

Ludwigsburg, den 7. September 2016

Abschlussbericht

Einsatzprüfung und -anpassung eines Emissionsmessverfahrens für Methanemissionen auf Deponien mittels des Lasermessverfahrens CHARM[®] aus Mitteln des Kommunalen Investitionsfonds des Landes Baden-Württemberg.



Das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg hat der Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg mbH auf den Förderantrag vom 11. März 2016 am 12. April 2016 eine Zuwendung in Höhe von 22.000 € für die Durchführung der Einsatzprüfung und -anpassung eines Emissionsmessverfahrens für Methanemissionen auf Deponien mittels des Lasermessverfahrens CHARM[®] bewilligt.

Der Förderungsantrag bezog sich auf die Validierung des o.g. Messsystems an drei Deponiestandorten in Baden-Württemberg und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Anwendung des Systems für das Deponiegasmonitoring auf Deponien im Allgemeinen. Aus den Emissionsmessergebnissen für die jeweiligen Standorte lässt sich auch die Funktionalität bzw. Wirksamkeit der Gaserfassung und ggf. erforderliches Investitionspotential zur Optimierung der Gasfassung auf den Deponien ableiten.

In einem Kooperationsprojekt des Landkreises Ludwigsburg sowie der Stadtkreise Pforzheim und Karlsruhe wurde an jeweils einer ihrer Deponien das System CHARM[®] unter Betriebsbedingungen eingesetzt und die Ergebnisse mit zeitgleich durchgeführten Haubenmessungen nach dem FID- bzw. dem LAS-Prinzip abgeglichen. Daraus sollen zunächst Randbedingungen für den Einsatz von CHARM[®] auf flächigen Betriebsanlagen und die Anwendbarkeit auf Deponien mit ihren bewegten Topografien

ermittelt werden. Zudem sollte durch die parallele Auswertung der Ergebnisse der seitherigen Messmethoden und der neuen Methodik deren Vor- und Nachteile eingeschätzt werden. Daraus leiten sich Handlungsempfehlungen für die Betreiber früherer Rohmülldeponien zur Überwachung der Deponiegasemissionen ab.

Die Federführung der Projektabwicklung lag bei der AVL Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg mbH, die als Gesellschaft des Landkreises Ludwigsburg die Betriebsführung der kreiseigenen Deponien inne hat. Im Verantwortungsbereich der AVL wurde die Einsatzprüfung auf der Deponie BURGHOFF (Landkreis Ludwigsburg) durchgeführt. Für die Stadt Pforzheim wurde der Einsatz auf der Deponie HOHBERG und für die Stadt Karlsruhe auf der Deponie KARLSRUHE-OST erprobt. Alle Deponien dienten vor dem sogenannten „TASi-Stichtag“ im Jahr 2005 der Entsorgung von unbehandeltem Rohmüll und erzeugen noch immer in erheblichen Mengen methanhaltige Deponiegase.

Zur wissenschaftlichen Unterstützung wurde das Projekt von der LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Referat 35, Sachgebiet Kreislaufwirtschaft, begleitet.

Nach eingehender Abstimmung der Vorgehensweise wurden die Messflüge am 28. April 2016 nachmittags und am 29. April 2016 vormittags durchgeführt.

Zur Auswertung erster Ergebnisse fand am 8. Juni 2016 eine Besprechung beim Umweltministerium, Referat 25, Kommunale Kreislaufwirtschaft, Abfalltechnik, im Beisein von Herrn Nagel (UM), Herrn Fabian (LUBW), Herrn Ulbricht von Fa. ADLARES sowie den Vertretern der o. g. Deponiebetreiber statt. Anregungen aus dieser eingehenden Erörterung des Messverfahrens und der Ergebnisse der Befliegung Ende April 2016 sind in den Abschlussbericht eingegangen.

1. Ergebnisse

Das Messprinzip und die erzielten Ergebnisse der Einsatzprüfung sind im Abschlussbericht

CHARM[®]-Befliegung der Deponien Karlsruhe-Ost, Hohberg und Burghof

ADLARES GmbH / Matthias Ulbricht, Sebastian Dominok,
vom 22.07.2016

ausführlich dargestellt. Der Abschlussbericht der Fa. ADLARES ist als Anlage 1 Teil des Abschlussberichtes.

Im Rahmen dieses Projekts wurde erstmalig CHARM[®] zur Dichtheitsprüfung im Vergleich mit einer zeitgleich stattfindenden konventionellen Deponiegas-Emissionsmessung eingesetzt. Darüber hinaus wurde erstmals versucht, die Gesamtemission der Deponie zu messen.

Die Dichtheitsprüfung erfordert keine weiteren bodengebundenen Messungen, so dass sie kurzfristig durchgeführt werden kann. Die wesentlichen Emissionen wurden sowohl von CHARM[®] als auch mit den bodengebundenen Haubenmessungen nach dem FID- oder dem LAS-Prinzip aufgefunden. Auch die bewegte Topografie der Deponien, hier insbesondere der Deponie BURGHOF, war kein Hindernis für die Anwendung des Messprinzips von CHARM[®].

Die wesentlichen Vorteile von CHARM[®] liegen darin, dass auch schwer zugängliche Areale flächendeckend überprüft werden können. Dies führt insgesamt zu einer Optimierung der Emissionsüberwachung durch eine komplettere, da flächendeckende Scannung des Deponiegeländes. Darüber hinaus können ohne zusätzlichen Aufwand weitere Daten wie georeferenzierte Luftbilder oder das Höhenprofil der Deponie erzeugt werden.

Mittels der CHARM[®]-Fenceline-Befliegung war es erstmals möglich, die Gesamtemission von Deponien messtechnisch zu bestimmen. Hierbei muss jedoch eine bodengestützte Windmessung erfolgen. Die Standardabweichung dieser Messungen kann möglicherweise durch erweiterte numerische Verfahren und die Wahl geeigneter Wetterbedingungen (insbesondere stabiler Wind) noch verringert werden.

2. Ergebnisse der Fenceline-Befliegung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Fenceline-Befliegung den aktuellen Mitteilungen der Deponiebetreiber über die Methanemissionen in den PRTR¹-Berichten des Jahres 2015 gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten, dass die bisherigen Daten als Hochrechnung aufgrund von in der Regel zwei bis vier bodengebundenen Methanemissionsmessungen gewonnen wurden. Diesen stehen die Daten nur einer Befliegung gegenüber. Darüber hinaus wurde insbesondere bei der Befliegung der Deponie BURGHOF der Zaun des Messgebietes nicht entlang der Deponiegrenze gelegt, sondern im Rahmen dieser Versuchsbefliegung, mit Rücksicht auf die schwierige Topographie der Deponie, innerhalb der Deponie platziert, so dass mit den Ergebnissen nicht die Gesamtemission dieser Deponie erfasst wird. Sofern das Verfahren zur Quantifizierung der Methanemissionen eingesetzt werden sollte, muss die Grenzziehung für die jeweilige Deponie optimiert werden.

¹ Bund, Gesetz zur Ausführung des Protokolls über Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister vom 21. Mai 2003 sowie zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 166/2006 vom 6. Juni 2007 (BGBl. I S. 1002)

Die Bewertung der mit der Fenceline-Methode ermittelten realen Methanemissionsmengen kann nur durch den Vergleich der bisher dafür genutzten Methoden im Rahmen der PRTR-Meldepflichten erfolgen. Die Messungen mittels FID bzw. LAS liefern hierfür keine Ergebnisse.

Bei den hier mittels CHARM[®] ermittelten Methanaustrittsmengen, die auf einen Jahreswert hochgerechnet wurden, bleibt zu berücksichtigen, dass es sich um eine Tagesmomentaufnahme von freigesetzten Methanemissionen handelt. Aufgrund der in Anlage 1 Kap. 4 dargestellten Wetterbedingungen war auf allen Deponien eine gehemmte Methanemission gegeben. Starke Regenereignisse vor den Messflügen führten zu teilgesättigten Böden (hohe Bodenfeuchte), zudem erfolgte während der Flüge ein deutlicher Luftdruckanstieg. Damit wird die reale Jahresmethanemissionsmenge um einen Faktor 1 + x höher liegen, als hier anhand des Tagesmomentwertes bilanziert werden kann. Im Abgleich mit den für PRTR ermittelten (nach Modellrechnungen bilanzierten) Werten aus dem Jahre 2015 für die Deponien (siehe Tabelle 1), zeigt sich, dass sich die bilanzierten Methanmengen um einen Faktor von ca. 3,1 bis 8,6 unterscheiden.

Tabelle 1: Gegenüberstellung jährliche Methanfrachten (PRTR, CHARM[®] gemessene sowie verwertete Methanmenge)

Parameter	Deponie HOHBERG	Deponie KARLSRUHE-OST	Deponie BURGHOFF
Freigesetzte CH ₄ - Menge nach PRTR in 2015 [t]	78,57	19,40	494,53
Mittels CHARM [®] gemessene CH ₄ – Menge [t]	20,73 (± 13,29)	6,28 (± 5,65)	57,78 (± 41,45)
Verwertete CH ₄ - Menge nach PRTR in 2015 [t]	332,42	25,39	1.539,07
CH ₄ -Menge PRTR / CH ₄ -Menge CHARM [®]	3,79	3,09	8,56

Neben dem oben beschriebenen Aspekt der „gehemmten“ Tagesmomentaufnahme bei der CHARM[®] Messung, die zu einem geringeren Ergebnis führte, muss bei der Gegenüberstellung der Daten (Tabelle 1) auch berücksichtigt werden, dass die nach PRTR angegebenen Daten sich auf die Gesamtdeponiefläche beziehen. Im Projekt wurden bei der CHARM[®] Befliegung – wie beschrieben - nicht in jedem Fall die gesamte Fläche beflogen, so dass sich allein hieraus ein Faktor > 1 ergibt.

3. Fortführung der Untersuchungen

Die Ergebnisse der Evaluation sind ermutigend, sollten jedoch im Kreis von Deponiegas-Fachleuten noch weiter erörtert werden. Wir empfehlen dazu unter anderem die Diskussion innerhalb des *DGAW Arbeitskreises Deponiegas Baden-Württemberg* auf seiner 34. Sitzung im September 2016.

Das angewandte Messverfahren führt aus Sicht der am Fördervorhaben beteiligten Deponiebetreiber derzeit noch zu Kosten, die über den Kosten der bodengebundenen Messungen liegen. Fa. ADLARES hat jedoch ausgeführt, dass eine Optimierung des Messverfahrens im Sommer 2016 realisiert wird, die zu einer wesentlichen Beschleunigung des Messablaufes führt. Es ist vorstellbar, dass damit das Verfahren auch wirtschaftlich konkurrenzfähig zu den seitherigen Messmethoden wird.

Nachdem die Ergebnisse dieser ersten Evaluation von CHARM[®] für Deponiebetriebe positiv ist, sollte nun in einem zweiten Schritt die Anwendung des optimierten Messverfahrens unter echten Betriebsbedingungen bei einer Anzahl von acht bis zehn Deponien innerhalb eines Tages getestet werden. Daraus kann dann auf die tatsächlichen Betriebskosten geschlossen werden.

Sofern sich dann herausstellen sollte, dass das Messverfahren zu vergleichbaren Kosten wie bodengebundene Messungen ausgeführt werden kann, hätte das Umweltministerium gute Argumente, um den Deponiebetreibern einen Umstieg auf das System CHARM[®] zu empfehlen, das nur bei kooperativer Beauftragung des Systembetreibers durch mehrere regional benachbarte Deponiebetreiber wirtschaftlich angewendet werden kann.

Ein interessanter Anwendungsfall kann die Verifizierung von Ergebnissen zur Reduzierung der Methangesamtemission im Zuge der im Rahmen der NKI geförderten Projekte zur Reduzierung klimaschädlicher Emissionen sein. Mit der CHARM[®]-Fenceline-Befliegung wäre es möglich, die Gesamtemission von Deponien, an denen solche Maßnahmen durchgeführt werden, zu Projektbeginn und nach einigen Jahren erneut zu messen und damit den erzielten Erfolg zu überprüfen.

4. Rückfragen zum Projektbericht

Für Rückfragen zum Projektbericht steht Ihnen bei der

- Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg mbH
Dipl.-Ing. Albrecht Tschackert,
Tel. 07141 / 14456-15 sowie albrecht.tschackert@avl-lb.de
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Dipl.-Ing. Falk Fabian
Telefon: +49 (721) 5600 – 2316 sowie Falk.Fabian@lubw.bwl.de

zur Verfügung.

Albrecht Tschackert

Anlage:

Abschlussbericht der ADLARES GmbH
zur Einsatzprüfung des Systems CHARM® vom 22.07.2016



Abschlussbericht

CHARM[®]-Befliegung der Deponien Karlsruhe - Ost, Hohberg und Burghof

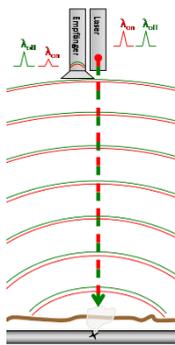
Matthias Ulbricht, Sebastian Dominok
ADLARES GmbH

Teltow, den 22.07.2016

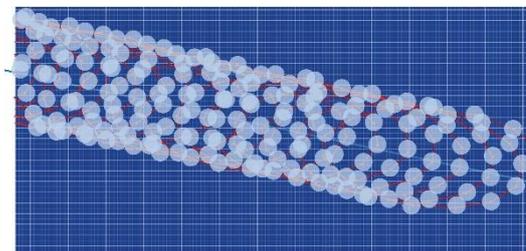
1. Aufgabenstellung

Im Rahmen dieses Projekts soll die Eignung der CHARM[®]-Technologie zur Überprüfung der Emissionssituation von stillgelegten Hausmülldeponien untersucht werden. Dazu wurden exemplarisch die drei Deponien Karlsruhe - Ost, Hohberg und Burghof Ende April 2016 mit CHARM[®] befliegen.

2. Die CHARM[®]-Technologie



Bei CHARM[®] handelt es sich um ein helikoptergestütztes LIDAR-System, das nach dem Prinzip der differentiellen Absorption arbeitet (DIAL) und spezifisch den empfindlichen Nachweis von Methan ermöglicht. Hierzu wird vom System für eine Messung jeweils ein Paar von kurzen Laserpulsen ausgesandt, deren infrarote Wellenlänge so abgestimmt sind, dass ein Puls des Paares spezifisch von Methan absorbiert wird, während der zweite Puls als Referenz nicht von Methan beeinflusst wird. Beide Pulse werden vom System in Richtung Erdboden ausgesandt und dort in alle Richtungen gestreut. Der kleine Teil des Lichts, der wieder in Richtung des Helikopters gestreut wird, wird dort mit einem Teleskop auf einen Detektor fokussiert und dann analysiert. Aus dem Verhältnis der rückgestreuten Lichtintensitäten lässt sich direkt die Zahl der Methanmoleküle auf dem Lichtweg bestimmen.



Die mit einer Frequenz von 100 Messungen je Sekunde aufgenommenen Messpunkte werden am Boden mit Hilfe eines Scanners auf einem einstellbar breiten Streifen („Messpunkt-Streifen“) verteilt. Dieser Streifen wird automatisch um eine vom Nutzer vorgegebene zentrale Spur („Tracking-Spur“) herum gelegt.

3. Einsatz der CHARM[®]-Technologie bei der Deponiebefliegung

a. Dichtheitsprüfung

Für den Einsatz von CHARM[®] zur Dichtheitsprüfung von Deponien werden die Tracking-Spuren so über die Deponiefläche gelegt, dass die Messpunktstreifen die zu überprüfende Deponiefläche vollständig bedecken. Die Spuren werden mit einer Geschwindigkeit von 30 – 40 kn in einer Höhe von 100 – 130 m abgeflogen. Bei der Auswertung der Messdaten werden dann die Stellen lokalisiert, an denen erhöhte Methankonzentrationen sichtbar werden und die damit auf Undichten in der Deponieabdeckung schließen lassen. Hierzu wurden zwei Verfahren angewendet:

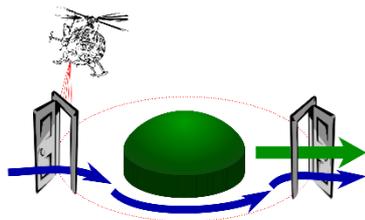
- i. Das auf Pipelines angewandte Verfahren bewertet mehrere Messpunkte, die maximal 5 m Entfernung aufweisen. Bei mindestens 3 Messpunkten mit obigem Entfernungskriterium, die außerdem die dynamisch errechnete Alarmschwelle überschreiten, wird eine Gasmeldung ausgegeben. Die Gasmeldung wird dann entsprechend ihrem abgeschätzten integralen Methangehalt in eine von vier Klassen eingeteilt.

Dieses Verfahren hat sich auf Pipelines als zuverlässig und stabil erwiesen. Bei flächigen Befliegungen mit aneinander liegenden Messpunktstreifen werden keine Sektor-übergreifenden Wolken erkannt. Daher wurde im Rahmen dieser Befliegung ein weiteres Auswerteverfahren hinzugefügt.

- ii. Um hier einerseits möglichst empfindlich auch kleine Gaswolken zu detektieren, andererseits aber nicht jede statistische Fluktuation zu melden, wurde als Methanhintergrund an jedem Punkt eine Mittelung über einen Umkreis von 20 m Radius vorgenommen. Darüber hinaus wurde die Mittelung über einen Umkreis von 5 m Radius betrachtet und hiervon der Hintergrund abgezogen. Hierdurch werden lokal höhere Gaskonzentrationen, die charakteristisch für Gasaustritte sind, empfindlich erkannt. Allerdings werden größere flächige Emissionen nicht im Sinne der Warnfunktion einer punktuellen Quelle ausgegeben.

b. Bestimmung der Gesamtemission

Hierzu wird eine Tracking-Spur um die zu untersuchende Fläche gelegt. Diese Spur wird



(zur Verbesserung der Messstatistik) mehrfach umflogen und dabei die Methankonzentrationen entlang der Spur aufgezeichnet. Darüber hinaus werden während der Methanmessungen die Winddaten aufgezeichnet. Die Windmessung erfolgt an einer Position auf der Deponie in einer Höhe von 10 m über Grund mit einer Messung alle 5 s. Für die Auswertung wird die Tracking-Spur in ca. 1 m lange

Abschnitte unterteilt und die in den Abschnitt fallenden Methanmessungen gemittelt.

Für die von der Fläche produzierte Methanmenge gilt dann:

$$F_{Methan} = \sum \bar{c}_k \cdot \bar{x}_k \cdot \bar{w} = \sum \bar{c}_k \cdot |\bar{x}_k| \cdot |\bar{w}| \cdot \sin \alpha_k$$

mit

\bar{c}_k : Über das Spurelement gemittelte Methansäulenkonzentration

\bar{x}_k : Spurelement

\bar{w} : Windvektor

α_k : Winkel zwischen Spurelement und Windvektor

Unsicherheiten bei der Emissionsbestimmung liegen insbesondere in der Messung des Windfelds, das für die Ausbreitung des Gases relevant ist. Um diese Unsicherheit zu begrenzen, wird zusätzlich bei einem Teil der Messflüge kontrolliert Methan mit einer konstant eingestellten Emissionsrate aus einer Gasflasche emittiert. Dieses Gas ist bei den entsprechenden Überflügen als zusätzlicher Offset des emittierten Methans sichtbar. Weicht diese zusätzlich gemessene Methanmenge von dem tatsächlich eingestellten Gasfluss ab, so kann das Verhältnis aus Ausströmung und gemessener zusätzlicher Emission als Korrekturfaktor für die gemessene Emission ohne zusätzlichen Gasfluss eingesetzt werden. Die Auswertung der Daten erfolgt numerisch. Aufgrund der relativ großen Flughöhe (100 – 150 m ü.G.) im Vergleich zu den Abmessungen der Deponien ist weitgehend sichergestellt, dass alles von der Deponie emittierte Methan messtechnisch erfasst wird.

c. Sonstiges

Die Konzentrationsangaben in ppm stellen die über den Messweg gemittelten Gaskonzentrationen dar. Sie sind daher nicht mit den Konzentrationsangaben von FID-Messungen o.ä. vergleichbar. Da sich Emissionen aus der Deponie nur in dünnen Schichten über dem Erdboden bemerkbar machen, ist die relative Änderung der Messwerte nur gering.

Mit Hilfe der LIDAR-Messungen kann auch ein Höhenprofil der Deponie erstellt werden. Die Messpunktdichte des eingesetzten LIDAR-Systems ist jedoch deutlich geringer als die Dichte üblicher 3D-Vermessungs-LIDAR-Systeme. Auch die Entfernungsauflösung ist geringer als bei Vermessungs-Systeme, so dass die Daten nicht für hochpräzise Kartierungen eingesetzt werden sollten.

Weiterhin werden Fotos der beflogenen Fläche aufgezeichnet, die später perspektivisch korrigiert und georeferenziert werden.

Alle im Folgenden als Karten / Luftbilder mit Overlay dargestellten Ergebnisse sind eingenordet (Norden oben).

4. Rahmenbedingungen

a. Befliegungszeitraum

Die Befliegung wurde am 28.04.2016 nachmittags und am 29.04.2016 vormittags durchgeführt.

b. Wettersituation

Zwei Tage vor der Befliegung kam es in der Befliegungsregion zu starken Niederschlägen, teils als Regen, teils als Schnee. Am 28.04. kam es vormittags auch noch zu leichten Niederschlägen, so dass der Boden bei den ersten Messungen noch recht feucht war. Der Luftdruck stieg vom 26.04. bis zum 28.04. um ca. 12 hPa an. Zum 29.04. ist nur ein leichter Anstieg zu verzeichnen (Quelle: DWD und AVL).

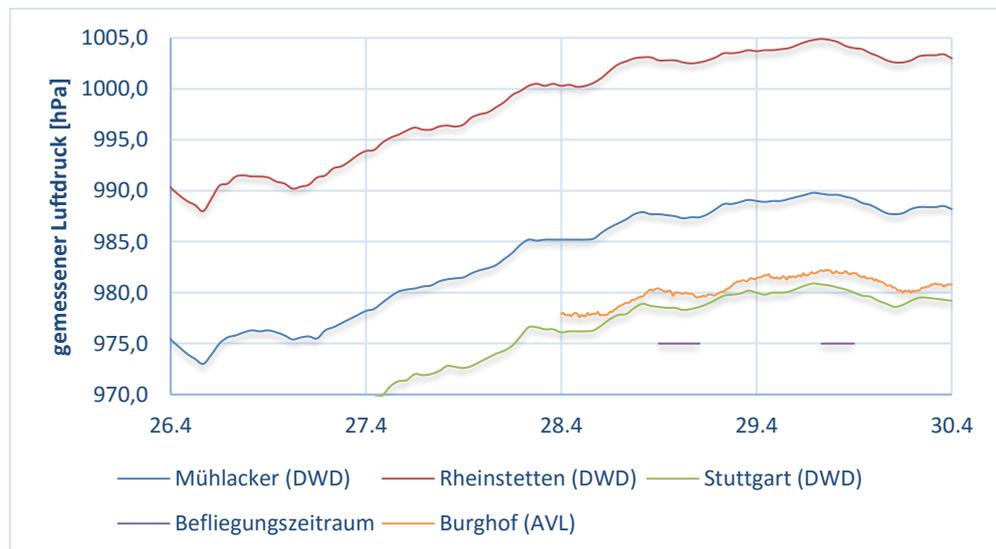


Abb. 1: Gemessener Luftdruck verschiedener Wetterstationen in der Umgebung der befliegenen Deponien (Quelle: Deutscher Wetterdienst). Die Messdaten aus Burghof wurden vom Deponiebetreiber bereitgestellt.

Dies bedeutet, dass die Messungen unter Bedingungen vorgenommen wurden, die eine untere Abschätzung der Emissionen darstellen, da die Deponien durch den Luftdruckanstieg eher „einatmen“.

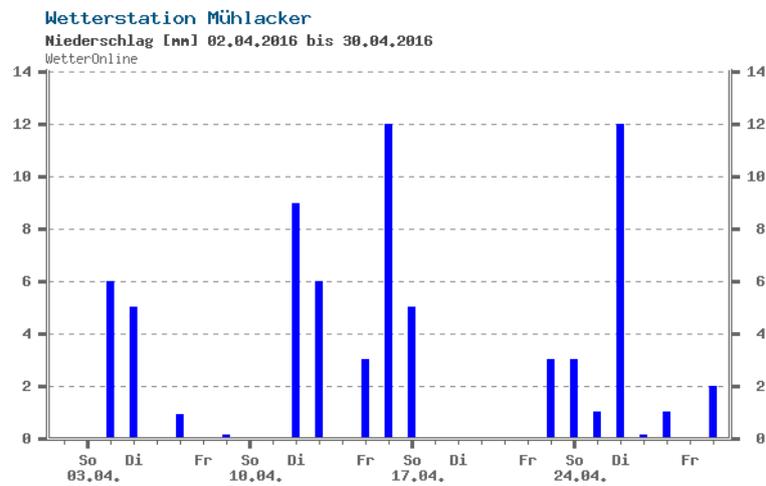


Abb. 2: Niederschläge an der Wetterstation Mühlacker (Quelle: WetterOnline.de)

Am Donnerstag herrschten vorwiegend westliche Winde mit 2 – 5 m/s. Freitagvormittag war der Wind mit 1 – 3 m/s aus östlichen Richtungen schwächer, er drehte aber später auf West mit 4 – 6 m/s.

5. Karlsruhe - Ost

a. Flugspuren & Messpunktdichte



Abb. 3: Lage der Tracking-Spuren



Abb. 4: Messpunktdichte

Die Messpunktdichte war überall ausreichend groß, an den Rändern konnte es im Bereich des Bewuchses mit höheren Pflanzen zur Reduktion der Messpunktdichte kommen. Der Durchmesser der Messpunkte am Boden beträgt je nach Flughöhe ca. 80 cm bis 1 m. Je nach Verteilung kann es dabei auch zur Überlappung der Messpunkte kommen.

b. Höhenprofil

Da bei der Gasmessung auch immer die Länge der optischen Wegstrecke bestimmt wird, kann unter Verwendung dieser Daten im Zusammenhang mit den Navigationsdaten

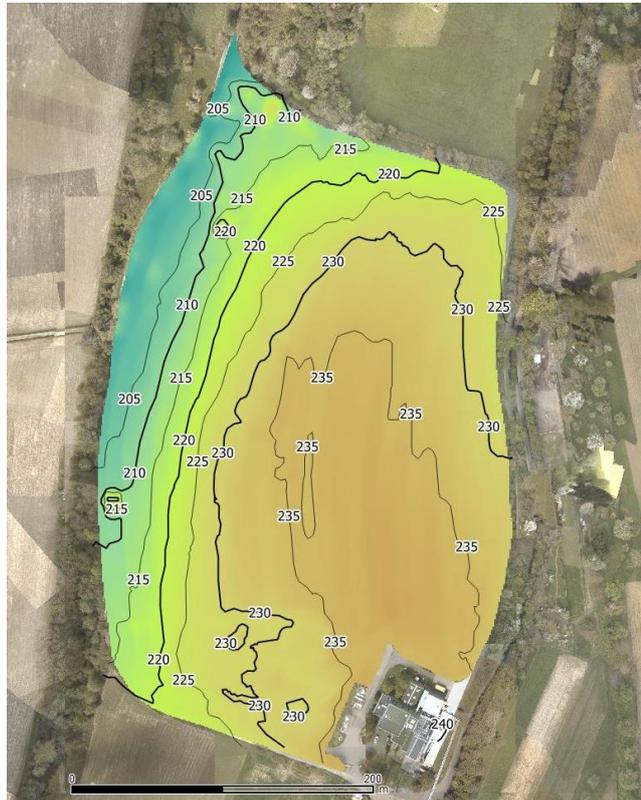


Abb. 5: Höhenprofil

auch ein Höhenprofil der Deponie erstellt werden. Im Vergleich zu dem vom Auftraggeber gelieferten Höhenprofil treten insbesondere an Punkte mit höherem Bewuchs entsprechende Abweichungen auf. Da die Navigationsdaten nicht weiter aufbereitet wurden (z.B. Gezeitenkorrektur etc.), kann die Qualität des mit CHARM[®] erstellten Höhenmodells durch derartige Maßnahmen weiter verbessert werden. Insgesamt ist CHARM[®] jedoch nicht für die Erstellung von Höhenmodellen optimiert.

c. Dichtheitsprüfung

Zur Dichtheitsprüfung wurde die gesamte Fläche entlang der Tracking-Spuren abgescannt. Dabei zeigten sich insbesondere an zwei Gasbrunnen auffällige Emissionen (Anhang 1). Weiterhin zeigten sich auf dem Deponierücken erhöhte Gaskonzentrationen.



Abb. 6: Ausschnitt Gasbrunnen mit Methanemission

Die gemessenen Gaskonzentrationen wurden in drei Klassen eingeteilt:

- i. Grün: Klasse 1 ($< 0,025$ ppm über Methanhintergrund)
Es liegt keine Methanemission vor
- ii. Gelb: Klasse 2 ($0,025 - 0,05$ ppm über Methanhintergrund)
Es liegt möglicherweise eine geringe Methanemission vor
- iii. Rot: Klasse 3 ($> 0,05$ ppm über Methanhintergrund)
Es liegt eine Methanemission vor

Beispielhaft ist für KA-Ost auch die Methankonzentration an einer Schnittlinie in West – Ost – Richtung dargestellt (Abb. 7, 8). In den Diagrammen ist auch der Verlauf der Grenzwerte der Konzentrationsklassen aufgezeigt. Die unterhalb der gelben Kurve liegenden Maxima werden als statistische Schwankungen ohne hinreichende Signifikanz betrachtet.



Abb. 7: Verlauf der Schnittlinie

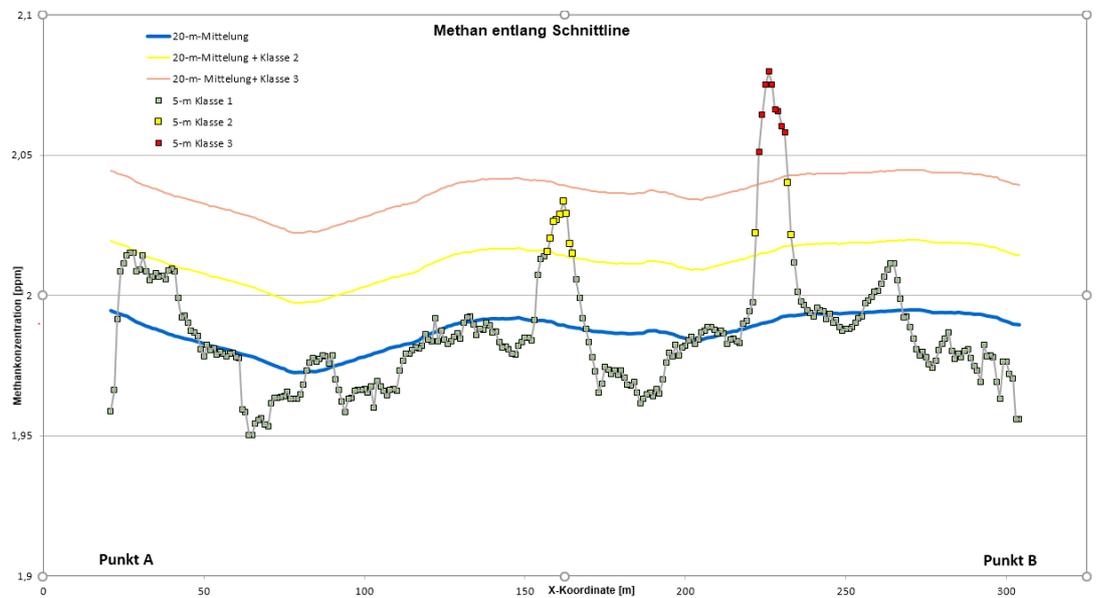


Abb. 8: Methanverlauf entlang der Schnittlinie

d. Emissionsbestimmung

Die Emissionsbestimmung erfolgte bei überwiegend westlichen Winden. Es wurden 6 Runden ohne sowie 5 Runden mit einem zusätzlichen Gasaustritt von $5 \text{ m}^3/\text{h}$ geflogen. Die Windsituation ist in Abb. 9 aufgezeigt.

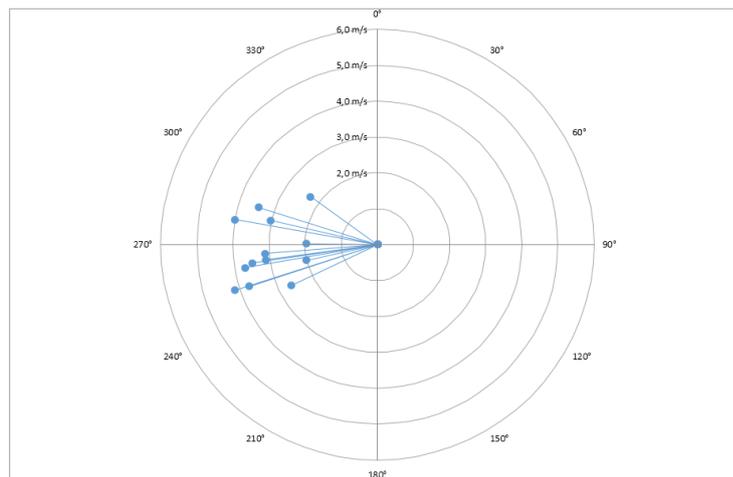


Abb. 9: Wind während der Emissionsbestimmung

Die Windmessungen stellen den jeweiligen Mittelwert während eines Fluges dar. Höherfrequente Variationen sind hier nicht aufgeführt. Für die hier durchgeführte Auswertung geht man davon aus, dass die höherfrequenten Variationen im Mittel keinen gravierenden Einfluss auf das Ergebnis haben. Die Stabilität des Windes hat jedoch einen Einfluss auf die Standardabweichung der Flussmessung.

Der Verlauf der Gaskonzentration bei der Fenceline-Befliegung ist in Abb. 10 dargestellt. Die Windmessung erfolgte in 10 m Höhe am Ort der Methanflasche (für zusätzliche Gasemissionen). Der dargestellte Flug erfolgte mit einer zusätzlichen Emission von $5 \text{ m}^3/\text{h}$. Man erkennt deutlich die erhöhten Gaskonzentrationen östlich der Gasflasche.



Abb. 10: Methankonzentration (farbcodiert) bei Fenceline-Flug mit geöffneter Gasflasche

Die Ergebnisse der Flussmessungen sind im Anhang in Tab. 1 dargestellt. Als Mittelwert erhält man ohne zusätzliches Gas eine detektierte Emission $F_{\text{gemessen}} = 2,3 \pm 2,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Für den Mittelwert mit zusätzlicher Gasemission ergibt sich ein Wert von $13,3 \pm 4,1 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Differenz beider Mittelwerte $F_{\text{Gas, diff}} = 11,0 \text{ m}^3/\text{h}$ liegt deutlich über der tatsächlichen Emission von $F_{\text{Gas, real}} = 5,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Als Korrekturfaktor k für die Bestimmung der tatsächlichen Emission erhält man:

$$k = \frac{F_{\text{Gas, real}}}{F_{\text{Gas, Diff}}} = 0,45$$

Damit ergibt sich für die tatsächliche Emission der Deponie

$$F_D = F_{\text{Gemessen}} * k = 1,0 \pm 0,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

e. Vergleich mit FID-Messungen

Parallel zur Befliegung wurden auch FID-Messungen auf der Deponie vorgenommen. Die FID-Messungen zeigen auch im westlichen Teil der Deponie erhöhte Gaskonzentrationen, die von CHARM nicht detektiert wurden. Möglicherweise liegt die Ursache dafür darin begründet, dass beide Messungen unmittelbar nach Niederschlägen vorgenommen wurden und der Gasaustritt noch nicht wieder in einem stationären Zustand war.

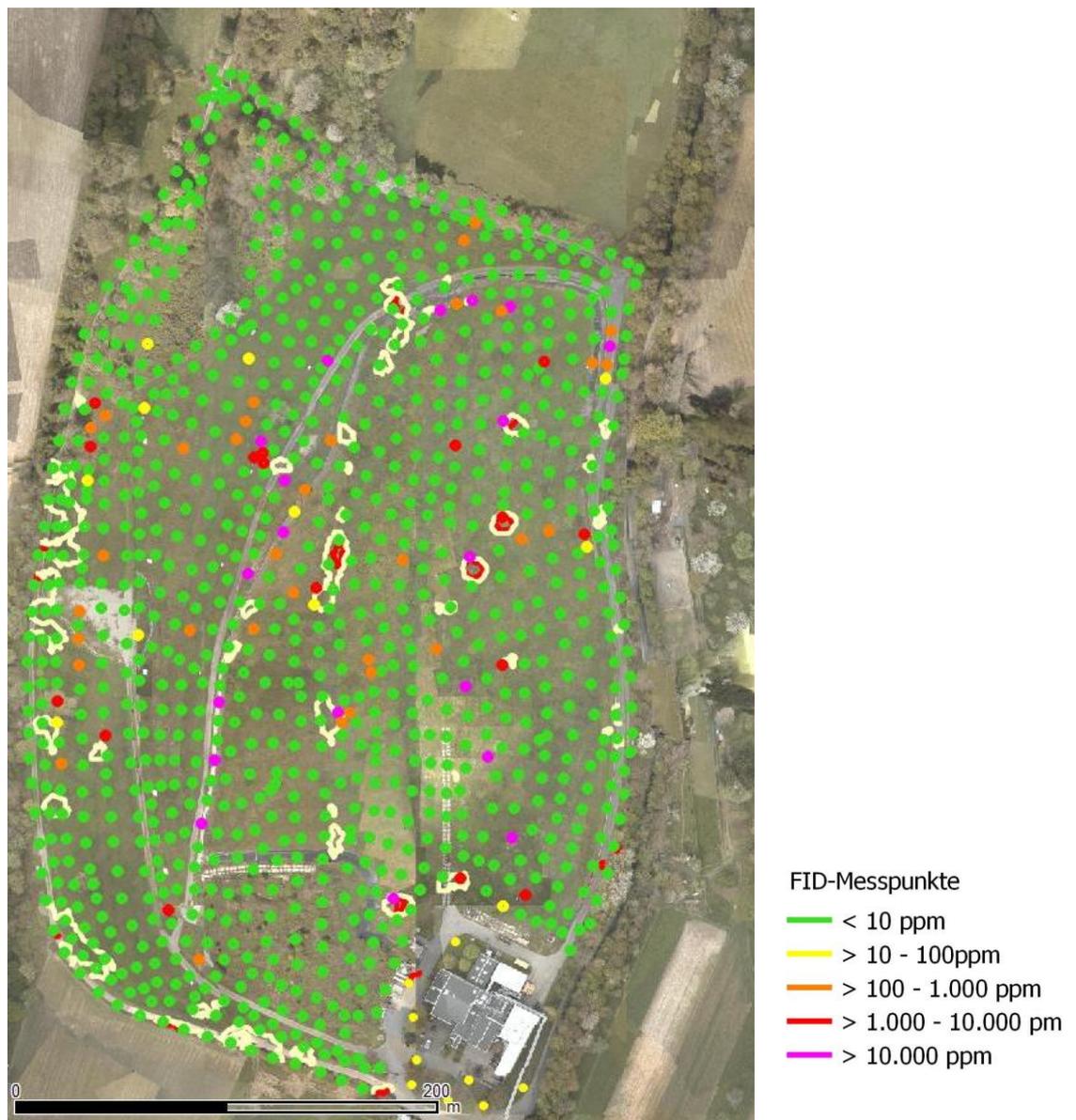


Abb. 11: Vergleich CHARM®-Messungen (Konturlinien) mit FID-Begehung (Farbcodierte Punkte)

6. Hohberg

a. Flugspuren & Messpunktdichte



Abb. 12: Lage der Tracking-Spuren



Abb. 13: Messpunktdichte

Die Messpunktdichte war meist ausreichend groß. An einigen Stellen war stehendes Wasser (z.B. Pflügen) vorhanden, wodurch dort die Messpunktdichte abnahm.

b. Höhenprofil

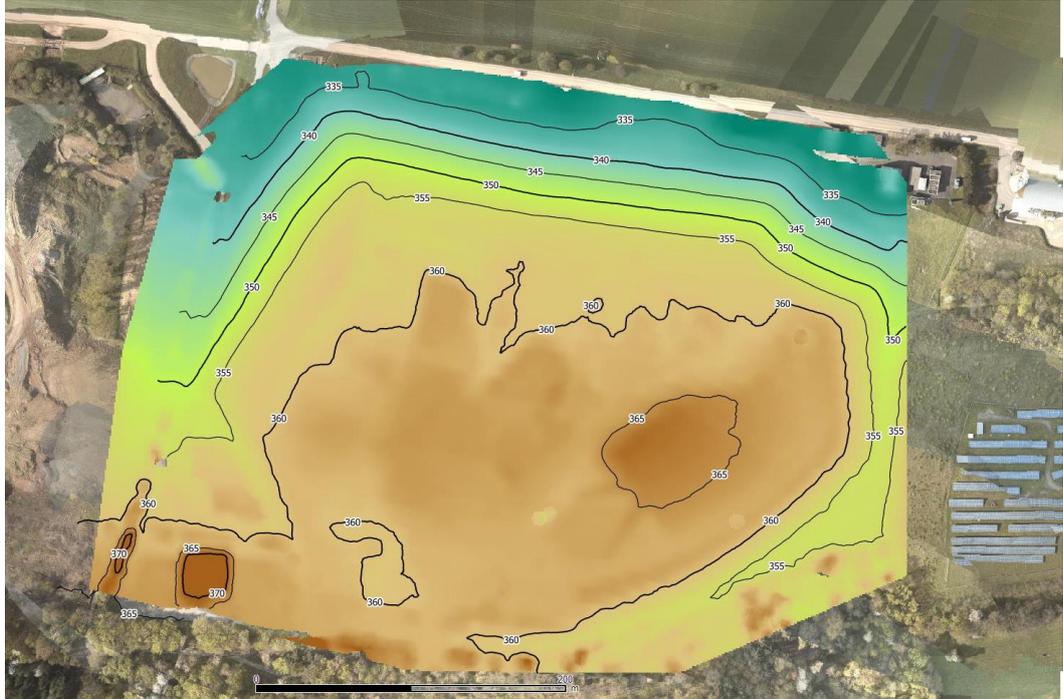


Abb. 14: Höhenprofil

Das Höhenprofil wurde aus den CHARM®-Messdaten erstellt. Die in der südwestlichen Ecke nicht durch Tracking-Spuren abgedeckten Bereiche wurden aus Daten erstellt, die ohne Tracking bei Überflügen in diesem Bereich aufgezeichnet wurden.

c. Dichtheitsprüfung

Die Dichtheitsprüfung fand am 28.04.2016 nachmittags statt. Zur Dichtheitsprüfung wurde die gesamte Fläche entlang der Tracking-Spuren abgescannt. Dabei wurden mehrere Auffälligkeiten lokalisiert. Diese standen teilweise nicht mit Gasbrunnen im Zusammenhang.

Die gemessenen Gaskonzentrationen wurden hier in vier Klassen eingeteilt:

- i. Grün: Klasse 1 (< 0,025 ppm über Methanhintergrund)
Es liegt keine Methanemission vor
- ii. Gelb: Klasse 2 (0,025 – 0,05 ppm über Methanhintergrund)
Es liegt möglicherweise eine geringe Methanemission vor
- iii. Orange: Klasse 3 (0,05 – 0,1 ppm über Methanhintergrund)
Es liegt eine mittlere Methanemission vor
- iv. Rot: Klasse 4 (> 0,1 ppm über Methanhintergrund)
Es liegt eine größere Methanemission vor



Abb. 15: Methanemissionen

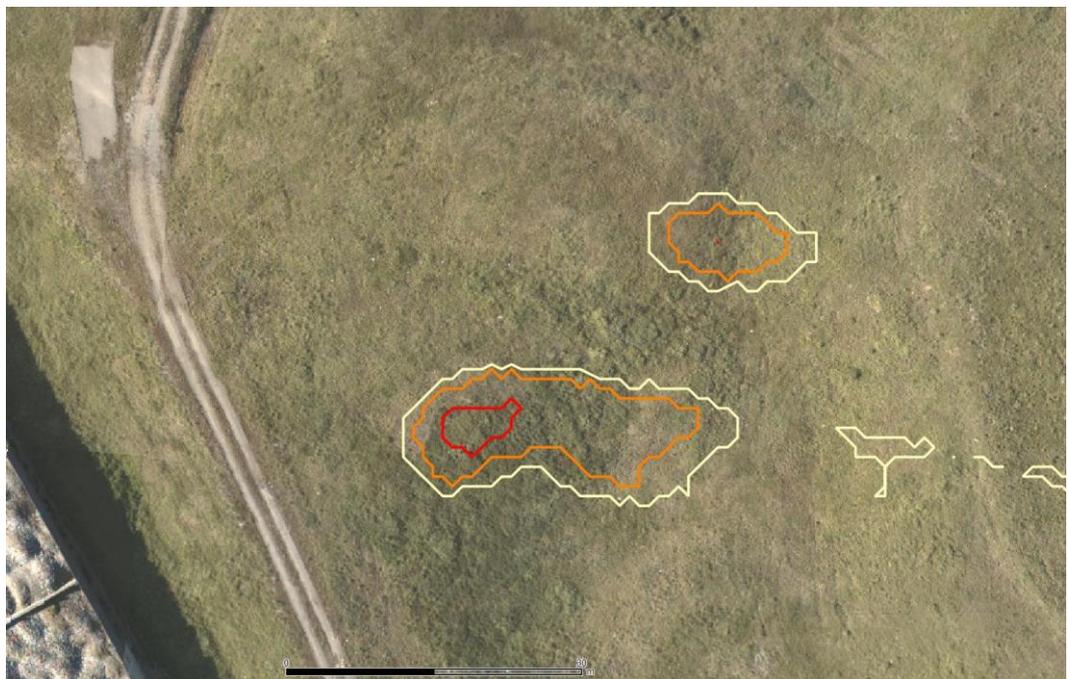


Abb. 16: Methanemission Detail 1

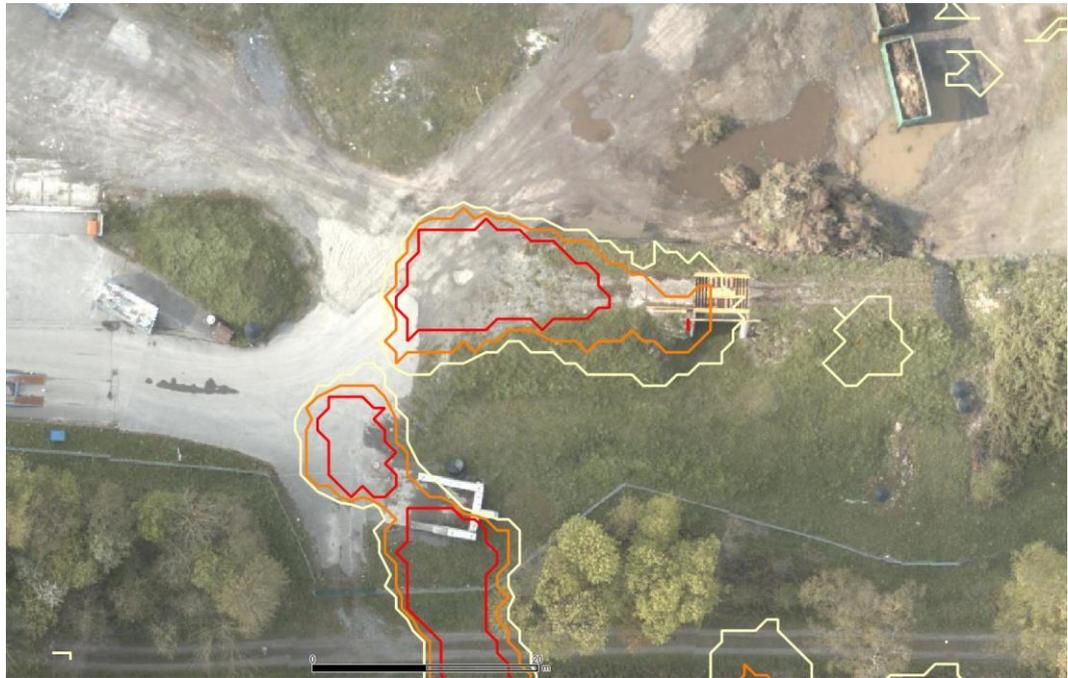


Abb. 17: Methanemission Detail 2

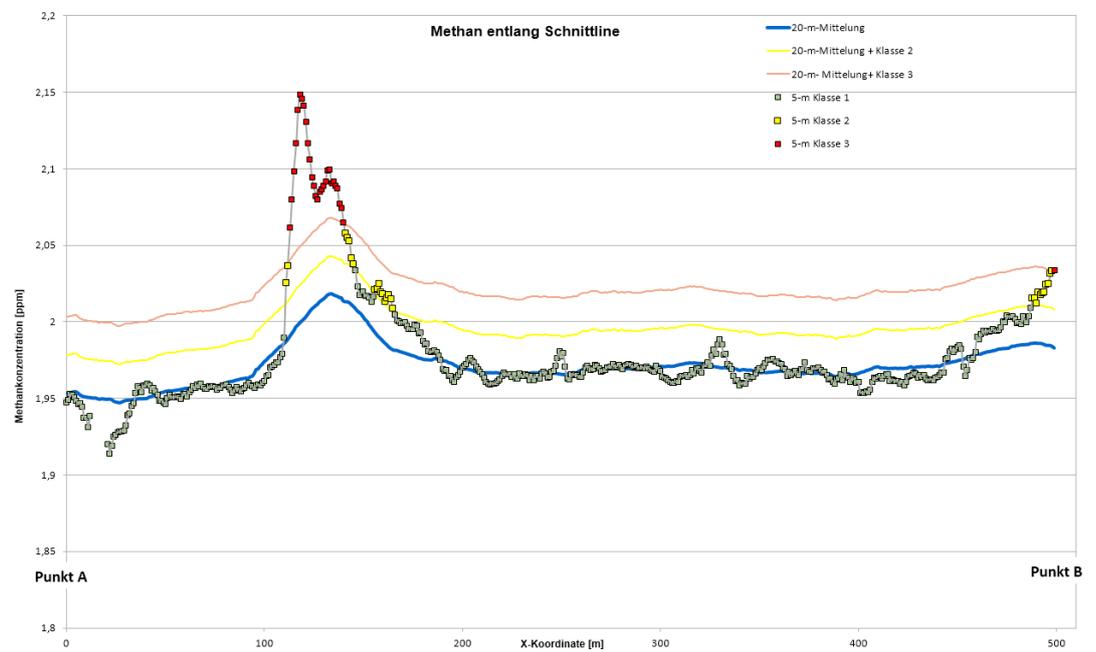


Abb. 18: Methanverlauf entlang der Schnittlinie (Abb. 15)

d. Emissionsbestimmung

Die Emissionsbestimmung fand am 29.04.2016 mittags bei westlichen Winden statt. Es wurden 5 Runden ohne sowie 7 Runden mit einem zusätzlichen Gasaustritt von $5 \text{ m}^3/\text{h}$ geflogen. Die Windsituation ist in Abb. 19 aufgezeigt.

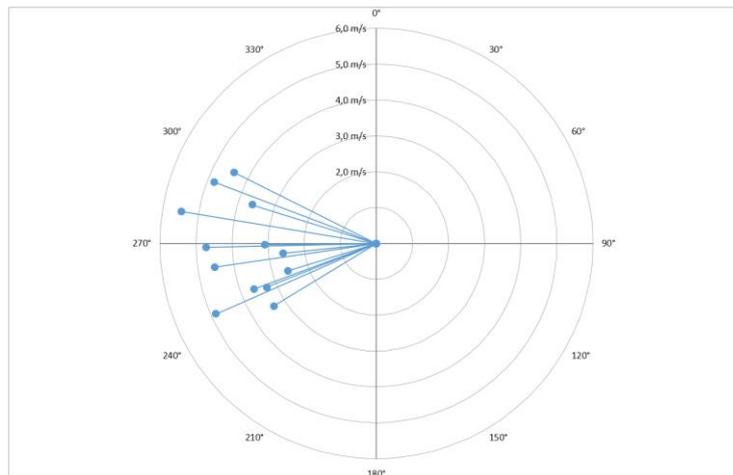


Abb. 19: Wind während der Emissionsbestimmung

Die Windmessungen stellen den jeweiligen Mittelwert während eines Fluges dar. Höherfrequente Variationen sind hier nicht aufgeführt. Für die hier durchgeführte



Abb. 20: Methanverteilung bei Fenceline-Flug

Auswertung geht man davon aus, dass die höherfrequenten Variationen im Mittel keinen gravierenden Einfluss auf das Ergebnis haben. Die Stabilität des Windes hat jedoch einen Einfluss auf die Standardabweichung der Flussmessung.

Wie in Abb. 20 erkennbar ist, führte die Spur zur Flussmessung im Süden durch eine Methanquelle (siehe auch Abb. 15 und 17). Da der Wind hier nahezu parallel zum Verlauf der Spur lag, konnte durch geringe Änderungen der Windrichtung die Messung in die eine oder andere Richtung beeinflusst werden. Dies ist eine mögliche Ursache der erhöhten Standardabweichung dieser Messreihe.

Die Messungen sind im Anhang (Tabelle 2) aufgelistet. Als Mittelwert erhält man ohne zusätzliches Gas eine detektierte Emission $F_{\text{gemessen}} = 3,7 \pm 2,4 \text{ m}^3/\text{h}$. Für den Mittelwert mit zusätzlicher Gasemission ergibt sich ein Wert von $9,3 \pm 6,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Differenz beider Mittelwerte $F_{\text{Gas, diff}} = 5,6 \text{ m}^3/\text{h}$ liegt leicht über der tatsächlichen Emission von $F_{\text{Gas, real}} = 5,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Als Korrekturfaktor k für die Bestimmung der tatsächlichen Emission erhält man:

$$k = \frac{F_{\text{Gas,real}}}{F_{\text{Gas,Diff}}} = 0,89$$

Damit erhält man für die tatsächliche Emission der Deponie

$$F_D = F_{\text{Gemessen}} * k = 3,3 \pm 2,1 \text{ m}^3/\text{h}$$

e. Vergleich mit FID-Messungen

Parallel zur Befliegung wurden auch FID-Messungen auf der Deponie vorgenommen. Die wesentlichen Emissionen werden mit beiden Verfahren erkannt.

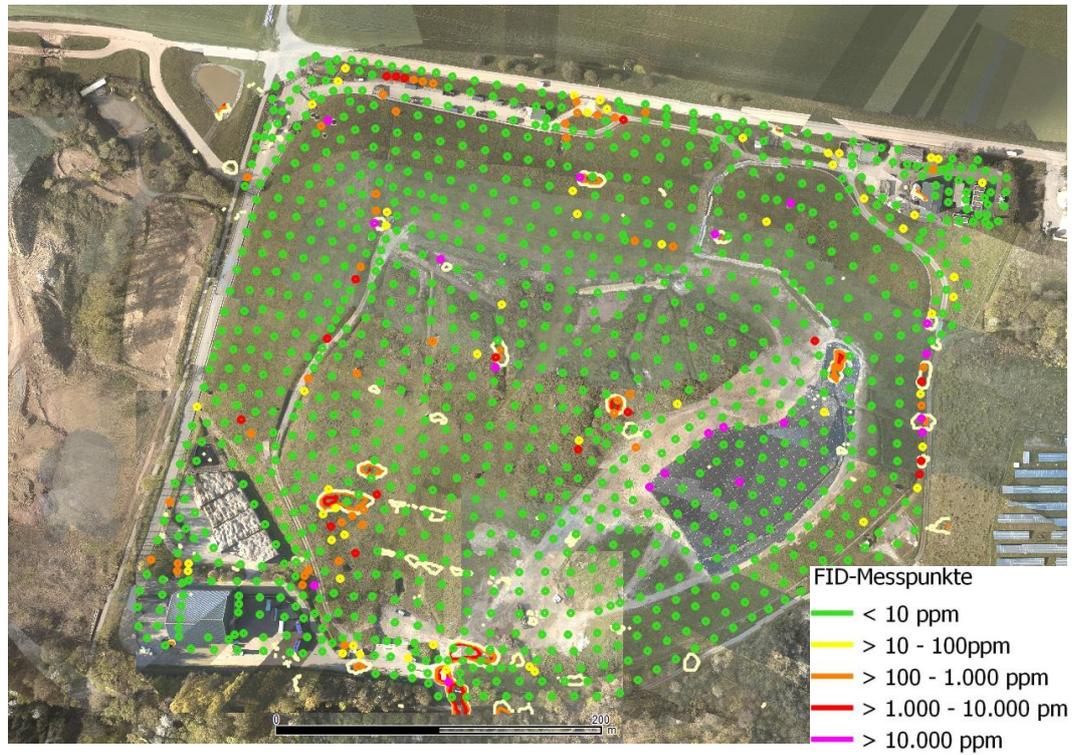


Abb. 21: Vergleich CHARM®-Messung (Konturlinien) vs. FID-Messung (farbcodierte Punkte)

7. Burghof

a. Flugspuren & Messpunktdichte



Abb. 22: Lage der Tracking-Spuren



Abb. 23: Messpunktdichte

Die Messpunktdichte war meist ausreichend groß. An einer Stelle kam es zu einer technisch bedingten Reduktion der Messpunktdichte.

b. Höhenprofil



Abb. 24: Höhenprofil

Das Höhenprofil wurde aus den CHARM®-Messdaten erstellt.

c. Dichtheitsprüfung

Zur Dichtheitsprüfung wurde die gesamte Fläche entlang der Tracking-Spuren abgescannt. Die gemessenen Konzentrationen lagen insgesamt deutlich höher als auf den Deponien Hohberg und Karlsruhe – Ost. Die Ursache hierfür liegt neben den höheren Emissionen auch in den geringeren Windgeschwindigkeiten während der Messungen, wodurch das Gas weniger verweht wird und größere Wolken ausbildet.

Die gemessenen Gaskonzentrationen wurden hier in vier Klassen eingeteilt (Achtung: andere Konzentrationsgrenzen als Hohberg und KA- Ost):

- i. Grün: Klasse 1 (< 0,125 ppm über Methanhintergrund)
Es liegt keine Methanemission vor
- ii. Gelb: Klasse 2 (0,125 – 0,25 ppm über Methanhintergrund)
Es liegt eine geringe bis mittlere Methanemission vor

- iii. Orange: Klasse 3 (0,25 – 0,5 ppm über Methanhintergrund)
Es liegt eine mittlere bis größere Methanemission vor
- iv. Rot: Klasse 4 (> 0,5 ppm über Methanhintergrund)
Es liegt eine größere Methanemission vor



Abb. 25: Methanemissionen

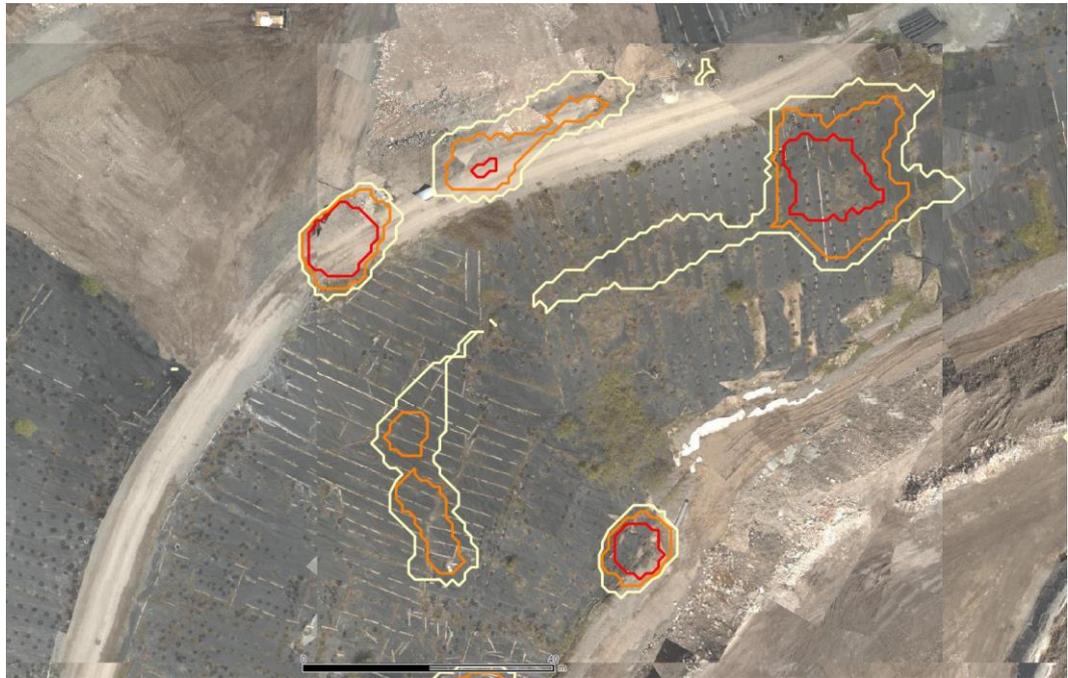


Abb. 26: Methanemission Detail

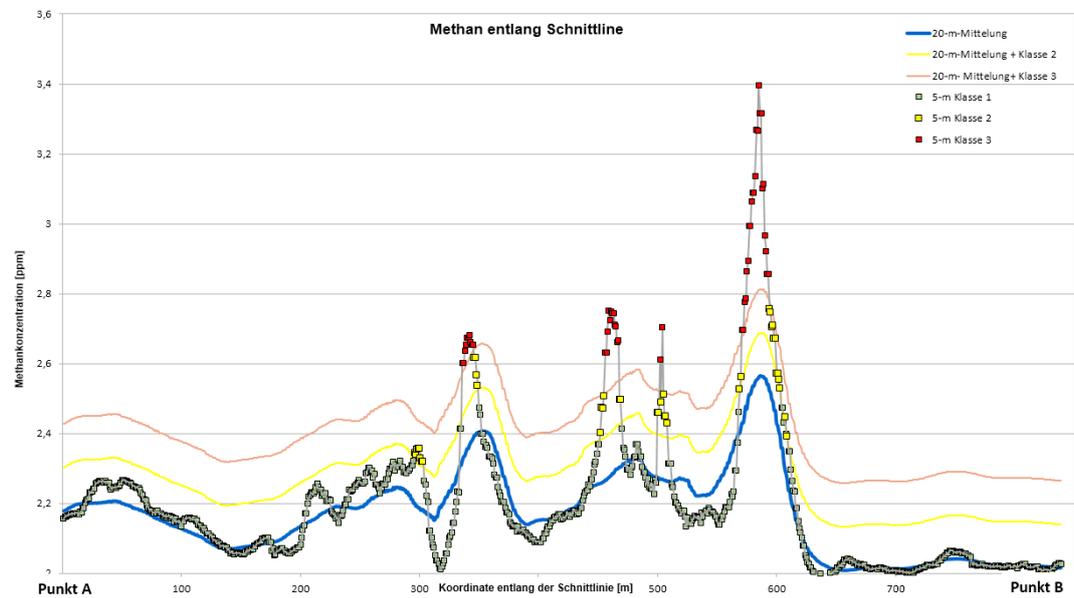


Abb. 27: Methanverlauf entlang der Schnittlinie

d. Emissionsbestimmung

Die Emissionsbestimmung fand am 29.04.2016 vormittags bei östlichen Winden. Es wurden 6 Runden ohne sowie 6 Runden mit einem zusätzlichen Gasaustritt von $5 \text{ m}^3/\text{h}$ geflogen. Die Windsituation ist in Abb. 28 aufgezeigt.

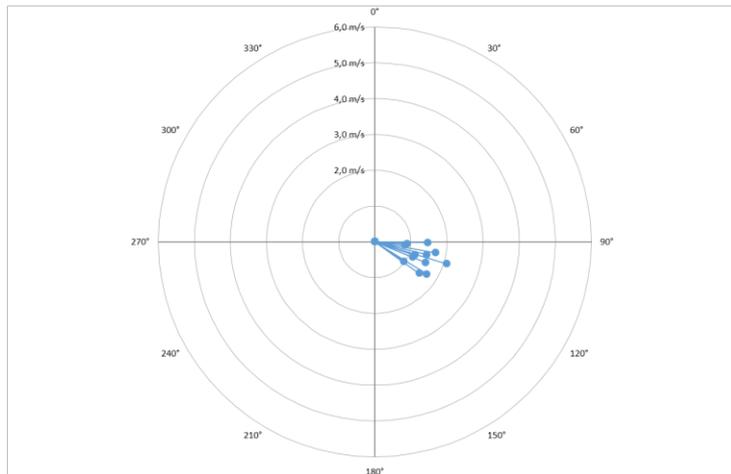


Abb. 28: Wind während der Emissionsbestimmung

Die Windmessungen stellen den jeweiligen Mittelwert während eines Fluges dar. Es lagen insgesamt geringere Windstärken als bei den Messungen in Hohberg und KA-Ost vor.



Abb. 29: Methanverteilung bei Fenceline-Flug

Die Messungen sind im Anhang in Tabelle 3 aufgelistet. Als Mittelwert erhält man ohne zusätzliches Gas eine detektierte Emission $F_{\text{gemessen}} = 27,8 \pm 20,1 \text{ m}^3/\text{h}$. Für den Mittelwert mit zusätzlicher Gasemission ergibt sich ein Wert von $43,0 \pm 12,1 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Differenz beider Mittelwerte $F_{\text{Gas, diff}} = 15,2 \text{ m}^3/\text{h}$ liegt deutlich über der tatsächlichen Emission von $F_{\text{Gas, real}} = 5,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Als Korrekturfaktor k für die Bestimmung der tatsächlichen Emission erhält man:

$$k = \frac{F_{\text{Gas, real}}}{F_{\text{Gas, Diff}}} = 0,33$$

Damit erhält man für die tatsächliche Emission der Deponie

$$F_D = F_{\text{Gemessen}} * k = 9,2 \pm 6,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

e. Vergleich mit LAS-Begehung

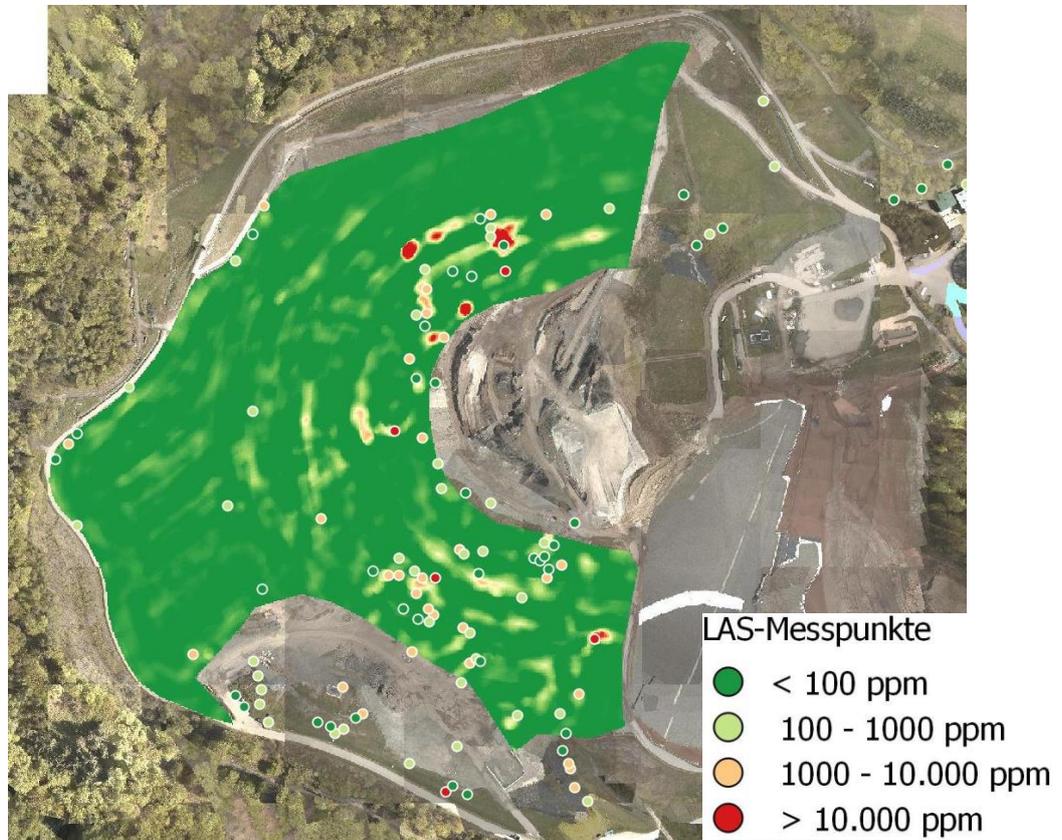


Abb. 30: Vergleich LAS-Begehung (farbcodierte Punkte) mit CHARM®-Detektion (Farbflächen)

Während in Hohberg und KA-Ost mit der FID-begehung ein gleichmäßiges Messpunktraster erzeugt werden konnte, war dies in Burghof aufgrund der topografischen und Abdeckungssituation nicht einfach möglich.

8. Bewertung und Ausblick

Im Rahmen dieses Projekts wurde erstmalig CHARM® zur Dichtheitsprüfung im Vergleich mit einer zeitgleich findenden konventionellen Dichtheitsprüfung eingesetzt. Darüber hinaus wurde erstmals versucht, die Gesamtemission der Deponie zu messen.

Die Dichtheitsprüfung erfordert keine weiteren bodengebundenen Messungen, so dass sie kurzfristig durchgeführt werden kann. Die wesentlichen Emissionen wurden sowohl von CHARM® als auch von der FID-/LAS-Begehung aufgefunden.

Die wesentlichen Vorteile von CHARM® liegen darin, dass auch schwer zugängliche Areale flächendeckend überprüft werden können. Darüber hinaus können ohne zusätzlichen Aufwand weitere Daten wie georeferenzierte Luftbilder oder das Höhenprofil der Deponie erzeugt werden. Die Dauer der Befliegung ist mit der eingesetzten Technik noch relativ lang, sie wird sich aber mit Beginn des Einsatzes der nächsten Technikgeneration im kommenden Jahr deutlich verkürzen und damit auch wirtschaftlich attraktiver werden.

Mittels der CHARM®-Fenceline-Befliegung ist es erstmals möglich, die Gesamtemission einer Deponie messtechnisch zu bestimmen. Hierbei muss jedoch eine bodengestützte Windmessung erfolgen. Die Standardabweichung dieser Messungen kann möglicherweise durch erweiterte numerisch Verfahren und die Wahl geeigneter Wetterbedingungen (insbesondere stabiler Wind) noch verringert werden. Insgesamt ist jedoch zu beachten, dass es sich um eine Momentaufnahme der Emission handelt, die in Abhängigkeit von Jahreszeit und Wettersituation variieren kann.

Anhang: Flussmessungen

Flug #	Gas	Dauer [min:sec]	Windrichtung [°]	Windstärke [m/s]	Fluss [m ³ /h]
1	-	1:42	271	2,0	3,9
2	-	1:49	306	2,3	1,3
3	-	1:26	283	3,0	4,7
4	-	1:20	288	3,4	1,3
5	-	1:27	260	3,7	-0,7
6	-	1:25	265	3,1	3,5
7	+	1:28	252	3,7	11,9
8	+	1:25	252	4,1	17,3
9	+	1:16	262	3,5	15,1
10	+	1:24	262	3,1	15,5
11	+	1:28	245	2,7	6,9

Tab. 1: Flussmessung KA-Ost

Flug #	Gas	Dauer [min:sec]	Windrichtung [°]	Windstärke [m/s]	Fluss [m ³ /h]
1	-	1:25	264	2,6	5,6
2	-	1:24	279	5,5	5,8
3	-	1:19	287	3,6	3,2
4	-	1:21	291	4,8	4,1
5	-	1:17	269	3,1	-0,1
6	+	1:16	248	3,3	3,4
7	+	1:19	262	4,5	10,4
8	+	1:16	250	3,6	0,3
9	+	1:20	253	2,6	5,9
10	+	1:17	269	4,7	16,0
11	+	1:17	246	4,9	10,4
12	+	1:18	238	3,3	18,4

Tab. 2: Flussmessung Hohberg

Flug #	Gas	Dauer [min:sec]	Windrichtung [°]	Windstärke [m/s]	Fluss [m ³ /h]
1	-	1:49	112	1,1	31
2	-	2:05	112	1,5	54
3	-	2:01	122	1,7	19
4	-	2:03	124	1,0	5
5	-	1:52	97	0,8	10
6	-	1:50	93	0,9	48
7	+	1:55	100	1,7	34
8	+	1:48	104	1,5	35
9	+	1:46	107	2,1	64
10	+	1:39	108	1,2	32
11	+	1:49	91	1,5	48
12	+	1:48	126	1,5	45

Tab. 3: Flussmessung Burghof