

GEO-GASH

Erfassung und geochemische Analyse von Ausgasungen an der Tagesoberfläche im Raum Hamm

(Gas Emission Observation and Geochemical Analysis of Surface Emissions in Hamm)

Abschlussbericht

(Förderzeitraum 01.07.2025 bis 30.06.2026)

Projektnummer: T0518/47580/2025

Bochum, den 02.07.2026

Projektleitung: Prof. Dr. Christian Melchers
Dr.-Ing. Sebastian Westermann

Projektbearbeitung: PD Dr. Barbara Teichert
Dr. Bastian Reker
Dr.-Ing. Benjamin Haske

1. Zusammenfassung

Das Projekt „GEO-GASH – Gas Emission Observation and Geochemical Analysis of Surface Emissions in Hamm“ wurde vom Forum Bergbau und Wasser unter der Projektnummer To518/47580/2025 (siehe Zuwendungsbescheid vom 23.09.2025) im Zeitraum vom 01.07.2025 bis 30.06.2026 gefördert. Ziel des Projekts war sowohl die systematische, messtechnische Erfassung als auch die Aus- und Bewertung von Gasemissionen im Raum Hamm. Die Ergebnisse dienen der Erweiterung des System- und Prozessverständnisses im Hinblick auf Herkunft und Mobilisierung von Gas in einer Steinkohlenlagerstätte mit Deckgebirgsüberlagerung.

Insgesamt konnten im Rahmen des Projekts nach Auswertung vorhandener Forschungsergebnisse und einer Analyse von Vegetationsanomalien auf historischen Luftbildern ca. 40 Verdachtsflächen identifiziert und vermessen werden, wovon zehn Lokalitäten Ausgasungen von Kohlenwasserstoffen gezeigt haben, neun von ihnen in Konzentrationen im drei- bis fünfstelligen ppm-Bereich. Zwei Ausgasungsorte wiesen dabei einen möglichen räumlichen Zusammenhang mit den tektonischen Strukturen im Untergrund auf. Drei Lokalitäten im südwestlichen Bereich von Hamm wurden aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Ausgasungen (6.900 bis 17.000 ppm Methan [CH_4]) ausgewählt, um weiterführende UAV-Untersuchungen durchzuführen und Proben für die Analyse der Gaszusammensetzung und Isotopensignatur zu nehmen. Dabei zeigten die meisten Proben, dass hier vorwiegend thermogenes Methan (Kohleflözgas) mit einem geringen Anteil an biogenem Methan über Wegsamkeiten an der Erdoberfläche austritt. An einer Gasmesstelle der Stadtwerke Hamm gibt es einen Hinweis auf thermogenes Kohleflözgas, welches langsam durch das Deckgebirge migriert ist.

Mithilfe der UAV-Befliegungen ließ sich das Ausmaß der Vegetationsanomalien schnell, einfach und wiederholbar erfassen und kartieren. Die multispektrale Auswertung ermöglicht es zudem, auch Schäden zu erkennen, die im einfachen RGB-Bild nicht sichtbar sind.

Das Open-Path-TDLAS-System „Falcon Plus“ konnte dabei zu jeder Zeit effektiv Methanemissionen detektieren, während das Closed-Path-System aufgrund der hohen Luftdrücke technisch bedingt durch die Ansaugung in Flughöhe keine Gase mehr nachweisen konnte. Für die reine Detektion und Verortung von Emissionen eignet sich der Falcon also deutlich besser. Je nach Anwendungszweck kann es jedoch sinnvoll sein, beide Sensoren gleichzeitig zu nutzen, beispielsweise zur 3D-Erfassung und Quantifizierung einer Gaswolke.

2. Ausgangslage und Motivation

Das südliche Münsterland sowie der nördliche Bereich des Ruhrgebiets, insbesondere das Gebiet um die Stadt Hamm, sind für oberflächennahe Methanausgasungen seit mehr als hundert Jahren bekannt (WEGNER 1924; KUKUK 1938; MELCHERS 2009). In dieser Region treten seither natürliche Methanaustritte auf. Bekanntheit erlangte vor allem das „Ewige Feuer“ in den Lippe-Auen der Stadt Hamm (KAWATERS 1987). Häufig sind diese Ausgasungserscheinungen auch mit Vegetationsanomalien verbunden (NOOMEN et al. 2003, NOOMEN et al. 2012). Die beobachteten Ausgasungen können unterschiedlichen Ursprungs sein:

1) **Thermogenes Methan als Kohleflöz- und/oder Grubengas:**

Entstanden im Zuge der Inkohlung in den karbonischen kohleführenden Schichten. Migration über bergbaubedingte Wegsamkeiten, bergbaubedingte Reaktivierung von bestehenden tektonischen Störungen oder aktiven tektonischen Störungen durch das Deckgebirge bis zur Erdoberfläche.

2) **Thermogenes Methan als Kohleflözgas:**

Entstanden im Zuge der Inkohlung in den karbonischen kohleführenden Schichten. Migration über geologische Zeiträume durch das Deckgebirge bis zur Erdoberfläche.

3) **Fossil-biogenes Methan:**

Bildung in organikreichen Schichten des Deckgebirges oberhalb der Kohleflöze. Dieses Methan kann aus den Muttergesteinen in Speichergesteine gewandert sein und von dort möglicherweise auch zur Oberfläche migrieren.

4) **Rezent-biogenes Methan:**

In-situ-Bildung in oberflächennahen, sauerstofffreien Bodenschichten durch den mikrobiellen Abbau von Organik mit anschließender unmittelbarer Ausgasung.

5) **Biogenes Methan aus Grubenholz/Kohle:**

Bildung von Methan innerhalb der Kohleablagerungen bzw. im Bergwerk durch den mikrobiellen Abbau von Organik (Grubenholz und/oder Kohle).

Die Differenzierung von thermogener und biogener Methanquelle erfolgt über die Bestimmung der geochemischen Gaszusammensetzung sowie der Kohlenstoff- und Wasserstoffisotopensignaturen des Methans.

Die seit Dezember 2023 dokumentierten Ausgasungsereignisse (Gaserfassungen DMT GmbH in Abbildung 1) in bebauten und bergbaubeeinflussten Bereichen im Stadtgebiet von Hamm können nach Einschätzung der DMT GmbH wahrscheinlich auf die Mobilisierung von Deckgebirgsgas aus abbaubedingten Zerrungszonen zurückgeführt werden, wie es bereits in einem Einzelfall nachgewiesen werden konnte. Ein direkter kausaler Zusammenhang von Deckgebirgsgas- oder Grubengasaustritten mit dem Grubenwasseranstieg konnte bisher jedoch nicht nachgewiesen werden. Diese Ableitung wird auch darin begründet, dass der aktuelle Grubenwasserstand noch in größeren Teufen (z. T. unterhalb der Basis des Deckgebirges) liegt. Mögliche Mechanismen und Wegsamkeiten für einen denkbaren, grubenwasseranstiegsbedingten Gasaustritt sind bekannt und können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- **Gas-Wegsamkeiten:**

In nicht wassererfüllten Grubenbauen kann das anstehende Grubengas verdichtet und infolge des steigenden Drucks in Abhängigkeit der vorhandenen Gaswegsamkeiten verdrängt werden. Diese Verdrängung kann über Entgasungsleitungen, Streckenverbindungen, Abbaunäherungen oder tektonische Störungen über das Deckgebirge in die Atmosphäre erfolgen.

- **Druckerhöhung:**

Durch den Grubenwasseranstieg kann es zu einer Erhöhung des Grundwasserpotentials innerhalb des tiefen Deckgebirges kommen. Mit dem erhöhten hydrostatischen Druck kann es dabei zu einer Verdichtung und auch zu einer Verdrängung des dort gespeicherten, thermogen gebildeten Methans in Richtung Tagesoberfläche kommen. Zudem kann infolge des

erhöhten Drucks das zirkulierende Wasser mehr Gas aufnehmen und transportieren. Eine erhöhte Emission von Deckgebirgsgas an der Tagesoberfläche infolge dieser Druckbedingungen ist bisher nicht belegbar.

- **Bodenbewegungen:**

Bei einem Grubenwasseranstieg von -600 m NHN auf -380 m NHN am Standort Haus Aden wird nach Annahme der RAG AG eine maximale Bodenhebung von 12 cm prognostiziert. Scherbewegungen in Hebungsrandbereichen sind dabei nicht vollständig auszuschließen und Gasemissionen können möglich sein. Dennoch sind bisher keine Gasfreisetzungen von im kreidezeitlichen Deckgebirge gespeicherten, thermogen oder biogen gebildetem Gas durch Bodenbewegungen bekannt.

Zur belastbaren Einordnung der Gasemissionen sowie zur Bewertung der unterschiedlichen Mechanismen und Wirkungszusammenhänge werden zusätzliche Daten und Analysen benötigt – einschließlich der Einbindung der von den Stadtwerken Hamm erhobenen (historischen) Messwerte aus den Gasmessstellen sowie der durchgeführten Isotopenanalysen. Diese sind essenziell für eine objektbezogene Gefährdungsanalyse und der Schlüssel für die Ursachenklärung.

3. Zielsetzung und Methodik

Ziel des Forschungsvorhabens GEO-GASH ist die systematische, analytische Erfassung und Bewertung von Methanemissionen im Raum Hamm sowie der Aufbau eines prozessorientierten Verständnisses der Ausgasungsdynamik in Bereichen mit mächtiger Deckgebirgsüberdeckung oberhalb stillgelegter Lagerstätten. Im Fokus stehen die Identifikation potenzieller Emissionsquellen sowie die Charakterisierung der zugrundeliegenden geogenen (z. B. Tektonik, Lithologie, Deckgebirgsmächtigkeit, Grundwasserkörper) und bergbaubedingten Prozesse (z. B. Zerrüttungszonen, bergbauliche Infrastruktur, Abbaukanten und -mächtigkeiten, Bodenbewegungen, Grubenwasseranstieg). Bisherige Untersuchungsbereiche beschränken sich auf – aus Sicht des ehemaligen Bergbaubetreibenden – gastechnisch isolierten Bereiche. Diese umfassen jene Abschnitte der bergbaubeeinflussten Schichten des Karbons, die infolge des Grubenwasseranstiegs nicht mehr durch Grubenbaue erschlossen sind und keine Verbindungen mehr zu Schächten mit Entgasungsleitungen aufweisen. Zur Abgrenzung der betroffenen Flächen wurden die Abbaubereiche vertikal auf die Tagesoberfläche projiziert, wobei jeweils die Außenkanten der abgebauten Flächen zugrunde gelegt wurden. Da die möglichen Methanemissionen nicht zwangsläufig an diesen beobachteten bergbaubeeinflussten und bebauten Bereiche geknüpft sind (Monitoringflächen in Abbildung 1), sollen die nachfolgenden Untersuchungen auf Bereiche außerhalb der bergbaulichen Beeinflussung in ländliche, unbebaute Gebiete im nordöstlichen Bereich der Stadt Hamm und Umgebung ausgeweitet werden.

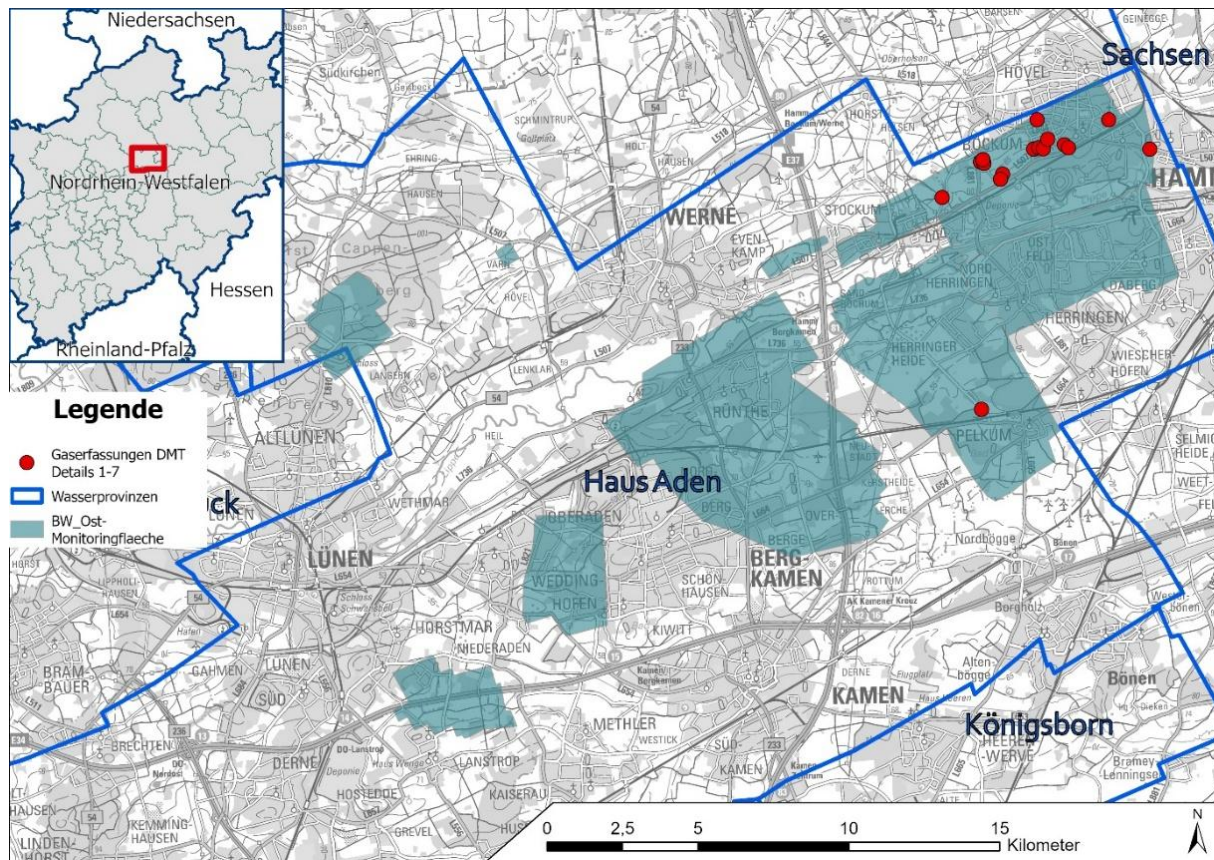


Abbildung 1: Monitoringflächen (grün-türkise Bereiche, entsprechen den gastechnisch isolierten Bereichen innerhalb der Wasserprovinz) der RAG AG im Bereich Bergwerk Ost, die einzelnen Wasserprovinzen (blaue Umrandung und blau-schwarze Schrift) sowie die überwachten Gasemissionen der DMT GmbH (rote Punkte).

Insgesamt wurden folgende Arbeitspakete zur Erreichung der Zielsetzung definiert und umgesetzt:

- AP 0: Auswertung historischer Luftbilder und früherer Forschungsarbeiten:**
 Während der Projektbearbeitung erwies sich die Auswertung von historischen Luftbildern (Abbildung 2) und früheren Forschungsarbeiten als hilfreich, Verdachtsflächen von Emissionen zu identifizieren. Aus diesem Grund wurden diese Arbeiten als zusätzliches Arbeitspaket 0 im Projektplan aufgenommen.
- AP 1: Geologische Grundlagenanalyse:**
 Zur weiteren Detektion von Verdachtsflächen und zur besseren Ableitung von möglichen Wirkungszusammenhängen von möglichen Gas-Wegsamkeiten im Untergrund wurden geologische, tektonische, bergbauliche und städteplanerische Daten in ein GIS-Projekt eingepflegt und mit den Ergebnissen der Auswertung historischer Luftbilder und früherer Forschungsarbeiten (s.o., AP0) abgeglichen.
- AP 2: Punktueller Erfassung von Emissionsquellen:**
 Die identifizierten Verdachtsflächen wurden in mehreren Geländebefahrungen aufgesucht und die Gasemissionen mittels eines tragbare Flammenionisationsdetektors (FID) bestimmt. Bei ausreichend hohen gemessenen Kohlenwasserstoffkonzentrationen (ab einem hohen dreistelligen ppm-Bereich) wurden Proben zur Bestimmung der Gaszusammensetzung (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2 , He, höhere Kohlenwasserstoffe) und zur Bestimmung der Isotopensignatur ($\delta^{13}\text{C}$)

und δD des Methans, $\delta^{13}C$ des Kohlenstoffdioxids) genommen und in einem externen Labor analysiert.

- **AP 3: Flächenhafte Erfassung von Emissionsquellen:**

Es wurden für ausgewählte Standorte in mehreren Messkampagnen UAV-gestützte Befliegungen zur flächenhaften Erfassung der Gasemissionen unter dem Einsatz unterschiedlicher Sensor-Technologien durchgeführt. Hierbei wurde auch ein Fokus auf die Detektion und Analyse von Vegetationsanomalien mittels Hyperspektralsensoren gelegt.

- **AP 4: Datenintegration zur Entwicklung eines integrativen Prozessverständnisses:**

Die gewonnenen Daten wurden in dem bestehenden GIS-Projekt (s.o.) zusammengeführt, um das Verständnis der verschiedenen Wirkungszusammenhänge über die Dynamik der MethanAusgasungen im Untersuchungsgebiet zu erweitern.

Die gewonnen Erkenntnisse sollen als erste essentielle Datengrundlage dabei helfen, folgende Einschätzungen und Ergebnisse zu liefern:

- Kartierung und Typisierung aktiver und potenzieller Emissionszonen (punktuell/flächenhaft);
- Geochemische und isotopegeochemische Zuordnung der Gasquellen;
- Evidenzbasierte Bewertung der Wirkmechanismen inkl. Quantifizierung mobilisierbarer Gas-mengen/-ströme;
- Integratives Prozess- und Risikomodell als Grundlage für Gefährdungsanalysen und Maßnahmenplanung; Handlungsempfehlungen für Monitoring-Design, Kommunikation und Gefahrenabwehr in Hamm und übertragbaren Referenzgebieten.

Die Untersuchungen erfolgten durch Mitarbeitende des Forschungszentrums Nachbergbau und ergänzen die bislang im Zuge der Gefahrenabwehr durchgeführten systematischen Messungen durch die DMT GmbH.

4. Ergebnisse

AP 0: Auswertung vorhandener Forschungsarbeiten und historischer Luftbilder

Auf Grundlage verschiedener Abschlussarbeiten (MELCHERS 2009, WESCHE 2010) wurden verschiedene Verdachtsflächen für MethanAusgasungen identifiziert und über das Geoportal NRW mittels einer Auswertung historischer Luftbilder überprüft. Dabei wurde insbesondere darauf geachtet, ob es an diesen Punkten Auffälligkeiten hinsichtlich der Vegetation gibt, wie großflächig diese ausgeprägt sind und wie lange diese Anomalien zurückverfolgbar sind (Abbildung 2). Insgesamt konnten auf diese Weise ca. 40 Verdachtsflächen ausgemacht werden, von denen zehn (NO_1 - NO_7 und SW_1 - SW_3 in Abbildung 3) Ausgasungen von Kohlenwasserstoffen inkl. Methan aufwiesen (neun davon im drei- bis fünfstelligen ppm-Bereich, Abbildung 3).



Abbildung 2: Zeitreihe historischer Luftbilder der Vegetationsschäden auf einem Acker im südwestlichen Bereich von Hamm innerhalb der Wasserprovinz Haus Aden (Lokalität SW2 in Abbildung 3).

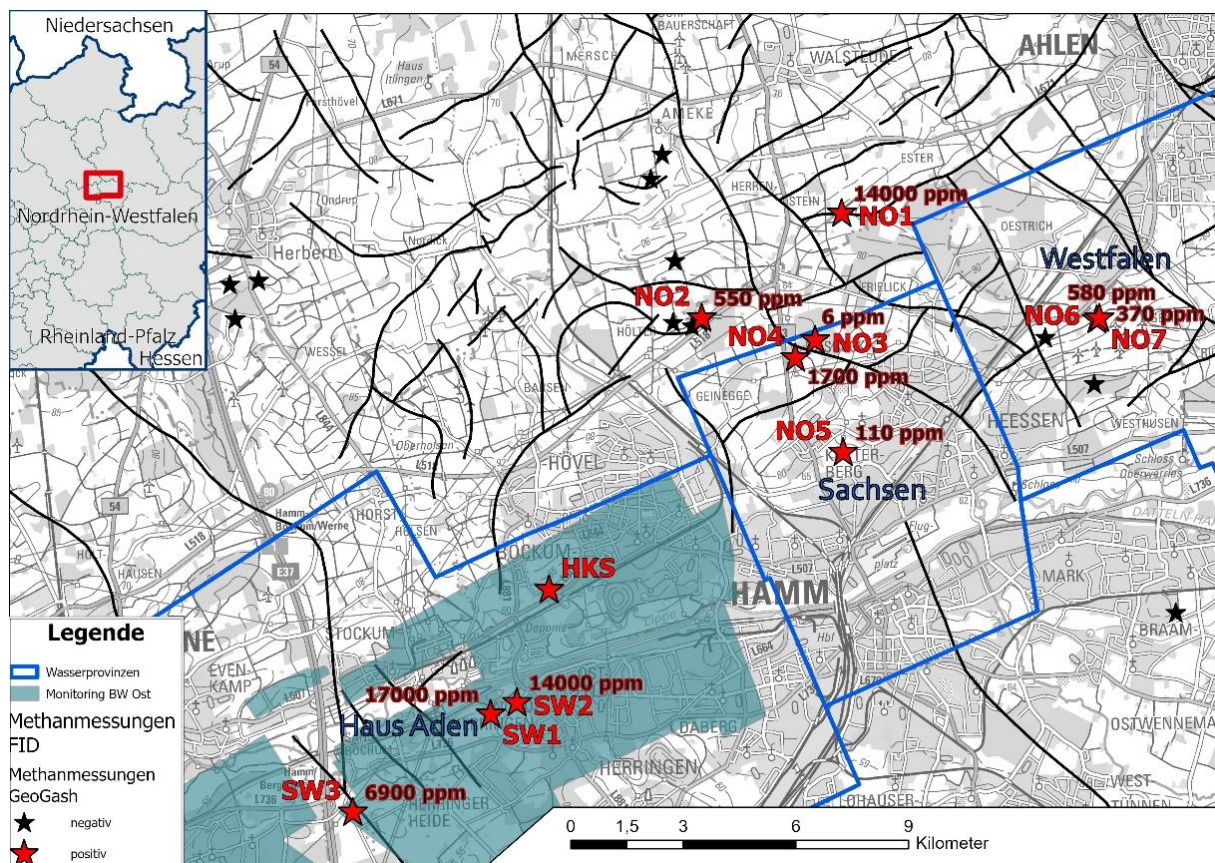


Abbildung 3: Im Rahmen des Projekts angefahrne und mittels FID gemessene Verdachtsflächen im Raum Hamm. Schwarze Sterne bedeuten keine gemessenen Ausgasungen, rote Sterne sind mit dem maximalen Messergebnis in ppm und Lokalitäts-ID (NO für Nordost und SW für Südwest mit durchlaufender Nummerierung, HKS = Harkampstraße) beschriftet. Die schwarzen Linien zeigen bekannte Störungen. Die blauen Linien zeigen die Grenzen der einzelnen Wasserprovinzen.

AP 1: Geologische Grundlagenanalyse

Neben der Untersuchung von historischen Luftbildern auf Vegetationsanomalien (AP 0) wurden die gefundenen Verdachtsflächen in ein GIS-Projekt eingeladen (siehe AP 4), um einen möglichen räumlichen Bezug zum tektonischen Inventar im bergbaulich beeinflussten sowie unbeeinflussten Bereich innerhalb des Untersuchungsgebiets herzustellen. Auf diese Weise konnten die prioritären Ver-

dachtsflächen ausgewählt und im Rahmen des AP 2 (siehe unten) im Gelände angefahren und vermessen werden. Insgesamt konnten an zwei Verdachtsflächen in unmittelbarer Nähe zu Störungssystemen eine Ausgasung festgestellt werden (siehe AP 2 und Abbildung 4). Bezüglich der beim Geologischen Dienst von Nordrhein-Westfalen verfügbaren Datensätze zum tektonischen Inventar im Untersuchungsgebiet ist einschränkend festzuhalten, dass bei vielen Störungssystemen nicht eindeutig bekannt ist, ob es sich um reine Karbon- oder Kreidestörungen handelt, oder ob die jeweilige Störung durch beide stratigraphischen Einheiten geht. Nur im Gebiet des früher erkundeten Donar-Feldes ist durch die Auswertung von seismischen Untersuchungen (DÖLLING & JUCH 2009) eine eindeutige Identifizierung von reinen Kreidestörungen durchgeführt worden.

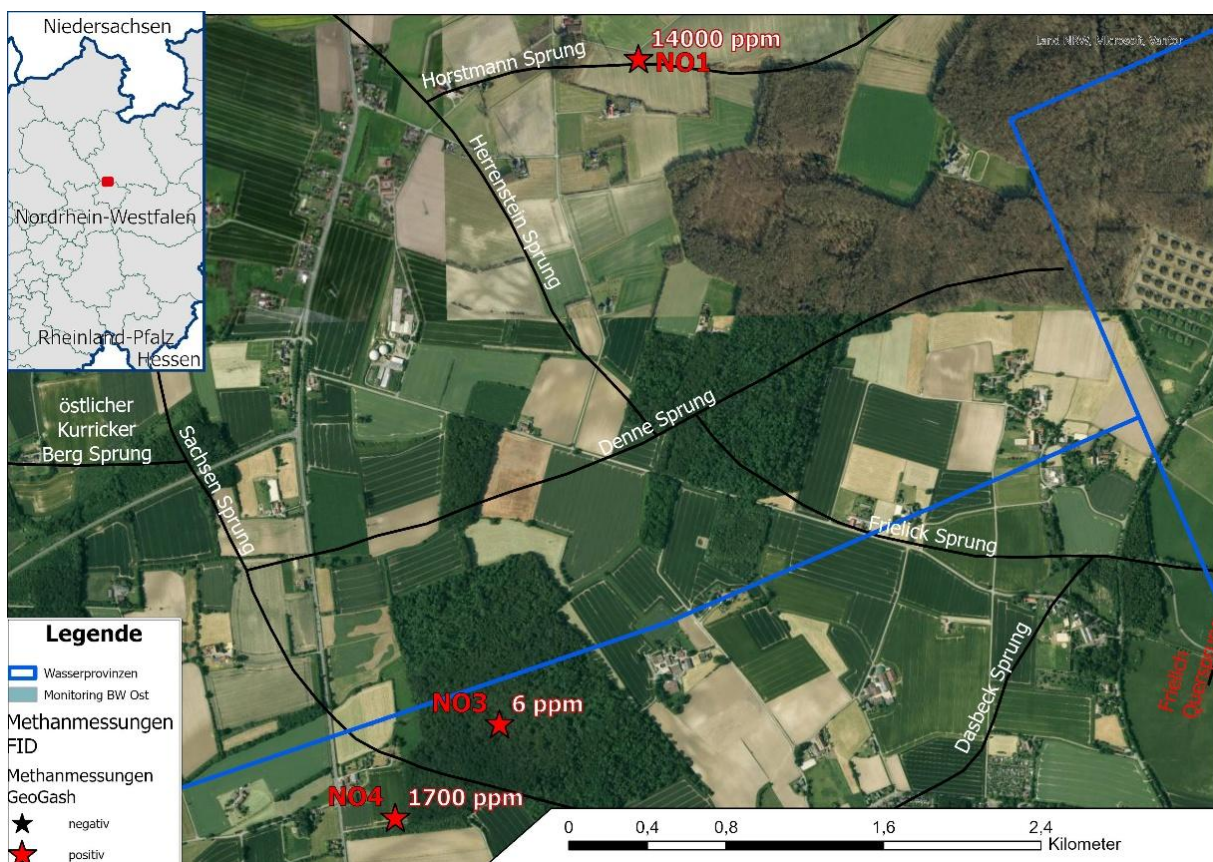


Abbildung 4: Detailansicht der Ausgasungserscheinungen im Nordosten Hamms mit möglichem tektonischen Bezug (Horstmann Sprung bei NO1 und Sachsen Sprung bei NO4) und den jeweils höchsten gemessenen Kohlenwasserstoffkonzentrationen.

AP 2: Punktueller Erfassung von Emissionsquellen

Ein Flammenionisationsdetektor (FID) ist ein hochempfindliches, tragbares Analysegerät für die Erfassung von Kohlenwasserstoffen vom einstelligen bis sechsstelligen ppm-Bereich (parts per million). Es wurden rund 40 verschiedene Verdachtsflächen angefahren, die sowohl innerhalb als auch außerhalb des vom Bergbau beeinflussten Gebietes lagen (Abbildung 3). Außerhalb der Wasserprovinzen konnten an zwei Lokalitäten (NO1 und NO2 in Abbildung 3) Kohlenwasserstoffkonzentrationen von 550 ppm bis 14.000 ppm (entspricht 1,4 Vol.-%) gemessen werden, innerhalb der Wasserprovinzen Sachsen und Westfalen an fünf Lokalitäten (NO3 bis NO7) Konzentrationen von 110 ppm bis 1.700 ppm (ein Wert in einem Waldgebiet, NO₃, lag nur bei 6 ppm). Bei den höchsten gemessenen

Konzentrationen im nordöstlichen Untersuchungsgebiet (14.000 ppm außerhalb der Bergbauflächen und 1.700 ppm in der Wasserprovinz Sachsen) liegen Störungen in unmittelbarer Nähe der Ausgasungserscheinungen (NO₁ und NO₄ in Abbildung 4). Für eine abschließende Beurteilung, ob hier ein direkter kausaler Zusammenhang mit dem tektonischen Inventar besteht, reicht die Datengrundlage jedoch nicht aus. Im Bereich der Monitoringflächen des Bergwerks Ost (innerhalb der Wasserprovinz Haus Aden) konnten Konzentrationen von 6.900 ppm bis 17.000 ppm auf drei verschiedenen Äckern (SW₁ bis SW₃) nachgewiesen werden, wovon zwei (SW₁ und SW₂) im südlichen Bereich der Lippeauen in unmittelbarer Nähe zum Kraftwerk Uentrop liegen.

Isotopenanalyse

An den Standorten SW₁ bis SW₃ (Abbildung 3, Abbildung 5) im südwestlichen Bereich der Stadt Hamm wurden im Rahmen verschiedener Messkampagnen Proben zur Bestimmung der Gaszusammensetzung und Isotopensignatur genommen, um die Herkunft und/oder Genese des Methans zu evaluieren.

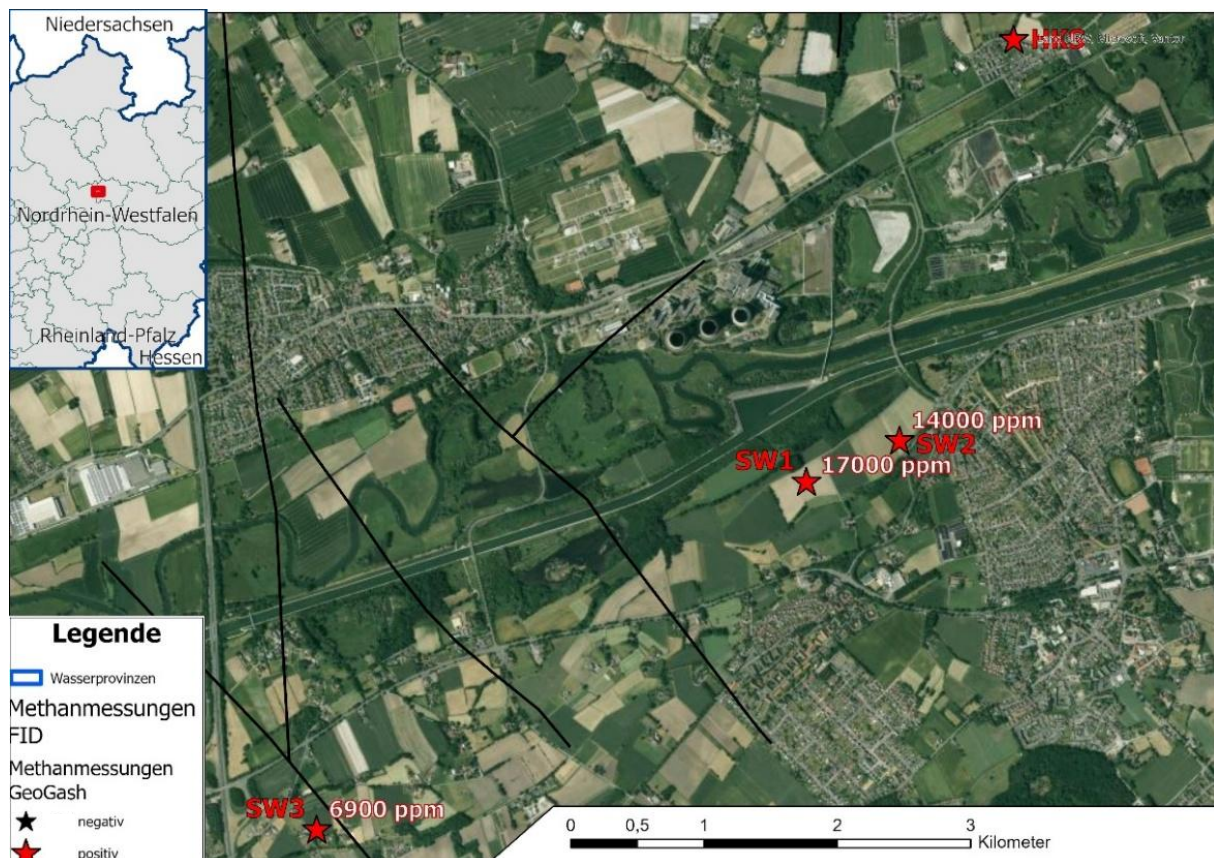


Abbildung 5: Detailansicht der Ausgasungs-, Mess- und Probenahmepunkte im südwestlichen Bereich Hamms (SW₁ bis SW₃ und HKS) mit den jeweils höchsten gemessenen Kohlenwasserstoffkonzentrationen.

An der Gasquelle am Standort Torksweg (SW₁) konnte die Kohlenstoffisotopie des Methans an zwei Proben bestimmt werden. Eine Probe hat eine deutlich thermogene Signatur (Vorhandensein von höheren Kohlenwasserstoffen), die andere Probe zeigt eine Mischung mit einem biogenen Methan (Ab-

bildung 6). Die beiden Proben von der Gasquelle am Hof Lehmkämpfer (SW3) sind recht unterschiedlich in ihrer isotopischen Zusammensetzung (Abbildung 6). Prinzipiell zeigen sie aber wie am Torksweg eine eher thermogene Signatur mit einer geringen Beimengung an biogenem Methan an.

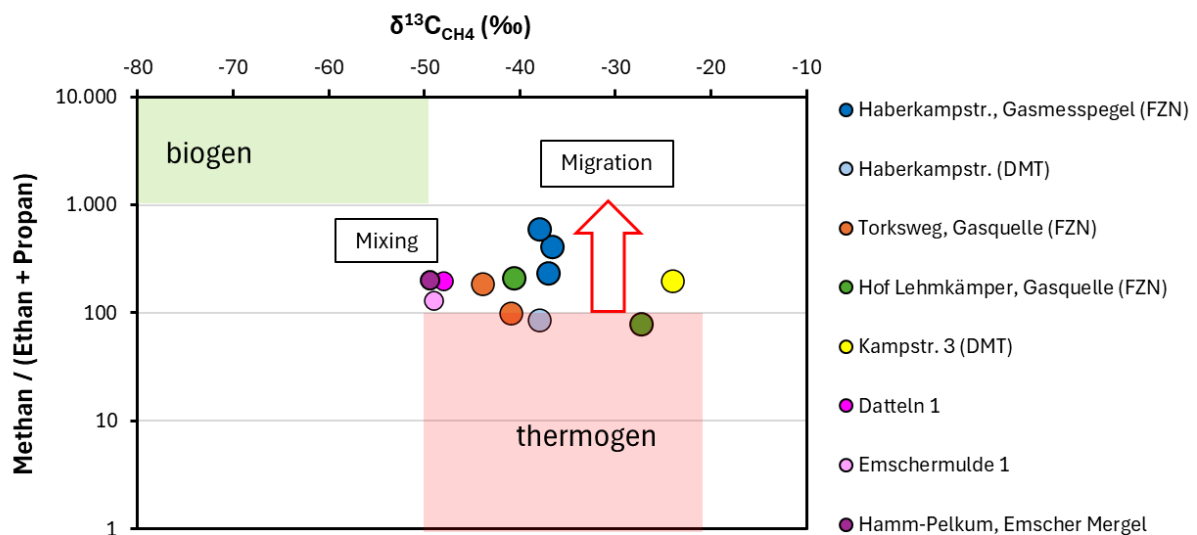


Abbildung 6: Dargestellt ist in einem BERNARD-Diagramm das Verhältnis von Methan / (Ethan + Propan) gegen den $\delta^{13}\text{C}$ -Wert des Methans (SW2: Torksweg, SW3: Hof Lehmkämpfer). Das grüne Feld kennzeichnet den Bereich des biogenen Methans, das rote Feld den Bereich des thermogenen Methans. Zum Vergleich sind Daten aus Geothermie Bohrungen sowie der DMT GmbH gezeigt.

Die Proben von einer Gasmessstelle in der Haberkampstraße (HKS in Abbildung 5) sind vergleichbar mit einem Messwert der DMT GmbH (Abbildung 6). Während der Isotopenwert eher eine thermogene Quelle vermuten lässt, sind die Proben verarmt an höheren Kohlenwasserstoffen. Diese Fraktionierung deutet auf die Migration von thermogenem Methan (Kohleflözgas) aus den karbonischen Kohleablagerungen über geologische Zeiträume hin.

AP 3: Flächenhafte Erfassung von Emissionsquellen

Im Rahmen des Projektes wurden an drei zuvor ausgewählten Standorten (Abbildung 7) über einen Zeitraum von vier Monaten regelmäßige multisensorale Drohnenbefliegungen durchgeführt. Zur Erstellung verzerrungsfreier und maßstabsgetreuer Luftbilder ("Orthofotos") wurde eine DJI Mavic 3 Multispectral (DJI 2006a) verwendet, die neben einer klassischen RGB-Kamera auch separate Kameras für die Spektralkanäle Rot, Grün, RedEdge und Nahinfrarot besitzt. Letztere können zur Auswertung der Vegetationsqualität genutzt werden. Für die Methangasdetektion wurde eine DJI Matrice 350 RTK (DJI 2026b) mit zwei verschiedenen Sensoren verwendet. Der Open-Path Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TLDAS)-Sensor "Falcon Plus" (SPH Engineering, 2026) nutzt einen Laserstrahl, um Methanmoleküle innerhalb der Strecke zwischen Drohne und Erdboden zu detektieren. Ein weiterer TLDAS-Sensor "Sniffer4D" (DJI 2026c) arbeitet nach dem Prinzip der geschlossenen

Messstrecke und quantifiziert Gasmessungen durch Ansaugung direkt an der Drohne. Zur Verringerung von Verfälschungen durch den Abwind befindet er sich direkt oberhalb der Propeller.

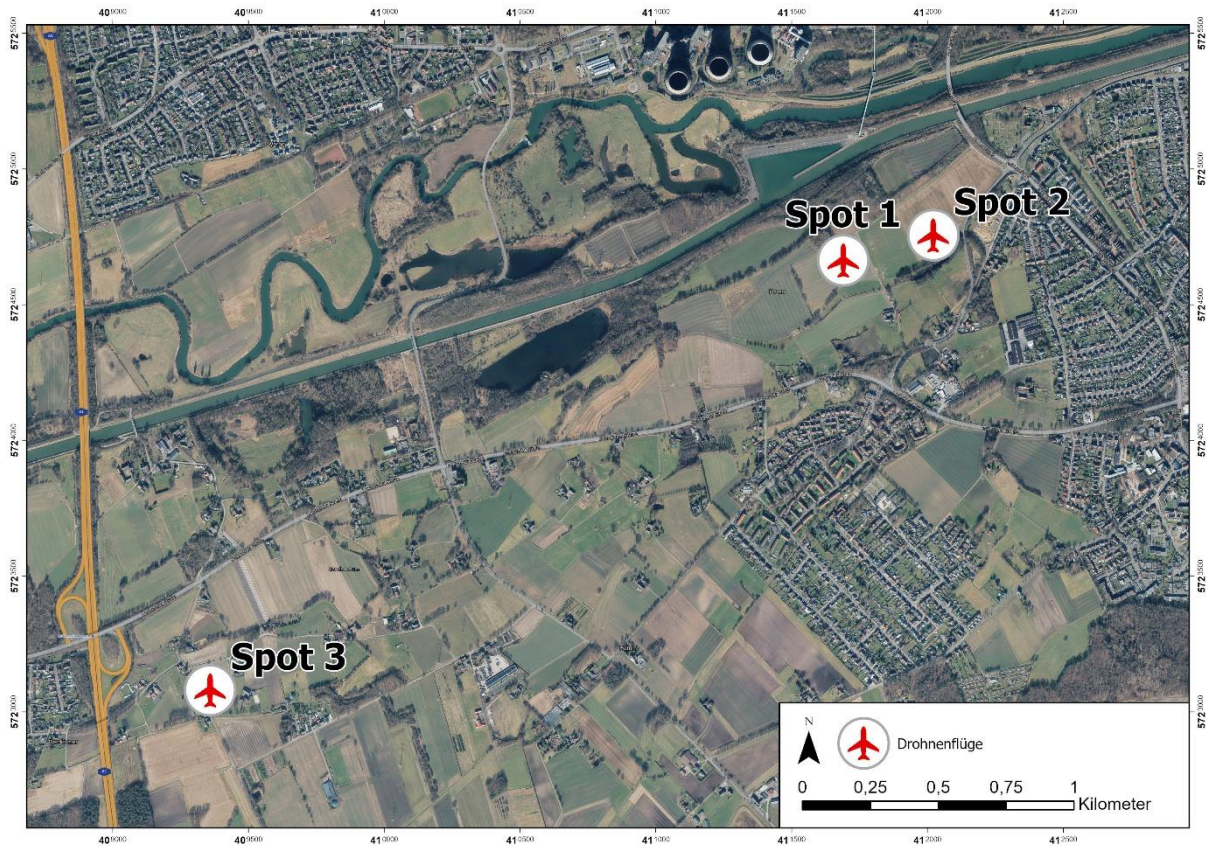


Abbildung 7: Übersicht über die drei Bereiche in denen Drohnenbefliegungen durchgeführt wurden (Spot 1 = SW₁, Spot 2 = SW₂, Spot 3 = SW₃). Hintergrund: Digitales Orthofoto mit Overlay der Geobasis NRW (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2026a).

Alle Drohnen und Sensoren sind mit Real Time Kinematic (RTK) Modulen ausgestattet, welche die GNSS-Signale verbessern und es ermöglichen, die Flüge sowie sämtliche Aufnahmen und Messungen durch die Referenzstationen der Landesvermessung mit einer absoluten Genauigkeit von 2 cm bis 3 cm durchzuführen (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2026c). Die Flüge zur Gasmessung wurden unter Verwendung des hochgenauen Digitalen Geländemodells (DGM) der Landesvermessung (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2026b) in einer exakten Höhe von 10 m durchgeführt, während die Kameraflüge in einer Flughöhe von 60 m erfolgten.

Bildaufnahmen wurden durch die Drohnen an allen vier Terminen gemacht, Gasmessungen aufgrund des höheren Aufwandes nur am 04.03.2026 (Spot 1) und am 26.05.2026 (alle Spots).

Spot 1 (SW₁)

Im ersten Bereich (südlich des Torkswegs in Hamm-Stockum) konnten bereits in den Luftbildern der Geobasis NRW die größten Schäden festgestellt werden (Abbildung 2). Bei den monatlichen Drohnenbefliegungen und der anschließenden Bildverarbeitung konnte festgestellt werden, dass sich der Schadensbereich mit den Jahreszeiten und der Vegetation zwar leicht verändert, in Form (Abbildung 8) und Größe (Tabelle 1) aber in etwa konstant bleibt.

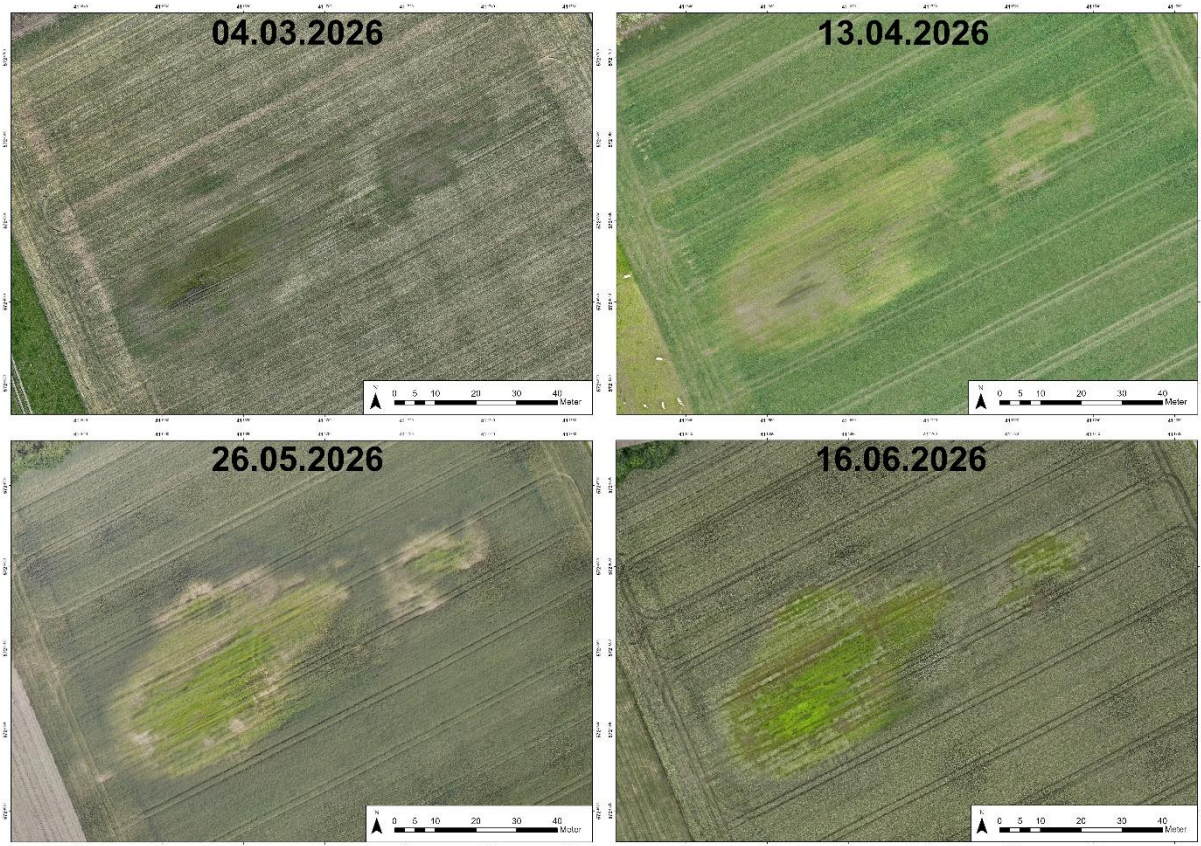


Abbildung 8: Zeitliche Veränderung der Schadensflächen an Spot 1 anhand der Drohnenaufnahmen.

Tabelle 1: Anhand der Orthofotos erfasste ungefähre Größe der Vegetationsschäden in den Befliegungsbereichen

Bereich	Datum	Größe [m²]
Spot 1	04.03.2026	2.714
Spot 1	13.04.2026	2.537
Spot 1	26.05.2026	2.692
Spot 1	16.06.2026	2.615
Spot 2	04.03.2026	1.076
Spot 2	13.04.2026	1.412
Spot 2	26.05.2026	1.518
Spot 2	16.06.2026	1.864
Spot 3	04.03.2026	445
Spot 3	13.04.2026	570
Spot 3	26.05.2026	462
Spot 3	16.06.2026	477

Die zusätzlichen Kameras ermöglichten es, den Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) (HUETE 1988) zu nutzen, um zu zeigen, dass die Vegetation im Zentrum der Anomalie zumindest im Mai keine Verringerung, sondern eine Erhöhung des Chlorophyllanteils zeigt, was entweder auf verbessertes Wachstum oder eine andere Pflanzenart hindeuten kann (Abbildung 9 oben rechts). Der SAVI ähnelt in der Berechnung dem bekannteren Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (ROUSE et al.

1974), ist aufgrund der Bereinigung von Bodeneffekten für Ackerflächen jedoch besser geeignet. Neben dem Reflexionsgrad im nahen Infrarot (NIR) und im roten, sichtbaren Bereich geht auch der empirisch festzulegende Korrekturfaktor L in die Berechnung ein. In diesem Fall wurde ein Mittelwert von 0,5 verwendet.

$$SAVI = \frac{NIR - rot}{NIR + rot + L} \times (1 + L)$$

Anhand der Auswertungen (Abbildung 9 oben) ist gut erkennbar, dass es sich um eine andere Vegetation als auf dem umgebenden Feld handelt. Innerhalb des Feldes sind statt des ausgesäten Roggens deutlich andere Pflanzen gewachsen (Abbildung 10). Die Auswirkungen diffuser Kohlenwasserstoffemissionen auf die Vegetation sind zwar bereits erforscht, aber noch nicht vollumfänglich geklärt (NOOMEN et al. 2012).

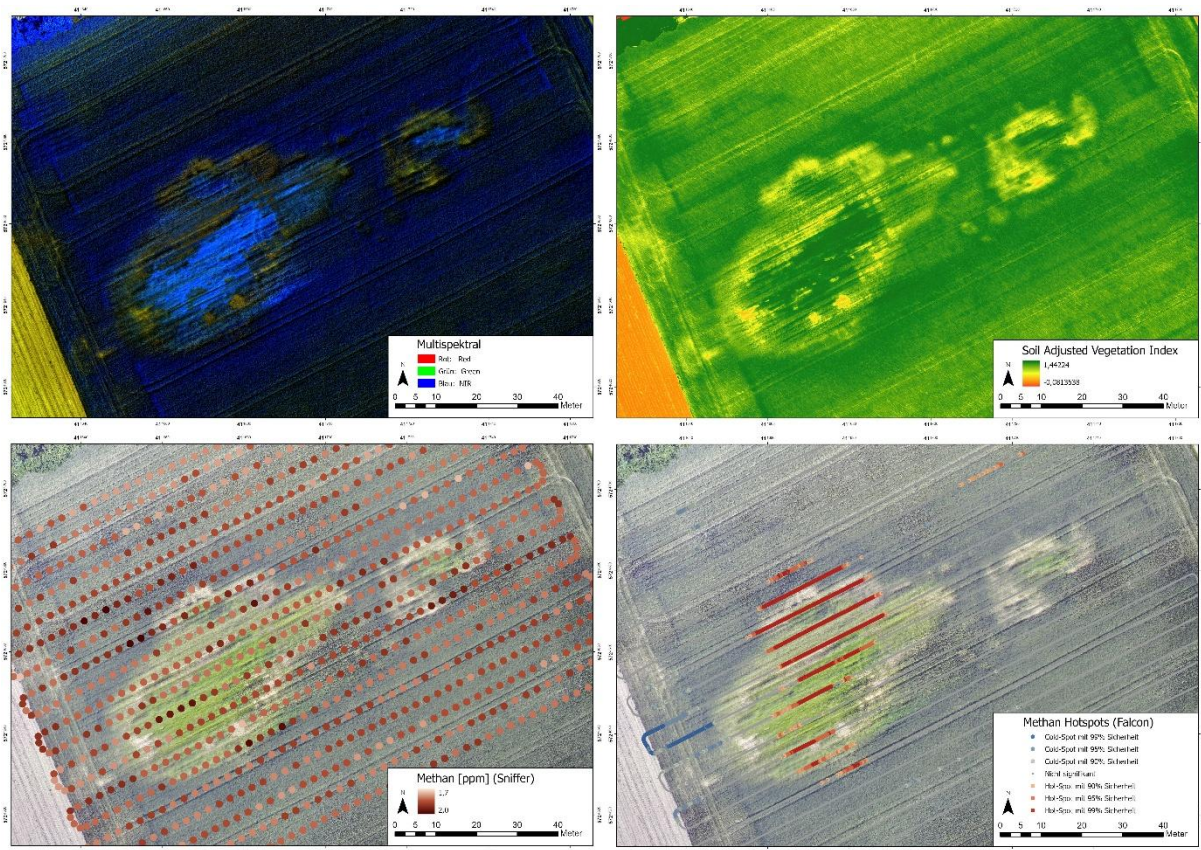


Abbildung 9: Multisensorale Auswertung der Drohnenmessungen an Spot 1. Oben links: Falschfarbenbild mit Nahinfrarot statt Blau-Kanal. Oben rechts: SAVI. Unten links: Gasmessung mittels Sniffer. Unten rechts: Geostatistische Auswertung (Hotspot-Analyse) der Falcon Plus Messungen.

Auch die drohnengestützten Gasmessungen am 04.03.2026 und am 26.05.2026 konnten erfolgreich durchgeführt werden. Dabei konnten Methanausgasungen festgestellt werden. Die direkte Messung in 10 m Höhe konnte keine Emissionen oberhalb der zu erwartenden Hintergrundbelastung feststellen, was darauf hindeutet, dass sich die Methanwolke entweder aufgrund des hohen Luftdrucks in Bodennähe bewegt hat oder durch natürliche Dispersion in der Höhenlagen keine ausreichende Konzentration mehr aufwies. Die Werte bewegten sich z. B. am 26.05.2026 in einem Bereich von 1,7 ppm

bis 2,0 ppm (Abbildung 9 unten links), die Varianz lag damit noch deutlich unter der Auflösung von 1 ppm.



Abbildung 10: Die Nahaufnahme der RGB-Kamera der Drohne zeigt deutlich, dass innerhalb der Schadstelle von Spot 1 eine unterschiedliche Vegetation zu dem angebauten Roggen heranwächst (16.06.2026). Die anderen Spots zeigen, vermutlich aufgrund der geringeren Größe, diesen Effekt gar nicht oder nur in verringertem Maße.

Mithilfe des Falcon konnten 80.908 gültige Messwerte erfasst werden, von denen etwa 10 % Spuren von Methan aufwiesen. Aufgrund des Messverfahrens ermöglicht der Sensor zwar keine direkte Quantifizierung, die Messwerte liegen in der Einheit ppm x m vor. Durch die hohe Messdichte konnten in ArcGIS Pro jedoch mittels geostatistischer Methoden entsprechende Hotspots hoher Gaskonzentration berechnet werden, die mit den visuellen Schäden sowie den In-Situ-Messungen übereinstimmen (siehe Abbildung 9 unten rechts). Bei dem verwendeten Verfahren handelt es sich um die Getis-Ord G_i^* -Statistik (ORD & GETIS 1995). Mithilfe dieses räumlichen Autokorrelationsindex werden statistisch signifikante räumliche Cluster als „Hotspots“ identifiziert. Ein hoher positiver G_i^* -Wert zeigt an, dass ein Punkt in einem Cluster hoher Werte liegt. Ein hoher negativer Wert zeigt dagegen einen Cluster mit niedrigen Werten an (Coldspot). Letzteres ist in diesem Fall nicht relevant, da der niedrigste Wert „0“ beträgt. Als Vergleichsradius wurden 15 m gewählt, was dem 3-fachen des Abstandes der einzelnen Flugbahnen im Raster entspricht.

Spot 2 (SW₂)

Auch der zweite Bereich (zwischen Torksweg und Johannes-Rau-Straße) zeigte in der zeitlichen Auswertung einige Veränderungen. Neben der Vergrößerung im Zeitraum von März bis Juni (Tabelle 1), zeigen sich auch neue Stellen mit Vegetationsveränderungen im südwestlichen Bereich (Abbildung 11). Die starken Schäden im südöstlichen Bildausschnitt sind hingegen eher durch regelmäßige Ein- und Ausfahrt mit landwirtschaftlichem Großgerät zurückzuführen.

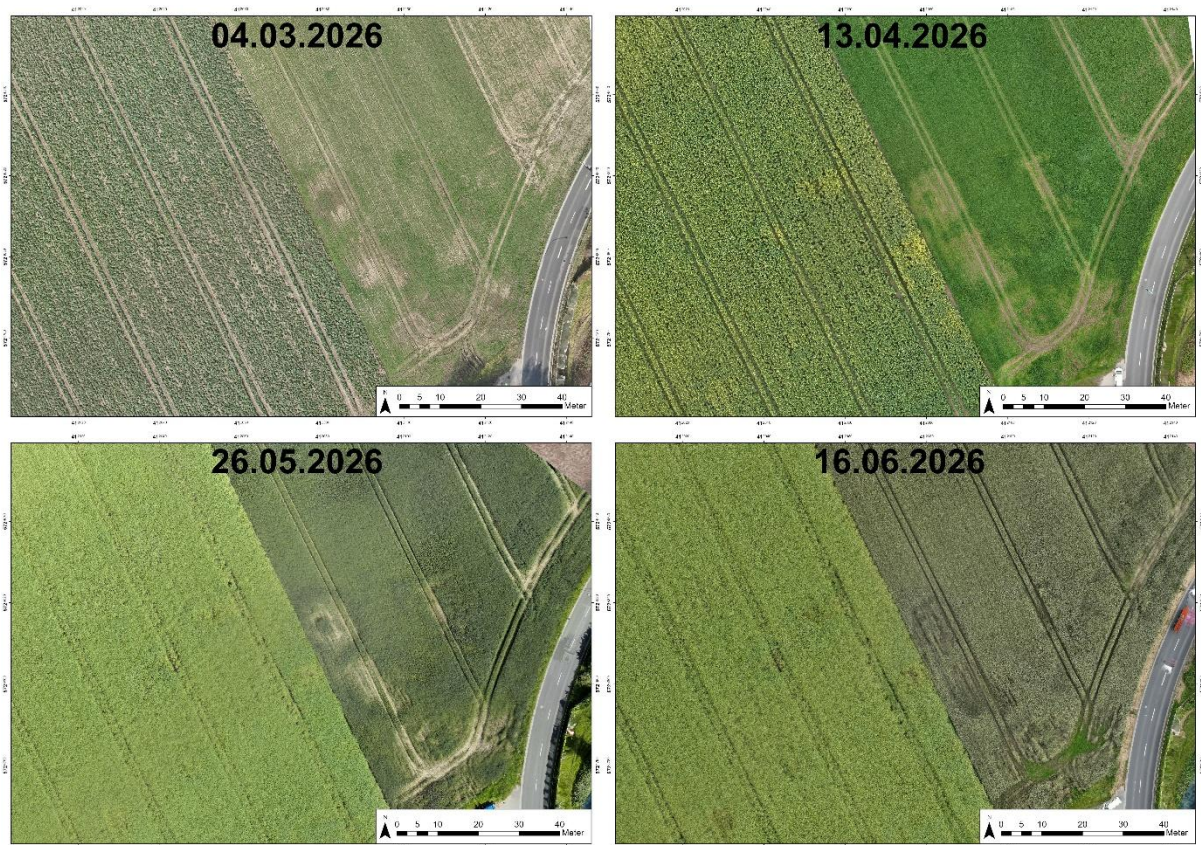


Abbildung 11: Zeitliche Veränderung der Schadensflächen an Spot 2 anhand der Drohnenaufnahmen.

Wie beim ersten Spot konnten auch hier anhand zusätzlicher Messungen und Auswertungen die deutlichen Vegetationsschäden im SAVI sowie die Hotspots vergleichsweise hoher Methankonzentrationen sichtbar gemacht werden (Abbildung 12).

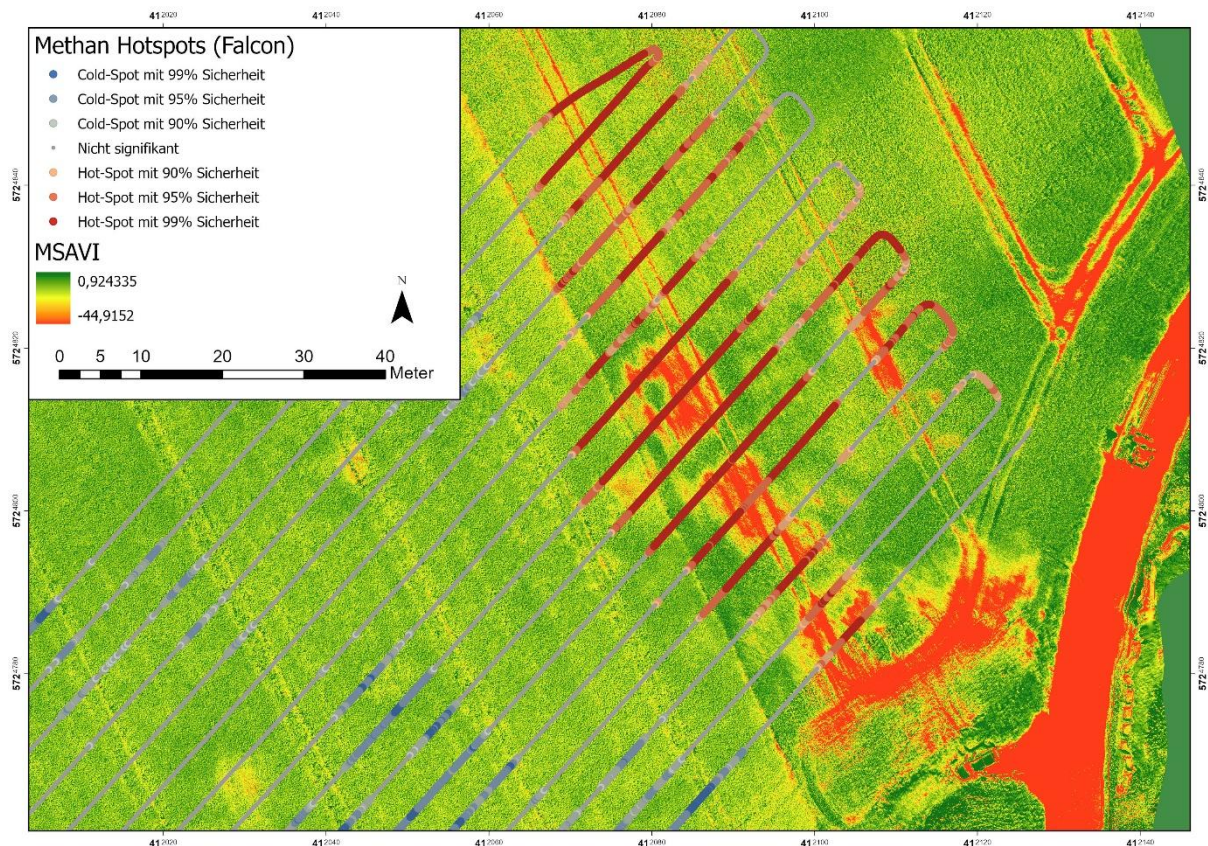


Abbildung 12: Starke Korrelation von Hotspots der Gasdetektion mit starken Vegetationsschäden, sichtbar gemacht durch eine modifizierte Version des SAVI (EOS Data Analytics, Inc, 2026).

Auch hier zeigt die separate Erfassung der Vegetationsgüte durch Multispektralbilder sowie der Methan-Hotspots mittels Falcon-Sensor eine sehr starke Korrelation. An den neu sichtbaren Vegetationsschäden im westlichen Bereich konnte hingegen kein Gas detektiert werden. Es ist möglich, dass diese Schäden durch andere Faktoren, wie beispielsweise Vernässungen, entstanden sind.

Spot 3 (SW₃)

Wie in den anderen Bereichen gibt es auch an Spot 3 (zwischen Kerstheider Straße und Am Holtkamp in Hamm-Sandbochum) geringe Fluktuationen in Form (Abbildung 13) und Größe (Tabelle 1), die sich im Vegetationsindex gut nachweisen lassen. Allerdings konnten bei den Befliegungen am 26.05.2026 keine Methanemissionen nachgewiesen werden, was sich mit den In-situ-Messungen zur gleichen Zeit deckt. Insgesamt scheint dieser Standort aufgrund geologischer und/oder meteorologischer Einflüsse eine deutlich höhere Variabilität der Emissionen aufzuweisen als die anderen Standorte. Auch bei vorherigen Messungen im Mai 2025 im Rahmen eines anderen Projekts konnten hier zwar deutliche Vegetationsschäden festgestellt werden, jedoch weder per Drohne noch per FID Methan detektiert werden.

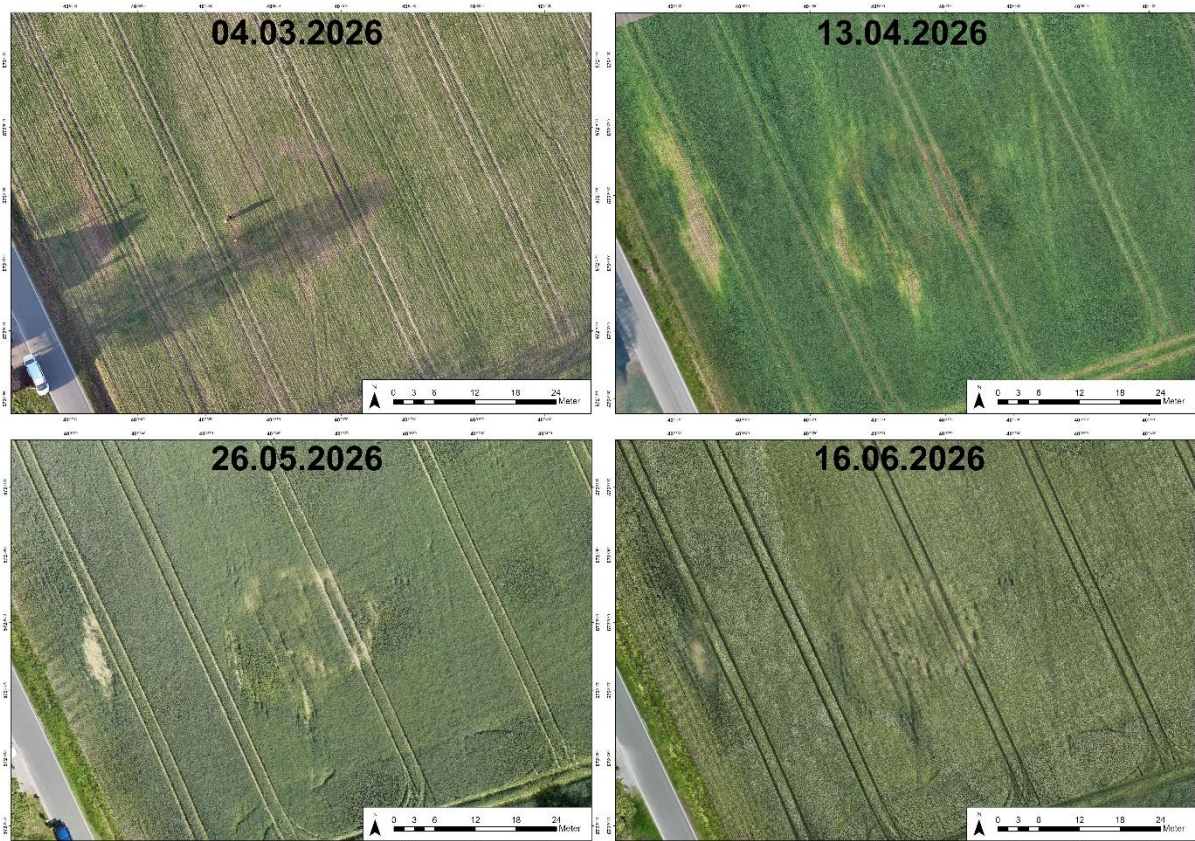


Abbildung 13: Zeitliche Veränderung der Schadensflächen an Spot 3 anhand der Drohnenaufnahmen. Von oben links nach unten rechts: 04.03.2026, 13.04.2026, 26.05.2026 und 16.06.2026.

AP 4: Datenintegration zur Entwicklung eines integrativen Prozessverständnisses

Für die abschließende Bewertung der Messergebnisse und die raum-zeitliche Analyse der Ausgasungserscheinungen wurde ein Projekt in Esri® ArcGIS erstellt, in dem alle verfügbaren Informationen (AP 1) zur Geologie (Lithologie, Bodenarten, Mächtigkeiten), Tektonik (Karbon- und Kreidetektonik), Bergbau (Wasserprovinzen, Abbaubereiche, bergbauliche Einwirkungsbereiche) und Infrastruktur (u. a. verfügbare Daten zu Gasleitungen) zusammen mit den gefundenen Verdachtsflächen (AP 0) und gefundenen Lokalisationen mit Gasemissionen (AP 2) hinterlegt wurden. Außerdem konnten in diesem GIS sämtliche Daten der UAV-Messungen (AP 3) mit den übrigen Daten kombiniert, ausgewertet und ebenfalls bewertet werden. Insgesamt zeigt sich bei der Kombination sämtlicher verfügbarer Daten, dass es im Raum Hamm

- vermutlich sowohl rein vom Bergbau induzierte Gasemissionen gibt (Zerrungszonen des Deckgebirges infolge des Steinkohlenabbaus) als auch Ausgasungen, die auf natürliche Ursachen (Tektonik) zurückzuführen sind. Mischungen aus beiden Faktoren sind dabei anzunehmen;
- häufig zu einer Mischung der ausströmenden Gase – ein Teil thermogenes Methan aus der Steinkohle und ein Teil biogen gebildetes Methan – kommt;

- eine Isotopenfraktionierung des ausströmenden Methans durch die Migration durch das Deckgebirge über geologische Zeiträume wahrscheinlich ist;
- zu diversen Vegetationsanomalien durch das Ausströmen von Methan kommt.

Schlussfolgerungen

Aufgrund der begrenzten Anzahl an gefundenen positiven Methanausgasungspunkten und einer fehlenden Redundanz der Messungen können keine eindeutigen Aussagen zur Herkunft des Methans getroffen werden. Möglicherweise spielen auch in den vom Bergbau beeinflussten Bereichen rund um die Stadt Hamm verschiedene Wirkmechanismen zusammen – sowohl Zerrüttungs- und Zerrungszone des Deckgebirges infolge des Steinkohlenabbaus als auch natürliche, tektonische Elemente wie Störungen oder Klüfte. Bei den gefundenen Ausgasungspunkten außerhalb des vom Bergbau beeinflussten Bereiches sind natürliche Ursachen anzunehmen. Durch fehlende Isotopenanalysen dieser Lokalitäten steht jedoch noch die Frage aus, ob es sich um biogen oder thermogen gebildetes Methan handelt. Bei biogen gebildetem Methan ist eine oberflächennahe Bildung durch Bakterien nicht auszuschließen, was die These des tektonischen Einflusses widerlegen würde. Wenn es sich hingegen um thermogen gebildetes Methan handelt oder eine Mischform aus thermogenen und biogenen Methan, ist eine durch Tektonik hervorgerufene Wegsamkeit nicht unwahrscheinlich.

Es verbleiben also offene Forschungsfragen, die in einem künftigen Forschungsprojekt durch die Vorarbeit dieser Studie gezielt bearbeitet werden können:

- Auffinden weiterer Ausgasungspunkte innerhalb und außerhalb des vom Bergbau beeinflussten Gebiets mit Hilfe der gewonnenen Erfahrungen bei der Auswertung von historischen Luftbildern und Vegetationsanomalien.
- Systematische Beprobung weiterer Ausgasungspunkte innerhalb und außerhalb der vom Bergbau beeinflussten Gebiete zur Analyse der geochemischen Zusammensetzung des Gases und der Isotopensignatur, sowie ihrer zeitlichen Variation.
- Regelmäßige UAV gestützte Untersuchungen zur systematischen Analyse der Auswirkungen der Ausgasung auf die Vegetation und Ausweitung dieser Untersuchungen auf weitere Gebiete, um einen automatisierten, KI-gestützten Ansatz zur Detektion von Ausgasungsverdachtsflächen zu entwickeln.
- Abschätzung des Einflusses der Migration auf die Isotopensignatur des Methans (mögliche Fraktionierungserscheinungen durch unterschiedlich lange Aufstiegszeiten).

5. Literatur

BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2026a): Digitale Orthophotos. - Online verfügbar: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/luftbild-und-satellitenbildinformationen/aktuelle-luftbild-und-o> (zuletzt geprüft am 11.06.2026).

BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2026b): Digitales Geländemodell. - Online verfügbar: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/hoehenmodelle/digitale-gelaendemodelle/digitales-gelaendemodell> (zuletzt geprüft am 11.06.2026).

BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2026c): SAPOS®-HEPS: Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service. - Online verfügbar: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/raumbezug/satellitenpositionierungsdienst-sapos/sapos-heps> (zuletzt geprüft am 11.06.2026).

DJI (2026a): DJI Agriculture. DJI Mavic 3M: - Online verfügbar: <https://ag.dji.com/de/mavic-3-m> (zuletzt geprüft am 11.06.2026).

DJI (2026b): Matrice 350 RTK. - Online verfügbar: <https://enterprise.dji.com/de/matrice-350-rtk> (zuletzt geprüft am 11.06.2026).

DJI (2026c): TDLAS Methane Sensing Module. - Online verfügbar: <https://enterprise.dji.com/de/ecosystem/sniffer-tdlas> (zuletzt geprüft am 11.06.2026).

DÖLLING, M., JUCH, D. (2009): Strukturgeologische Modellvorstellungen zum Kreide-Deckgebirge im zentralen Münsterland. - In: Scriptum 18, Zwei Beiträge zur Geologie des zentralen und südlichen Münsterlandes. Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Krefeld.

EOS DATA ANALYTICS, INC. (2026): MSAVI: Modified Soil Adjusted Vegetation Index - Online verfügbar: <https://eos.com/make-an-analysis/msavi/>

HUETE, A. R. (1988): A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3), 295–309.

KAWATERS, C. (1987): Ein Naturwunder an der Lippe als leuchtende Ruhrpott-Attraktion. - Zeitungsartikel der taz (Tageszeitung) vom 31.08.1987.

KUKUK, P. (1938): Geologie des niederrheinisch-westfälischen Steinkohlengebietes, 706 S.; Berlin.

MELCHERS, C. (2009): Methan im südlichen Münsterland. - Dissertation an der Universität Münster, 198 S.; Münster.

NOOMEN, M.F., SKIDMORE, A.K., VAN DER MEER, F.D. (2003): Detecting the Influence of Gas Seepage on Vegetation, using Hyperspectral Remote Sensing. - 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Herrsching, 13–16 May 2003.

NOOMEN, M.F., VAN DER WERFF, H.M.A., VAN DER MEER, F.D. (2012): Spectral and spatial indicators of botanical changes caused by long-term hydrocarbon seepage. - Ecological Informatics 8 (2012), S. 55–64.

ORD, J. K., & GETIS, A. (1995): Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues. Geographical Analysis, 27, 286–306.

ROUSE, J., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., & DEERING, D. W. (1974): Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium.

SPH ENGINEERING. (2026): Falcon Plus TDLAS methane detector. - Online verfügbar: <https://shop.sphengineering.com/products/falcon-plus-tdlas-methane-detector> (zuletzt geprüft am 11.6.2026).

WEGNER, T. (1924): Das Auftreten von Kohlenwasserstoffen im Bereich des westfälischen Karbon. - Glückauf, Bd. 60, 631–642, 659–644.

WESCHE, D. (2010): Erfassung und Bewertung geogener Methanausgasungen im Stadtgebiet Hamm. - unveröffentlichte Master-Arbeit an der Universität Münster im Fachbereich Geowissenschaften.