Originalarbeit

Berg Huettenmaenn Monatsh
https://doi.org/10.1007/s00501-026-01788-5
© The Author(s) 2026

BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte

# Echtzeit-Luftanalyse und Strömungssimulation für Ereignisbewältigung und Gesundheitsschutz in Untertage-Infrastrukturen

**Thomas Hochsteiner[1], Katja Hüttenbrenner[2], Hannes Kern[2], Aiman Al-Fakih[3] und Lucrezia Kroeger-Lass[4]**

[1]Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich
[2]IRIS – Industrial Risk and Safety Solutions e.U., Vorau, Österreich
[3]Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V., Köln, Deutschland
[4]GSA Messgerätebau GmbH, Ratingen, Deutschland

Angenommen 23. September 2026

**Zusammenfassung:** Das Projekt ELSA4Hans entwickelt ein echtzeitfähiges Messsystem zur Erfassung von Staub, Gasen und Temperaturveränderungen in untertägigen Infrastrukturen, um Gesundheits- und Arbeitsschutz sowie die Ereignisbewältigung zu verbessern. Mithilfe von Großversuchen am Zentrum am Berg (ZaB), numerischen Simulationen, CFD-Modellen und maschinellem Lernen werden Ausbreitungs- und Strömungsmuster untersucht. Erste Ergebnisse zeigen eine mögliche Differenzierung zwischen einatembarem und alveolengängigem Staub sowie eine starke Abhängigkeit der Schwergasausbreitung von Tunnelgeometrie, Lüftung und Einbauten. Das System soll künftig eine verbesserte Gefährdungsbewertung, Lüftungsoptimierung und Unterstützung von Einsatzkräften und Infrastrukturbetreiber:innen ermöglichen.

**Schlüsselwörter:** Tunnelbau, Gefahrstoffausbreitung, CFD-Simulation, Gesundheitsschutz

**Real-time Air Analysis and Flow Simulation for Incident Management and Health Protection in Underground Infrastructure**

**Abstract:** The ELSA4Hans project is developing a real-time measurement system to monitor dust, gases, and temperature changes in underground infrastructures, with the aim of improving health and safety at work and incident management. Propagation and flow patterns are being investigated using large-scale experiments at the Zentrum am Berg (ZaB), numerical simulations, CFD models, and machine learning. Initial results indicate a possible distinction between respirable and alveolar dust, as well as a strong dependence of heavy gas dispersion on tunnel geometry, ventilation, and internal structures. In future, the system is intended to enable improved risk assessment, ventilation optimisation, and support for emergency services and infrastructure operators.

**Keywords:** Tunnel construction, Hazardous substance dispersion, CFD simulation, Health and safety

## 1. Einleitung

Verkehrstunnelanlagen sind kritische Infrastrukturen von hoher Bedeutung für den nationalen und internationalen Personen- und Güterverkehr. In Österreich sind derzeit fast 400 km Straßentunnel und 230 km Eisenbahntunnel in Betrieb [1]. Ausfälle dieser Infrastruktur können schwerwiegende wirtschaftliche und gesellschaftliche Folgen haben [2]. Eine weitere Herausforderung stellt die Überwachung der Luftqualität im Tunnelvortrieb und bei Sanierungsarbeiten dar. Dabei können unter anderem Verbrennungsmotoren Schadstoffe wie CO, $CO_2$, Ruß und Stäube freisetzen. Besonders die Messung von Stäuben ist problematisch, da die derzeitige gravimetrische Laboranalyse keine unmittelbare Erkennung von Grenzwertüberschreitungen vor Ort ermöglicht.

Im bilateralen Forschungsprojekt ELSA4Hans entwickelt ein Konsortium bestehend aus der STUVA, der GSA Messgerätebau GmbH und der Bechler GmbH aus Deutschland und IRIS bzw. der Montanuniversität aus Österreich ein Messgerät zur automatisierten Online-Erfassung von Stäuben, Gasen und Temperaturen. Mithilfe von CFD-Simulationen und künstlicher Intelligenz sollen zudem charakteristi-

T. Hochsteiner (✉)
Lehrstuhl für Subsurface Engineering,
Montanuniversität Leoben,
Erzherzog-Johann-Straße 3,
8700 Leoben, Österreich
thomas.hochsteiner@unileoben.ac.at


© The Author(s)

sche Strömungsmuster erkannt und in einem generischen Luftströmungsmodell abgebildet werden [3]. Dieses Modell unterstützt Tunnelbetreibende bei der Risikobewertung und trägt sowohl in der Bauphase als auch im späteren Betrieb zum Arbeits-, Gesundheits- und Bevölkerungsschutz bei.

## 2. Methodik

Um ein derartiges Messsystem für den Tunnelbau und -betrieb zu entwickeln, wurden zu Projektbeginn verschiedene Grundlagen zusammengetragen, u. a. Prozessanalysen durchgeführt, Nutzungsanforderungen erhoben und darauf aufbauend die Systemspezifikation erstellt. Auf diesen Grundlagen aufbauend, konnte in einem nächsten Schritt die Erstellung der Simulationspläne für die verschiedenen Anwendungsfälle erfolgen. Ein weiterer Eckpfeiler im Projekt ELSA4Hans ist die Durchführung von experimentellen Versuchen in einer realen Tunnelumgebung. Diese Versuche werden am Zentrum am Berg (kurz ZaB) durchgeführt. Das ZaB ist eine untertägige Forschungs- und Versuchsanlage mit zwei Straßen- und zwei Eisenbahntunneln von jeweils rund 400 m Länge. Die Ergebnisse der Versuchskampagnen werden im Anschluss mit den Ergebnissen der Simulationsserien gegeneinander verglichen, um so eine Ergebnisabschätzung zu erhalten. Um eine Grundlage für die Simulation und die geplanten Feldversuche zu bilden, wurde für den Teil der Gasfreisetzung bei Unfallereignissen eine Analyse von 27 realen Bahnunglücken durch die Firma IRIS durchgeführt. Dadurch konnten die Gasaustrittsparameter für die weiteren Projekttätigkeiten festgelegt werden.

### 2.1 Messsystem

Zur Erfassung gesundheitsgefährdender Staubfraktionen wie A-Staub sowie schädlicher Gase und erhöhter Temperaturen wurde speziell für die Nutzung in Tunneln das stabile Messgerät „DustSense“ von der GSA Messgerätebau GmbH entwickelt. Das Gerät kann sowohl mit einem Akku, als auch mit einem Netzteil betrieben werden und ist für eine Dauernutzung ausgerichtet. Abb. 1 zeigt die verwendeten Messgeräte. Dem enthaltenen Streulichtsensor ist ein Zyklon vorgeschalten, um die Fraktion >6 µm (Grobstaub) von der schädlichen A-Staub Fraktion abzutrennen. Ergänzt wird die Staubsensorik durch ein Gasmesssystem und Thermoelemente, um weitere untertägige Gefahren wie Gasaustritt oder Brände frühzeitig zu detektieren. Zur Verarbeitung der Messdaten dienen die DustSense-Messgeräte nicht nur als Erfassungseinheiten, sondern zugleich auch als Relaisstationen zur Weiterleitung der Daten. Die dafür zuständige Technik der Datenübertragung wurde von der Firma Bechler entwickelt.



**Abb. 1:** Messgerät „DustSense“

### 2.2 Staubsimulation

Für die Untersuchung der Staubkonzentration wurde das Simulationsprogramm Bauklima von HBI verwendet. Zunächst wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Für die weitere Untersuchung wurden insbesondere die Staubproduktionsrate, der Lüftungsmassenstrom und der Tunneldurchmesser berücksichtigt. Anschließend wurden mithilfe von Latin Hypercube Sampling (LHS) insgesamt 1000 Simulationsszenarien erzeugt. Jedes Szenario wurde über 24 h simuliert; die Staubkonzentration wurde dabei in 5-Sekunden-Intervallen und räumlich in 10-m-Abständen entlang der Tunnellänge ausgegeben. Für das Training der Machine-Learning-Modelle wurden die Daten anschließend auf ein 60-Sekunden-Intervall aufbereitet. Zur zeitabhängigen Vorhersage wurden zusätzlich die Staubkonzentrationen der beiden vorhergehenden Zeitschritte als Eingangsgrößen verwendet. Die Modellgüte wurde anhand von $R^2$, MAE und RMSE bewertet. Für eine unabhängige Validierung wurden zusätzlich 100 neue Simulationsszenarien mit bisher nicht verwendeten Parameterkombinationen erstellt.

### 2.3 Brandsimulation

Für die Untersuchung der brandbedingten Strömungsumkehr wurden mit THER-MOTUN insgesamt 7776 Simulationsszenarien berechnet. Die Szenarien basierten auf systematischen Kombinationen mehrerer Parameter, wie z. B. Tunnellänge, Tunnelquerschnittsfläche und maximaler Brandleistung. Als zentrale Ergebnisgrößen wurden die stationäre Anfangsgeschwindigkeit vor Brandbeginn, der Zeitpunkt der Strömungsumkehr nach Brandbeginn sowie die maximale Geschwindigkeit der brandbedingten Auftriebsströmung ausgewertet. Die Simulationsergebnisse wurden anschließend für die weitere datenbasierte Auswertung sowie das Training der Machine-Learning-Modelle aufbereitet.

### 2.4 (CFD)-Simulation

Zusätzlich zu den Staub- und Brandsimulationen werden dreidimensionale Simulationsberechnungen zur Ausbreitung im Nahfeld von IRIS und der Montanuniversität Leo-

© The Author(s)

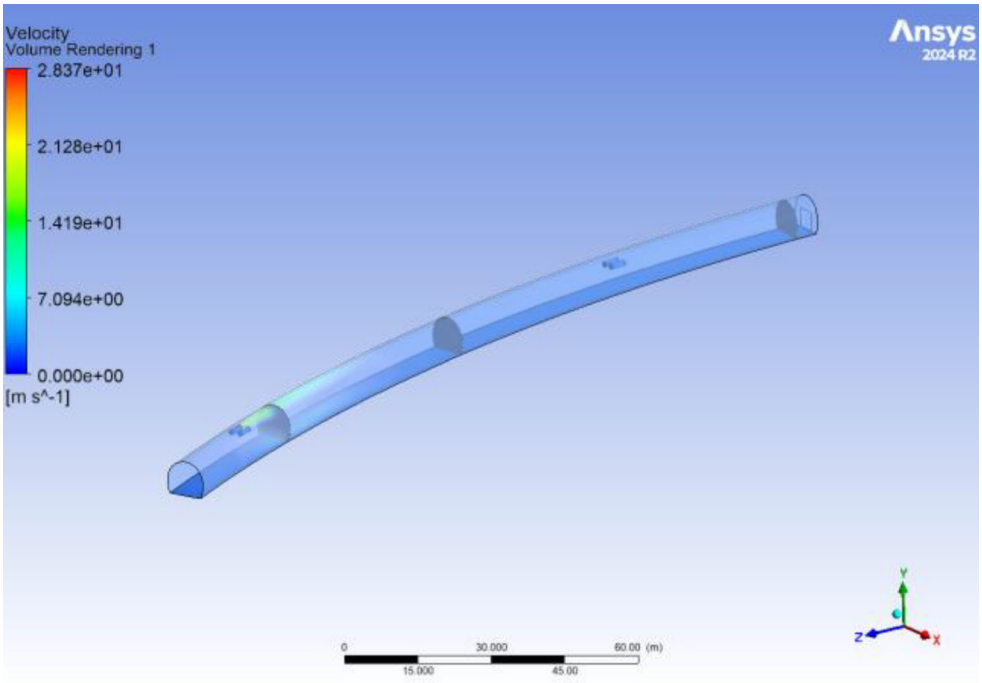



Abb. 2: Strömung im Eisenbahntunnel-West in der Konturdarstellung mit drei Auswertequerschnitten

ben aufgesetzt und ausgewertet. Für die einzelnen Simulationen der Partikel wird zuerst ein geometrisches Modell mittels ANSYS Discovery erstellt. Danach wird das Modell in ein Rechennetz unterteilt und mithilfe einer Netzunabhängigkeitsanalyse die optimale Anzahl an Rechenzellen ermittelt. Hierfür wurden vier Netze mit unterschiedlichen maximalen Kantenlängen erstellt. Anschließend wurden der Druck am Portal, der Massenstrom aus dem Portal und die mittlere Geschwindigkeit an drei unterschiedlichen Querschnitten ausgelesen und verglichen. Abb. 2 zeigt das Modell.

Im nächsten Schritt müssen die Oberflächenrauheit und die Turbulenzparameter bestimmt werden. Hierfür wird zuerst mit verschiedenen Randbedingungen am Lüfter die Strömungsentwicklung simuliert. Die Entscheidung, welche Randbedingung für die Lüfter in der Partikelsimulation Anwendung findet, wird durch den Verlauf der Strömungsmessung bestimmt.

## 2.5 Feldtests

Für die Durchführung der Großversuche werden reale Gase freigesetzt, Materialien in Staubform ausgebracht sowie ein Brand aufgebaut. Die Ergebnisse dieser Versuchsserien dienen der Verbesserung der numerischen Modellansätze und der Gewinnung belastbarer Originaldaten. Die Detektion der Schadstoffe und die Ermittlung der richtigen und aussagekräftigen Messstellen in Tunnelanlagen können so untersucht und evaluiert werden. Die messtechnische Verfolgung der Ausbreitung der Schadstoffe wird durch ein Gassensornetzwerk sowie Strömungssensoren und Temperaturmessstellen gewährleistet. Die erste Messkampagne beschäftigte sich mit der Ausbreitung von Schwergasen. Hierfür wurde im Eisenbahntunnel-Ost $CO_2$ als Modellgas für Schwergas freigesetzt und die Ausbreitung messtechnisch erfasst und untersucht. Abb. 3 zeigt exemplarisch die Durchführung der Versuche. Die generierten Messergebnisse fließen wiederum in die Simulationen ein. Um die entwickelte Staubmesstechnik auf vollständige Funktionalität überprüfen zu können, wurden mehrere Versuchsreihen im Eisenbahntunnel-West am ZaB durchgeführt. Die erste Messreihe wurde mit Sikron SF 600, einem Quarzstaub mit einem mittleren Korndurchmesser von 3 µm, durchgeführt. Zur Zerstäubung wird ein eigens vom Management Center Innsbruck (MCI) entwickelter Staub-Dispergierer verwendet. Im Laufe der Durchgänge wurden die Abstände der Messgeräte und die Dauer der Staubaufgabe variiert, um den zeitlichen Verlauf der Staubwolke zu erfassen und zu validieren. In einem weiteren Schritt wurde eine kombinierte Messreihe mit der Kombination aus Staub- und Gasfrei-



Abb. 3: Feldversuche Gasfreisetzung im Eisenbahntunnel-Ost am ZaB


© The Author(s)



Abb. 4: Feldversuche mit Staub- und Gasfreisetzung im Eisenbahntunnel-West am ZaB

setzung durchgeführt. Dadurch soll sichergestellt werden, dass beide Messungen sich nicht gegenseitig beeinflussen, jedoch in jedem Fall Staub sowie Gas fehlerfrei in Kombination sowie einzeln erfassen. Abb. 4 zeigt exemplarisch die Durchführung des Versuchs.

Die Auswertung der Versuche und die Validierung des entwickelten Messgerätes erfolgen derzeit.

## 3. Resultate

Die Ergebnisse der Netzunabhängigkeitsanalyse können Abb. 5 entnommen werden. Auf Basis der Analyse wird Mesh C als ausreichend genau festgelegt. Nach Auswahl der Feinheit des Rechennetzes wird ein Vergleich zwischen den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten und den Simulationswerten durchgeführt, wobei „Velocity Inlet“ als geeignetste Randbedingung festgelegt wurde.

Aus den durchgeführten Staub- und Brandsimulationen liegen inzwischen umfangreiche Datensätze für die weitere datenbasierte Auswertung vor. Die Simulationsdaten wurden strukturiert und für das Training der Machine-Learning-Modelle aufbereitet. Derzeit werden verschiedene Machine-Learning-Modelle trainiert und hinsichtlich ihrer Prognosegüte miteinander verglichen, um das für die jeweilige Anwendung am besten geeignete Modell zu identifizieren.

Eine erste orientierende Analyse der mithilfe des direktanzeigenden Messverfahrens erfassten Werte über die untersuchten Staubkonzentrationen hinweg deutet darauf hin, dass die messtechnische Differenzierung zwischen einatembarer Staubfraktion (E-Staub) und der alveolengängigen Staubfraktion (A-Staub) zuverlässig realisiert werden kann. Eine abschließende Beurteilung der Trennleistung erfolgt nach vollständiger Auswertung und Validierung der Messdaten. Es erfolgten Vergleichsversuche mit kontinuierlicher Staubeingabe und mit einer intervallweisen Abfolge von Phasen mit und ohne Staubeingabe. In den Messsignalen der Sensorik war erkennbar, wann eine neue Staubwolke die Messgeräte erreichte und über welchen Zeitraum sie an den Messstellen vorbeizog.

Die Versuchsreihe der Gasfreisetzung zeigt unter realmaßstäblichen Tunnelbedingungen, dass Schwergas-Freisetzungen in kurzer Zeit großräumige, langanhaltende und stark geometrieabhängige Konzentrationsverteilungen erzeugen können. Die in der Versuchsreihe beobachteten Ausbreitungsbilder und Messverläufe stimmen mit zentra-

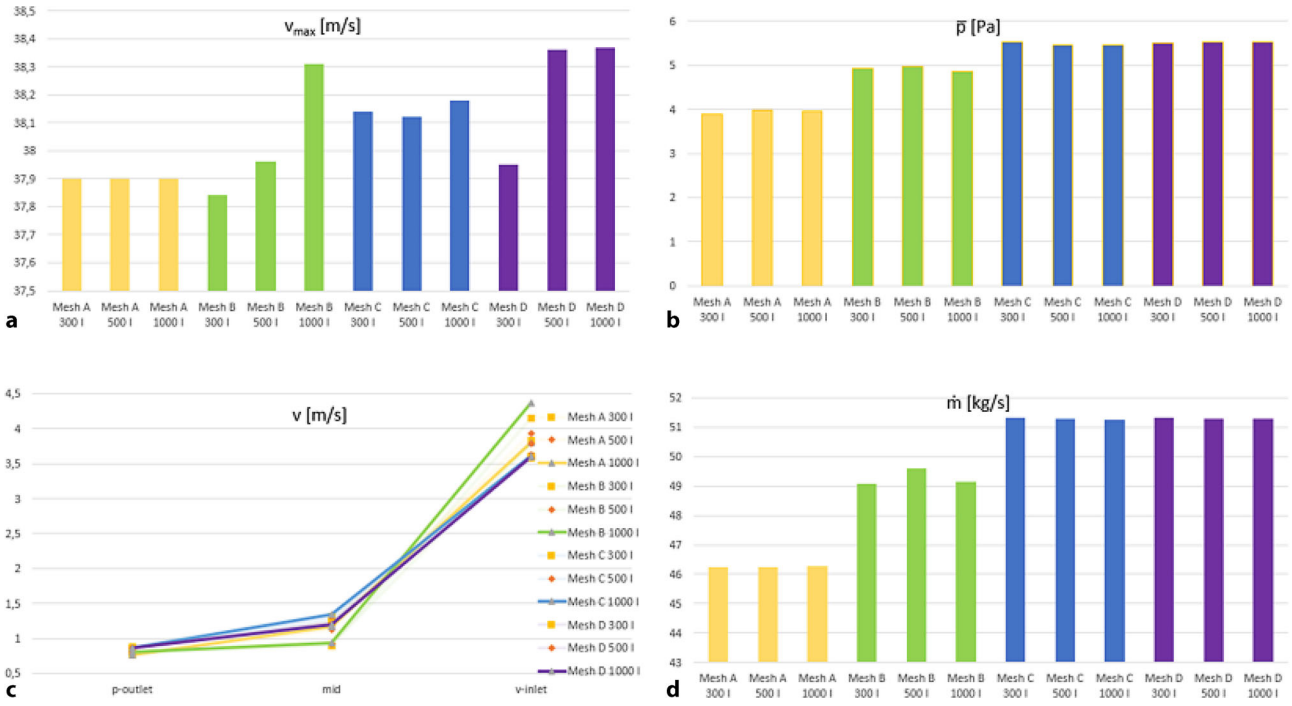



Abb. 5: Auswertung der Sensitivitätsanalyse und nötiger Anzahl an Iterationen mit **a** Austrittsgeschwindigkeit am Lüfter, **b** Druck am Portal, **c** Geschwindigkeit an den Auswertungsquerschnitten und **d** Massenstrom aus dem Portal

© The Author(s)

len, in der Literatur beschriebenen Schwergasphänomenen überein: bodennahe, gravitationsgetriebene Ausbreitung, erhöhte Persistenz bei geringer Lüftung, lokale Akkumulation in tiefliegenden bzw. abgeschatteten Bereichen sowie eine deutliche Beeinflussung durch Hindernisse und Einbauten.

## 4. Diskussion und Ausblick

Da das entwickelte Messsystem unter anderem von Feuerwehren und Infrastrukturbetreibern eingesetzt werden soll, wird es Ende des Jahres 2026 einer abschließenden Testreihe unterzogen, um dessen Eignung zur Detektion von Bränden zu validieren. Es soll sowohl die entstehenden Schadstoffe als auch die Temperaturverteilungen messen und dadurch als Einsatzunterstützungssystem Anwendung finden. Ein weiterer Use Case der Messvorrichtung soll als Unterstützung für maschinenbautechnische Anbieter und Messdienstleister sein. Hierbei soll das Ziel am Ende sein, ein optimales, energiesparendes Lüftungs- und Luftreinigungskonzept zu erarbeiten und zu implementieren. In weiterer Folge soll die Erstellung von Konzepten zur praktischen Umsetzung und Anwendung des entwickelten Gesamtsystems mit Echtzeitmessung und Auswertung von Parametern der Verbesserung der Arbeitssicherheit und der Einsatzunterstützung der Gefahrenabwehr im Ereignisfall in Verkehrstunneln dienen. Anschließend werden Anwendungskonzepte des entwickelten Gesamtsystems einschließlich der Multifunktionsknoten vorgestellt, die der Erhöhung von Sicherheit, Gesundheitsschutz und Gefahrenabwehr in der Bauphase, der Inbetriebnahme und dem Betrieb von Tunnelanlagen dienen.

**Danksagung.** Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts *ELSA4HANS* (Projektnummer FO999915762/eCall Nummer 54604224) von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert.

**Autorenrollen.** Alle Autorinnen und Autoren waren gleichermaßen an der Erstellung dieses Beitrags beteiligt.

**Funding.** Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

**Datenverfügbarkeit.** Alle Daten, die den Ergebnissen dieser Arbeit zugrunde liegen, sind auf begründete Anfrage beim korrespondierenden Autor erhältlich.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de.

## Literatur

1. Webmaster, L.B.: Statistik der Eisenbahn-Tunnel in Österreich, Informationen von Lothar Brill. https://www.eisenbahntunnel.at/inhalt/statistik.html Accessed 2026-09-21
2. Klampfer, B.: Resilienz von Straßentunneln - Bedrohungen, Ausfallszenarien und verkehrliche Auswirkungen. Masterarbeit (2019)
3. Batt, R.: Review of dense-gas dispersion for industrial regulation and emergency preparedness and response. https://admlc.com/wp-content/uploads/2022/05/pe06527_admlc_dgd_review_final-inc-admlc-foreword.pdf Accessed 2026-09-21

**Hinweis des Verlags.** Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.



© The Author(s)