

ENTRAUCHUNGSSIMULATION

BAUVORHABEN: **U-Bahnlinie 7 - U-Bahnhof Rohrdamm**
13629 Berlin

BETREIBER: **Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)**
Anstalt des öffentlichen Rechts
Holzmarktstraße 15-17
10179 Berlin

AUFSTELLER: **KREBS+KIEFER**
Ingenieure GmbH
Rudi-Dutschke-Str. 9 | 10969 Berlin
T +49 (0)30 217342-0 | F +49 (0)30 217342-11

Aktenzeichen: 2017 6064

Berlin, 31.08.2017

Unterschrift:



ppa. Dr. techn. Sven Huisman

Veranlassung und Aufgabenstellung

Am 21.07.2017 wurden wir von den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) mit der Durchführung einer Entrauchungssimulation für den U-Bahnhof Rohrdamm der Linie U7 beauftragt.

Im Zuge der Überprüfung/Anpassung der Brandschutzkonzepte von U-Bahnhöfen der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) muss sichergestellt sein, dass die Bahnhöfe im Brandfall entfluchtet werden können. Dafür wurde seitens der BVG berechnet, in welchem Zeitraum der U-Bahnhof Rohrdamm vollständig entfluchtet werden kann. Für diesen Zeitraum muss im Bahnhof eine entsprechend hohe raucharme Schicht gegeben sein. Dies soll im Rahmen der vorliegenden Entrauchungssimulation für den U-Bahnhof Rohrdamm untersucht werden.

Ergebnisse

Die Ergebnisse sind einschließlich der Bewertung dem beiliegenden Gutachten von IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung zu entnehmen.

Zusammenfassung

Die Zusammenfassung ist dem beiliegenden Gutachten von IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung zu entnehmen.

Dieser Bericht zur Entrauchung ist nur in seiner Vollständigkeit gültig.

Der Bericht zur Entrauchung umfasst 35 Seiten.

Berlin, 31.08.2017



Dr. techn. Sven Huismann
Sachverständiger für vorbeugenden Brandschutz

Anlagen

Simulationsbericht, Stand 29.08.2017

erstellt von IFAB Ingenieure für angewandte Brandforschung



Ingenieure für angewandte
Brandschutzforschung

Simulationsbericht

Entrauchungssimulation für den
U-Bahnhof Rohrdamm

Dokumentennummer:	2017/00079-SB
Datum:	29.08.2017
Revision:	00
QMS-Code:	MF 7-1-12 Rev. 0

Projekt: Entrauchung U-Bahnhof Rohrdamm
Projektnummer: 2017/00079
Schlüsselwörter: Entrauchungssimulation, CFD, FDS, BVG, Rohrdamm
Kunde: Krebs+Kiefer
Ingenieure GmbH
Herr Dr. Huismann
Rudi-Dutschke-Straße 9
10969 Berlin
Seitenzahl: 35 (Fünfunddreißig)

Erstellt von:
Ralf Lehmann
CFD- und Versuchsingenieur
Berlin, 17.08.2017
i.A.

Geprüft von:
Rajko Rothe
Geschäftsführer
Berlin, 21.08.2017

Freigegeben von:
Rajko Rothe
Geschäftsführer
Berlin, 31.08.2017

Unterschrift



Unterschrift



Unterschrift



Kontakt: Ralf Lehmann
IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung GmbH
Pankstraße 8, Haus A, EG
13127 Berlin

Email: Lehmann@ifab-fire.com
Tel: +49-(0)30-643185 903
Fax: +49-(0)30-643185 979

Urheberrecht

Diese Unterlagen sind urheberrechtlich geschützt. Sämtliche Rechte am Inhalt, insbesondere Urheberrechte, sind vorbehalten. Verletzungen unserer Rechte werden verfolgt. Diese Unterlagen sind vertraulich zu behandeln und dürfen ohne unsere Zustimmung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden und sind uns auf Verlangen zurückzugeben.

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG / ZIELSTELLUNG	7
2	VERWENDETE UNTERLAGEN	9
3	SCHUTZZIELE	9
3.1	ALLGEMEINE BEMERKUNGEN ZU CFD	11
3.2	FDS 6.3.2 UND SMOKEVIEW	12
3.2.1	<i>Allgemeines</i>	12
3.2.2	<i>Numerische Eigenschaften</i>	12
3.3	PYTHON 3.4 UND SPYDER 2.3	13
3.4	ABLEITUNG VON SCHUTZZIELRELEVANTEN AUSGABEGRÖßEN	14
4	MODELLERSTELLUNG	14
4.1	BRANDSZENARIEN	14
4.2	GEOMETRIE	16
4.3	VENTILATIONSBEDINGUNGEN	19
4.4	SONSTIGE RANDBEDINGUNGEN	20
5	ERGEBNISSE	20
5.1	ALLGEMEINES	20
5.2	PLAUSIBILITÄTSUNTERSUCHUNGEN	21
5.3	SZENARIO 1	21
5.4	SZENARIO 2	24
5.5	SZENARIO 3	27
6	BEWERTUNG	31
	LITERATUR	32
7	ANHANG	34
7.1	BERECHNUNG DER ENTFLUCHTUNGSDAUER NACH NFPA	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bahnsteigebene U-Bahnhof Rohrdamm	7
Abbildung 2: Schalterhalle 1 des U-Bahnhofs Rohrdamm	8
Abbildung 3: Schalterhalle 2 des U-Bahnhofs Rohrdamm	8
Abbildung 4: Wärmefreisetzungsrate eines Wagens des Großprofils F74	15
Abbildung 5: Definition von 3 Brandszenarien bezogen auf verschiedene Brandorte	16
Abbildung 6: Gesamtes 3D-Modell	18
Abbildung 7: Kontur des 3D-Modells	18
Abbildung 8: Ansicht der Bahnsteigebene mit Treppe zur Schalterhalle	19
Abbildung 9: Geschwindigkeitsvektoren auf dem Bahnsteig 5 min nach Simulationsbeginn in 1 m Höhe, Ansicht von oben	21
Abbildung 10: Geschwindigkeitsvektoren auf der Treppe zwischen Bahnsteig und Schalterhalle 1, 7 min nach Simulationsbeginn, Ansicht von der Seite	21
Abbildung 11: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 5,7 min (Szenario 1)	22
Abbildung 12: Erkennungsweite in den Schalterhallen nach 5,7 min (Szenario 1)	22
Abbildung 13: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 7,1 min (Szenario 1)	23
Abbildung 14: Erkennungsweite in den Schalterhallen nach 7,1 min (Szenario 1)	23
Abbildung 15: Erkennungsweite auf den Treppen zwischen Bahnsteigebene und Schalterhallen (Szenario 1)	24
Abbildung 16: Erkennungsweite auf den Treppen ins Freie (Szenario 1)	24
Abbildung 17: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 5,7 min (Szenario 2)	25
Abbildung 18: Erkennungsweite in den Schalterhallen nach 5,7 min (Szenario 2)	25
Abbildung 19: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 7,1 min (Szenario 2)	26
Abbildung 20: Erkennungsweite in den Schalterhallen nach 7,1 min (Szenario 2)	26
Abbildung 21: Erkennungsweite auf den Treppen zwischen Bahnsteigebene und Schalterhallen (Szenario 2)	27
Abbildung 22: Erkennungsweite auf den Treppen ins Freie (Szenario 2)	27

Abbildung 23: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 5,7 min (Szenario 3)	28
Abbildung 24: Erkennungsweite in den Schalterhallen nach 5,7 min (Szenario 3)	28
Abbildung 25: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 7,5 min (Szenario 3)	29
Abbildung 26: Erkennungsweite in der Schalterhalle 1 nach 7,5 min (Szenario 3)	29
Abbildung 27: Erkennungsweite auf den Treppen zwischen Bahnsteigebene und Schalterhalle (Szenario 3)	30
Abbildung 28: Erkennungsweite auf den Treppen ins Freie (Szenario 3)	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungen	6
Tabelle 2: Verbrennungsprodukte eines Wagens F74	15
Tabelle 3: Eigenschaften des Rechengitters	17
Tabelle 4: Stoffeigenschaften der modellierten Materialien	20
Tabelle 5: Zeitpunkte, ab denen die jeweiligen Fluchtwege nicht mehr benutzbar sind	31

Abkürzungen

Tabelle 1: Abkürzungen

Abkürzungen	Beschreibung
BVG	Berliner Verkehrsbetriebe
CFD	Computational Fluid Dynamics (Numerische Strömungsmechanik)
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy Zahl
DNS	Direkte Numerische Simulation
FDS	Fire Dynamics Simulator
FDM	Finite Differenzen Methode
FVM	Finite Volumen Methode
LES	Large Eddy Simulation (Grobstruktursimulation)
RANS	Reynolds Averaged (Reynolds-gemittelte) Navier-Stokes Gleichungen

1 EINFÜHRUNG / ZIELSTELLUNG

Im Zuge der Überprüfung/Anpassung der Brandschutzkonzepte von U-Bahnhöfen der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) muss sichergestellt sein, dass die Bahnhöfe im Brandfall entfluchtet werden können. Dafür wurde seitens der BVG berechnet, in welchem Zeitraum der entsprechende Bahnhof vollständig entfluchtet werden kann. Für diesen Zeitraum muss im Bahnhof eine entsprechend hohe raucharme Schicht gegeben sein. Dies soll im Rahmen der vorliegenden CFD-Simulation als anerkanntes ingenieurtechnisches Werkzeug für den U-Bahnhof Rohrdamm der Berliner Verkehrsbetriebe untersucht werden.

Der U-Bahnhof Rohrdamm befindet sich zwischen den Bahnhöfen Paulsternstraße im Westen und Siemensdamm im Osten an der Linie U7. Der Bahnhof umfasst einen Bahnsteig, von dem jeweils eine Treppe in eine Schalterhalle führt. Von beiden Schalterhallen führen jeweils 2 Treppen ins Freie, siehe dazu auch Abbildung 1, Abbildung 2 und Abbildung 3.

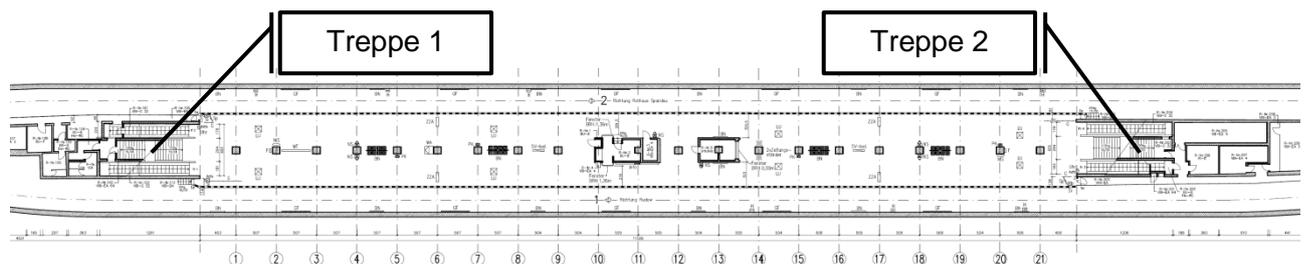


Abbildung 1: Bahnsteigebene U-Bahnhof Rohrdamm

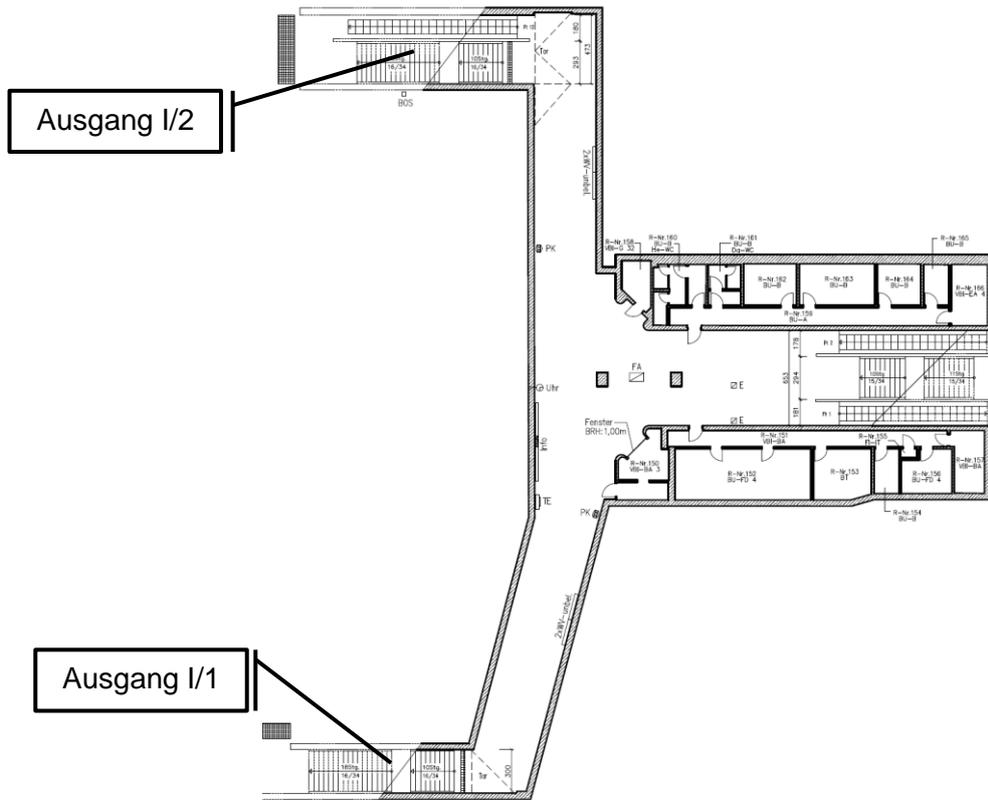


Abbildung 2: Schalterhalle 1 des U-Bahnhofs Rohrdamm

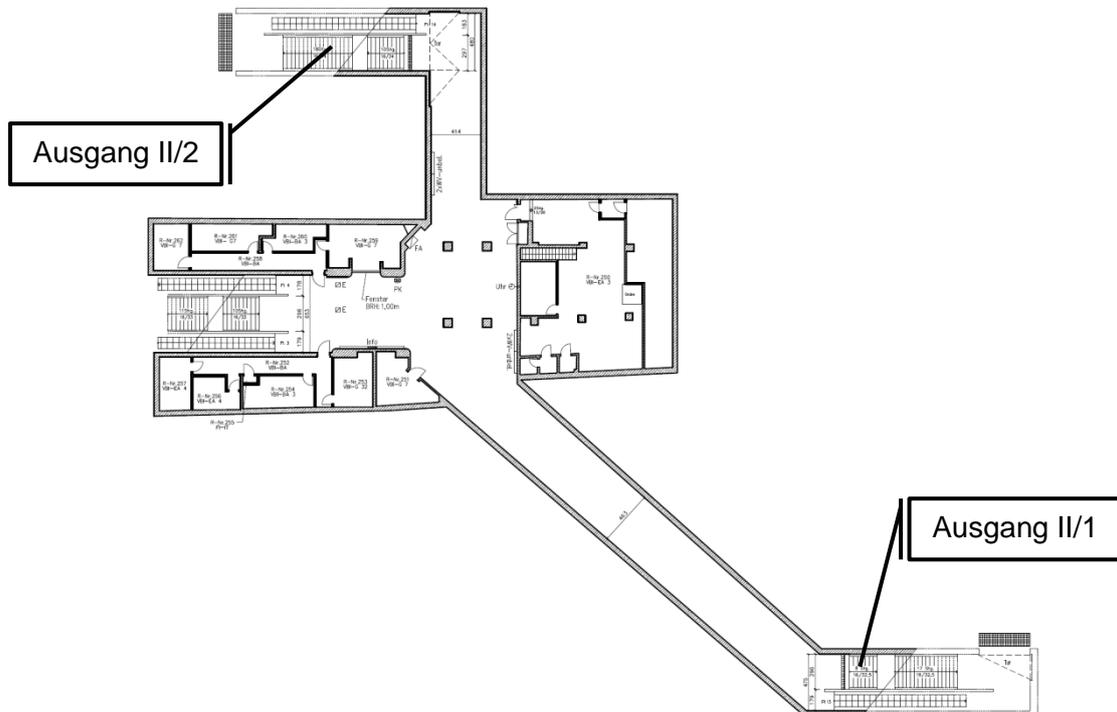


Abbildung 3: Schalterhalle 2 des U-Bahnhofs Rohrdamm

2 VERWENDETE UNTERLAGEN

Folgende Unterlagen wurden seitens der BVG zur Verfügung gestellt:

- Brandschutzkonzept U-Bahn Anlage 1 – Risikobetrachtung der U-Bahnhöfe
- Brandschutzkonzept U-Bahn Anlage 2 – Risikobetrachtung der Tunnel
- Anlage U-Bahnhof Rohrdamm – Entfluchtungsrechnung nach NFPA
- MH_H444_Rm_UE200 – U-Bahnhof Rohrdamm (Grundriss Bahnsteig, Trompeten und Schalterhallen)

3 SCHUTZZIELE

Nach [1] werden verschiedene Kriterien in Betracht gezogen, die für den Nachweis der Personensicherheit herangezogen werden können. Dies sind:

1. die Höhe der raucharmen Schicht,
2. die Qualität der raucharmen Schicht,
3. thermische Einwirkungen aus Wärmestrahlung und Konvektion.

Gemäß [2] ist eine raucharme Schicht in 2 m Höhe für den gesamten Zeitraum der Entfluchtung in den entsprechenden Bereichen des Bahnhofes nachzuweisen. Dafür stehen die Größen der Erkennungsweite S und der optischen Dichte D_L zur Verfügung. Beide Größen beschreiben den gleichen Sachverhalt, lassen sich in Bezug auf Personensicherheit aber unterschiedlich anwenden. Während mit der Erkennungsweite in der Regel die Sicherheit in Bezug auf die Sichtbarkeit von Fluchtwegzeichen beschrieben wird, wird die optische Dichte meist für die Beschreibung der Rauchdichte als physikalische Größe verwendet.

Grundsätzlich sind auch die Auswirkungen der bei der Verbrennung entstehenden Atemgifte für den Nachweis der Personensicherheit relevant. Messungen verschiedener Forschungsgruppen haben ergeben, dass die Evaluation der raucharmen Schicht auf Basis der optischen Dichte im Vergleich zur toxischen Wirkung des Rauches ein konservativerer Ansatz ist. Es ist also davon auszugehen, dass die Grenzwerte für die üblichen Atemgifte CO , CO_2 und HCN eingehalten werden, wenn auch der Grenzwert für die optische Dichte nicht überschritten wird. Das gleiche gilt auch für die Rauchgastemperatur [1] [3] [4] [5] [6]. Die raucharme Schicht wird daher ausschließlich anhand der optischen Dichte (bzw. der Erkennungsweite) bewertet.

Die Erkennungsweite S ist als die Strecke definiert, bei der der Objektkontrast eines Sicherheitszeichens C und der Schwellenkontrast \bar{C} des menschlichen Auges gleich groß ist [7].

Der Objektkontrast C ist definiert als

$$C = C_0 K e^{-kl}$$

wobei C_0 den Anfangskontrast, K den Leuchtdichtekontrast, k den Schwächungskoeffizienten des Rauches und l den Beobachterabstand beschreibt. Der Schwächungskoeffizient k ist abhängig von den Raucheigenschaften:

$$k = k_s \rho_s$$

wobei k_s der spezifische Extinktionskoeffizient des Rauches und ρ_s die Rauchdichte beschreibt. Der spezifische Extinktionskoeffizient wird konservativ mit $8,7\text{m}^2/\text{g}$ angegeben [8]. Der Schwächungskoeffizient ist proportional zur optischen Dichte, die als

$$D_L = \frac{k}{\ln 10}$$

definiert ist. Der Schwellenkontrast \bar{C} wird mittels empirischer Gleichungen bestimmt, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll [9]. Nach Gleichsetzung von C und \bar{C} und Umformung ergibt sich für die Erkennungsweite S

$$S = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{C_0 K}{\bar{C}} \right)$$

wobei die Logarithmusfunktion ausschließlich von den Eigenschaften des Sicherheitszeichens und dessen Umgebungsbedingungen abhängig ist. Vereinfachend definiert man dafür den Erkennungsfaktor V , der für verschiedene Sicherheitszeichen tabelliert ist [7]. Damit ergibt sich

$$S = \frac{V}{k}$$

In der Praxis und für diese Simulation werden für hinterleuchtete Sicherheitszeichen Erkennungsfaktoren von 3 angesetzt [10] [11].

Die Entfluchtungsdauer für den gesamten Bahnhof Rohrdamm beträgt nach den vorgegebenen Berechnungen 7,1 min. Dies stellt damit auch die maximale Aufenthaltsdauer im brandbeeinflussten Bereich dar. Da der U-Bahnhof als übersichtlich bewertet werden kann, ergeben sich gemäß [1] folgende Bewertungskriterien, die während des Zeitraumes der Entfluchtung nachzuweisen sind:

1. Erkennungsweite $S \geq 10\text{ m}$
2. Optische Dichte $D_L \leq 0.15\text{ m}^{-1}$

Aus obigen Gleichungen ergibt sich eine Beziehung zwischen der optischen Dichte D_L und der Erkennungsweite S , die bei gegebenem Erkennungsfaktor direkt über die Gleichung

$$S = \frac{V}{D_L \ln 10}$$

ineinander umwandelbar ist. Setzt man eine Erkennungsweite von 10 m in die obige Gleichung ein und stellt nach D_L um, so ergibt sich eine optische Dichte von $0,13 \text{ m}^{-1}$. Der Grenzwert für die Erkennungsweite ist also restriktiver als für die optische Dichte. Der Nachweis der rauchfreien Schicht erfolgt daher ausschließlich über die Erkennungsweite, wobei die optische Dichte informellen Wert hat.

Für die Entfluchtung des Bahnsteiges ergibt sich die Räumungszeit aus der Zeit zum Erreichen der Treppen auf Bahnsteigebene (T1), der Wartezeit an den Treppen (W1) und der Zeit zur Überwindung des vertikalen Höhenunterschieds zu den Schalterhallen (T2) (siehe Anhang). Der Bahnsteig muss also für einen Zeitraum von 5,7 min nach Beginn der Simulation die Bewertungskriterien erfüllen. Die Entfluchtungszeit des gesamten Bahnhofes einschließlich der Schalterhallen beträgt 7,1 min. Die Bewertungskriterien müssen hier für diesen Zeitraum erfüllt sein.

3.1 Allgemeine Bemerkungen zu CFD

Die grundlegende Strategie numerischer Strömungssimulation (CFD) besteht darin, physikalische Eigenschaften eines kontinuierlichen Problems in Raum und Zeit mithilfe eines Gitters zu diskretisieren. Im kontinuierlichen Raum ist jede Eigenschaft der Strömung, beispielsweise die Temperatur, in jedem Punkt definiert. Im diskreten Raum sind die Variablen hingegen nur in den Gitterpunkten definiert und werden nur in diesen berechnet. Um die Werte anderer Punkte bestimmen zu können, ist eine Interpolation notwendig.

Die bestimmenden partiellen Differentialgleichungen (Impuls-, Masse-, Energiebilanz u. a.) sind im kontinuierlichen Raum definiert und müssen entsprechend ebenso diskretisiert werden, um sie numerisch lösen zu können. Im Bereich der CFD werden hauptsächlich zwei Verfahren angewendet: Finite Differenzen Methode (FDM) und Finite Volumen Methode (FVM). Bei finiten Differenzen werden die Ableitungen der Differentialgleichungen durch Differenzgleichungen approximiert. Finite Volumen approximieren die integrale Form der Differenzialgleichungen mittels Bilanzierung über Kontrollvolumen um Gitterpunkte. In der Regel werden die partiellen Differentialgleichungen vereinfacht, um die bestimmenden Dynamiken effizient lösen zu können.

3.2 FDS 6.3.2 und Smokeview

3.2.1 Allgemeines

Das in der vorliegenden Simulation verwendete Programm ist der Fire Dynamics Simulator (FDS), Version 6.3.2. Das Programm ist das am häufigsten genutzte Werkzeug für Brandsimulationen. Dabei lassen sich mit FDS schutzzielorientierte Fragestellungen im baulichen und anlagentechnischen Brandschutz bearbeiten, wie [12]:

- Rauchableitung / Entrauchung
- thermische Beaufschlagung von Bauteilen
- Reaktion von Sensoren zur Branderkennung und Steuerung des anlagen-technischen Brandschutzes
- Reaktion und Wirkung von Sprinkler-Anlagen
- Entzündung und Brandausbreitung (nur bedingt)

Für eine Vielzahl an physikalischen Phänomenen (Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Konvektion, Verdampfung, Rauchausbreitung u. a.) und technische Vorgaben (Ventilation, Brandmelde- und -bekämpfungsanlagen), die von FDS für die Simulation von Bränden und deren Auswirkungen abgebildet werden müssen, existiert eine große Sammlung an Validierungsarbeiten [13], die für die entsprechenden Anwendungen eine gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation nachweisen.

3.2.2 Numerische Eigenschaften

FDS löst eine Formulierung der Navier-Stokes Gleichungen, die für brandinduzierte Strömungen mit vergleichsweise kleinen Strömungsgeschwindigkeiten mit dem Fokus auf Rauch- und Wärmetransport von Bränden geeignet ist. Die partiellen Differentialgleichungen der Strömungsgrößen werden mittels finiter Differenzen (FDM) approximiert und auf einem dreidimensionalen, rechtwinkligen Rechengitter berechnet.

Turbulente Eigenschaften von Strömungen werden von FDS mit Grobstruktursimulation (Large Eddy Simulation LES) behandelt. Direkte numerische Simulation (DNS) ist optional verfügbar, erweist sich für brandschutzrelevante Raumabmessungen wegen immensem Rechenaufwand aber als unzumutbar. Im Gegensatz zu vielen anderen CFD-Programmen werden Zeitschritte in FDS durch ein explizites Eulerverfahren berechnet. Als Konsequenz ergeben sich verschiedene Kriterien, die für die Stabilität der Simulation erfüllt werden müssen (Courant-Friedrichs-Lewy-Bedingung (CFL), Von-Neumann-Bedingung, Divergenz-Zeitschritt-Beschränkung).

Das restriktivste dieser Kriterien ist in der Regel die CFL-Bedingung, die als

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta h}$$

definiert ist, wobei u die lokale Geschwindigkeit, Δt der Zeitschritt und Δh die charakteristische Zellgröße ist. Die CFL-Zahl wird für jede Zelle berechnet und muss als notwendige Bedingung für numerische Stabilität kleiner als 1 sein. Die CFL-Zahl wird global evaluiert, d. h. der Zeitschritt ist für alle Zellen eines Netzes gleich groß. In einem gleichmäßigen Netz bestimmt damit in der Regel die Zelle mit der höchsten Strömungsgeschwindigkeit den Zeitschritt.

Für das explizite Euler-Verfahren ist Stabilität sowohl notwendige als auch hinreichende Bedingung für Konvergenz. Die CFL-Zahl wird von FDS während der Simulation berechnet, überwacht und angepasst. Die Zeitschritte die mit diesem Verfahren erreicht werden können sind vergleichsweise klein. Ein Iterationsalgorithmus zur Minimierung von Residuen wie in vielen finite-Volumen (FVM) Programmen üblich, die eine Reynolds-gemittelte Version der Navier-Stokes Gleichungen (RANS) nutzen, ist allerdings nicht notwendig. Von einem numerischen Standpunkt können die Ergebnisse von FDS daher immer als konvergent betrachtet werden.

Thermische Strahlung wird in FDS mittels finiter Volumen auf demselben Netz wie der Strömungslöser mit ca. 100 diskreten Winkeln für die Strahlungsrichtung berechnet. Die Absorptionskoeffizienten des Rauch-Gas Gemisches werden mit dem RadCal-Schmalbandmodell berechnet. Die Simulation flüssiger Tropfen ermöglicht die Berechnung von Absorption und Streuung von Strahlung auf Basis der Mie-Theorie.

Wärmeleitung in festen Stoffen wird mit der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung senkrecht zur Oberfläche berechnet.

Partikel werden nach dem Modell von Lagrange berechnet um die Simulation von Rauchgasausbreitung und Wassertropfen zu ermöglichen.

Weitere Details zu FDS und dessen physikalische und mathematische Grundlagen finden sich im „FDS User Guide“ und „FDS Technical Reference Guide“ [13] [14].

3.3 Python 3.4 und Spyder 2.3

Python ist eine universelle höhere Open-Source-Programmiersprache, die Programmierparadigmen wie Objektorientierung, sowie imperative und funktionale Programmierung unterstützt. Python bietet eine große Standardbibliothek und ist dadurch für viele verschiedene Anwendungen wie Datenverarbeitung, höhere mathematische Berechnungen und

Erstellung von Diagrammen geeignet. Spyder ist eine integrierte Entwicklungsumgebung, die Python für wissenschaftliche Anwendungen nutzt. Daher enthält Spyder zusätzliche Bibliotheken und Werkzeuge, die die Anwendbarkeit von Python auf spezielle, insbesondere mathematische, Einsatzzwecke erweitert.

Das Softwarepaket wurde für die Vor- und Nachbearbeitung der Simulationen benutzt, d.h. Erstellung der FDS-Eingabedatei, insbesondere der Geometrie, und Aufbereitung der von FDS erzeugten Daten.

3.4 Ableitung von schutzzielrelevanten Ausgabegrößen

Um die Verrauchung des Bahnsteiges und der Schalterhallen in Bezug auf die Erkennungsweite und die optische Dichte beurteilen zu können, werden diese jeweils in horizontalen Ebenen 2 m über dem jeweiligen Fußboden der Größen `VISIBILITY` und `OPTICAL DENSITY` mit FDS aufgezeichnet.

Die Verrauchung der Treppen von der Bahnsteigebene zu den Schalterhallen und von den Schalterhallen ins Freie lässt sich mit horizontalen Ebenen nicht ausreichend erfassen. Daher wird zusätzlich an allen Treppen eine punktförmige Messstelle für die Erkennungsweite und die optische Dichte definiert. Diese wird jeweils auf der Mitte der Treppe, mittig zwischen den Wänden und in 2 m über der Treppe platziert.

Um die Simulationen auf physikalische Plausibilität zu überprüfen und eventuelle Fehler in der Eingabedatei zu detektieren, werden weiterhin Messebenen für die Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit und Druck definiert.

4 MODELLERSTELLUNG

4.1 Brandszenarien

Auf Grundlage der Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde die Wärmefreisetzungsrate eines Wagens des Großprofils F74 als mögliches Brandszenario definiert. Gemäß [15] ist die Wärmefreisetzungsrate eines Wagens ohne Fahrerraum größer als mit Fahrerraum. Die simulierte Wärmefreisetzungsrate ist in Abbildung 4 gezeigt.

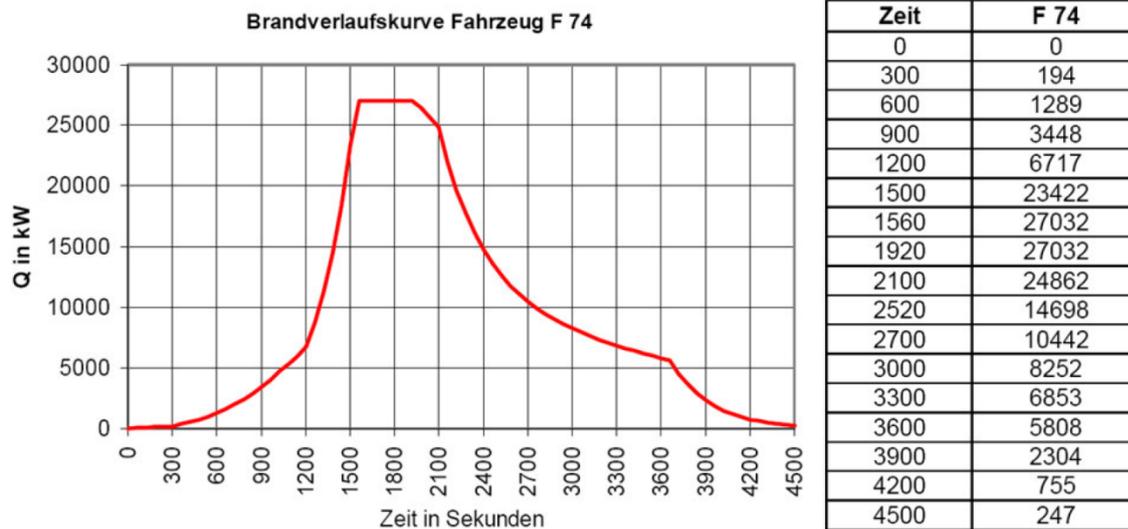


Abbildung 4: Wärmefreisetzungsrates eines Wagens des Großprofils F74

Eine Vor-/Schwelbrandphase wird in der Simulation nicht angesetzt. Konservativ wird angenommen, dass der Brand direkt nach Verlassen eines der angrenzenden Bahnhöfe (Paulsterstraße / Siemensdamm) ausbricht. Dieser wird während der Fahrt sicher detektiert und entsprechende Maßnahmen veranlasst. Die maximale Fahrzeit von einer benachbarten Station von 100s wird berücksichtigt, indem die Wärmefreisetzungsrates für die Simulation auf der Zeitachse in Abbildung 4 um 100s nach links verschoben wird.

Nach [15] beträgt die Rauchfreisetzungsrates während der ersten 720s des Brandes 0,046g/g (siehe auch Tabelle 2). Dieser Wert beschreibt den Massenanteil am Brennstoff, der in Form von Rauchpartikeln (unverbrannt) freigesetzt wird. Um die Unsicherheiten des CFD-Modells zu berücksichtigen, wurde dieser Wert für die Simulation mit 0,05g/g angesetzt.

Tabelle 2: Verbrennungsprodukte eines Wagens F74

Gasanteil	Dimension	bis 720 sec.	> 720 sec.
y-CO ₂	g / g	1,034	1,5
y-CO	g / g	0,023	0,045
y-s	g / g	0,046	0,154
Dm	m ² / g	0,113	0,32



Abbildung 5: Definition von 3 Brandszenarien bezogen auf verschiedene Brandorte

Der Bahnsteig des Bahnhofes besteht aus einer Plattform und zwei Bahngleisen. Auf der Plattform befinden sich zwei Treppen, die in die Schalterhallen führen. Davon ausgehend wurden drei verschiedene Brandorte definiert (siehe auch Abbildung 5):

- Szenario 1: am Westende des Bahnsteiges (Westen)
- Szenario 2: in der Mitte des Bahnsteiges (Mitte)
- Szenario 3: am Ostende des Bahnsteiges (Osten)

4.2 Geometrie

Die Geometrie des Bahnhofes wird in FDS mittels quaderförmiger Zellen realisiert. Dabei wird der gesamte Bahnhof mit einem Netz modelliert. Aufgrund vorteilhafter Performance sind alle Zellen in allen Netzen gleich groß. Wie schon in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, hängt die Rechenzeit einer Simulation mit der vierten Potenz (drei Raumdimensionen und eine Zeitdimension) von der Zellengröße ab. Für die Zellengröße muss daher ein Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit der Simulation getroffen werden. Eine gängige Abschätzung für die Zellengröße ist das Verhältnis von charakteristischem Durchmesser D^* , der durch

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

definiert ist, wobei \dot{Q} die Wärmefreisetzungsrate, ρ_{∞} die Luftdichte, c_p die spezifische Wärmekapazität, T_{∞} die Umgebungstemperatur und g die Erdbeschleunigung beschreibt, und der charakteristischen Zellgröße Δh

$$\Delta h = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

Für den für die Entfluchtung relevanten Zeitraum wird eine Wärmefreisetzungsrate von 2000 kW angenommen. Damit ergibt sich ein charakteristischer Durchmesser von 1,27 m. Mit den in

Tabelle 3 aufgeführten Netzeigenschaften ergibt sich ein Verhältnis $\frac{D^*}{\Delta h}$ von 5,5. Simulationen der US Nuclear Regulatory Commission ergaben konvergente Lösungen für Verhältnisse ab 4 [16]. Unter diesem Kriterium ist das Netz hinreichend genau.

Tabelle 3: Eigenschaften des Rechengitters

Eigenschaft	Wert
Länge x [m]	260
Breite y [m]	70
Höhe z [m]	13
Zellen in x	1040
Zellen in y	280
Zellen in z	65
Anzahl Zellen	18.928.000
Charakteristische Zellgröße Δh [m]	0,232

Das Modell beinhaltet alle relevanten Strömungshindernisse. Zum Zeitpunkt des Starts der Simulation werden alle Türen des brennenden Wagens offen modelliert. Gemäß [15] öffnet sich die Wagendecke des brennenden Zuges 5 min nach Erreichen einer Wärmefreisetzungsrates von 1 MW. Dies ist bei etwa 10 min nach Simulationsbeginn der Fall, spielt aber für die Entfluchtung keine Rolle. Konservativ wird auf dem Nachbargleis ein weiterer Zug modelliert. Beide Züge werden durch 6 räumlich getrennte Wagen modelliert. Dadurch wird die Rauchausbreitung in die anderen Wagen verhindert, wodurch mehr Rauch auf den Bahnsteig gelangt.

Die Modellierung des Bahnhofes inklusive der Züge und Treppen ist exemplarisch in Abbildung 6 bis Abbildung 8 dargestellt.

An den Treppenaufgängen von der Bahnsteigebene zu den Schalterhallen befinden sich an der Decke Anzeigetafeln, die als Rauchbarriere fungieren sollen. Diese wurden in der Simulation berücksichtigt.

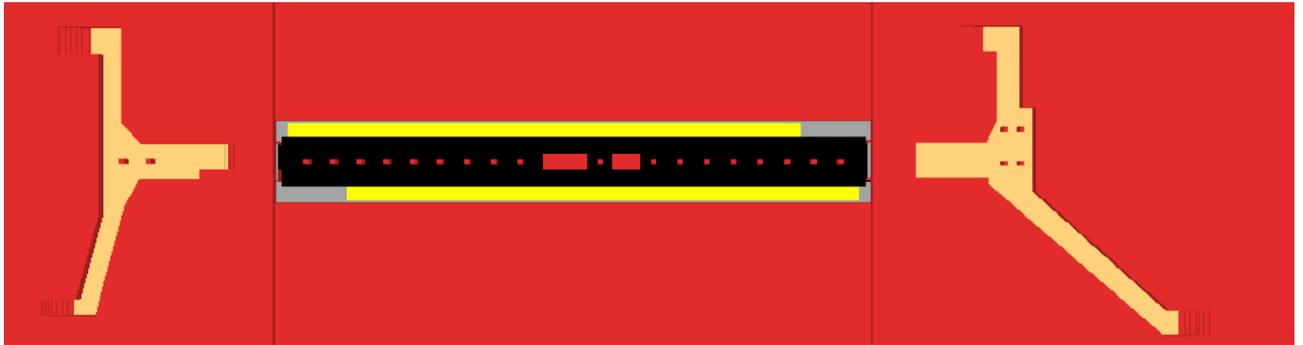


Abbildung 6: Gesamtes 3D-Modell

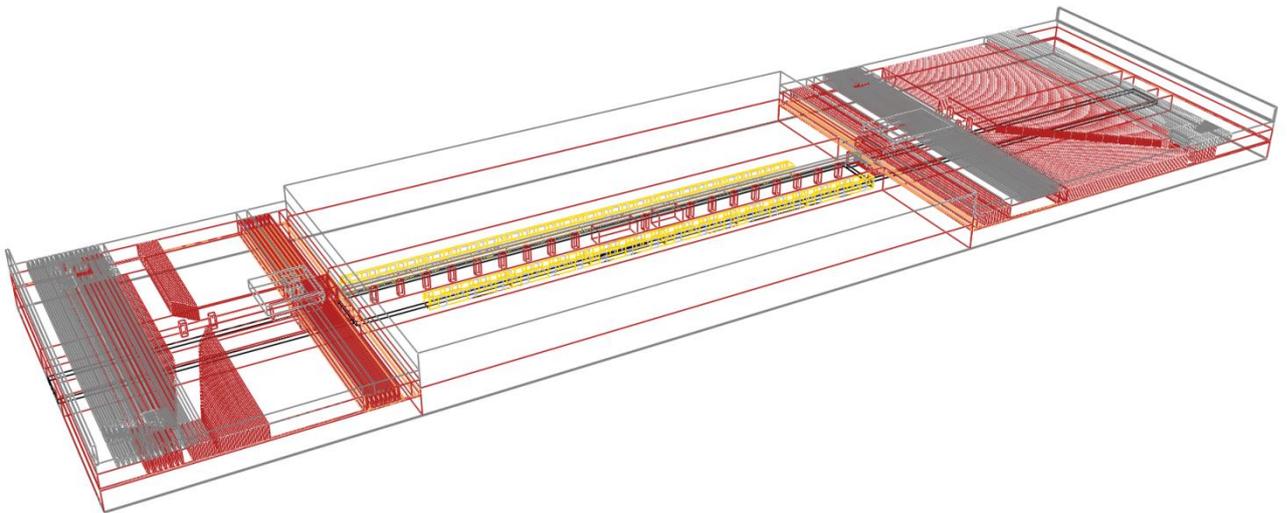


Abbildung 7: Kontur des 3D-Modells

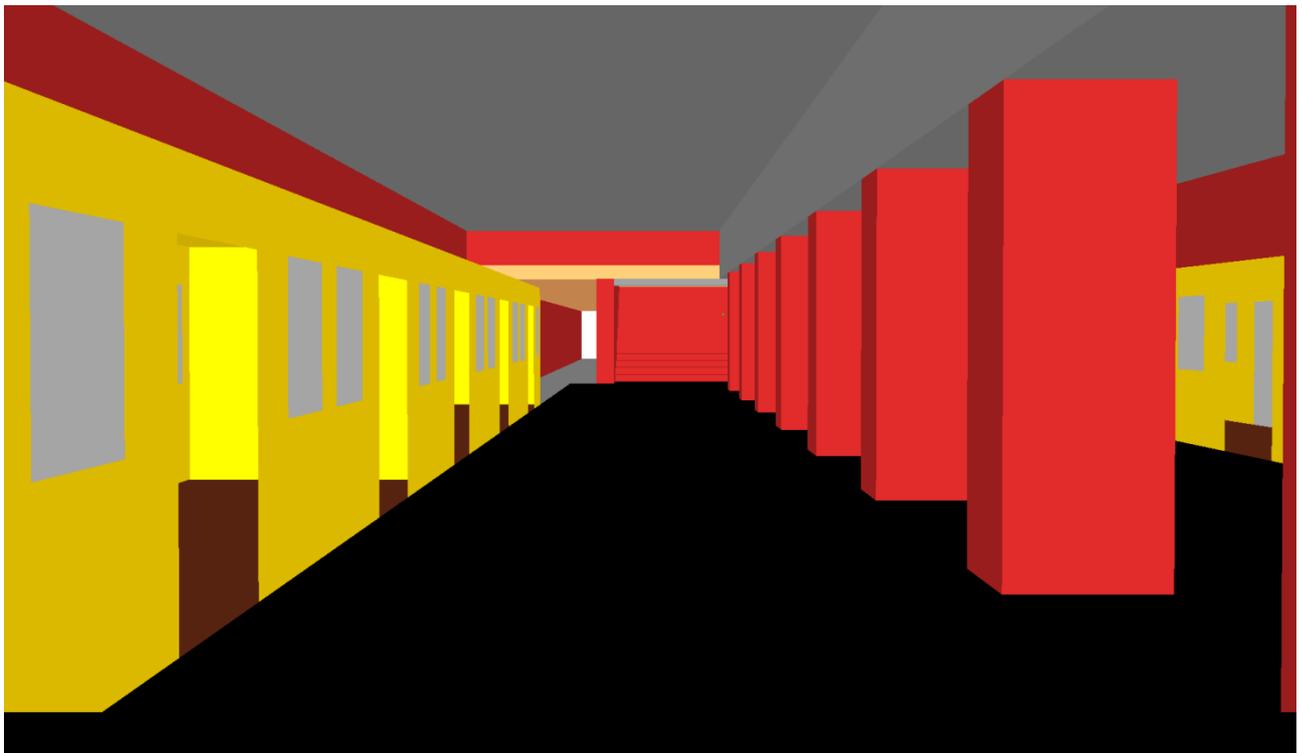


Abbildung 8: Ansicht der Bahnsteigebene mit Treppe zur Schalterhalle

4.3 Ventilationsbedingungen

Auf Grundlage von Informationen der BVG herrscht im Bahnhof eine latente Hintergrundströmung von 0,5 m/s. Im Brandfall entsteht durch die dichtegradientbedingte Abströmung der warmen Luft nach oben eine Sogwirkung, durch die kältere Luft aus den Tunnelröhren angesaugt wird. Die dadurch entstehende brandinduzierte Strömung und die Hintergrundströmung überlagern sich. Um beide Strömungen simulieren zu können, wird an den Tunnelportalen an Stelle einer festen Geschwindigkeitsrandbedingung eine Druckrandbedingung definiert. Diese beträgt gemäß Bernoulli'scher Druckgleichung 0,08 Pa Überdruck am einen und 0,08 Pa Unterdruck am anderen Tunnelportal. In der Simulation ohne Brandszenario stellt sich damit eine gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit der Luft von 0,5 m/s ein.

Bezüglich der Richtung der Hintergrundströmung wurden keine Vorgaben gemacht. Daher wird die konservative Annahme getroffen, dass die Hintergrundströmung die Rauchgase in Richtung der Treppen zur angrenzenden Schalterhalle transportiert. Für Szenario 1 wird die Hintergrundströmung daher von rechts nach links und für Szenario 3 von links nach rechts simuliert. Für Szenario 2 spielt die Richtung der Hintergrundströmung eine untergeordnete Rolle.

4.4 sonstige Randbedingungen

Die Umgebungstemperatur im Bahnhof und im Freien wird zu 20°C definiert. Windeinflüsse im Freien werden nicht modelliert.

Um die Auswirkungen der Wärmeleitung in Feststoffen auf die Ausbildung des Strömungsfeldes zu berücksichtigen, wurden für den Zug die relevanten Materialien Glas und Aluminium mit entsprechenden Stoffwerten modelliert. Vereinfachend wird der Rest des Bahnhofes mit den Stoffwerten von Beton modelliert. Die entsprechenden Stoffwerte sind in Tabelle 4 gelistet.

Tabelle 4: Stoffeigenschaften der modellierten Materialien

Material	Aluminium	Glas	Beton
Dichte [kg/m ³]	2700	2500	2500
Materialdicke [mm]	4	4	-
spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)]	0,897	0,8	0,95
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)] [8]	202	1,0	2,1

5 ERGEBNISSE

5.1 Allgemeines

Wie in Abschnitt 3 erläutert, wird nachfolgend lediglich die Erkennungsweite für die Bewertung der raucharmen Schicht in Betracht gezogen. Dafür wurden für alle Szenarien horizontale Ebenen der Erkennungsweiten zu den beiden relevanten Zeitpunkten 5,7 min (Abschluss Evakuierung aus der Bahnsteigebene) und 7,1 min (Abschluss Evakuierung des gesamten Bahnhofes) in einer Höhe von 2 m über dem Erdboden ausgewertet.

Für die Bewertung der Treppen zwischen Bahnsteig, Schalterhallen und der Umgebung werden gesondert Punktmessstellen ausgewertet.

Nachfolgend wird mit t_1 der Zeitpunkt bezeichnet, zu dem der Bahnsteig und mit t_2 der Zeitpunkt, zu dem der gesamte Bahnhof vollständig entfluchtet ist. Dabei gilt für die Zeitpunkte $t_1=5,7$ min und $t_2=7,1$ min.

In den Diagrammen ist zu beachten, dass die maximale Erkennungsweite innerhalb FDS nicht mit unendlich definiert ist, wie das bei komplett rauchfreier Luft theoretisch der Fall wäre. Hierfür wurde der Wert 30 m, der innerhalb der Simulationssoftware definiert ist, für rauchfreie Luft übernommen.

5.2 Plausibilitätsuntersuchungen

Simulationsdurchläufe zur Plausibilitätsuntersuchung haben gezeigt, dass das Modell plausible Ergebnisse erzeugt. Exemplarisch sind in Abbildung 9 und Abbildung 10 Felder der Geschwindigkeitsvektoren gezeigt.

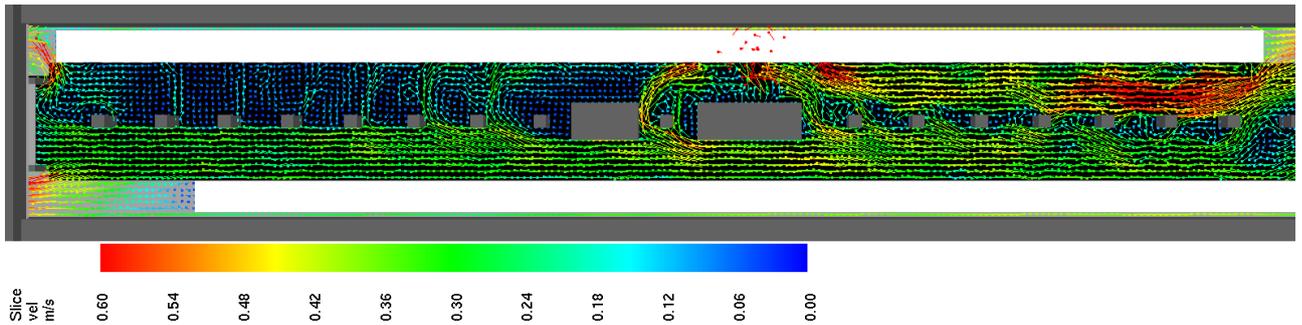


Abbildung 9: Geschwindigkeitsvektoren auf dem Bahnsteig 5 min nach Simulationsbeginn in 1 m Höhe, Ansicht von oben

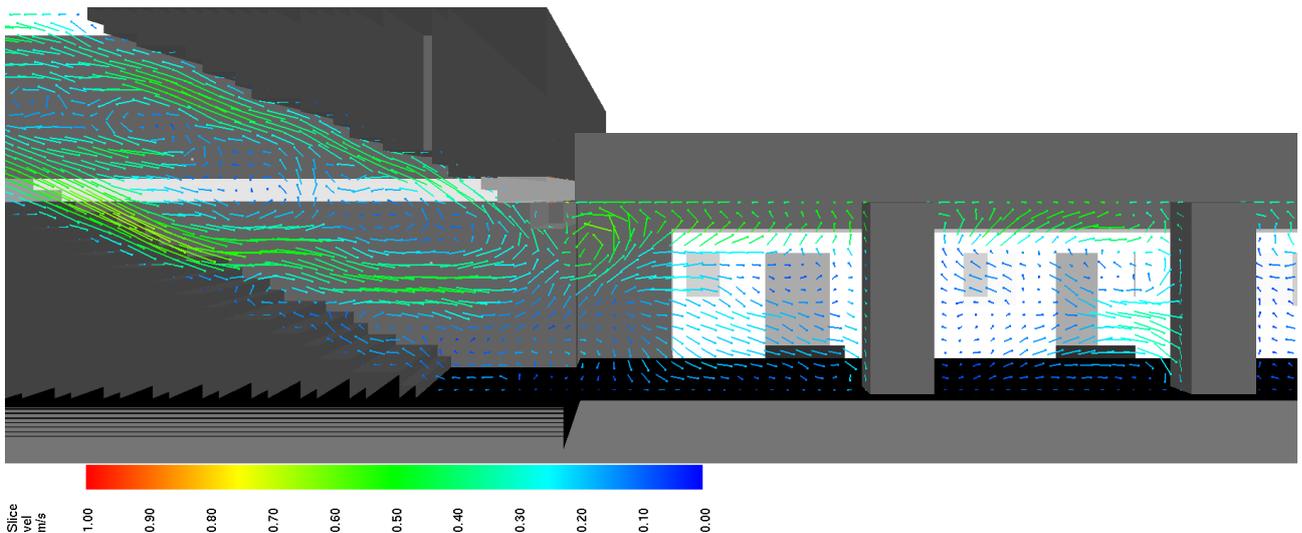


Abbildung 10: Geschwindigkeitsvektoren auf der Treppe zwischen Bahnsteig und Schalterhalle 1, 7 min nach Simulationsbeginn, Ansicht von der Seite

5.3 Szenario 1

Die Erkennungsweiten für Szenario 1 zu den relevanten Zeitpunkten sind in Abbildung 11 bis Abbildung 16 dargestellt. Zum Zeitpunkt t_1 beträgt die Sichtweite auf dem gesamten Bahnsteig und in beiden Schalterhallen mehr als 10 m (Abbildung 11 und Abbildung 12). Das Schutzziel ist damit zum Zeitpunkt t_1 vollumfänglich erfüllt.

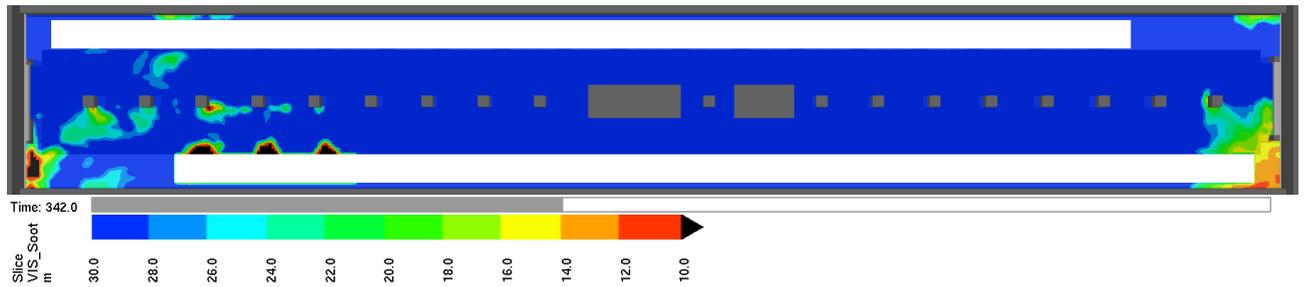


Abbildung 11: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 5,7 min (Szenario 1)

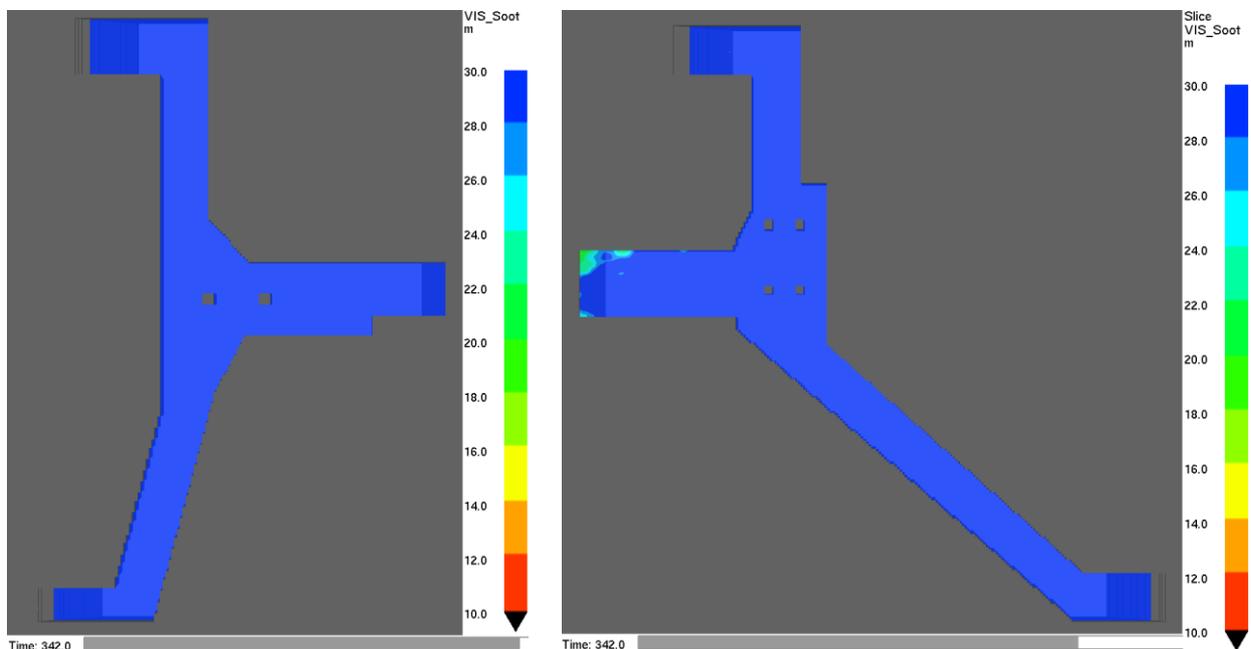


Abbildung 12: Erkennungsweite in den Schalterhallen nach 5,7 min (Szenario 1)

Zum Zeitpunkt t_2 ist der Bahnsteig an einigen Stellen verraucht (Abbildung 13). Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt noch erfüllt, die Entfluchtung des Bahnsteiges ist zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen. Die Schalterhallen sind zu diesem Zeitpunkt weitgehend rauchfrei (Abbildung 14). Da die Schalterhallen eine Erkennungsweite über 10 m aufweisen, ist das Schutzziel zu diesem Zeitpunkt erfüllt.

Für die Bewertung der Treppen kann Abbildung 14 nicht herangezogen werden, da die horizontalen Messebenen die Erkennungsweite nicht in einer Höhe von konstant 2 m über den Treppenstufen auswerten. Die Treppen werden daher gesondert mit Punktmessstellen betrachtet.

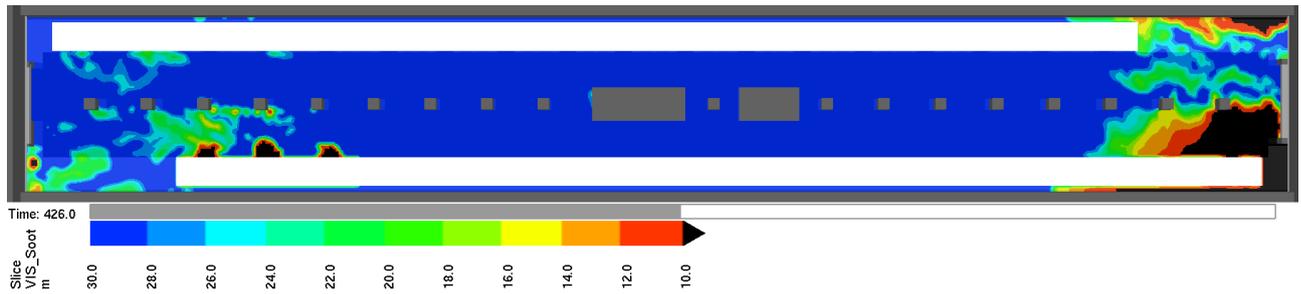


Abbildung 13: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 7,1 min (Szenario 1)

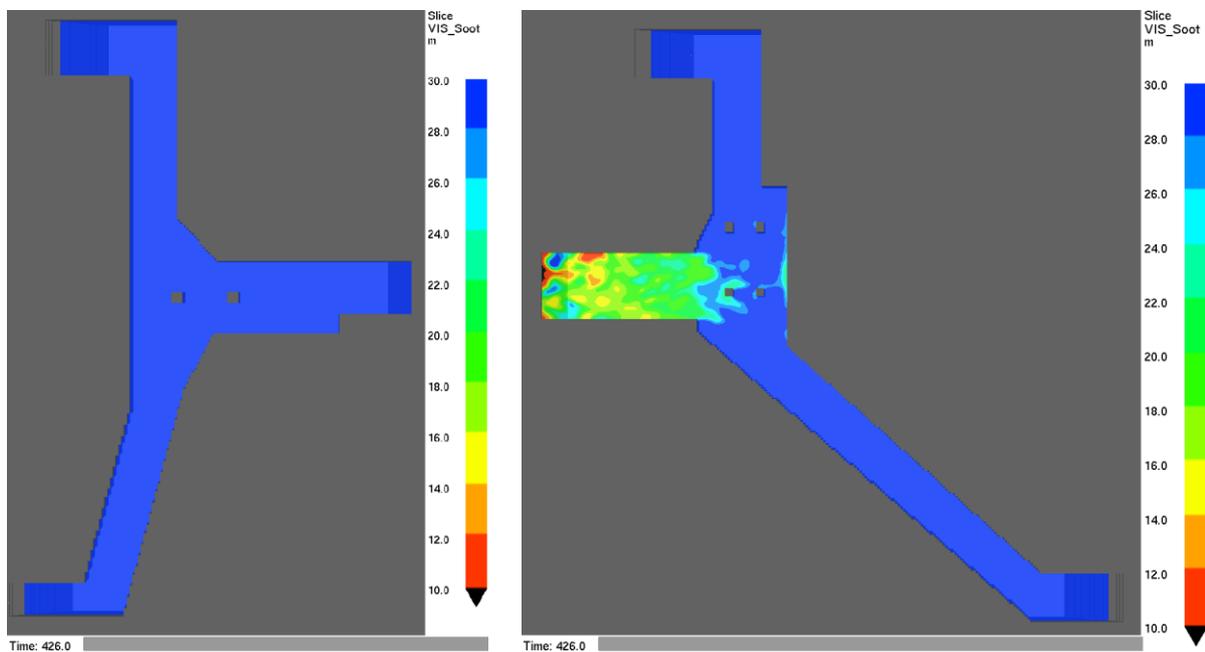


Abbildung 14: Erkennungsweite in den Schalterhallen nach 7,1 min (Szenario 1)

Die Treppen zwischen Bahnsteig und Schalterhalle müssen bis zum Zeitpunkt t_1 das Schutzziel erfüllen. Beide Treppen zu den Schalterhallen weisen auch nach 11 min eine genügend raucharme Schicht auf (Abbildung 15). Auch die Treppen ins Freie sind auch nach 11 min noch passierbar (Abbildung 16). Das Schutzziel ist damit vollumfänglich erfüllt.

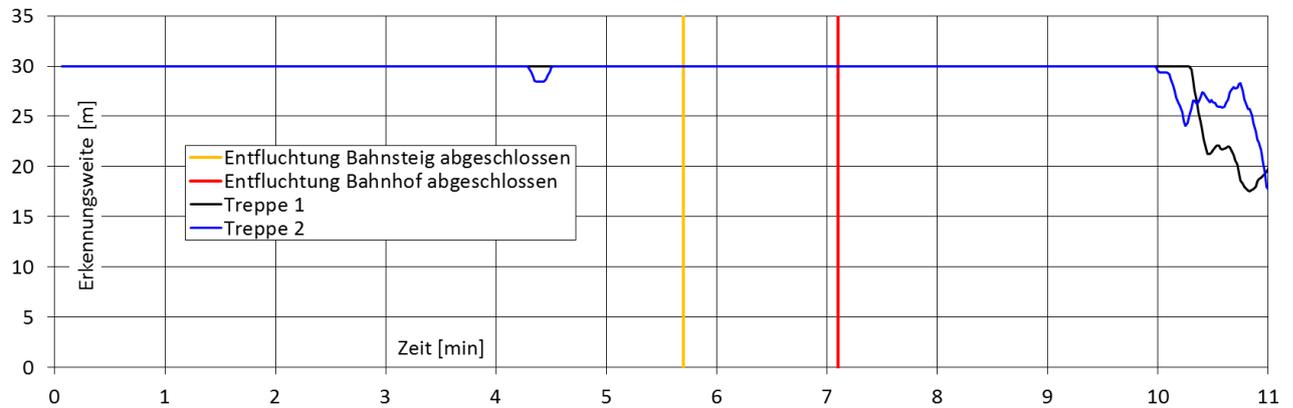


Abbildung 15: Erkennungsweite auf den Treppen zwischen Bahnsteigebene und Schalterhallen (Szenario 1)

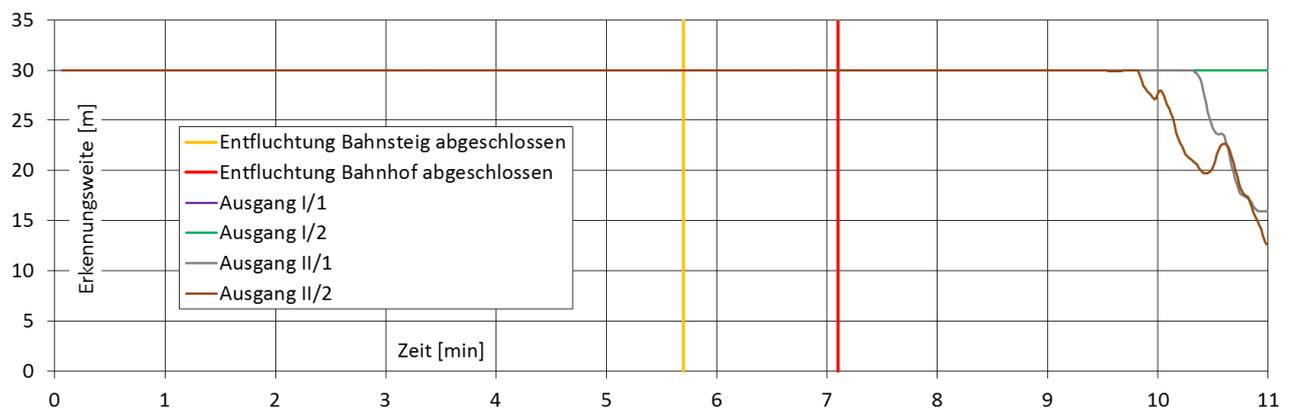


Abbildung 16: Erkennungsweite auf den Treppen ins Freie (Szenario 1)

5.4 Szenario 2

Die Erkennungsweiten für Szenario 2 zu den relevanten Zeitpunkten sind in Abbildung 17 bis Abbildung 22 dargestellt. Zum Zeitpunkt t_1 beträgt die Sichtweite auf dem gesamten Bahnsteig und in beiden Schalterhallen mehr als 10 m (Abbildung 17 und Abbildung 18). Das Schutzziel ist damit zum Zeitpunkt t_1 vollumfänglich erfüllt.

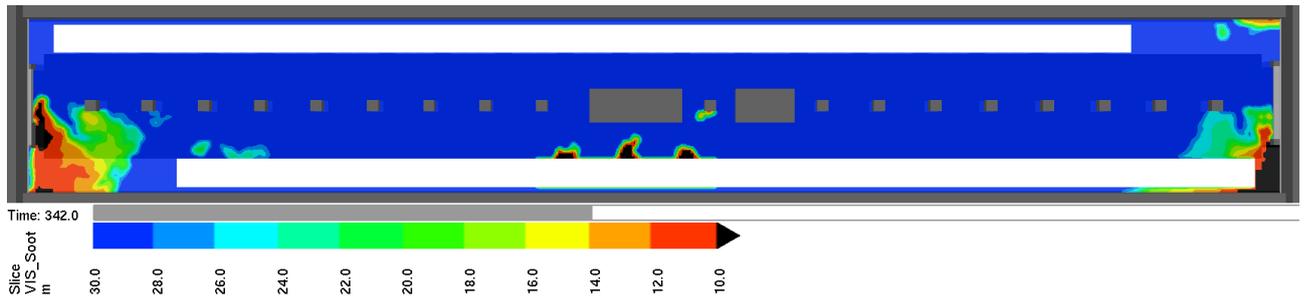


Abbildung 17: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 5,7 min (Szenario 2)

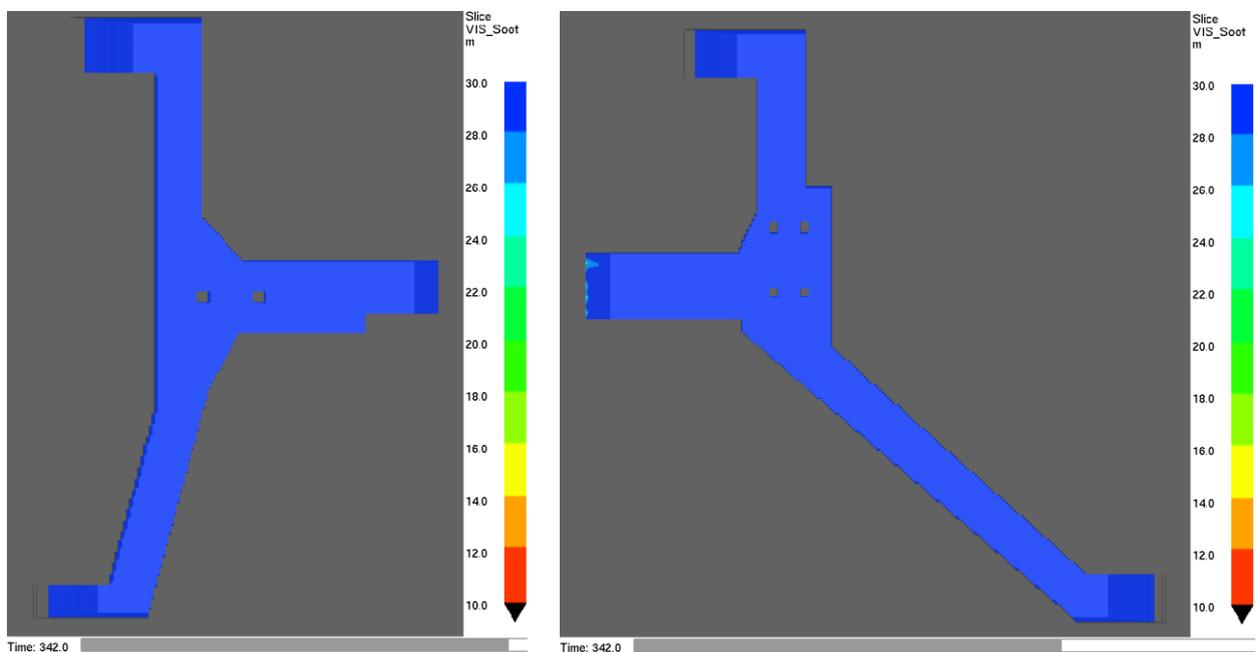


Abbildung 18: Erkennungsweite in den Schalterhallen nach 5,7 min (Szenario 2)

Zum Zeitpunkt t_2 ist der Bahnsteig an einigen Stellen verraucht (Abbildung 19). Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt noch erfüllt, die Entfluchtung des Bahnsteiges ist zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen. Die Schalterhallen sind zu diesem Zeitpunkt weitgehend rauchfrei (Abbildung 20). Da die Schalterhallen eine Erkennungsweite über 10 m aufweisen, ist das Schutzziel zu diesem Zeitpunkt erfüllt.

Für die Bewertung der Treppen kann Abbildung 20 nicht herangezogen werden, da die horizontalen Messebenen die Erkennungsweite nicht in einer Höhe von konstant 2 m über den Treppenstufen auswerten. Die Treppen werden daher gesondert mit Punktmessstellen betrachtet.

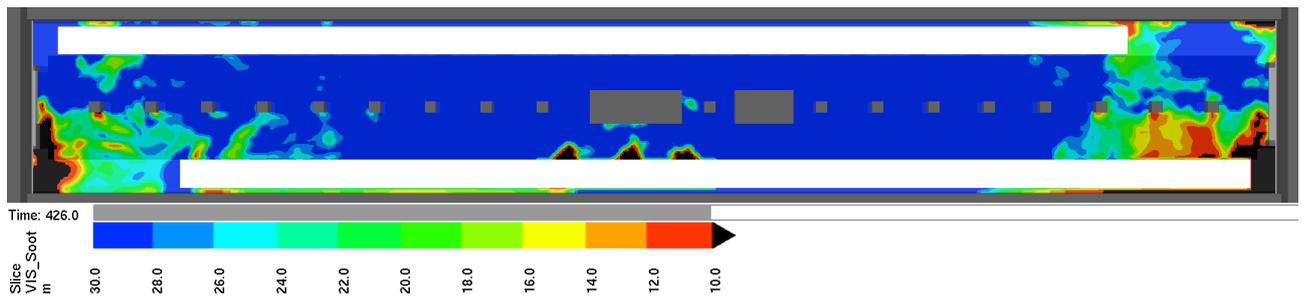


Abbildung 19: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 7,1 min (Szenario 2)

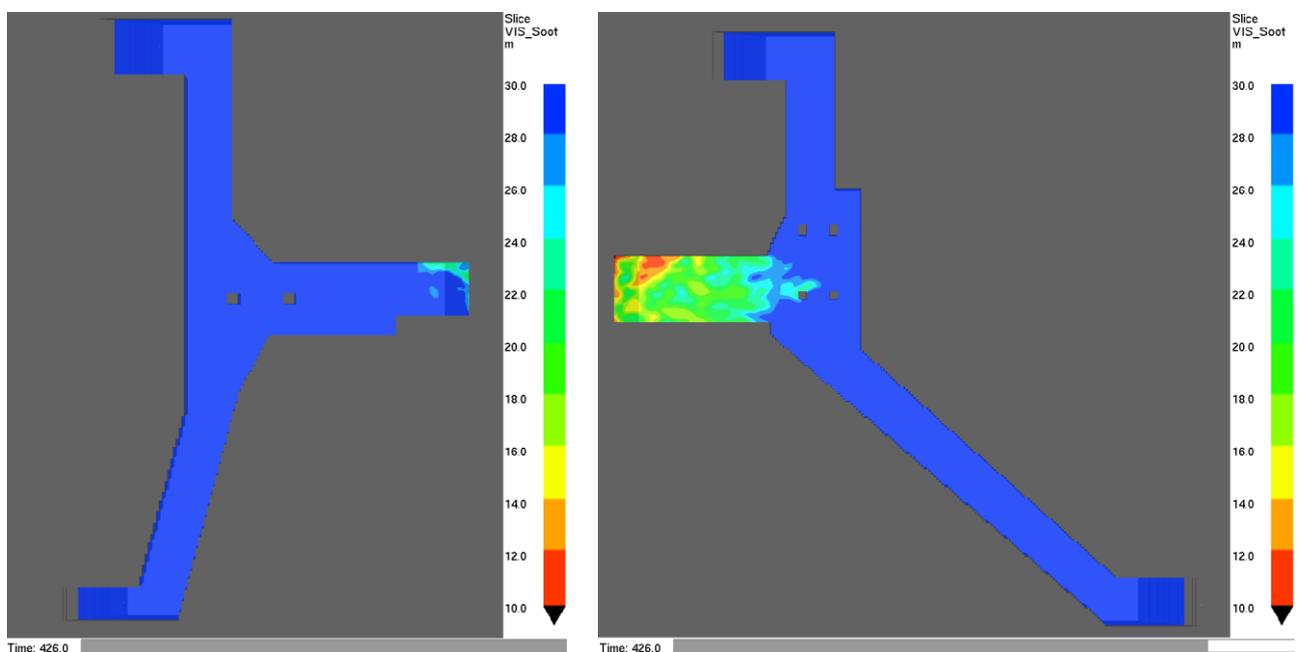


Abbildung 20: Erkennungsweite in den Schalterhallen nach 7,1 min (Szenario 2)

Die Treppen zwischen Bahnsteig und Schalterhalle müssen bis zum Zeitpunkt t_1 das Schutzziel erfüllen. Beide Treppen zu den Schalterhallen weisen auch nach 11 min eine genügend raucharme Schicht auf (Abbildung 21). Auch die Treppen ins Freie sind auch nach 11 min noch passierbar (Abbildung 22). Das Schutzziel ist damit vollumfänglich erfüllt.

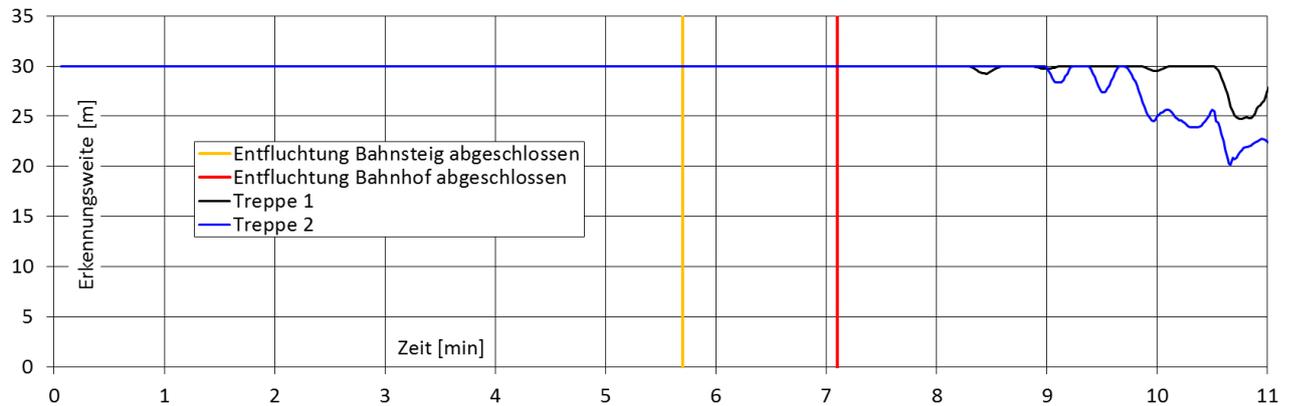


Abbildung 21: Erkennungsweite auf den Treppen zwischen Bahnsteigebene und Schalterhallen (Szenario 2)

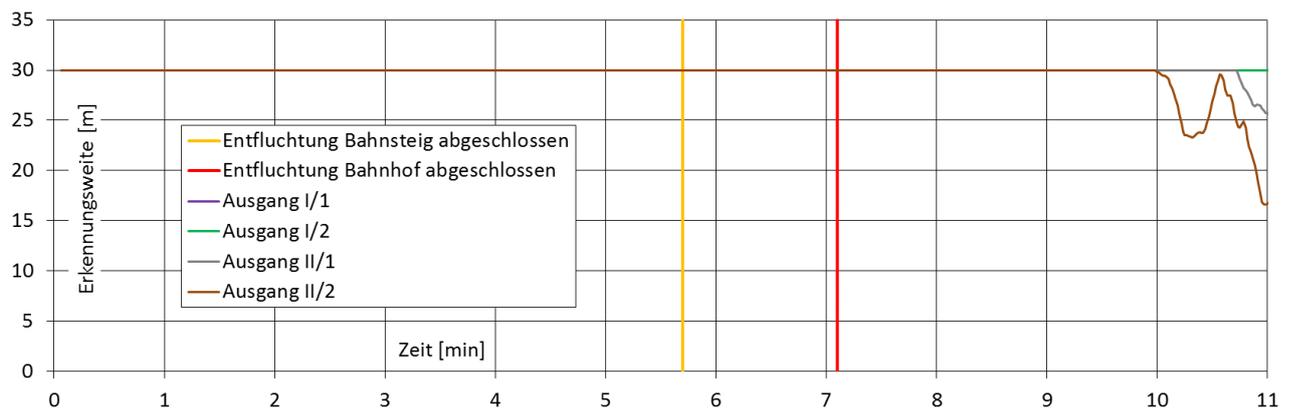


Abbildung 22: Erkennungsweite auf den Treppen ins Freie (Szenario 2)

5.5 Szenario 3

Die Erkennungsweiten für Szenario 3 zu den relevanten Zeitpunkten sind in Abbildung 23 bis Abbildung 28 dargestellt. Zum Zeitpunkt t_1 beträgt die Sichtweite auf dem gesamten Bahnsteig und in beiden Schalterhallen mehr als 10 m (Abbildung 23 und Abbildung 24). Das Schutzziel ist damit zum Zeitpunkt t_1 vollumfänglich erfüllt.

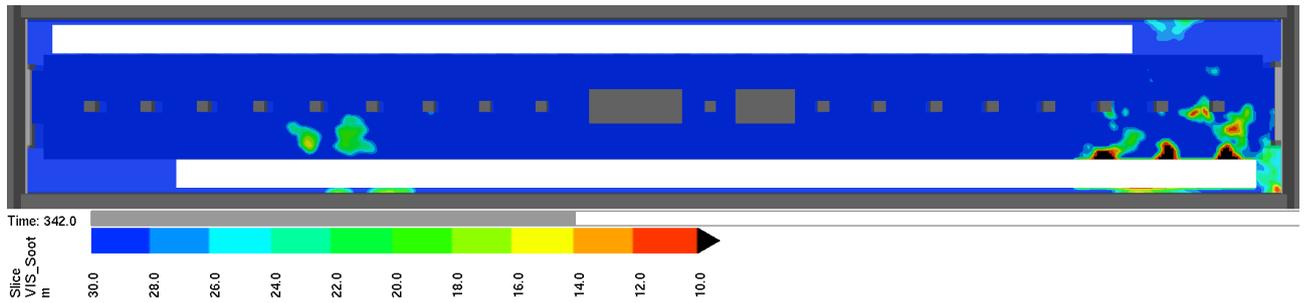


Abbildung 23: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 5,7 min (Szenario 3)

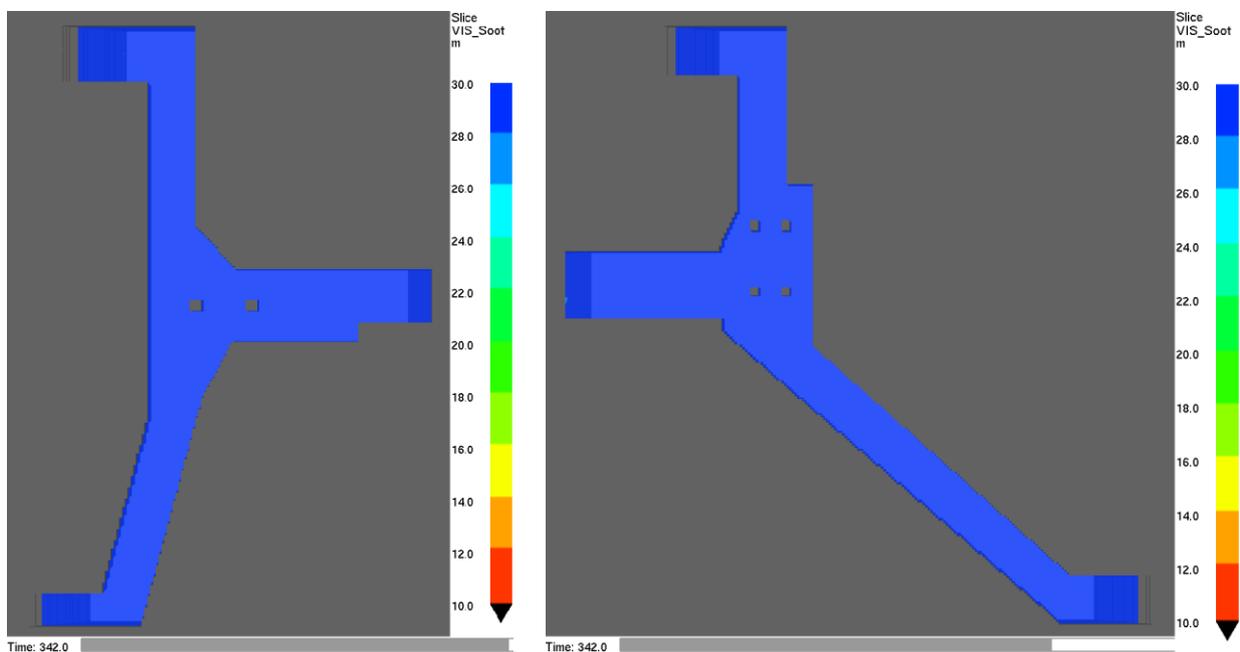


Abbildung 24: Erkennungsweite in den Schalterhallen nach 5,7 min (Szenario 3)

Zum Zeitpunkt t_2 ist der Bahnsteig an einigen Stellen verrauchet (Abbildung 25). Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt noch erfüllt, die Entfluchtung des Bahnsteiges ist zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen. Die Schalterhallen sind zu diesem Zeitpunkt weitgehend rauchfrei (Abbildung 26). Da die Schalterhallen eine Erkennungsweite über 10 m aufweisen, ist das Schutzziel zu diesem Zeitpunkt erfüllt.

Für die Bewertung der Treppen kann Abbildung 26 nicht herangezogen werden, da die horizontalen Messebenen die Erkennungsweite nicht in einer Höhe von konstant 2 m über den Treppenstufen auswerten. Die Treppen werden daher gesondert mit Punktmessstellen betrachtet.

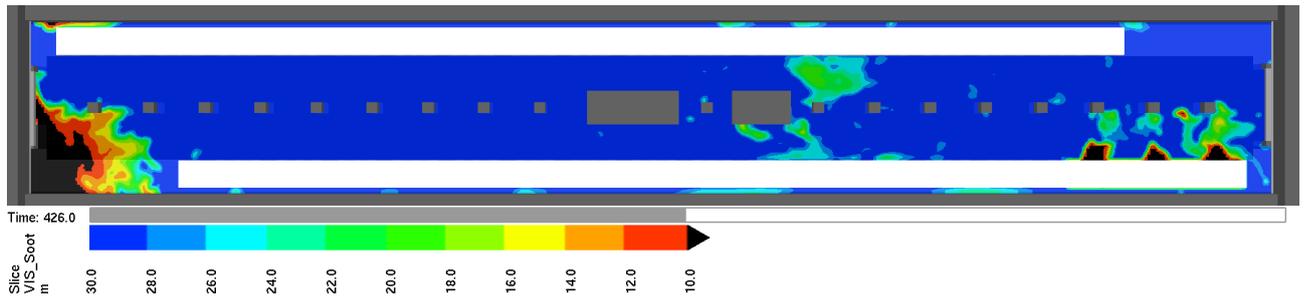


Abbildung 25: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 7,5 min (Szenario 3)

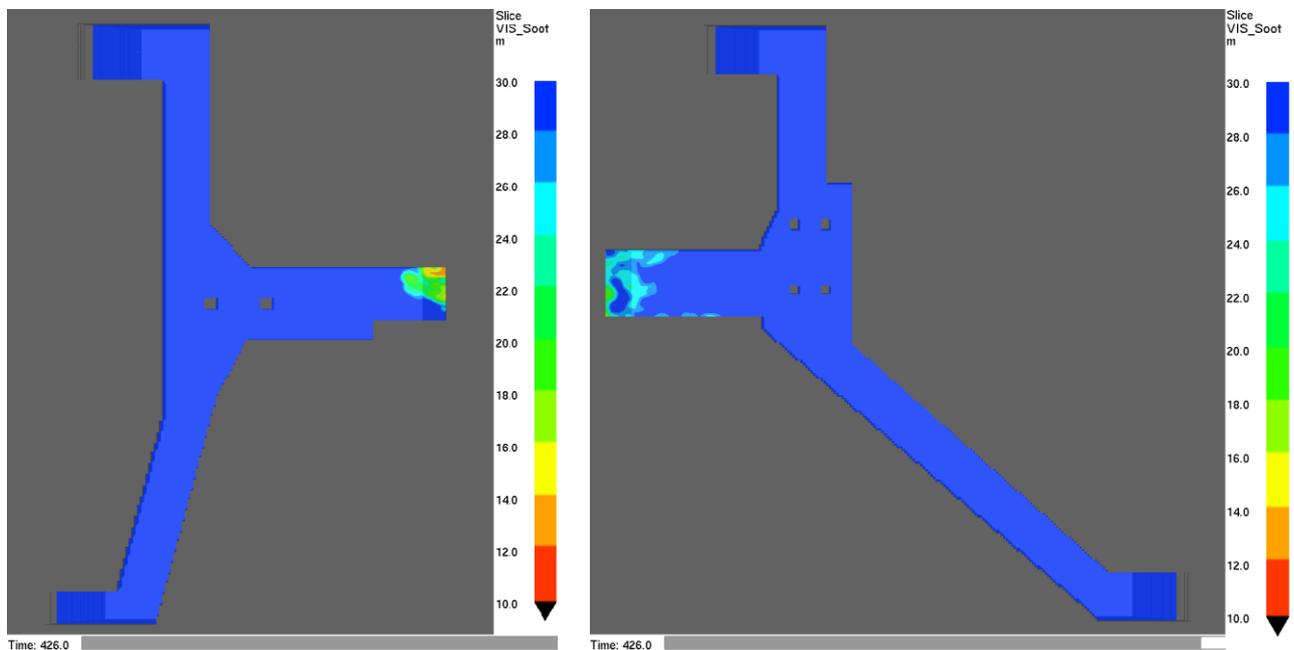


Abbildung 26: Erkennungsweite in der Schalterhalle 1 nach 7,5 min (Szenario 3)

Die Treppen zwischen Bahnsteig und Schalterhalle müssen bis zum Zeitpunkt t_1 das Schutzziel erfüllen. Beide Treppen zu den Schalterhallen weisen auch nach 11 min eine genügend raucharme Schicht auf (Abbildung 27). Auch die Treppen ins Freie sind nach 11 min noch passierbar (Abbildung 28). Das Schutzziel ist damit vollumfänglich erfüllt.

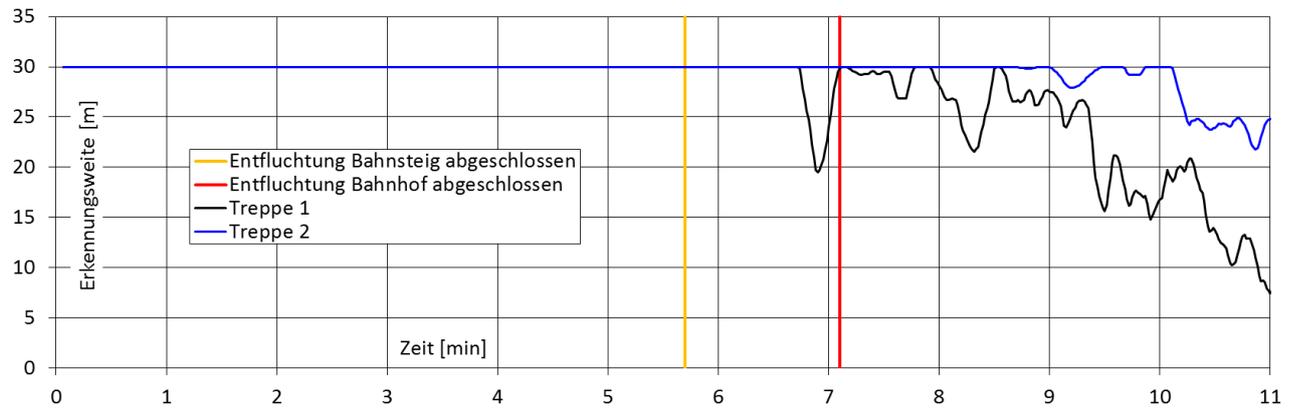


Abbildung 27: Erkennungsweite auf den Treppen zwischen Bahnsteigebene und Schalterhalle (Szenario 3)

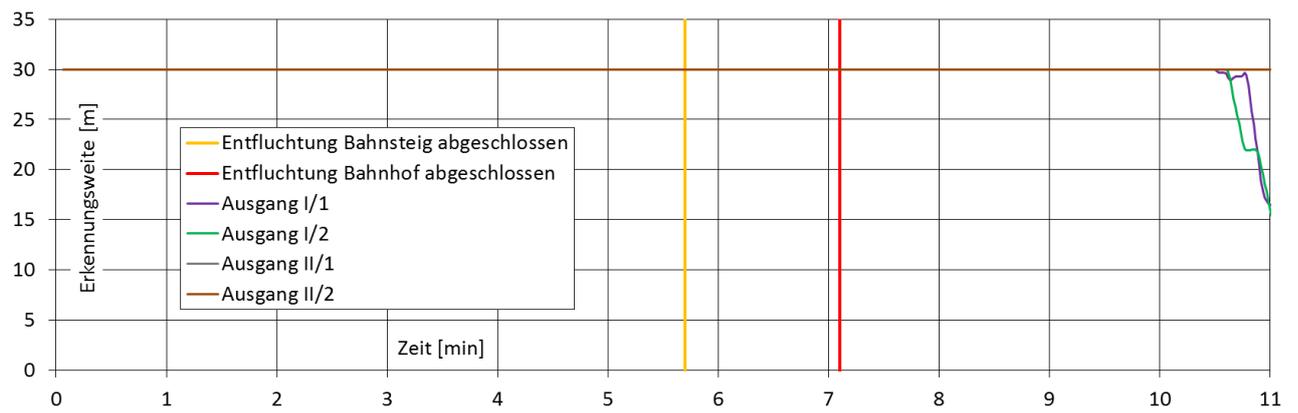


Abbildung 28: Erkennungsweite auf den Treppen ins Freie (Szenario 3)

6 BEWERTUNG

Die Simulation eines brennenden Wagens an drei verschiedenen Positionen auf dem Bahnsteig führt zu dem Ergebnis, dass in jedem der drei Fälle eine raucharme Schicht für den gesamten zur Entfluchtung aller Bereiche des U-Bahnhofes Rohrdamm notwendigen Zeitraum gegeben ist.

Damit ist mittels CFD-Simulation nachgewiesen, dass der Zeitraum der Verrauchung für den Bahnhof größer als die Zeit ist, die für die Entfluchtung benötigt wird. Die einzelnen Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Zeitpunkte, ab denen die jeweiligen Fluchtwege nicht mehr benutzbar sind

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Evakuierung Bahnsteig abgeschlossen nach	5,7 min		
Bahnsteigebene	9,5 min	9,7 min	9,0 min
Treppe 1	> 11 min	> 11 min	> 11 min
Treppe 2	> 11 min	> 11 min	> 11 min
Evakuierung Bahnhof abgeschlossen nach	7,1 min		
Schalterhalle 1	> 11 min	> 11 min	10,0 min
Schalterhalle 2	10,0 min	10,2 min	11,0 min
Ausgang I/1	> 11 min	> 11 min	> 11 min
Ausgang I/2	> 11 min	> 11 min	> 11 min
Ausgang II/1	> 11 min	> 11 min	> 11 min
Ausgang II/2	> 11 min	> 11 min	> 11 min

LITERATUR

- [1] D. Hosser, vfdb-Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 3. überarbeitete und ergänzte Auflage, 2015.
- [2] Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) - Bereich U-Bahn, Dienstanweisung zur Umsetzung des Brandschutzkonzepts der Berliner U-Bahn, 2016.
- [3] E. Wilk und R. Lessing, Untersuchungen zur Sichtweite im Rauch und zu Brandgaswirkungen auf den Menschen, vfdb-Zeitschrift 3, 168, 2004.
- [4] Fire Code Reform Centre, Fire Engineering Guidelines, New South Wales, Australia, 2000.
- [5] D. Purser, Toxicity assessment of combustion products and human behaviour in fires, 10. Int. Brandschutzseminar, vfdb, 2005.
- [6] W. Siegfried und J. Will, Die Verwendung des Verdünnungsverhältnisses zur Bewertung von Ergebnissen bei der Modellierung der Rauchableitung. vfdb-Zeitschrift 3, 101, 2002.
- [7] D. Gall, K. Bieske und S. Kokoschka, Evaluierung von Sicherheitsleitsystemen in Rauchsituationen, TU Ilmenau, 2003.
- [8] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4. Edition, 2008.
- [9] S. Kokoschka, Zur Berechnung von Schwellenkontrasten für die Detektion einfacher Sehobjekte, Zts. LICHT 37. Jhg. Nr. 4, S. 305-308, 1988.
- [10] ISO 13571:2007, Life threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data, 2007.
- [11] G. Mulholland, Smoke Production and Properties, in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, NFPA, Quincy, Massachusetts, 4th Edition, 2008.
- [12] Arnold et al, FDS Leitfaden, Version 1.0.0, 12. November 2015, 2015.
- [13] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk und K. Overholt, „Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide,“ NIST Special Publication 1018, 2013.
- [14] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk und K. Overholt, „Fire Dynamics Simulator User's Guide,“ NIST Special Publication, 2013.

- [15] Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft Leipzig, Arbeitsblatt zur Brandsimulationsrechnung bezogen auf das Fahrzeug der Baureihe F74.
- [16] US Nuclear Regulatory Commission, Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications - Volume 7: Fire Dynamics Simulator, NUREG-1824, 2007.

- Ende des Dokuments -

7 ANHANG

7.1 Berechnung der Entfluchtungsdauer nach NFPA

VBU-KBT2 - Alexander Seefeldt
12.06.2017

Anlage U-Bahnhof Rohrdamm
Seite 1 von 2

Zeitabschnitte der Räumung Rm	Dauer (Sek.)	Dauer (Min.)
Gehzeiten der zuletzt fliehenden Personen:		
T1: Zeit zum Erreichen der Treppenaufgänge auf Bahnsteigebene : (ca. 56m / 0,63m/s)	89	1,5
T2: Zeit zum Überwinden des vertikalen Höhenunterschiedes zwischen Bahnsteigebene und Zwischengeschoss (ca. 3,36m / 0,25 m/s):	13	0,2
T3: Zeit zum Erreichen der Treppen zur Oberfläche im Zwischengeschoss : (ca. 60m / 1m/s)	60	1,0
T4: Zeit zum Überwinden des vertikalen Höhenunterschiedes zwischen Zwischengeschoss und Oberfläche (ca. 4,0m / 0,25 m/s):	16	0,3
T5: Gehzeit an der Oberfläche (ca. 10m / 1 m/s):	10	0,2
Schleusungszeiten an den Treppenaufgängen:		
S1: Schleusungszeit an den Treppen vom Bahnsteig zum Zwischengeschoss 5,5 Minuten (siehe Nebenrechnung 1)		
S2: Schleusungszeit an den Treppen vom Zwischengeschoss zur Oberfläche 3,3 Minuten (siehe Nebenrechnung 2)		
Wartezeiten an den Treppenaufgängen:		
Treppenaufgänge Bahnsteigebene: W1 = (S1-T1) = (5,5 - 1,5) min	240	4,0
Treppenaufgänge Zwischengeschoss: W2 = (S2-S1) = (3,3 - 5,5) min » » Ansatz 0, da negativer Wert!	0	0,0
Räumungszeit: RZ=T1+T2+T3+T4+T5+W1	428	7,1

VBU-KBT2 - Alexander Seefeldt
12.06.2017Anlage U-Bahnhof Rohrdamm
Seite 2 von 2**Nebenrechnung 1 zur Schleusungszahl S1: (S=Personenzahl vor der Treppenanlage / Kapazität der Treppenanlage in Personen pro Minute)**

Durch Aufzugseinbau Treppe I nun 2,40 m breit

Kapazität feste Treppe I 2,40 m breit \rightarrow 2,60 m/0,6m \rightarrow 4 Fluchtspuren \rightarrow $4 \cdot 33 = 132$
Personen/Minute + jeweils Kapazität Fahrtreppe: 1,0m/0,6m \rightarrow 1 Fluchtspur \rightarrow $1 \cdot 25 = 25$
Personen/Minute \rightarrow \rightarrow Gesamtkapazität: **157 Personen/Minute**Kapazität feste Treppe II 2,66 m breit \rightarrow 2,30 m/0,6m \rightarrow 4 Fluchtspuren \rightarrow $4 \cdot 33 = 132$
Personen/Minute + jeweils Kapazität Fahrtreppe: 1,0m/0,6m \rightarrow 1 Fluchtspur \rightarrow $1 \cdot 25 = 25$
Personen/Minute \rightarrow \rightarrow Gesamtkapazität: **157 Personen/Minute**S1 Treppe II: 863 P / 157 P/min = **5,5 Minuten****Nebenrechnung zur Schleusungszahl S: (S=Personenzahl vor der Treppenanlage / Kapazität der Treppenanlage in Personen pro Minute)**

Alle vier Treppen identisch!

Ausgang I/1: Kapazität feste Treppe 2,60 m breit \rightarrow 2,60 m/0,6m \rightarrow 4 Fluchtspuren \rightarrow $4 \cdot 33 =$
132 Personen/MinuteAusgänge I/2, II/1 und II/2: Jeweils Kapazität feste Treppe 2,40 m breit \rightarrow 2,40 m/0,6m \rightarrow 4
Fluchtspuren \rightarrow $4 \cdot 33 = 132$ Personen/Minute + jeweils Kapazität Fahrtreppe: 1,0m/0,6m \rightarrow 1
Fluchtspur \rightarrow $1 \cdot 25 = 25$ Personen/Minute \rightarrow \rightarrow Gesamtkapazität: **157 Personen/Minute**S2 Ausgang I/1: 432 P / 132 P/min = **3,3 Minuten**

S2 jeweils Ausgänge I/2, II/1 und II/2: 432 P / 157 P/min = 2,8 Minuten