

Emissionsmessung

Ein innovativer Ansatz, enthalten in P-Cubed® Rev. 6.4

PICARRO

Die Methanemissionen stehen im Mittelpunkt der aktuellen Klimakrise, da Methan in hohem Maße zur globalen Erwärmung beiträgt. Methan ist eines der stärksten Treibhausgase und wirkt sich innerhalb der ersten 20 Jahre in der Atmosphäre etwa 86 Mal negativer auf den Klimawandel aus als Kohlendioxid. Es macht bis zu 25 % der bisherigen Erwärmung aus, die auf menschliche Aktivitäten zurückgeführt werden kann, und gilt als das Treibhausgas, das die Erwärmung in naher Zukunft am stärksten vorantreibt. Methan stellt für Länder auf der ganzen Welt auch eine große Chance dar, ihren gesamten Kohlenstoff-Fußabdruck drastisch zu reduzieren. Diese Gelegenheit ist der Tatsache geschuldet, dass ein großer Teil des Methans, das in unsere Atmosphäre gelangt, aus Quellen stammt, die wirksam eingedämmt werden können. Aufgrund der kurzen Lebensdauer von Methan in der Atmosphäre (nur 12-15 Jahre im Vergleich zu mehr als 100 Jahren bei Kohlendioxid) kann eine bedeutende Reduzierung der Treibhausgase in der Atmosphäre bereits innerhalb einer einzigen Generation erreicht werden. Mit den richtigen Protokollen und Technologien kann die Menschheit den Kampf gegen flüchtige Methanemissionen gewinnen und so den Erwärmungstrend unseres Planeten drastisch beeinflussen. Die Berichterstattung über Methanemissionen und deren Verringerung ist der größte Hebel, der heute zur Verlangsamung der Emissionen eingesetzt werden kann

Die Erwärmung des Planeten wird eingedämmt, und Picarro verfügt über die Berichts-anwendung, die die Grundlage für das Emissionsmanagement und den Berichterstattungsprozess eines jeden Versorgungsunternehmens bilden sollte.

Die Emissionsmessung-Anwendung stellt eine notwendige Lösung für das schwierige Problem dar, ein vollständiges und genaues Inventar der Gesamtemissionen eines Gasversorgungsunternehmens in allen Regionen und im Zeitverlauf zu erstellen. Diese innovative Anwendung, die auf der Analyseplattform P-Cubed® gehostet wird, erstellt ein auf Messungen basierendes Emissionsfaktoreninventar, das eine wesentlich genauere Erfassung der Gesamtemissionen darstellt. Ohne Kenntnis der gesamten Methanemissionen eines Versorgungsnetzes ist es sehr schwierig, ein sinnvolles Programm zur Emissionsreduzierung durchzuführen - wenn man die Emissionen seines Netzes nicht gemessen hat, weiß man nicht, wo man mit der Reduzierung beginnen soll. Ein Versorgungsunternehmen kann die Anwendung nutzen, um seine Emissionen und die damit verbundenen Emissionsreduzierungen effizient zu überwachen, zu quantifizieren und zu melden, und zwar Jahr für Jahr und aufgeschlüsselt nach Regionen. Dieses Dokument fasst die Schritte

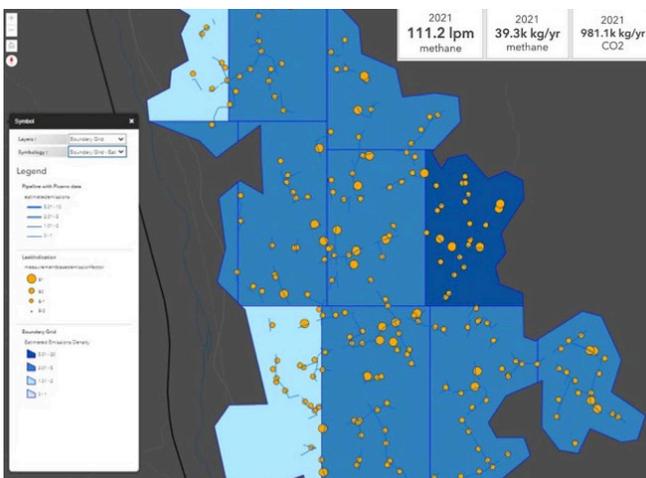


Abbildung 1. Emissionsbezogene Daten können mit Hilfe von Leistungs-Dashboards schnell operationalisiert werden. Dieses Dashboard enthält Informationen über die Gesamtemissionen des Netzes, Emissionstrends im Laufe der Zeit, Emissionsintensitäten, auf Messungen basierende Emissionsfaktoren und spezifische Emissionspunktquellen.

zusammen, die notwendig sind, um ein praktikables System für das Management und die Berichterstattung von Methanemissionen zu entwickeln, und informiert darüber, wie Picarro Technologies ein robustes System für die Emissionsberichterstattung liefern kann.

Ein Versorgungsunternehmen kann die Anwendung nutzen, um seine Emissionen und die damit verbundenen Emissionsreduzierungen effizient zu überwachen, zu quantifizieren und zu melden, und zwar Jahr für Jahr und aufgeschlüsselt nach Regionen.

Ermöglichung von ESG-Zielen

Bei der Betrachtung der flüchtigen Methanemissionen der Industrie ist es wichtig zu betonen, dass die gesamte Wertschöpfungskette des Erdgases - Upstream, Midstream, Downstream und Distribution - den Auftrag erhält, ihre Emissionen genau zu messen und zu melden. Außerdem müssen sie einen Plan erstellen und umsetzen, um ihre Emissionen im Laufe der Zeit deutlich zu reduzieren. Dieser Auftrag kommt von globalen Handelsorganisationen, Regierungen, Aufsichtsbehörden, Gemeinden, Aktionären und Finanzmärkten. Die Verringerung der Methanemissionen ist heute für viele Unternehmen ein wichtiges Ziel in Bezug auf Umwelt, Soziales und Unternehmensführung (ESG), und die Unternehmen, die diese KPIs zur Verringerung der Methanemissionen erfüllen, finden bessere Finanzierungsmöglichkeiten, werden von der Öffentlichkeit gewürdigt und übertreffen wahrscheinlich die Marktperformance. Verteilernetzbetreiber (DSOs), die nationale, regionale und sogar lokale Verteilernetze verwalten, bilden keine Ausnahme von diesem Mandat und sind in der Tat von entscheidender Bedeutung, wenn es darum geht, der gesamten Öl- und Gasindustrie zu helfen, die Methanemissionen wirksam zu reduzieren, da die Verteilung einen bedeutenden Prozentsatz der Gesamtemissionen der Branche in den USA ausmacht. Schließlich bietet die Umsetzung wirksamer Emissionsmanagement- und -reduzierungsprogramme, die den Betreibern helfen, bessere Sicherheitsergebnisse zu erzielen, die betrieblichen Auswirkungen auf die Umwelt zu verringern, die Kapitaleffizienz zu steigern und die Gasnetze so umzubauen, dass ein Netto-Null-Betrieb erreicht wird, der den Weg für eine nachhaltige und sicherere Erdgasverteilung in der Zukunft ebnet, eine große Chance.

Der Schlüssel zum Verständnis und zur Bewältigung des Problems der Methanemissionen liegt in der Ermittlung, Messung, Quantifizierung und schließlich in der Verringerung der Methanemissionen aus unseren Geschäftstätigkeiten. Erstens wissen wir, dass einige Emissionen das unvermeidliche Ergebnis von Erdgassystemen und -prozessen sind; es ist von entscheidender Bedeutung, diese Quellen zu identifizieren, damit sie später abgemildert

oder kompensiert werden können. Zu den konstruktionsbedingten Quellen gehören Dinge wie Fackeln oder Überdruckentlüftungen, die Teil der Wertschöpfungskette bei der Verarbeitung und dem Transport von Erdgas sind. Der eigentliche Schuldige an den Auswirkungen der Methanemissionen auf die globale Erwärmung sind die unerwarteten oder flüchtigen Emissionen; diese Emissionen sind nicht Bestandteil der Konzipierung des Erdgassystems und stellen daher nicht nur eine enorme Belastung für die Umwelt dar, sondern auch entgangene Einnahmen und Gewinne. Flüchtige Emissionen tragen weltweit in erheblichem Maße zu den gesamten DSO-Emissionen bei. Beispiele für flüchtige Emissionen sind Lecks in unseren Pipelines, ein defektes Ventil oder eine ineffiziente Fackel.

Wirksame Emissionsminderung und -reduzierung

Die Identifizierung und Messung flüchtiger Leckagen ist der erste Schritt zur Minderung oder Reduzierung von Emissionen. Es kann sehr herausfordernd sein, flüchtige Emissionen in einem Verteilungsnetz zu berücksichtigen, das Millionen von Rohrsegmenten und

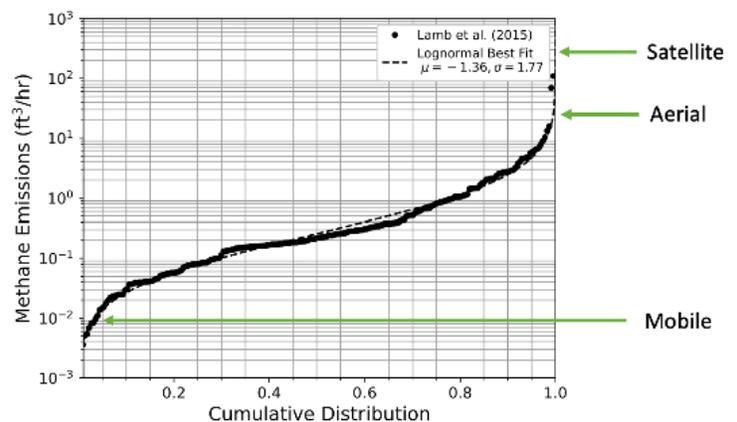


Abbildung 2. Diagramm, das die Methanemissionen im Vergleich zur kumulativen Verteilung zeigt, einschließlich einer Darstellung, welcher Teil der Kurve für verschiedene Technologien nach MDL sichtbar ist. AMLD ist die einzige Technologie, die empfindlich genug ist, um die Gesamtheit eines Verteilungsnetzes zu messen.

andere Anlagen umfassen kann, die potenzielle Punkt-Emittenten darstellen. Es gibt heute viele Technologien auf dem Markt, mit denen undichte Infrastrukturen aufgespürt werden können, darunter Handgeräte, fortschrittliche mobile Leckerkennungslösungen (Fahrzeug- und Drohnen-basiert), Methoden aus der Luft (LIDAR), Sensoren zur kontinuierlichen Überwachung und Satelliten. Nicht alle Technologien sind für die Messung und Reduzierung von Emissionen in einem Erdgasverteilungssystem geeignet. Ein gutes Maß für die Eignung für den Einsatz in Verteilernetzen ist die Mindestnachweisgrenze (MDL) im Vergleich zur lognormalen Kurve der Emissionsrate im Verhältnis

zur kumulativen Leckverteilungskurve. Wie aus Abbildung 2 hervorgeht, bedeutet die sehr verzerrte Darstellung, dass sehr wenige Leckagen einen großen Prozentsatz der Gesamtemissionen ausmachen (d. h. <10 % der gesamten Leckagen können 40-50 % der Gesamtemissionen ausmachen). Leider haben viele Technologien einfach keine ausreichend niedrige MDL, um die große Mehrheit der Lecks in einem Verteilernetz zu erkennen; in einigen Fällen umfasst ihr "blinder Fleck" sogar große Lecks von >10-20 scfh, und wenn die Technologie das Leck nicht messen kann, weil es unterhalb der Mindestdetektionsgrenze liegt, dann kann der Betreiber nicht wissen, wie er es beseitigen kann, was sowohl zu einem weniger sicheren Netz als auch zu einer verpassten Gelegenheit der Emissionsreduktion führt. Um genaue Angaben zu den Basisemissionen machen zu können und sinnvolle Bemühungen zur Emissionsreduzierung zu fördern, ist es wichtig, Leckagen aller Größenordnungen im Netz messen zu können. In dem technischen Bericht von Highwood Emissions Management, "Leak detection methods for natural gas gathering, transmission, and distribution pipelines" [1], versucht das Unternehmen, verschiedene Technologien zu vergleichen, um Betreibern, die diese für die Emissionsmessung, -berichterstattung und -minderungsprogramme nutzen möchten, eine Orientierung zu geben. Anhand dieses Berichts und anderer Belege aus der Branche könnte man zu folgendem Schluss kommen:

- **Handhelds** – im Allgemeinen nicht empfindlich genug und zu langsam (nicht skalierbar für die Messung des gesamten Netzes in einem aussagekräftigen Zeitrahmen), schlechte Trefferquote
- **Satelliten** – geringe räumliche Auflösung, extrem hohe MDL
- **Luftgestütztes LIDAR** – teuer im Einsatz, wetterabhängig, möglicherweise nicht in der Lage, Zugang zu allen Gebieten zu erhalten (FAA-Vorschriften, Flugverbotszonen usw.), hohe MDL
- **Drones** – gut für bestimmte Anwendungsfälle (hauptsächlich Upstream- und Downstream-Verarbeitung, Potenzial für Midstream), hohe Betriebskosten, begrenzte Reichweite
- **Fahrzeuggestützte AMLD** – Sehr niedrige MDL (bis zu 0,01 SCFH unter Verwendung eines PPB-Sensors), skalierbar für das gesamte Netz, kosteneffizient

Abbildung 3. Die AMLD-Lösung von Picarro zeigt die verschiedenen Komponenten, einschließlich der branchenführenden Methan-Ethan-Sensoren mit minimaler Nachweisgrenze (MDL), mit denen Picarro flüchtige Methanlecks und -emissionen identifizieren, messen und quantifizieren kann.

Die fahrzeuggestützte AMLD ist zweifellos die leistungsfähigste Methode zur Erfassung der Emissionsdaten, die zur Berechnung einer netzweiten, messungsgestützten Emissionsschätzung erforderlich sind.



Die fahrzeuggestützte AMLD ist zweifellos die leistungsfähigste Methode zur Erfassung der Emissionsdaten, die zur Berechnung einer netzweiten, messungsgestützten Emissionsschätzung erforderlich sind. AMLD von Picarro ist eine bewährte Technologie und Methodik, die in 10 US-Bundesstaaten für die Erhebung von Compliance-Lecks eingesetzt wird und von mehr als 30 Kunden aus aller Welt angewendet wird. Mit dem Advanced Leak Detection Algorithmus der 4. Generation (ALD 4.0) von Picarro können Kunden jetzt eine konkurrenzlose Leistung mit einer Leckfindungsrate von >90 %, <10 % falsch-positiven Ergebnissen und >90 % Sichtfeld erwarten. Darüber hinaus wurde die Genauigkeit der Picarro-Durchflussschätzungen über acht Jahre hinweg in mehreren Studien mit Betreibern unter kontrollierter Freigabe validiert und in Produktionsabläufen auf der ganzen Welt ausgiebig eingesetzt. Mit dem AMLD von Picarro kann ein lokales Verteilungsunternehmen sein gesamtes Netz jährlich abdecken, und zwar mit einer hohen Genauigkeit der gemessenen Methankonzentrationen, einem klaren Verständnis dafür, welche Anlagen undicht sind, und der Möglichkeit, über Veränderungen der Netzleistung im Laufe der Zeit und mit aussagekräftiger Granularität zu berichten.

Nachdem ein Leck aufgespürt wurde, muss es gemessen werden, und hier kommt es wirklich auf die Empfindlichkeit und Genauigkeit der Technologie an. Die genaue Messung des Lecks ist der entscheidende Prozess, der es uns später ermöglicht, die Emissionen am Standort oder an der einzelnen Anlage zu quantifizieren. Neben der Möglichkeit, Leckagen genau zu messen, ist es sehr wichtig, die Infrastruktur ausreichend zu erfassen, um wirklich



zu verstehen, wie undicht sie ist (wie groß das Problem der flüchtigen Emissionen ist). Die Notwendigkeit von Genauigkeit und Effizienz (Skalierbarkeit) ist der ultimative Maßstab für die Technologie, wenn es um die genaue Quantifizierung von Emissionen in großem Maßstab geht. Geeignete Technologien, die ein Programm zur Emissionsberichterstattung und -reduzierung unterstützen, müssen auf Messungen beruhen und es den Betreibern ermöglichen, ihre Leckagen aufzuspüren, diese zu messen und die durch diese Leckagen verursachten Emissionen auf betriebswirtschaftlich wirksame und skalierbare Weise zu quantifizieren.

Quantifizierung von Leckflussraten

Nach der Identifizierung und Messung von Leckagen in einem Verteilungsnetz stehen verschiedene Methoden zur Quantifizierung des Leckdurchflusses zur Auswahl. Diese Methoden reichen von der direkten Messung des Gasflusses aus dem Boden über die Berechnung des Flusses anhand der Konzentration in der Luft bis hin zu optischen Bildgebungsverfahren, mit denen versucht wird, die Methanemissionen anhand des Volumens der Methanfahne und der spektralen Absorption zu quantifizieren. Sobald ein DSO die Durchflussraten einzelner Leckagen kennt, besteht der nächste Schritt darin, die Skalierung auf Standortebene, geografische Ebene und schließlich auf Netzebene zu erhöhen, um eine unternehmensweite Quantifizierung der Methanemissionen zu erreichen. Traditionell konnte die Quantifizierung auf der Netzebene auf zwei Arten erfolgen; beide Methoden sind Schätzungen und beide sind nicht besonders genau. Erstens wird eine Top-Down-Schätzung im Allgemeinen durch die Aggregation von Messungen (oder einer Kombination von Messungen und Emissionsfaktoren) für große geografische Einheiten, wie eine ganze Stadt oder Region, durchgeführt. Bei dieser Art von Schätzungen werden häufig Emissionsereignisse übersehen, die nicht kontinuierlich sind, und es werden möglicherweise Methanquellen einbezogen, die für die Berechnung nicht relevant sind (z. B. Gas von einem anderen Betreiber, einem Milchviehbetrieb oder in ähnlicher Weise zweckentfremdetes Gas), und sie bieten aufgrund des Umfangs der Sichtbarkeit oder der Messungen im Allgemeinen keine verwertbaren Erkenntnisse, die ein Betreiber zur Verbesserung seiner Netzleistung nutzen könnte. Zweitens werden bei einer Bottom-up-Schätzung Messungen oder Emissionsfaktoren für kleine Anlagen wie Pumpen, Rohrleitungen, Zählersätze usw. vorgenommen und dann addiert, um ein Gesamtemissionsvolumen zu ermitteln. Diese Methode stößt auf Schwierigkeiten, da die Emissionsfaktoren allgemeiner Natur sind, die Methanemissionen unterhalb der Ebene des Standorts oder der Anlage nur ungenau gemessen werden können, es schwierig ist, große geografische Gebiete zeitnah zu messen, und das additive Verfahren zur Quantifizierung der Gesamtemissionen des Netzes eine gewisse Fehlerquote aufweist. Es ist anzumerken, dass die überwiegende Mehrheit der derzeitigen

Es ist anzumerken, dass die überwiegende Mehrheit der derzeitigen koeffizientenbasierten Bottom-up-Methoden nicht auf direkten Messungen beruht. Sie geben die tatsächlichen Emissionen nicht genau wieder und können einzelne Emittenten weder ausfindig machen noch quantifizieren (was ihren Nutzen bei der Verringerung von Leckagen und Emissionen einschränkt).



koeffizientenbasierten Bottom-up-Methoden nicht auf direkten Messungen beruht. Sie stellen die tatsächlichen Emissionen nicht genau dar und können einzelne Emittenten weder lokalisieren noch quantifizieren (was ihre Nützlichkeit bei der Leckagebekämpfung und Emissionsreduzierung einschränkt); daher sind sie für eine aussagekräftige Emissionsberichterstattung oder Emissionsreduzierungsprogramme nicht sonderlich geeignet.

Nutzung von maschinellem Lernen zur Beschleunigung von Messungen

Im Jahr 2022 macht Picarro einen gewaltigen Schritt nach vorn, um die Öl- und Gasindustrie bei der Reduzierung von Emissionen zu unterstützen, indem es die Anwendung zur Messung von Netzwerkemissionen für die P-Cubed® Plattform veröffentlicht. Auf der Grundlage des neuen Algorithmus der 3. Generation zur Emissionsquantifizierung (EQ) ermöglicht die Emissionsmessung eine Top-down-Emissionssschätzung, die auf echten Messungen von Punktquellen basiert, ähnlich einer Bottom-up-Berechnung. Es verwendet einen einzigartigen leckagebasierten, zeitlich gemittelten Ansatz, der sich seit mehr als vier Jahren in der Praxis bewährt hat. Mit Hilfe der Emissionsmessung können die Betreiber ein vollständiges Inventar der Emissionsquellen des Netzes erstellen, das von 0,01 SCFH bis zu 100+ SCFH geordnet und unterteilt ist. Die Anwendung gibt messtechnisch ermittelte Emissionsfaktoren aus, die für jeden Betreiber kalibriert und optimiert sind - ein enormer Fortschritt gegenüber allgemeinen Emissionsfaktoren, die für bestimmte Anlagen nicht repräsentativ sein können. Unsere Protokolle und Methoden unterstützen die bestehenden und künftigen freiwilligen Berichterstattungsschemata für Methanemissionen, einschließlich OGMP 2.0, Project Veritas, NGSi, Marcogaz und OneFuture. Schließlich wird die Emissionsmessung bereits von mehreren Versorgern genutzt, um Emissionen zu melden und die Bemühungen zur Emissionsreduzierung voranzutreiben. Zu diesen Betreibern gehören Italgas und PG&E, und viele andere werden diese Technologie im Jahr 2022 ebenfalls übernehmen.

Um unsere Bemühungen zur Emissionsmessung und -reduzierung zu unterstützen, führen wir mehrere GIS-basierte Visualisierungstools ein. Das erste Tool, das im Jahr 2022 veröffentlicht wird, ist der Network Assessment Viewer (NAV). Der NAV ist eine intuitive und interaktive Darstellung aller gemessenen Methanquellen und der damit verbundenen Emissionen in einem DSO-Netz. Es berechnet die Leck- und Emissionsdichte sowie die gesamten Methanemissionen für die Rohranlagen. Außerdem werden diese Daten auf verschiedenen räumlichen (Zoom-)Ebenen aggregiert, von der lokalen über die regionale bis hin zur gesamten Netzwerkebene. Der NAV wird mehrere Anwendungen unterstützen, darunter Emissionsmessungen und -berichterstattung. In der Entwicklung befindet sich eine Reihe von Dashboards, die es den Betreibern ermöglichen werden, ihre Emissionen in verschiedenen Regionen und im Zeitverlauf nachzuverfolgen. Im weiteren Verlauf des Jahres 2022 wird Picarro das Mess- und Berichterstattungskonzept auf alle Anlagen und Emissionsquellen des Betreibers ausweiten, was zu einer umfassenden

Die jährliche Messung des gesamten Netzes mit Picarro ermöglicht es einem Betreiber oder lokalen Verteilungsunternehmen (LDC), seine ESG-Ziele zu erreichen, die Erwartungen der Aktionäre zu erfüllen und den zukünftigen regulatorischen Berichtsanforderungen durch ein datenzentriertes Schema zur



Berichtsanforderungen durch ein datenzentriertes Schema zur Quantifizierung der Netzemissionen und zur Berichterstattung voraus zu sein. Wenn eine jährliche Messung des gesamten Netzes nicht möglich ist, würden datengestützte und messtechnisch ermittelte Emissionsfaktoren für Anlagenklassen, die für ihre Infrastruktur optimiert sind, dennoch einen vollständigeren und korrekteren Überblick über die Netzemissionen ermöglichen und die Gesamtemissionen des Netzes im Vergleich zu den allgemeinen Emissionsfaktoren (d. h. den GHGRP-Faktoren der EPA) in einer Quantifizierungsmethode wie NGSi oder OGMP 2.0 senken. Wenn man tiefer in die freiwillige Berichterstattung einsteigt, bietet die Emissionsmessung einen klaren Weg zur Erreichung der Stufe 4 oder 5 des „Gold Standard“ in OGMP 2.0 und der obersten Stufe in vielen anderen freiwilligen Berichterstattungs-schemata, da sie auf direkten Messungen sowohl auf Standort- als auch auf Quellenebene basiert.

Es gibt für jedes Unternehmen einen klaren Weg, die Kontrolle über flüchtige Methanemissionen zu erlangen, und es ist an der Zeit, diesen Weg einzuschlagen. Der Weg zum Erfolg führt über den Fahrplan und die richtigen Werkzeuge zur Unterstützung des Vorhabens. Wir hoffen, dass dieses Whitepaper dazu beigetragen hat, ein klares Bild von der Problematik der Methanemissionen zu vermitteln, den Weg zur Umsetzung einer Lösung aufzuzeigen, einige verwendbare Instrumente zur Verfügung zu stellen und schließlich den Nutzen des Prozesses aufzuzeigen. Die Kenntnis des Gesamtemissionsvolumens Ihres Unternehmens ist ein entscheidender Schritt auf dem Weg zu einer sinnvollen Emissionsreduzierung und der damit verbundenen Anerkennung dieser Reduzierungen. Verwenden Sie Picarros neue Anwendung zur Messung von Netzwerkemissionen; messen Sie die Emissionen, berichten Sie über die Ergebnisse und reduzieren Sie sie im Laufe der Zeit für eine nachhaltige Zukunft.



Abbildung 4. Das NAV-Bild zeigt eine Darstellung der Emissionsdichte im Verhältnis zur Leckdichte, wobei hochemittierende Punktquellen und Rohrleitungsabschnitte überlagert sind. NAV ermöglicht eine schnelle Analyse komplexer Daten, um fundierte Entscheidungen über die Netzinfrastruktur treffen zu können.

Einen klaren Weg zur Emissionsreduzierung aufzeigen

Wenn ein Verteilernetz jedes Jahr untersucht werden kann, wie es mehrere Betreiber heute mithilfe von Picarro tun, ist es möglich, eine umfassende, unternehmensweite Emissionsquantifizierung mit einer einzigen Technologie und einer einzigen Quantifizierungsmethode durchzuführen. Die jährliche Messung des gesamten Netzes mit Picarro ermöglicht es einem Betreiber oder lokalen Verteilungsunternehmen (LDC), seine ESG-Ziele zu erreichen, die Erwartungen der Aktionäre zu erfüllen und den zukünftigen regulatorischen

Quellenangaben:

[1] M. Strange, T. Fox, A. Hayman, B. Moorhouse (2022, January). Technical Report: Leak detection methods for natural gas gathering, transmission, and distribution pipelines. Highwood Emissions Management. <https://highwoodemissions.com/reports/leak-detection-methods-for-natural-gas-gathering/>

[2] Brian K. Lamb, Steven L. Edburg, Thomas W. Ferrara, Touché Howard, Matthew R. Harrison, Charles E. Kolb, Amy Townsend-Small, Wesley Dyck, Antonio Possolo, and James R. Whetstone. 2015. "Direct Measurements Show Decreasing Methane Emissions from Natural Gas Local Distribution Systems in the United States." *Environmental Science & Technology* 49 (8): 5161-5169. DOI: 10.1021/es505116p