



SACHSEN-ANHALT

Landesamt für Umweltschutz

Messtechnische Erfassung von diffusen Methanemissionen aus Deponien



Agenda

- Hintergrund
- Emissionsmessmethoden
 - Direkte Methoden
 - Indirekte Methoden
- Zusammenfassung und Ausblick



Hintergrund

- Deponiegase sind die durch Reaktionen der abgelagerten Abfälle entstandenen Gase (Hauptbestandteile: CH_4 , CO_2 Nebenbestandteile: O_2 , N_2 , H_2O , H_2S , Spurengase)
- **§ 12 Abs. 3 Nr. 2 DepV i. V. m. Anhang 5 Nr. 7 DepV:** „Entsteht auf einer Deponie [...] Deponiegas in relevanten Mengen, hat der Betreiber [...] dieses Deponiegas [...] zu fassen und zu behandeln, nach Möglichkeit energetisch zu verwerten. Deponiegaserfassung, -behandlung und -verwertung sind nach dem **Stand der Technik** durchzuführen. Die Länder legen hierfür **bundeseinheitliche Qualitätsstandards** [BQS] fest. [...]“
- BQS 10-1 (Deponiegas) / BQS 7-3 (Methanoxidationsschichten)



Hintergrund

- Deponiekörper = diffuse Emissionsquelle
- Einordnung gemäß VDI 4285 Blatt 1: ortsfeste, inhomogene, bodennahe Flächenquelle mit instationärem / kontinuierlichem Emissionsverhalten
- Direkte Messverfahren → Messung erfolgt unmittelbar an der Quelle (Bestimmung von Konzentration und ggf. *Volumenstrom*, Auswahl von möglichst repräsentativen Probenahmestellen erforderlich)
- Indirekte Messverfahren → Emissionsermittlung in bestimmtem Abstand zur Emissionsquelle (Bestimmung von Konzentrationen, Wind und atmosphärischen Umgebungsbedingungen)
- Ziel der Bestimmung entweichender Methanemissionen (Überwachung, Bewertung von Emissionsminderungsmaßnahmen, Prüfung der ausreichenden Gasfassung)

Hintergrund

- Richtlinien / Weiterführende Literatur:
 - VDI 4285 Blatt 1 - Messtechnische Bestimmung der Emissionen diffuser Quellen - Grundlagen
 - VDI 3790 Blatt 2 - Umweltmeteorologie - Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen – Deponien
 - VDI 3899 Blatt 1 – Emissionsminderung – Deponiegas – Deponiegasverwertung und -behandlung
 - VDI 3899 Blatt 2 – Emissionsminderung – Deponiegas – Systeme zur Deponiegaserfassung und Belüftung
 - Gebert, J.; Pfeiffer, E.-M. (Hrsg.) (2017): Bilanzierung von Gasflüssen auf Deponien. Leitfaden I des Forschungsverbundes MiMethox. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten Band 81/I. ISSN: 0724-6382.
 - Mønster et al. (2019): Methodologies for measuring fugitive methane emissions from landfills – A review. In: Waste Management 87, 835. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.047> oder https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/196062998/WM_17_2090_open_access.pdf
 - Duan et al. (2021): Trace gas emissions from municipal solid waste landfills: A review. In: Waste Management 119, 835. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.015> oder https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/234106615/DTU_ZHENHAN_review_manuscript_revised_clean_version.pdf



Hintergrund

- Bedeutung der Randbedingungen bei Emissionsmessungen auf Deponien
 - Einfluss der atmosphärischen Umgebungsbedingungen (Luftdruck, Wind)
 - Topografische Bedingungen Deponie (Kubatur, Umgebung um die Deponie, Straßen)
 - Oberflächenbeschaffenheit (Auffälligkeiten im Bewuchs, Bewuchshöhe, Risse, Setzungen)



Emissionsmessmethoden

- Indirekte Methoden

- Eddy-Kovarianz-Methode
- Stationäre Massenbilanzmethode
- Radial Plume Mapping
- DIAL
- Flugbasierte-Massenbilanzmethode
- Tracergasmethode
- Inverse Ausbreitungsmodellierung

Hollenbeck et al. 2021: Advanced Leak Detection and Quantification of Methane Emissions Using sUAS. In: Drones 2021, 5(4), 117. Link: <https://doi.org/10.3390/drones5040117>

Direkte Methoden (qualitativ) – Saugglockenverfahren

- Standardverfahren zur Überwachung der Entgasung / Restgasoxidation nach Anhang 5 Nr. 3.2 Tabelle Nr. 2.5 DepV
- VDI 3860 Blatt 3
- Überwiegende Nutzung von Flammenionisationsdetektoren (nicht CH₄-spezifisch) oder von Laser-Absorptionsspektrometern (CH₄-spezifisch)

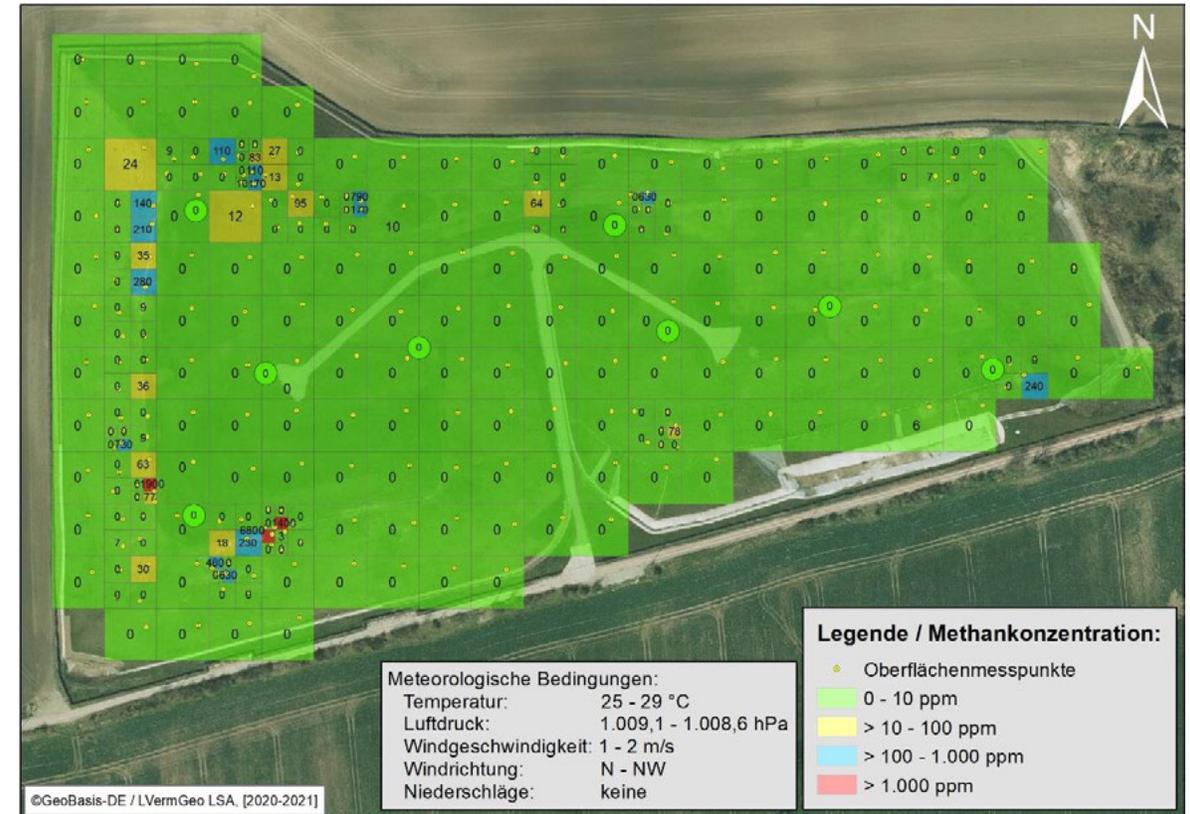


Bild: © LAU

Literaturverweise: VDI 3790 Blatt 2 (Kap. 7.4.2.1), VDI 4285 Blatt 1 (Kap. 6.2.1), Gebert & Pfeiffer 2017- Leitfaden I (Kap. 3.3.1.1), Mønster et al. 2019 (Kap. 2.1)



Direkte Methoden (qualitativ) – Saugglockenverfahren

- Vorteile:
 - Einfache und „schnelle“ Umsetzbarkeit
 - Vergleichsweise kostengünstig (nur CH₄-Analyзатор und GPS erforderlich)
 - Behördlich anerkanntes Verfahren
- Nachteile:
 - Nur begrenzter Flächenanteil begehbar (Auswahl zufälliger Messpunkte + aktive Hot-Spot-Suche erforderlich)
 - I. d. R. kein Rückschluss von gemessenen CH₄-Konzentrationen auf Emissionsrate möglich (Veränderung der Strömungs- und Konzentrationsverhältnisse im Boden)

Direkte Methoden (qualitativ) – Saugglockenverfahren

- Alternative zur extraktiven Probenahme mittels Saugglocken:
Open-Path-Laser (TDLAS)

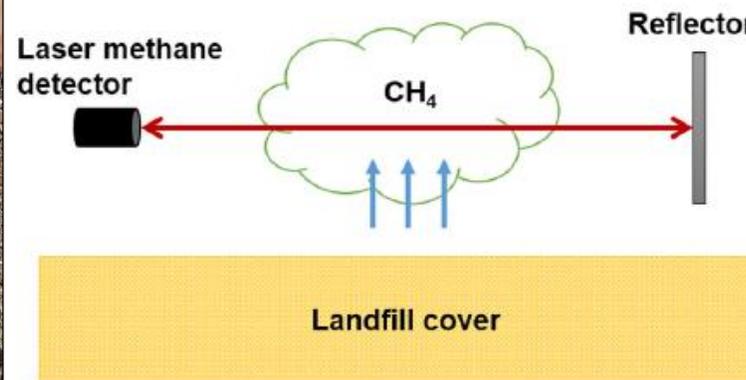
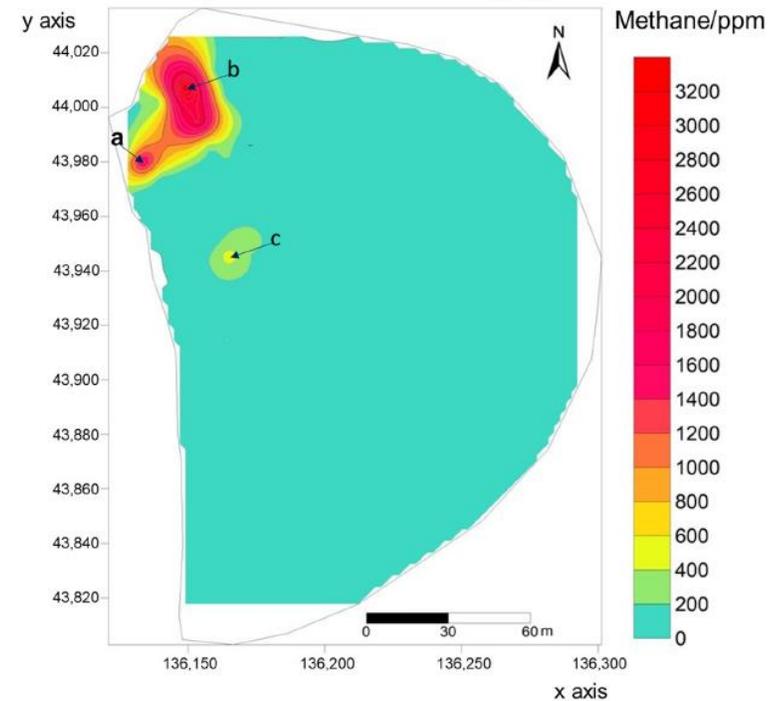
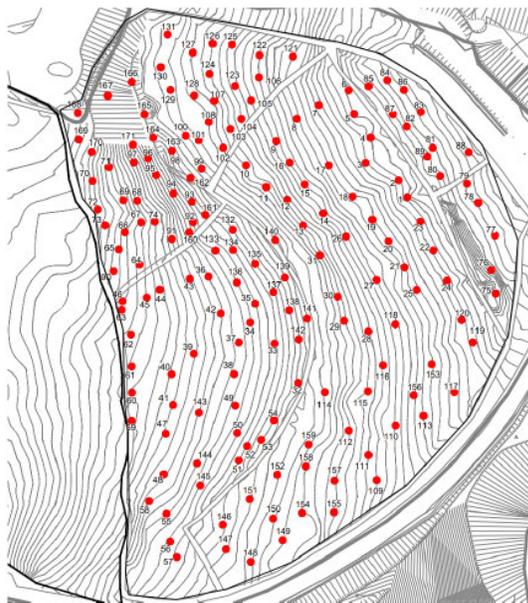


Bild links: © Reinelt et al. 2022: Field measurements of fugitive methane emissions from three Australian waste management and biogas facilities. In: Waste Management 137, 294. Link: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.012>

Bild Mitte / Rechts: © Wu et al. 2023: Hotspot Detection and Estimation of Methane Emissions from Landfill Final Cover. In: Atmosphere 2023, 14(11), 1598. Link: <https://doi.org/10.3390/atmos14111598>

Direkte Methoden (qualitativ) – Saugglockenverfahren

- Alternative zur extraktiven Probenahme mittels Saugglocken:
Open-Path-Laser (TDLAS)



Bilder: © Wu et al. 2023: Hotspot Detection and Estimation of Methane Emissions from Landfill Final Cover. In: Atmosphere **2023**, 14(11), 1598. Link: <https://doi.org/10.3390/atmos14111598>

Direkte Methoden (quantitativ) – Saugglockenverfahren

- Korrelation der CH_4 -Konzentration in kurzer Distanz über der Deponieoberfläche mit Ergebnissen von Haubenmessungen
- Abschätzung der Methanemissionsrate durch gemessene Konzentrationen
- Probleme:
 - Korrelationen i. d. R. relativ schwach (Messunsicherheit)
 - Nur bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten sinnvoll ($< 1 \text{ m s}^{-1}$)

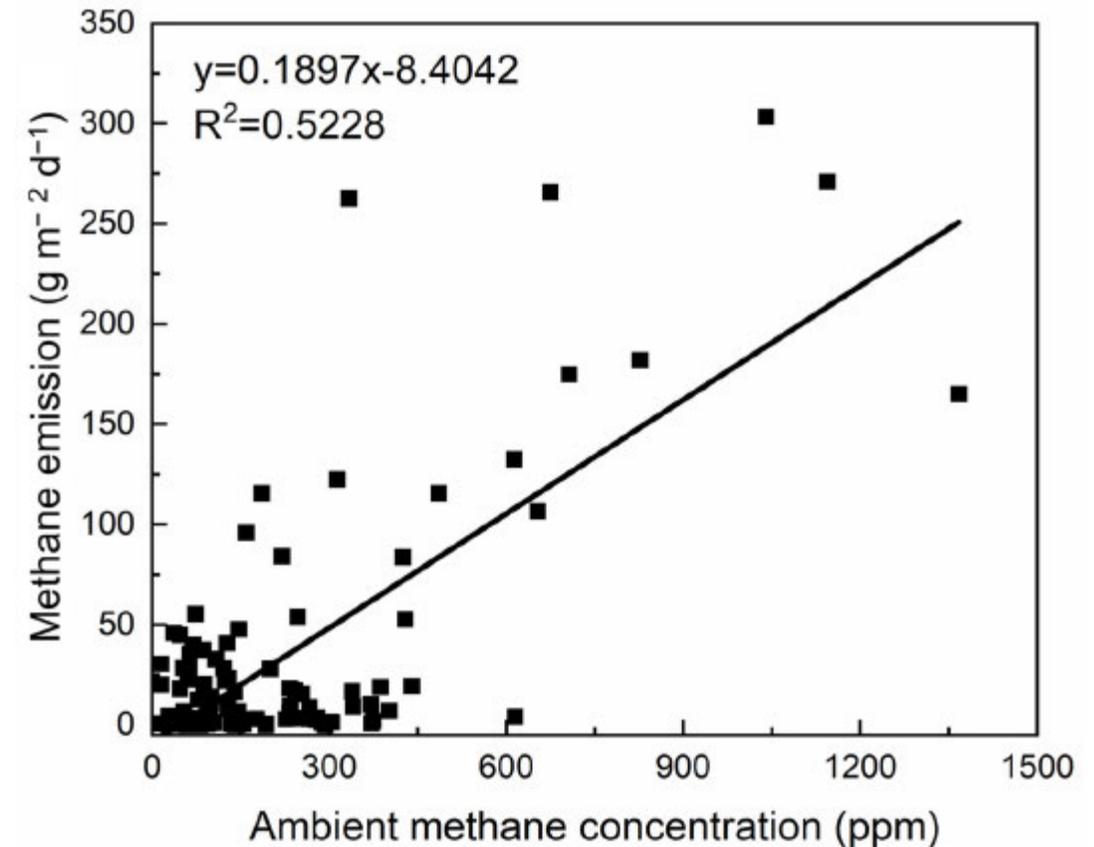


Bild: © Wu et al. 2023: Hotspot Detection and Estimation of Methane Emissions from Landfill Final Cover. In: Atmosphere **2023**, 14(11), 1598. Link: <https://doi.org/10.3390/atmos14111598>

Direkte Methoden (qualitativ) – IR-Thermografie

- Messung von Temperaturdifferenzen auf der Deponieoberfläche mittels Wärmebildkameras
- Messbedingungen:
 - Nachts / früher Morgen (große Temperaturdifferenz zwischen Deponiegas und Umgebung), aber kein Frost
 - Geringe Windgeschwindigkeiten ($< 1,5 \text{ m s}^{-1}$)
- Probleme:
 - Andere Wärmequellen (z. B. biologische Aktivität)
 - Unterschiedliches Absorptionsvermögen von Oberflächen (Boden mit oder ohne Vegetation)
- Bildgebende Systeme für Leckagedetektion an Gasanlagen (VDI 4321)

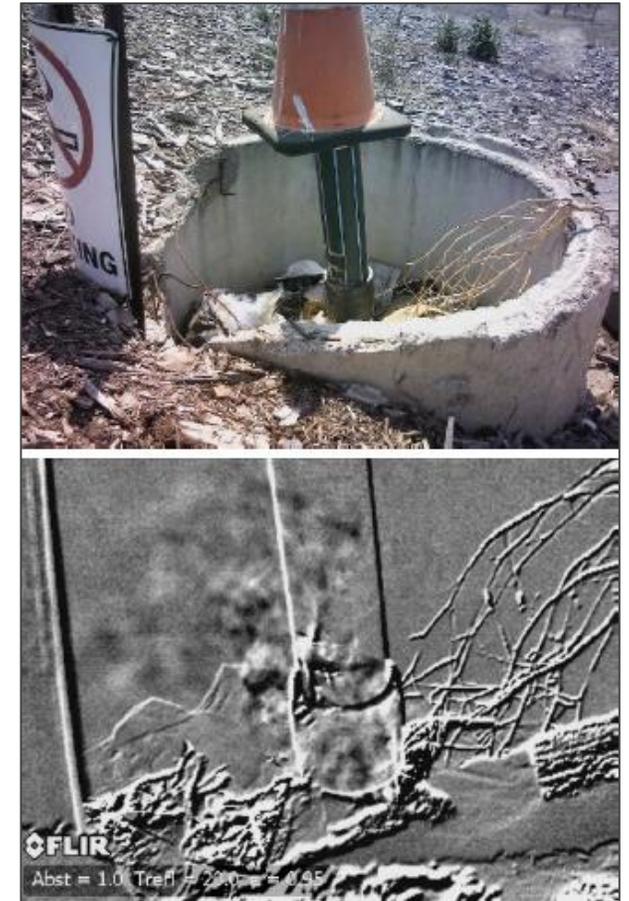
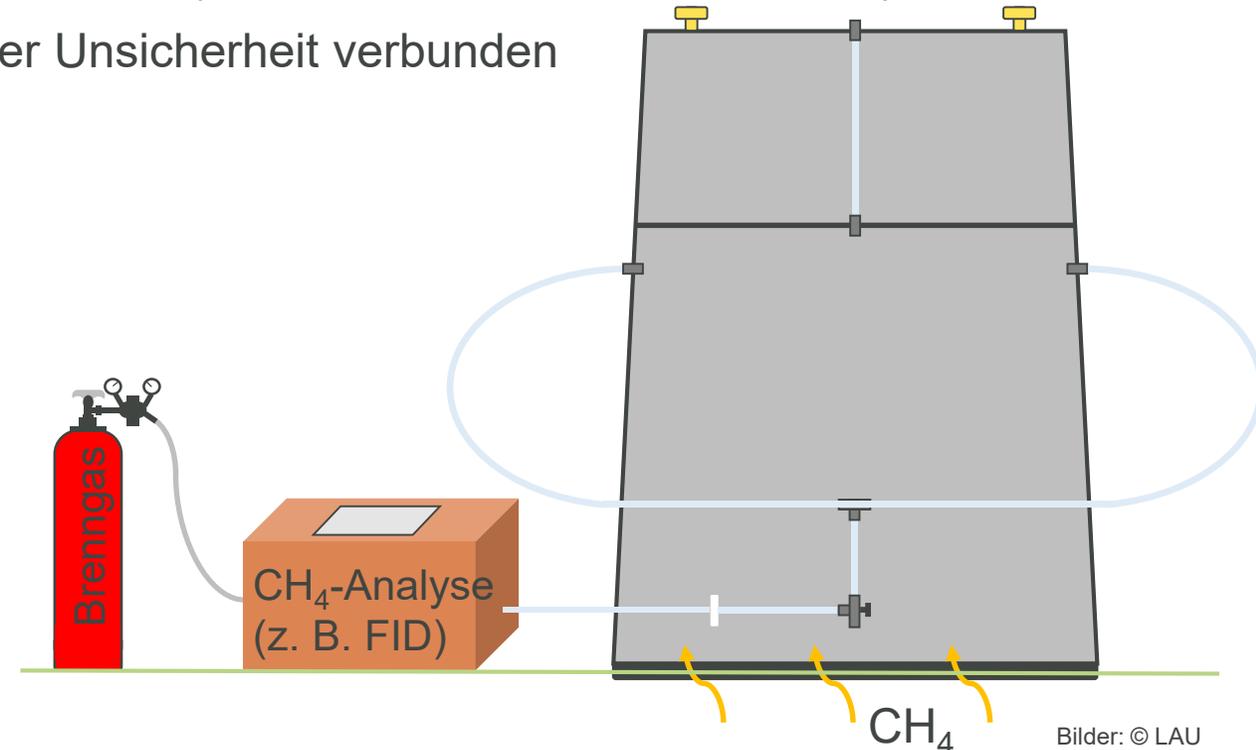
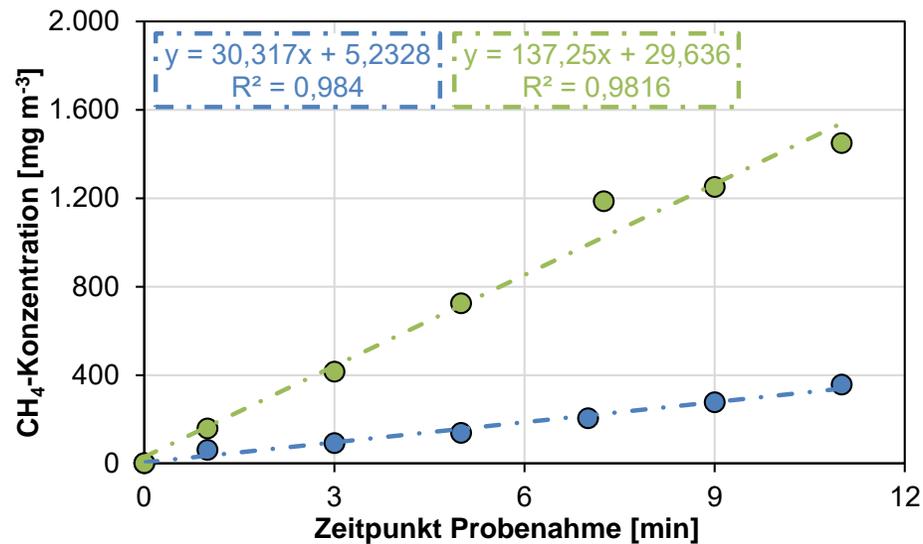


Bild: © Reinelt et al. 2022: Field measurements of fugitive methane emissions from three Australian waste management and biogas facilities. In: Waste Management 137, 294. Link: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.012>

Literaturverweise: Gebert & Pfeiffer 2017- Leitfaden I (Kap. 3.3.1.2), Mønster et al. 2019 (Kap. 2.1)

Direkte Methoden (quantitativ) – Statische Hauben

- Messung einer oberflächenspezifischen Emissionsrate in $\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ von Teilflächen (z. B. Hot-Spots)
- Messung des Konzentrationsanstiegs innerhalb der Haube (hier mit extraktiver Probenahme)
- Extrapolation auf (Gesamt)-Deponiefläche mit hoher Unsicherheit verbunden



Literaturverweise: VDI 3790 Blatt 2 (Kap. 7.4.2.2), VDI 4285 Blatt 1 (Kap. 6.2.2), Gebert & Pfeiffer 2017- Leitfaden I (Kap. 3.3.2), Mønster et al. 2019 (Kap. 2.3.1, BQS 7-3) Bilder: © LAU



Direkte Methoden (quantitativ) – Statische Hauben

- Lüfter innerhalb der Haube für bessere Durchmischung der Gasphase
- Druckausgleichventil für die Vermeidung von Überdruck in der Haube
- Hier mit Open-Path-Messung (Vorteile: schnellere Analytik; ohne extraktive Probenahme entfällt das Risiko einer unterdruckinduzierten Erhöhung der Emissionsrate)

Zhan et al. 2020: A simple and rapid in situ method for measuring landfill gas emissions and methane oxidation rates in landfill covers. In: Waste Management & Research **38(5)**, Link: <https://doi.org/10.1177/0734242X19893007>

Direkte Methoden (quantitativ) – Statische Hauben

- Haubendimensionen 1 m² bis 18 m² Grundfläche



Geck 2017: Temporal and spatial variability of soil gas transport parameters, soil gas composition and gas fluxes in methane oxidation systems. Dissertation. Universität Hamburg <https://ediss.sub.uni-hamburg.de/bitstream/ediss/7202/1/Dissertation.pdf>

Bild: © Hanson et al. 2023: Geoenvironmental assessment of climate impacts from landfill gas emissions. In: Soils and Foundations 63, 101279. Link <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101279>

Direkte Methoden (quantitativ) – Statische Hauben

- Übersicht basiert auf Yesiller et al. (2022); ergänzt ab Wu et al.
- Sehr große Schwankungsbreite der Messergebnisse
 - Verschiedene Hauben / Analysengeräte
 - Umfang (Einzelmessungen vs. Langzeitmessungen)
 - Verschiedene Oberflächenabdeckungs- und Gasfassungs- bzw. Behandlungssysteme

Deponie	Land	Q_{CH_4} [g m ⁻² d ⁻¹]	Referenz
Altamont	USA, Kalifornien	0,079 - 0,125	Green et al. 2010
Redwood	USA, Kalifornien	0,018	Green et al. 2010
Monterey Peninsula	USA, Kalifornien	0,003 - 86,3	Bogner et al. 2011
Scholl Canyon	USA, Kalifornien	0,015 - 4,43	Shan et al. 2013
Lancaster	USA, Kalifornien	0,08 - 2,43	Green et al. 2009
Tri-Cities	USA, Kalifornien	5,2 - 8,1	Abichou et al. 2011
Puente Hills	USA, Kalifornien	3,34 - 12,1	Shan et al. 2013
Calabasas	USA, Kalifornien	0,05 – 13,6	Shan et al. 2013
Honghualing	China, Shenzhen	0 - 303,3 (Mittelwert 4,3)	Wu et al. 2023
Tamangapa	Indonesien, Makassar	0,03 - 155 (Mittelwert 38,3)	Lando et al. 2017
	Spanien	0,1 - 14,2	Delgado et al. 2022
LAU-Messung	Deutschland, Sachsen-Anhalt	1,8	Reinelt (2023)

Tabelle: © Yesiller et al. 2022: Assessment of methane emissions from a California landfill using concurrent experimental, inventory, and modeling approaches. In: Waste management 154. 146 - 159 Link: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.09.024>

Tabelle erweitert mit:

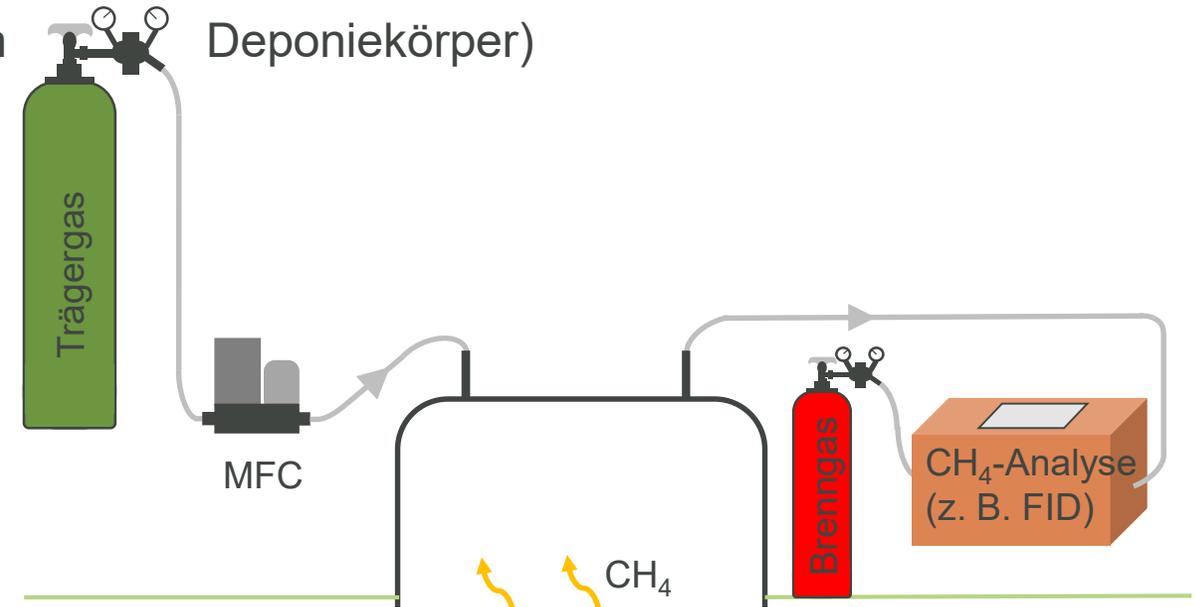
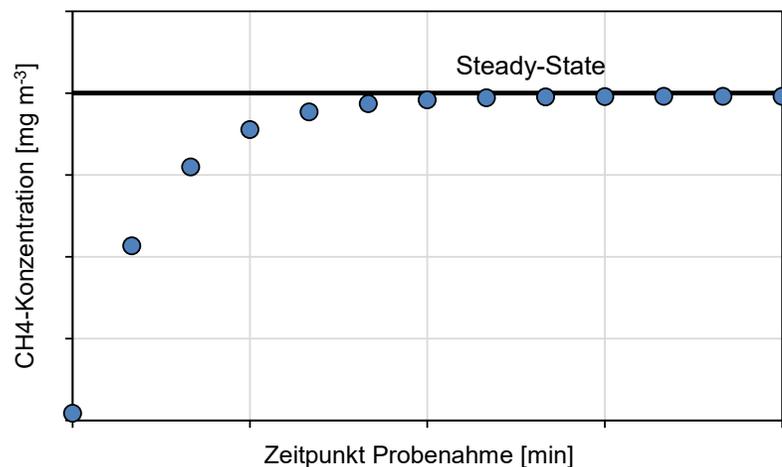
Wu et al. 2023: Hotspot Detection and Estimation of Methane Emissions from Landfill Final Cover. In: Atmosphere **2023**, 14(11), 1598. Link: <https://doi.org/10.3390/atmos14111598>

Lando et al. 2017: Application of portable gas detector in point and scanning method to estimate spatial distribution of methane emission in landfill. In: Waste Management 59, 255–266. Link: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.033>

Delgado et al. 2022: Some findings on the spatial and temporal distribution of methane emissions in landfills. In: Journal of Cleaner Production 362, 132334. Link: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132334>

Direkte Methoden (quantitativ) – Dynamische Hauben

- Im Vergleich zur statischen Haube ein offenes System → kontinuierliche Zufuhr eines Trägergases (Messung des Trägergasvolumenstromes und der Gaskonzentration in der Abluft der Haube)
- Bei Nutzung von Luft statt eines Trägergases, Berücksichtigung der Hintergrundkonzentration erforderlich
- Höhere Nachweisgrenze als bei statischen Hauben durch Verdünnungseffekt des Trägergases (geringe Austrittsgeschwindigkeit des Deponiegases aus dem Deponiekörper)





Indirekte Methoden – Tracergasmethode

- Freisetzung von Tracergasen (üblicherweise C_2H_2 oder N_2O , früher SF_6) im Bereich der Emissionsquelle → Gase mit relativ langer Aufenthaltsdauer in der Atmosphäre
- Freisetzungsrates des Tracergases wird gemessen (MFC, gravimetrisch)
- Annahme: Gleiche Ausbreitung (bzw. gleichbleibendes Verhältnis) von Tracergas und CH_4 in der Abwindfahne
- Gemeinsame Messung von Tracer-/Zielgas, häufig mittels Cavity Ring Down Spektrometern
- Statische / Dynamische Methodik

Literaturverweise: VDI 3790 Blatt 2 (Kap. 7.4.3.2), VDI 4285 Blatt 1 (Kap. 6.3.1), Gebert & Pfeiffer 2017- Leitfaden I (Kap. 3.3.3), Mønster et al. 2019 (Kap. 2.8)

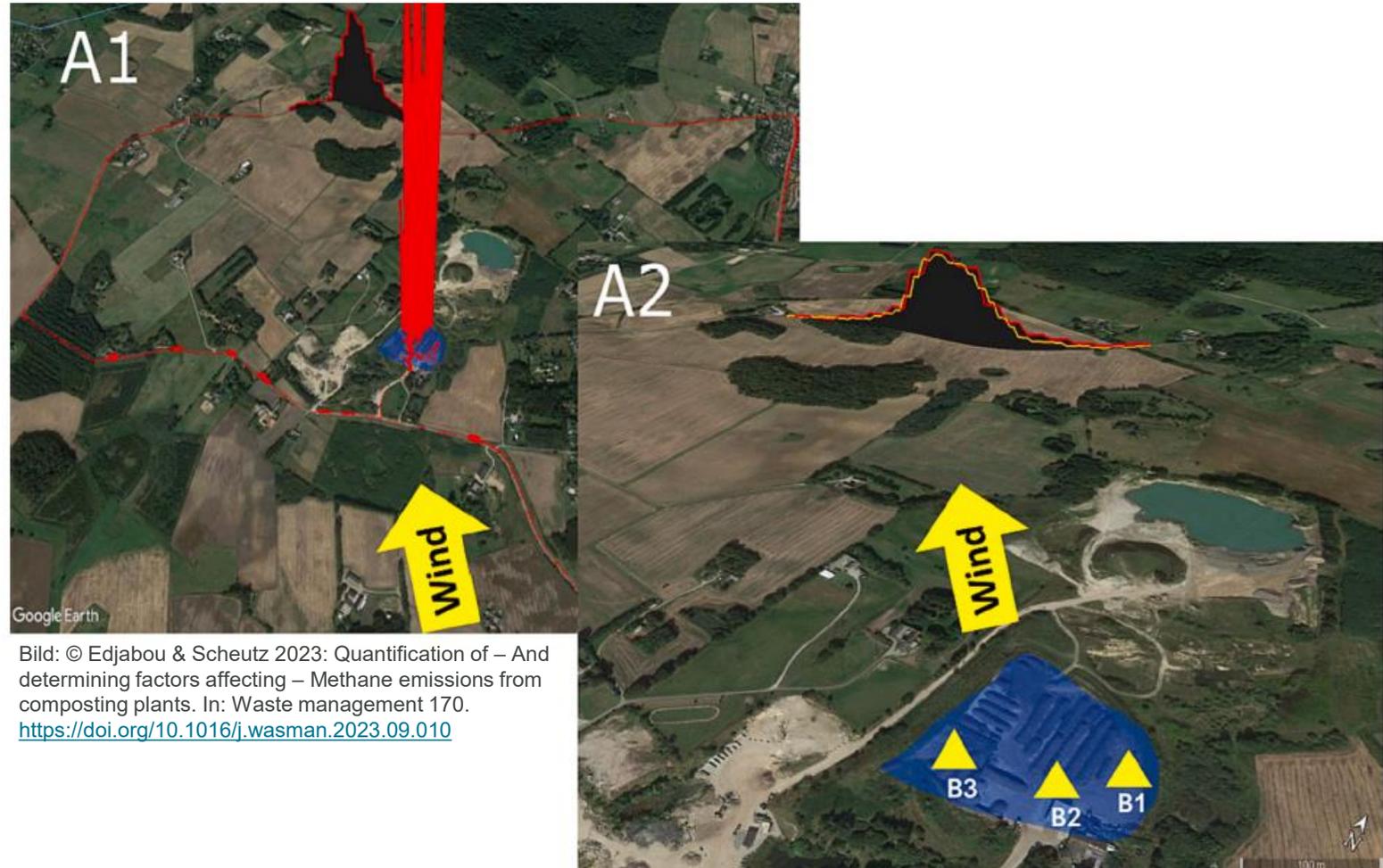


Indirekte Methoden – Tracergasmethode

- Statische Tracergasmethode
 - Zunächst Detektion der Abwindfahne (z. B. mit Gasanalysator mit extraktiver Probenahme in einem Fahrzeug)
 - Probenahme (z. B. in Gassack) für die Gasanalytik erfolgt an einem oder mehreren fixen Punkten
 - Bedeutet: dauerhaft stabile Windbedingungen während der gesamten („blinden“) Probenahme

Indirekte Methoden – Tracergasmethode

- Dynamische Tracergas-
methode
 - Aufnahme und Integration
des Profils der Abwindfahne
 - Empfindliche Messtechnik
(CRDS, ppb-Bereich) in
Fahrzeug mit extraktiver
Probenahme + GPS
 - Richtige Positionierung des
Tracergases





Indirekte Methoden – Tracergasmethode

- Vorteile
 - Kein / Wenig Einfluss nahegelegener Fremdquellen in Abhängigkeit der Bedingungen
 - Relativ simpel (keine Modellierungen)
- Nachteile
 - Gutes Straßennetz im Umfeld erforderlich
 - Abhängigkeit von den richtigen Wetterbedingungen

Bild: Holmgren et al 2015: MEASUREMENTS OF METHANE EMISSIONS FROM BIOGAS PRODUCTION. REPORT 2015:158
<https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/18539/measurements-of-methane-emissions-energiforskrapport-2015-158.pdf>

Indirekte Methoden – Tracergasmethode

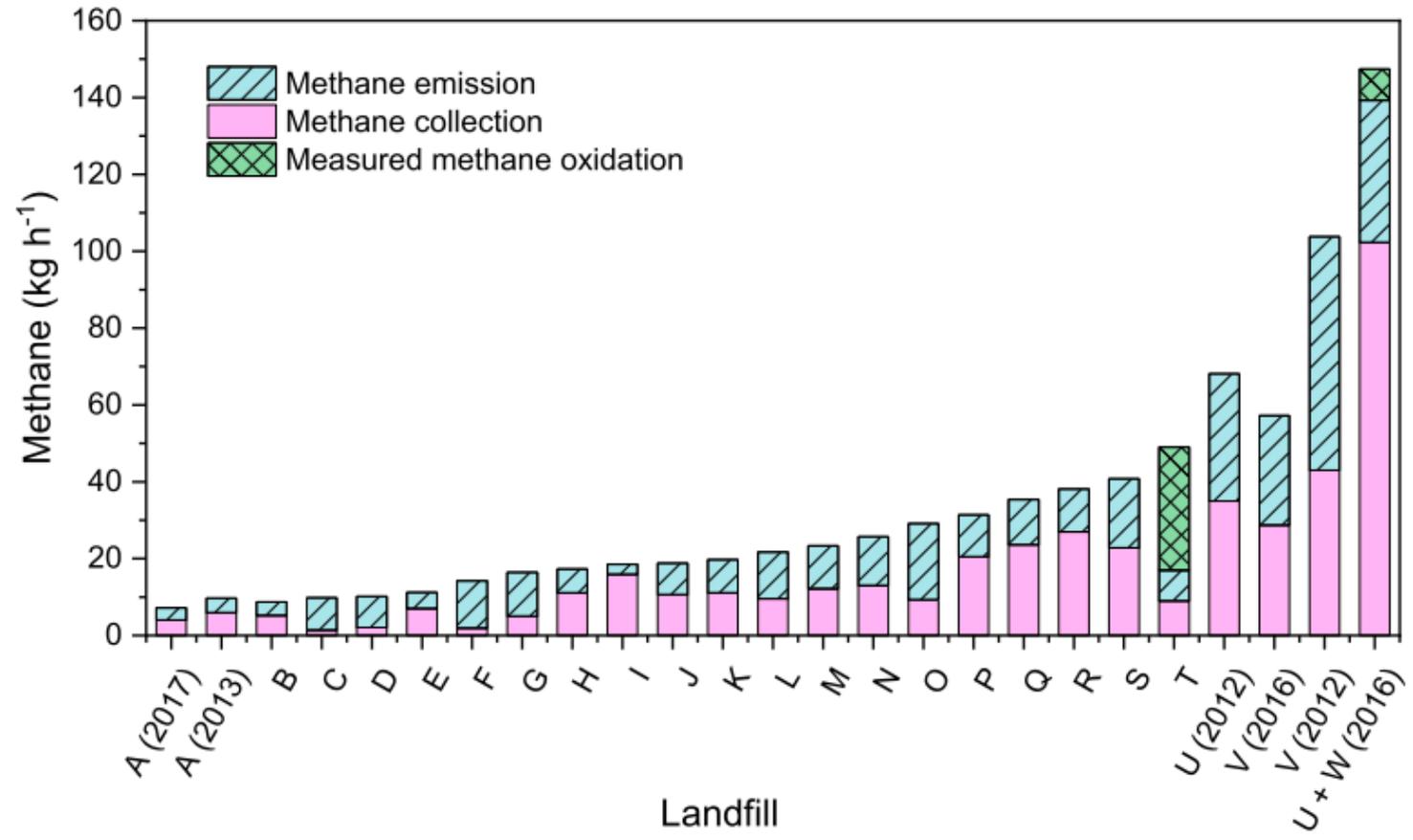


Fig. 1. Methane collection, emission and oxidation at the studied Danish landfills (kg h⁻¹).

Bild: © Duan et al 2022: Efficiency of gas collection systems at Danish landfills and implications for regulations. In: Waste management 139. 269 – 278. Link: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.023>

Indirekte Methoden – Tracergasmethode

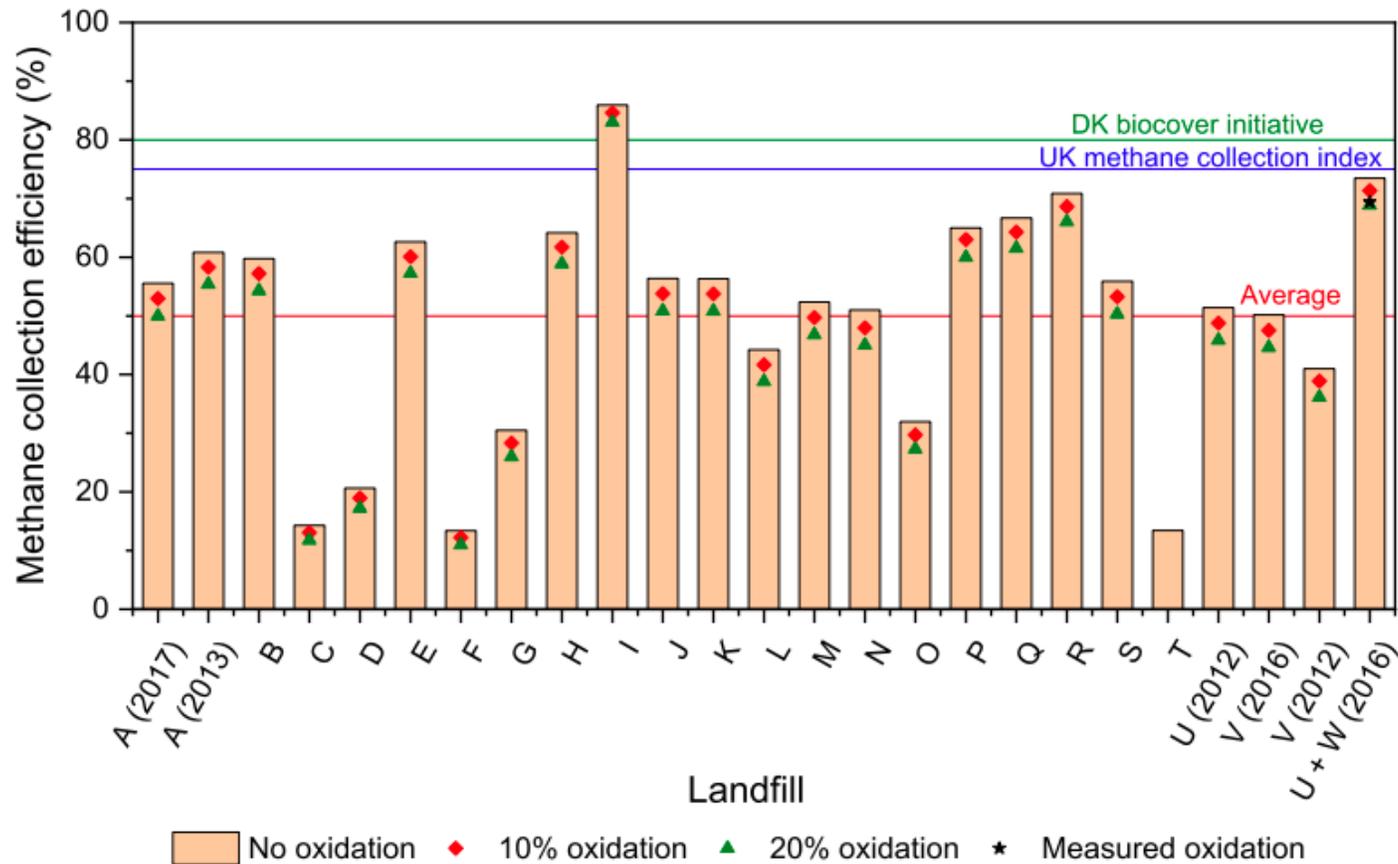


Fig. 2. Gas collection efficiency at the studied Danish landfills.

Bild: © Duan et al 2022: Efficiency of gas collection systems at Danish landfills and implications for regulations. In: Waste management 139. 269 – 278. Link: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.023>



Zusammenfassung

- Bestimmung der Methanemissionen aus diffusen Quellen (Deponie)
 - Direkte Methoden (näher an der behördlichen Praxis)
 - Messung unmittelbar an der Quelle
 - Schwachstellenanalyse
 - Qualitative / quantitative Messmethoden
 - Indirekte Methoden (näher an Wissenschaft und Forschung)
 - Messung im Abstand zur Quelle
 - Quantifizierung der Emissionen großer Flächenbereiche / ganzer Deponiestandorte
 - Quantitative Methoden

Ausblick

- Drohnenbasierte Systeme (Flugbasierte-Massenbilanzmethode)
- Zunehmendes Potenzial?
 - Drohnen leistungsfähiger und günstiger
 - Ausrüstbar mit etablierter Messtechnik

Bild: © Shaw et al. (2021): Methods for quantifying methane emissions using unmanned aerial vehicles: a review. *Phil. Trans. R. Soc. A* 379:20200450. Link <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0450>



Ausblick

measurement type	mass (kg)	power consumption (W)	precision	resolution (Hz)	notes	reference
off-axis integrated cavity output spectroscopy	19.5 (with ancillary systems)	70	2 ppb (in laboratory)	1	temperature interference	[76]
mid-infrared open-path wavelength modulated spectroscopy	4.6 1.6	30	5 ppb 10 ppb	1–10		[70,87]
handheld open-path	0.6		10%	10	path-averaged concentration	[35,37]
near-infrared standoff tunable diode laser absorption spectroscopy	1.4	1			path-averaged concentration	[69]
custom open-path	3.1	25	100 ppb or 10%	1	path-averaged concentration	[71]
near-infrared vertical cavity surface-emitting laser	2	2	1%	1	long-term drift around 1%	[39]
near-infrared tunable diode laser absorption spectroscopy	6		10%	0.5		[68]
tunable laser spectroscopy	0.25		10 ppb	1	potentially 100 s ppb drift due to thermal interference	[72]
open-path cavity ring-down spectroscopy	4.1	12	5–10 ppb (in laboratory) 10–30 ppb (in field)	1		[77]
open-path tunable laser diode spectroscopy					noise on the order of 1000 ppb path-averaged concentration	[73,74]

Tabelle: © Shaw et al. (2021): Methods for quantifying methane emissions using unmanned aerial vehicles: a review. *Phil. Trans. R. Soc. A* **379**:20200450. Link: <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0450>



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dipl.-Ing. (FH) Torsten Reinelt

torsten.reinelt@lau.mwu.sachsen-anhalt.de

+49 345 5704 486

Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt

Reideburger Straße 47

06116 Halle (Saale) / Deutschland