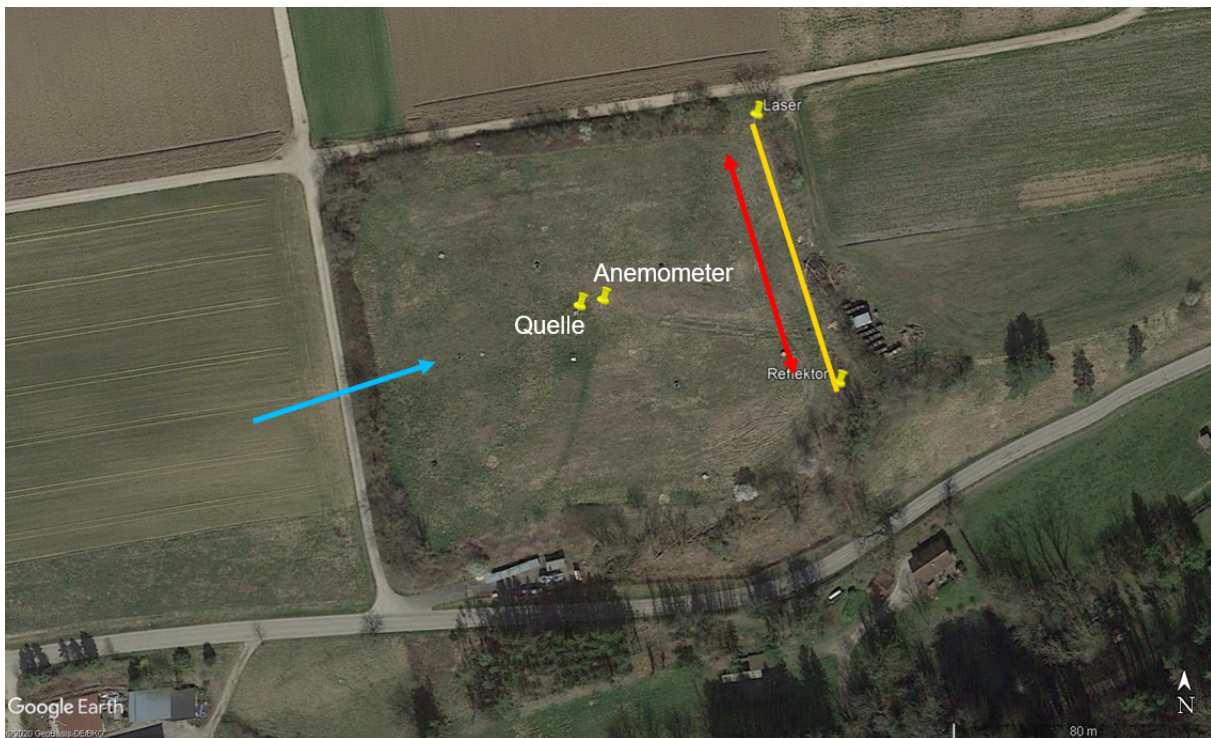


Abbildung 5: Deponie A mit der Messstrecke für das TDLAS-System (gelb), der Flugstrecke des D-FTIR (rot), den Positionen von Quelle und Anemometer sowie der vorherrschenden Windrichtung in Blau.

5.2.3. Vergleichsmessungen mit TDLAS und D-FTIR zur Verifizierung der Stabilisierungsmaßnahme

Ziel dieser Vergleichsmessung ist die Überprüfung der Deponie auf Emissionen. Die ermittelten Emissionen dienen als Vergleichspunkt zur Quantifizierung der Emissionsminderung durch die Stabilisierungsmaßnahme im Vergleich zu den Emissionen der Deponie im Ur- und Grundzustand.

Bei der Messung zur Verifizierung der Stabilisierungsmaßnahme wurden die gleichen Messstrecken wie in Abschnitt 5.2.2. (Abbildung 5) verwendet. Einziger Unterschied war, dass keine Tracer-Freisetzung zum Einsatz kam. Die Deponie befand sich am Messtag und einige Tage davor im Zustand der Übersaugung. Es wird angenommen, dass sich die Deponie in diesem Zustand im Unterdruck befindet und somit die Stabilisierungsmaßnahme als aktiv angesehen werden kann.

5.3. Deponie B

5.3.1. Vergleichsmessungen mit TDLAS, CHARM und FID zur Emissionsermittlung im Urzustand

Ziel der messtechnischen Ermittlung der diffusen Methanemissionen im Urzustand der Deponie B war einerseits der grundsätzliche Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Messverfahren. Andererseits sollte das Emissionsverhalten einer Deponie ohne aktives Entgasungssystem zum späteren Abgleich mit dem Emissionsverhalten der Deponie bei aktiver Stabilisierungsmaßnahme erfasst werden.

Abbildung 6 zeigt ein Luftbild der Deponie B. Die Messstrecke war südlich der Deponie aufgebaut. Die Aufstellung des Anemometers erfolgte ebenfalls südlich, im Lee der Deponie. Laser (L2) und Reflektor (R2) sind markiert und die Messstrecke durch eine gelbe Linie verdeutlicht. Die Hauptwindrichtung (Nord-Ost) ist durch einen blauen Pfeil gekennzeichnet.

In Abbildung 6 ist die Flugspur des Helikopters an der Deponie B eingezeichnet. Die Flugspur umfasst sowohl Fackel als auch den kompletten Altteil der Deponie. Es wurden 12 Fenceline-Umfliegungen zur Emissionsermittlung durchgeführt.

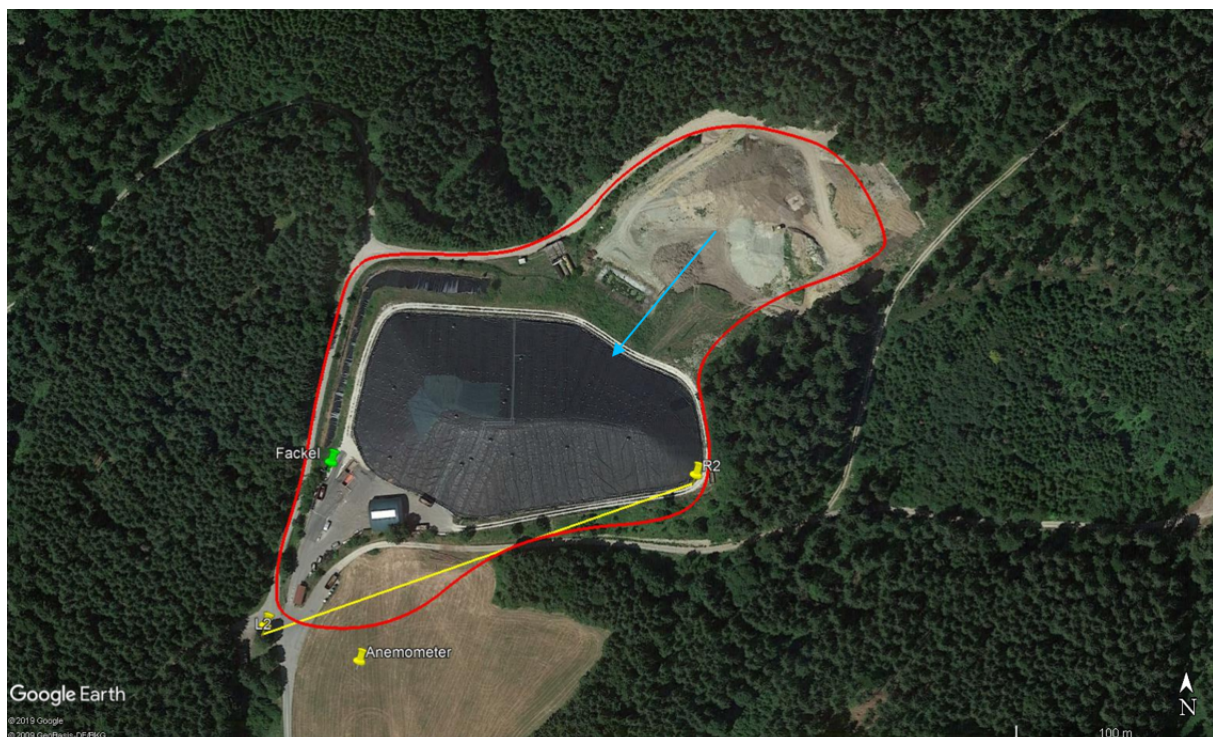


Abbildung 6: Luftbild der Deponie B mit markierten Aufstellungsorten des Anemometers, des Lasers (L2) und des Reflektors (R2). Die Messstrecke des TDLAS-Systems ist gelb markiert und die Hauptwindrichtung durch einen blauen Pfeil gekennzeichnet. In Rot ist die Messspur des CHARM-Systems verzeichnet.

Mit der gewählten Flugspur wird die gesamte Emission von Deponie und Altteil erfasst. Die Messstrecke des TDLAS-Systems erfasst bei der vorherrschenden Windrichtung mit der verwendeten Messstrecke nicht den gesamten Neuteil.

Im Anschluss an die Fenceline-Umfliegung wurde mit dem CHARM-System die flächige Überprüfung auf Austrittsstellen durchgeführt. Dabei wurde die Deponie in Streifen von Ost nach West überflogen. Durchschnittlich wurde eine Messpunktdichte von einer Messung pro Quadratmeter erreicht. Dies entspricht circa 18 000 Messpunkten.

Im Zuge der FID-Rasterbegehung wurde an 717 Punkten gemessen und die Methankonzentration bestimmt.

5.3.2. Vergleichsmessungen mit TDLAS und FTIR zur Verifizierung der Stabilisierungsmaßnahme

Ziel der Vergleichsmessung mit TDLAS und FTIR zur Verifizierung der Stabilisierungsmaßnahme ist es das Emissionsminderungspotential durch die Umsetzung einer Stabilisierungsmaßnahme messtechnisch zu ermitteln. Zu beachten ist hierbei, dass die Fackelanlage während dieser Messung nicht in Betrieb war. Vom Betreiber wurde die Entgasungsanlage jedoch in den Wochen davor regelmäßig manuell gestartet. Auf Grund der Sensibilität der verbauten Anlage auf zu niedrige CH₄-Konzentrationen, konnte ein durchgängiger Betrieb und damit eine durchgängige Absaugung von CH₄ aus dem Deponiekörper jedoch nicht gewährleistet werden. Vom Betreiber wurde angegeben, dass der Zustand der Deponie, der einer aktiven Übersaugung sehr nahekommt. Die durchgeführte Messung entspricht also der Messung bei aktiver Maßnahme (Tabelle 3).

In Abbildung 7 ist ein Luftbild der Deponie B mit eingezeichneten Messstrecken für die TDLAS-Messung (gelb) und die FTIR-Messung (rosa, orange) gezeigt. Für die Emissionsratenquantifizierung wurden alle Messstrecken, auf denen Konzentrationsmesswerte ermittelt wurden, verwendet. Die Emissionsrate ist das Ergebnis der Mittelwertbildung der unterschiedlichen Modellierungen mit den verwendeten Messstrecken. Zusätzlich sind die Position des Anemometers und die vorherrschende Windrichtung (blau) markiert. Auf Grund technischer Probleme war die Schwerlastdrohne an diesem Tag nicht verfügbar. Die eingezeichnete Strecke für das FTIR wurde zu Fuß bzw. mit dem Auto zurückgelegt. Besonderheit hierbei ist, dass nicht nur eine Strecke im Lee begangen bzw. befahren wurde, sondern erstmals auch Runden um den Deponiekörper herum befahren wurden. Im 10-Minuten-Intervall wurden vier Runden um die Deponie herum befahren. Die Emissionsrate wurde so zweimal bestimmt. Bei dieser Messung besteht der Vorteil, dass unabhängig von der Windrichtung immissionsseitige Konzentrationen rund um den Deponiekörper herum erfasst werden. Insbesondere bei umlaufenden Winden bietet dieses Verfahren die Sicherheit die Emissionsfahne sicher zu durchfahren und die Konzentrationen zu ermitteln.

Die Messstrecke in Rosa wurde mit dem Auto pro 10-Minuten-Intervall 13 Mal befahren. Die Emissionsrate wurde zweimal bestimmt. Zu Fuß mit FTIR als Rucksack wurde die Strecke 6 Mal im 10-Minuten-Intervall zurückgelegt. Die Emissionsratenbestimmung erfolgte ebenfalls zweimal.

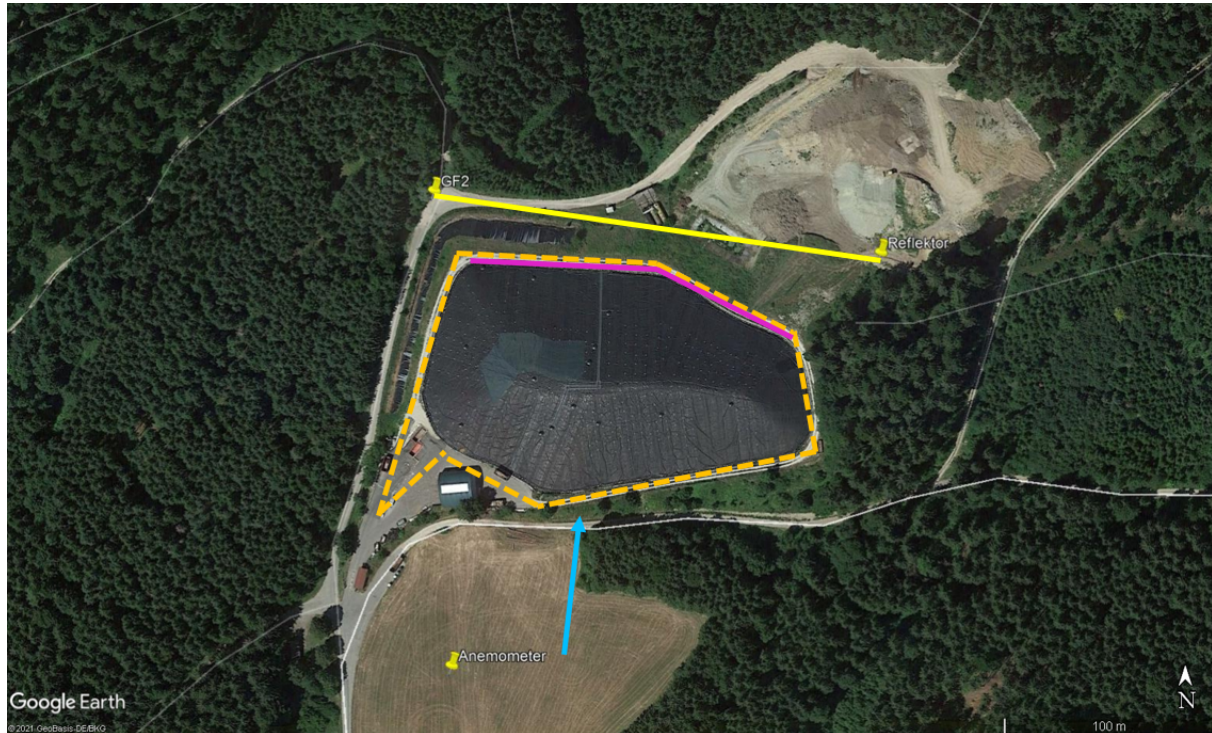


Abbildung 7: Positionen der Messstrecken für TDLAS (gelb) und FTIR (rosa, orange gestrichelt), sowie die Anemometerposition mit vorherrschender Windrichtung (blau, süd-süd-west) für die Messung zur Verifizierung der Wirksamkeit der Stabilisierungsmaßnahme.

Für die Datenauswertung nach der Messung wurden die unterschiedlichen Fortbewegungsgeschwindigkeiten für Gehen und Fahren berücksichtigt. Die resultierende unterschiedliche Anzahl an Messpunkten pro absolvierte Strecke wurde bei der Modellierung durch eine unterschiedliche Anzahl an Punktsensoren integriert.

Gleichzeitig zur Gesamtemissionsermittlung mittels Modellierung und vorheriger Datenaufnahme mit TDLAS und FTIR fand eine Rasterbegehung mit FID statt. Hierbei wurde besonderes Augenmerk auf offensichtliche Defektstellen in der Folie, Verankerungen innerhalb der Folie und die Randbereiche der Deponie gelegt.

6. Ergebnisse der Vergleichsmessungen

6.1. Allgemeines

Die Gesamtmessdauer des CHARM-Systems beträgt je nach Deponie 30 bis 40 Minuten, 20 Minuten für die Rasterbefliegung und 10 Minuten für die Fenceline-Umfliegungen zur Ermittlung der Gesamtemission. Für die Emissionsermittlung mit der IDMM werden pro Deponie mindestens 4 Stunden veranschlagt. Um einen Überblick über eventuelle tageszeitliche Schwankungen der Emission zu erhalten, werden für die Messung zur Ermittlung der Gesamtemission mindestens 2 Stunden eingerechnet. Bei den Messtagen, an denen die IDMM mit TDLAS-Systemen parallel zum CHARM-System zum Einsatz kam, stand je Deponie nur ein TDLAS-System zu Verfügung. An diesen Messtagen erfolgte die Datenaufnahme für Hintergrundkonzentration und immissionsseitiger Konzentration nacheinander. An Messtagen, an denen die Datenaufnahme parallel mit dem D-FTIR-System erfolgte, standen zwei TDLAS-Systeme auf der jeweiligen Deponie zu Verfügung. An diesen Messtagen wurde die Datenaufnahme für Hintergrundkonzentration und immissionsseitige Konzentration parallel durchgeführt.

6.2. Deponie A

6.2.1. Bestimmung der Gesamtemission bei der Vergleichsmessung mit TDLAS und CHARM

Die Emissionen der Deponie A schwankten im Messzeitraum von 11:15 Uhr bis 14:15 Uhr zwischen $0,08 \text{ m}^3/\text{h}$ und $0,46 \text{ m}^3/\text{h}$, ermittelt mit der IDMM (Abbildung 8). Im Zeitraum, in dem die Datenaufnahme mit dem CHARM-System erfolgte, zwischen 13:15 Uhr und 13:25 Uhr, lag die Emission bei $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$. Der Durchschnittswert, den die Auswertung des CHARM-Systems liefert, beträgt ebenfalls $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$.

In Abbildung 8 sind die 10-Minuten-Mittelwerte, die als Ergebnis der IDMM basierend auf TDLAS-Daten zwischen 11:15 Uhr und 14:15 Uhr, ermittelt wurden, in Hellblau eingetragen. Der durchschnittliche Wert der 11 Umfliegungen des CHARM-Systems ist um 13:25 Uhr eingetragen und deckt sich mit dem Wert von $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$ der zu diesem Zeitpunkt auch mit der IDMM ermittelt wurde.

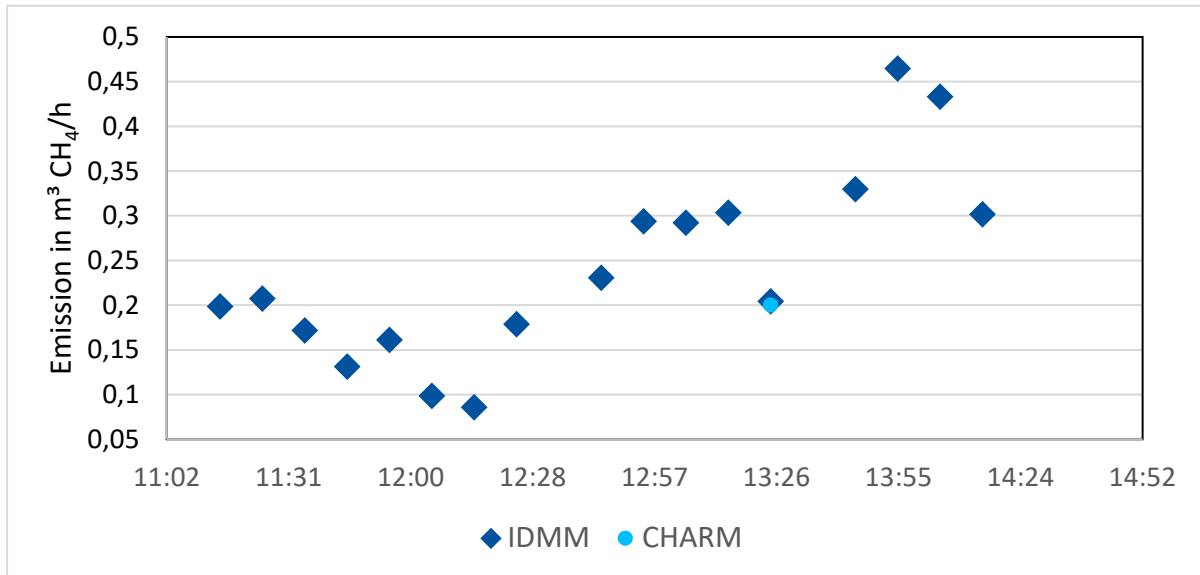


Abbildung 8: Vergleich der Emissionen der Deponie A ermittelt mit IDMM basierend auf TDLAS-Daten und CHARM

6.2.2. Bestimmung der Hauptaustrittsstellen bei der Vergleichsmessung mit FID und CHARM

Bei der flächigen Befliegung zur Ermittlung von Hauptaustrittsstellen mit dem CHARM-System wurden 2 ppm als Hintergrundkonzentration ohne Einfluss der Deponie angesetzt und bei 2,16 ppm wurde von einer stark erhöhten Methankonzentration ausgegangen. In Abbildung 9 ist das Ergebnis der flächigen Befliegung des CHARM-Systems gezeigt. Auf der Deponieoberfläche wurden keine Austrittsstellen gefunden. Einzig die Absaugereinrichtung mit Fackelanlage (VOCsiBox) wurde als Austrittsstelle von Methanmengen ermittelt.

Bei der FID-Rasterbegehung wurden Konzentrationen zwischen < 10 ppm und > 10 000 ppm auf der Deponieoberfläche gefunden.

In Abbildung 10 sind die zum Teil stark erhöhten Methankonzentrationen von > 10 000 ppm auf der Deponieoberfläche eingetragen. Diese sehr hohen Konzentrationen wurden vor allem um die Gasbrunnen (GB) 1 und 10 herum gefunden. Geringere Konzentrationen von < 1 000 ppm wurden im nördlichen verbuschten Bereich und im südlichen Hangbereich der Deponie gemessen.

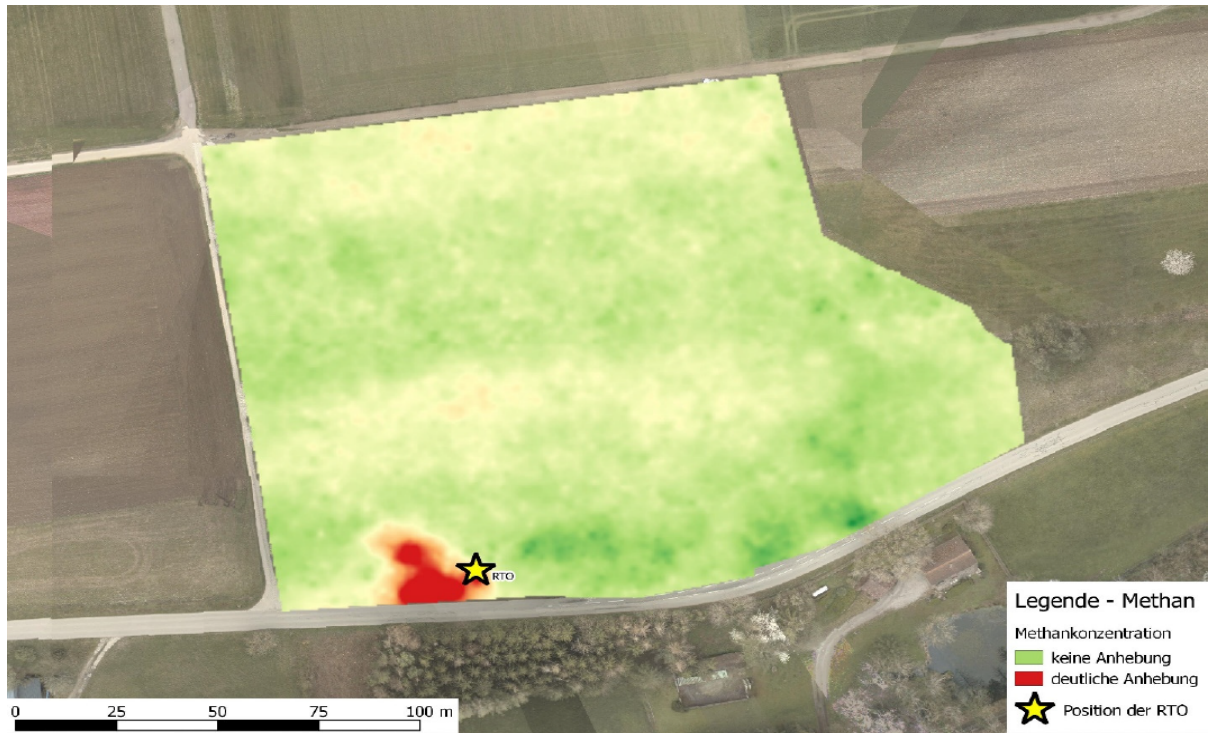


Abbildung 9: Rasterbefliegung an der Deponie A mit dem CHARM-System, grüne Flächen entsprechen Konzentrationen von 2 ppm, rote Flächen entsprechen Konzentrationen von 2,16 ppm [Dominok 2019].



Abbildung 10: Ergebnis der Rasterbegehung an der Deponie A. Die Konzentrationsverteilung ist der Legende zu entnehmen [Richter 2019].

6.2.3. Emissionsermittlung bei der Vergleichsmessung mit TDLAS und D-FTIR bei gleichzeitiger Verifizierung der Messmethode

Ziel der Parallelmessung von TDLAS und D-FTIR bei gleichzeitiger Lachgasfreisetzung als Tracer war einerseits die Bestimmung der diffusen Emissionen der Deponie A im Urzustand, also bei inaktivem Entgasungssystem. Andererseits sollten beide IDMM-Messmethoden mit Hilfe einer dritten modellierungsunabhängigen Methode verifiziert werden. Dazu diente die Tracer-Freisetzung. Wie in Abschnitt 4.4. beschrieben kann mit Hilfe der Tracer-Freisetzung aus dem Verhältnis zwischen den gemessenen Konzentrationen und der bekannten Tracer-Freisetzungsrate die Methanemission ohne Modellierung der Ausbreitungssituation berechnet werden.

Abbildung 11 zeigt das Ergebnis dieses Vergleichs. Aufgrund der Windrichtung gibt es vier Vergleichspunkte zwischen IDMM basierend auf TDLAS-Daten und basierend auf D-FTIR-Daten und einen Vergleichspunkt zwischen diesen beiden Verfahren und der Tracer-Methode basierend auf Konzentrationsmessungen mit dem FTIR.

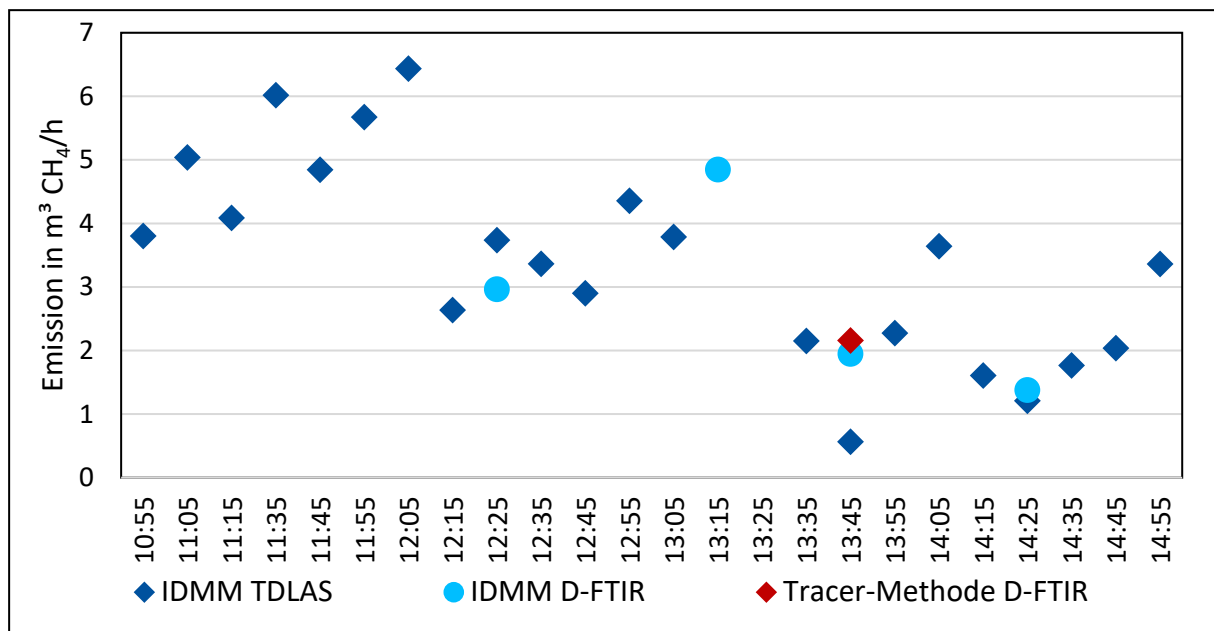


Abbildung 11: Vergleichende Betrachtung der Emissionen der Deponie A, ermittelt mit der IDMM basierend auf TDLAS- und D-FTIR-Daten und mit der Tracer-Methode basierend auf D-FTIR-Daten.

6.2.4. Bestimmung der Emissionsraten bei der Vergleichsmessung mit TDLAS und D-FTIR zur Verifizierung der Stabilisierungsmaßnahme

Ziel der dritten Messung an der Deponie A war die Verifizierung der Wirksamkeit der Stabilisierungsmaßnahme. Jede Stabilisierungsmaßnahme zielt auf die Emissionsreduktion ab. Die messtechnische Ermittlung dieser Reduktion war ein Hauptziel des Projekts. Die These vom niedrigen Emissionsniveau bei aktiver Stabilisierungsmaßnahme warf die weitere Fragestellung auf, ob dieses niedrige Emissionsniveau messtechnisch abzubilden ist. In Abbildung 12 ist das Ergebnis der Emissionsermittlung bei aktiver Stabilisierungsmaßnahme für die IDMM basierend auf TDLAS- und FTIR-Daten gezeigt.

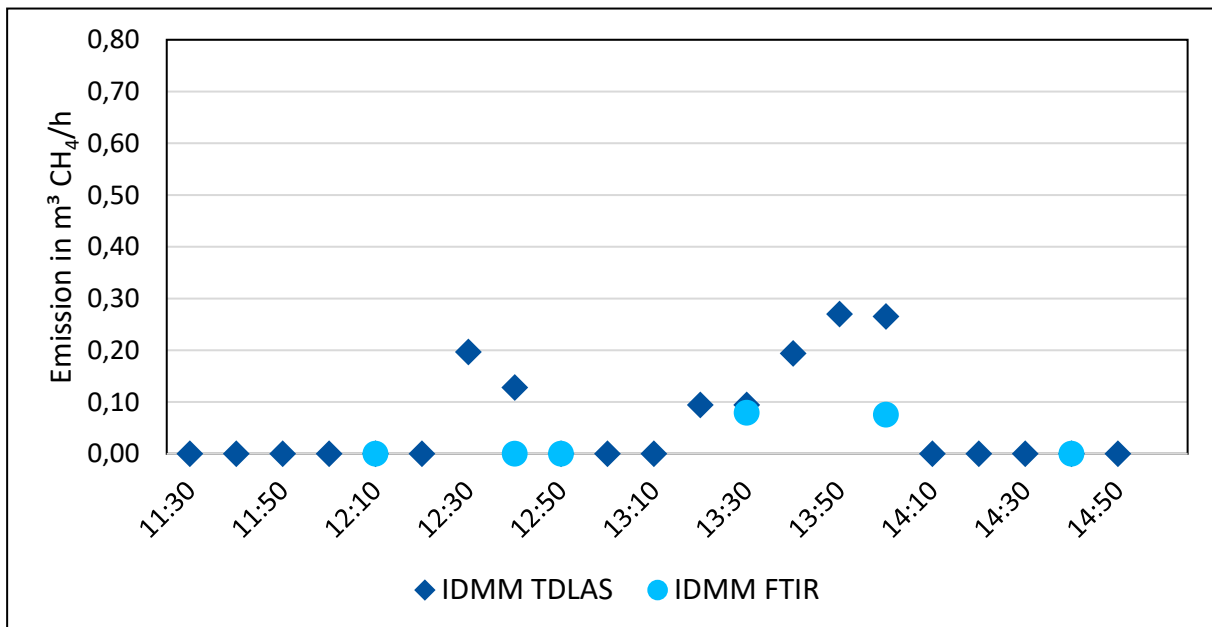


Abbildung 12: Emissionen der Deponie A in stabilisiertem Zustand, ermittelt mit der IDMM basierend auf TDLAS- und FTIR-Daten.

Die These des deutlich niedrigeren Emissionsniveaus einer stabilisierten Deponie gegenüber einer nicht stabilisierten Deponie wird durch dieses Ergebnis gestützt. Die niedrigen Emissionen können mit der eingesetzten Messtechnik bestimmt werden. Durchschnittlich liegen die Emissionen für die IDMM basierend auf TDLAS-Daten bei $0,06 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$. Für die alternative Messtechnik der IDMM basierend auf FTIR-Daten liegen die Emissionen durchschnittlich bei $0,03 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$.

6.3. Deponie B

6.3.1. Ergebnis der Emissionsermittlung der Deponie im Urzustand mittels IDMM und CHARM

Bei der ersten Parallelmessung lagen die Emissionen der Deponie B im Urzustand, ermittelt mit der IDMM basierend auf TDLAS-Daten zwischen $5,4 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$ und $1,1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$. Die durchschnittliche Emission zwischen 12:05 Uhr und 14:15 Uhr betrug $3,2 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$. Die Datenaufnahme mit dem CHARM-System fand zwischen 13:57 Uhr und 14:10 Uhr statt. Die ermittelten Flüsse liegen zwischen $1,25 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$ und $9,02 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$. Der durchschnittliche Methanfluss betrug $5,5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$. In Abbildung 13 ist in Dunkelblau die mit der IDMM und in Hellblau die mit CHARM ermittelte Emission aufgetragen. Bei der Emissionsermittlung mit CHARM wurde der Mittelwert aus allen 12 Umliegungen verwendet. Bei der Emissionsermittlung mit IDMM basierend auf TDLAS-Daten wurden Mittelwerte jeweils über 10-Minuten-Intervalle gebildet. In der Zeit, in der die Datenaufnahme mit dem CHARM-System erfolgte, lagen die mit der IDMM ermittelten Emissionen um das Dreifache niedriger als die mit dem CHARM-System ermittelten Emissionen. Für die IDMM wurden die Daten in diesem Fall mit einem TDLAS-System aufgenommen.

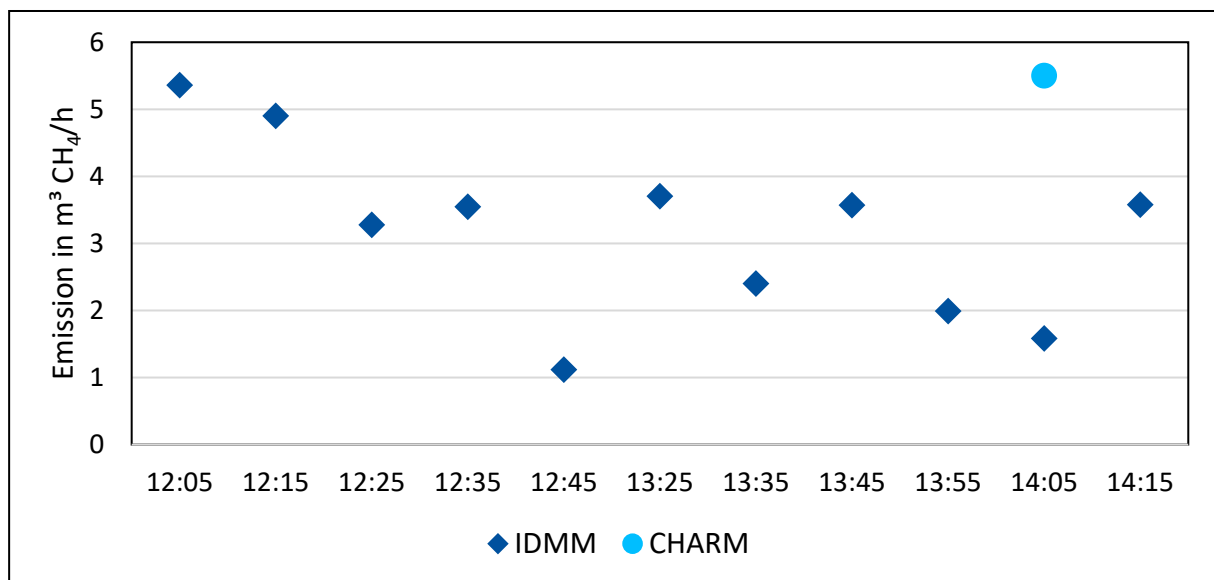


Abbildung 13: Emissionen der Deponie B, ermittelt mit der IDMM basierend auf TDLAS-Daten (dunkelblau) und mit CHARM (hellblau)

6.3.2. Bestimmung der Hauptaustrittsstellen der Deponie im Urzustand

An der Deponie B wurden für das CHARM-System 1,8 ppm als Hintergrundkonzentration und 2,06 ppm als stark erhöhte Konzentration bei der flächigen Befliegung angesehen. In Abbildung 14 sind die Flächen mit erhöhten Konzentrationen rot markiert. Die Flächen mit hintergrundgleicher Methankonzentration sind grün markiert. Bei der flächigen Befliegung der Deponie B mit dem CHARM-System wurden acht Hauptaustrittsstellen ermittelt.

Abbildung 15 zeigt das Ergebnis der FID-Rasterbegehung. An der Deponie B wurden Methankonzentrationen von < 10 ppm bis $> 10\,000$ ppm festgestellt. Methankonzentrationen von $> 10\,000$ ppm wurden an allen Gasbrunnen, sowie an den auf der Deponie liegenden Kontrollschächten gemessen. Auf dem Deponiescheitel lagen ebenfalls Konzentrationen von über $10\,000$ ppm vor. Neben diesen hohen Konzentrationen auf dem Deponiekörper wurden an den Böschungsbereichen westlich der Deponie und im Bereich der südwestlich der Deponie gelegenen Abfallumladestation geringere Konzentrationen zwischen > 10 ppm und $< 1\,000$ ppm ermittelt.

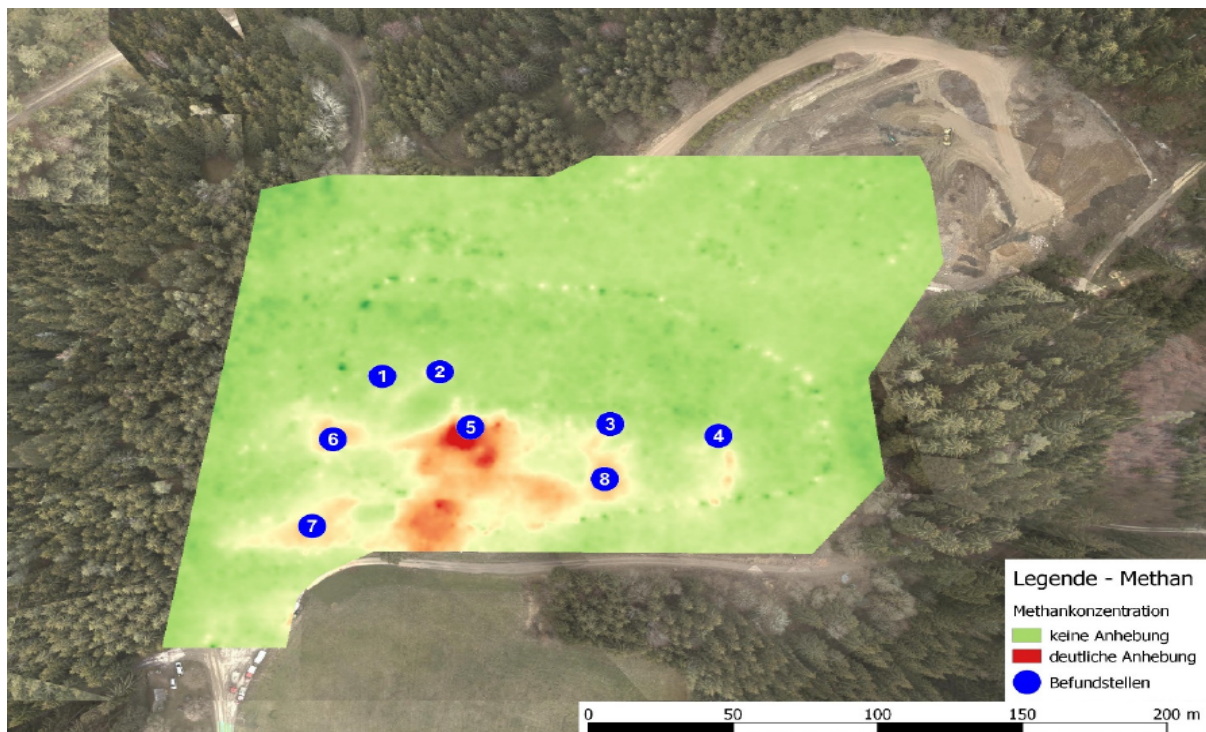


Abbildung 14: Ergebnis der Rasterbefliegung an der Deponie B. Ermittelt wurden 8 Hauptaustrittsstellen. Die grünen Bereiche entsprechen der Methanhintergrundkonzentration von 1,8 ppm, die roten Bereiche entsprechen erhöhten Methankonzentrationen von 2,06 ppm [Dominok 2019].

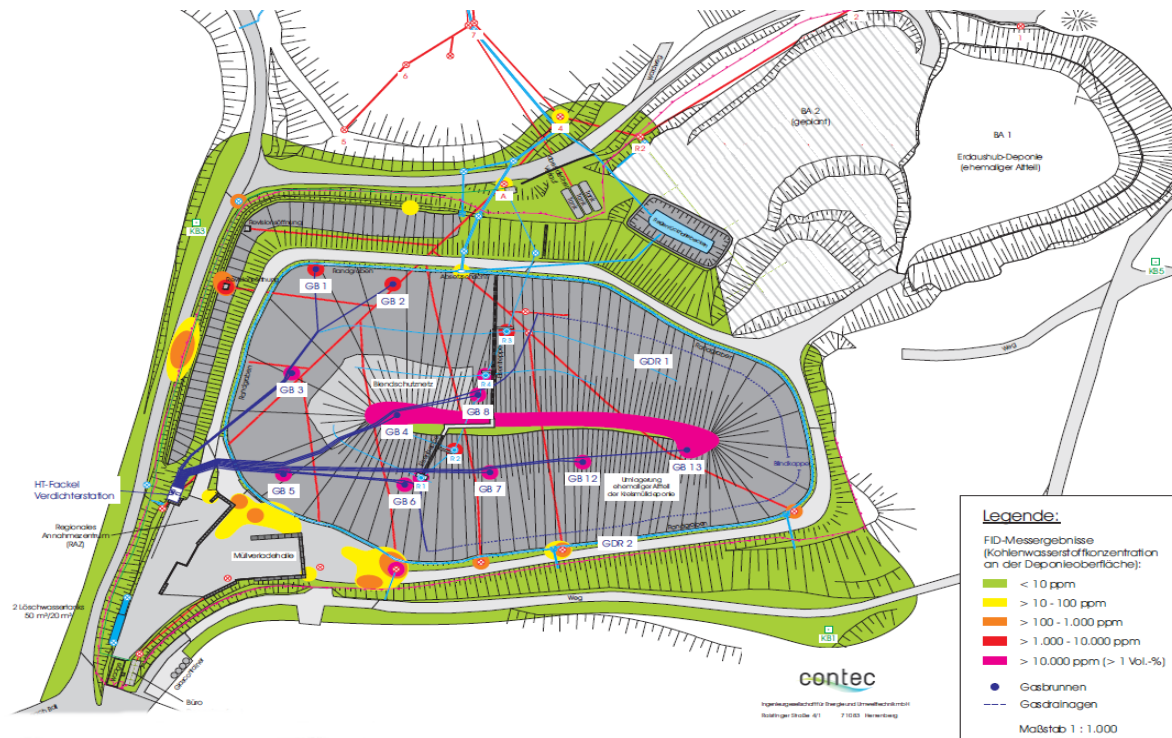


Abbildung 15: Ergebnis der FID-Rasterbegehung an der Deponie B. Ermittelte Methankonzentrationen liegen zwischen < 10 ppm (grüne Bereiche) und > 10 000 ppm (pinke Bereiche) [Lehner 2019].

6.3.3. Ergebnis der Messungen zur Verifizierung der Wirksamkeit der Stabilisierungsmaßnahme

Bei der Messung zur Verifizierung der Wirksamkeit der Stabilisierungsmaßnahme kamen zwei TDLAS-Systeme zur parallelen Aufzeichnung der Hintergrundkonzentration und der immissionsseitigen Konzentration zum Einsatz. Des Weiteren wurde ein FTIR zur Konzentrationserfassung eingesetzt. Die Daten beider Messgeräte wurden mit Hilfe der IDMM ausgewertet. Das Ergebnis der Auswertung ist in Abbildung 16 gezeigt.

Mit der IDMM basierend auf der TDLAS-Messtechnik konnten an diesem Tag keine Emissionen aus der Deponie festgestellt werden. Für die IDMM basierend auf FTIR-Daten liegen die ermittelten Emissionen aus fünf auswertbaren Zeitintervallen im Mittel bei $0,5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$.

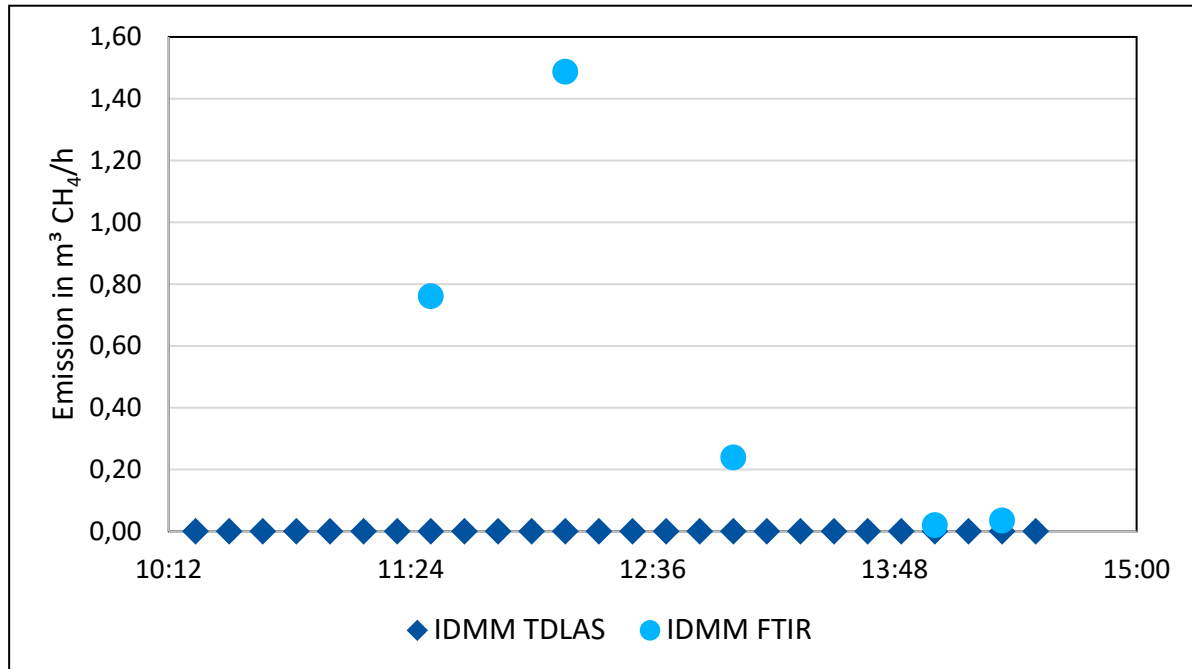


Abbildung 16: Ergebnis der Emissionsermittlung mit der IDMM basierend auf TDLAS- und FTIR-Daten zur Verifizierung der Wirksamkeit der Stabilisierungsmaßnahme.

6.3.4. Ermittlung der Hauptaustrittsstellen der Deponie in stabilisiertem Zustand

In Abbildung 17 ist das Ergebnis der FID-Begehung der Deponie B in stabilisiertem Zustand gezeigt. Bei dieser Begehung wurde das Hauptaugenmerk auf mögliche Austrittsstellen gerichtet und insbesondere an den Gasbrunnen, Foliendurchdringungen und Störungen in der Folie gemessen. Insgesamt wurde an 72 von 87 Messpunkten der Messwert 0 ppm ermittelt.

Wie bei den Ermittlungen zu den Hauptaustrittsstellen im Grundzustand der Deponie wurden auch bei der Ermittlung der Hauptaustrittsstellen bei stabilisierter Deponie alle Messwerte > 0 ppm am Deponiescheitel festgestellt. Messwerte von > 10 000 ppm konnten an der Deponie in stabilisiertem Zustand nicht ermittelt werden. Hier lag das Konzentrationsniveau bei der Deponie im Urzustand deutlich höher.

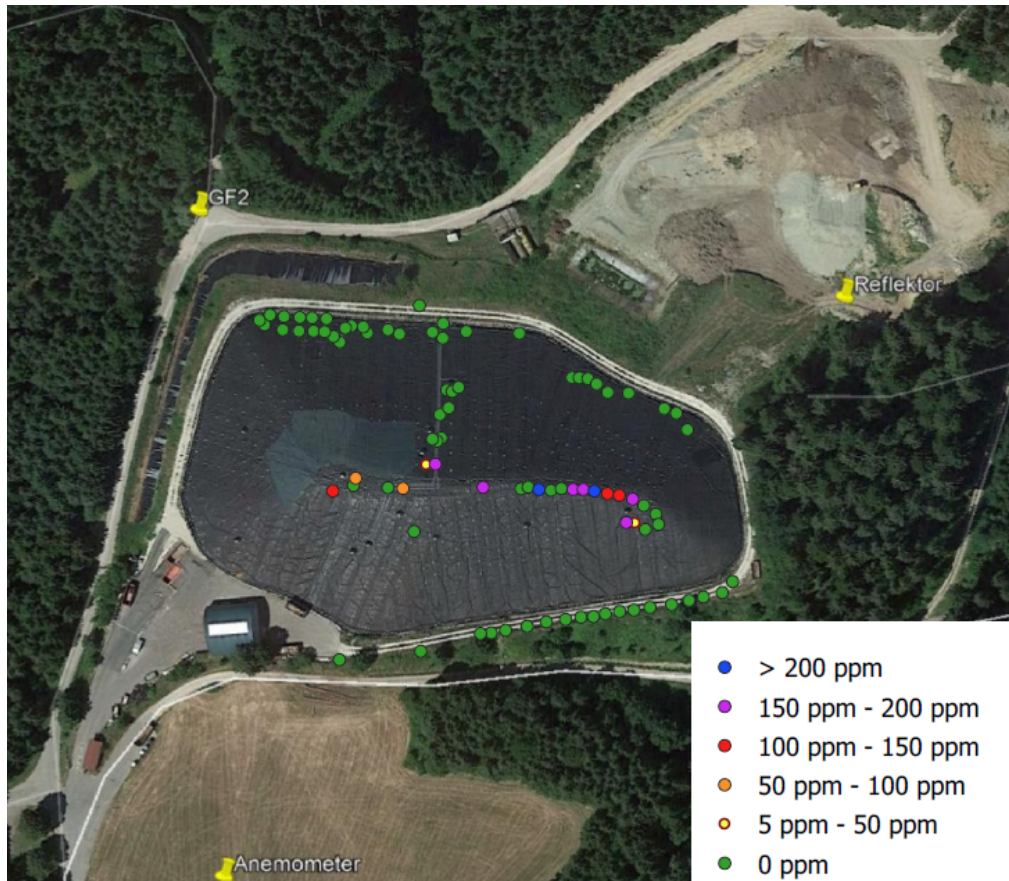


Abbildung 17: Ergebnis der FID-Begehung an der Deponie B bei aktiver Stabilisierungsmaßnahme.

6.4. Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse aus der Emissionsermittlung

Während der Projektlaufzeit wurde an der Deponie A eine Stabilisierungsmaßnahme in Form einer Übersaugung realisiert. Beim Vergleich der ermittelten Emissionen, wie in Tabelle 4, kann eine Emissionsreduktion von 93 % (IDMM mit TDLAS-Messungen) bzw. um mind. 90 % (alternative Methode) zwischen Urzustand und regelmäßiger Entgasung (Grundzustand) festgestellt werden. Im Falle der Umsetzung der Stabilisierungsmaßnahme reduzieren sich die Emissionen der Deponie im Vergleich mit dem Grundzustand noch einmal um 75 % (IDMM mit TDLAS-Messungen) bzw. um 85 % (alternative Methode). Die Emissionsreduktion zwischen Urzustand und aktiver Maßnahme beträgt für die IDMM mit TDLAS-Daten 98 %. Für die alternativen Emissionsermittlungsmethoden beträgt die quantifizierte Emissionsreduktion sogar 99 %.

Bei der Messung, bei der mit der IDMM basierend auf TDLAS- und D-FTIR-Daten der Urzustand der Deponie aufgenommen wurde (vgl. Tabelle 2), war die Stabilisierungs-

maßnahme bereits installiert, jedoch seit mehreren Monaten aus technischen Gründen außer Betrieb. Vor diesem technischen Defekt war die Stabilisierungsmaßnahme bereits 9 Monate aktiv. Mit Hilfe dieser Messung kann also gezeigt werden, dass die Dauer von 9 Monaten zur vollständigen Stabilisierung und damit Aerobisierung der Deponie nicht ausreichend war.

Tabelle 4: Zusammenfassung der vergleichenden Emissionsermittlung einerseits mit verschiedenen Messverfahren, andererseits bei verschiedenen Zuständen des Entgasungssystems der Deponie A.

Zustand der Deponie	Ermittelte durchschnittliche Emission mit IDMM TDLAS	Ermittelte durchschnittliche Emission mit alternativer Methode
Urzustand (keine Entgasung)	3,42 m ³ CH ₄ /h	2,78 m ³ CH ₄ /h (IDMM D-FTIR) 2,15 m ³ CH ₄ /h Tracer-Methode D-FTIR)
Grundzustand (regelmäßige Entgasung)	0,24 m ³ CH ₄ /h	0,2 m ³ CH ₄ /h (CHARM)
Aktive Maßnahme (Übersaugung)	0,06 m ³ CH ₄ /h	0,03 m ³ CH ₄ /h (IDMM FTIR)

Auch an der Deponie B wurde während der Projektlaufzeit eine Stabilisierungsmaßnahme in Form einer Übersaugung realisiert. In Tabelle 5 ist eine Zusammenfassung der ermittelten Emissionen mit verschiedenen Messverfahren im Urzustand und während der aktiven Maßnahme (Übersaugung) an der Deponie B gegeben. Auf Grund technischer Probleme des Entgasungssystems vor Ort und der geringen Verfügbarkeit des CHARM-Systems wurde an der Deponie B keine Parallelmessung im Grundzustand (bei regelmäßiger Entgasung) bewerkstelligt. Für die IDMM basierend auf TDLAS-Daten ergibt sich eine Emissionsreduktion um 100 %. Dieses Ergebnis muss mit Vorsicht betrachtet werden. In Abschnitt 7.3. werden diese Ergebnisse diskutiert. Für die alternativen Messverfahren ergibt sich an der Deponie B eine Emissionsreduktion um 91 %.

Tabelle 5: Zusammenfassung der vergleichenden Emissionsermittlung einerseits mit verschiedenen Messverfahren, andererseits bei verschiedenen Zuständen des Entgasungssystems der Deponie B.

Zustand der Deponie	Ermittelte durchschnittliche Emission mit IDMM TDLAS	Ermittelte durchschnittliche Emission mit alternativer Methode
Urzustand (keine Entgasung)	3,2 m ³ CH ₄ /h	5,5 m ³ CH ₄ /h (CHARM)

Aktive (Übersaugung)	Maßnahme	0 m ³ CH ₄ /h	0,5 m ³ CH ₄ /h (IDMM FTIR)
-------------------------	----------	-------------------------------------	---

7. Diskussion

7.1. Bestimmung der Gesamtemission

Bei der Auswertung gibt es grundsätzliche Unterschiede. Durch die Praxis der 10-Minuten-Mittelwerte bei der IDMM werden Schwankungen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung normalisiert. Die abgedeckte Zeit für die Emissionsratenquantifizierung durch die IDMM bei der Konzentrationsdatenaufnahme mit TDLAS-Systemen ist nur durch die Akkulaufzeit von Anemometer und Gasfinder begrenzt. Die Akkulaufzeit beträgt bei beiden Geräten ca. 10 Stunden. Bei der CHARM-Methode ist der begrenzende Faktor die Tankfüllung des Helikopters. Dieser kann maximal ca. 2 Stunden in der Luft bleiben. In dieser Zeit müssen beide Deponien befliegen werden. Somit können mit Hilfe der IDMM basierend auf TDLAS-Messungen die Emissionen über mehrere Stunden bestimmt werden, bei CHARM nur über 10 Minuten. Für die Drohne beträgt die Flugzeit pro Akkuladung etwa 12 Minuten. Durch Akkutauch kann diese Zeit pro Messtag bis zu etwa 10 Mal wiederholt werden.

Bei der Eignung der Messgeräte ist die Verfügbarkeit ein wichtiger Punkt der beachtet werden muss. Für das CHARM-System hat sich im Forschungsumfeld des durchgeführten Projekts eine sehr geringe Verfügbarkeit herausgestellt. Beim vorliegenden Forschungsprojekt mussten Messtage gefunden werden, an denen nicht nur die Wetterbedingungen für die TDLAS-Messung erfüllt waren, sondern auch die Wetterbedingungen für das CHARM-System, die sich zum Teil unterscheiden. Darüber hinaus mussten auf der Anflugstrecke des Helikopters die entsprechenden Sichtflugwetterbedingungen vorliegen.

Die Wetterbedingungen für TDLAS-Messungen schließen Windgeschwindigkeiten von mehr als 2,5 m/s und kein Nebel ein. Bei Niederschlag ist es abhängig von der Dichte des Niederschlags. Bei zu dichtem Niederschlag wird zu viel des ausgesandten Lichtstrahls zwischen TDLAS-Gerät und Reflektor durch Niederschlag absorbiert. Ein leichter Nieselregen stellt erfahrungsgemäß aber beispielsweise kein Problem dar. Für das CHARM-System werden Messungen bei Niederschlag jeglicher Art und bei taubedecktem oder gefrorenem Boden grundsätzlich ausgeschlossen. Dies wird mit der zu hohen Rückstreuung des Lichts zum Detektor, der dadurch beschädigt werden kann, begründet. An Sommertagen (maximale Tagestemperatur beträgt oder überschreitet 25 °C) wird eine Messung auf Grund der Überhitzung des Messgeräts zusätzlich ausgeschlossen. Windgeschwindigkeiten über 3 m/s sind zwar für das Messgerät unproblematisch, jedoch wird es ab dieser Windgeschwindigkeit für den Piloten des Helikopters problematisch die notwendigen engen Schleifen über der Deponie zu fliegen. Daraus ergibt sich eine sehr geringe Schnittmenge zwischen TDLAS-Einsatzzeiten und CHARM-Einsatzzeiten. Hinzu kamen während der Projektlaufzeit noch Probleme mit der Messtechnik beim CHARM-System. Ergebnis dieser vielen

Einschränkungen war, dass nur eine Parallelmessung zwischen TDLAS und CHARM während der Projektlaufzeit realisiert werden konnte. Um die Ziele des Projekts dennoch zu erreichen wurde begonnen das D-FTIR-System zu entwickeln. Dieses bietet den großen Vorteil der Multi-Komponentenanalyse und der Mobilität sowohl mit Drohnensystem als auch ohne.

Der aufwändigen Entwicklung des Schwerlastdrohnensystems ist es zuzuschreiben, dass zwei Messungen mit dem FTIR ohne Drohne durchgeführt werden mussten. Bei diesen Messungen wurde das FTIR entweder zu Fuß (mit durchschnittlicher Gehgeschwindigkeit) oder in einem Auto (mit ca. 12 km/h) entlang der geplanten Messstrecke bewegt. Die Unabhängigkeit von luftbasierten Systemen kann als weiterer Vorteil für die FTIR-Technik gewertet werden. Da so auch bei großen Windgeschwindigkeiten, bei denen die Drohne die Flugbahn nicht mehr sauber halten kann, eine Messung in geringfügig abgewandelter Form möglich bleibt.

7.2. Bestimmung der Hauptaustrittsstellen

Zwischen dem CHARM-System und dem Messprinzip bei der FID-Rasterbegehung gibt es grundsätzliche Unterschiede. Das CHARM-System scannt die unbeeinflusste Deponieoberfläche auf erhöhte Konzentrationen aus der Ferne. Bei der FID-Rasterbegehung wird durch Aufsetzen der Messhaube und Saugen des Messgeräts ein geringer Unterdruck auf der Deponieoberfläche angebracht. Der Deponiebereich, an dem die jeweilige Messung durchgeführt wird, kann bei den FID-Messungen nicht als unbeeinflusst gewertet werden. Nicht die Konzentration oberhalb der Deponie wird erfasst, sondern die Konzentration eines Gasgemischs, das sich in der obersten Schicht der Deponie befindet und aus Luft und Deponiegas in unbekanntem Mischungsverhältnis besteht.

7.3. Vergleich der Messverfahren

Bei den Messungen an der Deponie A zeigen sich alle drei verwendeten Messverfahren als ähnlich gut geeignet zur messtechnischen Bestimmung der Emissionen. Die höchsten Abweichungen sind bei der Messung in stabilisiertem Zustand zu verzeichnen. Hier weicht die alternative Methode (FTIR mit IDMM) um 50 % von der IDMM basierend auf TDLAS-Daten ab. Das Emissionsniveau ist in diesem Zustand sehr niedrig und liegt unter $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$ für beide Messverfahren.

Bei den an der Deponie A durchgeführten Ermittlungen der Emissionsraten liefern die als alternative Methoden bezeichneten Verfahren zur Emissionsratenquantifizierung niedrigere Ergebnisse für die Emissionen als die auf TDLAS-Daten basierende IDMM. Bei der Deponie B zeigt sich ein umgekehrter Sachverhalt. Die Ergebnisse der Emissionsbestimmung mit den alternativen Messverfahren sind hier höher als die ermittelten Emissionen mit der IDMM basierend auf TDLAS-Daten.

Bei der Messung zur Verifizierung der Messmethode mit der Tracer-Methode (vgl. Abschnitt 4.4.) weicht das Ergebnis der IDMM basierend auf TDLAS-Daten um 38 % vom Referenzwert ermittelt mit der Tracer-Methode ab. Die IDMM basierend auf FTIR-Daten weicht um 19 % ab. Dieses Ergebnis muss aufgrund der leicht unterschiedlichen Messstrecken jedoch mit Vorsicht betrachtet werden. Die Messstrecke für das FTIR-System war hier minimal kürzer und um einen Meter näher an der Emissionsquelle auf der Deponiefläche als die Messstrecke für das TDLAS-System.

Bei der Bewertung der Messergebnisse ist die topographische Situation an der Deponie auch immer von Bedeutung. Die Deponien A und B weisen unterschiedliche Topographien auf. Die Deponie hat eine flache Oberfläche. Diese eignet sich grundsätzlich besser für die Emissionsratenquantifizierung mit der IDMM basierend auf TDLAS-Daten als die hügelartige Topographie der Deponie B. Bei der Deponie A sind die durchschnittlichen Abweichungen zwischen den verwendeten Messverfahren geringer als bei der Deponie B. Bei der Deponie A betragen die Abweichungen über die drei Messungen 28 %, bei der Deponie B liegen die Abweichungen über die zwei Messungen bei 71 %.

Bei den Messungen an der Deponie B ist zu beachten, dass bei den beiden Messungen unterschiedliche Messstrecken, einmal südlich der Deponie (vgl. Abbildung 6) für die Deponie im Grundzustand und einmal nördlich der Deponie (vgl. Abbildung 7) für die stabilisierte Deponie verwendet wurden. Dabei ist nicht nur die Position der Messstrecken wichtig, beachtet werden muss auch die Topographie vor Ort. So liegt die nördlich der Deponie befindliche Messstrecke für die Emissionsermittlung der stabilisierten Deponie deutlich unterhalb der mit schwarzer Folie abgedeckten Abfallablageung. Der Wind folgt zwar grundsätzlich der Topographie, insbesondere bei tiefen Einschnitten, wie hier auf der nördlichen Seite noch mit weiteren Hindernissen (Bäumen), kommt es aber zu Verwirbelungen, die auch eine lokale Umkehr der vorherrschenden Windrichtung zur Hauptwindrichtung zur Folge haben kann. Die Erfassung des am First der Hügeldeponie emittierten CH_4 kann mit dieser Messstrecke nicht sichergestellt werden. Ein weiterer Grund für die Nichterfassung liegt in der schwarzen Abdeckung. Am Messtag, an dem die Emissionen der stabilisierten Deponie B ermittelt wurden, war es sehr sonnig. Durch die Sonneneinstrahlung erwärmt sich die schwarze Folie schneller als die Umgebung und es kommt zu Thermik. Über diese aufwärts gerichtete Bewegung der Luft, wird das CH_4 aufwärts getragen und nicht von der Messstrecke die deutlich unterhalb der mit Folie abgedeckten Deponie und insbesondere des Firstes liegt, erfasst.

Das ebenfalls an diesem Messtag eingesetzte FTIR wurde näher am Deponiekörper entlangbewegt. Mit diesem Gerät konnten in diesem Fall das emittierte Methan besser erfasst werden. Die ermittelten Emissionsraten sind höher. Diese qualitative Bewertung wird durch die Auswertung der FID-Begehung an diesem Messtag gestützt. Diese ergibt Austrittsstellen ausschließlich am höchsten Punkt der Deponie (vgl. Abbildung 17). Das austretende Methan wird von der niedrig gelegenen TDLAS-Messstrecke nicht erfasst.

Anhand der Tabelle 6 und der Tabelle 7 wurde Abbildung 18 erstellt. Bei der Bewertung der Flexibilität war die zeitliche Verfügbarkeit während der Projektlaufzeit ausschlaggebend. Diese ist auch abhängig von den erforderlichen Wetterbedingungen für eine Messung. Für die Bewertung der Robustheit eines Messverfahrens spielt die Einsatzfähigkeit eines Messverfahrens bei unterschiedlichen Wetterbedingungen ebenfalls eine Rolle. Bei diesen beiden Bewertungskriterien schneidet das CHARM-System auf Grund geringen zeitlichen Verfügbarkeit während der Projektlaufzeit relativ schlecht ab. Die Flexibilität kann eventuell durch einen anderen Standort des Hubschraubers erhöht werden. Dennoch weist das Messverfahren hinsichtlich der Robustheit bezüglich der Einsatzfähigkeit etwa bei sommerlichen Temperaturen oder bei Niederschlag vor und während der Messung Mängel auf. Durch die Umfliegungen mit dem CHARM-System weist dieses Messverfahren aber verglichen mit der IDMM mit TDLAS-Daten eine höhere Toleranz auf.

Tabelle 6: Kriterien zur Einordnung der verwendeten Messverfahren.

Kriterien	Aussage 100 %	Aussage 0 %
Bestimmung der Gesamtemission	Realistisch möglich	Nicht möglich
Robustheit	Unempfindlich gegen äußere Einflüsse wie Temperatur und Niederschlag	Einsatzfähigkeit bei nicht idealen Wetterbedingungen nicht möglich
Flexibilität	Schnelle Einsatzfähigkeit, geringer Aufwand	Lange Planung notwendig, hoher Aufwand
Windabhängigkeit	Messung nicht windabhängig	Messung stark windabhängig
Örtliche Konzentrationsauflösung	vorhanden	Nicht vorhanden
Kosten	niedrig	hoch
Zeitliche Abdeckung der Ergebnisse	Hoch (lange Messdauer, Schwankungen werden miterfasst)	Niedrig (Schwankungen werden nicht miterfasst)

In Tabelle 7 sind die Kosten der einzelnen Messverfahren, wie sie für das vorliegende Projekt berechnet wurden, gezeigt. Je nach Messziel (Konzentrationsverteilung oder Gesamtemissionsermittlung) und Messobjekt (Topographie, Windverhältnisse) sind ein oder mehrere Messverfahren notwendig. Die IDMM mit TDLAS-Messtechnik ist dabei das einzige Messverfahren, das für kontinuierliche Langzeitmessungen geeignet ist.

Tabelle 7: Vergleich der verwendeten Messverfahren hinsichtlich verfügbarer Messzeit und Kosten.

Mess-technik	Ergebnis	Zeitlicher Aufwand	Zeitliche Abdeckung der Ergebnisse	Kosten
FID	Konzentrationsverteilung	2 h	Momentaufnahme	1 200 €
CHARM	Konzentrationsverteilung, Emissionsermittlung	0,5 h	Jeweils ca. 15 Minuten	15 000 €
IDMM mit TDLAS	Emissionsermittlung	≥ 5 h	Beliebig	2 000 €/d
IDMM mit D-FTIR	Emissionsermittlung	20 Minuten	≥ 3 h	3 000 €/d

In Abbildung 18 ist zur besseren Lesbarkeit in zwei Abbildungen ein qualitativer Vergleich der verwendeten Messtechniken gezeigt. Die obere Abbildung zeigt dabei den direkten Vergleich der IDMM basierend auf TDLAS-Daten und auf D-FTIR-Daten.

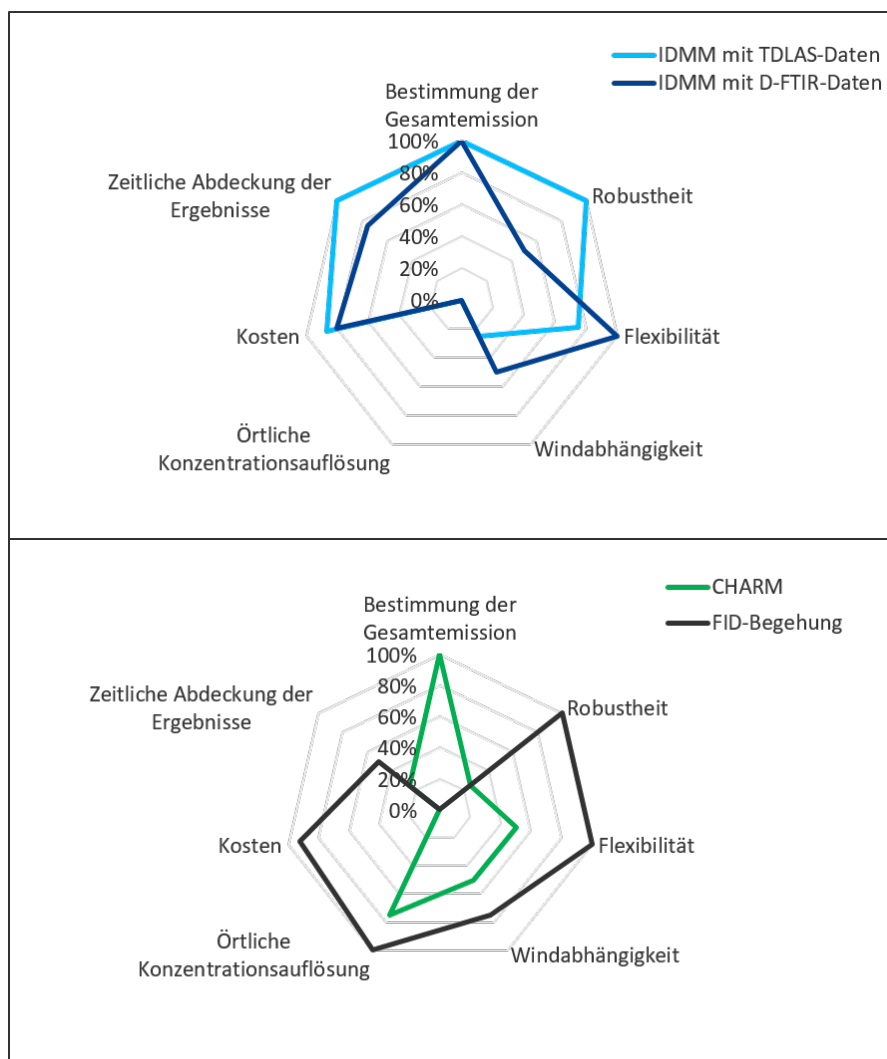


Abbildung 18: Qualitativer Vergleich der verwendeten Messverfahren.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Während der Projektlaufzeit konnte die Wirksamkeit von Stabilisierungsmaßnahmen an zwei Deponien messtechnisch nachgewiesen werden. Eingesetzt wurden vier verschiedene Messverfahren: die IDMM basierend auf TDLAS- und (D-)FTIR-Daten, CHARM und FID-Begehungen. Bei allen fünf durchgeführten Messungen wurde die IDMM basierend auf TDLAS-Daten angewendet. Bei beiden Deponien ließ sich eine Emissionsreduktion durch Anwendung regelmäßiger Entgasung bzw. einer Stabilisierungsmaßnahme messtechnisch nachweisen.

Beim Vergleich der verschiedenen Messverfahren zur Gesamtemissionsbestimmung zeigten sich grundsätzlich alle drei Verfahren als geeignet. Je nach örtlichen Gegebenheiten und meteorologischen Bedingungen zeigte sich die ein oder andere Methode besser geeignet. Die Durchführung einer FID-Begehung zeitlich vor der Messung zur Ermittlung der Gesamtemission ist insbesondere an unübersichtlicheren Deponiestandorten empfehlenswert. So kann die Messstreckenposition entsprechend gewählt werden, um eine Abdeckung der Hauptaustrittsstellen zu gewährleisten. Ein Vergleich der Messverfahren mit bekannter Freisetzungsratesollte mit identischen Messstrecken und mit einer diffusen Methanfreisetzung wiederholt werden. Der Freisetzungsversuch mit Lachgas zur Verifizierung der zwei Modellierungs-basierten Messverfahren zeigte eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Während der Projektlaufzeit konnte eine Emissionsreduktion an der Deponie A um mindestens 98 % durch die Umsetzung einer Stabilisierungsmaßnahme in Form einer Übersaugung festgestellt werden. An der Deponie B konnten die Emissionen um mindestens 91 % gemindert werden. Ob dies eine allgemein gültige Aussage ist und sich auf weitere Deponien übertragen lässt, muss mit weiteren Messungen gezeigt werden. Des Weiteren werden Untersuchungen hinsichtlich der notwendigen Dauer einer Stabilisierungsmaßnahme empfohlen. Insbesondere nach Beendigung einer durchgeführten Stabilisierungsmaßnahme sind erneut Messungen zur Gesamtemissionsermittlung notwendig, um eine Aussage über die endgültige Wirksamkeit der Maßnahme treffen zu können.

Es hat sich gezeigt, dass eines der hier verwendeten Messverfahren zur Gesamtemissionsermittlung für eine messtechnische Überprüfung der Wirksamkeit von Stabilisierungsmaßnahmen ausreichend ist.

Literatur

- [Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg 2016] *Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg (AVL): Abschlussbericht Einsatzprüfung und -anpassung eines Emissionsmessverfahrens für Methanemissionen auf Deponien mittels des Lasermessverfahrens CHARM aus Mitteln des Kommunalen Investitionsfonds des Landes Baden-Württemberg, Ludwigsburg, 2016.*
- [BMUB 2014] *BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit): Aktionsprogramm Klimaschutz 2020: Kabinettsbeschluss vom 3. Dezember 2014 (2014).*
- [Burkhard & Eggloffstein 2016] *Burkhard, G.; Eggloffstein, T. (Hrsg.): Deponie und Altlastenseminar 2016: Planung und Bau neuer Deponien: Zukünftige Deponiekapazitäten / mögliche Auswirkungen der Mantelverordnung - praktischer Umgang mit bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS), 2016.*
- [DepV 2009] *DepV: Verordnung über Deponien und Langzeitlager. BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2009), S. 63.*
- [Dominok 2019] *Dominok, S.: Erste Deponiebefliegung im Projekt Müdse, ADLARES GmbH, 2019.*
- [Fix et al. 2004] *Fix, A.; Ehret, G.; Hoffstädt, A.; Klingenberg, H.; Lemmerz, C.; Mahnke, P.; Ulbricht, M.; Wirth, M.; Wittig, R.; Zirrig, W.: CHARM - A Helicopter-borne Lidar System For Pipeline Monitoring. 22nd International Laser Radar Conference (2004).*
- [Heyer et al. 2018] *Heyer, K.-U.; Hupe, K.; Stegmann, R.: Modifizierte Ansätze zur Quantifizierung der Methanemissionen von Siedlungsabfalldeponien - Ergebnisse eines UFOPLAN-Vorhabens. In: Stegmann, R.; Rettenberger, G.; Ritzkowski, M.; Kuchta, K.; Siechau, R.; Fricke, K.; Heyer, K.-U. (Hrsg.): Hamburger Berichte. Abfall aktuell, Hamburg, 2018, S. 299–316.*
- [Lehner 2019] *Lehner, J.: Münchingen - 06.03.2019, contec GmbH, 2019.*
- [Richter 2019] *Richter, M.: Lottstetten - 06.03.2019, contec GmbH, 2019.*
- [Scherello 2012] *Scherello, A.: Projekte, Ergebnisse und Erfahrungen im Umfeld der luftgestützten Gasferndetektion. gwf- Gas/Erdgas 150 (2012), 12, S. 954–959.*
- [UBA 2013] *UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2013: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2011, 2013.*
- [VDI 3860 Blatt 3 2017] *VDI 3860 Blatt 3: Messen von Deponiegas Messen von Methan an der Deponieoberfläche mittels Saugglockenverfahren. VDI-Richtlinie. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL 13.030.40 (2017), 3860.*

Anhang

[Bericht erste Befliegung von ADLARES GmbH](#)

[FID-Messung Lottstetten \(entspricht Deponie A\)](#)

[FID-Messung Münchingen \(entspricht Deponie B\)](#)