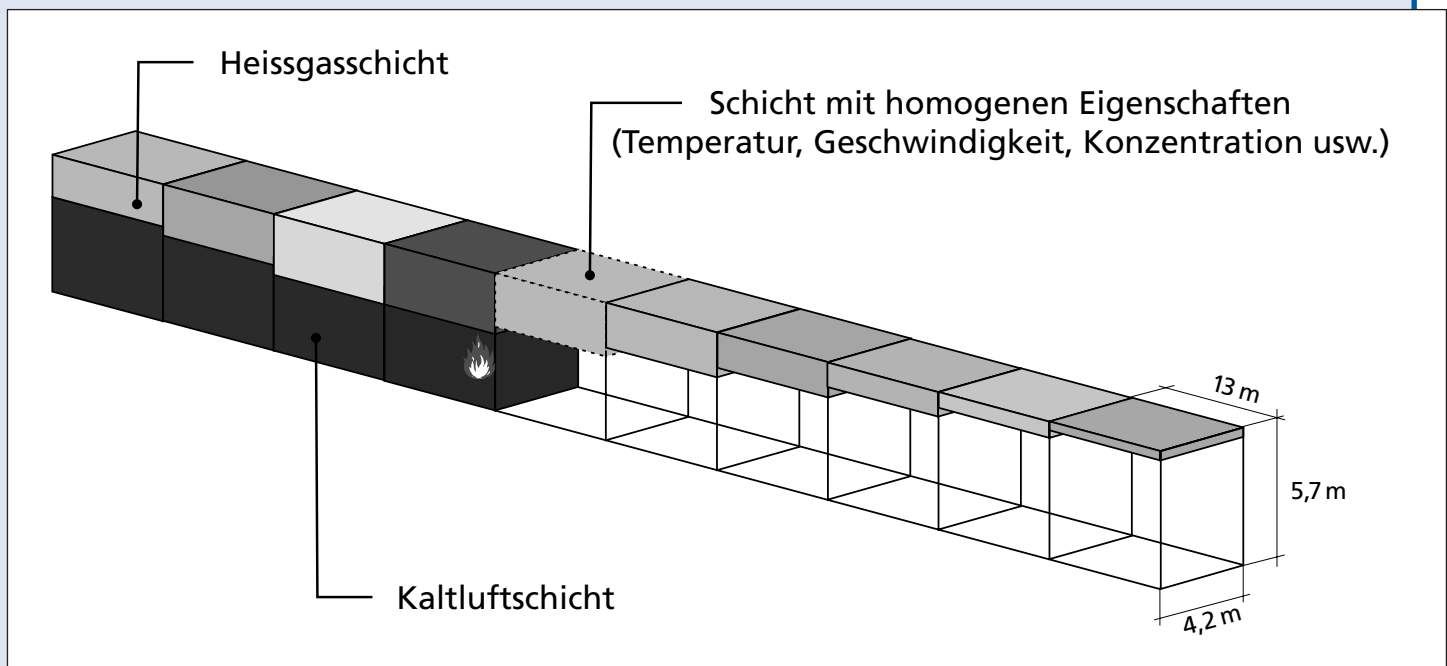


Numerische Simulation eines Tunnelbrands

Das mathematische Modell, welches auf einer zweischichtigen Zone basiert, erlaubt eine numerische Simulation der Brand- und Rauchausbreitung in einem Tunnel. Im Fall der Nothaltestelle Ferden des zukünftigen Lötschberg-Basistunnels angewendet, zeigt das Zonenmodell Tufisi, dass ein Absaugen des Rauchs an einer einzigen Stelle die Überlebensbedingungen der Reisenden im Brandfall beträchtlich verbessert.



Tunnelmodellierung anhand von Segmenten und zweischichtigen Zonenmodellen.

Von Alan Weatherill

Das vom Ingenieurbüro Bonnard & Gardel Ingenieure & Berater, Lausanne, entwickelte Zonenmodell Tufisi (TUNnel Fire Simulation) ist in der Lage, im Brandfall Umgebungsbedingungen in einer Struktur mit mehreren Segmenten vorauszusehen. Dieses zweischichtige Zonenmodell wurde auf der Basis mehrerer gross angelegter Versuche validiert, welche im Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program in West Virginia (USA) und im Ofenegg-Tunnel (Schweiz) durchgeführt wurden. Vergleiche haben

gezeigt, dass das Tufisi-Modell in der Lage ist, die Temperaturen, den Strahlungswärmefluss, die Höhe der Rauchsicht und die Konzentration der verschiedenen Verbrennungsprodukte vorauszusehen. Diese Voraussage ist auch genügend genau, um bei Tunnellüftungsprojekten eingesetzt werden zu können.

Bei praktischen Fällen wird das Tufisi-Zonenmodell dem komplizierteren, zwei- oder dreidimensionalen CFD-Modell vorgezogen. Zudem beträgt die Tufisi-Rechenzeit etwa eine Viertelstunde. Beim CFD-Modell braucht man mehrere Stunden, wenn nicht Tage. Weiter bietet das

Zonenmodell eine grössere Flexibilität bei der Bestimmung der verschiedenen Modellparameter, dies ohne die Genauigkeit der Resultate zu beeinflussen.

Eigenschaften des Zonenmodells

Das Zonenmodell teilt den Tunnel in eine gewisse Anzahl Segmente auf, welche die Form von rechteckigen Quadern aufweisen. Diese Segmente werden durch vertikale und horizontale Öffnungen untereinander und mit der Umgebung verbunden. Jedes Segment beinhaltet zwei isotrope,

Lesen Sie weiter auf Seite 2

horizontale Schichten, wobei die obere Schicht die heissen Rauchgase und die untere Schicht die kühlere Umgebungsluft

Editorial

Arbeit darf nicht krank machen oder Gesundheit wie physisches, psychisches und soziales Wohlbefinden des Menschen beeinträchtigen. Die Arbeit im dritten Jahrtausend entfernt sich, wenigstens in unseren Kulturkreisen, immer mehr vom Arbeitsleid hin zum zentralen Kreativpotenzial des Menschen. Wenn noch zu Anfang des vorigen Jahrhunderts der Traum der meisten Menschen war, Arbeit zu vermeiden, so stehen wir heute an der Schwelle der Erkenntnis, dass ohne Arbeit keine Selbstentfaltung und somit letztlich auch keine Sinnfindung möglich ist. Allerdings hat sich die Arbeit für diese Wertsteigerung auch grundlegend geändert. Heute sind 66 Prozent der Schweizer ArbeitnehmerInnen in technisch-administrativen Berufen tätig (Bildschirmarbeit). Dadurch haben sich auch die beruflich bedingten Krankheitsursachen verändert: Arbeitnehmende leiden vermehrt an Erkrankungen des Bewegungsapparats (durch Bewegungsmangel) und an Stressfolgekrankheiten (z. B. Bluthochdruck, Magenbrennen, Kopfschmerzen). Es braucht deshalb neue Ansätze, um den heutigen Belastungen wirkungsvoll entgegenzutreten zu können.

Grundsätzlich kann aber gesagt werden, dass die Arbeit in den letzten 100 Jahren in ihren meisten Bereichen besser strukturiert, organisiert und vielfach befriedigender geworden ist. Damit hat sie sich in ihrem Wesen aber nicht nur ein grosses Stück von der Forderung «Arbeit darf nicht krank machen» entfernt, sondern ist auf dem besten Weg, für sich behaupten zu können: «Arbeit ist die zentrale Grundausstattung des Menschen – und wie menschliches Leben muss sie für den Einzelnen wandelbar sein und sich an seine Lebensabschnitte optimal anpassen können.» Sicherheit wird so zu einer Grundvoraussetzung. Zu einer neuen Bewusstseinslage. Zu einem Schnittpunkt verantwortungsvollen, kollegialen und innovativen Handelns.

Andreas Merz



darstellt. Die Feuersbrunst wird durch eine Brennstoffquelle mit definierbarer Verbrennungsgeschwindigkeit angezeigt. Das Modell berechnet danach den durch Konvektion und Strahlung entstehenden Wärmeaustausch zwischen den Gasschichten und der Tunnelstruktur.

Der Programmbenutzer kann ebenfalls Lüftungsschächte zwischen den einzelnen Segmenten und/oder der Umgebung definieren. Weiter können Ventilatoren so positioniert werden, dass ein zeitabhängiger, erzwungener Luftstrom entsteht. Bei Simulationen können ebenfalls Luftströme in Tunnellängsrichtung in Betracht gezogen werden, welche durch die Bewegung der Züge induziert werden.

Bei Zonenmodellsimulationen wird das Brandprofil durch die Zone bestimmt, in welcher die potenziellen Opfer noch atmen können. Dieses Profil wird durch die folgenden sechs Parameter definiert: (1) Sichtweite, (2) Kohlenmonoxidkonzentration, (3) Kohlendioxidkonzentration, (4) Sauerstoffkonzentration, (5) Strahlungswärmefluss, (6) Lufttemperatur.

Ausgehend von diesen Daten kann ein Modell zur Abschätzung der Risiken erstellt werden. Damit kann die voraussichtliche Zeit berechnet werden, nach welcher dem Brand exponierte, vergiftete Personen sich nicht mehr ohne Fremdhilfe retten können. Die Risikoabschätzung wird mittels Positions/Zeit-Diagrammen dargestellt. Eine Zone, in welcher man sich nicht mehr ohne Fremdhilfe retten kann, wird als «Unfähigkeit zur Selbstrettung»-Zone bezeichnet.

Sichttrübung

Die Sichttrübung beeinflusst die Gesundheit der Opfer nicht direkt, kann allerdings deren Fähigkeit, sich zu retten, reduzieren. Eine Sichtbehinderung wird in einem Risikomodell als Ausdruck der «Hartnäckigkeit» dargestellt. Eine Unfähigkeit zur Selbstrettung kann allerdings schnell eintreten, wenn die Sichtweite dauerhaft maximal 2 m beträgt.

Giftigkeit der Rauchgase

Den Rauchgasen ausgesetzte Personen riskieren, sich nicht mehr selbst retten zu können und sogar zu sterben. Der Grenzwert der Unfähigkeit zur Selbstrettung bei giftigen Gasen wird anhand einer FED (Fractional Effective Dose) berechnet. Dabei basiert man sich auf Vergleiche der vorgefundenen Mengen an Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Sauerstoff mit Mengen dieser Gase, welche eine Unfähigkeit zur Selbstrettung hervorrufen. Die Menge errechnet sich bei Integration

der Gaskonzentration durch die Zeit, in welcher die Personen dem Gas ausgesetzt sind.

Belastung durch die Wärme

Unfähigkeit zur Selbstrettung oder sogar Tod treten bei Wärmebelastung auf aus Gründen wie thermischer Schock (Hyperthermie), Hautverbrennungen und Atemwegverbrennungen. Es wird zwischen Konvektions- und Strahlungswärme unterschieden. Die Konvektionswärme wird durch den Luftzug und durch die Rauchgase transportiert. Wie bei einer Aussetzung an giftigen Gasen wird das Opfer eines Brandes während einer gewissen Zeitdauer mit warmen Gasen angeströmt. Das kurzfristige Ausgesetztsein eines Opfers an hohen Temperaturen kann schlimmere Folgen haben als ein längerfristiges Verbleiben der Person in einer Zone mit niedrigerer Temperatur. Die Technik der FED kann demzufolge auch bei giftigen Gasen angewendet werden.

Die Strahlungswärme resultiert aus elektromagnetischen Wellen, welche durch das Feuer, den Rauch und die warmen Oberflächen abgestrahlt werden. Bei einem Feuer wird ein Grossteil der Strahlungswärme dem Russ als schwarzem Körper zugeschrieben. Bei einem Wärmefluss über $0,25 \text{ W/cm}^2$ ist die Überlebensdauer sehr kurz (< 1 Minute). Demzufolge wurde die Toleranzschwelle bei der Strahlungswärme bei $0,25 \text{ W/cm}^2$ festgesetzt.

Praktische Anwendung

Im zukünftigen Lötschberg-Basistunnel sollen zwei unterirdische Nothaltestellen errichtet werden, in welchen die Züge bei Brandfall anhalten können. Die Passagiere werden danach aussteigen und sich in einer geschützten Zone mit Frischluftzufuhr in Sicherheit bringen können. Das Tufisi-Zonenmodell wurde nun in der Not-



Zum Autor

Alan Weatherill ist dipl. Maschineningenieur (ETHZ), Sicherheitsberater SSI und Verantwortlicher der Abteilung «Tunnel-Lüftung» im Ingenieurbüro Bonnard & Gardel AG in Lausanne. Zurzeit ist er auf dem Gebiet der Sicherheitsstudien für die Projekte Lötschberg-Basistunnel und Wiederherstellung/Modernisierung des Mont-Blanc-Ventilationssystems tätig.

Basler & Hofmann

Basler & Hofmann ist ein unabhängiges Ingenieur-, Planungs- und Beratungsunternehmen. Unser Hauptsitz befindet sich in Zürich-Rehalp, ein zweiter Standort in Esslingen ZH. Im Lauf der Jahre kamen Tochtergesellschaften und Beteiligungen im In- und Ausland dazu. Der Erfolg von Basler & Hofmann ist Ausdruck einer langjährigen und treuen Partnerschaft mit unseren Kundinnen und Kunden.

Unsere Stärken

- Wirtschaftliche und fachgerechte Lösungen
- Kundenorientierung

Unsere Dienstleistungen im Bereich Risiko und Sicherheit

Risikoanalysen, Sicherheitskonzepte

- Chemische und biologische Gefahrstoffe
- Verkehrs- und Transportsysteme
- Infrastrukturanlagen
- Naturgefahren
- Risiken neuer Technologien in Bezug auf Mensch, Umwelt und Sachwerte

Risiko-Kommunikation

- Risikobeurteilung, Sicherheitsziele
- Störfall-/Notfallvorsorge

Wertschutz

- Brandschutz
- Werkschutz
- Einbruchs- und Diebstahlschutz

IT-Sicherheit

- Umfassende Sicherheitsberatung für KMU
- Audits zur Standortbestimmung
- Netzwerkanalysen

Sicherheit von Bauwerken

- Erdbeben
- Erschütterungen
- Stossbelastungen
- Alterungen

Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz

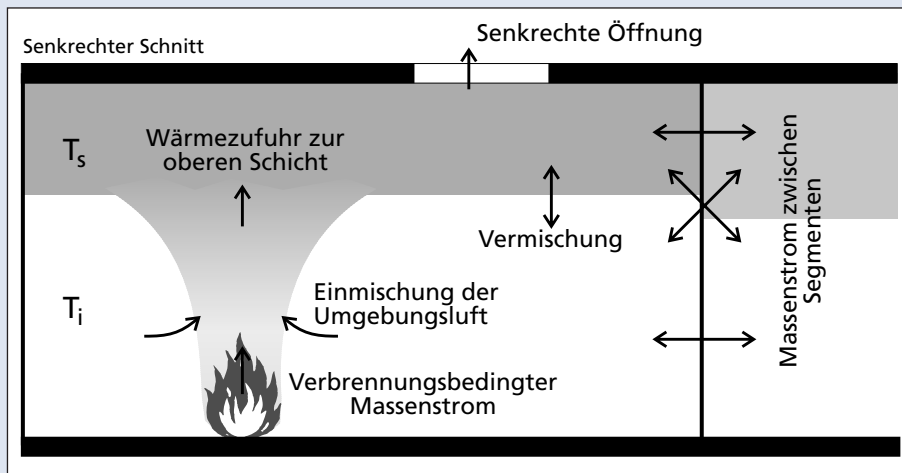
- Einführung und Umsetzung der EKAS-Richtlinie 6508
- Integration ins QMS

Basler & Hofmann

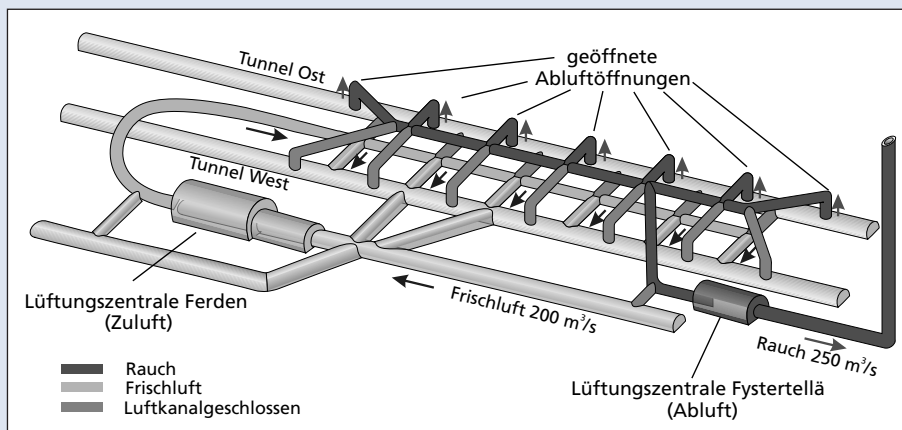
Forchstrasse 395, CH-8029 Zürich
+41 1 387 11 22

www.bhz.ch

Dr. Felix K. Gmünder
fgmuender@bhz.ch



Verbrennungsmodell mit Massenströmen und Energietransport.



Luftführung im Bereich der Nothaltestelle Ferden im Ereignisfall.

haltestelle Ferden angewendet, um die Überlebensbedingungen der Passagiere in den verschiedenen Konzeptvarianten zu definieren. Eine der wichtigsten zu betrachtenden Komponenten stellt dabei die erzwungene Lüftung zur Rauchabsaugung dar.

Lüftung der Nothaltestelle

Die in der Nothaltestelle vorgesehene Lüftungsanlage soll den Schutz der Zugpassagiere verbessern. Diese Anlage wird erstens genügend Frischluft in die geschützte Zone zwischen beiden Tunnelröhren fördern und zweitens den Rauch aus dem Tunnel herausholen, damit die aus dem Zug flüchtenden Reisenden die Schutzzone sicherer erreichen können.

Das Rechenmodell erlaubt es, eine Analyse der Überlebensbedingungen entsprechend beider nachfolgender Lüftungsszenarien durchzuführen: Fall 1: Lüftung der geschützten Zone ohne Rauchabsaugung. Fall 2: Lüftung der geschützten Zone mit örtlicher Rauchabsaugung (300 kg/s).

Brandszenario

Folgendes Brandszenario wurde angenommen: Ein nach Süden fahrender Zug fängt fünf Minuten vor Einfahrt in die Weströhre des Lötschberg-Basistunnels

Feuer. Der Brand wird erst nach Einfahrt des Zugs in den Tunnel festgestellt. Der Zug fährt bis zur Nothaltestelle und hält an. Diese Station befindet sich rund 12 Kilometer vom Tunnelsüdportal entfernt.

Es werden sich zeitlich ändernde Bedingungen angenommen: Der von der Zugbewegung induzierte Luftstrom in Tunnellängsrichtung (Geschwindigkeit: 5 m/s) nimmt nach dem Zugstillstand schnell ab. Der zeitliche Verlauf dieser Strömung wurde vorher mittels eines eindimensionalen Modells berechnet. Das Feuer wächst innerhalb von 20 Minuten von 0 auf 20 MW an. Zwischen der 20. und 80. Minute stabilisiert es sich bei 20 MW und nimmt nach 90 Minuten um 20 MW ab.

Fall 1: Toxikologische und physische Risiken ohne Rauchabsaugung

Der Vergleich der verschiedenen Zonen der Unfähigkeit zur Selbstrettung und der Evakuierungszeiten führt zu folgenden Schlüssen: Die Zone der Unfähigkeit zur Selbstrettung umfasst die ganze Zuglänge (400 Meter). Der Rauch breitet sich nach Norden und Süden im Tunnel aus. Die durch reduzierte Sicht und Giftigkeit bedingte Zone der Unfähigkeit zur Selbstrettung erstreckt sich auf die ganze Zug-

Lesen Sie weiter auf Seite 4

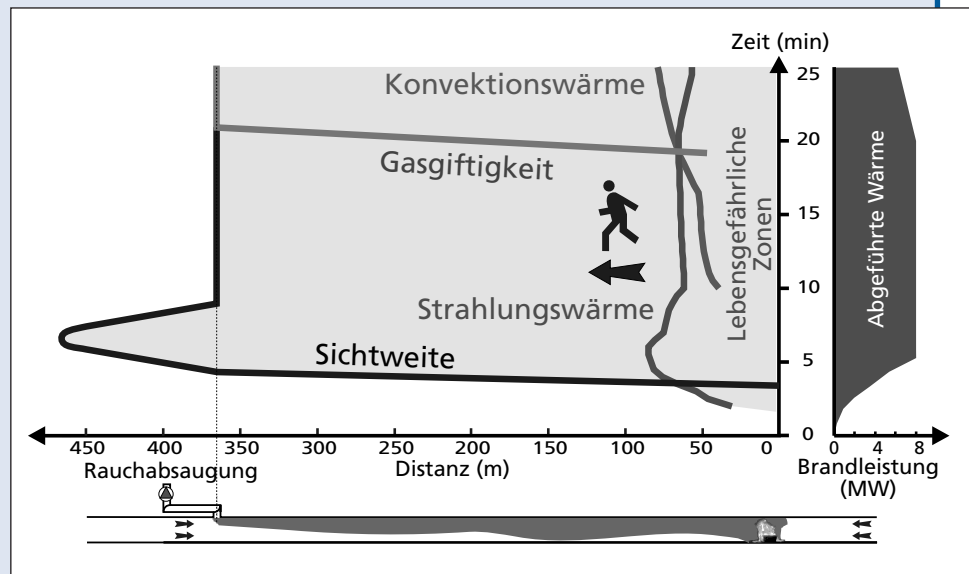
länge, da sowohl die Sichttrübung als auch die Giftigkeit von der sich nicht auflösenden Russ- und Gaskonzentration abhängen.

Hingegen sind die wärmebedingten Zonen der Unfähigkeit zur Selbstrettung weit kürzer und entsprechen ungefähr der halben Zuglänge rund um den Brandherd. Die heissen Gase kühlen sich bedingt durch den Wärmetransfer mit der Tunnelwandfläche bei zunehmendem Abstand vom Brandherd immer mehr ab.

Im ganzen Zug sind die zeitlichen Grenzen, welche durch die reduzierte Sichtweite und die wärmebedingte Unfähigkeit zur Selbstrettung gesetzt werden, kürzer als die Evakuierungszeit der Reisenden. Abwärts des Brandes (d. h. nördlich) ist die durch die reduzierte Sicht bedingte Unfähigkeit zur Selbstrettung noch kritischer. Die untere Grenze liegt bei drei Minuten, die Evakuierungszeit aber bei vier Minuten. Die sichtbedingte Zone der Unfähigkeit zur Selbstrettung ist asymmetrisch, bedingt durch die Luftströmung in Tunnelrichtung, welche schnell einige Minuten nach dem Anhalten des Zugs abnimmt. Aufwärts des Brandes ist die durch die Strahlungswärme bedingte Unfähigkeit zur Selbstrettung kritischer. Die Grenze, welche nur eine Minute am Brandherd beträgt, liegt also unter der Evakuierungszeit. Die durch die Giftigkeit bedingte Unfähigkeit zur Selbstrettung beträgt 20 Minuten am Brandherd. Sie übertrifft also die zur Evakuierung nötige Zeit (vier Minuten).

Fall 2: Toxikologische und physische Risiken bei örtlicher Rauchabsaugung

Der Vergleich der verschiedenen Zonen der Unfähigkeit zur Selbstrettung und der Evakuierungszeiten führt zu folgenden Schlüssen: Die Zone der Unfähigkeit zur Selbstrettung erstreckt sich auf etwa 30 Prozent der Zuglänge (120 Meter). Die örtliche Rauchabsaugung generiert am Brandherd einen Luftzug abwärts, welcher die Ausbreitung bergwärts dauernd bei beliebigem Szenario unterbindet. Es entstehen eine reduzierte Sichtweite, giftigkeits- und wärmebedingte Zonen der Unfähigkeit zur Selbstrettung, welche sich zwischen dem Brandherd und der Rauchabsaugestelle erstreckt. Die strahlungswärmebedingte Zone der Unfähigkeit zur Selbstrettung erstreckt sich ebenfalls ausgehend vom Brandherd leicht aufwärts. Der Grund liegt darin, dass sich die für den Wärmetransfer durch Strahlung verantwortlichen elektromagnetischen Wellen trotz der Absaugventilatoren aufwärts (südlich) ausbreiten können.



Beispiel: Entwicklung der lebensgefährlichen Zonen für eine 8-MW-Brandleistung.

Zwischen dem Brandherd und der Rauchabsaugestelle ist der sichtweiten- und strahlungswärmebedingte Grenzwert der Unfähigkeit zur Selbstrettung kürzer als die Evakuierungszeit. Sie beträgt am Brandherd eine Minute. Was die Sichttrübung anbelangt, ist der Grenzwert der Unfähigkeit zur Selbstrettung kürzer als die Evakuierungszeit (vier Minuten) zwischen dem Brandherd und der Rauchabsaugestelle. Die Strahlungswärme besitzt einen tieferen Grenzwert der Unfähigkeit zur Selbstrettung als die Evakuierungszeit ungefähr 80 Meter nördlich des Brandherdes. Hingegen übertrifft der Grenzwert der Unfähigkeit zur Selbstrettung der Konvektionswärme (zehn Minuten) und der Giftigkeit sogar am Brandherd die Evakuierungszeit. Demzufolge stellt die sichtweitenbedingte Unfähigkeit zur Selbstrettung die kritischste Gefahr dar, gefolgt durch die Strahlungswärme, die Konvektionswärme und die Giftigkeit.

Fazit

Die vorliegende Studie erlaubt es, folgende Schlussfolgerungen zu ziehen: Ein Rauchabsaugungssystem verbessert die Überlebensbedingungen entscheidend, wobei die Zone der Unfähigkeit zur Selbstrettung von 400 auf 120 Meter reduziert wird.

Die Richtlinien für annehmbare Zonen der Unfähigkeit zur Selbstrettung müssen durch Experten aufgestellt werden. Mit oder ohne Rauchabsaugung ist die sichtweiten- und strahlungswärmebedingte Unfähigkeit zur Selbstrettung kürzer als die Evakuierungszeit in gewissen Zugabschnitten.

Die in dieser Studie eingesetzte Methodologie kann zur Konzeptoptimierung

der zukünftigen Rauchabsaugungssysteme eingesetzt werden. Werden annehmbare Zonen der Unfähigkeit zur Selbstrettung festgelegt, so können verschiedene Rauchabsaugungssysteme modelliert werden, mit dem Ziel, die Auswirkungen der Anzahl Rauchabsaugestellen und die Förderleistung der Ventilatoren unter verschiedenen Grenzbedingungen zu analysieren. Die Resultate dieser Studie werden es den Ingenieuren erlauben, ein optimales Rauchabsaugungssystem unter Berücksichtigung der untereinander abhängigen Faktoren wie Zuverlässigkeit, Kosten und Minimierung der Zonen der Überlebensunfähigkeit zu definieren.

I M P R E S S U M

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung unabhängiger Sicherheitsingenieure und -berater
Güstrasse 46, CH-8700 Küsnacht
Telefon 01 910 73 06, Fax 01 910 73 96
E-Mail ssi@secumedia.com

Erscheinungsweise: Drei Ausgaben pro Jahr

Mitarbeiter dieser Ausgabe: Alan Weatherill
BG Bonnard & Gardel
Ingénieurs-conseils SA,
CH-1007 Lausanne

Andreas Merz
BDS Safety Management AG
Sicherheits- und Umweltberatung
CH-5400 Baden Dättwil

Layout, Satz und Lithos: WPS-RCM AG,
CH-8954 Geroldswil

Druck: Buchdruckerei AG, BUAG
CH-5405 Baden Dättwil