

Artikel

Studie über die Bewegungseigenschaften von Brandrauch und deren Auswirkungen auf die Personenevakuierung in kurvigen Autobahntunneln

Yuang Cui und Zhiqiang Liu *

Fakultät für Bauingenieurwesen, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 11220166@stu.lzjtu.edu.cn *
Korrespondenz: lzqiang@mail.lzjtu.cn

Vorgestellte Anwendung: Vorgestellte Anwendung: Branddynamiksimulator Pyrosim.

Zusammenfassung: In der bisherigen Forschung zu Tunnelbränden konzentrieren sich die Forscher hauptsächlich auf gerade Tunnel und vernachlässigen die Auswirkungen gekrümmter Seitenwände in gekrümmten Tunneln. Basierend auf der Theorie der Rauchdiffusion wurde eine Reihe numerischer CFD-Simulationen mit dem Fire Dynamics Simulator durchgeführt, um die Eigenschaften der Rauchverteilung in einem gekrümmten Autobahntunnel zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigten, dass bei einem Brand in einem gekrümmten Tunnel unterschiedliche Rauchverteilungsmerkmale beobachtet wurden mit denen in geraden Tunneln verglichen, wobei erhebliche Unterschiede besonders beim Krümmungsradius des Tunnels unter 1000 m deutlich wurden. Durch Vergleich der Rauchverteilungseigenschaften von verschiedenen Brandherdstellen wurden die ungünstigsten Brandherdstellen in einem gekrümmten Tunnel ermittelt. Hohe Temperaturen beim Brand stauen sich zwischen den Innen- und Außenwänden des Tunnels, wodurch in der Nähe des Brandherds mehrere Hochtemperaturzonen entstehen, anstatt sich in einem geradlinigen Tunnel direkt zum Ausgang zu verteilen. Zusätzlich wurden auf Grundlage einer Analyse von Temperatur, Sichtweite und CO-Konzentration in charakteristischen Höhen geeignete Stellen für Fußgängerüberwege innerhalb des Tunnels abgeleitet und eine Evakuierungsstrategie für Personen im Kernbrandbereich vorgeschlagen. Die Ergebnisse können als Referenz für persönliche Evakuierungsstrategien bei Bränden in gekrümmten Autobahntunneln und für die Gestaltung eines Stollens für Passanten in solchen Tunneln dienen.



Zitat: Cui, Y.; Liu, Z. Studie über Feuer Rauchbewegungseigenschaften und

Ihr Einfluss auf die Personenevakuierung in kurvigen Autobahntunneln. Appl.

Sci. **2024**, *14*, 6339. <https://doi.org/10.3390/app14146339>

Wissenschaftlicher Herausgeber: Cheng-Yu Ku

Empfangen: 22. Juni 2024

Überarbeitet: 15. Juli 2024

Akzeptiert: 18. Juli 2024

Veröffentlicht: 20. Juli 2024



Copyright: © 2024 bei den Autoren.

Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz.

Dieser Artikel ist ein Open Access-Artikel vertrieben unter den Bedingungen und Bedingungen der Creative Commons

Namensnennungslizenz (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Schlüsselwörter: gekrümmter Autobahntunnel; Feuer; Rauchverteilung; persönliche Evakuierung

1. Einleitung

Mit der Weiterentwicklung der Tunnelvortriebstechnologie hat der Anteil gekrümmter Autobahntunnel innerhalb von Autobahnsystemen allmählich zugenommen. Die einzigartige Struktur eines gekrümmten Tunnels führt je nach Radius der Tunnelkurve zu einer größeren Komplexität der Rauchströmung und der Temperaturschwankungen bei Brandvorfällen [1–3]. Frühere Forschungen haben die Bewegungsmuster von Brandrauch in linearen Tunneln beschrieben und Formeln zur Berechnung der Länge der Rauchrückenschicht, der kritischen Windgeschwindigkeit und der Höchsttemperatur bereitgestellt. Die Ausbreitung des Rauchs unterliegt jedoch verschiedenen Einflussfaktoren wie der Höhe, der Neigung des Tunnels und der Tunnelkrümmung. Die Tunnelkrümmung bildet den Schwerpunkt dieser Untersuchung.

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass gekrümmte und gerade Tunnel unterschiedliche Merkmale aufweisen. Kashef et al. untersuchten die Rauchbekämpfungsstrategie in den geradlinigen und gekrümmten Bereichen eines Tunnels durch Experimente und numerische Simulationen. Ihre Ergebnisse zeigten, dass, wenn sich die Brandquelle im gekrümmten Bereich befand, die Temperatur in der Nähe der Brandquelle deutlich niedriger war als im geraden Bereich und die Länge der Rauchrückenschicht zunahm [4].

Inzwischen wurden Korrekturformeln für Schlüsselindikatoren von Bränden in gekrümmten Tunneln vorgeschlagen, die auf denen von Bränden in geraden Tunneln basieren. Wang Feng konstruierte numerische Modelle für die Brandrauchbewegungseigenschaften eines gekrümmten Tunnels mit einem Radius von

600 m und schlugen eine Berechnungsmethode für den Widerstand entlang des gekrümmten Tunnels vor, um das Gesetz des Einflusses des gekrümmten Tunnels auf den Flüssigkeitsfluss zu klären [5–7]. Caliendo et al. setzten eine numerische CFD-Simulation ein, um den Einfluss der Längslüftung auf die Rauchrück-schichtung in einem zweispurigen gekrümmten Tunnel zu untersuchen und sagten die Stelle der maximalen Decktemperatur voraus [8]. Wu et al. untersuchten die Brandrauchtransporteigenschaften des Autobahntunnels in der Qianhaizi-Kurve, um die kritische Windgeschwindigkeit des Tunnels zu bestimmen [9]. Wang führte numerische Simulationen eines Brandes in einem gekrümmten Straßentunnel mit Fluent durch, um die kritische Windgeschwindigkeit an den konvexen und konkaven Stellen der Brandquelle zu vergleichen. Sie analysierten auch die Länge der Rauchrück-schichtung und kamen zu dem Schluss, dass die kritische Geschwindigkeit an der konvexen Stelle höher war [10]. Zhong et al. untersuchten das Gesetz der Rauchausbreitung bei Bränden in geneigten und gekrümmten Tunneln durch numerische Simulationen und Experimente und fanden heraus, dass die Stelle mit den größten Unterschieden bei den Wärmeübertragungsraten die Tunneldecke unter verschiedenen Arbeitsbedingungen war [11]. Zhang et al. kombinierte numerische Simulation mit theoretischer Analyse, um ein für gekrümmte Tunnel geeignetes Brandmodell zu bestimmen, und untersuchte die Länge der Rauchschiicht und die kritische Belüftungsgeschwindigkeit gekrümmter Tunnel [12]. Pan et al. untersuchten die Auswirkung einer gekrümmten Seitenwand auf die Brandform und die Maximaltemperatur unterhalb der Deckenmittellinie und erstellten Formeln zur Vorhersage der Maximaltemperatur unterhalb der Deckenmittellinie [13]. Lu untersuchte die Temperaturverteilung in gekrümmten Tunneln mithilfe einer numerischen Simulationsmethode und schlug ein neues exponentielles Abklingmodell zur Vorhersage der Längstemperatur unter verschiedenen Tunnelkrümmungsbedingungen vor [14].

Xu et al. führten Experimente und numerische Simulationen durch, um die kritische Geschwindigkeit eines gekrümmten Tunnels unter verschiedenen Brand-Szenarien zu analysieren [15].

Dennoch gibt es nur wenige Untersuchungen, die sich direkt mit den Auswirkungen von Bränden in gekrümmten Tunneln auf die Evakuierung von Personen befassen. Muhasilovic et al. untersuchten den Einfluss des Krümmungsradius (>2500 m) auf die Wärmestrahlung und Rauchverteilung in einem Tunnel durch numerische Simulation [16]. Lu entwickelte ein numerisches Modell mit FDS, um die Rauchausbreitung und Temperaturverteilung eines Tunnelbrandes im geraden und im gekrümmten Abschnitt zu vergleichen. Sie fanden heraus, dass der Rauchrückfluss stärker war und die Temperatur stärker anstieg, wenn der Brand im gekrümmten Abschnitt auftrat [17]. Zhao et al. verwendeten FDS, um eine numerische Simulation eines Tunnelbrandes mit kleinem Krümmungsradius durchzuführen und fanden heraus, dass der Krümmungsradius zu einem großen Temperaturgradienten in der Nähe der Brandquelle führen würde [18]. Li simulierte den Brandrauchfluss in einem Tunnel mit einfacher Krümmung mit Fluent, um die Veränderung der CO-Konzentration unter verschiedenen Krümmungs- und Belüftungsbedingungen zu ermitteln [19]. Liu et al. bewerteten Faktoren wie Tunnelkrümmung, Betriebszeit der Längslüftung und Belüftungsgeschwindigkeit, um den Einfluss der Parameter der Längslüftung auf die Feuerlöschwirkung von Wassernebel in einem gekrümmten Tunnel zu untersuchen [20].

Darüber hinaus wurden die Eigenschaften der Rauchausbreitung in der für das menschliche Auge typischen Höhe und die Variation von Faktoren wie Temperatur, Sichtweite und CO-Konzentration bei Bränden in gekrümmten Tunneln, die die Evakuierung von Personen beeinflussen, nicht berücksichtigt. Sogar die bestehenden Vorschriften enthalten keine spezifischen Richtlinien für die Brandbekämpfung in gekrümmten Tunneln [21,22]. In diesem Dokument werden daher die Eigenschaften der Rauchausbreitung in gekrümmten Autobahntunneln mit unterschiedlichen Krümmungen ermittelt und die Auswirkungen auf die Evakuierung von Personen bewertet. Die empfohlenen Evakuierungsstrategien und das Design eines Stollens für Personen werden ebenfalls bereitgestellt. Der Schwerpunkt liegt auf dem spezifischen Rauchausbreitungsmuster und den Strategien zum Umgang mit dessen Auswirkung.

2. Materialien und Methoden

2.1. Braddynamik-Simulator

Der Fire Dynamics Simulator (FDS) [23,24] ist ein vom US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology entwickelter Code, der von vielen Forschern zur Untersuchung von Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldern bei Bränden eingesetzt wird, nachdem die numerische Strömungsmechanik (CFD) ausgereifter geworden ist und Computerrechenfähigkeiten entwickelt wurden [25]. Die Gültigkeit dieses Codes wurde durch zahlreiche Arbeiten in der Brandforschung umfassend bestätigt. Der FDS ist für die Large-Eddy-Simulation (LES) von langsamen und thermisch angetriebenen Strömungen

Computational Fluid Dynamics (CFD) und die Entwicklung von Computer-Rechenfähigkeiten [25]. Die Gültigkeit dieses Codes wurde durch viele Arbeiten in der Brandforschung umfassend bestätigt.

Das FDS ist für die Large-Eddy-Simulation (LES) von langsamen und thermisch angetriebenen Strömungen konzipiert, und die neue Version (Version 6) bietet viele Fortschritte in den Bereichen Hydrodynamik, Turbulenzmodelle.

Modelle. Daher wird das FDS (Version 6.8) mit einem LES-Modell übernommen. Weitere Einzelheiten zum FDS finden Sie bei McGrattan in dieser Studie. Weitere Einzelheiten zum FDS finden Sie bei McGrattan et al. [26]. Die Durchführbarkeit von FDS zur Simulation des Brandverhaltens im Tunnel wurde durch frühere Studien bestätigt.

[27,28]. Studien [27,28].

2.2. Brandszenarioanalyse

2.2.1. Brandszenarioanalyse

Wie in Abbildung 1 dargestellt, ist ein Tunnelmodell im Originalmaßstab mit einer Mittellinienlänge von 1000 m in dieser Studie festgestellt. Der Tunnelabschnitt ist 10,75 m breit und 7,3 m hoch. Die in dieser Studie festgestellten Materialien. Der Tunnelabschnitt ist 10,75 m breit und 7,3 m hoch. Die Materialien des Bodens, der Seitenwände und der Decke sind aus „Beton“, einem häufig verwendeten Material für Autobahntunnel. Das linke Portal des Tunnels ist als Luftzufuhröffnung für Autobahntunnel eingerichtet. Das linke Portal des Tunnels ist als Luftzufuhröffnung für Autobahntunnel eingerichtet. Langsüftung und die andere ist auf „offen“ eingestellt. Die „einfache Chemie“-Verbrennung

Das Modell verwendet N-Heptan als Brennstoff [29]. Basierend auf der Brandskala für verschiedene Arten und Anzahlen von

Bei den von PIARC [30] veröffentlichten Fahrzeugen wird die Brandskala für volle Lkw-Brände (30 MW) gewählt als HRR unter Berücksichtigung des Worst-Case-Szenarios. Die Brandquelle ist 2,6 m hoch, HRR unter Berücksichtigung des Worst-Case-Szenarios. Die Brandquelle ist 2,6 m hoch, was Das ist die Höhe eines normalen LKWs. Der Umgebungsdruck wurde auf 101,325 kPa eingestellt und die Höhe eines normalen LKWs. Der Umgebungsdruck wurde auf 101,325 kPa eingestellt und die Umgebungs Die Umgebungstemperatur wurde auf 20 °C eingestellt. Die Schwerkraft wird mit 9,81 m/s² angenommen. Die Temperatur wurde auf 20 °C eingestellt. Die Schwerkraft wird mit 9,81 m/s² angenommen. Die Qualität des Kraftstoffs wurde auf Grundlage der Methoden früherer Studien ignoriert, und die Simulationszeit Die Berechnungszeit wurde auf 450 s festgelegt. Die Bestimmung des Krümmungsradius für den Tunnel wurde auf 450 s festgelegt. Die Bestimmung des Krümmungsradius für den Tunnel wurde auf 450 s festgelegt.

Das Modell stützte sich sowohl auf vorhandene Tunneldaten als auch auf die Einhaltung der vorgeschrieben durch anwendbare Codes [21–22], die bestimmten

Entwurfsgeschwindigkeiten entsprechen. Darüber hinaus in einer geraden Tunnel beträgt der Krümmungsradius

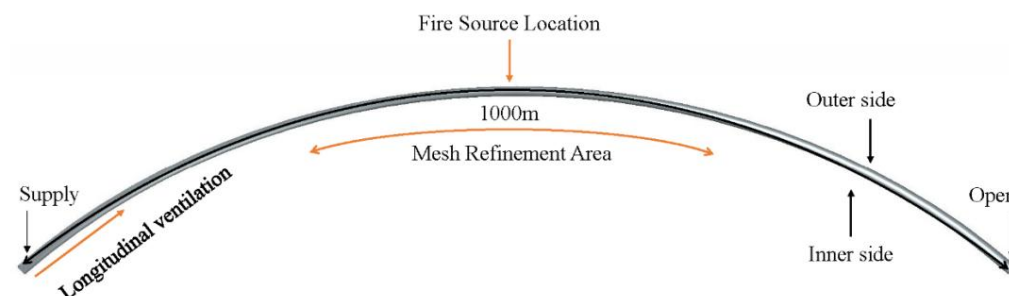


Abbildung 1: Tunnelbrandmodell.

2.3. Kritische Geschwindigkeit

in der Auswirkung auf die Evakuierung von Personen muss die Längssüftungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden. In praktischen Brandszenarien hat die Längssüftungsgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluss auf die Ausbreitung von Brandrauch. Der natürliche Wind in Tunneln weist jedoch häufige Schwankungen auf, wobei sich Windrichtung und -geschwindigkeit ständig ändern. Insbesondere mechanische Belüftungsmaßnahmen im Tunnel wurden bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt.

Nach dem vorliegenden Stand der Forschung wird Gleichung (1) zur Berechnung der kritischen Geschwindigkeit gewählt [22].

$$\text{Wann } Q/\gamma_a C_p T_a \gamma g H^{5/2} \geq 0,15 (H/B) \gamma^{1/4},$$

$$u/\gamma g H = 0,81 \quad Q/\gamma_a C_p T_a \gamma g H^{5/2} \geq 0,15 (H/B) \gamma^{1/4} \quad (1a)$$

$$\text{Wann } Q/\gamma_a C_p T_a \gamma g H^{5/2} \geq 0,15 (H/B) \gamma^{1/4},$$

$$\gamma u/\gamma g H = 0,43 e \gamma L_b/18,5 H \quad (1b)$$

wobei γ_a die Umgebungsichte ist; C_p die Wärmekapazität; g die Erdbeschleunigung, H die Tunnelhöhe; L_b ist die Rückschichtungslänge, wobei $L_b = 0$ die kritische Geschwindigkeit definiert; T_a ist die Umgebungsgastemperatur; u ist die Längsgeschwindigkeit; und W ist die Tunnelbreite.

Wie in Gleichung (1) gezeigt, Umgebungsdichte, Umgebungsgastemperatur und Wärmekapazität ändern sich mit zunehmender Höhe. Als Ergebnis wird die maximale kritische Geschwindigkeit von 3,56 m/s gewählt um die Simulationen zu entwerfen.

Basierend auf den vorhandenen Daten über die Tunnelbetriebsdauer [31,32], ist die Steuerwindgeschwindigkeit Die Tunnellängslüftung variiert zwischen 2,0 m/s (der maximalen natürlichen Längslüftung Die maximale Ventilationsgeschwindigkeit (Längsventilation) beträgt 8,0m/s (maximale Regelventilationsgeschwindigkeit). Bei einem Brand sollte die Tunnelwindgeschwindigkeit etwas höher sein als die kritische Windgeschwindigkeit Geschwindigkeit. Gemäß dem nationalen Code betrug der Krümmungsradius der Simulationen als minimale Wenderadien bei unterschiedlicher Geschwindigkeit gewählt [33].

Vorhandene Studien [6,7,15,34,35] zeigen, dass die Krümmung eines Tunnels die kritische Geschwindigkeit eines Tunnelbrandes. Daher wurde 4 m/s als kritische Geschwindigkeit in diesem Die nachfolgenden Simulationsergebnisse zeigen auch, dass die Tunnelkrümmung einen Einfluss auf die kritische Geschwindigkeit.

Eine allgemeine Geschwindigkeitsgruppe (die Längslüftungsgeschwindigkeit beträgt 2 m/s; Tests 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 und 17) und eine kritische Geschwindigkeitsgruppe (die longitudinale Ventilationsgeschwindigkeit beträgt 4 m/s; die Tests 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 und 18) wurden durchgeführt, um die Bewegung von Feuerrauch zu untersuchen Eigenschaften unter natürlicher Längslüftungsgeschwindigkeit und Kontrolle der Längslüftung Lüftungsgeschwindigkeit im Brandfall. Außer Längslüftung ist keine andere mechanische Lüftungsmaßnahmen wurden in der Simulation berücksichtigt. Alle Versuche sind dargestellt in Tabelle 1.

Tabelle 1. Zusammenfassung aller Tests.

NEIN.	Krümmungsradius, m	Längslüftungsgeschwindigkeit, m/s
1, 2	9	2, 4
3, 4	250	2, 4
5, 6	400	2, 4
7, 8	600	2, 4
9, 10	800	2, 4
11, 12	1000	2, 4
13, 14	1200	2, 4
15, 16	1500	2, 4
17, 18	2000	2, 4

2.4. Rastergröße

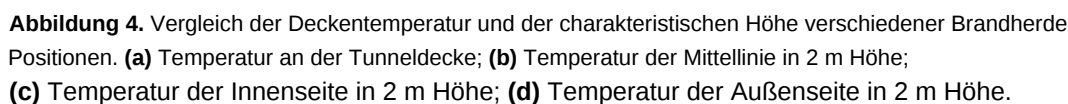
Bisherige Studien haben gezeigt, dass die Rastergröße einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse und Maschengröße haben eine starke Beziehung zur Brandcharakteristik Durchmesser D_y Wenn der charakteristische Durchmesser D_y zwischen dem 4- und 16-fachen des Gitterdurchmessers liegt , Größe können die Simulationsergebnisse die reale Situation genauer widerspiegeln [24] Die Berechnung Die Methode von D_y lautet wie folgt:

$$D_y = \sqrt[2.5]{\frac{Q}{\rho_y c_p T_y g}}$$
 (2)

wobei D_y der feuertypische Durchmesser ist, Q ist die HRR, ρ_y ist die Luftdichte, c_p ist die spezifische Wärmekapazität von Luft, T_y ist die Umgebungstemperatur und g ist die Erdbeschleunigung. Wie aus Gleichung (1) hervorgeht, wird der charakteristische Durchmesser des Feuers größer, wenn die Umgebungstemperatur Der Druck sinkt.

Die für den vorliegenden Brand mit 30 MW geeignete Gittergröße liegt im Bereich von 0,233 m und 0,94 m. Die Simulationsergebnisse für den Fall eines Krümmungsradius von 800 m und mit Belüftung von 2 m/s (wie in Test 9) bei 150 s wurden anhand von fünf verschiedenen Gitternetzlinien verglichen. Größen von 0,25 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m und 0,9 m, wie in Abbildung 2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit abnehmender Gittergröße wird die Temperaturabweichung unbedeutend. Außer Bei den Rasterweiten von 0,6 m und 0,9 m sind die vertikalen Temperaturen in der Nähe der Tunneldecke von Bei anderen Rastergrößen war es ähnlich. Bei einer Rastergröße von nicht mehr als 0,5 m war die Genauigkeit der Die Simulationen mit kleineren Gittergrößen verbesserten sich nicht signifikant, erforderten aber mehr

Die experimentellen Ergebnisse für die Längsverteilung der maximalen Temperaturanstieg des Brandrauchs in einem Tunnel bei 120 s aus [36] werden mit den numerischen Ergebnissen verglichen, wie in Abbildung 3 dargestellt. An jedem Datenpunkt waren die Simulationsergebnisse von FDS insgesamt gut Übereinstimmung mit den experimentellen Werten, typischerweise innerhalb einer Abweichung von 5%. Ein Fehler in einer Entfernung von 5 m vom Brandherd wurde eine Marge von 8 % beobachtet. Diese Abweichungen werden abseits der Brandquelle vernachlässigbar, da komplexe Turbulenz- und Wärmeübertragungsprozesse Phänomene, die in der Nähe der Brandquelle auftreten. Diese Unterschiede sind hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass der Wind



Um die Verteilungseigenschaften von Brandrauch und deren Auswirkungen zu untersuchen
Bei der Evakuierung von Personen konzentriert sich diese Studie auf die eindimensionale Ausbreitung von Rauch am
charakteristische Höhe des menschlichen Auges. Der Sicherheitsstandard für die Rauchttemperatur am

Die charakteristische Höhe wurde gemäß den nationalen Vorschriften auf 60 $\dot{y}C$ festgelegt [37]. Ebenso wurde eine Sichtweite von 10 m und eine CO-Konzentration von 400 ppm wurden als Standard für die Sichtweite festgelegt und CO-Konzentration. Die charakteristische Höhe wurde in dieser Studie mit 2 m definiert.

3.2. Vergleich der Rauchverteilung auf verschiedenen Seiten des Tunnels

Um die Eigenschaften der Rauchverteilung im Tunnel weiter zu analysieren,

Simulationen wurden in zwei Gruppen eingeteilt: Gruppe A und Gruppe B. Gruppe A umfasste vier verschiedene Simulationen mit Krümmungsradien von 250 m, 400 m, 600 m und 800 m, während Gruppe B aus vier Simulationen mit Krümmungsradien von 1000 m bestand, 1200 m, 1500 m und 2000 m. Sowohl Gruppe A als auch Gruppe B wurden mit geraden Tunneln verglichen um die Auswirkungen der Tunnelkrümmung zu beurteilen. Die eindimensionalen Verteilungseigenschaften von Brandrauch in der charakteristischen Höhe bei 360 s werden in dieser Arbeit analysiert.

3.2.1. Temperatur

In früheren Untersuchungen wurde überwiegend angenommen, dass der Brandherd auf der Mittellinie des Tunnels liegen, was zu symmetrischen horizontalen und longitudinalen Temperaturverteilungen. Betrachtet man jedoch reale Szenarien, wenn ein Fahrzeug Feuer fängt In einem Tunnel ist es wahrscheinlicher, dass das Löschfahrzeug auf einer Seite des Tunnels steht. Der Tunnel.

Appl. Sci. 2024, 14, x FOR PEER REVIEW

8 von 18

Abbildung 5 zeigt die longitudinale Temperaturverteilung auf der charakteristischen Höhe für die kritische Geschwindigkeitsgruppe bei 360 s. In diesem Szenario ist der schnelle Temperaturanstieg innerhalb Im Brandherdbereich kommt es zur Entstehung von Flammen und Rauch mit hohen Temperaturen. 1500 m und 2000 m, die Temperaturverteilung und Spitzentemperaturen sind relativ die Dieses Phänomen wird durch den ersten Peak auf der Temperaturverteilung Figur dargestellt die gleichen wie im geraden Tunnel, an der Innenseite des Tunnels. Anschließend, angetrieben durch Längsluftung,

Wenn jedoch die Tunnellüftungsgeschwindigkeit unter der kritischen Geschwindigkeit liegt, breitet sich der Rauch mit hohen Temperaturen nach vorne aus. Aufgrund der Biegung des Die Temperaturverteilung in der gitudinalen Zone weist deutliche Schwankungen auf, wie in Abbildung 6 dargestellt. Beim Tunneln kollidiert es mit der Außenwand und prallt von ihr ab, was zu einem deutlichen Spitzensbereich auf der der solchen Umständen, die treibende Kraft der Längsluftung für Hochtemperatur seiner Oberfläche. Die Variation in der Krümmung des Tunnels führt zu dem Unterschied in der Lage

Rauch im Tunnel wird unzureichend, was zu seiner vorherrschenden Verteilung der Temperaturspitze auf der Außenseite führt. Folglich werden mehrere Spitzen beobachtet, wenn die hohen Temperaturen entlang der Längsluftung des Tunnels auftreten. Trotzdem übt die gekrümmte Wand immer noch Temperaturschwankungen aus, die wiederholt zwischen den Innen- und Außenseiten auftreten. Wenn man sich bewegt eine gewisse hemmende Wirkung auf die Rauchausbreitung. Dies äußert sich vor allem in einer konsequenten Abkehr vom Brandherd, den Temperaturschwankungen in der Mittellinie des Tunnels Temperaturverteilung entlang der Mittellinie des Tunnels in verschiedenen Simulationen mit- kleiner werden und allmählich nach unten. Die Lage und Höhe des Temperaturpeaks

Es wurden signifikante Unterschiede beobachtet. Die primären Unterschiede zwischen den inneren und äußeren Gruppen der Gruppe A (Tests 4, 6, 8 und 10) unterscheiden sich signifikant von denen in der geraden Seiten des Tunnels liegt in der maximalen Temperatur im Kernbereich des Brandherdes. Tunnel (Test 2). Diese Diskrepanz kann auf den Einfluss des gekrümmten Tunnels auf die anfängliche Aufprallposition des Hochtemperaturrauchstroms unter Längsluftung gationsphase.

Bedingungen, was zu Variationen in der nachfolgenden Temperaturverteilung führt.

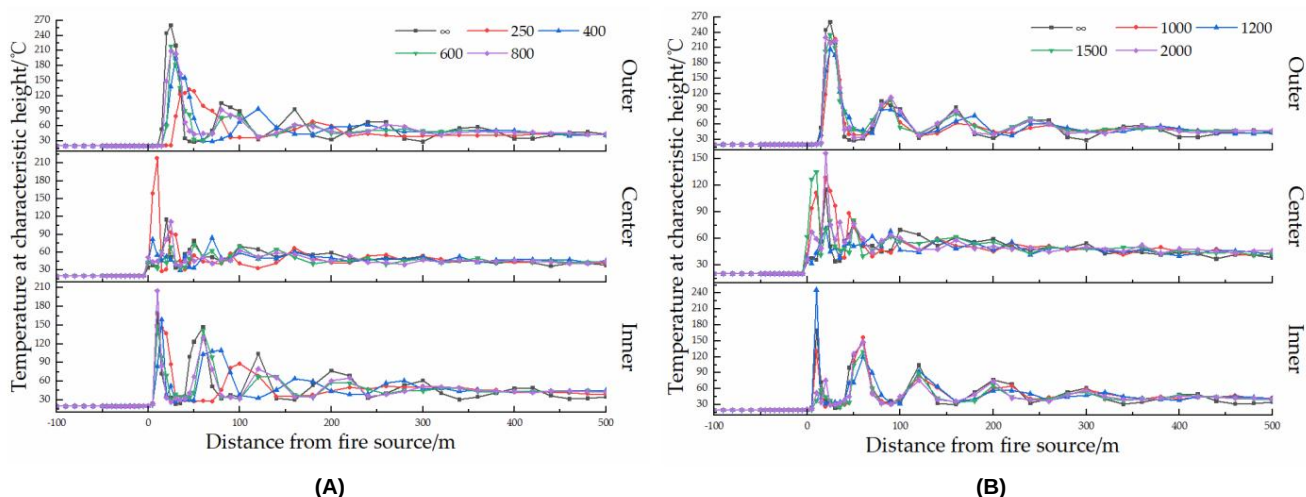


Abbildung 5. Variation der Längstemperatur auf der charakteristischen Höhe der kritischen Geschwindigkeit Gruppe. **(a)** Vergleich der Temperatur auf verschiedenen Seiten des Tunnels für Gruppe A. **(b)** Vergleichsgruppe der Temperatur auf verschiedenen Seiten des Tunnels für Gruppe B. der Temperatur auf verschiedenen Seiten des Tunnels für Gruppe B.

Temperaturverteilung entlang der Mittellinie des Tunnels in verschiedenen Simulationen, ohne dass signifikante Unterschiede beobachtet wurden. Der Hauptunterschied zwischen der Innen- und Außenseite des Tunnels liegt in der maximalen Temperatur im Kernbereich der Brandquelle. Jenseits dieses Kernbereichs tritt für den Rauch jedoch eine eindimensionale Längsausbreitungsphase ein.

Für Gruppe B (Tests 12, 14, 16 und 18) ist die longitudinale Temperaturverteilung auf der Die Innenseite, Außenseite und Mittellinie des Tunnels ähneln stark denen des geraden Tunnels (Test 2). Es gibt jedoch erhebliche Unterschiede bei den Spitzentemperaturwerten zwischen die Innen- und Außenseite des Tunnels in der entsprechenden Entfernung vom Brandherd Quelle. Die numerischen Vergleiche zeigen erhebliche Unterschiede sowohl bei der Temperatur Verteilung und Spitzentemperaturen zwischen dem Tunnelkrümmungsradius von 1000 m und 1200 m bei einem geraden Tunnel. Umgekehrt, wenn der Tunnelkrümmungsradius auf 1500 m festgelegt ist und 2000 m sind die Temperaturverteilung und die Spitzentemperaturen relativ gleich wie diejenigen, die im geraden Tunnel beobachtet wurden.

Wenn jedoch die Tunnellüftungsgeschwindigkeit unter der kritischen Geschwindigkeit liegt, weist die Längstemperturverteilung deutliche Schwankungen auf, wie in Abbildung 6 dargestellt. Unter solchen Umstände, die treibende Kraft der Längslüftung für Hochtemperaturrauch innerhalb des Tunnels wird unzureichend, was zu einer überwiegenden Verteilung entlang der Längslüftung des Tunnels. Dennoch übt die gekrümmte Wand noch immer eine gewisse hemmende Wirkung auf die Rauchausbreitung. Dies äußert sich vor allem in einer konstanten Temperatur Verteilung entlang der Mittellinie des Tunnels in verschiedenen Simulationen ohne signifikante Unterschiede zu beobachten. Der primäre Unterschied zwischen der Innen- und Außenseite des Tunnels liegt in der maximalen Temperatur im Kernbereich der Brandquelle. Jenseits dieses Kernbereichs tritt für den Rauch jedoch eine eindimensionale Längsausbreitungsphase ein.

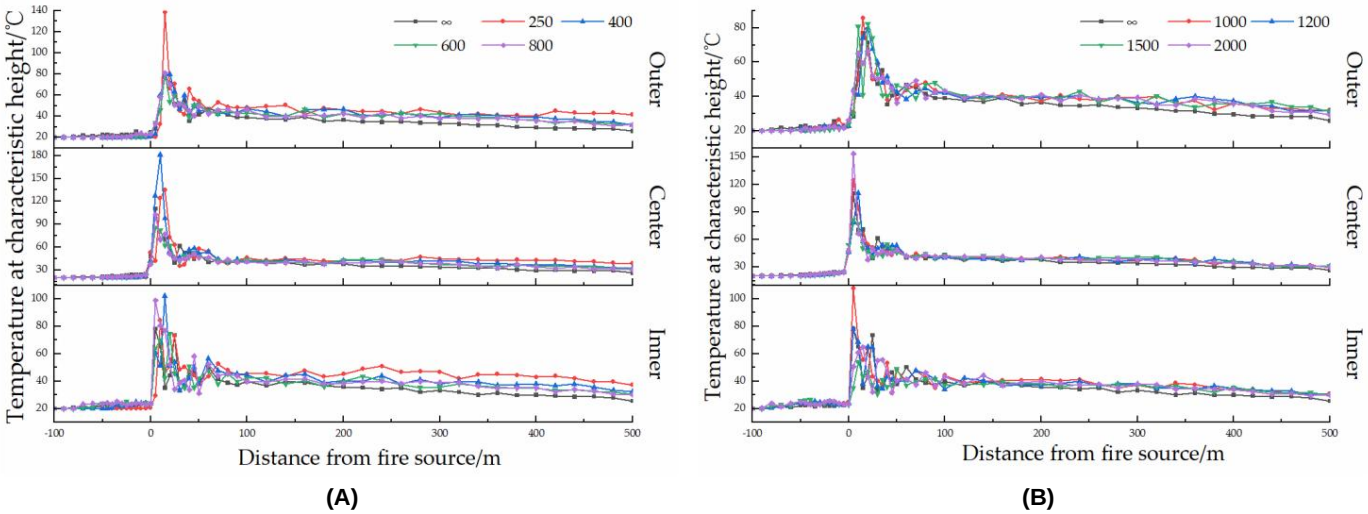


Abbildung 6. Variation der longitudinalen Temperatur auf der charakteristischen Höhe der allgemeinen Geschwindigkeit Gruppe. (a) Vergleich der Temperatur auf verschiedenen Seiten des Tunnels für Gruppe A. (b) Vergleich der Temperatur auf verschiedenen Seiten des Tunnels für Gruppe B.

3.2.2. Sichtbarkeit

Abbildung 7 zeigt die longitudinale Variation der Sichtbarkeit der kritischen Geschwindigkeitsgruppe in der charakteristischen Höhe bei 360 s. Zunächst, in den frühen Phasen des Feuers, Rauch Aufgrund der Hitzeentwicklung des Brandherdes sammelt sich das Gas vorwiegend in der Tunneldecke. Diese Ansammlung hat nur minimale Auswirkungen auf die Sichtbarkeit in der charakteristischen Höhe, da Es gibt keine signifikanten Veränderungen in der Temperatur oder Rauchkonzentration. Wenn das Feuer fortschreitet, breitet sich der Rauch in Längsrichtung durch den Tunnel aus. Die Verteilung von Die menschliche Sichtbarkeit entspricht der Längsverteilung der Temperatur und spiegelt abwechselnde Brandrauchzonen, die durch den Hochtemperaturrauch und die Flammen zwischen die Innen- und Außenseiten des Tunnels.

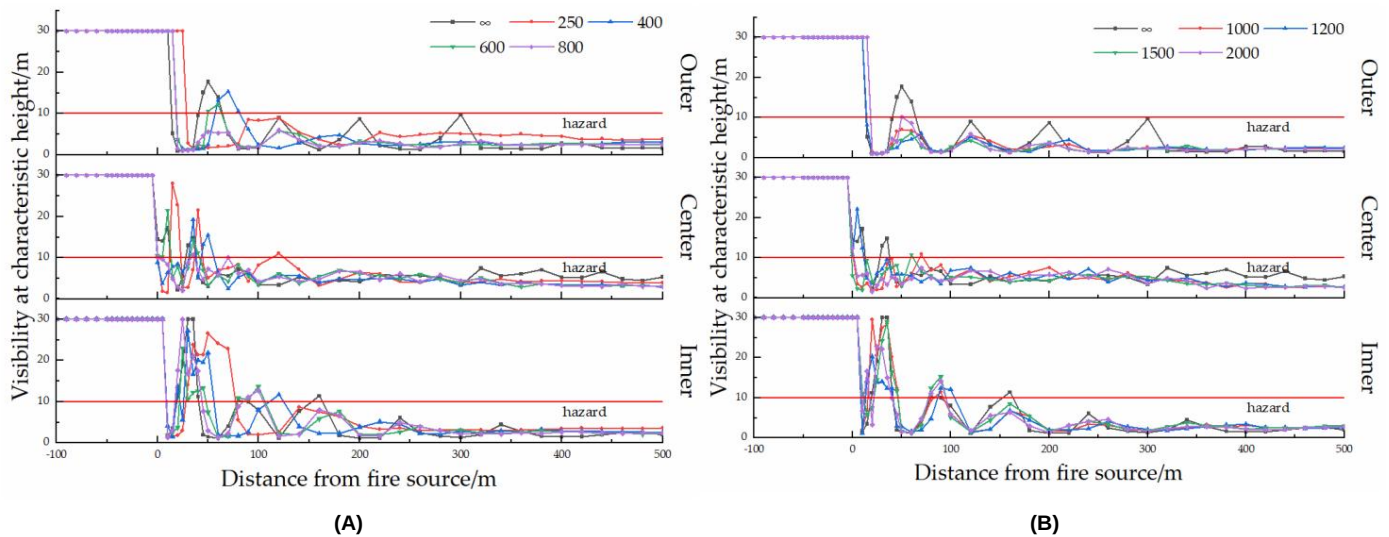
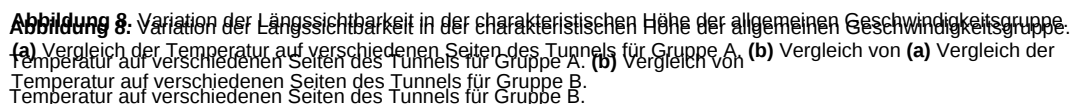
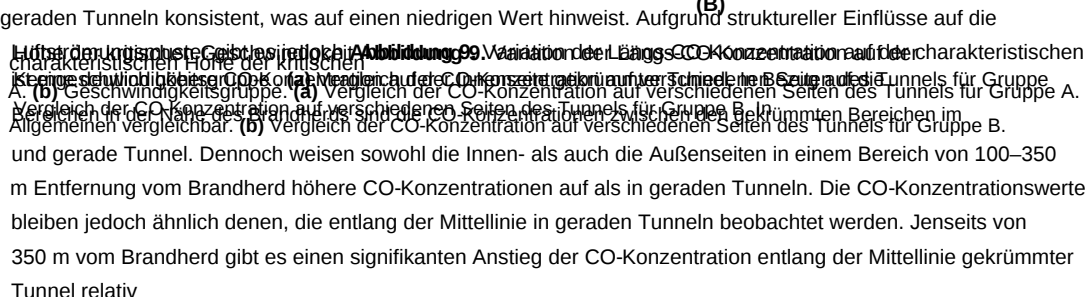


Abbildung 7: Variation der Längssichtbarkeit in der charakteristischen Höhe der allgemeinen Geschwindigkeitsgruppe. (a) Vergleich der Sicht auf verschiedenen Seiten des Tunnels für Gruppe A. (b) Vergleich der Sicht auf verschiedenen Seiten des Tunnels für Gruppe B.

Gruppe B (Tests 12, 14, 16 und 18) zeigt einen ähnlichen Trend in der Sichtbarkeitsverteilung im Vergleich zu dem in einem geraden Tunnel (Test 2). Der Hauptunterschied besteht darin, dass die Sichtweite in 50 m Entfernung vom Brandherd des geraden Tunnels blieb im sicheren Bereich, während Gruppe B am höchsten Sichtbarkeitsniveau ist, aber immer noch im Gefahrenbereich. Für Gruppe A (Tests 4, 6, 8 und 10) sind die Peakposition und Peakhöhe der Sichtbarkeit signifikant anders als die des geraden Tunnels. Wenn jedoch die Entfernung vom Feuer Quelle übersteigt 150 m, die Sichtweite ist in allen Simulationen geringer als 10 m, was bedeutet Es gibt keinen Unterschied bei der persönlichen Evakuierung. Wenn jedoch die Tunnellüftung Geschwindigkeit unterhalb der kritischen Geschwindigkeit liegt, wie in Abbildung 8 dargestellt, gibt es eine erhebliche Diskrepanz in der longitudinalen Sichtbarkeitsverteilung innerhalb der allgemeinen Geschwindigkeitsgruppe. Die Belüftung reicht nicht aus, um den heißen Rauch im Tunnel unter solchen Bedingungen zu vertreiben. Simulationen. Ab einer Entfernung von 50 m vom Brandherd ist die menschliche Sicht für Bei allen Simulationen liegt die Temperatur im Gefahrenbereich. Es kommt zu deutlicher Rauchrückbildung. In Gruppe A beeinflussen Variationen in der Tunnelkrümmung stark die Auswirkungen der Länge der Rauchrückbildung auf die Sicht des Menschen oberhalb der Brandquelle. Aufgrund der Behinderung durch An der Innenseite des Tunnels sinkt die Rauchtemperatur schneller als mit der auf der Außenseite, was zu einer schnellen Sichtverschlechterung an der charakteristischen Höhe. Dennoch bleibt die menschliche Sicht auf der Außenseite des Tunnel; dies gilt auch für Gruppe B. Obwohl die Tests 16 und 18 ähnliche Rauchmuster und Temperaturverteilung wie in einem geraden Tunnel Innerhalb der Gruppe B gibt es immer noch erhebliche Unterschiede in der Sichtbarkeit oberhalb der Brandquelle und an der Mittellinie.



11 von 18

[illegible]

(A)

(B)

Abbildung 9. Variation der longitudinalen CO-Konzentration auf der charakteristischen Höhe der kritischen Geschwindigkeitsgruppe. **(a)** Vergleich der CO-Konzentration auf verschiedenen Seiten des Tunnels für Gruppe A. **(b)** Vergleich der CO-Konzentration auf verschiedenen Seiten des Tunnels für Gruppe B.

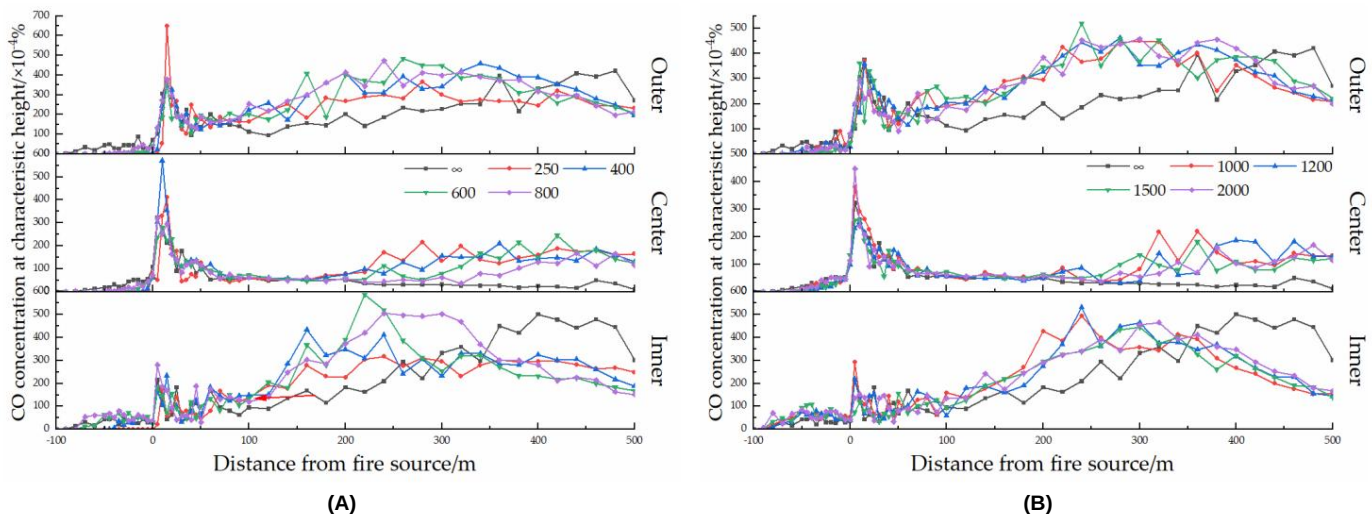


Abbildung 10. Variation der longitudinalen CO-Konzentration auf der charakteristischen Höhe der allgemeinen Ortsgruppe. **(a)** Vergleich der CO-Konzentration auf verschiedenen Seiten des Tunnels für Gruppe A. **(b)** Vergleich der CO-Konzentration auf verschiedenen Seiten des Tunnels für Gruppe B.

3.3. Umfassende Analyse des Höheneffekts und der Längslüftung Wie in Abbildung 9 dargestellt, unterdrückt die Längslüftung in der kritischen Geschwindigkeitsgruppe effektiv die

Rauchrückströmung. Aufgrund der einzigartigen Tunnelstruktur ist dies jedoch nicht der Fall.

Der heiße Rauch verteilt sich nicht direkt entlang des Tunnels, sondern besonders wird er zwischen den Seitenwänden transportiert. Dies führt zu einer hohen CO-Konzentration in der Mitte des Tunnels, die sich mit zunehmender Entfernung vom Brandherd allmählich verringert. Die CO-Konzentration in der Mitte des Tunnels ist höher als in der Nähe der Seitenwände. Die CO-Konzentration in der Mitte des Tunnels ist höher als in der Nähe der Seitenwände. Die CO-Konzentration in der Mitte des Tunnels ist höher als in der Nähe der Seitenwände.

Die Verteilung der CO-Konzentration auf der Außen- und Innenseite nähert sich allmählich der in geraden Tunneln beobachteten. Höhere CO-Konzentrationen bleiben jedoch in der Mittellinie bestehen, verglichen mit denen in geraden Tunneln.

Wenn jedoch die longitudinale Ventilationsgeschwindigkeit unter der kritischen Geschwindigkeit liegt, Das Längsverteilungsmuster der CO-Konzentration in gekrümmten Tunneln unterscheidet sich erheblich von der in geraden Tunneln beobachteten, wie in Abbildung 10 dargestellt. Die CO-Konzentration in gekrümmten Tunneln mit unterschiedlichen Krümmungsradien an der Außenseite und der Mittellinie des

der Tunnel vor dem Brandherd bleibt mit dem in geraden Tunneln konsistent,

ein niedriger Pegel angezeigt wird. Aufgrund struktureller Einflüsse auf die Luftströmungsmuster gibt es jedoch ist eine deutlich höhere CO-Konzentration auf der Innenseite gekrümmter Tunnel. In Bezug auf den Kern In Bereichen in der Nähe des Brandherdes sind die CO-Konzentrationen in gebogenen und gerade Tunnel. Dennoch sind in einem Umkreis von 100–350 m um den Brandherd sowohl

Die Innen- und Außenseiten weisen höhere CO-Konzentrationen auf als die in geraden Tunneln. Die CO-Konzentration bleibt jedoch ähnlich wie entlang die Mittellinie in geraden Tunneln. Jenseits von 350 m vom Brandherd gibt es eine signifikante Anstieg der CO-Konzentration entlang der Mittellinie gekrümmter Tunnel im Vergleich zu dem in geraden Tunneln. Der beobachtete Abwärtstrend der CO-Konzentrationen sowohl auf der Innen- und Außenseiten werden allmählich niedriger als die innerhalb gemessenen gerade Tunnel.

Der in den Simulationen verwendete Tunnel besteht aus einer gewölbten Decke, durch die CO zusammen mit dem Rauchgas transportiert. Anschließend steigt CO zur Tunneldecke auf, bevor nach beiden Seiten hin absteigend. Die räumliche Verteilung von CO wird vermutlich beeinflusst durch den Krümmungsradius des Tunnels.

3.3. Umfassende Analyse des Höheneffekts und der Längslüftung

Die Längsverteilungsmuster von Temperatur, Sichtbarkeit und CO-Konzentration spiegeln zusammen die Verteilungseigenschaften des Brandrauchs im Tunnel wider. Insbesondere

Wenn die Längslüftungsgeschwindigkeit im Tunnel die kritische Geschwindigkeit überschreitet, breiten sich die von der versetzten Brandquelle erzeugten Flammen und Rauch hoher Temperatur unter dem Einfluss der Längslüftung schnell entlang der Tunnelrichtung aus. Diese Ausbreitung verläuft jedoch nicht perfekt in Längslüftungsrichtung, sondern weist eine gewisse Abweichung auf. Anschließend prallt der Rauch hoher Temperatur auf die Außenwand des Tunnels und prallt von ihr ab. Dieses Phänomen äußert sich in einem ersten Temperatur- und CO-Konzentrationspeak sowie einer Zone mit schlechter Sicht auf der Innenseite des Tunnels. Anschließend kommt es zu einem abwechselnden Reflexions- und Abkühlungsprozess zwischen Innen- und Außenwand des Rauchs hoher Temperatur. Der Hauptunterschied, der in Tunneln mit unterschiedlichen Krümmungen beobachtet wird, liegt in den Positionen und Werten der numerischen Peaks. Wenn die Längslüftungsgeschwindigkeit in einem gekrümmten Tunnel jedoch unter die kritische Geschwindigkeit fällt, zeigen Temperatur, Sichtweite und CO-Konzentration im Vergleich zu geraden Tunneln im Abstand von 0 m bis 100 m ähnliche Muster wie die von der Brandquelle emittierten Werte. Temperatur, Sichtweite und CO-Konzentration nehmen mit zunehmender Entfernung von der Quelle ab. In der stromaufwärts gelegenen Region gibt es jedoch erhebliche Unterschiede aufgrund der durch die Tunnelkrümmungseffekte verursachten Rauchrückschichtung. Darüber hinaus trägt die Tunnelkrümmung erheblich zu einer erhöhten CO-Konzentration in Regionen bei, die 100–350 m stromabwärts der Brandquelle liegen.

3.4. Auswirkungen auf die persönliche Evakuierung

3.4.1. Auswirkungen auf die verfügbare Zeit für einen sicheren Ausstieg

Basierend auf der Verteilung von Temperatur, Sichtweite und CO-Konzentration wurde die verfügbare sichere Fluchtzeit (ASET) bestimmt, wenn ein beliebiger Faktor ein Gefahrenniveau erreichte. Bei einem Tunnelbrand ist die persönliche Sicherheit vor allem durch die folgenden drei Faktoren gefährdet: Temperaturanstieg im Brandherdbereich, Verschlechterung der Sichtweite durch Rauchausbreitung und Ausbreitung giftiger Gase. Diese drei Faktoren addieren sich allmählich zum Gefahrenbereich. Eine vergleichende Analyse zeigt, dass die Temperatur der wichtigste Gefahrenfaktor ist, der zu einer Katastrophe im Kernbereich eines Tunnelbrandes beiträgt. Nach etwa 120 s erreichen die Temperaturen im Kernbereich gefährliche Werte. Bei einem Brand in einem Autobahntunnel würde die Längswindgeschwindigkeit über die kritische Geschwindigkeit hinausgehen. Daher basiert die folgende Analyse auf den Ergebnissen der kritischen Geschwindigkeitsgruppe.

Wie oben erläutert, weist bei einem Brand in einem gekrümmten Tunnel die Verteilung des Hochtemperaturrauchs auf der Innen- und Außenseite des Tunnels einen gewissen Unterschied auf. Abbildung 11 zeigt die Unterschiede zwischen dem ASET innerhalb und außerhalb des Tunnels. Von links nach rechts und von oben nach unten betragen die entsprechenden Krümmungsradien jedes Tunnels 250 m, 400 m, 600 m, 800 m, 1000 m, 1200 m, 1500 m und 2000 m.

Wie in Abbildung 11 gezeigt, steht auf der Innenseite des Tunnels im Kernbereich des Brandes und in einem Abstand von 150 m vom Brandherd unabhängig vom Krümmungsradius mehr Zeit zum sicheren Verlassen zur Verfügung als auf der Außenseite. In einem Abstandsbereich von 75 bis 150 m vom Brandherd entsteht, wie bereits erwähnt, wenn heißer Rauch auf die äußere Tunnelwand trifft und zur Innenwand reflektiert wird, durch aufeinanderfolgende Reflexionen eine örtlich begrenzte Schwachzone aus heißem Rauch. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass der schwache Bereich der Temperaturverteilung nahe der Kernzone des Brandherds, wie in Abschnitt 3.2.1 dargestellt, wenn heißer Rauch auf die gegenüberliegende Seite des Tunnels trifft, dennoch frühzeitig in den gefährlichen Bereich der menschlichen Sichtbarkeit übergeht.

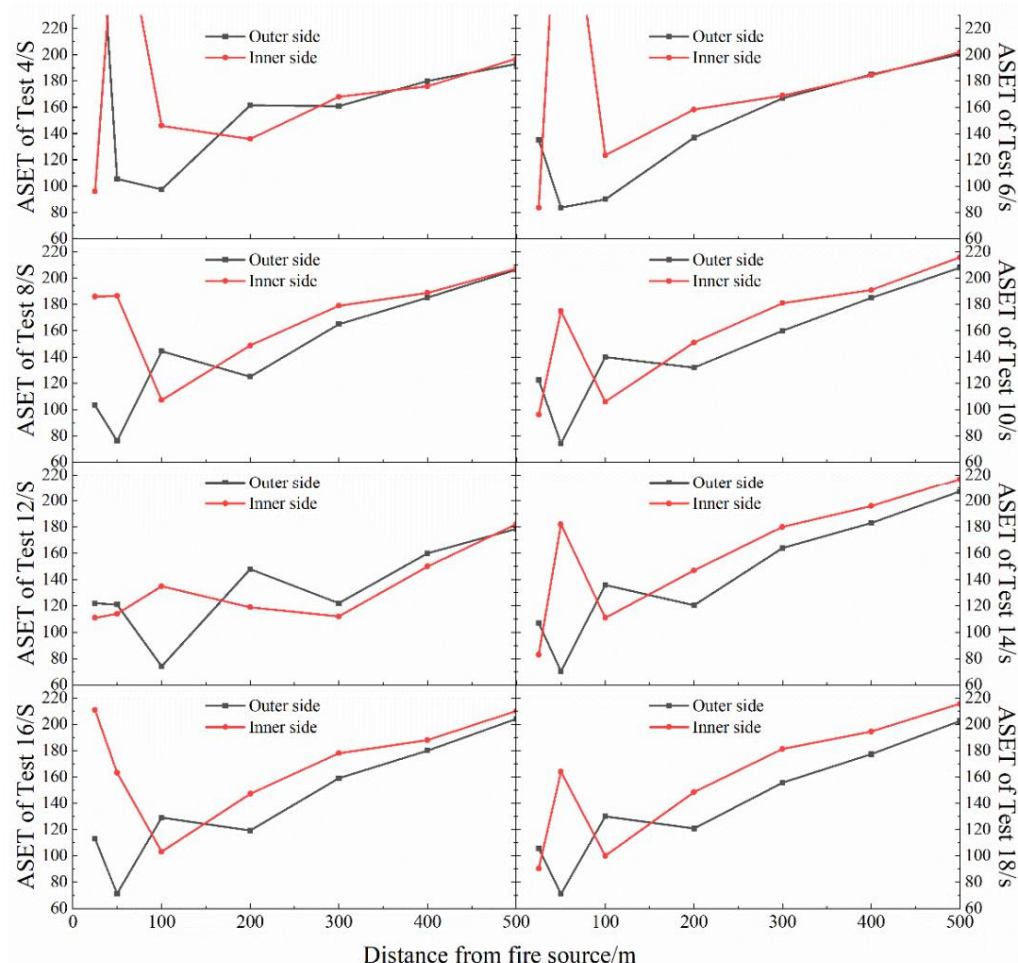


Abbildung 11. ASET von Tunneln mit unterschiedlichen Krümmungsradien in unterschiedlichen Abständen vom Brandherd.
Quelle.

3.4.2. Lage eines Durchgangsstollens

Basierend auf den oben genannten Ergebnissen, bei der Gestaltung von persönlichen Fluchtwegen für gekrümmte Tunnel, Personendurchgang Es wird empfohlen, einen Stollen für den Personendurchgang strategisch an der Innenseite Auf Grundlage der oben genannten Ergebnisse sollte bei der Gestaltung persönlicher Fluchtwegen für gekrümmte Tunnel darauf geachtet werden, die verfügbare Zeit für einen sicheren Ausgang zu maximieren. Es wird empfohlen, einen Stollen für Passanten auf der Tunnelinnenseite strategisch zu positionieren, um die verfügbare Zeit für einen sicheren Ausgang zu maximieren.

3.4.3. Lage des Durchgangsstollens

Die vorliegenden Untersuchungen und Analysen lassen darauf schließen, dass die Reaktion auf einen Brand im Allgemeinen in drei Hauptphasen eingeteilt werden kann: Branderkennung, Bestätigung der von Bränden und die Evakuierungsmaßnahmen beeinflussen kann [38]. Um die sichere Evakuierung aller Personen zu gewährleisten, General kann die Brandbekämpfung in drei Hauptphasen eingeteilt werden: Branderkennung, Bestätigung von Brandereignisse und Evakuierungsmaßnahmen [38]. Um die sichere Evakuierung aller Personen zu gewährleisten, müssen Personen, die vorbeikommen, sicher von stromaufwärts nach stromabwärts gelangen können. Stollenbereichen und dem Brandherd herzustellen. Der maximal zulässige Abstand sollte definiert werden als für vorbeikommende Personen, damit sich Personen sicher von stromaufwärts und stromabwärts bewegen können, so dass die Personen innerhalb der erforderlichen sicheren Fluchtzeit (RSET) sicher evakuiert werden können. Die Bereiche der Brandquelle. Der maximal zulässige Abstand sollte als Abstand definiert werden. RSET ist , dass Menschen innerhalb der erforderlichen sicheren Fluchtzeit (RSET) sicher evakuiert werden können. Die RSET = $T_d + T_{pre} + T_t$ (3) wobei T_d die Alarmzeit ist; T_{pre} die Zeit vor der persönlichen Evakuierung ist; und T_t ist die persönliche Evakuierungszeit.

Die in der Praxis eingesetzten Rauchmelder können Brände von 100 kW erkennen. Der Brand wo ist die Alarmzeit; 2 Alarmstartzeit wird basierend auf dem Brandmodell in dieser Forschung. Normalerweise ist die ist die Zeit bis zur persönlichen Evakuierung.

Das Gesetz der Entstehung von Bränden im Anfangsstadium lautet wie folgt:
Die in der Praxis verwendeten Rauchmelder können Brände von 100 kW erkennen. Das Die Alarmstartzeit wird berechnet auf Grundlage der Brandmodell in dieser Untersuchung. (4)
Das Gesetz der Entwicklung von Bränden im Anfangsstadium ist wie folgt:

wobei t der Zeitpunkt des Brandeintritts ist; Q_f ist die HRR, die in der Berechnung auf 100 kW festgelegt wird der Alarmzeit; und γ ist der Brandausbreitungskoeffizient, der in dieser Studie auf 0,187 kW/s² festgelegt wurde. Der Alarmzeitpunkt der Brandmeldeanlage lässt sich somit wie folgt ermitteln:

$$T_d = \sqrt{Q_f / \gamma} = \sqrt{(100/0,187)} \approx 23,1 \text{ s} \quad (5)$$

Die Zeitspanne zwischen dem Empfang des Feueralarms und der Einleitung der Evakuierungsmaßnahmen, bekannt als Voraktionszeit oder persönliche Evakuierungs Reaktionszeit ist entscheidend in Brandnotfälle. Die Bestimmung der Voraktionszeit hängt in erster Linie von Faktoren ab wie Gebäudetyp und Merkmale, die mit der Sicherheit der Bewohner verbunden sind. Die bestehende Forschung Daten [39–42] zeigen, dass die Vorlaufzeit für die persönliche Evakuierung zwischen 30 s und 210 s. In dieser Studie wurde eine Voraktionszeit von 90 s beobachtet.

Derzeit gibt es keine Studie, die einen Einfluss des Krümmungsradius auf die persönliche Evakuierungsgeschwindigkeit oder ihre Entscheidungen in einem gekrümmten Tunnel. Daher ist die persönliche Evakuierung Die Zeit T_t wird zwischen gekrümmten und geraden Tunneln als konsistent angenommen. Dieses Problem ist nicht werden in diesem Dokument weiter erörtert.

Abbildung 12 zeigt die Temperaturverteilung im Tunnel mit einem Krümmungsradius von 400 m innerhalb von 200 m vom Brandherd. Von links nach rechts die Temperaturverteilungen liegen bei 83,1 s, 113,1 s, 143,1 s und 173,1 s. Basierend auf der eingestellten Alarmzeit von 23,1 s und der Vorlaufzeit für eine persönliche Evakuierung von 90 s, die Evakuierung beginnt bei 113,1 s, und die Temperaturverteilung im Tunnel zu diesem Zeitpunkt ist in Abbildung 12b dargestellt.

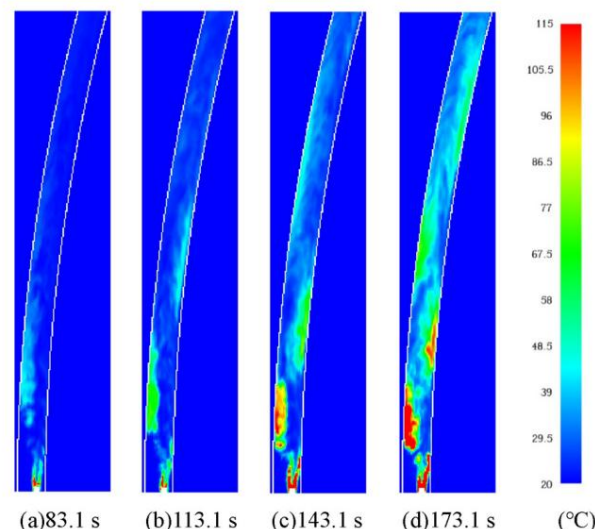


Abbildung 12. Temperaturverteilung des Tunnels im Umkreis von 210 m vom Brandherd zu verschiedenen Zeiten.

Zu diesem Zeitpunkt, wie bereits erwähnt, trifft der heiße Rauch auf die Außenwand des Tunnels, der zur Grünfläche auf der Außenseite führt. Die Grünfläche Bereich bedeutet, dass die Temperatur in diesem Bereich 60 °C erreicht, was nicht geeignet ist

4. Erster Besuch
Diese Untersuchung der Rauchausbreitung bei Bränden in gekrümmten Autobahntunneln ergab, dass Menschen nicht leicht hindurchkommen. Im Allgemeinen sollten Personen während der Evakuierung entlang der Fußgängerspur auf beiden Seiten der Fahrspuren. Die gefährlichen Feuer bildet eine Zone an der Außenseite des Tunnels, was bedeutet, dass die Menschen entlang der Tunnelinnenphase.
die eindimensionale Längsausbreitungsphase [46]. Während der Brandentwicklungsphase, wie in Abbildung 12c dargestellt, erschien der zweite Treffer des Hochtemperaturrauchs bei 143,1 s. Der direkt von der Brandquelle erzeugte Rauch mit hoher Temperatur wird wiederholt kollidiert. 143,1 s. Das Vorhandensein einer zweiten Hochtemperaturzone innerhalb des Tunnels macht die zwischen der Innen- und Außenseite des Tunnels. Folglich ist dieser Vorgang die Innenseite für die Evakuierung ungeeignet, was eine Umleitung der Evakuierungsrouten erforderlich macht. Dies führt zu mehreren Hochtemperaturzonen zwischen der Innen- und Außenseite. Zusätzlich entlang der CO₂, das die Evakuierung von Personen aufgrund der unvollständigen Verbrennung erheblich beeinträchtigt.

Die Durchführbarkeit eines solchen Hin- und Her-Wechsels zwischen dem inneren und der Brandquelle weist ebenfalls abwechselnde Spitzen zwischen den Innen- und Außenseiten auf, da die Außenseiten des Tunnels für im Feuer eingeschlossene Personen gefährdet sind. Es breitet sich mit Rauch hoher Temperatur aus. Die nachfolgende Rauchausbreitung ähnelt jedoch. Daher wird bei Bränden in gekrümmten Tunneln empfohlen, dass in einem geraden Tunnel, wo die Sicht weniger durch die Rauchtemperatur beeinflusst wird, Personen, die sich im Kernbereich der Brandquelle befinden, umgehend entlang der Mittellinie des von den Übertragungseigenschaften, aber stärker von der Rauchkonzentration beeinflusst. Nach Beginn der eindimensionalen longitudinalen Rauchdiffusion gibt es keine erkennbaren Temperatur- oder Sichtunterschiede an verschiedenen Stellen im Tunnel. Dennoch stimmt die CO₂-Verteilung nicht vollständig mit der Rauchdiffusion überein. Bei Rauch mit hohen Temperaturen bleiben auf beiden Seiten deutliche Zonen mit abwechselnden CO₂-Konzentrationsspitzen bestehen.

der Tunnel. Sobald sie mehr als 100 m vom Brandherd entfernt sind, sollten sie ihre Evakuierung entlang der Innenwand des Tunnels fortsetzen und durch einen Durchgangsstollen austreten.

Der in Abbildung 12 gezeigte Vergleich legt außerdem nahe, dass, wenn die Vorlaufzeit für die persönliche Evakuierung auf 60 s reduziert werden kann, die vorhandene Forschung zur persönlichen Evakuierungsgeschwindigkeit [21,43–45] darauf hinweist, dass Personen in der Lage sein werden, aus dem Kernbereich der Brandquelle zu evakuieren, bevor sich eine Hochtemperaturzone bildet. Jenseits des Kernbereichs der Brandquelle verschiebt sich der primäre Gefahrenindex der persönlichen Evakuierung von der Temperatur zur Sichtbarkeit.

4. Diskussion

Diese Untersuchung der Rauchausbreitung bei Bränden in gekrümmten Autobahntunneln ergab unterschiedliche Muster der Brandeigenschaften auf Augenhöhe des Menschen. Im Vergleich zu geraden Tunneln weist die Rauchbewegung in gekrümmten Tunneln andere Muster auf. Die Ausbreitung des Brandrauchs kann in die folgenden zwei Phasen eingeteilt werden: die Brandentwicklungsphase und die eindimensionale Längsausbreitungsphase [46]. Während der Brandentwicklungsphase kollidiert der direkt von der Brandquelle erzeugte Hochtemperaturrauch wiederholt mit den Innen- und Außenseiten des Tunnels. Folglich führt dieser Prozess zu mehreren Hochtemperaturzonen zwischen den Innen- und Außenseiten. Darüber hinaus weist CO, das aufgrund der unvollständigen Verbrennung der Brandquelle die Evakuierung von Personen erheblich beeinträchtigt, bei der Ausbreitung mit dem Hochtemperaturrauch ebenfalls abwechselnde Spitzen zwischen den Innen- und Außenseiten auf. Die anschließende Rauchausbreitung ähnelt jedoch der in einem geraden Tunnel, wo die Sicht aufgrund der Übertragungseigenschaften weniger von der Rauchtemperatur, sondern stärker von der Rauchkonzentration beeinflusst wird. Nach Beginn der eindimensionalen Längsrauchausbreitung gibt es an verschiedenen Stellen im Tunnel keine erkennbaren Temperatur- oder Sichtunterschiede. Die CO-Verteilung verläuft jedoch nicht vollständig parallel zur Rauchdiffusion. In heißem Rauch gibt es während der eindimensionalen Ausbreitungsphase an den Innen- und Außenseitenwänden deutliche Zonen mit abwechselnden CO-Konzentrationsspitzen.

Die Ergebnisse zur Temperaturverteilung stimmen gut mit früheren Untersuchungen überein [4,14,18]. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass wir beim Vergleich unserer Ergebnisse mit denen älterer Studien zusätzlich zwei kritische Indikatoren berücksichtigt haben, nämlich die CO-Konzentration und die menschliche Sehschärfe. Darüber hinaus war die Wahl des Tunnelkrümmungsradius nicht auf einen Mindestwert von 2500 m beschränkt [16]. Basierend auf praktischer Ingenieurskunst wurde die Längslüftungsgeschwindigkeit in die Simulationen eingeführt, um das Rauchausbreitungsmuster im tatsächlichen Brandszenario zu berücksichtigen. Die Ergebnisse gingen über den Umfang der Rauchkontrollmaßnahmen hinaus und umfassten Überlegungen zur Auswahl von persönlichen Evakuierungsstrategien.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse sollten die Einschränkungen unserer Studie berücksichtigt werden. Zunächst ist es wichtig zu betonen, dass die Ergebnisse zur Temperaturverteilung durch genügend Experimente [11,15] validiert wurden, was die Genauigkeit unserer Ergebnisse sicherstellt. Die Verteilung der Sichtbarkeit für Menschen wurde ebenfalls sorgfältig untermauert. Dennoch besteht weiterhin Bedarf an einer experimentellen Überprüfung des Verteilungsmusters der CO-Konzentration in gekrümmten Autobahntunneln. In aktuellen numerischen Simulationen wird die Wärmefreisetzungsrate der Brandquelle durchgängig als superschnelles Feuer angenommen. Die Wärmefreisetzungsrate der Brandquelle weist jedoch einen erkennbaren Trend eines allmählichen Anstiegs auf. Darüber hinaus ist unsere Auswahl an Simulationen mit Einschränkungen behaftet. Da in der tatsächlichen Konstruktion keine völlig flachen Tunnel von der Höhe unberührt bleiben, bleibt unsere Studie eingeschränkt. Variationen in Luftdichte, Luftfeuchtigkeit und Sauerstoffgehalt am Tunnelstandort werden sich ebenfalls auf die Ergebnisse auswirken. Trotz ihres vorläufigen Charakters zeigt unsere Studie deutlich den Einfluss unterschiedlicher Tunnelkrümmungsradien auf die Ausbreitung von Brandrauch und die Evakuierung von Personen.

Eine wichtige zukünftige Richtung ist die Erforschung der kombinierten Auswirkungen mehrerer Einflussfaktoren. So kann beispielsweise die Untersuchung der Auswirkungen von Höheneffekten und Kamineffekten auf das Diffusionsmuster von Brandrauch in einem gekrümmten Tunnel helfen, ihr Potenzial aufzuklären, die Rauchverteilung entweder zu verstärken oder zu unterdrücken. Eine weitere wichtige zukünftige

Richtung ist ein Übergangskurvenabschnitt zwischen dem geraden Bereich und dem gekrümmten Bereich. Der Einfluss des sich kontinuierlich ändernden Krümmungsradius auf die Rauchverteilung ist ebenfalls eine weitere Untersuchung wert.

Aus unseren Erkenntnissen lässt sich eine neue persönliche Evakuierungsstrategie für kurvenreiche Autobahntunnel ableiten. In geraden Tunneln erfolgt die Evakuierung über die Gehwege auf beiden Seiten des Tunnels, die zu einem Stollen für Passanten führen. Um jedoch in kurvenreichen Tunneln Schäden zu minimieren und eine sichere Evakuierung zu gewährleisten, empfehlen wir, dass Personen in der Nähe des Brandherds zunächst eine bestimmte Strecke entlang der Mittellinie des Tunnels evakuieren, bevor sie zu den seitlichen Fußgängerüberwegen wechseln.

5. Schlussfolgerungen

Um die Eigenschaften von Temperatur, CO-Konzentration und Sichtbarkeit des menschlichen Auges in charakteristischen Höhen zu untersuchen, wurde eine Reihe numerischer Simulationen unter Berücksichtigung des Krümmungsradius und der Längslüftungsgeschwindigkeit durchgeführt. Die Auswirkungen auf die persönliche Evakuierung wurden auf Grundlage der Ergebnisse berechnet. Die wichtigsten Schlussfolgerungen lauten wie folgt:

Unter dem Einfluss der Längslüftung verteilt sich der Brandrauch in gekrümmten Tunneln nicht direkt zum Tunnelausgang. Stattdessen wird der Rauch zwischen den inneren und äußeren Seitenwänden des Tunnels reflektiert. Infolgedessen bilden sich auf beiden Seiten des Tunnels in der Nähe des Brandherds mehrere Hochtemperaturzonen. Die Position der Hochtemperaturzonen ändert sich mit Variationen des Tunnelkrümmungsradius, was zu unterschiedlichen Merkmalen der Rauchverteilung innerhalb des Tunnels führt.

Wenn der Krümmungsradius des Tunnels weniger als 1000 m beträgt, gibt es einen ausgeprägteren Unterschied in den Rauchverteilungseigenschaften zwischen gekrümmten und geraden Tunneln. Wenn der Krümmungsradius des Tunnels 1000 m übersteigt, gleicht sich die Rauchverteilung in gekrümmten Tunneln allmählich der in geraden Tunneln an.

Aufgrund der besonderen Rauchverteilungseigenschaften in gekrümmten Tunneln zeigt ein Vergleich der Brandherdstandorte, dass ein Feuerwehrfahrzeug auf der Innenspur des Tunnels ein höheres Risiko für die Evakuierung von Personen darstellt. Durch eine Analyse und einen Vergleich der Temperatur-, Sicht- und CO-Konzentrationsverteilung an den Innen- und Außenseitenwänden über verschiedene Krümmungsradien der Tunnelkurven wird daher bestimmt, dass der Stollen für vorbeifahrende Personen auf der Innenseite des Tunnels liegen sollte.

Für die persönliche Evakuierung innerhalb des Kernbereichs des Brandherdes empfehlen wir, unter Berücksichtigung der Auswirkungen der Hochtemperatur-Rauchverteilungseigenschaften, die durch Längslüftung in gekrümmten Tunneln entstehen, die Evakuierung zunächst entlang der Mittellinie des Tunnels durchzuführen. Anschließend sollten die Personen entlang des inneren Fußgängerwegs in Richtung des Stollens für Personen geleitet werden, die aus dem Kernbereich des Brandherdes herauskommen.

Beiträge der Autoren: Konzeptualisierung, YC und ZL; Methodik, YC; Software, YC; Validierung, YC; formale Analyse, YC; Untersuchung, ZL; Ressourcen, ZL; Datenkuratierung, YC; Schreiben – Vorbereitung des Originalentwurfs, YC; Schreiben – Überprüfung und Bearbeitung, ZL; Visualisierung, YC; Überwachung, ZL; Projektverwaltung, ZL; Mittelbeschaffung, ZL. Alle Autoren haben die veröffentlichte Version des Manuskripts gelesen und stimmen ihr zu.

Finanzierung: Diese Forschung wurde von der National Natural Science Foundation of China finanziert, Zuschussnummer 41461016 und Zuschussnummer 41761015.

Erklärung des Institutional Review Board: Nicht zutreffend.

Einverständniserklärung: Nicht zutreffend.

Datenverfügbarkeitserklärung: Die in der Studie vorgestellten Originalbeiträge sind im Artikel enthalten, weitere Anfragen können an den entsprechenden Autor gerichtet werden.

Interessenkonflikte: Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Verweise

- Du, T.; Li, P.; Wang, Y.; Xue, X. Längsabfall der Rauchtemperatur **und** Frontgeschwindigkeit bei Tunnelbränden. 33, 140–145. [\[CrossRef\]](#)
- Jiang, X.-P.; Chen, X.-G.; Guo, K. Untersuchung der kritischen Geschwindigkeit von Tunnelbränden mit seitlicher Punktrauchabsaugung. China Saf. Sci. J. **2021**, 31, 105–111. [\[CrossRef\]](#)
- Zhao, Q.; Li, J.-M.; Xie, X.; Liu, W. Numerische Studie zur Rauchdiffusion und Rauchkontrolle in unterirdischen Kurventunneln in Städten. J. Phys. Conf. Ser. **2023**, 2445, 012003. [\[CrossRef\]](#)
- Kashef, A.; Saber, HH; Gao, L. Optimierung von Notfallbelüftungsstrategien in einem Straßentunnel. Fire Technol. **2016**, 47, 1019–1046. [\[CrossRef\]](#)
- Wang, F. Forschung zu Schlüsselparametern der Betriebsbelüftung von gekrümmten Autobahntunneln. Doktorarbeit, Südwest-Jiaotong Universität, Chengdu, China, 2010. [\[CrossRef\]](#)
- Wang, F.; Dong, G.-H.; Wang, M. Untersuchung der kritischen Luftgeschwindigkeit zur Brandrauchkontrolle in einem gekrümmten Tunnel. Mod. Tunn. Technol. **2015**, 52, 84–89. [\[CrossRef\]](#)
- Wang, F.; Wang, M.; Carvel, R.; Wang, Y. Numerische Studie zur Bewegung und Kontrolle von Brandrauch in gekrümmten Straßentunneln. Tunn. Undergr. Space Technol. **2017**, 67, 1–7. [\[CrossRef\]](#)
- Caliendo, C.; Ciambelli, P.; De Guglielmo, ML; Meo, MG; Russo, P. Numerische Simulation verschiedener Lkw-Brandszenarien in gekrümmten Zweirichtungs-Straßentunneln und Sicherheitsbewertung. Tunn. Undergr. Space Technol. **2012**, 3133, 50. [\[CrossRef\]](#)
- Wu, C.; He, J.; Ni, T. Untersuchungen zur Rauchbewegung bei kurvenförmigen Tunnelbränden mit kleinem Radius. Fire Sci. Technol. **2014**, 33, 37–40. [\[Querverweis\]](#)
- Wang, F.; Wang, M.-N. Eine rechnergestützte Studie über die Auswirkungen des Brandortes auf die Rauchbewegung in einem Straßentunnel. Tunn. Undergr. Weltraumtechnologie. **2016**, 51, 405–413. [\[CrossRef\]](#)
- Zhong, M.-H.; Shi, C.-L.; He, L.; Shi, J.; Liu, C.; Tian, X. Rauchentwicklung bei großflächigen Bränden in langen, geneigten und großen gekrümmten Tunneln unter natürlicher Belüftung. Appl. Therm. Eng. **2016**, 108, 857–865. [\[CrossRef\]](#)
- Zhang, S.; Yang, H.; Yao, Y.; Zhu, K.; Zhou, Y.; Shi, L.; Cheng, X. Numerische Untersuchung der Rückschichtungslänge und der kritischen Geschwindigkeit in gekrümmten U-Bahn-Tunneln mit unterschiedlichem Wenderadius. Fire Technol. **2017**, 53, 1765–1793. [\[CrossRef\]](#)
- Pan, R.-L.; Zhu, G.-Q.; Liang, Z.-H.; Zhang, G.; Liu, H.; Zhou, X. Experimentelle Studie zur Brandform und Maximaltemperatur unterhalb der Deckenmittellinie in einem Versorgungstunnel unter dem Einfluss einer gekrümmten Seitenwand. Tunn. Undergr. Space Technol. **2020**, 99, 103304. [\[Querverweis\]](#)
- Lu, K.-X.; Xia, K.-H.; Shi, C.; Yang, M.; Wang, J.; Ding, Y. Untersuchung des Tunnelkrümmungseffekts auf die Decke Temperatur von Tunnelbränden: Eine numerische Simulation. Fire Technol. **2021**, 57, 2839–2858. [\[CrossRef\]](#)
- Xu, Z.-S.; Zhou, D.-M.; Tao, H.; Zhang, X.; Hu, W. Untersuchung der kritischen Geschwindigkeit in gekrümmten Tunneln unter den Auswirkungen unterschiedlicher Brandorte und Wenderadien. Tunn. Undergr. Space Technol. **2022**, 126, 104553. [\[CrossRef\]](#)
- Muhasilovic, M.; Deville, MO Einfluss der Tunnelkrümmung auf die Ausbreitung der Folgen von Großbränden – Eine CFD-Untersuchung. Turk. J. Eng. Environ. Sci. **2013**, 31, 391–402. [\[CrossRef\]](#)
- Lu, F. Simulationsforschung zur Brandrauchkontrolle in gekrümmten Autobahntunneln. Dissertation, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 2017. [\[CrossRef\]](#)
- Zhao, W.-F.; Lv, S.-J.; Xu, H. Rauchbewegungseigenschaften von Feuer in Tunneln mit kleinem Krümmungsradius. Fire Sci. Technol. **2019**, 38, 77–81. [\[CrossRef\]](#)
- Lin, L.; Jian, G.; Xiong, X.-P. Numerische Analyse des Rauchflusses bei Tunnelbränden mit einfacher Krümmung. J. Nanchang Hangkong Univ. (Nat. Sci. Ed.) **2019**, 33, 66–67, 88. [\[CrossRef\]](#)
- Liu, Z.; Chen, C.; Liu, M.; Wang, S.; Liu, Y. Numerische Simulationen zur Löschwirkung von Wassernebelsystemen mit verschiedenen Parameter der Längslüftung bei Kurventunnelbränden. Adv. Civ. Eng. **2021**, 5, 1–13. [\[CrossRef\]](#)
- JTG/T D70/2-02-2014; Richtlinien für die Gestaltung der Belüftung von Autobahntunneln. People's Communications Press: Peking, China, 2014.
- NFPA 502; Standard für Autobahntunnel, Brücken und andere Autobahnen mit beschränktem Zugang. National Fire Protection Association: Quincy, MA, USA, 2020.
- McGrattan, K.; McDermott, R.; Floyd, J.; Hostikka, S.; Forney, G.; Baum, H. Computergestützte Strömungsdynamik-Modellierung von Feuer. Int. J. Comput. Fluid Dyn. **2012**, 26, 349–361. [\[CrossRef\]](#)
- McGrattan, K.; Hostikka, S.; McDermott, R.; Floyd, J.; Weinschenk, C.; Overholt, K. Fire Dynamics Simulator Users Guide, 6. Auflage; Sonderveröffentlichung (NIST SP)–1019; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA, 2013. [\[CrossRef\]](#)
- Fan, C.; Chen, J.; Zhou, Y.; Liu, X. Auswirkungen des Brandortes auf die Kapazität des Rauchabzugs aus natürlichen Lüftungsschächten in städtischen Tunnel. Fire Mater. **2018**, 42, 974–984. [\[CrossRef\]](#)
- McGrattan, KB; McDermott, RJ; Weinschenk, CG; Forney, GP Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Band 1: Mathematisches Modell; NIST-Sonderveröffentlichung; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA, 2013. [\[Querverweis\]](#)
- Ji, J.; Gao, ZH; Fan, CG; Sun, JH Large Eddy Simulation des Kamineffekts auf die natürliche Rauchabzugswirkung auf städtischen Straßen Tunnelbrände. Int. J. Heat Mass Tran. **2013**, 66, 531–542. [\[CrossRef\]](#)
- Zhang, X.-L.; Lin, Y.-J.; Shi, C.; Zhang, J. Numerische Simulation der maximalen Temperatur und Rauchrückschichtungslänge in ein geneigter Tunnel mit natürlicher Belüftung. Tunn. Undergr. Space Technol. **2021**, 107, 103661. [\[CrossRef\]](#)

29. Bai, Y.; Zhang, X.-F.; Yan, X.; Zeng, Y. Studie zur Geschwindigkeitskontrolle unter Beschuss in einem zweispurigen Straßentunnel in großer Höhe. *Chin. J. Undergr. Space Eng.* **2019**, *15*, 269–276.
30. Weltstraßenverband (PIARC). *Das Handbuch für Autobahntunnel*; Weltstraßenverband: Pairs, Frankreich, 2016.
31. Zheng, B.; Fang, L.; Guo, R. Analyse des Längstemperaturverteilungsgesetzes und der Einflussfaktoren in großen Höhen Tunnel unter unidirektionaler Belüftung. *Mod. Tunn. Technol.* **2021**, *58*, 349–358. [\[CrossRef\]](#)
32. Liu, B.; Mao, J.; Xi, Y.; Hu, J. Auswirkungen der Höhe auf die Rauchbewegungsgeschwindigkeit und die Längstemperaturverteilung im Tunnel Brände. *Tunn. Undergr. Space Technol.* **2021**, *112*, 103850. [\[CrossRef\]](#)
33. JTG D70/2-2014; Spezifikationen für die Konstruktion von Autobahntunneln. Abschnitt 2 Verkehrstechnik und zugehörige Einrichtungen. China Communications Press: Peking, China, 2014.
34. Jafari, S.; Farhanieh, B.; Afshin, H. Numerische Untersuchung der kritischen Geschwindigkeit in gekrümmten Tunneln: Parametrische Studie Entwicklung eines neuen Modells. *Tunn. Undergr. Space Technol.* **2023**, *135*, 105021. [\[CrossRef\]](#)
35. Jafari, S.; Farhanieh, B.; Afshin, H. Auswirkungen von Brandparametern auf die kritische Geschwindigkeit in gekrümmten Tunneln: Eine numerische Studie und Reaktionsflächenanalyse. *Fire Technol.* **2024**, *60*, 1769–1802. [\[CrossRef\]](#)
36. Pan, R.-L.; Wang, Y.-N.; Yue, S.-Y.; Ran, C.-H.; Cheng, H.-H.; Zhong, M.-H. Umfassende experimentelle Studie zu den Eigenschaften des Längsrauchströmungsfelds in Hochgeschwindigkeitstunneln. *J. Tsinghua Univ. (Sci. Technol.)* **2024**, *1*–12. [\[CrossRef\]](#)
37. Nationale Eisenbahnverwaltung der Volksrepublik China. Entwurfsvorschriften für Evakuierungstechnik zur Katastrophenvorbeugung und Rettung von Eisenbahntunneln; Nationale Eisenbahnverwaltung der Volksrepublik China: Peking, China, 2017.
38. Leslie, J.; Millenson, J. *Prinzipien der Verhaltensanalyse*; Prentice Hall: Hoboken, NJ, USA, 1967.
39. PIARC Technischer Ausschuss Straße. Brand- und Rauchbekämpfung in Straßentunneln; PIARC Technischer Ausschuss Straße: La Défense, Frankreich, 1999.
40. National Fire Protection Association. NFPA 72 Nationaler Brandmelde- und Signalisierungscode Ausgabe 2019; National Fire Protection Association: Boston, MA, USA, 2019.
41. Caliendo, C.; Ciambelli, P.; De Guglielmo, M.L.; Meo, M.G.; Russo, P. Simulation der Evakuierung von Personen im Falle eines Brandes in einem Straßentunnel. *Procedia: Social & Behavioral Sciences* **2012**, *53*, 178–188. [\[CrossRef\]](#)
42. Wang, G.-H.; Yan, Z.-G. Simulationsstudie zur Evakuierungszeit in einem langen und steilen Fußgängerüberweg eines Autobahntunnels. *Mod. Tunn. Technol.* **2019**, *S. 2*, 132–137. [\[CrossRef\]](#)
43. GB 1589-2016; Grenzwerte für Abmessungen, Achslasten und Massen für Kraftfahrzeuge, Anhänger und Lastkombinationen. Allgemeine Verwaltung für Qualitätsüberwachung, Inspektion und Quarantäne der Volksrepublik China: Peking, China, 2016.
44. Wang, X.; Qu, J.-R.; Xia, Y.; Wang, L.; Zhen, Y. Studie zur Evakuierung und Rettung von Feuerwehrpersonal in einem einseitigen zweispurigen Autobahntunnel. *J. Undergr. Space Eng.* **2020**, *16*, 944–954.
45. Zhang, T.-R.; Li, W.; Yan, Z.-G. Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Längsrauchabsaugstrategien und Personalevakuierungen in Straßentunnel. *Mod. Tunn. Technol.* **2020**, *57*, 651–661. [\[CrossRef\]](#)
46. Jones, W.W. Stand der Technik bei der Zonenmodellierung von Bränden. Die Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (VFDB). In *Proceedings des 9. Internationalen Brandschutzseminars, Technische Methoden für den Brandschutz*, München, Deutschland, 25.–26. Mai 2001; S. 89–126.

Haftungsausschluss/Anmerkung des Herausgebers: Die in allen Veröffentlichungen enthaltenen Aussagen, Meinungen und Daten sind ausschließlich die der einzelnen Autoren und Mitwirkenden und nicht die von MDPI und/oder den Herausgebern. MDPI und/oder die Herausgeber lehnen jegliche Verantwortung für Personen- oder Sachschäden ab, die aus den im Inhalt erwähnten Ideen, Methoden, Anweisungen oder Produkten resultieren.