

TEXTE

16/2025

# Bestimmung der diffusen Methanemissionen von Deponien im laufenden Prozess bei aeroben In-situ-Stabilisierungsprojekten

von:

Imke Elpelt-Wessel, Sophie Strohmaier, Martin Reiser  
Universität Stuttgart, Stuttgart

Herausgeber:

Umweltbundesamt



TEXTE 16/2025

Projektnummer 174644

FB001742

# **Bestimmung der diffusen Methanemissionen von Deponien im laufenden Prozess bei aeroben In-situ-Stabilisierungsprojekten**

von

Imke Elpelt-Wessel, Sophie Strohmaier, Martin Reiser  
Universität Stuttgart, Stuttgart

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

### Durchführung der Studie:

Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft  
Bandtäle 2  
70569 Stuttgart

### Abschlussdatum:

März 2024

### Redaktion:

Fachgebiet III 2.4  
Ling He; Wolfgang Butz; Kathrin Brand

### DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7759>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

### **Kurzbeschreibung**

Das Projekt zielt darauf ab, diffuse Methanemissionen aus Deponien während der aeroben In-situ-Stabilisierung mit Hilfe indirekter Emissionsmessverfahren zu bestimmen. Für den Zeitraum der Stabilisierung (Belüftung) können die sonst herangezogenen Prognosemodelle zur Ermittlung des Gaserfassungsgrades nicht verwendet werden.

Zur Erprobung der alternativen Methode der indirekten Emissionsmessungen wurden zwei vergleichbare Deponien ausgewählt, auf denen bis in die 1990er Jahre jeweils etwa 2 Mio. m<sup>3</sup> gemischte Siedlungsabfälle abgelagert wurden. Im Rahmen der Nachsorge führen die Deponien verschiedene Belüftungsmaßnahmen durch.

Zunächst wurden Konzentrationsmessungen am Rand der Deponie mit einem mobilen FTIR-Spektrometer und zusätzlich mittels TDLAS-Linienmessungen durchgeführt. Anschließend konnte der von der Deponie diffus emittierte Methan-Massenstrom aus den Messergebnissen abgeleitet werden. Dies erfolgte mit der inversen Dispersions-Modellierungsmethode (IDMM) und zum Vergleich zusätzlich mit der Tracer-Methode.

Die Untersuchungen belegen, dass die diffusen Methanemissionen während aerober In-situ-Stabilisierungsprojekte vernachlässigbar sind. Es wurden diffuse Emissionen zwischen 50 und 750 mg CH<sub>4</sub>/s ermittelt. In beiden Fällen lagen die Methan-Erfassungsraten bei über 90 %.

### **Abstract**

The project aims to determine diffuse methane emissions from landfills during aerobic in-situ stabilization using indirect emission measurement methods. For the period of stabilization (aeration), the forecasting models otherwise used to determine the gas capture rate cannot be used.

To test the alternative method of indirect emission measurements, two comparable landfills were selected, on each of which around 2 million m<sup>3</sup> of mixed municipal waste was deposited until the 1990s. As part of aftercare, the landfills carry out various aeration measures.

Firstly, concentration measurements were carried out at the edge of the landfill using a mobile FTIR spectrometer and additionally using TDLAS line measurements. The methane mass flow diffusely emitted from the landfill was then derived from the measurement results. This was done using the inverse dispersion modeling method (IDMM) and, for comparison, also using the tracer method.

The investigations show that diffuse methane emissions during aerobic in-situ stabilization projects are negligible. Diffuse emissions between 50 and 750 mg CH<sub>4</sub>/s were determined. In both cases, the methane capture rates were over 90 %.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	10
Abkürzungsverzeichnis.....	12
Zusammenfassung.....	13
Summary	14
1 Ziel und Gegenstand des Projekts.....	15
2 Vorgehensweise zur Erreichung des Projektziels.....	16
3 Arbeitspakete.....	17
3.1 Arbeitspaket 1 – Deponieauswahl.....	17
3.1.1 Im Angebot geforderte Vorgehensweise.....	17
3.1.2 Im Angebot beschriebene Kriterien für die Auswahl.....	17
3.1.3 Vorgehen bei der Auswahl.....	17
3.1.4 Die Deponie Dibbersen.....	18
3.1.5 Die Deponie Blumentobel.....	20
3.1.6 Vergleich der ausgewählten Deponien.....	21
3.2 Arbeitspaket 2 – Planung und Durchführung von Messungen sowie Auswertung der Messergebnisse.....	22
3.2.1 Details zur Messung und der verwendeten Messtechnik.....	22
3.2.1.1 Grundsätzliches.....	22
3.2.1.2 Konzentrationsermittlung mittels beweglicher Infrarot-Spektrometrie.....	22
3.2.1.3 Ermittlung der Emissionsrate mittels IDMM.....	26
3.2.1.4 Emissionsratenquantifizierung mittels Tracer-Methode.....	28
3.2.1.5 Qualitätssicherung bei der IDMM durch die Berechnung einer Nachweisgrenze.....	29
3.2.1.6 Auswertung der messtechnisch gesammelten Daten.....	30
3.2.2 Planung der Vorgehensweise.....	30
3.2.2.1 Grundsätzliches zur Planung der Vorgehensweise.....	30
3.2.2.2 Vorgehensweise an der Deponie Blumentobel.....	31
3.2.2.3 Vorgehensweise an der Deponie Dibbersen.....	31
3.2.3 Durchführung und Ergebnisse der Messungen an der Deponie Blumentobel.....	32
3.2.3.1 Meteorologische Gegebenheiten.....	32
3.2.3.2 Durchführung und Ergebnisse der Messung am 29.11.2022.....	32
3.2.3.3 Durchführung und Ergebnisse der Messung am 22.12.2022.....	34
3.2.4 Durchführung und Ergebnisse der Messungen an der Deponie Dibbersen.....	37

3.2.4.1	Meteorologische Gegebenheiten .....	37
3.2.4.2	Durchführung und Ergebnisse der Messung am 31.05.2023 .....	37
3.2.4.3	Durchführung und Ergebnisse der Messung am 27.06.2023 .....	39
3.2.5	Einordnung der Messergebnisse .....	42
3.2.5.1	Grundsätzliches zur Einordnung der Messergebnisse.....	42
3.2.5.2	Deponie Blumentobel.....	42
3.2.5.3	Deponie Dibbersen .....	43
3.3	Arbeitspaket 3 – Handlungsempfehlungen .....	46
4	Quellenverzeichnis .....	48
A	Anhang49	
A.1	Messwerte .....	49
A.1.1	Blumentobel.....	49
A.1.2	Dibbersen.....	51
A.2	FID-Rasterbegehungen.....	54
A.2.1	FID-Rasterbegehung an der Deponie Blumentobel (aus Jahresbericht 2022) .....	54
A.2.2	FID-Rasterbegehungen an der Deponie Dibbersen (aus Jahresbericht 2023).....	54

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Luftbild der Deponie Dibbersen: Rechts oben die RTO, daneben der Recyclinghof .....	19
Abbildung 2:	Luftbilder der Deponie Blumentobel: Links Blick von Südwesten. Im Süden schließt sich die Deponie für Erdaushub und Bauschutt an (1996). Rechts Blick von Norden .....	20
Abbildung 3:	Prinzip der Konzentrationsmessung mit dem FTIR-Analysator. ....	23
Abbildung 4:	Prinzip der Konzentrationsmessung mit dem TDLAS-Analysator. ....	24
Abbildung 5:	Prinzip der FTIR-Messung für die IDMM am Beispiel der Umfliegung der Quellfläche mit einem UAV als Vehikel .....	25
Abbildung 6:	Bisher erprobte und mögliche Vehikel für den Transport des FTIR entlang unterschiedlicher Messstrecken zur Konzentrationsermittlung .....	26
Abbildung 7:	Flussdiagramm zum Vorgehen bei der IDMM (links) und Darstellung der Partikelfreisetzung während der Modellierung (rechts).....	27
Abbildung 8:	Messaufbau und Quellkonfiguration für die Emissionsratenquantifizierung mittels Tracer-Methode .....	29
Abbildung 9:	Luftbild der Deponie Blumentobel mit den Positionen des USA und der Quelle, sowie den Messstrecken für FTIR (blaue und gelbe Linie) und TDLAS (jeweils zwischen den gelben Markierungen) und der Windrichtung (hellblauer Pfeil) am 29.11.2022.....	33
Abbildung 10:	Ergebnis der Emissionsquantifizierung am 29.11.2022 an der Deponie Blumentobel für die Konzentrationserfassung mit FTIR und TDLAS.....	34
Abbildung 11:	Luftbild der Deponie Blumentobel mit den Positionen des USA und der Quelle, sowie den Messstrecken für FTIR (rote und gelbe Linie) und TDLAS (zwischen den gelben Markierungen) und der Windrichtung (hellblauer Pfeil) am 22.12.2022.....	35
Abbildung 12:	Ergebnis der Emissionsquantifizierung am 22.12.2022 an der Deponie Blumentobel für die Konzentrationserfassung mit FTIR und TDLAS.....	36
Abbildung 13:	Luftbild der Deponie Dibbersen mit Darstellung den Positionen des USA und der Quelle, sowie den Messstrecken für FTIR (rote Strecke) und TDLAS (zwischen den gelben Markierungen) und der Windrichtung (hellblauer Pfeil) am 31.05.2023.....	38
Abbildung 14:	Ergebnis der Emissionsquantifizierung am 31.05.2023 an der Deponie Dibbersen für die Konzentrationserfassung mit FTIR und TDLAS.....	39

Abbildung 15:	Luftbild der Deponie Dibbersen mit Darstellung den Positionen des USA und der Quelle, sowie den Messstrecken für FTIR (blaue Linie und rote Markierung) und TDLAS (zwischen den gelben Markierungen) und der Windrichtung (hellblauer Pfeil) am 27.06.2023 .....	40
Abbildung 16:	Ergebnis der Emissionsquantifizierung am 27.06.2023 an der Deponie Dibbersen für die Konzentrationserfassung mit FTIR und TDLAS.....	41
Abbildung 17:	Luftbild mit, bei der IDMM erzeugten „Partikeln“ und der TDLAS-Messstrecke am 31.05.2023 um 13:20 Uhr bei „kalter RTO“. Der hellblaue Pfeil zeigt die Windrichtung an.....	44
Abbildung 18:	Luftbild mit, bei der IDMM erzeugten „Partikel“ und der TDLAS-Messstrecke am 31.05.2023 um 12:30 Uhr. Der hellblaue Pfeil zeigt die Windrichtung an .....	45
Abbildung 19:	FID-Messung – Messpunkte – Messergebnisse, Deponie Blumentobel, (Jahresbericht 2022) .....	55
Abbildung 20:	FID-Messung – Messergebnisse, Deponie Dibbersen (Jahresbericht 2023).....	56

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zur Auswahl stehende Deponien mit aktuellem Status der Stabilisierung .....	18
Tabelle 2:	Datenvergleich der ausgewählten Deponien .....	21
Tabelle 3:	Weitere benötigte Informationen für die Modellierung in WindTrax .....	26
Tabelle 4:	Meteorologische Daten an den Messtagen 29.11.2022 und 22.12.2022, Deponie Blumentobel.....	32
Tabelle 5:	Definition und Beschreibung der verwendeten Messstrecken am 29.11.2022, Deponie Blumentobel.....	32
Tabelle 6:	Messergebnisse der in Abbildung 9 dargestellten Strecken am 29.11.2022, Deponie Blumentobel.....	33
Tabelle 7:	Definition und Beschreibung der verwendeten Messstrecken am 22.12.2022, Deponie Blumentobel.....	34
Tabelle 8:	Messergebnisse der in Abbildung 11 dargestellten Strecken am 22.12.2022, Deponie Blumentobel.....	35
Tabelle 9:	Meteorologische Eckdaten an den Messtagen 31.05.2023 und 27.06.2023, Deponie Dibbersen.....	37
Tabelle 10:	Definition und Beschreibung der verwendeten Messstrecken am 31.05.2023, Deponie Dibbersen.....	37
Tabelle 11:	Messergebnisse der in Abbildung 13 dargestellten Strecken und Punkte am 31.05.2023, Deponie Dibbersen .....	38
Tabelle 12:	Definition und Beschreibung der verwendeten Messstrecken am 27.06.2023, Deponie Dibbersen.....	39
Tabelle 13:	Messergebnisse der in Abbildung 15 dargestellten Strecken und Punkte am 27.06.2023, Deponie Dibbersen .....	40
Tabelle 14:	Methan-Emissionsraten aus der Oberfläche der Deponie Blumentobel .....	43
Tabelle 15:	Methan-Emissionsraten aus der Oberfläche der Deponie Dibbersen .....	46
Tabelle 16:	Methan-Erfassungsgrad während der aeroben Stabilisierung.	47
Tabelle 17:	Messergebnisse der IDMM mit FTIR auf der Deponie Blumentobel am 29.11.2022 .....	49
Tabelle 18:	Messergebnisse der IDMM mit TDLAS als 10-Minuten-Mittelwerte auf der Deponie Blumentobel am 29.11.2022.....	49
Tabelle 19:	Messergebnisse der IDMM mit FTIR auf der Deponie Blumentobel am 22.12.2022 .....	50
Tabelle 20:	Messergebnisse der IDMM mit TDLAS als 10-Minuten-Mittelwerte auf der Deponie Blumentobel am 22.12.2022.....	50
Tabelle 21:	Messergebnisse der IDMM mit FTIR auf der Deponie Dibbersen am 31.05.2023.....	51

Tabelle 22:	Messergebnisse der IDMM mit TDLAS als 10-Minuten-Mittelwerte auf der Deponie Dibbersen am 31.05.2023 .....51
Tabelle 23:	Messergebnisse der IDMM mit FTIR auf der Deponie Dibbersen am 27.06.2023 .....52
Tabelle 24:	Messergebnisse der IDMM mit TDLAS als 10-Minuten-Mittelwerte auf der Deponie Dibbersen am 27.06.2023 .....53

## Abkürzungsverzeichnis

---

<b>FID</b>	Flammenionisations-Detektor
<b>FTIR</b>	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie/-spektrometer
<b>GF</b>	GasFinder, TDLAS-Analysator der Boreal Laser Inc.
<b>IDMM</b>	Inverse Dispersionsmodellierungsmethode
<b>INSPIRO</b>	Belüftungsverfahren der contec GmbH, Herrenberg
<b>IR</b>	Infrarot
<b>KDB</b>	Kunststoffdichtungsbahn
<b>LK</b>	Landkreis
<b>Mg</b>	Megagramm
<b>MP</b>	Messpunkt
<b>MS</b>	Messstrecke
<b>NKI</b>	Nationale Klimaschutzinitiative
<b>NNW</b>	Nord-Nord-West
<b>NWG</b>	Nachweisgrenze
<b>RTO</b>	Regenerative Thermische Oxidation
<b>SKA</b>	Schalenkreuzanemometer
<b>TDLAS</b>	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy/Absorptionsspektroskopie mittels durchstimmbarem Diodenlaser
<b>THG</b>	Treibhausgas
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle (Unbemanntes Luftfahrzeug – „Drohne“)
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt, Dessau
<b>USA</b>	Ultraschallanemometer
<b>Vgl.</b>	vergleiche
<b>WSW</b>	West-Süd-West

## Zusammenfassung

Ziel des Projektes ist die Bestimmung der diffusen Methanemissionen von Deponien im laufenden Prozess bei aeroben In-situ-Stabilisierungsprojekten durch verschiedene Fernerkundungsverfahren.

Es wurden zwei in Bezug auf Alter und Ablagerungsvolumen vergleichbare Deponien ausgewählt, die sich in einer laufenden Aerobisierung (In-situ-Stabilisierung) befinden. Diese wird bei der Deponie Dibbersen mittels Druck-Saug-Belüftung und bei der Deponie Blumentobel mittels Übersaugung ausgeführt. Zudem wurde im Vorfeld die Eignung der Standorte für das gewählte Messverfahren geprüft. Hierbei sind Topografie, Bewuchs und Meteorologie die wesentlichen Kriterien.

Die Messungen wurden mittels eines mobilen FTIR-Spektrometers, kombiniert mit einem für die jeweilige Deponiesituation geeigneten Vehikel, in Verbindung mit der Inversen Dispersionsmodellierungsmethode (IDMM) und der Tracer-Methode durchgeführt. Eine Absicherung der Ergebnisse wurde mit einer weiteren Messmethode, der Linienmessung mittels TDLAS durchgeführt. Zur Qualitätssicherung wurden Nachweisgrenzen über die IDMM und Wiederfindungsraten für den Tracer berechnet.

Die ermittelten Massenströme lagen während des regulären Betriebs der Aerobisierung und der Abgasreinigung zwischen 50 und 220 mg CH<sub>4</sub>/s bei der Deponie mit Übersaugung und zwischen 100 und 750 mg CH<sub>4</sub>/s bei der Deponie mit Druck-Saug-Belüftung. An beiden Deponien war der Methan-Erfassungsgrad deutlich größer als 90%.

Die Qualität der Ergebnisse war signifikant von den maßgeblichen Faktoren am Messort geprägt und somit unterschiedlich hoch. Die Wiederfindungsrate für die Tracergase lag zwischen 62% und 94%.

Zur Einordnung von Klimaschutzprojekten auf Deponien wird entsprechend der im Projekt gewonnenen Daten und Erkenntnisse folgende Vorgehensweise empfohlen: Wenn gesichert ist, dass die Verfügbarkeit der Absaugungs- und/oder Belüftungstechnik sowie der dazu gehörenden Abgasreinigung im Bilanzzeitraum gegeben war, kann die diffuse Methanemission dieser Deponien während der laufenden Aerobisierung vernachlässigt werden.

## Summary

The goal of the project is to determine the diffuse methane emissions from landfills in the ongoing process of aerobic in-situ stabilization projects using various remote sensing methods.

Two landfills were selected that are comparable in terms of age and deposit volume and are currently undergoing aerobisation (in-situ stabilisation). The stabilisation method used at landfill Dibbersen is the application of positive pressure and at landfill Blumentobel aeration is done by applying excessive vacuum to the landfill body. In addition, the suitability of the locations for the selected measurement method was checked in advance. Topography, vegetation and meteorology are the key criteria here.

The measurements were carried out using a mobile FTIR spectrometer, combined with a vehicle suitable for the respective landfill situation, in conjunction with the inverse dispersion modeling method (IDMM) and the tracer method. The results were validated with a further measurement method, the line measurement using TDLAS. For quality assurance purposes, detection limits were calculated using the IDMM and recovery rates for the tracer were determined.

The mass flows determined during regular operation of the aerobisation and waste gas cleaning were between 50 and 220 mg CH<sub>4</sub>/s at the landfill with excessive vacuum and between 100 and 750 mg CH<sub>4</sub>/s at the landfill with positive pressure aeration. At both landfills, the methane capture rate was significantly greater than 90%.

The quality of the results was significantly influenced by the relevant factors at the sites and therefore varied. The recovery rate for the tracer gases was between 62% and 94%.

The following procedure is recommended for the classification of climate protection projects at landfills in accordance with the data and findings obtained in the project: If it is ensured that the availability of the extraction and/or ventilation technology and the associated waste gas purification was given in the balance period, the fugitive methane emission from these landfills during ongoing aerobisation can be neglected.

## 1 Ziel und Gegenstand des Projekts

Ziel des Projektes ist die Bestimmung der diffusen Methanemissionen von Deponien im laufenden Prozess bei aeroben In-situ-Stabilisierungsprojekten mit dem Messverfahren der drohnenbasierten Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometrie (FTIR). Damit soll eine Datengrundlage für eine weitergehende Bilanzierung der Minderung der THG-Emissionen bei Klimaschutzprojekten auf Deponien geschaffen und die Grundlage für eine mögliche Berücksichtigung dieser Effekte in der Klimaberichterstattung zur Verfügung gestellt werden. Zu diesem Punkt soll eine Empfehlung erarbeitet werden.

## 2 Vorgehensweise zur Erreichung des Projektziels

Mithilfe der Methodik der Fernerkundung sollen an zwei Deponiestandorten an denen aktuell eine In-situ-Stabilisierung durchgeführt wird, die über die Oberfläche in die Atmosphäre übertretende Methanfracht bestimmt werden. Dies soll mit jeweils zwei Messkampagnen pro Deponie erfolgen.

An den Deponien sollen die beiden am häufigsten realisierten Belüftungsmethoden, die „Übersaugung“ und das „Druck-Saug-Verfahren“ in Anwendung sein.

Die Messung der Methankonzentration zur Quantifizierung der Emissionen soll durch ein mobiles FTIR-Spektrometer erfolgen. Für die Bewegung des Messgeräts entlang der Messlinien wird ein für die topographischen und meteorologischen Verhältnisse vor Ort geeignetes Vehikel (Auto, Mensch oder Schwerlastdrohne) verwendet.

Zur Qualitätssicherung sollen zusätzliche Methan-Messungen mittels Laserabsorptionsspektrometrie entlang geeigneter linearer Messstrecken erfolgen und in der Modellierung der Ausbreitungssituation verwendet werden.

## 3 Arbeitspakete

### 3.1 Arbeitspaket 1 – Deponieauswahl

#### 3.1.1 Im Angebot geforderte Vorgehensweise

Für die Bestimmung der Methanemissionen sind vom Auftragnehmer zwei geeignete Deponien auszuwählen, auf denen derzeit aerobe In-situ-Stabilisierungsprojekte durchgeführt werden. In der Auswahl soll die Stabilisierung auf je einer Deponie durch Druckbelüftung und Saugbelüftung erfolgen. Die ausgewählten Deponien sollen möglichst repräsentativ für den Bestand sein. In den Angeboten sind geeignete Auswahlkriterien für die Deponieauswahl zu beschreiben.

#### 3.1.2 Im Angebot beschriebene Kriterien für die Auswahl

Neben der Hauptkriterien, der geforderten aktiven Stabilisierungsmaßnahme, spielen hinsichtlich der **Deponietechnik** weitere Kriterien eine wichtige Rolle:

- ▶ Für repräsentative Messungen während des laufenden Betriebs einer In-situ-Stabilisierung sollte die Anlagentechnik bereits seit mindestens zwei Wochen voll funktionsfähig und im Regelbetrieb sein.
- ▶ Die Deponien sollten bezüglich ihres Ablagerungsvolumens, ihres Alters und ihrer Oberflächenabdichtung möglichst ähnlich sein.
- ▶ Das Ergebnis einer FID-Rasterbegehung, die während des Betriebs der In-situ-Stabilisierung aufgenommen wurde und nicht älter als 6 Monate ist, wäre hilfreich, ist aber nicht zwingend notwendig.

Hinzu kommen **Gegebenheiten mit Relevanz für die angebotenen Messungen**. Für die in Kapitel 3.2. näher erläuterten Messmethoden müssen bestimmte Parameter eingehalten werden, die sowohl meteorologische als auch topographische Bedingungen einschließen.

Aus meteorologischer Sicht sind Messungen und die anschließende Ausbreitungsmodellierung ab Windgeschwindigkeiten von 2,5 m/s sicher möglich.

Die Umgebung der Emissionsfläche sollte möglichst nur niedrigen Bewuchs und keine schroffen Kanten oder Abbrüche aufweisen. Bei Tallage muss beachtet werden, dass insbesondere bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten die Hauptwindrichtung meist in Richtung des Talverlaufs ist.

Bezüglich der topographischen Situation ist der Idealfall mit einer ebenen Emissionsfläche in ebenem Gelände erreicht. Wenn die Deponie haufenförmig angelegt ist, sollte sie sich möglichst in ebener Umgebung befinden und die Oberfläche möglichst glatt ohne Bewuchs von Büschen oder Bäumen sein.

#### 3.1.3 Vorgehen bei der Auswahl

Zunächst wurden dem Auftragnehmer bekannte Deponien hinsichtlich ihres Status bezüglich der Stabilisierungsmaßnahme abgefragt. Eine Auswahl der in Frage kommenden Deponien ist in Tabelle 1 gelistet.

**Tabelle 1: Zur Auswahl stehende Deponien mit aktuellem Status der Stabilisierung**

Name der Deponie mit zugehörigem Landkreis	Status der in situ-Stabilisierung
Deponie Münchingen, LK Waldshut (Baden-Württemberg)	Keine Stabilisierungsmaßnahme aktiv, eine kurzzeitige Übersaugung wäre technisch aber möglich
Deponie Burghof, LK Ludwigsburg (Baden-Württemberg)	Stabilisierung mit Gasnutzung, daher keine Übersaugung
Deponie Dibbersen, LK Harburg (Niedersachsen)	Druck-Saug-Belüftung, RTO befindet sich zum Abfragezeitpunkt in Reparatur
Deponie Lottstetten, LK Waldshut (Baden-Württemberg)	Gasentsorgungstechnik ausgeschrieben, keine Installation vor Frühjahr 2023
Deponie Blumentobel, LK Esslingen (Baden-Württemberg)	Übersaugung aktiv

Nach dieser Sichtung der verfügbaren Deponien wurde die Auswahl basierend auf den geforderten Kriterien bezüglich der Stabilisierungsmaßnahme weiter eingeschränkt. Ausgewählt wurden schließlich die **Deponie Dibbersen** und die **Deponie Blumentobel**. Die Kriterien, die zur Auswahl geführt haben, sind in den beiden folgenden Kapiteln detailliert ausgeführt.

### 3.1.4 Die Deponie Dibbersen

Auf und in der im Landkreis Harburg (Niedersachsen) gelegenen Altdeponie Dibbersen wurden von 1982 bis 1993 etwa 2 Mio. m<sup>3</sup> gemischte Siedlungsabfälle verfüllt. Die Deponiefläche beträgt 8,5 ha. Die basisgedichtete Deponie verfügt über eine Sickerwasserfassung und ein Gasfassungssystem. Eine mineralische Oberflächenabdichtung ist vorhanden.

**Abbildung 1: Luftbild der Deponie Dibbersen: Rechts oben die RTO, daneben der Recyclinghof**



Quelle: GoogleEarthPro.

Nach einer Optimierung des Gasfassungssystems und eines Probebetriebs erfolgt seit 2016 die in situ-Stabilisierung der Deponie mittels **Druck-Saug-Belüftung**, bei der aktiv Luft oder Sauerstoff in den Deponiekörper eingebracht wird, um die dortigen anaeroben Verhältnisse in aerobe umzuwandeln. Das dabei aus dem Deponiekörper „herausgedrückte“ Gas wird abgesaugt und einer in Abgasreinigung, hier einer Regenerativen Thermischen Oxidation (RTO), zu CO<sub>2</sub> oxidiert.

Die meteorologischen und topographischen Bedingungen wurden im Auswahlzeitraum als „vermutlich geeignet“ eingestuft, was sich bei den Messungen im Prinzip auch bestätigt hat. Die Rückblickdaten für den Standort geben eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2,5 m/s bis 4 m/s bei einer mittleren Windrichtung von Süd-West an. Bezüglich der topographischen Situation vor Ort, lässt sich aus Geobasisdaten herauslesen, dass der höchste Punkt der Deponie Dibbersen etwa 22 m über dem niedrigsten liegt, dass die Deponie dementsprechend eine runde haufenförmige Erhöhung darstellt. Aus Luftbildern ist erkennbar, dass unmittelbar südlich angrenzend an die Deponie Mischwald und nördlich anschließend eher niedrigeres Buschwerk wächst. Diese örtlichen Gegebenheiten sind hauptsächlich für die Messmethodik mit Ausbreitungsmodellierung von großer Relevanz. Die größte Ausdehnung beträgt in Ost-West-Richtung 350 m. Die Abmessungen der Deponiefläche sind bezüglich der Länge der Messstrecken wichtig und wirken sich wiederum auf die Wahl der Messtechnik bzw. des Vehikels für den FTIR-Analysator (Drohne, Auto, Mensch, siehe Kapitel 3.2) aus. Mit 350 m ist die Deponie in der Nähe der maximal machbaren Ausdehnung. Weiterhin entscheidend ist die Zugänglichkeit der Deponie und ob beispielsweise ein Weg an der Basis entlang oder auf den Deponiekörper hinauf verläuft, was im Fall der Deponie Dibbersen beides gegeben ist, wie Abbildung 1 zeigt.

### 3.1.5 Die Deponie Blumentobel

Der Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Esslingen (Baden-Württemberg) betreibt auf der Gemarkung Beuren die Deponie Blumentobel. Die Deponie ist in zwei Abschnitte untergliedert (Abbildung 2), eine Hausmülldeponie (in der Nachsorgephase) und eine aktive Erd- und Bauschuttdeponie (Deponieklasse 0).

Der Hausmüllbereich ist bereits seit dem Jahr 2000 mit etwa 2,13 Mio. m<sup>3</sup> gemischten Siedlungsabfällen verfüllt. Die Deponiefläche beträgt 8,7 ha. Seit 2007 ist ein endgültiges Oberflächenabdichtungssystem als Regelabdichtungssystem für Deponieklasse II nach TA-Siedlungsabfall / Deponieverordnung vorhanden (Dichtungselemente: KDB und mineralische Dichtungsschicht).

Vom Abschnitt der Erddeponie sind aufgrund des eingelagerten inerten Materials keine Methanemissionen zu erwarten. Er wird daher hier nicht weiter betrachtet.

**Abbildung 2: Luftbilder der Deponie Blumentobel: Links Blick von Südwesten. Im Süden schließt sich die Deponie für Erdaushub und Bauschutt an (1996). Rechts Blick von Norden**

---



Quellen: Abfallwirtschaftsbetrieb Esslingen, GoogleEarthPro.

Die aktive Stabilisierungsmaßnahme erfolgt an der Deponie Blumentobel mit der Methode der **Übersaugung** (hier: INSPIRO-Verfahren). Bei dieser Art der in situ-Stabilisierung wird die Gasabsaugung so eingestellt, dass die pro Zeiteinheit entnommene Gasmenge das theoretisch im Deponiekörper gebildete Volumen deutlich übersteigt. Die Deponie gerät somit in Unterdruck. Das hat zur Folge, dass passiv Umgebungsluft in den Deponiekörper hineingesaugt und dieser von außen nach innen aerobisiert wird. Das abgesaugte Gas hat nur einen relativ geringen Brennwert und wird mit geeigneten Verfahren verbrannt. Hier erfolgt die Umwandlung in CO<sub>2</sub> über eine flammenlose Oxidation.

Die meteorologischen und topographischen Bedingungen wurden im Auswahlzeitraum als „vermutlich geeignet“ eingestuft, was sich bei den Messungen im Prinzip auch bestätigt hat. Rückblickdaten für den Standort geben eine mittlere Windgeschwindigkeit von 1,5 m/s bis 2,5 m/s bei einer mittleren Windrichtung von Süd an. Bezüglich der topographischen Situation vor Ort, lässt sich aus Geobasisdaten herauslesen, dass der höchste Punkt der Deponie Blumentobel etwa 32 m über dem niedrigsten liegt, dass die Deponie dementsprechend eine längliche haufenförmige Erhöhung darstellt. Aus Luftbildern lässt sich herauslesen, dass auf der relevanten Deponiefläche im nördlichen Bereich Buschwerk wächst. Im südlichen Teil befindet

sich die aktive Erdablagerungsfläche. Westlich der Deponie ist Wald zu erkennen mit zum Teil höherem Baumbestand. Östlich der Deponie befindet sich ein Wacholderhang bzw. eine Streuobstwiese mit lockerem Bewuchs. Die größte Ausdehnung beträgt in Nord-Süd-Richtung 400 m bis 800 m. Hier ist die maximale Ausdehnung davon abhängig, ob die Erdaushubdeponie im südlichen Bereich zum Deponiekörper hinzugezählt wird oder nicht. Die maximale Ausdehnung in Ost-West-Richtung beträgt etwa 200 m. Bei einer zu erwartenden Windrichtung aus südlicher Richtung, müsste die Messstrecke also nur die Ost-West-Richtung abdecken, was im Bereich des Möglichen für die angebotene Messtechnik liegt. Für die Aufstellung eines Anemometers muss eine möglichst wenig bewachsene Stelle gefunden werden, die von allen drei Seiten ohne Hindernis vom Wind frei anströmbar sein muss. Im Idealfall befindet sich der Aufstellungsort des Anemometers im Lee der Quelle, um etwaige Verwirbelungen durch die Quelle mit zu erfassen um diese bei der Modellierung beachten zu können. Trotz des vielen und zum Teil hohen Bewuchses wurde die Zugänglichkeit und Befahrbarkeit der Wege auf der Deponie in der Planungsphase als „gut“ eingestuft.

Eine detaillierte Betrachtung der in der Planungsphase erhobenen Daten und deren Verwendung in der Messplanung erfolgt in Kapitel 3.2.

### 3.1.6 Vergleich der ausgewählten Deponien

Zur Erreichung des Projektziels sollen zwei Deponien ausgewählt werden, an denen die in-situ-Stabilisierung mit verschiedenen Methoden durchgeführt wird. Um einen Effekt der Stabilisierungstechnik auf den Übergang von Methan in die Atmosphäre erkennen zu können, sollten sich die beiden Deponien in allen anderen maßgeblichen Bereichen möglichst ähnlich sein. Einen Vergleich der Daten zeigt Tabelle 2:

**Tabelle 2: Datenvergleich der ausgewählten Deponien**

	<b>Deponie Blumentobel („Übersaugung“)</b>	<b>Deponie Dibbersen („Druck-Saug-Belüftung“)</b>
Deponieklasse/Abfallart	DK 2 / Siedlungsabfälle, gemischt	DK 2 / Siedlungsabfälle, gemischt
Deponiefläche und -volumen	8,7 ha; 2,13 Mio. m <sup>3</sup>	8,5 ha; 2 Mio. m <sup>3</sup>
Deponiephasen seit	Betriebsphase 1974 Stilllegungsphase 2002 Nachsorgephase 2002	Betriebsphase 1982 Stilllegungsphase 1993 Nachsorgephase 1994
Oberflächenabdichtung	Mineralische Dichtung und KDB	Mineralische Dichtung
Entgasung	Aktive Entgasung, FLOX-Brenner zur Schwachgasbehandlung	Aktive Entgasung, RTO zur Schwachgasbehandlung

Die beiden Deponien sind sich bei vielen Parametern sehr ähnlich. Insbesondere Abfallvolumen und Deponiefläche sind gut vergleichbar. Die KDB in der Abdichtung bei der Deponie Blumentobel ist allerdings ein deutlicher Unterschied der prinzipiell eine Auswirkung auf die diffusen Methanemissionen hat. Da die Messungen jedoch bei gut funktionierender Absaugung durchgeführt werden müssen, sollten beide Deponiekörper im Unterdruck sein. Der Effekt der KDB wäre dann vernachlässigbar.

## 3.2 Arbeitspaket 2 – Planung und Durchführung von Messungen sowie Auswertung der Messergebnisse

### 3.2.1 Details zur Messung und der verwendeten Messtechnik

#### 3.2.1.1 Grundsätzliches

Grundsätzlich bestehen mehrere Möglichkeiten diffusen Emissionen an einer Flächenquelle zu ermitteln. Gemäß dem Forschungsauftrag soll die Quantifizierung der Methanemissionen durch Fernerkundung erfolgen. Nach DIN 18716 [2017] versteht man darunter „Die Gesamtheit der Verfahren zur Gewinnung von Informationen von entfernten Objekten ohne direkten Kontakt mit diesen...“. Da auf einer Deponiefläche kein messbarer Volumenstrom vorhanden ist, braucht es neben **geeigneten Konzentrationsmessgeräten** (Kapitel 3.2.1.2) weitere Verfahren, um einen Massenstrom an Methan zu ermitteln. Prinzipiell stehen dazu zwei Verfahren zur Wahl, die hier beide zur Anwendung kommen:

- ▶ Die **Inverse Dispersionsmodellierungsmethode (IDMM)** mit computerbasierter rückwärtsgerichteter Lagrange'scher Ausbreitungsmodellierung bei der ausgehend von am Untersuchungsobjekt ermittelten Konzentrationen und kleinskaligen meteorologischer Daten der Massenstrom mathematisch modelliert wird (siehe 3.2.1.3)

und die

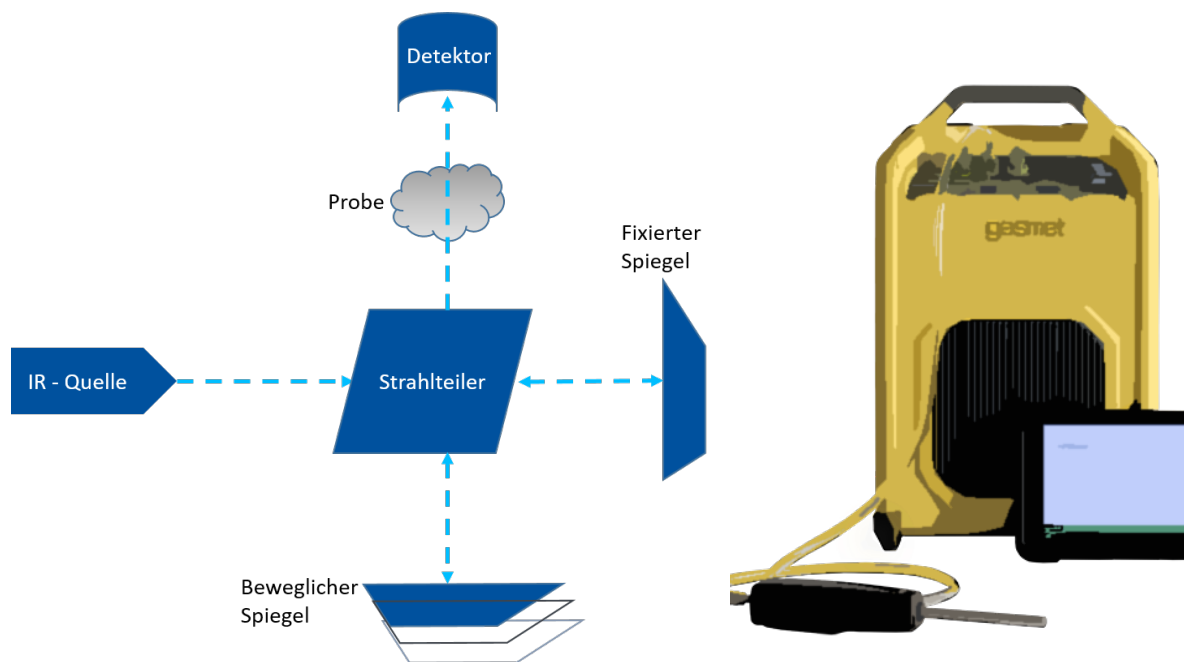
- ▶ **Tracer-Methode**, bei der am Untersuchungsobjekt ein Tracer-Gas mit bekanntem Massenstrom freigesetzt und die Konzentrationen von Tracer-Gas und Emittent gemessen werden. Durch einfache Berechnungen kann damit der gesuchte Volumenstrom der Emissionen ermittelt werden (siehe 3.2.1.4).

#### 3.2.1.2 Konzentrationsermittlung mittels beweglicher Infrarot-Spektrometrie

Für die anstehende Messaufgabe an einer Deponieoberfläche kann nur ein Messgerät eingesetzt werden, das mit ausreichender Genauigkeit im Bereich der ubiquitären Hintergrundkonzentration von Methan (ca. 1,9 ppm) analysiert. Aufgrund der chemischen Eigenschaften von Methan bietet sich hier die Infrarot-Absorptionsspektrometrie an.

Eine besonders effiziente und präzise Analytik ist mit der Variante des **Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometers (FTIR)** vorhanden. Solche Analysatoren können inzwischen sehr kompakt gebaut werden und sind somit tragbar und flexibel einsetzbar.

**Abbildung 3: Prinzip der Konzentrationsmessung mit dem FTIR-Analysator.**

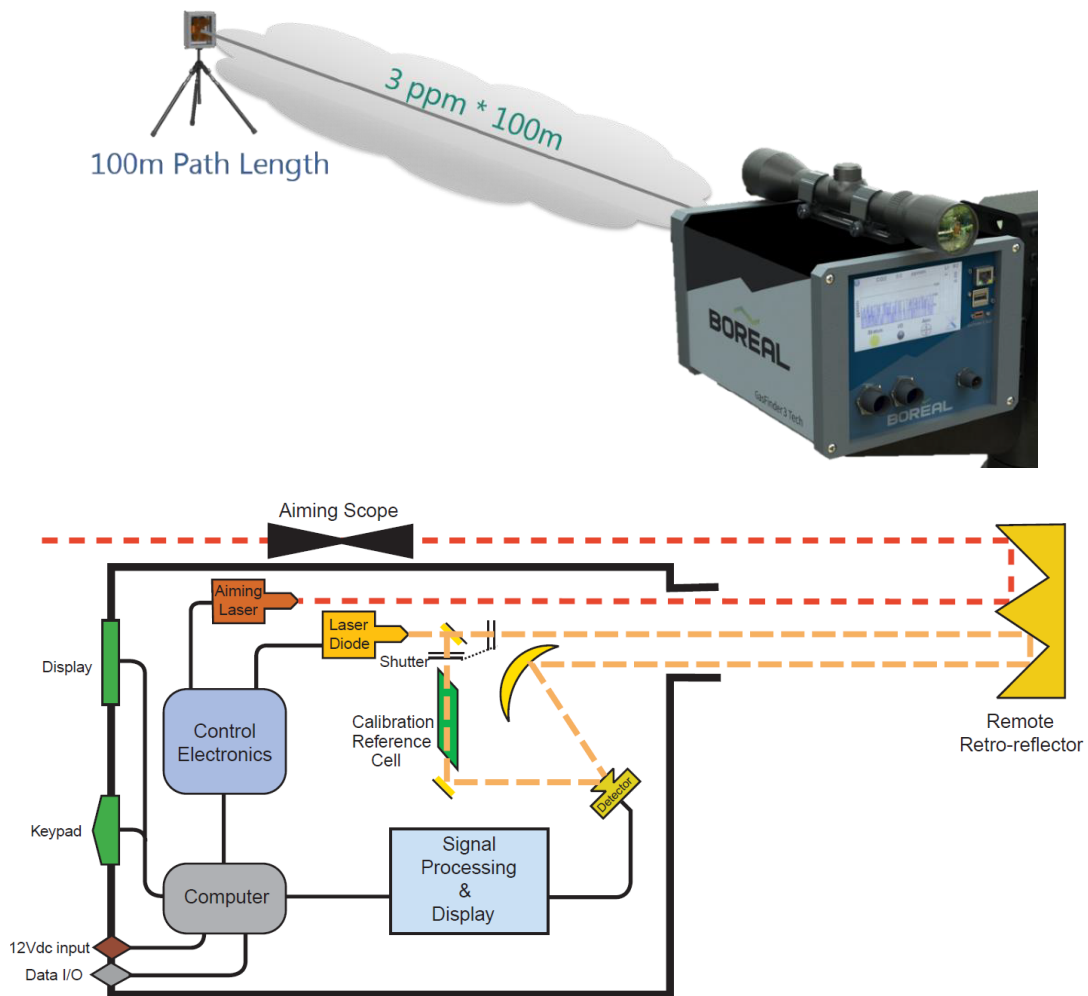


Quelle: links: eigene Darstellung, Universität Stuttgart; rechts: gasmet technologies.

Die verwendete mobile FTIR-Technik besteht aus dem tragbaren FTIR GT5000 Terra der Firma Gasmet in Kombination mit einem je nach Messsituation zu wählenden Vehikel. Das FTIR erstellt mit einer Frequenz von 10 Hz ein vollständiges Infrarot-Spektrum aller im Analysegas vorhandener IR-aktiver Moleküle. Die Identifikation und Quantifizierung von bis zu 50 einzelnen Substanzen ist so möglich. Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau. Der Strahlteiler, der bewegliche und der fixierte Spiegel bilden zusammen das Interferometer. Durch den beweglichen Spiegel wird ein Phasenunterschied der beiden Strahlenteile erzeugt. Bei ihrer Rekombination am Strahlteiler variiert die IR-Intensität mit der Position des beweglichen Spiegels. Der Detektor nimmt ein Signal über die Zeit und damit der Spiegelposition auf. Der bewegliche Spiegel ändert seine Position mit konstanter Geschwindigkeit. Das Signal, das der Detektor aufnimmt, und das IR-Spektrum können über eine Fourier-Transformation ineinander umgerechnet werden. Die Fourier-Transformation stellt eine mathematische Operation dar, bei der eine zeitabhängige Funktion in eine frequenzabhängige Funktion überführt wird. Ergebnis dieser Transformation ist das Detektor-Signal als Funktion der Frequenz des IR-Lichts. Bei Eingabe einer Probe zwischen das Interferometer und den Detektor wird ein Absorptionsspektrum des Probengases ermittelt. Identifikation und Quantifizierung der Gase in der Probe werden aus dem Absorptionsspektrum berechnet. [Gasmet Technologies Oy, 2020]

Das Ziel, eine möglichst hoch aufgelöste Messung von Hintergrund und immissionsseitiger Konzentration ist aber auch mit ortsfesten Analysatoren erreichbar, die über eine offene Wegstrecke mittels eines IR-Lasers die Methanabsorption „aufsummieren“. Nach dieser Methode arbeitet die **TDLAS-Technik (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)**, bei der keine Probenluft zur Analyse eingesaugt werden muss, wie dies bei der FTIR-Technik notwendig ist (siehe Abbildung 4). Aufgrund des Messprinzips eignet sich die TDLAS für sehr niedrige Konzentrationen noch besser als das FTIR. Daher wird sie hier als Vergleich oder Referenz ebenfalls eingesetzt.

Abbildung 4: Prinzip der Konzentrationsmessung mit dem TDLAS-Analysator.



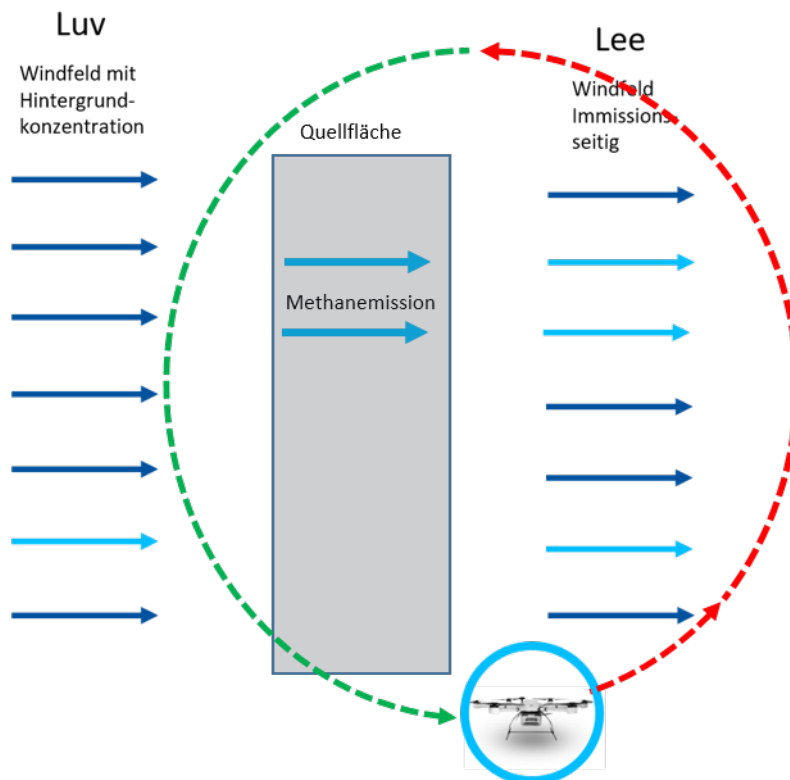
Quelle: Boreal Laser Inc.

Im Projekt kommen zwei TDLAS-Analysatoren vom Typ GasFinder der Boreal Laser Inc. zum Einsatz. Damit können theoretisch Messstrecken bis zu 1.000 m vermessen werden, wobei Sichtkontakt zwischen Sender und Reflektor bestehen muss. Dieser ist auf Deponien oft durch die Deponieform oder den Bewuchs sehr eingeschränkt zumal nur lineare Strecken verwendbar sind. Beim FTIR bestehen diese Einschränkungen nicht in dem Maße.

Der FTIR-Analysator kann immer für Punkt-Messungen eingesetzt und je nach Situation vor Ort mit unterschiedlichen Vehikeln bewegt und zur Linienmessung verwendet werden: Die innovativste Transportmethode ist in diesem Fall ein Flugrobotersystem (UAV), also eine Schwerlast-Drohne mit deren Hilfe der Analysator auch dreidimensional bewegt werden kann. Die höhere Flexibilität bei der Gestaltung von Messstrecken ermöglicht neben der Zugänglichkeit von unwegsamem Gelände auch die Verwendung von nicht linearen Messstrecken wie beispielsweise Runden um eine Quellfläche. Das Umrunden des Deponiekörpers hat den Vorteil der quasikontinuierlichen Hintergrundkonzentrationserfassung bei jeder Runde. Mit einem FTIR-Analysator kann auch nach der Tracer-Methode gearbeitet werden. Anders als ein TDLAS das durch die fixe Wellenlänge des Lasers immer auf eine Komponente festgelegt ist, lassen sich, wie oben beschrieben, eine große Anzahl an Komponenten gleichzeitig quantifizieren.

Abbildung 5 zeigt eine mögliche Messstrecke zur Konzentrationserfassung mittels FTIR. Die Hintergrundkonzentration wird hier bei jeder Umrundung miterfasst. Neben der Technik des Umrundens der Emissionsfläche („fence-line monitoring“) besteht weiterhin die Möglichkeit lineare und nichtlineare Messstrecken in Luv und Lee der Quelle zu definieren und das FTIR über diese zu bewegen.

**Abbildung 5: Prinzip der FTIR-Messung für die IDMM am Beispiel der Umfliegung der Quellfläche mit einem UAV als Vehikel**



Quelle: eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

Je nach Topografie und vorhandenen Wegen kann zur Bewegung des FTIR ein Vehikel gewählt werden, das bei den jeweiligen Gegebenheiten die besten Resultate verspricht. Erprobt wurden hierfür schon das Auto, die Drohne und die menschlichen Beine (siehe Abbildung 6). Ein Vorteil des Autos und des Menschen als Vehikel ist die längere Messdauer im Vergleich zur Drohne. Ein UAV das die nötige Leistung zur Beförderung des Analysators aufbringen kann, der ca. 10 kg wiegt, kann mit den derzeit verfügbaren Akkus nur zwischen 10 und 15 Minuten in der Luft bleiben. Damit wird die Möglichkeit zur wiederholten Vermessung einer Strecke vor allem im Vergleich zum Auto stark limitiert. Andererseits bietet ein fliegendes FTIR den großen Vorteil, dass in größerem Abstand zum Boden und in unterschiedlichen Höhen gemessen werden kann. Dies kann insbesondere bei Haufendeponien mit dunklen Abschattungen bei Sonnenschein von Vorteil sein.

**Abbildung 6: Bisher erprobte und mögliche Vehikel für den Transport des FTIR entlang unterschiedlicher Messstrecken zur Konzentrationsermittlung**



Quelle: eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

Einige der Vor- und Nachteile der verschiedenen Vehikel wurden bereits genannt. Grundsätzlich ist diejenige Methode zu bevorzugen, die eine möglichst lange Messdauer bietet, da diese im Fall des FTIR gleichbedeutend ist mit einer hohen Anzahl von Messpunkten pro Strecke und damit einer höheren Messgenauigkeit. Wenn also, wie im Fall der Deponien Blumentobel und Dibbersen geeignete Lauf- und Fahrwege vorhanden sind, kann das UAV seine Vorteile nicht ausspielen und wurde daher bei diesen Messungen nicht eingesetzt.

### 3.2.1.3 Ermittlung der Emissionsrate mittels IDMM

Auf Basis der im Luv und Lee der Flächenquelle gemessenen Methan-Konzentrationen (vgl. Abbildung 5) erfolgt hier die rückwärtsgerichtete Lagrange'sche Ausbreitungsmodellierung, die sich bereits seit langem für diese Art der Simulation bewährt hat [Flesch und Wilson, 1995]. Eine dazu geeignete Software ist das Computerprogramm WindTrax 2.0 (V 2.0.9.7 vom 05.11.2020) von Thunderbeach Scientific. WindTrax ist eine graphische Umgebung zur Vorhersage turbulenter Ausbreitung von Spurengasen [Crenna, 2017]. In Abbildung 7 ist die Rückrechnung mit WindTrax aus der  $\text{CH}_4$ -Hintergrundkonzentration, meteorologischen Parametern und der immissionsseitig erfassten  $\text{CH}_4$ -Konzentration auf die Emissionsrate gezeigt. Die meteorologischen Parameter werden bei jeder Messung mit Hilfe eines 3D-Ultraschall-Anemometers (uSonic-3 Scientific der Firma METEK GmbH, Elmshorn) mit einer Frequenz von 10 Hz erfasst. Dazu gehören die drei Windkomponenten  $u$ ,  $v$  und  $w$  in m/s und die Temperatur in °C. Das 3D-USA wird nach Möglichkeit auf oder im Lee der Quelle positioniert, um alle Verwirbelungen des Windfelds möglichst gut mit aufzunehmen. Alle für die Modellierung notwendigen Parameter sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

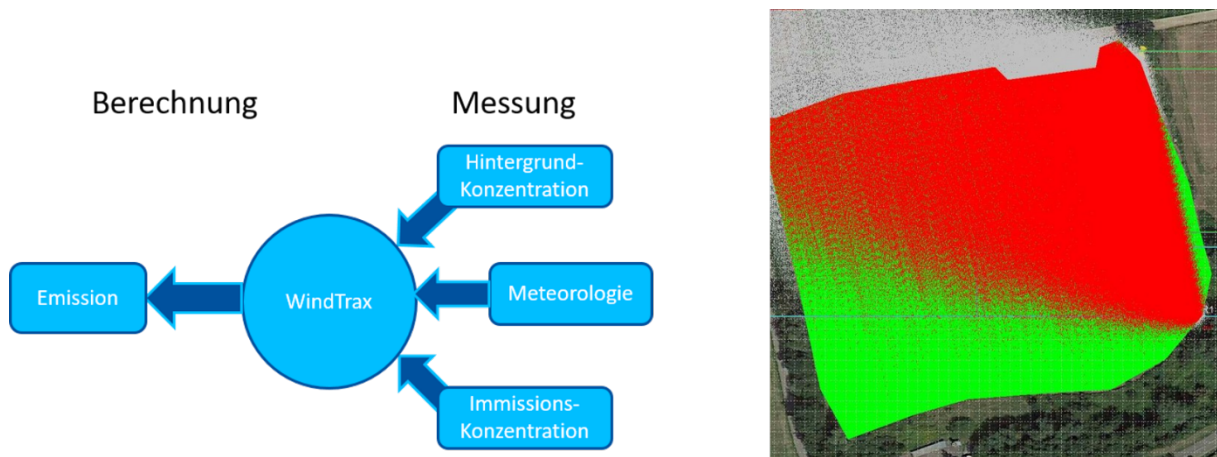
**Tabelle 3: Weitere benötigte Informationen für die Modellierung in WindTrax**

	Einheiten
Windrichtung $\theta$	Grad
Monin-Obukhov Länge MO	m
Oberflächenrauigkeit $z_0$	m
Reibungsgeschwindigkeit $u^*$	m/s

	Einheiten
Windgeschwindigkeit	m/s
Luftdruck p	hPa
Temperatur T	°C
Höhe Messgerät	m
Konzentrationen	ppm bzw. ppmm

In Abbildung 7 ist sowohl das theoretische Vorgehen bei der IDMM in Form eines Flussdiagramms als auch die grafische Umsetzung im Computerprogramm gezeigt. Bei der rechten Abbildung stellt die grüne Fläche die Emissionsfläche dar. Die roten Punkte repräsentieren die zurückverfolgten Partikel oder Moleküle.

**Abbildung 7: Flussdiagramm zum Vorgehen bei der IDMM (links) und Darstellung der Partikelfreisetzung während der Modellierung (rechts)**



Quelle: links: eigene Darstellung, Universität Stuttgart; rechts: GoogleEarthPro.; Thunder Beach Scientific (WindTrax 2.0).

Mit diesen Informationen berechnet WindTrax über die Zurückverfolgung von 50 000 Partikeln, die an 30 Punkten der Messstrecke freigesetzt werden, wie viele Partikel eine Berührung mit der Oberfläche innerhalb des definierten Bereichs der Emissionsfläche hatten. Diese Partikel werden zur Emissionsberechnung herangezogen.

Aus der Emissionsrate, typischerweise in der Einheit  $\text{mg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ , wird durch die Multiplikation mit der für die Modellierung angegebenen Fläche die Emission der aktiven Fläche in  $\text{mg}/\text{s}$  berechnet. Bei Messungen, bei denen von einer annähernden Homogenität der Emissionen über die gesamte Quellfläche auszugehen ist, wird die Emissionsrate mit der Gesamtfläche multipliziert und so die Gesamtemission der Deponie ermittelt.

Emissionsraten, die mit dieser Methode bestimmt wurden, sind in den Ergebnis-Tabellen je nach verwendeter Konzentrationsmessung mit „IDMM-FTIR“ oder „IDMM-TDLAS“ bezeichnet.

### 3.2.1.4 Emissionsratenquantifizierung mittels Tracer-Methode

Diese Methode stellt eine Alternative zur Modellierung des Massenstroms dar. Wird auf der Deponiefläche eine künstliche Quelle für ein „unbeteiligtes“ Gas mit bekanntem Massenstrom installiert, kann über einen Dreisatz der Methan-Massenstrom berechnet werden.

Als Tracer wurden bisher mit gutem Erfolg Lachgas (N<sub>2</sub>O) und Ethin (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) verwendet. Das Gas sollte möglichst inert und nicht Bestandteil des Deponiegases sein. Weiterhin sollte die Dichte und das Ausbreitungsverhalten Deponiegases möglichst ähnlich sein. Lachgas erfüllt diese Voraussetzungen sehr gut, aufgrund seiner klimaschädlichen Wirkung wird es jedoch zukünftig durch Ethin ersetzt.

Nach der Ermittlung der Konzentrationen von Methan und einem Tracer-Gas (mittels FTIR) über Punkt- oder Linienmessungen kann auch die Tracer-Methode zur Ermittlung der Methan-Emissionsrate aus flächigen oder punktförmigen Quellen angewendet werden. Dabei wird aus der messtechnisch ermittelten Verdünnung des repräsentativ freigesetzten Tracers auf die Verdünnung des von der Deponieoberfläche emittierten Methans geschlossen. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

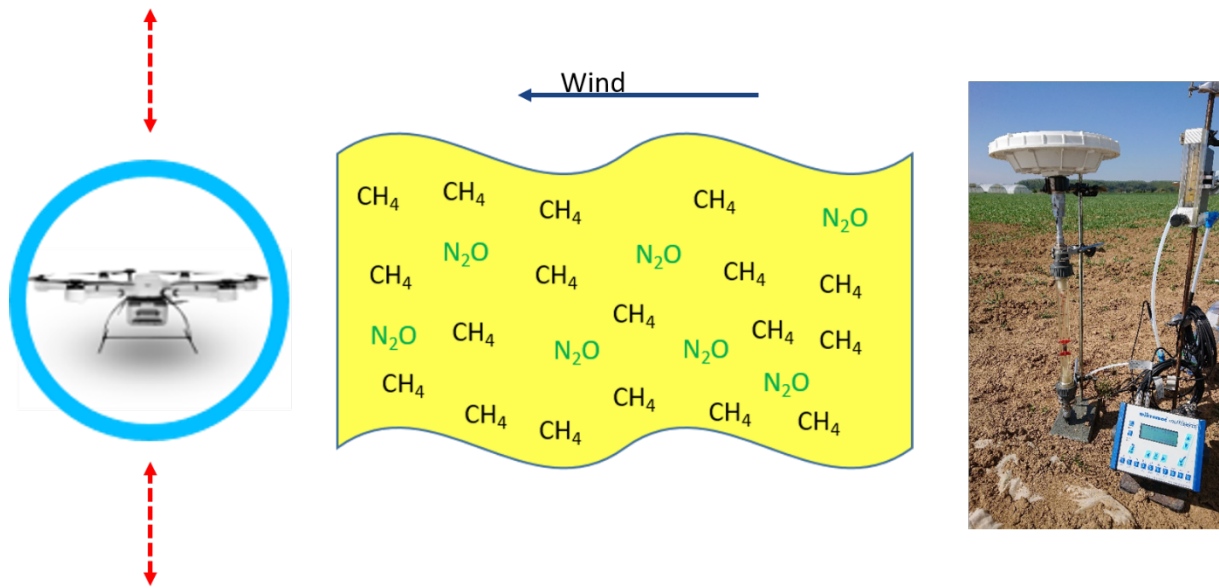
$$Q_M = \frac{c_M - c_{M, \text{Hintergrund}}}{c_{\text{Tracer}} - c_{\text{Tracer, Hintergrund}}} \cdot Q_{\text{Tracer}}$$

Die Parameter haben folgende Bedeutung:

$Q_M$	Zu errechnender Emissionsmassenstrom von CH <sub>4</sub> in Masse pro Zeit,
$c_M$	Gemessene CH <sub>4</sub> -Konzentration in ppm,
$c_{M, \text{Hintergrund}}$	Gemessene CH <sub>4</sub> -Hintergrundkonzentration in ppm,
$c_{\text{Tracer}}$	Gemessenen Konzentration des Tracer-Gases in ppm,
$c_{\text{Tracer, Hintergrund}}$	Gemessene Hintergrundkonzentration des Tracer-Gases in ppm,
$Q_{\text{Tracer}}$	Bekannter Freisetzungsmassenstrom des Tracers in Masse pro Zeit.

Messtechnische Voraussetzung ist hierfür die gleichzeitige Konzentrationsermittlung für das Tracer-Gas und CH<sub>4</sub>. Mithilfe des FTIR werden Tracer- und CH<sub>4</sub>-Konzentrationen zeitgleich ermittelt und der Mittelwert über den Erfassungszeitraum gebildet. Das FTIR wird über eine Strecke im Lee der Quelle bewegt, in Messintervallen von zwanzig Sekunden werden CH<sub>4</sub>- und Tracer-Konzentrationen bestimmt. Daraus wird über den Bewegungszeitraum ein Mittelwert mit der Einheit ppm gebildet. Die Freisetzung erfolgt mit Hilfe einer Quellkonfiguration, die aus einem Durchflussmesser, der für Luft bei einem Druck von 1 bar im Bereich 0 m<sup>3</sup> i.N./h bis 10 m<sup>3</sup> i.N./h hergestellt wurde und einem Diffusor mit einer Fläche von 573 cm<sup>2</sup> besteht. Der Messaufbau inklusive Quellkonfiguration ist in Abbildung 8 abgebildet. Die Quelle sollte so positioniert sein, dass sie einerseits weit genug von der Messstrecke entfernt ist, um eine homogene Durchmischung zwischen Emissionsgas (CH<sub>4</sub>) und Tracer-Gas zu gewährleisten. Andererseits sollte die Distanz nicht zu groß sein, damit eine Konzentrationsänderung messtechnisch nachweisbar ist.

**Abbildung 8: Messaufbau und Quellkonfiguration für die Emissionsratenquantifizierung mittels Tracer-Methode**



Quelle: eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

Aufgrund der Verwendung des beschriebenen Durchflussmessers wird es notwendig mittels Korrekturfaktoren die tatsächlich freigesetzte Gasmenge zu berechnen. Die Umrechnung ist in der folgenden Formel erläutert.

$$Q_{Tracer} = Q_{Luft} \cdot K_{\rho} \cdot K_T \cdot K_p$$

Für die Korrektur wird der angezeigte Wert des Durchflussmessers  $Q_{Luft}$  mit Hilfe der Korrekturfaktoren für Dichte, aktuellen Druck und aktuelle Temperatur ( $K_{\rho} = \sqrt{\frac{\rho_{Luft}}{\rho_{Tracer}}}$ ,  $K_p = \sqrt{\frac{p}{p_{kalibriert}}}$  und  $K_T = \sqrt{\frac{273+T_{kalibriert}}{273+T}}$ ) auf den Volumenstrom des freigesetzten Tracer-Gases umgerechnet.

### 3.2.1.5 Qualitätssicherung bei der IDMM durch die Berechnung einer Nachweisgrenze

Durch die Bestimmung der Nachweisgrenze (NWG) können die über die IDMM ermittelten Emissionsraten im Nachhinein hinsichtlich ihrer Aussagekraft bewertet werden. Die NWG gibt die Menge des zu ermittelnden Stoffes an, der qualitativ noch erfasst werden kann. In Anlehnung an DIN 32645 [2008] wird zunächst eine NWG der ermittelten Konzentration gemäß folgender Gleichung berechnet

$$c_{NWG} = \bar{c} + 3 \cdot c_{stabw, Hintergrund}$$

Dabei haben die Parameter folgende Bedeutung:

$c_{NWG}$	Die zu errechnende Konzentration der NWG in ppm,
$\bar{c}$	Mittelwert der gemessenen Hintergrundkonzentration in ppm,
$c_{stabw, Hintergrund}$	Standardabweichung der gemessenen Hintergrundkonzentration in ppm.

Das Ergebnis dieser Berechnung ist eine Konzentration in ppm, die der NWG entspricht. Um zu ermitteln welche Emission diesem Wert gleicht, wird der Mittelwert der Hintergrundkonzentrationen als Hintergrundkonzentration und die NWG multipliziert und mit der jeweiligen Messstrecke, als Immissionskonzentration für die Modellierung mit WindTrax verwendet. Das Ergebnis der Modellierung ist die NWG der Emissionsrate bei den am jeweiligen Messtag herrschenden meteorologischen Bedingungen. Liegt ein ermittelter Emissionswert unterhalb der NWG ist er nur noch eingeschränkt zu quantifizieren. Es kann nur eine qualitative Aussage getroffen werden, dass dieser Wert unterhalb der NWG liegt. Da die NWG auch die jeweilige Ausbreitungssituation berücksichtigt ist sie nicht mit einer „klassischen“ Messunsicherheit eines Messwerts zu verwechseln. Sie kann vielmehr als eine Art „Vertrauensbereich“ verstanden werden, ab dem die Quellstärke zuverlässig quantifiziert ist. Typischerweise ist die NWG hoch, wenn die Differenz zwischen Methankonzentration in Luv und Lee der Quelle gering ist und die Windsituation am Messtag ungünstig war (Windgeschwindigkeit zu niedrig o.ä.).

### **3.2.1.6 Auswertung der messtechnisch gesammelten Daten**

Die Auswertung der Daten erfolgt in 10 Minuten Intervallen. Dies liegt in der Ausbreitungsdynamik begründet. Bei der Wahl längerer Intervalle könnten kurzzeitige Schwankungen, die auch durch Windrichtungs- oder -stärkeänderungen begründet sein können, nicht mehr korrekt abgebildet werden. Bei kürzeren Intervallen besteht die Gefahr einer Missinterpretation der Messergebnisse durch die Überschätzung der meteorologischen Änderungen. Basis der Modellierung mit WindTrax sind somit für jeden einzelnen Parameter berechnete 10 Minuten Mittelwerte.

## **3.2.2 Planung der Vorgehensweise**

### **3.2.2.1 Grundsätzliches zur Planung der Vorgehensweise**

Aufgrund der verschiedenen Möglichkeiten bei der Analytik und der Berechnungsmethoden bedarfs es für die Ermittlung von Methanemissionen aus Deponieoberflächen einer guten Vorplanung. Vom Anlagenbetreiber sollten nach Möglichkeit alle relevanten Unterlagen zur Verfügung gestellt und alle Online-Quellen zur meteorologischen und topographischen Situation genutzt werden. Wichtig ist auch, die Funktionstüchtigkeit der technischen Einrichtungen zur in situ-Stabilisierung abzufragen. Für eine repräsentative Messung sollte die Entgasungsanlage im Zielzustand mindestens 2 Woche vor der geplanten Messung voll funktionstüchtig sein. Für die eigentliche Detailplanung der Messung müssen vorab folgende Fragen geklärt werden:

1. Bei welchen Windbedingungen kann auf welchen Messstrecken eine Konzentrationsermittlung erfolgen?
2. Welches Vehikel ist zum Transport des FTIR auf diesen Messstrecken am besten geeignet? (siehe 3.2.1.2)
3. Gibt es Sekundärquellen, die die Messung verfälschen können?
4. Wo soll das Anemometer positioniert werden? (siehe 3.2.1.3)
5. Soll die Tracer-Methode zum Einsatz kommen? (siehe 3.2.1.4)
  - a. Welche Menge von welchem Tracer-Gas soll freigesetzt werden?
  - b. An welcher Stelle soll das Tracer-Gas freigesetzt werden?
6. Soll zur Absicherung der Messergebnisse eine weitere Messtechnik (IDMM-TDLAS) zum Einsatz kommen? (siehe 3.2.1.2)

Die Fragen zum Tracer-Gas sind ohne Vorerkundung nur schwer zu beantworten. In der Regel sollte die Menge an freigesetztem Tracer-Gas in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie die geschätzte Menge des zu untersuchenden Emissionsgases (hier: Methan). Wenn die Deponiefläche nicht abschnittsweise untersucht werden soll, ist der Emissions-Massenstrom des gesamten Abfallinventars zu betrachten. Erfahrungsgemäß liegen Deponien in Größenordnung der beiden Messobjekte bei Gesamt-Emissionen von ungefähr 5 g CH<sub>4</sub>/s, allerdings in nicht stabilisiertem Zustand. Durch die Stabilisierung sollte die Emission deutlich gesenkt werden, so dass hier von etwa 1 g CH<sub>4</sub>/s bis 3 g CH<sub>4</sub>/s ausgegangen werden sollte [Elpelt-Wessel, 2022].

Bezüglich der Fragen zur „Absicherung“ gilt es eine Grundsatzentscheidung zu treffen, die nach Meinung der Autor\*innen nur zu Gunsten der Sicherung der Qualität der Messergebnisse getroffen werden kann. Somit wird, bei ausreichender Verfügbarkeit von Personal immer angestrebt mit dem Tracer zu arbeiten und parallel zum FTIR TDLAS-Messungen durchzuführen, da diese Messtechnik länger erprobt ist.

### **3.2.2.2 Vorgehensweise an der Deponie Blumentobel**

Mit den verfügbaren Informationen wurde die Detailplanung gemäß 3.2.2.1 durchgeführt. Es konnten geeignete Messpunkte und -linien im Luv und Lee der Deponie für verschiedene, vor Ort vorherrschende Windrichtungen identifiziert werden (die mittlere Jahreswindrichtung ist „Süd“). Bei einer Vorort-Erkundung wurde festgestellt, dass diese Strecken auf steilen, aber gut befahrbaren Wegen liegen. Bei winterlichen Verhältnisse wäre jedoch mit Schwierigkeiten zu rechnen. Als Vehikel wurde somit auf dieser Deponie, auch auf Grund ihrer Ausdehnung und Topografie das Auto (oder etwas Vergleichbares) vorgesehen. Ein Transport des FTIR mittels UAV kam auch aufgrund des Bewuchses mit Bäumen und der dadurch eingeschränkten Sichtverhältnisse nicht in Betracht.

Mögliche Positionen zur Aufstellung des USA und der Quelle für den Tracer wurden auf dem Satellitenbild ebenfalls festgestellt, die letztendliche Position wird aber von den Bedingungen am Messtag abhängig gemacht. Sekundärquellen wurden nicht gefunden.

Unterlagen zu FID-Begehungen liegen nicht vor, daher war in der Planung keine Berücksichtigung eventuell bekannter Hotspots möglich.

### **3.2.2.3 Vorgehensweise an der Deponie Dibbersen**

Die mittlere Jahreswindrichtung wurde aus den vorhandenen Daten als Süd-West erkannt. Auf dieser Basis konnten geeignete Messlinien und -punkte für Messungen mittels FTIR und TDLAS in Luv und Lee der Fläche ermittelt werden. Die Frage nach der Befahrbarkeit, der im Sattelitenbild erkennbaren Wege in Herbst und Winter konnte nicht eindeutig geklärt werden. Das bevorzugte Vehikel war daher zunächst das UAV, auch wenn damit auf Grund der kurzen Flugzeit nur eine eingeschränkte Anzahl an Messpunkte aufgenommen werden können (siehe 3.2.1.2). Aus technischen Gründen mussten die Messungen jedoch bis in den Sommer verschoben werden, so dass auch hier das Auto und der Mensch für den FTIR-Transport eingesetzt werden konnten. Für das Ultraschallanemometer (USA) und die Quelle des Tracer-Gases wurden geeignete Aufstellpunkte anhand des Luftbilds identifiziert. Ein nahe gelegener Gasspeicher und der Kamin der RTO (wegen Methanschluß) wurden als mögliche Sekundärquellen ausgemacht. Bei der zu erwartenden Windrichtung liegen diese jedoch außerhalb des Messbereichs und wurden daher als unkritisch für die Messung bewertet.

### 3.2.3 Durchführung und Ergebnisse der Messungen an der Deponie Blumentobel

#### 3.2.3.1 Meteorologische Gegebenheiten

Die Messungen an der Deponie Blumentobel wurden am 29.11.2022 und am 22.12.2022 durchgeführt. An beiden Tagen war die Deponie schneefrei und es herrschten leichte Plusgrade. Bei beiden Messungen wurde sowohl die bodenbasierte statische TDLAS-Technik als auch das bodenbasierte mobile FTIR im Auto eingesetzt. In Tabelle 4 sind die meteorologischen Randbedingungen für beide Messtage an der Deponie Blumentobel aufgelistet.

**Tabelle 4: Meteorologische Daten an den Messtagen 29.11.2022 und 22.12.2022, Deponie Blumentobel**

	29.11.2022	22.12.2022
Ø Windgeschwindigkeit in m/s	1,4 *	5,6
Ø Windrichtung in °	274 (West)	240 (WSW)
Ø Luftdruck in hPa	969	962
Ø Temperatur in °C	7,8	11,7

\* die Prognose für den 29.11. war deutlich höher. Vor Ort wurde entschieden, dass die Messung auch bei dieser Windgeschwindigkeit sinnvoll durchgeführt werden kann

#### 3.2.3.2 Durchführung und Ergebnisse der Messung am 29.11.2022

Am 29.11.2022 wurden für die TDLAS-Messtechnik zwei Messstrecken verwendet, ebenso für die FTIR-Messtechnik. In Tabelle 5 sind die Messstrecken, die mit der FTIR- und TDLAS-Messtechnik verwendet wurden mit den jeweiligen Längen und einer örtlichen Beschreibung dargestellt.

**Tabelle 5: Definition und Beschreibung der verwendeten Messstrecken am 29.11.2022, Deponie Blumentobel**

Bezeichnung	Länge in m	Beschreibung
MS 1 FTIR	125	Dem nordöstlichen Randweg um die Ecke folgend
MS 2 FTIR	283	Auf dem östlichen Randweg der Deponie
MS 1 TDLAS	157	Nördlich der Deponie
MS 2 TDLAS	174	Östlich der Deponie

In Abbildung 9 ist das Luftbild mit den verwendeten Messstrecken gezeigt. Zudem sind die Positionen des USA und der Quelle eingezeichnet. Als Tracer wurde Lachgas mit einem Volumenstrom von 1,3 m<sup>3</sup>/h freigesetzt. Dies entspricht gemäß der Umrechnung (Kap. 3.2.1.4) einer Quellstärke von 0,66 g/s. Die Messstrecken für das TDLAS erstrecken sich jeweils zwischen den Markierungen für Reflektor (RF) und Messgerät (GF).

**Abbildung 9: Luftbild der Deponie Blumentobel mit den Positionen des USA und der Quelle, sowie den Messstrecken für FTIR (blaue und gelbe Linie) und TDLAS (jeweils zwischen den gelben Markierungen) und der Windrichtung (hellblauer Pfeil) am 29.11.2022**



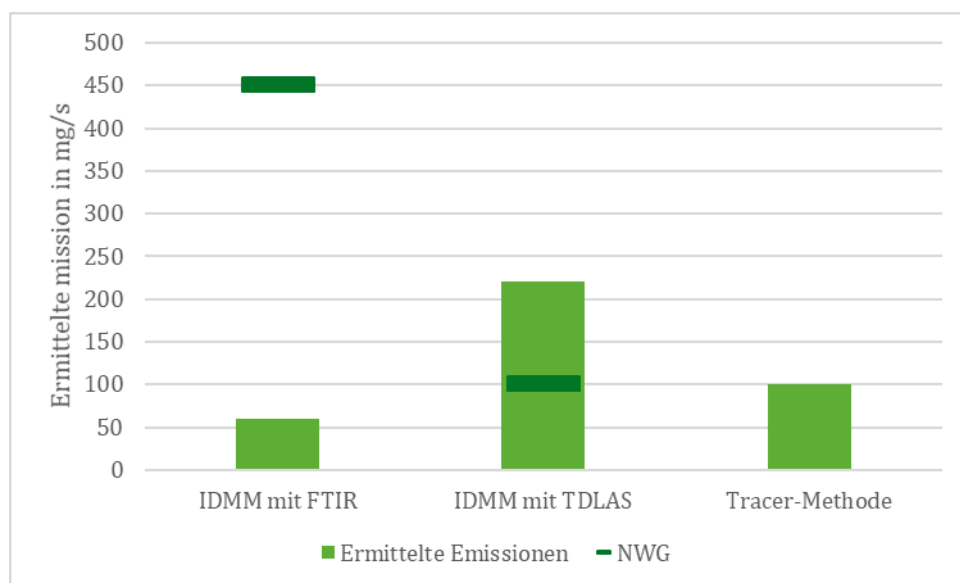
Quelle: GoogleEarthPro.; Markierungen: eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

In Tabelle 6 und Abbildung 10 sind die Ergebnisse der Emissionsquantifizierung der Messung vom 29.11.2022 gezeigt. Für die IDMM, basierend auf den TDLAS-Daten liegt die mittlere ermittelte Emission bei 220 mg/s, die NWG liegt mit 100 mg/s darunter. Die mit Hilfe der IDMM, basierend auf den FTIR-Daten ermittelte Emission beträgt im Mittel 60 mg/s, die NWG liegt hier bei 450 mg/s. Auf Grundlage der FTIR-Daten berechnete Tracer-Methode liegt mit 100 mg/s zwischen den IDMM-Ergebnissen.

**Tabelle 6: Messergebnisse der in Abbildung 9 dargestellten Strecken am 29.11.2022, Deponie Blumentobel**

Messmethode	Messergebnis in mg/s	Nachweisgrenze in mg/s	Emission in l/m <sup>2</sup> h	Emission in m <sup>3</sup> /h
IDMM mit TDLAS	220	100	0,01	0,9
IDMM mit FTIR	60	450	0,004	0,3
Tracer-Methode	100		0,01	0,9

**Abbildung 10: Ergebnis der Emissionsquantifizierung am 29.11.2022 an der Deponie Blumentobel für die Konzentrationserfassung mit FTIR und TDLAS**



Quelle: eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

### 3.2.3.3 Durchführung und Ergebnisse der Messung am 22.12.2022

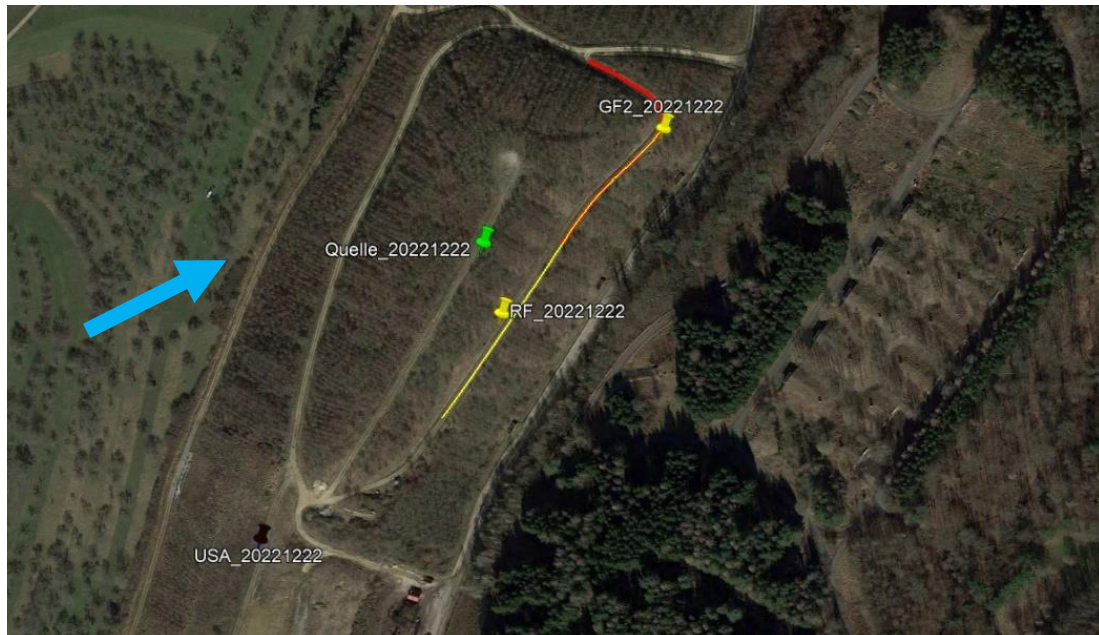
Am 22.12.2022 wurde für die TDLAS-Messtechnik *eine* Messstrecke verwendet. Mit der FTIR-Messtechnik wurden zwei Messstrecken genutzt. In Tabelle 7 sind die Messstrecken, die mit der FTIR- und TDLAS-Messtechnik verwendet wurden mit den jeweiligen Längen und einer örtlichen Beschreibung dargestellt.

**Tabelle 7: Definition und Beschreibung der verwendeten Messstrecken am 22.12.2022, Deponie Blumentobel**

Bezeichnung	Länge in m	Beschreibung
MS 1 FTIR	234	Dem nordöstlichen Randweg um die Ecke folgend
MS 2 FTIR	174	Auf dem östlichen Randweg der Deponie
MS TDLAS	162	Östlich der Deponie

In Abbildung 11 ist das Luftbild mit den verwendeten Messstrecken gezeigt. Zudem sind die Positionen des USA (schwarze Markierung) und der Quelle (grüne Markierung) eingezeichnet. Als Tracer wurde Lachgas mit einem Volumenstrom von  $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$  freigesetzt. Dies entspricht gemäß der Umrechnung (Kap. 3.2.1.4) einer Quellstärke von  $0,66 \text{ g/s}$ . Die Messstrecken für das TDLAS erstrecken sich jeweils zwischen den Markierungen für Reflektor (RF) und Messgerät (GF). Für das FTIR wurden, wie in Tabelle 7 beschrieben zwei Messstrecken verwendet, zunächst MS1-FTIR (rot), danach MS2-FTIR (gelb).

**Abbildung 11: Luftbild der Deponie Blumentobel mit den Positionen des USA und der Quelle, sowie den Messstrecken für FTIR (rote und gelbe Linie) und TDLAS (zwischen den gelben Markierungen) und der Windrichtung (hellblauer Pfeil) am 22.12.2022**



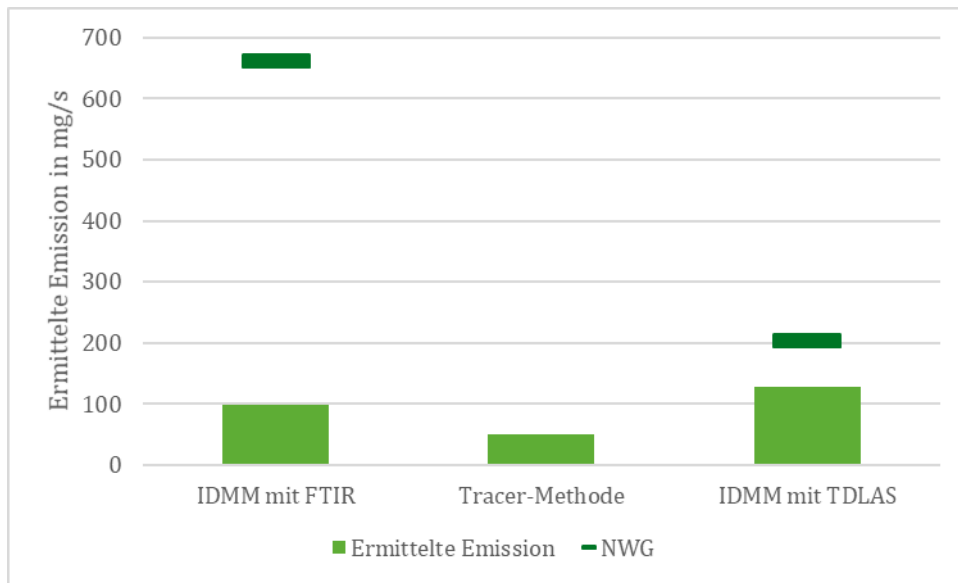
Quelle: GoogleEarthPro.; Markierungen: eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

In Tabelle 8 und Abbildung 12 sind die Ergebnisse der Emissionsquantifizierung der Messung vom 22.12.2022 gezeigt. Für die IDMM, basierend auf den TDLAS-Daten liegt die mittlere ermittelte Emission bei 130 mg/s, die NWG liegt mit 200 mg/s darüber. Die mit Hilfe der IDMM, basierend auf den FTIR-Daten ermittelte Emission beträgt im Mittel 100 mg/s, die NWG liegt hier bei 660 mg/s. Auf Grundlage der FTIR-Daten berechnete Tracer-Methode liegt mit 50 mg/s deutlich unter den Ergebnissen der IDMM.

**Tabelle 8: Messergebnisse der in Abbildung 11 dargestellten Strecken am 22.12.2022, Deponie Blumentobel**

Messmethode	Messergebnis in mg/s	Nachweisgrenze in mg/s	Emission in l/m <sup>2</sup> h	Emission in m <sup>3</sup> /h
IDMM mit TDLAS	130	200	0,008	0,7
IDMM mit FTIR	100	660	0,006	0,5
Tracer-Methode	50		0,003	0,3

**Abbildung 12: Ergebnis der Emissionsquantifizierung am 22.12.2022 an der Deponie Blumentobel für die Konzentrationserfassung mit FTIR und TDLAS**



Quelle: eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

### 3.2.4 Durchführung und Ergebnisse der Messungen an der Deponie Dibbersen

#### 3.2.4.1 Meteorologische Gegebenheiten

Die Messungen an der Deponie Dibbersen wurden am 31.05.2023 und am 27.06.2023 durchgeführt. An beiden Tagen herrschten sommerliche Temperaturen. Bei beiden Messungen wurde sowohl die bodenbasierte statische TDLAS-Technik als auch das bodenbasierte mobile FTIR – Messung mit und ohne Tracer eingesetzt. In Tabelle 9 sind die meteorologischen Randbedingungen für beide Messtage an der Deponie Dibbersen aufgelistet.

**Tabelle 9: Meteorologische Eckdaten an den Messtagen 31.05.2023 und 27.06.2023, Deponie Dibbersen**

	31.05.2023	27.06.2023
Ø Windgeschwindigkeit in m/s	2,0	3,2
Ø Windrichtung in °	350 (NNW), kurzzeitig auch 15 (NNO)	284 (West)
Ø Luftdruck in hPa	1017	1007
Ø Temperatur in °C	20,1	19,0

#### 3.2.4.2 Durchführung und Ergebnisse der Messung am 31.05.2023

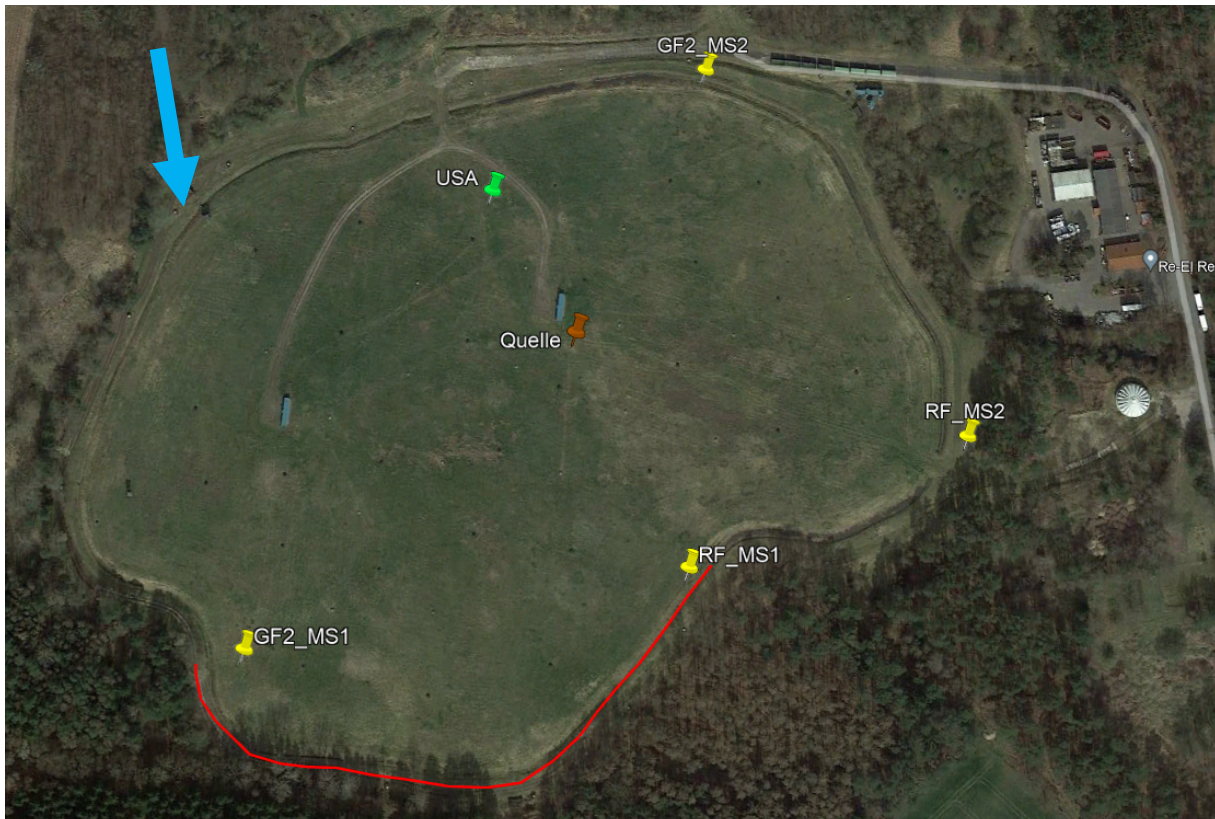
Am 31.05.2023 wurden für die TDLAS-Messtechnik zwei Messstrecken verwendet, mittels mobilem FTIR wurde eine Strecke vermessen. In Tabelle 10 sind die entsprechenden Messstrecken beschrieben und in Abbildung 13 räumlich dargestellt

**Tabelle 10: Definition und Beschreibung der verwendeten Messstrecken am 31.05.2023, Deponie Dibbersen**

Bezeichnung	Länge in m	Beschreibung
MS A FTIR	290	Auf dem südlichen Fahrweg
MS 1 TDLAS	194	Süd-westlich der Deponie
MS 2 TDLAS	205	Süd-östlich der Deponie

In Abbildung 13 sind auch die Positionen des USA (grüne Markierung) und der Quelle für den Tracer (braune Markierung) eingezeichnet. Als Tracer wurde Ethin mit einem Volumenstrom von 2,0 m<sup>3</sup>/h freigesetzt. Dies entspricht gemäß der Umrechnung (Kap. 3.2.1.4) einer Quellstärke von 0,66 g/s. Die Messstrecken für das TDLAS erstrecken sich jeweils zwischen den Markierungen für Reflektor (RF) und Messgerät (GF). Die FTIR-Strecke ist als rote Linie eingezeichnet.

**Abbildung 13: Luftbild der Deponie Dibbersen mit Darstellung den Positionen des USA und der Quelle, sowie den Messstrecken für FTIR (rote Strecke) und TDLAS (zwischen den gelben Markierungen) und der Windrichtung (hellblauer Pfeil) am 31.05.2023**



Quelle: GoogleEarthPro.; Markierungen: eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

In Tabelle 11 und Abbildung 14 sind die Ergebnisse der Emissionsquantifizierung der Messung vom 31.05.2023 gezeigt. Für die IDMM, basierend auf den TDLAS-Daten liegt die ermittelte Emission bei 1.200 mg/s, die NWG liegt mit 990 mg/s darunter. Die mit Hilfe der IDMM, basierend auf den FTIR-Daten ermittelte Emission beträgt im Mittel 570 mg/s, die NWG liegt hier bei 1.000 mg/s. Auf Grundlage der FTIR-Daten berechnete Tracer-Methode liegt mit 1.500 mg/s deutlich über den Ergebnissen der IDMM.

**Tabelle 11: Messergebnisse der in Abbildung 13 dargestellten Strecken und Punkte am 31.05.2023, Deponie Dibbersen**

Messmethode	Messergebnis in mg/s	Nachweisgrenze in mg/s	Emission in l/m <sup>2</sup> h	Emission in m <sup>3</sup> /h
IDMM mit TDLAS (MS1)	1.200	990	0,07	6,0
IDMM mit FTIR (rot)	570	1.000	0,03	2,6
Tracer-Methode	1.500		0,09	7,7

**Abbildung 14: Ergebnis der Emissionsquantifizierung am 31.05.2023 an der Deponie Dibbersen für die Konzentrationserfassung mit FTIR und TDLAS**



Quelle: eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

### 3.2.4.3 Durchführung und Ergebnisse der Messung am 27.06.2023

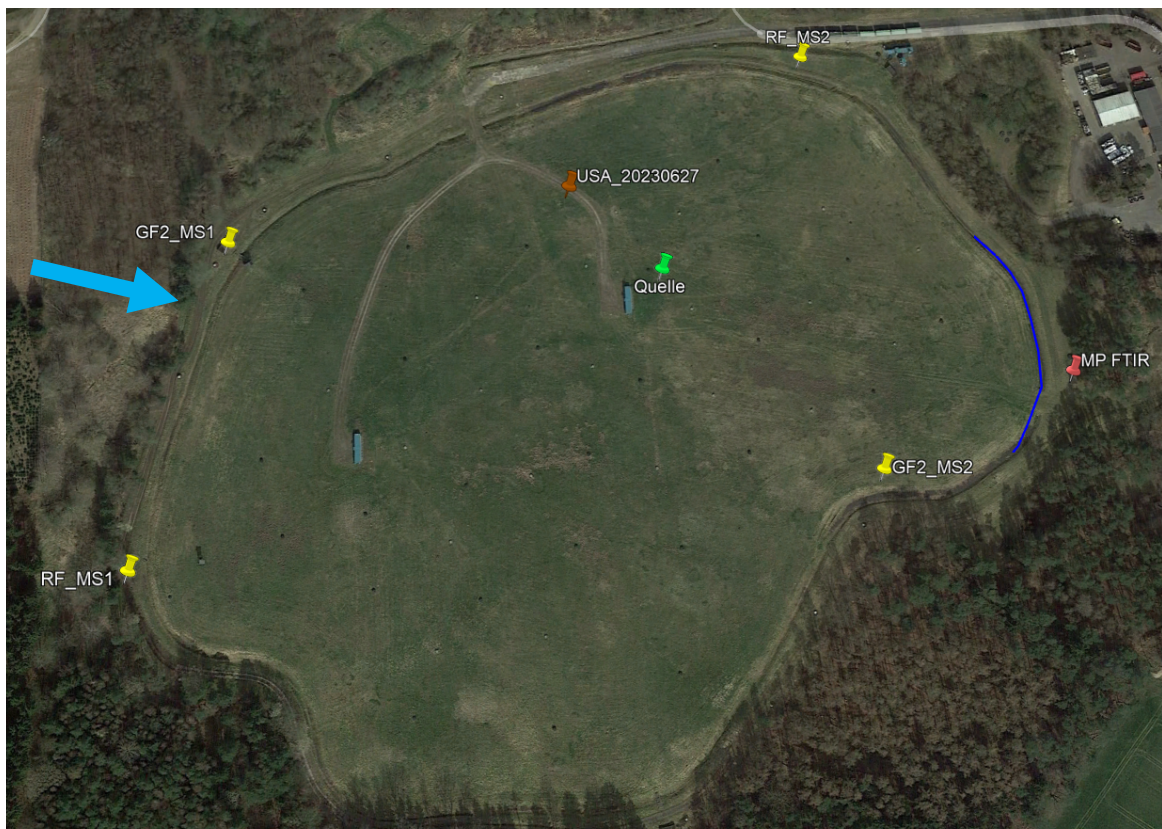
Am 27.06.2023 wurden für die TDLAS-Messtechnik zwei Messstrecken verwendet, ebenso für die FTIR-Messtechnik. In Tabelle 12 sind die Messstrecken, die mit der FTIR- und TDLAS-Messtechnik verwendet wurden mit den jeweiligen Längen und einer örtlichen Beschreibung dargestellt.

**Tabelle 12: Definition und Beschreibung der verwendeten Messstrecken am 27.06.2023, Deponie Dibbersen**

Bezeichnung	Länge in m	Beschreibung
MS (blau) FTIR	118	Östlich auf dem Randdamm entlang
MP (rot) FTIR	-	An der süd-östlich gelegenen Garage
MS2-TDLAS	190	Östlich der Deponie

In Abbildung 18 ist das Luftbild mit den verwendeten Messstrecken gezeigt. Zudem sind die Positionen des USA (braune Markierung) und der Quelle (grüne Markierung) eingezeichnet. Als Tracer wurde Ethin mit einem Volumenstrom von 1,8 m<sup>3</sup>/h freigesetzt. Dies entspricht gemäß der Umrechnung (Kap. 3.2.1.4) einer Quellstärke von 0,59 g/s. Die Messstrecken für das TDLAS erstrecken sich jeweils zwischen den Markierungen für Reflektor (RF) und Messgerät (GF). Für das FTIR wurden, wie in Tabelle 12 beschrieben, eine Messstrecke und ein Messpunkt verwendet, zunächst MS FTIR (blau) und anschließend MP-FTIR (rot).

**Abbildung 15: Luftbild der Deponie Dibbersen mit Darstellung den Positionen des USA und der Quelle, sowie den Messstrecken für FTIR (blaue Linie und rote Markierung) und TDLAS (zwischen den gelben Markierungen) und der Windrichtung (hellblauer Pfeil) am 27.06.2023**



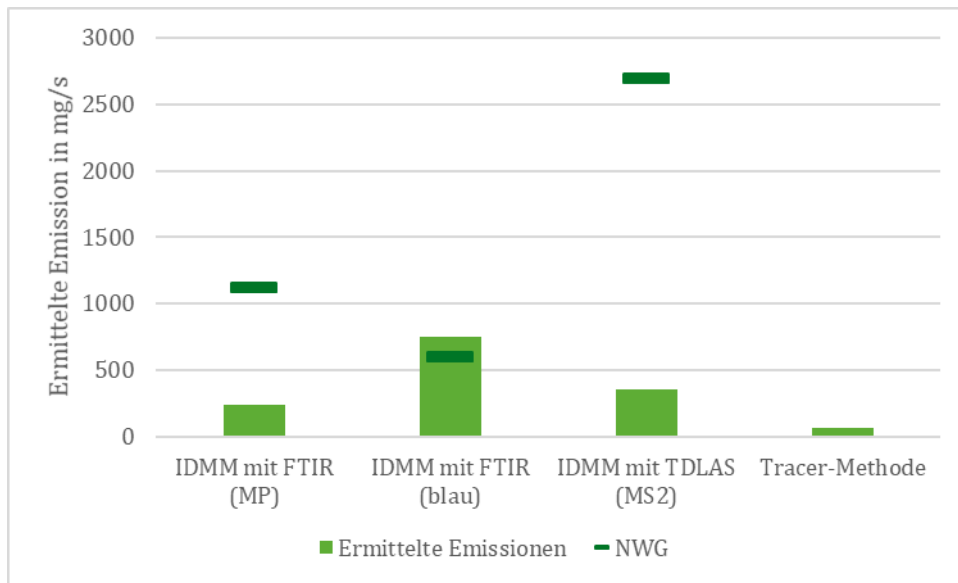
Quelle: GoogleEarthPro.; Markierungen: eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

In Tabelle 13 und Abbildung 16 sind die Ergebnisse der Emissionsquantifizierung der Messung vom 27.06.2023 dargestellt. Für die IDMM, basierend auf den TDLAS-Daten liegt die ermittelte Emission bei 360 mg/s, die NWG liegt mit 2.700 mg/s deutlich darüber. Die mit Hilfe der IDMM, basierend auf den FTIR-Daten ermittelte Emission beträgt bei der Streckenmessung 750 mg/s (NWG 600 mg/s) und bei der Punktmessung 240 mg/s (NWG 1.120 mg/s). Das Ergebnis der Berechnung über die Tracer-Methode auf Grundlage der FTIR-Daten liegt mit 70 mg/s unter den Ergebnissen der IDMM.

**Tabelle 13: Messergebnisse der in Abbildung 15 dargestellten Strecken und Punkte am 27.06.2023, Deponie Dibbersen**

Messmethode	Messergebnis in mg/s	Nachweisgrenze in mg/s	Emission in l/m <sup>2</sup> h	Emission in m <sup>3</sup> /h
IDMM mit TDLAS (MS2)	360	2.700	0,02	1,7
IDMM mit FTIR (MP)	240	1.120	0,01	0,9
IDMM mit FTIR (blau)	750	600	0,05	4,3
Tracer-Methode	70		0,005	0,4

**Abbildung 16: Ergebnis der Emissionsquantifizierung am 27.06.2023 an der Deponie Dibbersen für die Konzentrationserfassung mit FTIR und TDLAS**



Quelle: eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

### 3.2.5 Einordnung der Messergebnisse

#### 3.2.5.1 Grundsätzliches zur Einordnung der Messergebnisse

Die an den beiden Deponien durchgeführten FTIR-Messungen ergaben nach Auswertung über die IDMM an den beiden Messtagen jeweils unterschiedliche Emissionsraten. Zur Beurteilung der Qualität dieser Ergebnisse wurden Tracer freigesetzt und deren Wiederfindungsrate bestimmt. Zusätzliche Messungen mittels TDLAS dienten ebenfalls als Hilfe zur Qualitätssicherung. Es wurden somit zwei physikalisch verschiedene Analyseverfahren (FTIR und TDLAS) und zwei unterschiedliche Auswertungsmethoden (IDMM und Tracer-Methode) verwendet. Für die IDMM wurden Nachweisgrenzen berechnet, die ein Maß für die Einflüsse der unterschiedlichen Ausbreitungssituationen und die Genauigkeit der ermittelten Werte darstellen. Eine Abweichung der für die jeweiligen Messtage ermittelten Emissionsraten war systembedingt zu erwarten [DIN 38402-71, 2020]. Anhand dieser Informationen und der Erfahrung mit den jeweiligen Verfahren können Intervalle angegeben werden, in denen die Methan-Emissionsraten an den beiden Deponien liegen.

Im Rahmen dieses Vorhabens konnten nur an zwei Deponien jeweils zwei Messtage durchgeführt werden. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse wären jedoch längere Zeitreihen notwendig.

#### 3.2.5.2 Deponie Blumentobel

**Messtag 1** war der **29.11.2022**. Sowohl die Windrichtung als auch die Windgeschwindigkeit waren an diesem Tag anders als in der Planungsphase erwartet und wichen auch von der Prognose für diesen Tag ab. Anstatt südlichem Wind war die Hauptrichtung West und die Geschwindigkeit war mit 1,4 m/s für eine stabile Ausbreitungssituation eigentlich zu niedrig. Aufgrund der Einschätzung vor Ort wurde dennoch entschieden die Messungen durchzuführen. Der Luftdruck war auf einem tiefen Niveau den ganzen Tag über konstant.

Als Tracer wurde Lachgas mit einem Volumenstrom von 1,3 m<sup>3</sup>/h freigesetzt. Dies entspricht einer Quellstärke von 0,66 g/s.

Es wurden die im Anhang im Detail aufgelisteten Messwerte ermittelt. Für die mittels FTIR gemessenen N<sub>2</sub>O-Konzentrationen ergab die IDMM eine Emissionsrate von 0,62 g/s. Die Wiederfindungsrate liegt somit bei 94%. Die mittels der Tracer-Methode bestimmte Emissionsrate für CH<sub>4</sub> (100 mg/s) wird somit als verlässlich eingestuft.

Die mit der IDMM auf der Basis der TDLAS-Daten berechnete Emissionsrate liegt mit 220 mg/s über diesem Wert, jedoch in einer ähnlichen Größenordnung. Der Wert ist auch größer als die für diese Messungen berechnete Nachweisgrenze (NWG) von 100 mg/s und kann somit als Teil der Ergebnisintervalle verwendet werden.

Aus den FTIR-Daten ergibt die IDMM eine Emissionsrate von 60 mg/s. Auch diese liegt auf einem ähnlichen Niveau, aufgrund der ermittelten NWG von 450 mg/s würde dieser Wert jedoch nicht als ausreichend belastbar interpretiert. Er liegt jedoch rein rechnerisch ebenfalls innerhalb des Ergebnisintervalls (siehe Tabelle 6).

Auch am **zweiten Messtag (22.12.2022)** kam der Wind nicht aus Süd, sondern aus West-Süd-West-Richtung, er war jedoch deutlich stärker als die mindestens erforderlichen 2,5 m/s. Der Luftdruck war auf ähnlich tiefem Niveau wie an Messtag 1 den ganzen Tag über konstant.

Die mit der IDMM ermittelte emittierte Methanfracht beträgt basierend auf FTIR-Daten im Mittel 100 mg/s. Die NWG liegt in diesem Fall bei 660 mg/s. Es kann daher nicht von einer präzisen

Emissionsquantifizierung ausgegangen, sondern nur angegeben werden, dass die mit dieser Methode ermittelte emittierte Methanfracht kleiner als 660 mg/s ist.

Auch der über die Tracer-Methode bestimmte Wert liegt mit 50 mg/s deutlich unter diesem Niveau.

Für die IDMM basierend auf TDLAS-Daten liegt die mittlere ermittelte Emission bei 130 mg/s, die NWG liegt mit 200 mg/s knapp darüber. Die Interpretation entspricht somit derjenigen bei der Emissionsquantifizierung mit IDMM basierend auf FTIR-Messwerten. Als Grenzen des Intervalls für die Emissionsrate kann somit das Ergebnis der Tracer-Methode und die Nachweisgrenze der IDMM/TDLAS definiert werden (Tabelle 14).

**Tabelle 14: Methan-Emissionsraten aus der Oberfläche der Deponie Blumentobel**

	Messtag 1	Messtag 2
Intervall in mg/s	60 bis 220	50 bis 200
Intervall in l/m <sup>2</sup> h	0,004 bis 0,01	0,003 bis 0,009
Gesamtemission über die komplette Deponiefläche in m <sup>3</sup> /h (Mittelwert)	0,6	0,5

### 3.2.5.3 Deponie Dibbersen

**Messtag 1** war der **31.05.2023**. Die Messungen wurden auf diesen Tag festgesetzt, obwohl das Kriterium, dass die Anlage vor einer Messung mindestens 14 Tage lang im Regelbetrieb sein muss, nicht erfüllt war. Um weitere Verzögerungen im Projekt zu vermeiden, wurde dies in Kauf genommen. Sowohl die Windrichtung als auch die Windgeschwindigkeit waren an diesem Tag anders als in der Planungsphase erwartet und wichen auch von der Prognose für diesen Tag ab. Anstatt südwestlichem Wind war die Hauptrichtung Nord und die Geschwindigkeit war mit 2 m/s etwas zu niedrig. Bei dieser Windrichtung war die Gefahr, dass Sekundärquellen außerhalb der Deponiefläche miterfasst werden gegeben (siehe 3.2.2.3). Der Luftdruck war auf einem leicht erhöhten Niveau den ganzen Tag über konstant.

Als Tracer wurde Ethin mit einem Volumenstrom von 2 m<sup>3</sup>/h freigesetzt. Dies entspricht einer Quellstärke von 0,66 g/s.

Es wurden die im Anhang im Detail aufgelisteten Messwerte ermittelt. Für die mittels FTIR gemessenen C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-Konzentrationen ergab die IDMM eine mittlere Emissionsrate von 0,41 g/s. Die Wiederfindungsrate liegt somit bei 62%. Die Tracer-Methode unterschätzt somit in diesem Fall die wahre Emissionsrate um ca. 40%. Die über den Tracer berechnete Emissionsrate für CH<sub>4</sub> (1.500 mg/s) sollte somit eher bei ca. 2.000 mg/s liegen.

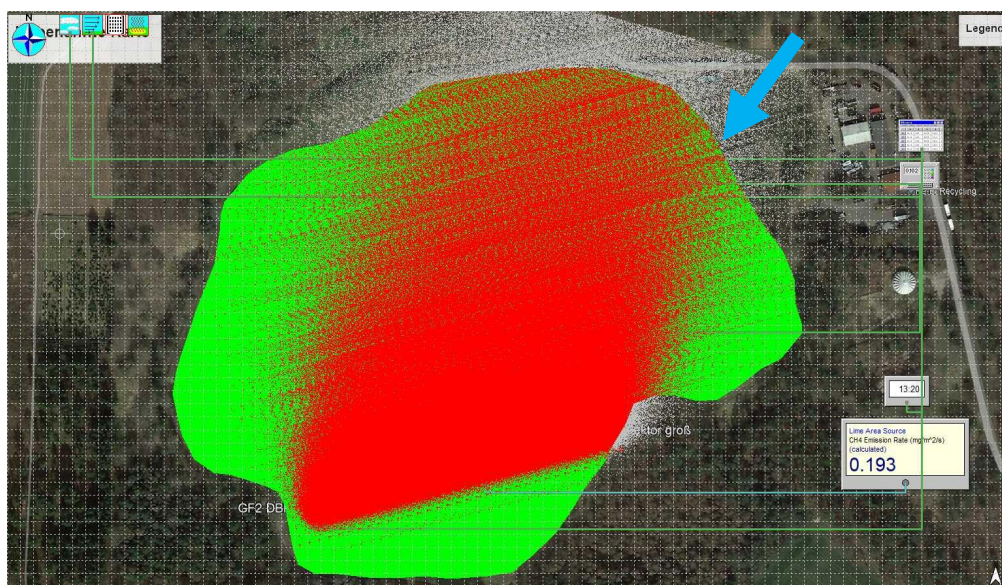
Die mit der IDMM auf der Basis der FTIR-Daten berechnete Emissionsrate beträgt 570 mg/s wobei die NWG bei 1.000 mg/s liegt. Die Werte aus Tracer-Methode und IDMM/FTIR liegen also in einer ähnlichen Größenordnung.

Aus den TDLAS-Daten ergibt die IDMM eine Emissionsrate von 1.200 mg/s. Auch diese liegt auf einem ähnlichen Niveau, aufgrund der ermittelten NWG von 990 mg/s kann dieser Wert als ausreichend belastbar interpretiert werden. Die Bandbreite für die Emissionsrate an diesem nicht repräsentativen Messtag ist in Tabelle 15 zusammengefasst.

Anhand der ermittelten Methan-Emissionsraten ist deutlich erkennbar, dass der Deponiekörper aufgrund der vorausgegangenen technischen Schwierigkeiten nicht im Unterdruck war. Laut

Betreiber wird im Regelbetrieb wesentlich mehr Luft aus dem Deponiekörper abgesaugt als hineingedrückt. Dies war während der Phasen mit Störungen umgekehrt der Fall. Weiterhin zeigt die Modellierung, dass zeitweise die oben beschriebenen Sekundärquellen miterfasst wurden. Sobald der Wind aus Nord-Nord-Ost kam, war die ermittelte Emissionsrate signifikant erhöht, wie das folgende Beispiel zeigt: Um 13:20 Uhr kommt der Wind aus NNO und damit aus der Richtung des Kamins der RTO, die aufgrund von Zündstörungen an diesem Tag immer wieder unverbranntes Deponiegas emittierte. Abbildung 17 veranschaulicht die IDMM mit den erzeugten „Partikeln“ aus dieser Richtung. Die Methanwerte liegen mit 17.700 mg/s ( $0,9 \text{ l/m}^2 \text{ h}$ ) deutlich über den zu erwarteten und bisher an anderen Deponien ermittelten Werten.

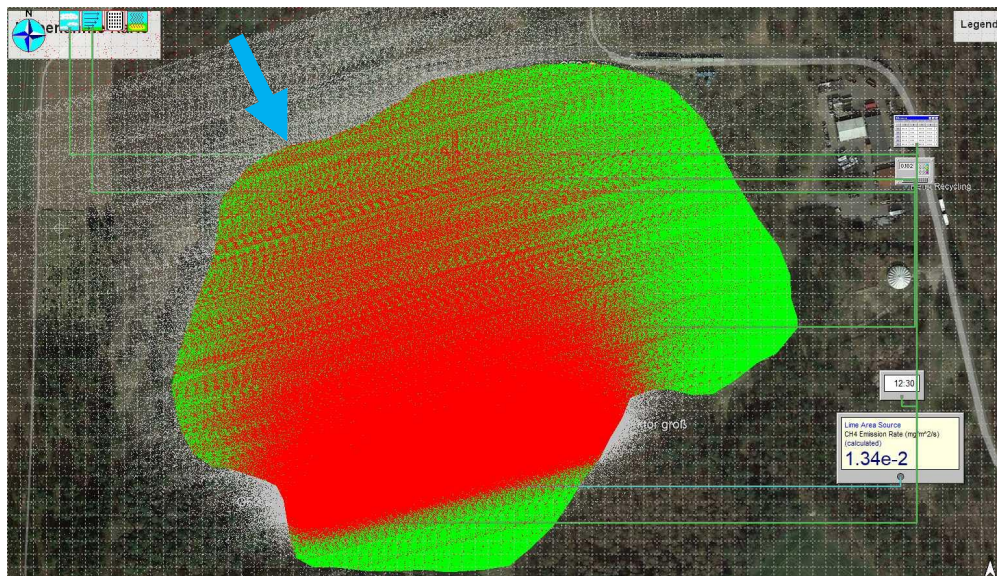
**Abbildung 17: Luftbild mit, bei der IDMM erzeugten „Partikeln“ und der TDLAS-Messtrecke am 31.05.2023 um 13:20 Uhr bei „kalter RTO“. Der hellblaue Pfeil zeigt die Windrichtung an**



Quelle: GoogleEarthPro.; Thunder Beach Scientific (WindTrax 2.0); eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

Kommt der Wind dagegen aus Nord-Nord-West, wird die Abgasfahne der RTO nicht erfasst und die ermittelte Emissionsrate liegt auf deutlich niedrigerem Niveau (siehe Abbildung 18, Methanfracht  $1.230 \text{ mg/s}$  ( $0,07 \text{ l/m}^2 \text{ h}$ )).

**Abbildung 18:** Luftbild mit, bei der IDMM erzeugten „Partikel“ und der TDLAS-Messtrecke am 31.05.2023 um 12:30 Uhr. Der hellblaue Pfeil zeigt die Windrichtung an



Quelle: GoogleEarthPro.; Thunder Beach Scientific (WindTrax 2.0); eigene Darstellung, Universität Stuttgart.

Die Situation bei den Messungen am 31.05. stellt nicht den Regelbetrieb der aktiven Belüftung dar. Vielmehr handelt es sich um ein Worstcase-Szenario, bei dem in zeitlich begrenzten Situationen sehr ungünstige emissionstechnische Bedingungen vorherrschen.

**Messtag 2** war der **27.06.2023**. Die Bedingungen für eine repräsentative Messung (mindestens 14 Tage Regelbetrieb) waren erfüllt. Es herrschte Westwind mit ausreichend hoher Geschwindigkeit (3,2 m/s). Der Luftdruck war auf etwas tieferem Niveau den ganzen Tag über konstant.

Als Tracer wurde wieder Ethin mit einer Quellstärke von 0,59 g/s freigesetzt.

Es wurden die im Anhang im Detail aufgelisteten Messwerte ermittelt. Für die mittels FTIR gemessenen  $C_2H_2$ -Konzentrationen ergab die IDMM eine mittlere Emissionsrate von 0,39 g/s. Die Wiederfindungsrate liegt somit bei 66 %. Die Tracer-Methode unterschätzt somit in diesem Fall die wahre Emissionsrate um ca. 34 %. Die über den Tracer berechnete Emissionsrate für  $CH_4$  (70 mg/s) sollte somit eher bei ca. 106 mg/s liegen.

Die mit der IDMM basierend auf FTIR-Messwerten bestimmten Emissionsraten waren etwas höher: Die Modellierung mit den am Messpunkt am östlichen Rand der Deponie gemessenen Immissionswerten ergab 240 mg/s (NWG 1.120 mg/s) und bei der Streckenmessung bei 750 mg/s (NWG 600 mg/s). Entsprechend der bereits oben diskutierten Interpretationsweise können für diesen repräsentativen Messtag als Bandbreite für die Emissionsrate die in Tabelle 15 zusammengefassten Werte angegeben werden. Es ist eindeutig erkennbar, dass bei stabilem Betrieb der Absaugung/Abgasreinigung auch an dieser Deponie wesentlich niedrigere Emissionsraten vorliegen (ca. 30% der Werte von Messtag 1).

**Tabelle 15: Methan-Emissionsraten aus der Oberfläche der Deponie Dibbersen**

	Messtag 1 (nicht repräsentativ)	Messtag 2
Intervall in mg/s	1.200 bis 2.000	100 bis 750
Intervall in l/m <sup>2</sup> h	0,07 bis 0,1	0,007 bis 0,05
Gesamtemission über die komplette Deponiefläche in m <sup>3</sup> /h (Mittelwert)	8,1	2,4

### 3.3 Arbeitspaket 3 – Handlungsempfehlungen

Für Deponien, die sich in der aeroben Stabilisierung befinden, ist die in Deutschland übliche Vorgehensweise zur Berechnung der Methanemissionen nur sehr eingeschränkt anwendbar. Wie im „Bundeseinheitlichen Qualitätsstandard 10-1 Deponiegas“ vom 10.11.2021 (BQS 10-1) beschrieben, berechnet sich der Erfassungsgrad für Methan aus Deponien aus dem „Verhältnis der in einem Betrachtungszeitraum (i. d. R. ein Jahr) gefassten zur gebildeten Methanmasse, wobei die gebildete Methanmasse in der Regel durch Prognosen bestimmt wird.“ Die im Betrachtungszeitraum verfügbare Masse an abbaubarem organischem Material ist aufgrund des aeroben Abbaus während der Belüftung jedoch nicht mehr über die FOD-Methode zu berechnen und somit unbekannt.

Im BQS 10-1 wird daher u.a. empfohlen, „indirekte Emissionsmessungen gemäß Nummer 7.4.3 der VDI 3790 Blatt 2 durchzuführen und den Erfassungsgrad darüber zu ermitteln“. Solche Messungen wurden im Rahmen dieses Projekts durchgeführt.

Unter der Annahme, dass die Summe aus diffus emittiertem und mittels Deponieentgasungstechnik erfasstem Methan das Volumen des im Betrachtungszeitraum gebildeten Methans ergibt (die Methanoxidation im Deponiekörper wird dabei nicht eingerechnet) lässt sich auch über diesen Weg der Methan-Erfassungsgrad berechnen.

Der Volumenstrom des erfassten Deponiegases beträgt an der **Deponie Blumentobel** an beiden Messtagen laut Betreiber im Durchschnitt 250 m<sup>3</sup>/h. Der Methananteil liegt an Messtag 1 bei 7,6 Vol.-% und an Messtag 2 bei 7,5 Vol.%. Für beide Messtage kann somit mit einer erfassten Methanmenge von ca. 19 m<sup>3</sup>/h gerechnet werden. Mit der in Tabelle 14 dargestellten mittleren Emission von 0,6 m<sup>3</sup>/h (Tag 1) bzw. 0,5 m<sup>3</sup>/h (Tag 2) ergibt sich für beide Messtage ein durchschnittlicher Erfassungsgrad von ca. 95 Prozent.

Bei der **Deponie Dibbersen** gibt der Betreiber für Messtag 2 (27.06.2023, repräsentative Bedingungen) eine Absaugrate von ca. 238 m<sup>3</sup>/h unter Normbedingungen an. Der Anteil an CH<sub>4</sub> beträgt 12,4 Vol.-%. Daraus ergibt sich ein erfasster Volumenstrom von 30 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> /h. Die Emissionsrate lag im Durchschnitt bei ca. 2 m<sup>3</sup>/h (Tabelle 15). Somit ergibt sich ein Erfassungsgrad von durchschnittlich 93 Prozent. Für Messtag 1 kann aufgrund der technischen Schwierigkeiten kein belastbarer Wert für den Erfassungsgrad berechnet werden. In Tabelle 16 sind die berechneten Werte zusammengefasst.

**Tabelle 16: Methan-Erfassungsgrad während der aeroben Stabilisierung**

	Deponie Blumentobel (Übersaugung)	Deponie Dibbersen (Druck-Saug-Belüftung)
Mit Absaugung erfasstes Methanvolumen in m <sup>3</sup> /h	ca. 19	ca. 30
Diffus emittiertes Methanvolumen in m <sup>3</sup> /h	ca. 1	ca. 2
Berechneter Erfassungsgrad für Methan	ca. 95%	ca. 93%

**Auf der Grundlage dieser Daten wird empfohlen, den Beitrag der Methanemissionen von Deponien, die aktiv aerobisiert werden, zum nationalen Treibhausgas-Inventar über den Methan-Erfassungsgrad abzuschätzen:**

Wenn gesichert ist, dass die Verfügbarkeit der Absaug- und/oder Belüftungstechnik sowie der dazu gehörenden Abgasreinigung im Bilanzzeitraum größer als 95% war, kann entweder ein Erfassungsgrad von 90% zur Berechnung der Methanemissionen angesetzt oder (als pragmatische Vorgehensweise unter Berücksichtigung der bei der sowohl bei der Berechnung als auch bei der messtechnischen Erfassung von Deponiegasemissionen vorhandenen Unsicherheiten) die diffuse Methanemission vernachlässigt werden.

Erst nach Abschluss der Stabilisierungsmaßnahme müsste die Deponie wieder in die normale Berechnungsmethode aufgenommen werden. Die dann noch vorhandene Masse an abbaubarer Organik kann jedoch nicht mehr aus der eingelagerten Abfallmenge berechnet werden, da von einem relativ hohen Anteil an aerob und einem eher unbekanntem Anteil an anaerob abgebautem Kohlenstoff auszugehen ist. Im Deponiejahresbericht ist jedoch die Menge an erfasstem Methan und Kohlendioxid angegeben, so dass daraus die abgebaute Kohlenstoffmasse ermittelt werden kann (bei der Deponie Blumentobel betrug sie beispielsweise im Jahr 2022 280 Mg C). Wird zusätzlich noch der Kohlenstoffaustrag über das Sickerwasser berücksichtigt, lässt sich die Abnahme an organischem Kohlenstoff in der Deponie auch während der Belüftung fortschreiben. Sollte die Aerobisierung dann tatsächlich beendet und die Deponie wieder „klassisch“ abgesaugt werden, wäre eine Basis für die „normale“ Berechnung der Methanemissionen mittels FOD-Methode vorhanden.

Ein absichtliches Rückführen einer aerobisierten Deponie in den anaeroben Zustand durch Reduzierung des Absaugvolumens ist uns jedoch bisher nicht bekannt (außer im Rahmen von entsprechenden Forschungsvorhaben). Vielmehr werden alle bisher begonnenen Aerobisierungen mit der im Rahmen des NKI-Projekts installierten Technik weiter betrieben. Damit ist dann, wenn die Gaserfassung und die Abgasreinigung im Regelbetrieb sind, auch von einer vernachlässigbaren diffusen Methanemission auszugehen.

## 4 Quellenverzeichnis

### Monografien:

Elpelt-Wessel, Imke (2022): Messtechnische Erfassung von Methanemissionen an Deponieoberflächen zur Abschätzung des Erfolgs von Maßnahmen zur Reduzierung von Treibhausgasen. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft.

### Internetadressen:

Crenna, Brian (2017): An introduction to WindTrax. Version 2.0: Thunder Beach Scientific. Online verfügbar unter <http://thunderbeachscientific.com/windtrax.html>.

Gasmet Technologies Oy (2020): FTIR Gas Analysis. White Paper. <https://info.gasmet.com/download-ftir-technology-white-paper>. Online verfügbar unter <https://info.gasmet.com/download-ftir-technology-white-paper>, zuletzt geprüft am 26.10.2020.

### Richtlinien/Normen:

DIN 18716 (2017): Photogrammetrie und Fernerkundung – Begriffe

DIN 32645 (2008): Chemische Analytik- Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze unter Wiederholbedingungen-Begriffe, Verfahren, Auswertung. Deutsche Norm. In: Normenausschuss Materialprüfung (NMP) 71.040.01.

DIN 38402-71 (2020): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Allgemeine Angaben (Gruppe A) - Teil 71: Gleichwertigkeit von zwei Analysenverfahren aufgrund des Vergleichs von Analyseergebnissen (A 71) 13.060.45.

LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“, Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 10-1 „Deponiegas“, 10.11.2021, <https://www.laga-online.de/Publikationen-50-Informationen-Bundeseinheitliche-Qualitaetsstandards.html>

### Wissenschaftliche Artikel:

Flesch, T.K., Wilson, J.D (1995): Backward-Time Lagrangian Stochastic Dispersion Models and Their Application to Estimate Gaseous Emissions. Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 34 Issue 6, p. 1320–1332

## A Anhang

### A.1 Messwerte

#### A.1.1 Blumentobel

**Tabelle 17: Messergebnisse der IDMM mit FTIR auf der Deponie Blumentobel am 29.11.2022**

	Konzentration CH <sub>4</sub> in ppm	Hintergrund CH <sub>4</sub> in ppm	Konzentration N <sub>2</sub> O in ppm	Hintergrund N <sub>2</sub> O in ppm
Strecke 1	2,24	2,2	0,52	0,28
Strecke 2	2,23	2,19	1,29	0,26
Strecke 3	2,3	2,29	0,26	0,27

**Tabelle 18: Messergebnisse der IDMM mit TDLAS als 10-Minuten-Mittelwerte auf der Deponie Blumentobel am 29.11.2022**

Konzentration CH <sub>4</sub> in ppm	Hintergrund CH <sub>4</sub> in ppm
392	3
345	3
353	3
355	3
429	2,9
351	2,9
356	2,9
347	2,9
348	2,9
353	3
350	3
346	3
348	3
348	3
350	3
351	3
352	3
352	3
396	3

Konzentration CH <sub>4</sub> in ppm	Hintergrund CH <sub>4</sub> in ppm
395	2,9
393	3
393	3
391	3
392	3

**Tabelle 19: Messergebnisse der IDMM mit FTIR auf der Deponie Blumentobel am 22.12.2022**

	Konzentration CH <sub>4</sub> in ppm	Hintergrund CH <sub>4</sub> in ppm	Konzentration N <sub>2</sub> O in ppm	Hintergrund N <sub>2</sub> O in ppm
Strecke 1	2,04	2,03	0,45	0,27
Strecke 2	2,04	2,03	0,4	0,26
Strecke 2	2,06	2,06	0,48	0,25
Strecke 2	2,07	2,09	0,3	0,23
Strecke 2	2,07	2,07	0,39	0,23

**Tabelle 20: Messergebnisse der IDMM mit TDLAS als 10-Minuten-Mittelwerte auf der Deponie Blumentobel am 22.12.2022**

Konzentration CH <sub>4</sub> in ppm	Hintergrund CH <sub>4</sub> in ppm
345	2,2
343	2,2
345	2,2
348	2,2
350	2,2
352	2,2
352	2,2
351	2,2
347	2,2
345	2,2
342	2,2
340	2,2
339	2,2
337	2,2

Konzentration CH <sub>4</sub> in ppmm	Hintergrund CH <sub>4</sub> in ppm
338	2,2
341	2,2
341	2,1
342	2,1
345	2,1
343	2,1
342	2,1
339	2,1
339	2,1

### A.1.2 Dibbersen

Tabelle 21: Messergebnisse der IDMM mit FTIR auf der Deponie Dibbersen am 31.05.2023

	Konzentration CH <sub>4</sub> in ppm	Konzentration C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> in ppm	Hintergrund in ppm
Strecke A	2,06	0,03	2,07
Strecke B	2,08	0,01	2,07
Strecke C	2,09	0,06	2,07
Punkt D	2,10	0,08	2,07
Punkt E	2,04	0,11	2,07

Tabelle 22: Messergebnisse der IDMM mit TDLAS als 10-Minuten-Mittelwerte auf der Deponie Dibbersen am 31.05.2023

Konzentration CH <sub>4</sub> in ppmm	Hintergrund CH <sub>4</sub> in ppm
349	1,8
401	2,07
401	2,07
398	2,05
393	2,03
390	2,01
387	2,00
388	2,00
386	1,99

Konzentration CH <sub>4</sub> in ppmm	Hintergrund CH <sub>4</sub> in ppm
381	1,97
342	1,76
333	1,71
387	2,00
391	2,01
392	2,02
394	2,03
396	2,04
396	2,04
396	2,04
395	2,04
396	2,04
394	2,03
394	2,03
395	2,03
394	2,03
393	2,03

**Tabelle 23: Messergebnisse der IDMM mit FTIR auf der Deponie Dibbersen am 27.06.2023**

	Konzentration CH <sub>4</sub> in ppm	Konzentration C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> in ppm	Hintergrund in ppm
Punkt A	2,01	0,19	1,99
Strecke B	1,99	0,13	1,99
Strecke C	2,01	0,19	1,99
Punkt D	1,97	0,04	1,95
Punkt E	1,98	0,02	1,95
Punkt F	1,97	0,12	1,95

**Tabelle 24: Messergebnisse der IDMM mit TDLAS als 10-Minuten-Mittelwerte auf der Deponie Dibbersen am 27.06.2023**

Konzentration CH <sub>4</sub> in ppm	Hintergrund CH <sub>4</sub> in ppm
381	2,2
394	2,1
389	2,1
390	2,1
390	2
396	2,1
400	2,1
401	2,1
401	2,1
392	2
391	2
398	2
392	2
388	2
388	2
383	2
378	1,9
375	1,9
377	1,9
379	1,9
378	2,1
372	2,1
373	2
371	2
384	2
383	2,1
385	2,1

## **A.2 FID-Rasterbegehungen**

### **A.2.1 FID-Rasterbegehung an der Deponie Blumentobel (aus Jahresbericht 2022)**

Untersucht wurde die gesamte Auffüllfläche (Hausmüllteil der Deponie). Außerdem wurden die angrenzenden Randbereiche, der Eingangsbereich und Schächte auf Gasmigrationen untersucht. Vor und während der FID-Messung wurden insgesamt ca. 265 m<sup>3</sup>/h Deponiegas abgesaugt und mit Hilfe des Flox-Brenners thermisch behandelt.

Aufgenommen wurden 919 Messpunkte (siehe Abbildung 19). Die an der Oberfläche und im Eingangsbereich der Deponie am 05. Oktober 2022 gemessenen Kohlenwasserstoffkonzentrationen lagen nur zu 1,2 % bei Konzentrationen > 100 ppm. Im Vergleich zur FID-Messung am 01. April 2022 hat sich die Anzahl der Messpunkte mit relevanten Konzentrationen > 100 ppm nicht wesentlich verändert.

#### **Bereiche mit relevanten Konzentrationen**

##### **nördlicher Böschungsfuß/Eingangsbereich**

Gasaustritte an einem Schacht südlich der Waage, an bzw. im Umkreis des Sickerwasserschachtes S 9 und an den Sickerwasserschächten S 2, S 3, S 4 und S 114.

##### **westlicher Deponierandbereich**

An den Sickerwasserschächten S 7 und S 8.

##### **Schwachgasbehandlungsanlage/Gasförderstation**

An den Rekuperatoren der Schwachgasbehandlungsanlage wurden Undichtigkeiten festgestellt (Konzentrationen > 10.000 ppm, in der Containerraumluft < 50 ppm). Die Undichtigkeiten wurden bei der nächsten Wartung behoben.

### **A.2.2 FID-Rasterbegehungen an der Deponie Dibbersen (aus Jahresbericht 2023)**

Zum Zeitpunkt der Begehung lief die Anlage mit ca. 120 m<sup>3</sup>/h Absaugungsvolumen und ca. 220 m<sup>3</sup>/h Belüftungsvolumen. Dies entspricht nicht dem eigentlichen Regelbetrieb, bei dem das Absaugvolumen stets größer als das Belüftungsvolumen ist. Insofern wurde die FID-Begehung im Sinne der Emissionsüberwachung unter ungünstigen bzw. „worst-case“ Randbedingungen durchgeführt.

Vereinzelt wurden punktuelle, eher kleinräumige Emissionen von 15 – 460 ppm ermittelt (siehe Abbildung 20). Darüber hinaus wurde eine maximale Punktemission von 21.000 ppm an einer Stelle in der Nähe von GB 5.1 gemessen.

Am nördlichen Randgraben wurde ein linienförmiger Deponiegasaustritt festgestellt. Die Emissionen lagen dabei im Bereich von 6 ppm und als punktueller Einzelwert über 10.000 ppm.

Die Ergebnisse der FID-Begehung von August 2023 belegen, dass es nur zu geringen Deponiegasemissionen über die Oberfläche der Deponie in die Atmosphäre gekommen ist. Es wird nochmals auf die ungünstigen Betriebsbedingungen zum Zeitpunkt der FID-Begehung hingewiesen, da es im Zeitraum vor der FID-Begehung zu vereinzelt technischen Einschränkungen im Anlagenbetrieb kam.

Abbildung 19: FID-Messung – Messpunkte – Messergebnisse, Deponie Blumentobel, (Jahresbericht 2022)

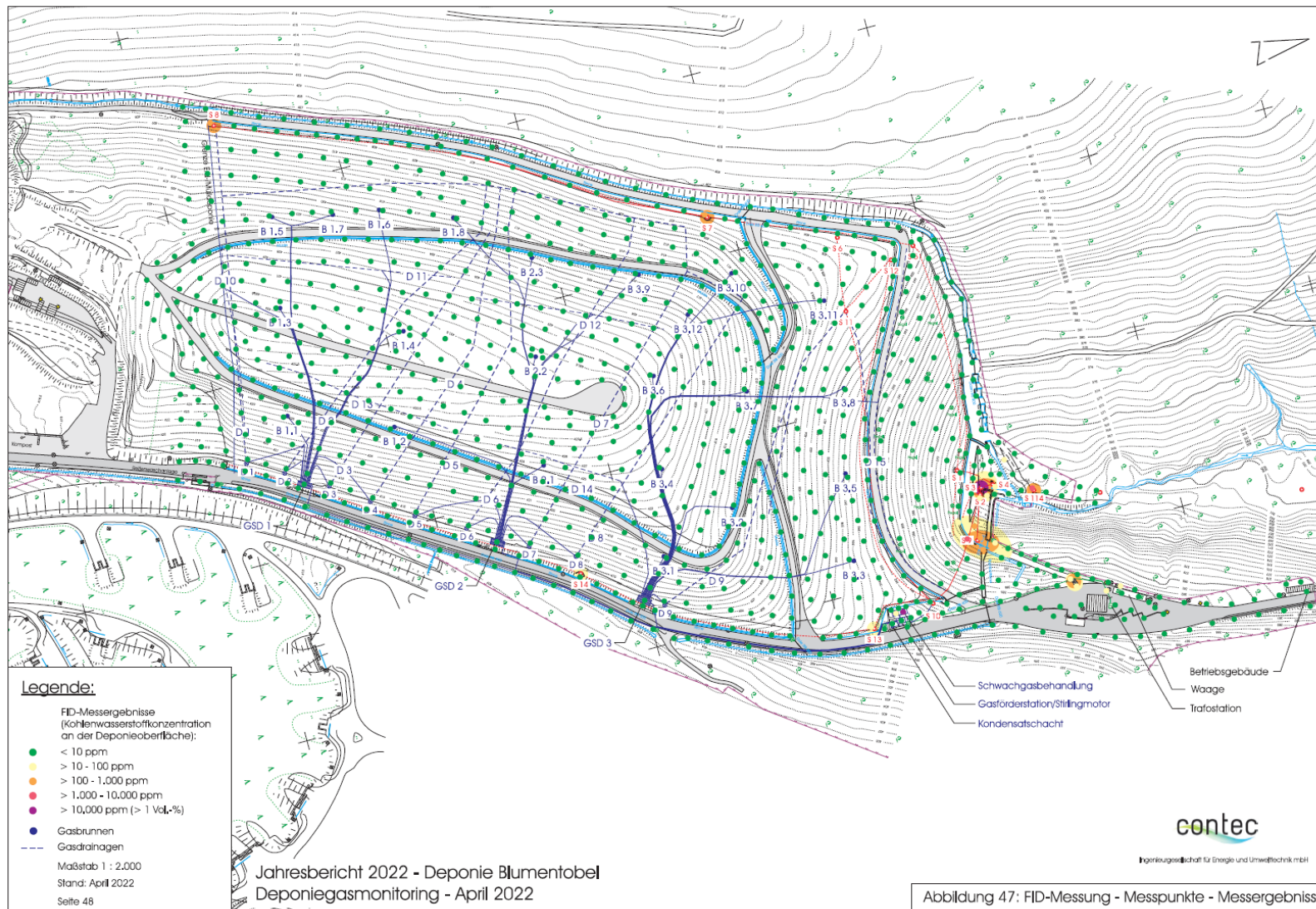
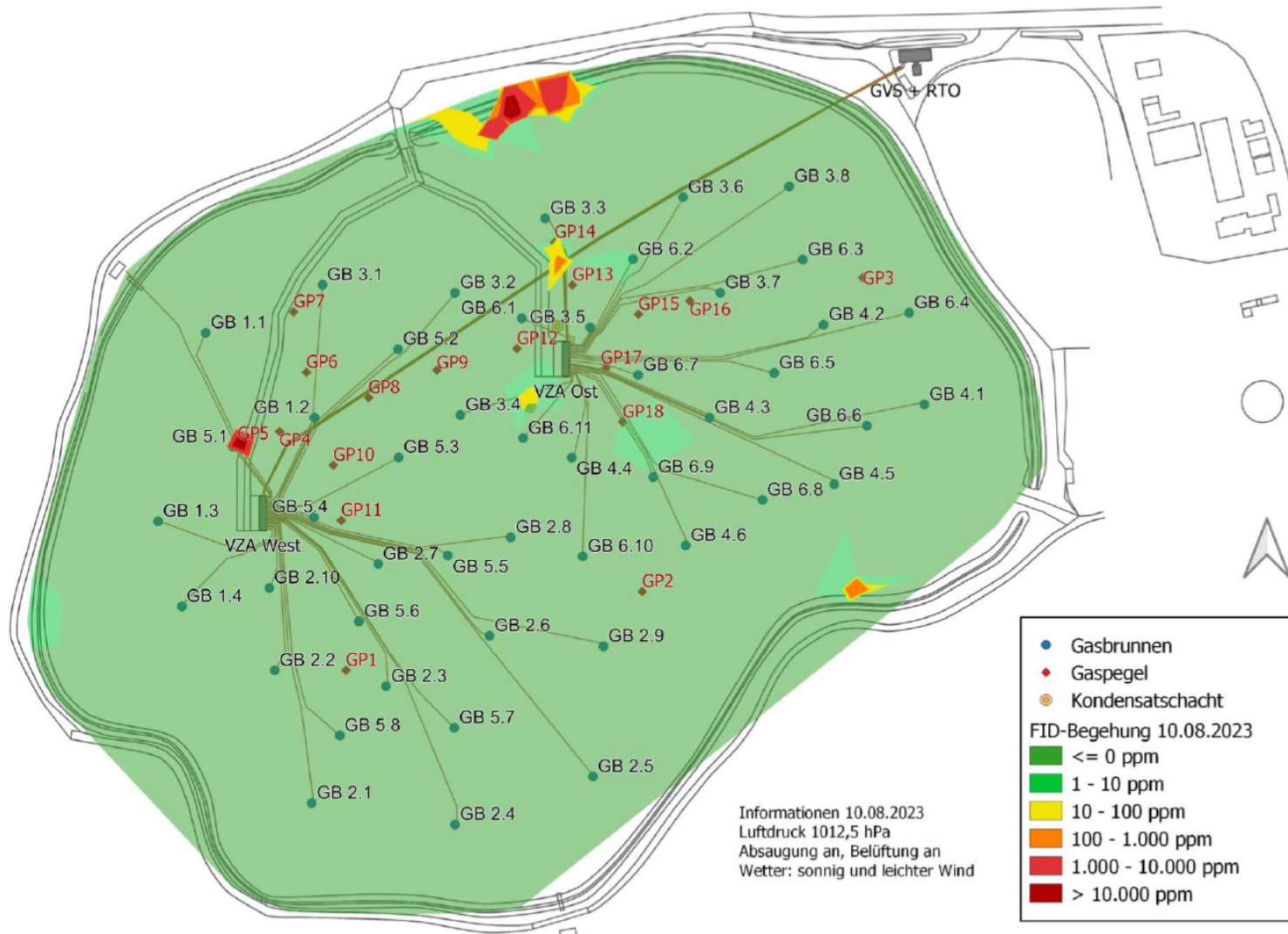


Abbildung 47: FID-Messung - Messpunkte - Messergebnisse

Quelle: contec, Deponie Blumentobel, Jahresbericht 2022

Abbildung 20: FID-Messung – Messergebnisse, Deponie Dibbersen (Jahresbericht 2023)



Quelle: IFAS, Aerobe in situ Stabilisierung der Deponie Dibbersen, 8. Bericht zum Stabilisierungsbetrieb 2023