

2. Revision Gutachtliche Detailstellungnahme 159awk11-G3 Rauchschutznachweis für den U-Bahnhof Paradesstraße

Datum: 21.11.2018

pdf - Ausfertigung

Auftraggeber: Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)
Anstalt des öffentlichen Rechts
Bereich Infrastruktur

Auftragnehmer: A-W-K Ingenieurgesellschaft mbH
Borkumstraße 2
13189 Berlin

Bearbeiter: Dr.-Ing. Michael Dehne
von der Ingenieurkammer Niedersachsen öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger für Vorbeugenden Brandschutz
Dipl.-Ing. Th. Koch
von der Baukammer Berlin öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger für Vorbeugenden Brandschutz
bauvorlagenberechtigt gemäß § 65 (3) BauO Bln

Dieses Schriftstück umfasst 46 Seiten und 4 Anlagen. Es darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Eine Veröffentlichung - auch auszugsweise - bedarf in jedem Einzelfall der schriftlichen Genehmigung. Die Ergebnisse dürfen nicht auf andere Bauwerke übertragen werden.

Sitz der Gesellschaft
Borkumstraße 2
13189 Berlin
Tel.: 030 479 08 69-0
Fax: 030 479 08 69-29
<http://www.a-w-k.eu>
buero@a-w-k.eu

Geschäftsführer
Dipl.-Ing. Jürgen Arndt
Dipl.-Ing. Harald Weiher
Dipl.-Ing. Thomas Koch

Bankverbindung
Commerzbank AG
DE31 1008 0000 0905 7833 00
BIC DRESDEFF 100
Berliner Volksbank
DE56 1009 0000 1278 9350 07
BIC BEVODEBB

Handelsregister
Amtsgericht Charlottenburg
HRB 189452 B
Ust.-ID-Nr.: DE170287006

Inhaltsverzeichnis

1 Anlass und Auftrag	3
2 Grundlagen der Beurteilung	4
2.1 Verwendete Unterlagen.....	4
2.2 Literatur.....	4
3 Ausgangssituation	7
4 Beschreibung des verwendeten CFD-Modells	8
4.1 Allgemeines.....	8
4.2 Fehlergrenzen der Methodik.....	9
5 Schutzziele	11
6 Geometrische Randbedingungen	15
7 Brandszenarien	19
8 3D-Volumenmodell des Simulationsbereiches	22
9 Ergebnisse	25
9.1 Allgemeines.....	25
9.2 Brandszenario 1 Brand eines Triebwagens in der Mitte von Gleis 2	26
9.3 Brandszenario 2 Brand eines Triebwagens im nördlichen Drittel des Gleises.....	32
9.4 Brandszenario 3 Brand eines Triebwagens im südlichen Drittel des Gleises	38
9.5 Schlussfolgerungen.....	44
10 Zusammenfassung	46
Anlage 1	CD-ROM mit Videoclips (Darstellung der optischen Rauchdichte und der Erkennungsweite)
Anlage 2	Erläuterung der 18 Videoclips auf der CD-ROM
Anlage 3	Berechnung der Räumungszeiten
Anlage 4	Papierausdrucke der verwendeten Planunterlagen

1 ANLASS UND AUFTRAG

Wir wurden von den Berliner Verkehrsbetrieben mit der Erarbeitung der 2. Revision des Rauchschutznachweises für den U-Bahnhof Paradesstraße beauftragt.

Die vorliegende 2. Revision der Gutachtlichen Detailstellungnahme untersucht die Rauchausbreitung im U-Bahnhof im Falle eines Triebwagenbrandes und dient als Nachweis, dass die im Bestand vorhandenen Öffnungen für die Rauchableitung eine ausreichend hohe raucharme Schicht im Brandfall während des erforderlichen Zeitraums für die Evakuierung (Phase der Selbstrettung) des U-Bahnhofs gewährleisten.

Weitere brandschutztechnische Belange sind nicht Gegenstand dieser Gutachtlichen Detailstellungnahme.

Die Erarbeitung der Gutachtlichen Detailstellungnahme erfolgt unter Berücksichtigung der Forschungsergebnisse auf dem Gebiet des vorbeugenden baulichen Brandschutzes.

2 GRUNDLAGEN DER BEURTEILUNG

2.1 Verwendete Unterlagen

- Planunterlagen

Für die Erarbeitung der Gutachtlichen Detailstellungnahme wurden folgende Planunterlagen verwendet:

Planbezeichnung (Bauteil)	Zg.-Nr.:	Projekt-Nr:	Datum	Maßstab
Bahnsteig-/ Verteiler- und Strassenebene Grundrisse, Schnitt Variante A	PS-VP-A-B	A27257	25.10.2011	1:200
Bahnsteigebene, Verteilerebene Grundriss, Längsschnitt Achse 1 bis 18	PS_PG010	A27257	12.10.2015	1:100
Bahnsteigebene, Verteilerebene Grundriss, Längsschnitt Achse 18 bis 26	PS_PG011	A27257	12.10.2015	1:100
Verteilerebene Grundriss Achse 01 bis 25, Schnitte B-B, C-C	PS_PG004	A27257	12.10.2015	1:100
Straßenebene Lageplan	PS_PG002	A27257	12.10.2015	1:500
Verteilerebene Grundriss Achse 01 bis 25, Schnitte B-B, C-C	PS_PG003	A27257	12.09.2018	1:100

- Evakuierungsberechnung für den U-Bahnhof Paradesstraße vom 10.09.2018, zur Verfügung gestellt von den Berliner Verkehrsbetrieben

2.2 Literatur

- [1] ISO/CD 13388 – “Fire Safety Engineering, Design Fire Scenarios and Design Fires”. Draft Feb. 1997
- [2] McGrattan, K. B. a. o.: Fire Dynamics Simulator (Version 5.5.3) – User’s Guide. National Institute of Standards and Technology
- [3] Hosser, D., Zehfuß, J., Dehne, M.: Schutzzielorientierte brandschutztechnische Bemessung für mehrgeschossige Gebäude. Stahlbau, 73. Jahrgang, Heft 4, S. 242 – 248
- [4] vfdb-Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Erarbeitet vom vfdb-Referat 4, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser. Fassung November 2013
- [5] Jin, Z.: Visibility and Human Behavior in Fire Smoke, in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd Ed. 2002
- [6] Mangs, J., Keski-Rahkonen, O.: Characterization of the Fire Behaviour of a Burning Passenger Car. Parts I and II. Fire Safety Journal Vol. 23 No. 1, 1994, Elsevier Science, Oxford (GB)

- [7] Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig: Arbeitsblatt zur Brandsimulationsrechnung bezogen auf das Fahrzeug der Baureihe – A3L - 67
- [8] British Standards, Draft for Development DD 240, Fire Safety Engineering in Buildings; Part 1: “Guide to the Application of Fire Safety Engineering Principles”, 1997
- [9] Brein, D.: Anwendungsbereiche und -grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchausbreitung in Gebäuden (Plume-Formeln). Erarbeitet an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) Hertzstrasse 16, D – 76187 Karlsruhe
- [10] National Institute of Standards and Technology: “An Algorithm for Estimating the Plume Centerline Temperature in the Presence of a Hot Upper Layer.” Gaithersburg, Maryland, June 1998
- [11] National Institute of Standards and Technology: “Technical Reference Guide for FPEtool, Version 3.2.” Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland, Draft April 1995
- [12] Heskestad, G.: “Fire Plumes. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.” Section 1/ Chapter 6, P. 107-115, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, April 1990
- [13] JCSS: Probabilistic Model Code. Joint Committee on Structural Safety, 2001
- [14] Arbeitspapier des vfdb-Referats 4 „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“: Anhang zu QMV IV 04.04 – Bewertungen zu Fehlern; im Rahmen des Qualitätsmanagements nach ISO 9001 fortgeschriebene Statistik des Büros Brandschutz Consult Leipzig Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig.
- [15] DIN EN 1993-1-2, Eurocode 3 – „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln; Tragwerksbemessung für den Brandfall“; Deutsche Fassung, Ausgabe 12-2010
- [16] Morgan, H.; Gardner, J.: Design principles for smoke ventilation in enclosed shopping centers. Building Research Establishment Report, CI / SfB (K23), 1990, Borehamwood, Herts (GB)
- [17] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 6019, Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden
- [18] Fire Engineering Guidelines. Australian Building Codes Board (ABCB), Australian Fire Authorities Council (AFAC), The Institution of Engineers, Australia (IEAust)
- [19] Fire Engineering Design Guide. Centre for Advanced Engineering, Christchurch, New Zealand, April 2001

- [20] Autorenkollegium: Hinweise zur Berechnung mittels Brandsimulationsmodelle, Stand 16.04.2009
- [21] Autorenkollegium: Hinweise zur Brandmodellierung mittels Feldmodell FDS 5, CFX, Fluent und KOBRA 3-D, Stand 01.01.2008
- [22] Technischen Regeln für Straßenbahnen – Brandschutz in unterirdischen Betriebsanlagen“ (TRStrab Brandschutz) vom 24. Juni 2014

3 AUSGANGSSITUATION

In U-Bahnhöfen können insbesondere zu den Hauptverkehrszeiten hohe Personenanzahlen auftreten. Im Brandfall muss sichergestellt sein, dass die Personen ausreichend schnell und sicher ins Freie gelangen können. Dabei ist als maßgebendes Brandszenario ein brennender Triebwagen in der Bahnsteigebene anzunehmen. Während der Entfluchtung dürfen die Personen nicht in kritischem Maße durch Rauch und toxische Gase beeinträchtigt werden, daher ist rechnerisch eine ausreichend hohe raucharme Schicht für den erforderlichen Zeitraum der Selbstrettung nachzuweisen.

Die Berechnung der Evakuierungszeit mit anerkannten Methoden hat ergeben, dass der U-Bahnhof Paradedstraße in einer Zeitspanne von 7,3 Minuten geräumt werden kann. Diese Angaben beruhen auf Studien des Auftraggebers. Eigene Untersuchungen zur Evakuierung wurden durch den Unterzeichner nicht vorgenommen. Während der Zeitspanne von mind. 7,3 Minuten muss eine ausreichend hohe raucharme Schicht vorhanden sein.

Die Notwendigkeit der vorliegenden 2. Revisionsfassung ergibt sich daraus, dass im Vergleich zur 1. Revisionsfassung zur Gutachtlichen Detailstellungnahme vom 01.12.2015, in der Verteilerhalle der östliche Notausgang geometrisch verändert wurde, so dass eine Veränderung der Ventilationsbedingungen im Brandfall zu erwarten ist. Zudem wurde die Evakuierungsberechnung vom Auftraggeber überarbeitet. Die Räumungszeit des Bahnhofes wurde in diesem Zusammenhang von 8,0 Minuten auf 7,3 Minuten reduziert.

In der raucharmen Schicht müssen bestimmte Schutzzielkriterien bezüglich der Erkennungsweite, der optischen Rauchdichte und der Konzentration toxischer Gase eingehalten werden [4].

Die Berechnungen werden aufgrund der geometrischen und strömungstechnischen Randbedingungen mittels eines CFD-Modells durchgeführt.

Im EN Grundlegendokument (89/106/EEC vom 21. Dezember 1998) ist verankert, dass anstelle von Realversuchen Ingenieurmethoden des Brandschutzes angewendet werden dürfen, sofern diese ausreichend validiert sind. Das für die vorliegende Problemstellung verwendete CFD-Modell FDS (Fire Dynamic Simulator) vom National Institute of Standards and Technology (NIST) aus Gaithersburg, USA, stellt ein vielfach validiertes und weltweit anerkanntes Modell dar.

Der vorliegende CFD-Rauchschutznachweis wird gemäß dem vfdb-Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“, Ausgabe November 2013, durchgeführt [4]. Dieser Leitfaden lehnt sich an internationale Normen an (Technical Reports ISO TR 13387 Part 1-8, siehe [1]) und stimmt inhaltlich mit den anderen europäischen und internationalen Design-Guides überein, z. B. mit dem British Standard [8], den Australien Building Codes [18] und dem Neuseeländischen Fire Engineering Design Guide [19].

Mittels CFD-Simulation wird nachgewiesen, dass für eine Zeitspanne von mind. 7,3 Minuten (Evakuierungszeit) eine ausreichend hohe raucharme Schicht auf dem Bahnsteig und in der Verteilerebene aufrechterhalten bleibt.

4 BESCHREIBUNG DES VERWENDETEN CFD-MODELLS

4.1 Allgemeines

Bei dem für die Berechnung der Rauchausbreitung beim U-Bahnhof Paradestraße verwendeten Modell FDS [2] vom National Institute of Standards and Technology (NIST) handelt sich um ein Computational Fluid Dynamics (CFD)- Programm, welches neben den für Feldmodelle üblichen Navier-Stokes-Gleichungen zusätzlich noch eine Energieerhaltungsgleichung für die Bestimmung des Temperaturfeldes sowie Gleichungen für die Beschreibung der Turbulenzen beinhaltet.

Das Modell enthält ein Verbrennungsmodell, das eine Beschreibung des Sauerstoffverbrauches und der Entstehung von Verbrennungsprodukten ermöglicht. Der Algorithmus für die Beschreibung des strahlungsbedingten Wärmeaustauschs berücksichtigt neben dem Energieaustausch zwischen der Flamme und der Festkörperoberfläche auch die Absorption und Emission von Strahlung im Gasvolumen.

Das verwendete CFD-Modell FDS (**F**ire **D**ynamics **S**imulator) ist für die Behandlung der vorliegenden brandschutztechnischen Fragestellungen geeignet und ermöglicht die Beschreibung folgender Brandprozesse und Parameter:

- Wärmetransport durch Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung,
- Turbulente Strömungen,
- Rauchgasmenge und Zusammensetzung,
- Entwicklung von Rauchgasschichten und raucharmen Bereichen,
- Erkennungsweite innerhalb von Rauchgasen,
- Rauchausbreitung in andere Raumbereiche bei beliebig komplizierten Geometrien,
- Temperaturentwicklung,
- Konzentration von Gasen und
- Strömungsgeschwindigkeiten sowie Massenfluss.

Für die Berechnung der genannten Größen wird das Volumen des betrachteten Gebäudes sowie ein Teil der äußeren Umgebung in Teilvolumina (Rechengitter) unterteilt. Die fundamentalen Erhaltungsgleichungen für Energie, Impuls und Masse werden auf den einzelnen Elementen des Rechengitters numerisch gelöst. Die oben genannten Größen können dabei orts- und zeitabhängig bestimmt werden.

Bei der Bewertung der von einem Brand ausgehenden Gefahren spielt das Ausmaß der Verrau-
chung und die damit einhergehende Reduktion der Erkennungsweite eine wesentliche Rolle. In Vereinfachung der komplexen Vorgänge bei der Entstehung und Ausbreitung von Rauch lässt dieser sich als ein Medium beschreiben, welches zunächst im Bereich der Verbrennungszone erzeugt und durch die auftriebsbehaftete Konvektionsströmung transportiert wird, beeinflusst von

Ventilationsströmungen, die durch Gebäudeöffnungen oder mechanische Ventilationssysteme hervorgerufen werden.

Dabei wird der heiße Brandrauch durch Einmischung von Luft verdünnt und abgekühlt, wobei er an Volumen zunimmt. Es bilden sich so die von Brandereignissen bekannten Phänomene wie Plume, ausgedehnte Rauchwalzen und lokale Wirbel, die nach dem derzeitigen Stand der Technik ausschließlich mit CFD-Modellen hinreichend genau simuliert werden können.

4.2 Fehlergrenzen der Methodik

Aufgrund notwendiger Idealisierungen innerhalb der CFD-Simulationsmodelle sind Abweichungen zwischen den rechnerisch ermittelten Strömungsvorgängen und der experimentell bestimmten Rauchausbreitung unvermeidbar.

Die Modellunsicherheit stellt die Größe dar, mit der das durch ein Modell berechnete Ergebnis korrigiert werden muss, um das tatsächliche, experimentell bestimmte Resultat zu erhalten. Dabei wird vorausgesetzt, dass das Experiment das exakte Ergebnis darstellt. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass auch Experimente aufgrund von naturgemäß vorhandenen Messfehlern gewissen Unsicherheiten unterworfen sind.

Abweichungen zwischen Modellen und Experimenten können durch Unsicherheitsfaktoren beschrieben werden. Möglich sind z. B. Multiplikative Ansätze, die sich wie folgt ergeben:

$$\eta = \frac{S_{T,exp}}{S_{T,cal}}$$

mit

η Modellunsicherheitsfaktor für die Beschreibung der Rauchausbreitung [-]

$S_{T,cal}$ berechnete Rauchausbreitung [-]

$S_{T,exp}$ experimentell ermittelte Rauchausbreitung [-]

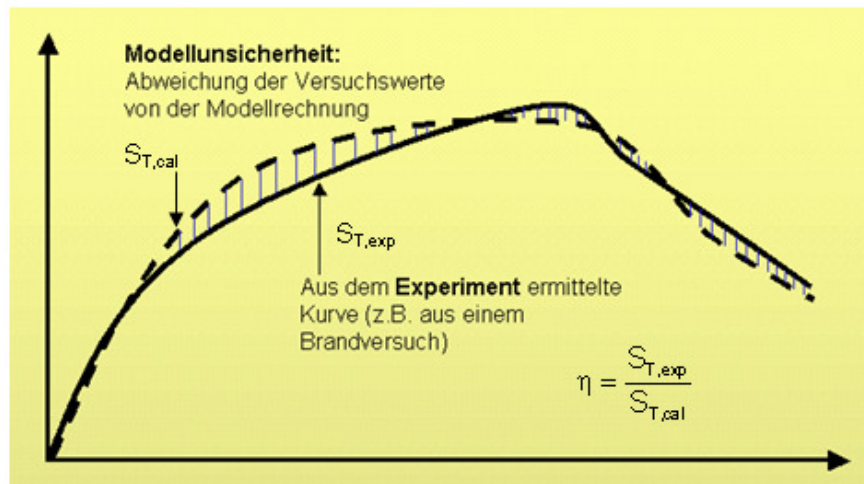


Abb. 1 Beschreibung von Modellunsicherheiten durch einen multiplikativen Ansatz

Bei Sicherheitsbetrachtungen (Systemzuverlässigkeitsanalysen) können die Modellunsicherheiten gemäß den Vorschlägen des JCSS Probabilistic Model Code [13] als normal verteilte Zufallsvariablen mit dem Mittelwert 1 und modellspezifischen Variationskoeffizienten verwendet werden, die jeweils auf Grundlage des Vergleiches der Ergebnisse von Brandversuchen mit den Resultaten aus entsprechenden Modellrechnungen ermittelt werden.

Auf Grundlage von eigenen Untersuchungen und einer Studie in [14] kann bei dem verwendeten CFD-Modell eine Modellunsicherheit von ca. 10 % angenommen werden.

Die Unsicherheiten beim Nachweis bezüglich der Streuung der Brandlasten und der naturgemäß stets vorhandenen Abweichungen des Modells zur Realität werden durch die konservative Festlegung der Rauchtentstehungsrate abgedeckt.

Gemäß [7] ist beim Bemessungsbrand des Triebwagens BR – F 74 für den Zeitraum $t = 0$ bis $t = 720$ sec. eine Rauchtentstehungsrate von 0,046 g/g anzusetzen. Dieser Wert wurde zur Abdeckung der Unsicherheiten beim Nachweis mit einem Sicherheitsbeiwert von 1,13 versehen, so dass in der Simulation eine Rauchtentstehungsrate von 0,05 berücksichtigt wurde.

Eine in der Realität meist auftretende Schwelbrandphase wird zudem vernachlässigt, es wird vom Zeitpunkt $t = 0$ an ein quadratisch anwachsender Brand angenommen.

Ggf. vorhandene Abweichungen der Modellrechnung von der Realität werden durch die vorgehaltenen Sicherheiten zuverlässig abgedeckt.

5 SCHUTZZIELE

Die Beurteilung einer ggf. vorhandenen Gefährdung durch Rauchgase erfolgt durch das Heranziehen von quantitativen Schutzzielkriterien für den Personenschutz.

Es sind nach [4] die folgenden Grenzwerte einzuhalten:

- **Erkennungsweite ≥ 10 m für reflektierende Zeichen**
- **Rauchdichte D_L (optische Dichte) $\leq 0,15 \text{ m}^{-1}$**

Die Verwendung des Grenzwertes von $0,15 \text{ 1/m}$ für die optische Dichte ist vertretbar, weil der Bahnhof sehr übersichtlich ist und in mehrere Richtungen entfluchtet werden kann.

Erfahrungsgemäß werden die Grenzkonzentrationen toxischer Gase immer eingehalten, wenn die Kriterien bezüglich der Erkennungsweite und der optischen Rauchdichte erfüllt werden. Die CO-Konzentration muss daher nicht weiter betrachtet werden, da sie nicht die maßgebende Ergebnisgröße darstellt.

Beurteilungsgröße	längere Aufenthaltsdauer (< 30 min)	mittlere Aufenthaltsdauer (ca. 15 min)	kurze Aufenthaltsdauer (< 5 min)
CO-Konzentration	100 ppm	200 ppm	500 ppm
CO ₂ -Konzentration	1 Vol.-%	2 Vol.-%	3 Vol.-%
HCN-Konzentration ⁽¹⁾	8 ppm	16 ppm	40 ppm
Wärmestrahlung	1,7 kW/m ²	2,0 kW/m ²	< 2,5 kW/m ²
Gastemperatur ⁽²⁾	45 °C	50 °C	50 °C
Rauchdichte D_L	0,1 m ⁻¹	0,1 m ⁻¹ / 0,15 m ⁻¹ ⁽³⁾	0,1 m ⁻¹ / 0,2 m ⁻¹ ⁽³⁾
Erkennungsweite ⁽⁴⁾	10 m – 20 m	10 m – 20 m	10 m – 20 m

Abb. 2 Schutzzielkriterien nach Tabelle 8.3 des vfdb-Leitfadens [4]

Bei einer optischen Rauchdichte $< 0,15 \text{ m}^{-1}$ sind die Konzentrationen toxischer Gase in der raucharmen Schicht immer kleiner als die zulässigen Grenzwerte. Im Rahmen des vfdb-Referats 4 „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ herrscht daher Übereinstimmung in der Vorgehensweise, dass die Konzentrationen toxischer Gase in der raucharmen Schicht bei Betrachtung der optischen Rauchdichte und der Erkennungsweite nicht weiter untersucht werden müssen.

Die Erkennungsweite ist eine komplexe, von vielen Einflussfaktoren (Eigenschaften und Dichte der Rauchpartikel, Ausleuchtung des Raumes, Eigenschaften des wahrzunehmenden Objektes, Blickwinkel, individuelle Personeneigenschaften, Augenreizung durch Brandgase, etc.) abhängige

Größe. Dennoch zeigt die Auswertung von Rauchversuchen [5], dass ein im Wesentlichen reziproker Zusammenhang zwischen Rauchdichte und Erkennungsweite besteht.

Die Reduzierung der Erkennungsweite ist eine Folge der Lichtabsorption, die durch die optische Dichte der Rauchgase beschrieben wird.

Die Lichtabsorption wird durch die folgende Beziehung beschrieben:

$$I / I_0 = e^{-k \cdot x}$$

mit:

I_0 Intensität des unbehinderten Lichtstrahles,

I durch Absorption und Streuung durch die Rauchgase geschwächte Lichtintensität,

k Extinktionskoeffizient.

Der Extinktionskoeffizient k ergibt sich aus der Beziehung

$$k = \sigma_s \cdot \rho_s$$

mit:

σ_s spezifischer Extinktionskoeffizient in m^2/g ,

Die optische Dichte OD ergibt sich entsprechend zu

$$OD = k / \ln 10.$$

Zwischen der Erkennungsweite S und dem Extinktionskoeffizienten k besteht die Beziehung

$$S = C / k \text{ für nicht reizenden Rauch bzw.}$$

$$S = C / k (0.133 - 1.47 \log k) \text{ für Rauch, der die Augen reizt,}$$

wobei die Konstante C für selbstleuchtende Objekte etwa gleich 8 und für lichtreflektierende Objekte etwa gleich 3 zu setzen ist.

Im vorliegenden Fall wird gemäß [4] eine Erkennungsweite von mindestens 10 m für *reflektierende* Zeichen gefordert.

Eine optische Rauchdichte von $0,15 m^{-1}$ darf in der raucharmen Schicht während der erforderlichen Zeitspanne für die Evakuierung (7,3 Minuten) nur lokal (Brandherdnähe) begrenzt erreicht oder überschritten werden.

Das Schutzziel besteht darin, dass eine mindestens 2,0 m hohe raucharme Schicht aufrecht erhalten bleiben muss, in der die oben genannten Schutzzielkriterien bezüglich der erforderlichen

Mindesterkennungsweite und der maximalen optischen Rauchdichte eingehalten werden.

Gemäß Tabelle 3.2 des vfdb-Leitfadens „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [4] muss die Einhaltung der Schutzzielkriterien bezüglich des Schutzziels der Begrenzung der Ausbreitung von Feuer und Rauch im Rettungswegbereich (hier: Bahnsteig, Treppen und Verteilerebene) mindestens für den Zeitraum der Selbstrettung eingehalten werden.

Tabelle 1 Konkretisierung bauordnungsrechtlicher Schutzziele

Funktionale Anforderung	Konkretisierung durch Angabe einzuhaltender Leistungskriterien
Begrenzung der Ausbreitung von Feuer und Rauch	Rauchfreihaltung für die eigenständige Flucht der Personen (objektbezogen zum Beispiel mindestens 10 Minuten)
Rettung von Menschen	Sicherer Aufenthalt in gesicherten Bereichen bis zur Rettung durch die Feuerwehr (objektbezogen zum Beispiel mindestens 30 Minuten)
Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten innerhalb eines Gebäudes	Standicherheit der Konstruktion mehrgeschossiger Bauten (objektbezogen zum Beispiel mindestens 90 Minuten), Rauch- und Wärmeabzug über Zeitraum x bei maximaler Rauchschichtdicke y

Es wird aufgrund der Evakuierungsberechnung von einer Zeitspanne von 7,3 Minuten ausgegangen, bis zu der sich die Personen aus dem Gefahrenbereich entfernt haben.

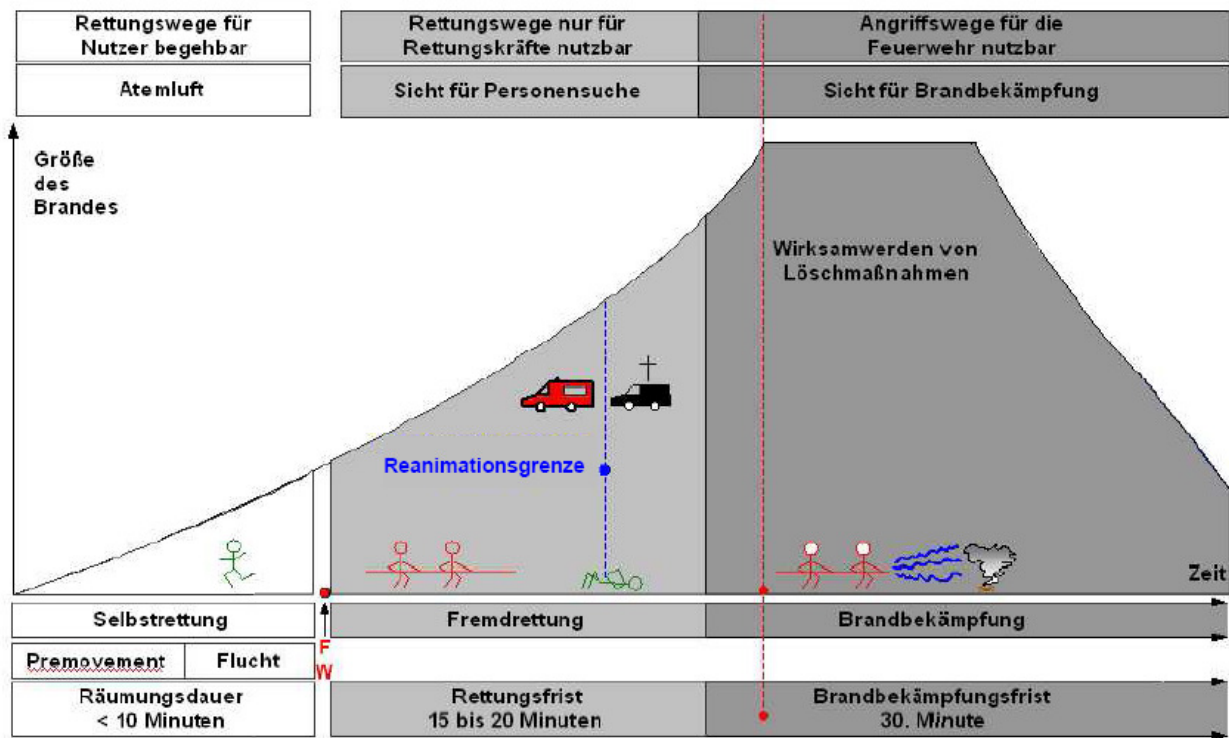


Abb. 3 Brandphasen mit zugeordneten Hauptnutzungen der Rettungswege

6 GEOMETRISCHE RANDBEDINGUNGEN

In der vorliegenden Gutachtlichen Detailstellungnahme werden nur die geometrischen und strömungsrelevanten Randbedingungen dargelegt, welche die Rauchausbreitung beeinflussen könnten.

Der in der Simulation betrachtete Bereich besitzt eine Länge von ca. 180 m (siehe nachfolgende Abbildung).

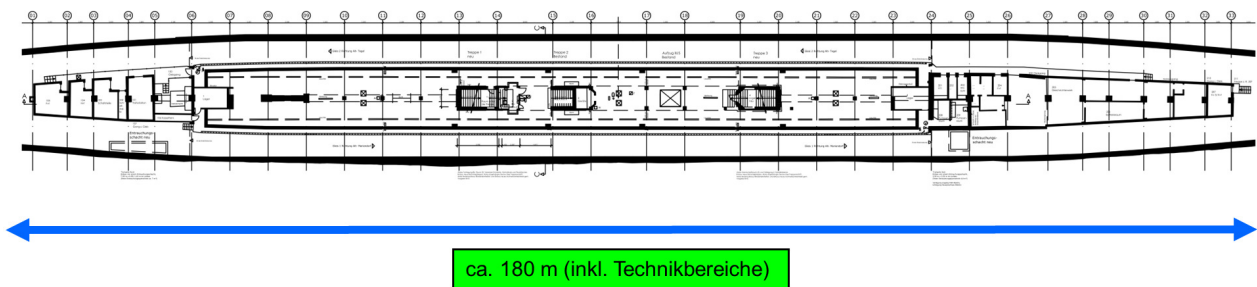


Abb. 4 Länge des betrachteten Bahnhofs

Der U-Bahnhof Paradesstraße weist zwei Gleise und einen Bahnsteig auf. Im mittleren Teil befinden sich drei Aufgänge in die Verteilerebene.

Nach Durchquerung der Verteilerebene gelangen die Personen über die vier Treppenanlagen ins Freie.

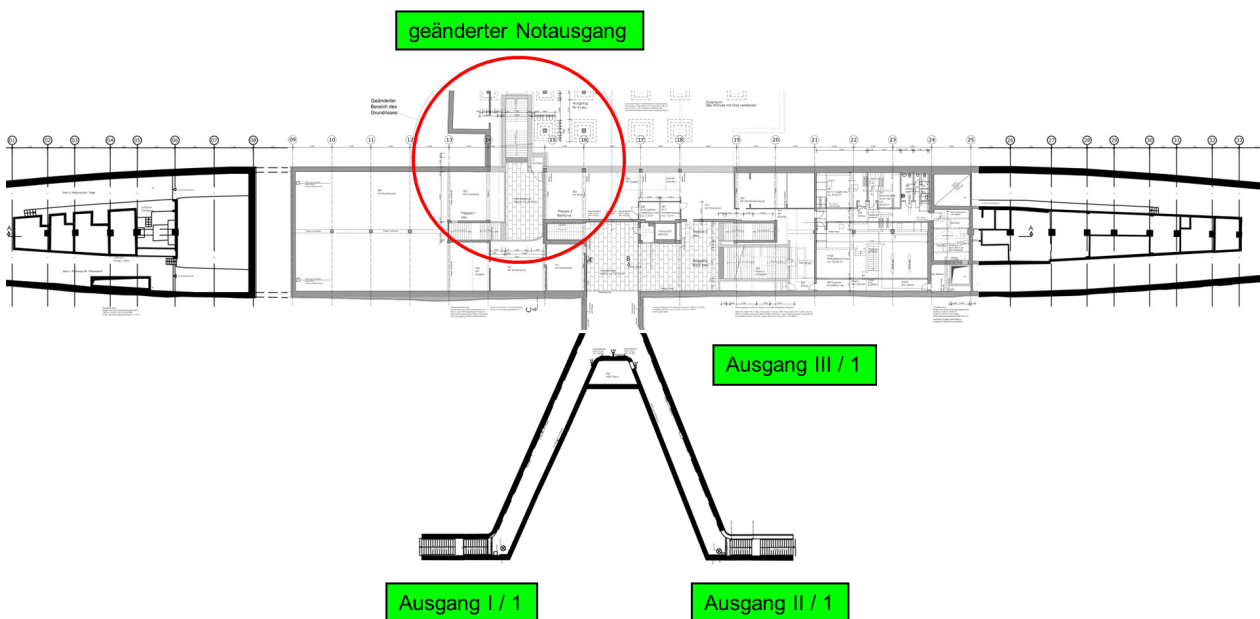


Abb. 5 Verteilerebene mit allen Ausgängen ins Freie

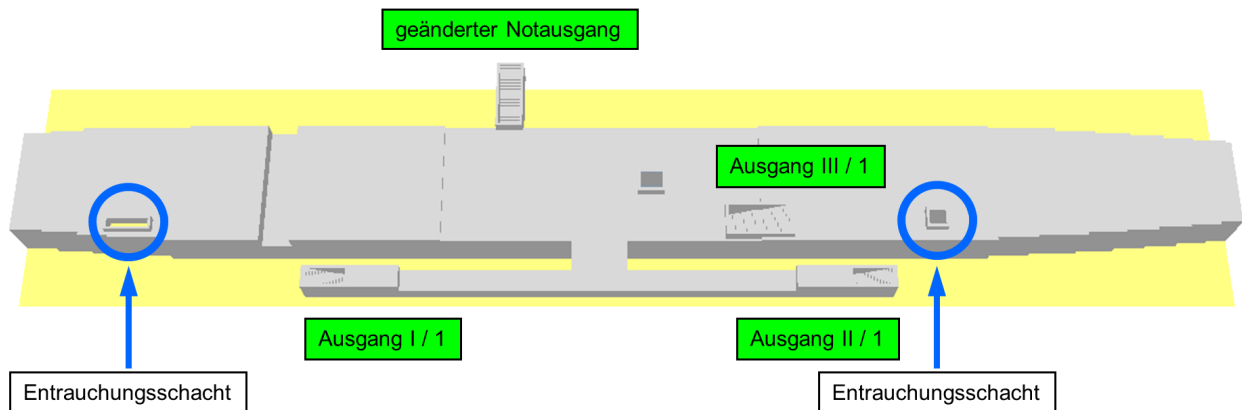


Abb. 6 alle Ausgänge und die Entrauchungsschächte im Modell

Die v-förmige Gabelung der Ausgänge I / 1 und II / 2 wurde zur Vereinfachung des Modells begradigt. Das Volumen und die lichten Maßen entsprechen weiterhin dem Bestand.

Die Zuluftnachströmung erfolgt über die Tunnelröhren. Je nach vorherrschender Längslüftung wird auch ein Teil der Abluft über die Röhren erfolgen. Die restliche Abluft strömt über die Treppenaufgänge in die Verteilerebene und von dort über die 4 Treppenaufgänge ins Freie.

In der vorliegenden 2. Revision der Gutachtlichen Detailstellungnahme sind oberhalb des Gleises 2 in der Tunnelröhre vor und nach dem Bahnsteig Entrauchungsschächte zur Rauchableitung angeordnet. Der nördliche Entrauchungsschacht weist nach Planangaben einen Entrauchungsquerschnitt von ca. 7,20 m² und der im südlichen Bereich von ca. 4,8 m² auf. In Summe ergibt sich somit ein geometrisch freier Entrauchungsquerschnitt von ca. 12,0 m².

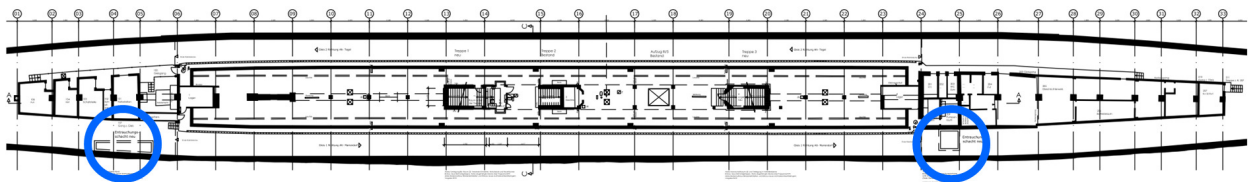


Abb. 7 Lage der Entrauchungsschächte

Eine zuginduzierte Tunnellängslüftung wurde außer Acht gelassen. Die brandbedingte Nachströmungsgeschwindigkeit im Gleis beträgt ca. 0,5 m/s.

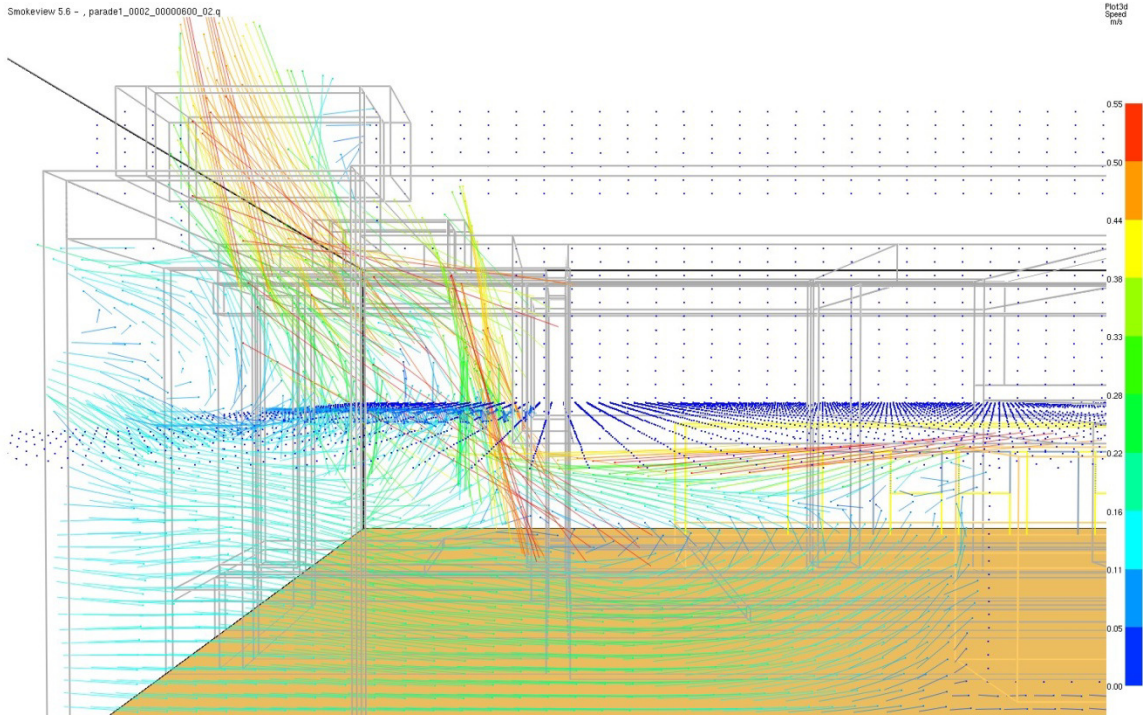


Abb. 8 Strömung in der Ebene des brennenden Triebwagens im Gleis

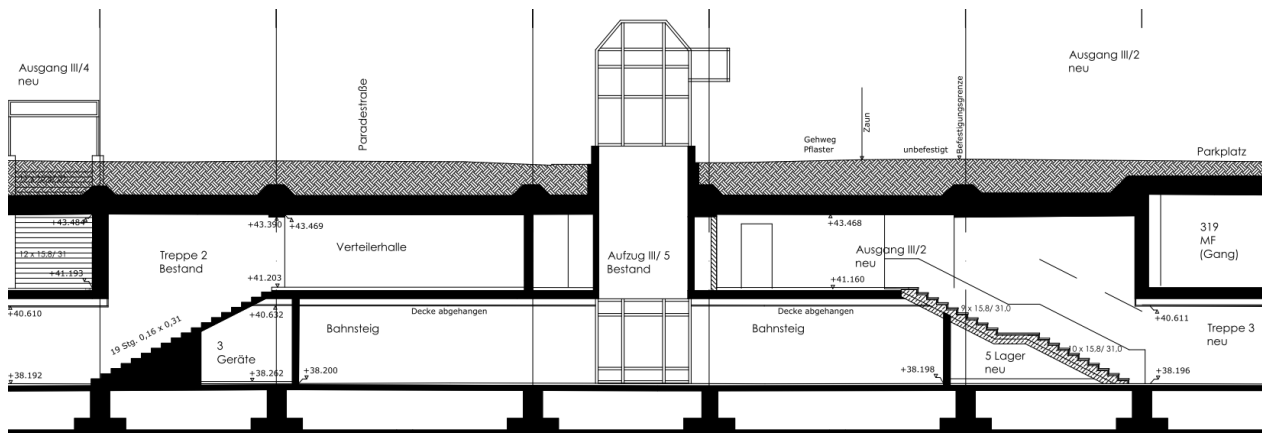


Abb. 9 Schnitt durch alle Ebenen (Bahnsteig und Verteilerebene)

Die Tunnelgewölbe bzw. Unterzüge sind von der Unterdecke verdeckt. Der gesamte Bereich des Bahnsteigs von Treppenaufgang zu Treppenaufgang wird bei einem Brandszenario wie ein Raum verraucht.



Abb. 10 Foto vom Bahnsteigbereich

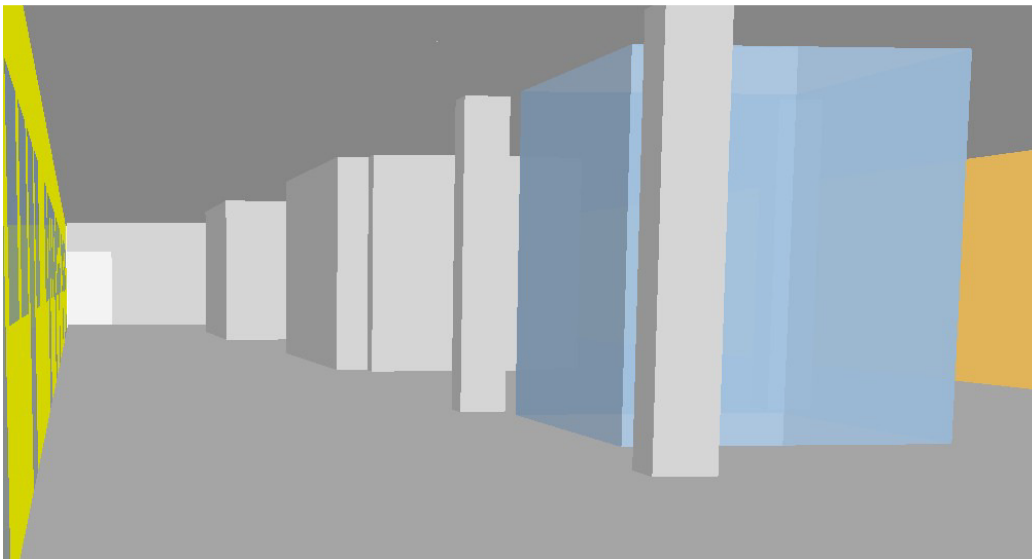


Abb. 11 Modellausschnitt Bahnsteig

7 BRANDSZENARIEN

Als Grund-Szenario wurde gemäß Abstimmung mit dem Auftraggeber der Brand eines Triebwagens vom Typ BR – F 74 (Großprofil) angenommen. Es werden zwei Brandszenarien in einem Fahrzeugteil ohne Fahrerraum vorausgesetzt, weil hier gemäß [7] die Wärmefreisetzungsrate höher ist als in einem Fahrzeugteil mit Fahrerraum.

Zum Brandverhalten des oben genannten Triebfahrzeuges erfolgten Materialprüfungen und rechnerische Untersuchungen, in deren Ergebnis eine Brandverlaufskurve bestimmt wurde [7].

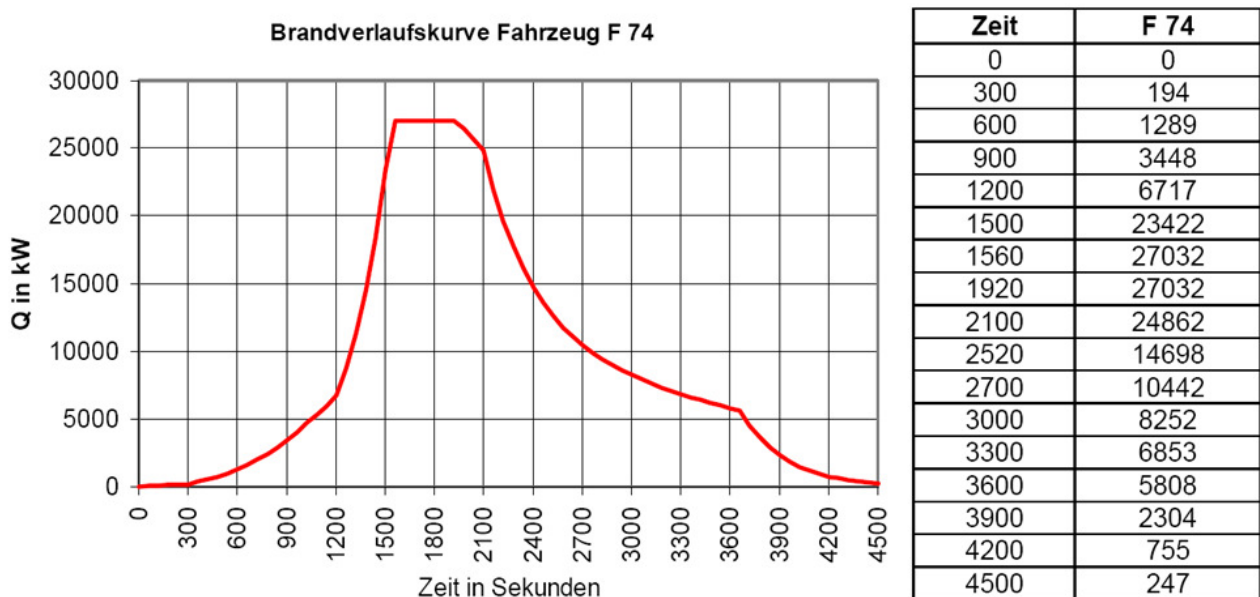


Abb. 12 Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate für den Brand eines Triebwagens F 74

Gemäß den „Technischen Regeln für Straßenbahnen – Brandschutz in unterirdischen Betriebsanlagen“ (TRStrab Brandschutz) vom 24. Juni 2014 [22] ist die Fahrzeit t_1 in der Simulation zu berücksichtigen. Nach Angaben des Auftraggebers beträgt t_1 für die Fahrtrichtung vom Bahnhof Platz an der Luftbrücke zum Bahnhof Paradestraße 70 Sekunden. Für die Gegenrichtung vom Bahnhof Paradestraße zum Bahnhof Tempelhof ist t_1 ebenfalls mit 70 Sekunden angegeben. Somit muss hier die maßgebliche Fahrzeit $t_1 = 70$ Sekunden in die Simulationsberechnung einfließen.

Konservativ wurde der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsrate nach Abb. 11 so angepasst, dass die Simulationszeit zum Zeitpunkt 70 Sekunden nach Brandbeginn startet. Zum Simulationszeitpunkt $t = 0$ Sekunden liegt somit bereits eine Wärmefreisetzungsrate von ca. 45 kW (konservativ linear ermittelt) vor.

Der durchschnittliche Heizwert der Brandlast wurde zu 20.220 kJ/kg angenommen. Als Rauchausbeute ist in [7] für den Zeitraum $t = 0$ sec. bis $t = 720$ sec. ein Wert von 0,046 g/g angegeben. Dieser Wert wurde zur Abdeckung von naturgemäß stets vorhandenen Unsicherheiten beim Nachweis mit einem Sicherheitsbeiwert von 1,13 belegt.

Tabelle 2 *Rauchausbeuten nach [7]*

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

Das vom Brand betroffene Fahrzeug wurde mit den folgenden Maßen beim Nachweis berücksichtigt:

- Länge 15,70 m
- Lichte Breite 2,40 m
- Lichte Höhe 2,20 m

Für den am Brand beteiligten Wagen wurden die nachfolgenden wärmetechnischen Kennwerte gemäß [7] verwendet:

- Material: Aluminium
- Materialdicke in mm 4
- Wärmeleitfähigkeit in W/mK 230
- Wärmekapazität in kJ/kgK 1,02
- Emissivität 0,8
- Dichte in kg/m³ 2.600

Eine Fahrzeugdämmung wird bei den thermischen Kennwerten nicht berücksichtigt, da die Dämmung mit verbrennt.

Der Boden des modellierten Fahrzeugs wird als inert angenommen. In Höhe des Bodens des Fahrzeugs wird in den Simulationen der Brandherd angeordnet.

Mit Brandbeginn (t = 0 sec.) werden die drei dem Bahnsteig zugewandten Türen konservativ als geöffnet simuliert. Damit wird berücksichtigt, dass das Fahrzeug am Bahnsteig einfährt, die Personen aussteigen und die Türen offen bleiben. Von t = 0 an findet somit bereits eine Rauchbeaufschlagung des Bahnsteigs statt.

Das Dach des Alu-Wagenkastens wird in der Simulation 5 Minuten nach dem Eintritt einer Wärmefreisetzung von > 1 MW geöffnet.

Es werden drei Brandszenarien untersucht:

- Brandszenario 1: brennender Triebwagen mittig im Bahnhof
- Brandszenario 2: brennender Triebwagen im nördlichen Drittel im Bahnhof
- Brandszenario 3: brennender Triebwagen im südlichen Drittel im Bahnhof

Eine zusätzliche Tunnellängslüftung wurde konservativ nicht angesetzt. Die durch den Brand bedingte Nachströmung besitzt eine Geschwindigkeit von ca. 0,5 m/s.

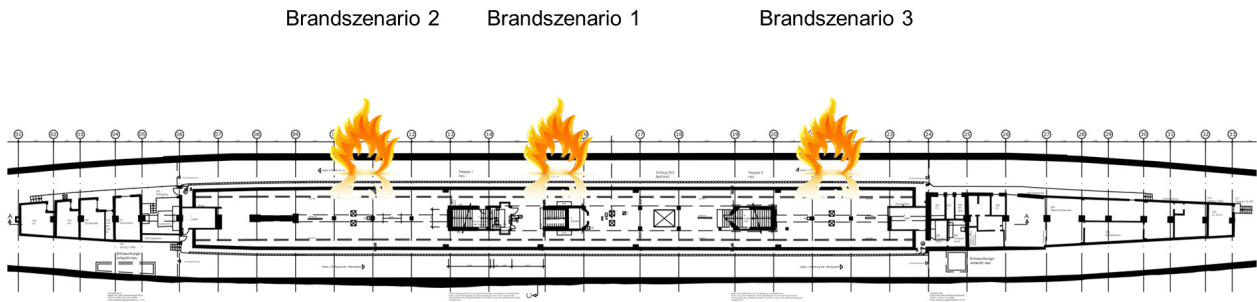


Abb. 13 Position des brennenden Triebwagens für Szenario 1 und 2

Der Extinktionskoeffizient bzw. die Optische Dichte ($D = K/2.3$) ergeben sich bei der Simulation als Produkt von Rußkonzentration [kgsoot/m^3] und spezifischem Extinktionskoeffizienten [m^2/kgsoot]. Der spezifische Extinktionskoeffizient (ca. 4000 – 9000 m^2/kgsoot) ist experimentell schwer zu bestimmen und hängt stark von den Randbedingungen bei der Verbrennung und dem Messverfahren ab. Trotzdem kommt diesem Parameter eine zentrale Bedeutung bei der Bewertung des Extinktionskoeffizienten / der Optischen Dichte zu. Auf der sicheren Seite liegend wurde im CFD-Modell der „Default“-Wert (8.700 m^2/kgsoot) verwendet.

8 3D-VOLUMENMODELL DES SIMULATIONSBEREICHES

Der bezüglich der Rauchausbreitung zu beurteilende U-Bahnhof Paradestraße wurde flächen- und volumengleich mit den tatsächlichen Gegebenheiten modelliert.

Es wurde die gesamte Geometrie der Station modelliert, weil der wechselseitige Bezug der Massenströme über die die Ebenen und die Tunnelanschlüsse verbindenden Öffnungen nur im Komplex betrachtet werden kann. Die Tunnelanschlüsse wurden offen simuliert.

Gemäß den Angaben in [21] wurde ein weiterer Zug im Bahnhof stehend modelliert, da sich die Belegung eines weiteren Gleises eher ungünstig auf die Rauchableitung auswirkt und die Berechnung somit konservativ ist.

Geometrische Details wie Stützen und Unterzüge wurden 1:1 im Modell berücksichtigt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das CFD-Modell des Bahnhofs aus verschiedenen Perspektiven.

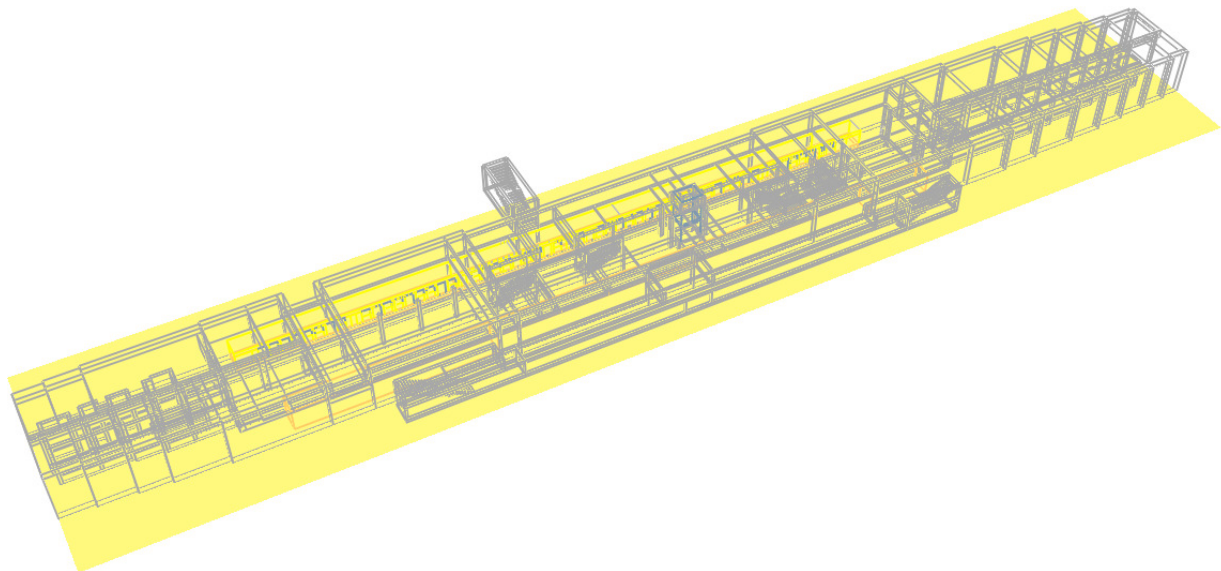


Abb. 14 Ansicht des simulierten Raumes

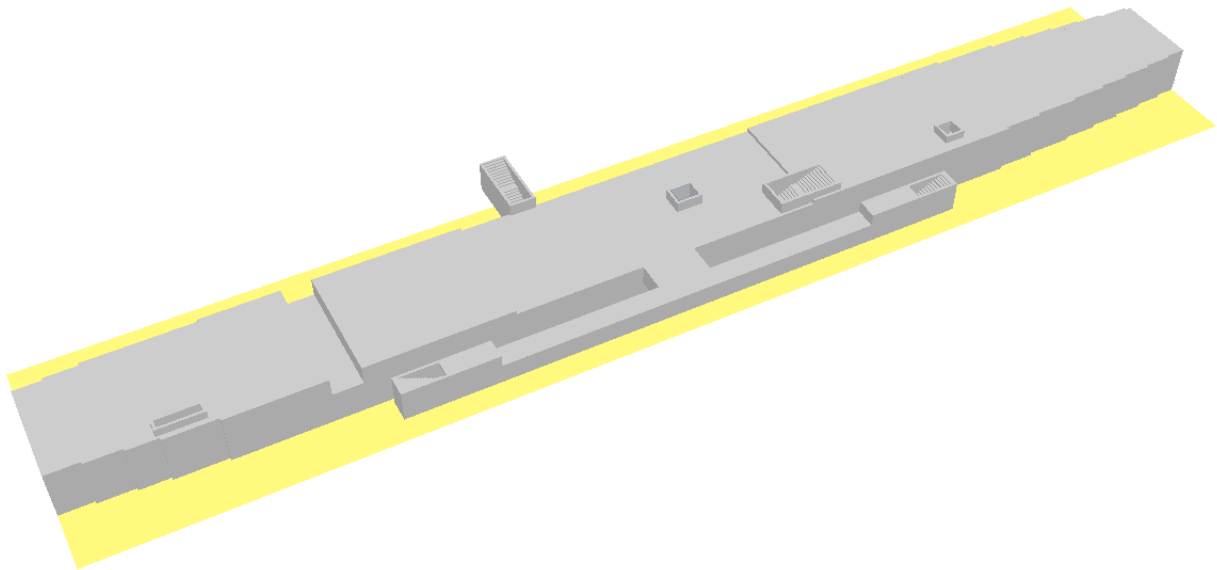


Abb. 15 Ansicht des simulierten Raumes

Schräge Linien und Bögen wurden näherungsweise durch quaderförmige Elemente angeschachtelt. Indem eine im CFD-Modell integrierte Glättungsfunktion verwendet wurde, ist der durch die Annäherung entstehende Strömungsunterschied zur Realität nur geringfügig und beeinflusst das Gesamtergebnis in Relation zum Einfluss des Quellterms (statistische Unsicherheiten bei der Abschätzung der Wärmefreisetzungsrate) erfahrungsgemäß nicht signifikant.

Die Berechnung der komplexen Strömungsvorgänge (Tunnellängslüftung, Rauchausbreitung über mehrere Ebenen), die geometrischen Randbedingungen sowie die Notwendigkeit, den Brandherd detailliert im Modell abzubilden, erfordert eine im Verhältnis zu den Gesamtabmessungen des Gebäudes feine Einteilung des Rechengitters. Der Knotenabstand des verwendeten Gitters beträgt im Brandnahbereich 20 cm und in untergeordneten Bereichen 40 cm. Insgesamt ergibt sich auf diese Weise eine Anzahl von knapp 2,4 Millionen Zellen (siehe Abb. 16).

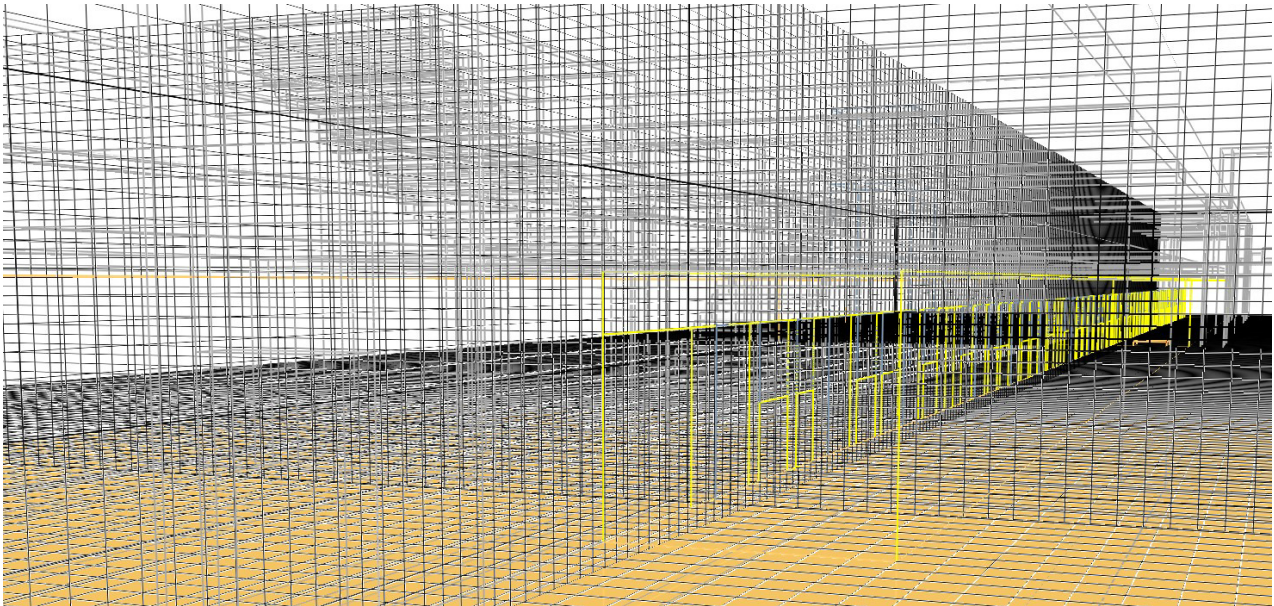


Abb. 16 *Verwendetes Rechengitter für die CFD-Simulation des U-Bahnhofes mit ca. 2.430.000 Zellen*

Die Brandsimulationszeit wird auf maximal 20 Minuten begrenzt, da zu diesem Zeitpunkt bereits alle Ebenen vollständig verrauchert sind. Die Außentemperatur wurde zu 20°C angenommen.

9 ERGEBNISSE

9.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die Ergebnisse der CFD-Simulationen für die oben erläuterten zwei Brandszenarien dargestellt und erläutert. Die Auswertung erfolgt anhand von Einzelbildern für die Parameter „Erkennungsweite in m für reflektierende Zeichen“ und „Optische Rauchdichte in 1/m“ zu den Zeitpunkten

- $t = 5$ Minuten (300 Sekunden) und
- $t = 7,3$ Minuten (436 Sekunden - Evakuierungszeit).

Zusätzlich wird der Parameter „Optische Rauchdichte“ zu den Zeitpunkten dargestellt, ab denen die Räumung auf dem Bahnsteig, in der Verteilerebene zu den Ausgängen I / 1, II / 1, III / 1 und im geänderten Notausgang I abgeschlossen sein muss.

Der Parameter „Optische Rauchdichte“ wird jeweils im Horizontalschnitt in einer Höhe von 2,0 m über der Fußbodenebene des Bahnsteigs und der Schalterhalle sowie im Vertikalschnitt ausgewertet. Die Auswertung des Parameters „Erkennungsweite“ wird jeweils im Horizontalschnitt in einer Höhe von 2,0 m über der Fußbodenebene des Bahnsteigs ausgewertet.

Ergänzt werden die Einzelbilder durch 18 Videoclips in der Anlage 1, aus denen der zeitliche Verlauf der Ergebnisgrößen „Optische Rauchdichte in 1/m“ und „Erkennungsweite in m“ entnommen werden kann. Die Videoclips werden in Anlage 2 erläutert.

Neben den Bildern sind stets Legenden für den jeweiligen Parameter platziert. Unten im Bild kann jeweils die Zeitachse eingesehen werden.

9.2 Brandszenario 1 Brand eines Triebwagens in der Mitte von Gleis 2

Smokeview 6.0.3 – Aug 18 2012

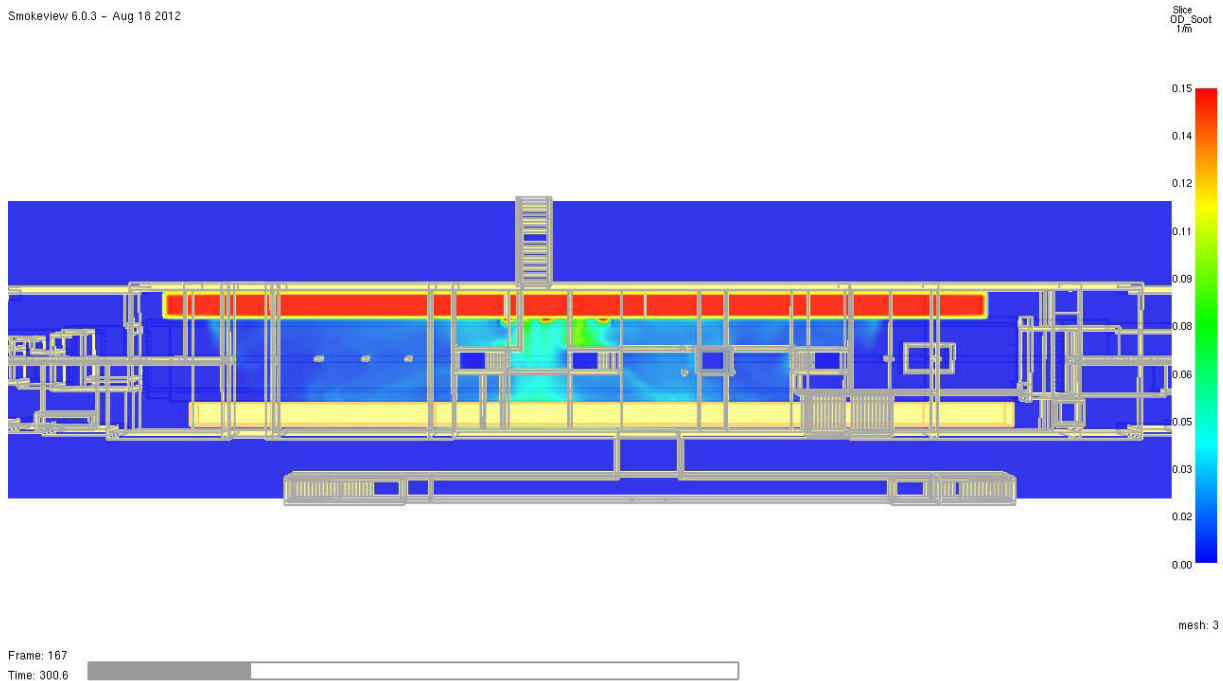


Abb. 17 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeview 6.0.3 – Aug 18 2012

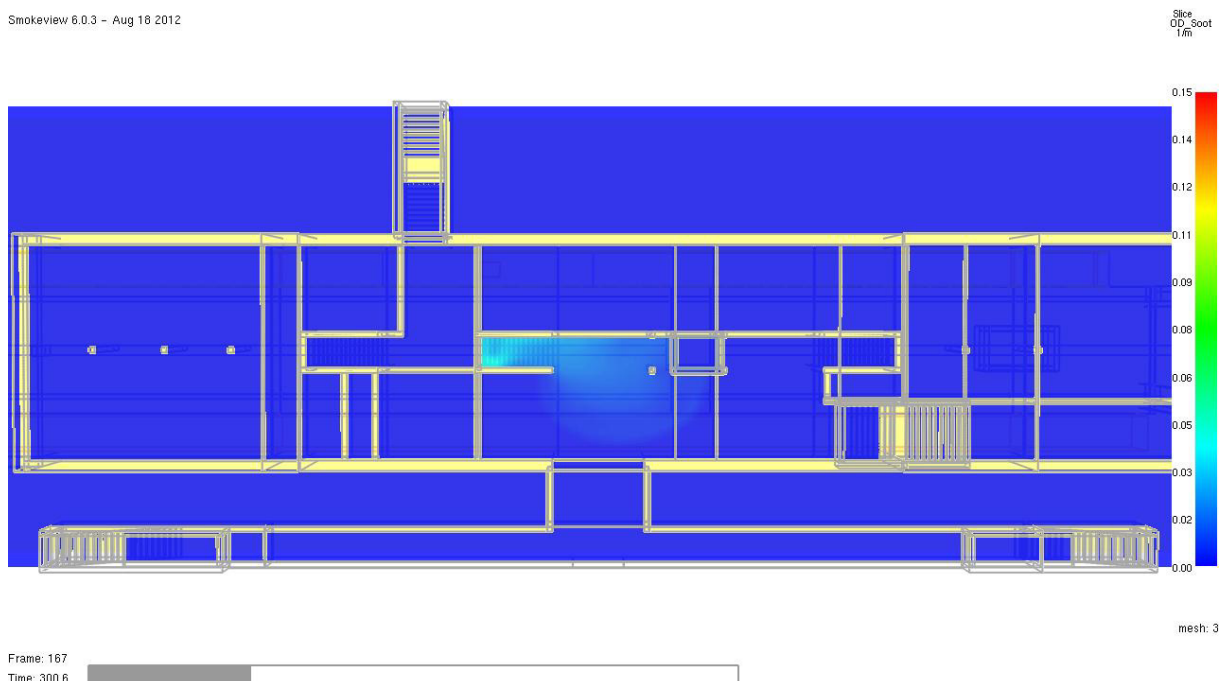


Abb. 18 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

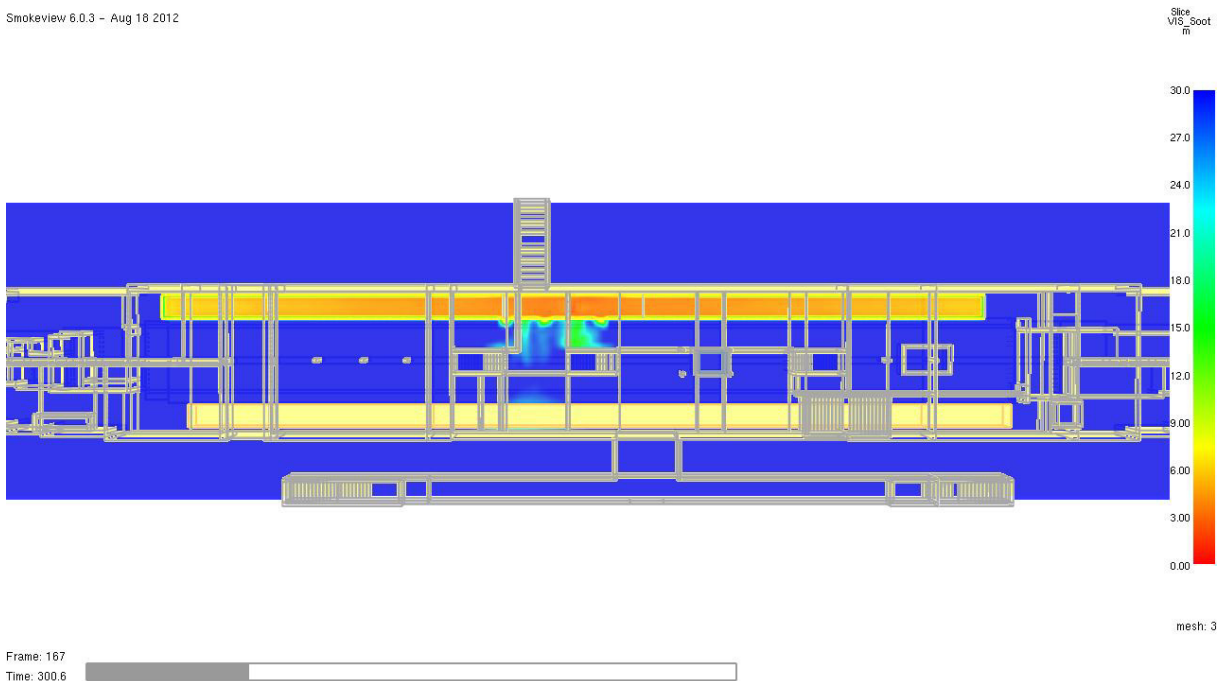


Abb. 19 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt. Es ist praktisch keine nennenswerte Sichttrübung in der Nachweisebene erkennbar.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

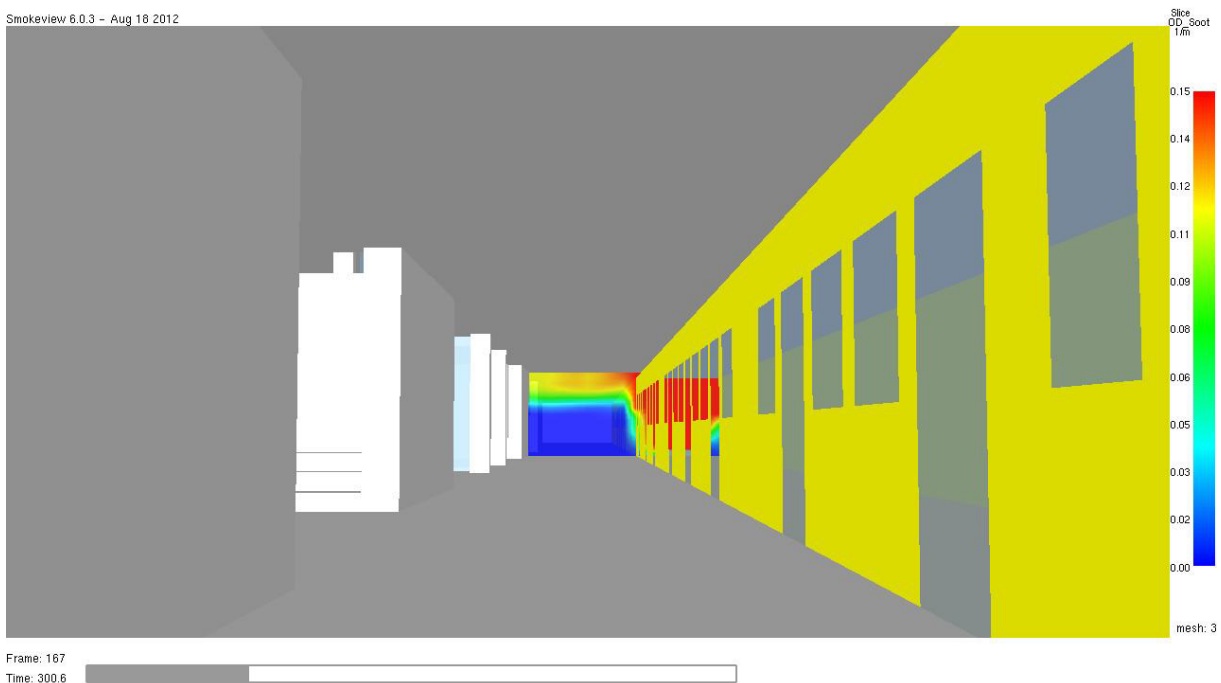


Abb. 20 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

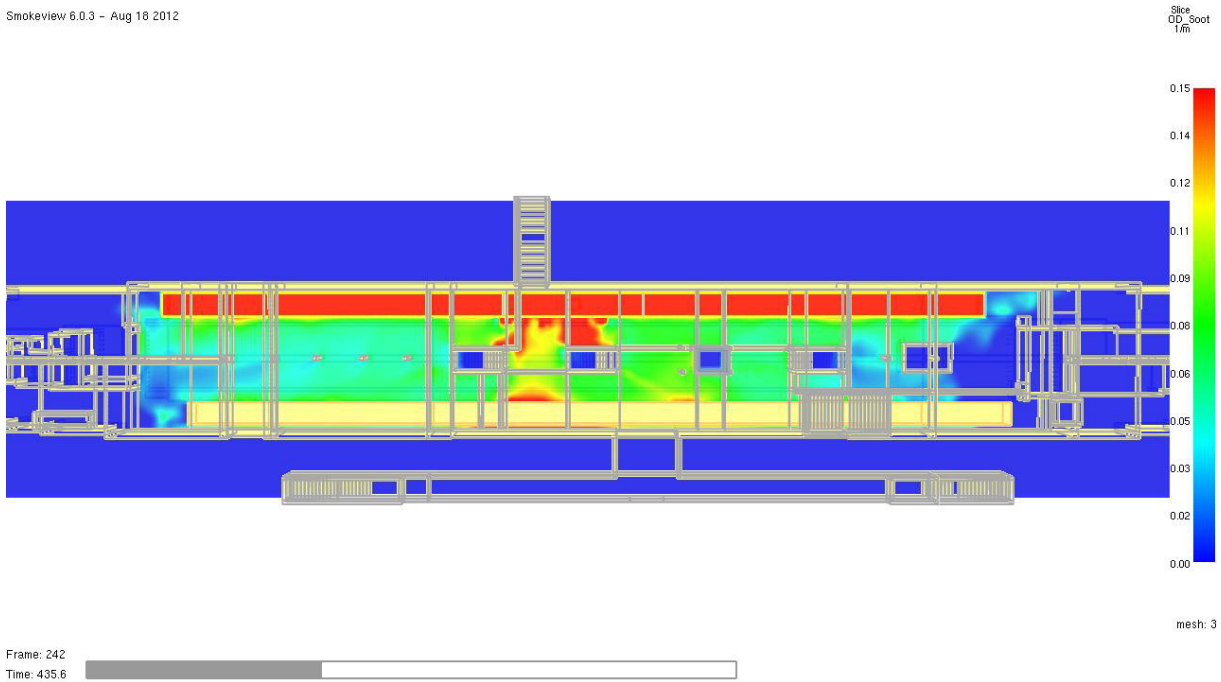


Abb. 21 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 436 Sekunden** (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird erfüllt, der Grenzwert von 0,15 1/m wird nur direkt vor dem Brandherd erreicht.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

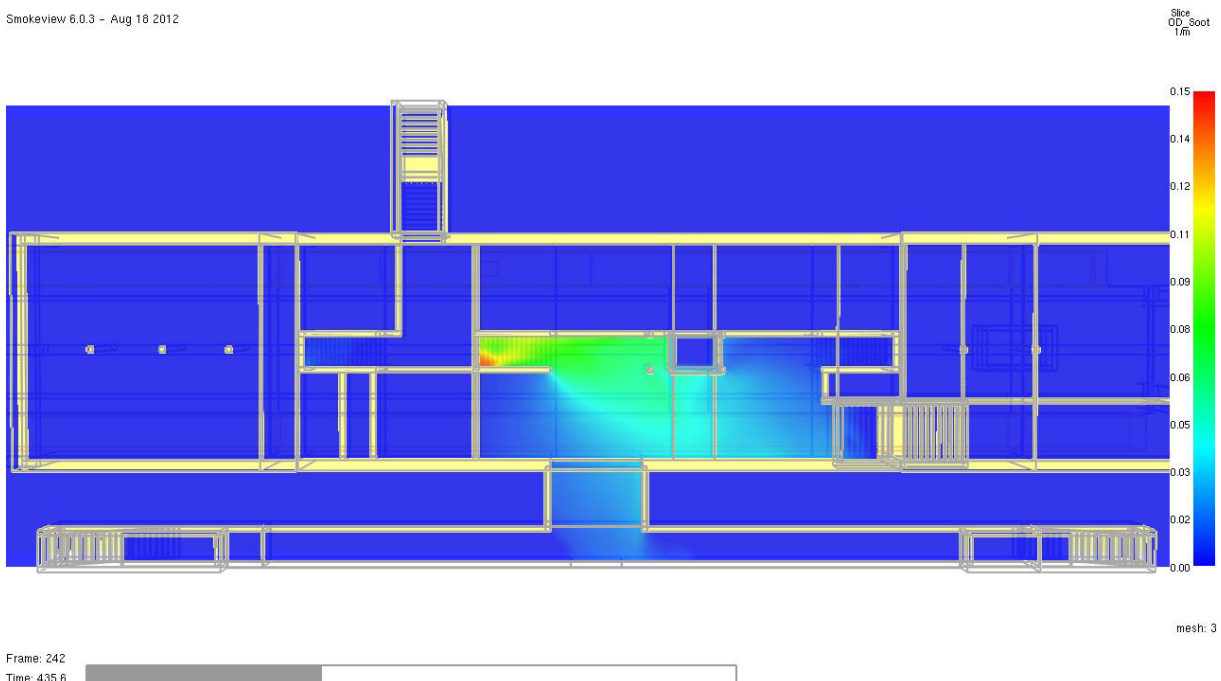


Abb. 22 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 436 Sekunden** (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteiler-ebene**. Das Schutzziel wird erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

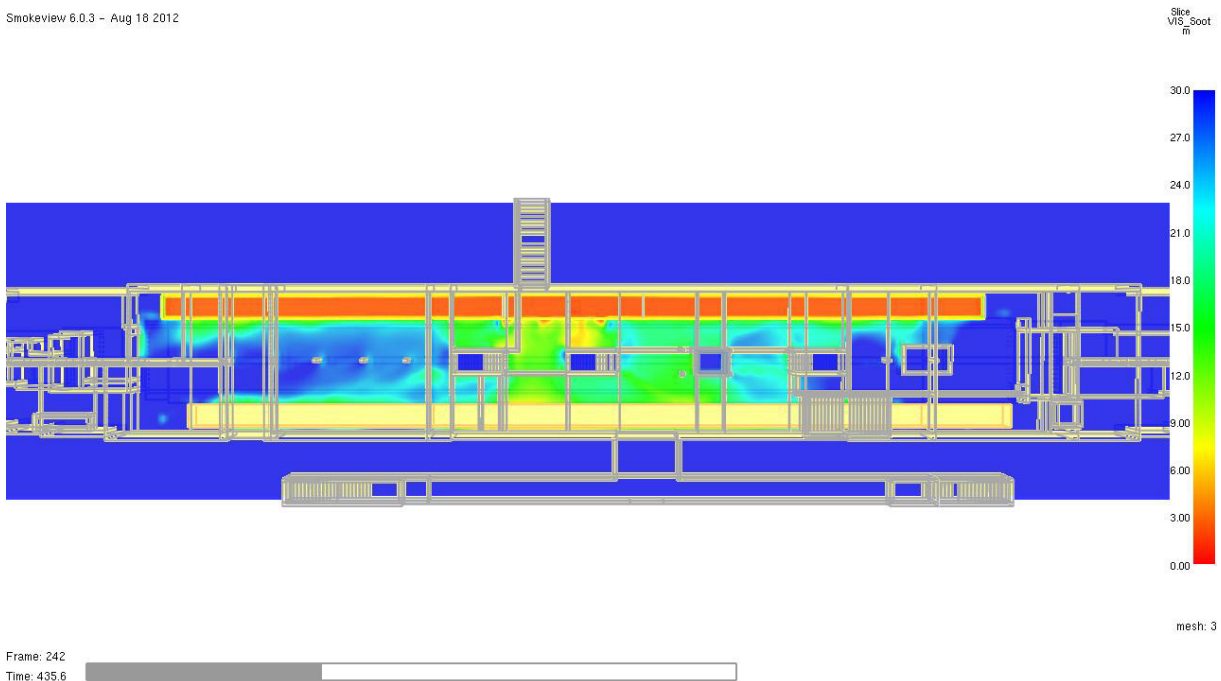


Abb. 23 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 436 Sekunden** (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird vollumfänglich erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

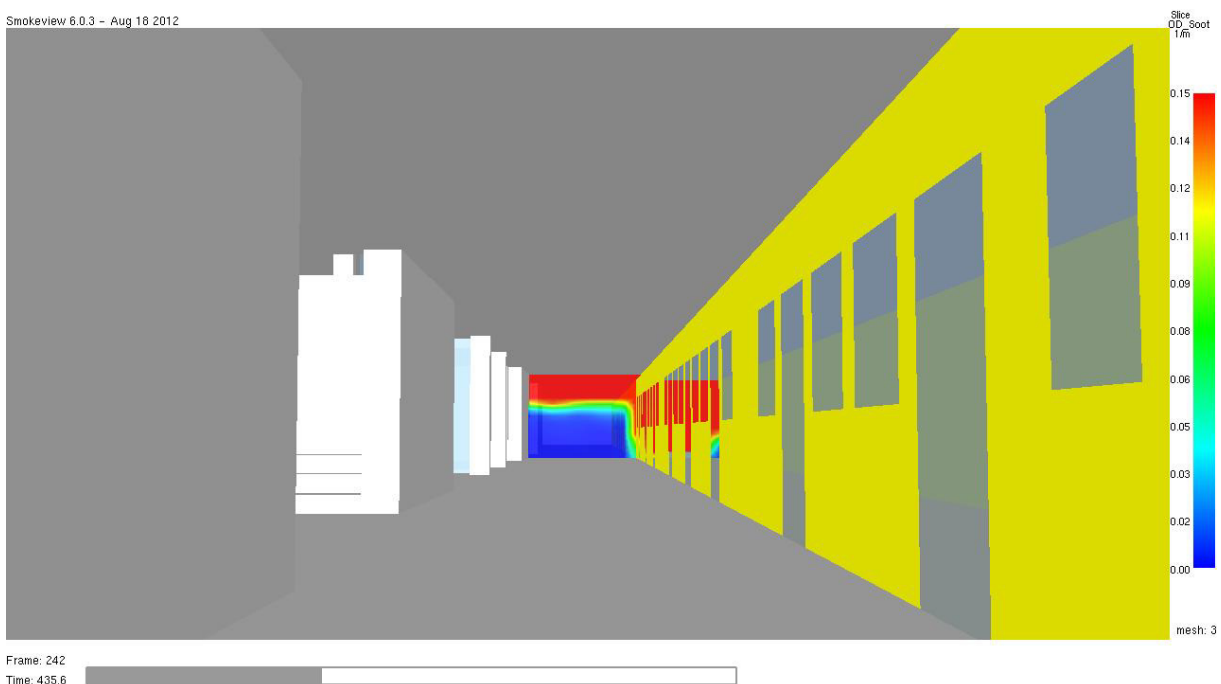


Abb. 24 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 436 Sekunden** (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen. Das Schutzziel wird erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

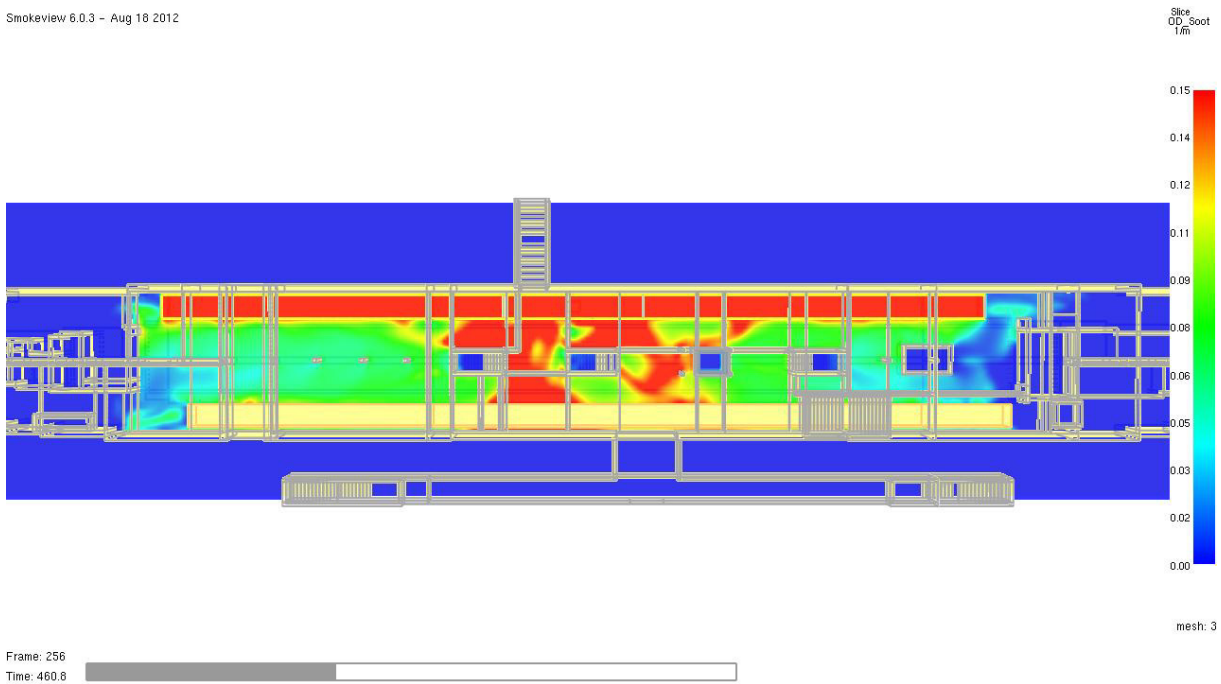


Abb. 25 *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 460 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der Bahnsteig nicht mehr passierbar.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

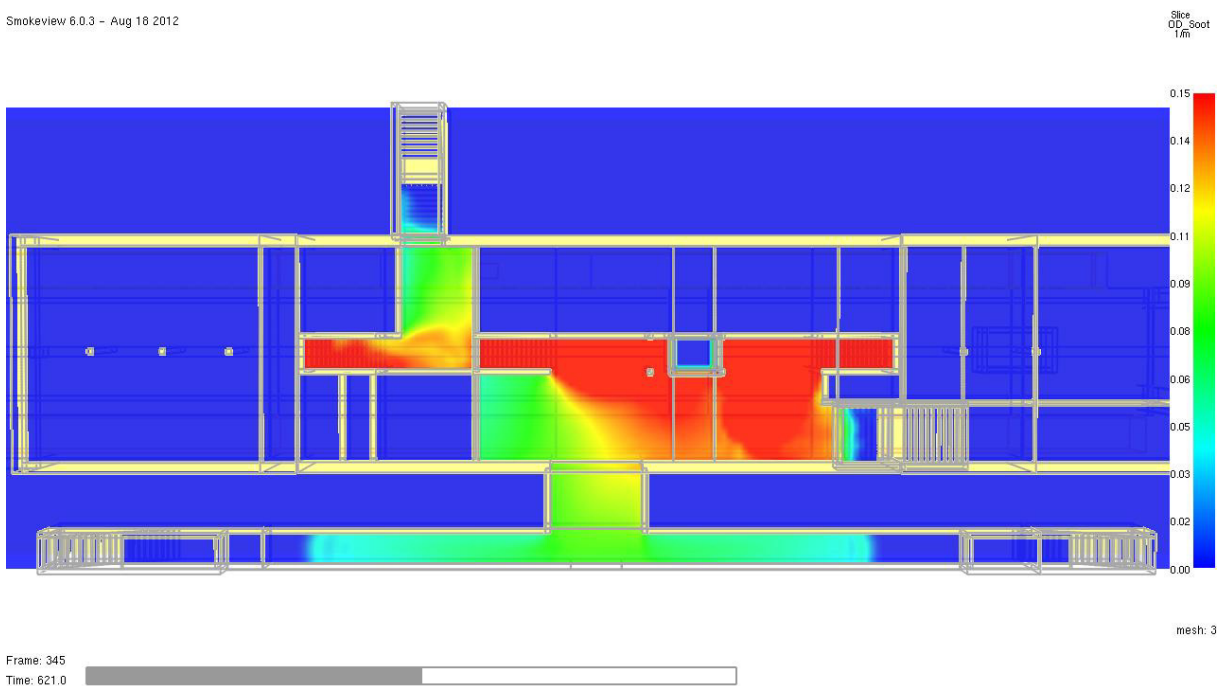


Abb. 26 *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 620 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist die Erreichbarkeit des Ausgangs III / 1 nicht mehr gegeben.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

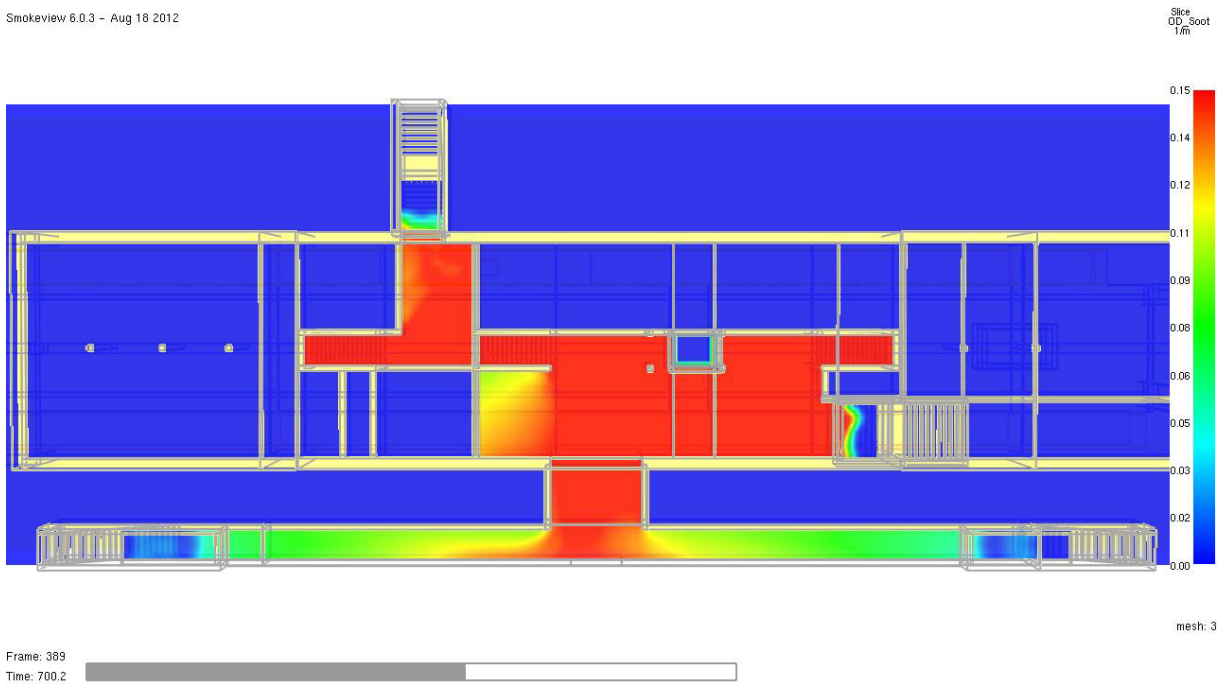


Abb. 27 *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 700 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist die Erreichbarkeit des geänderten Notausgangs nicht mehr gegeben.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

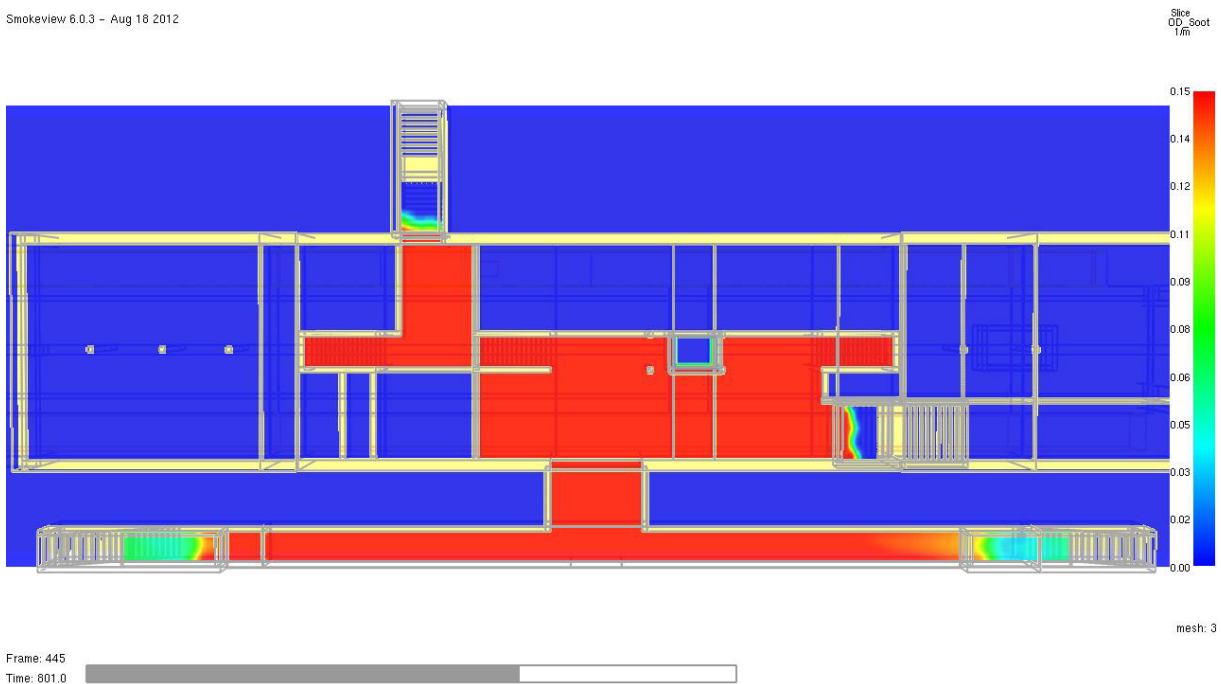


Abb. 28 *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 800 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist die Erreichbarkeit der Ausgänge I / 1 und II / 1 nicht mehr gegeben.

9.3 Brandszenario 2 Brand eines Triebwagens im nördlichen Drittel des Gleises

Smokeview 6.0.3 – Aug 18 2012

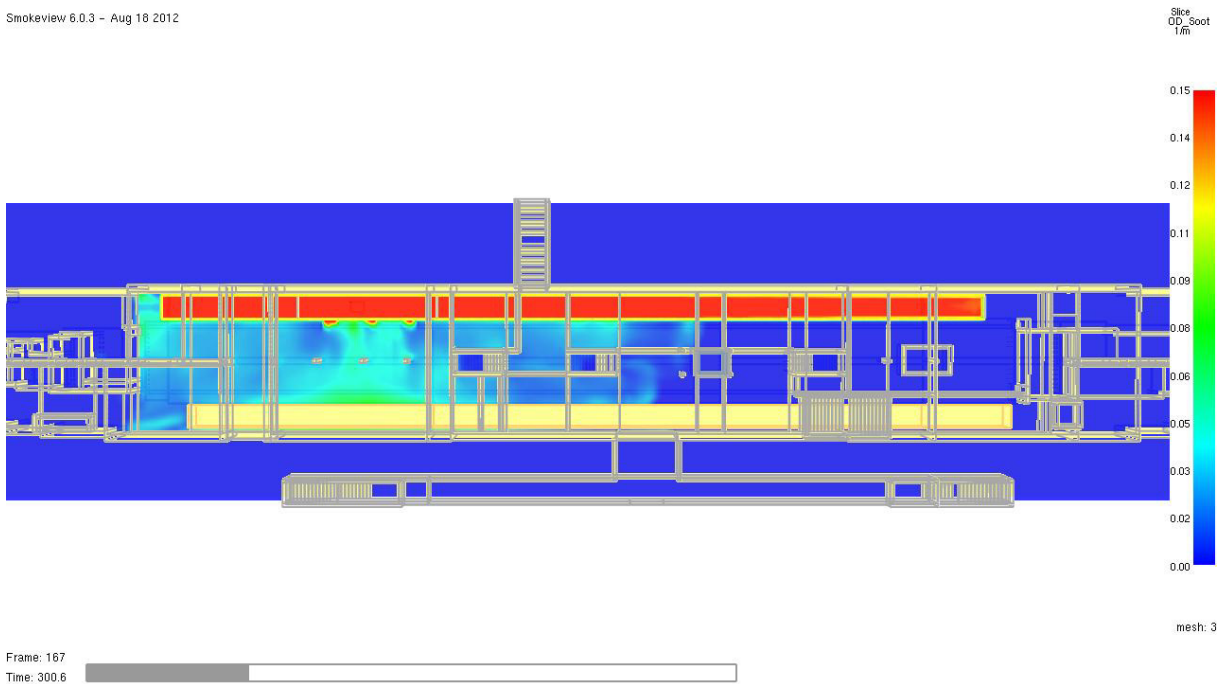


Abb. 29 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeview 6.0.3 – Aug 18 2012

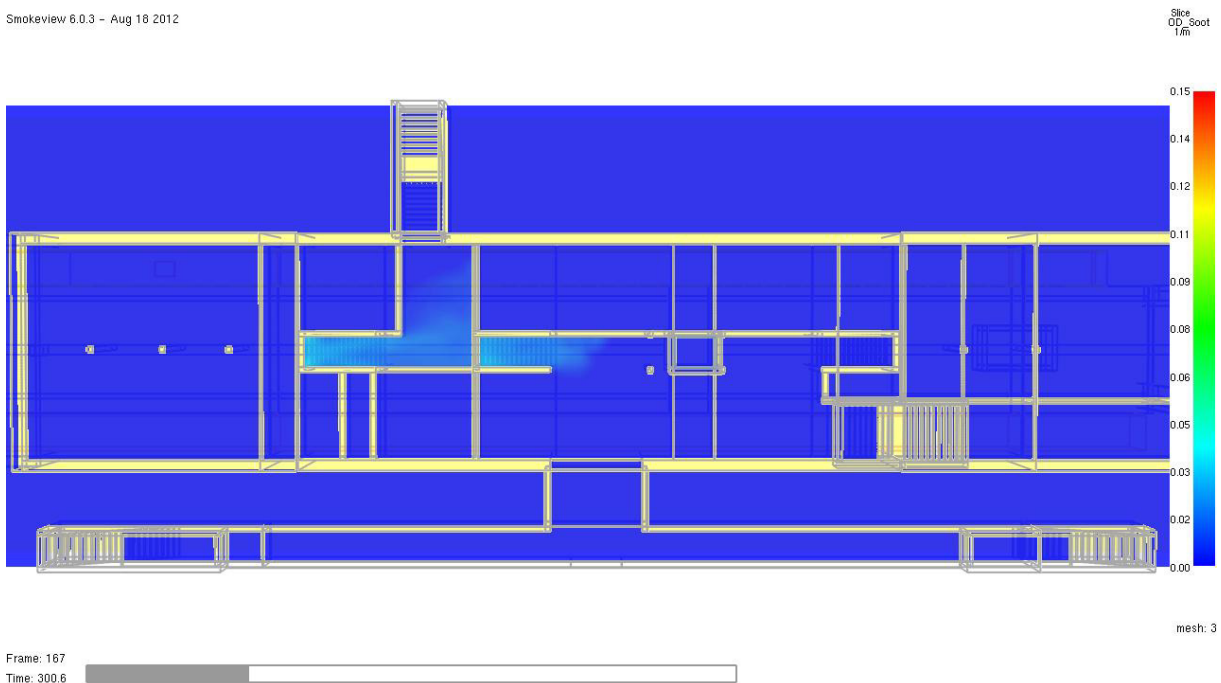


Abb. 30 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt. Es ist praktisch keine Rauchbeaufschlagung der Verteilerebene erkennbar.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

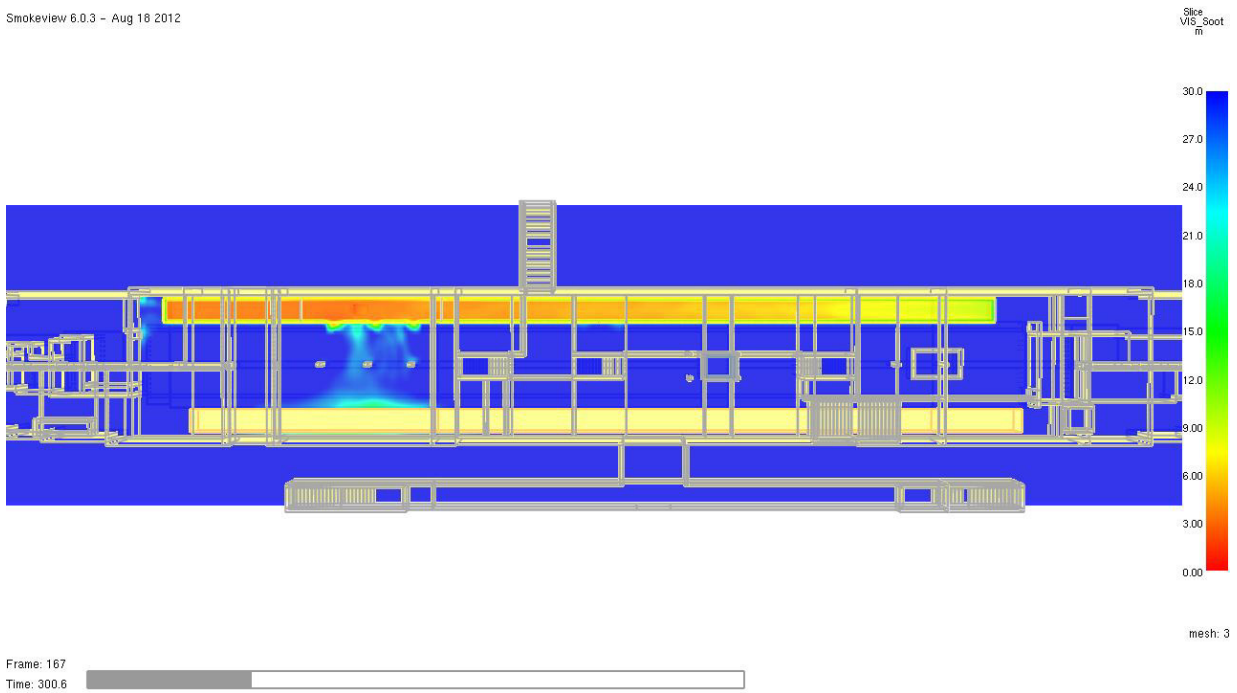


Abb. 31 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

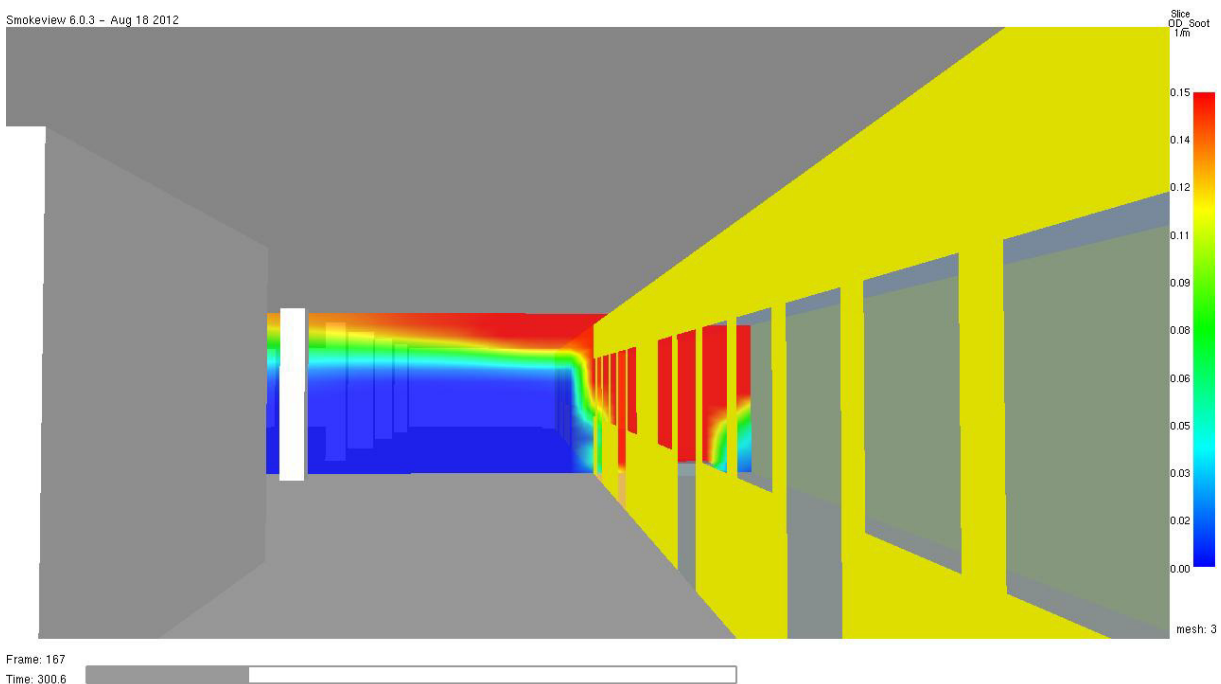


Abb. 32 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012

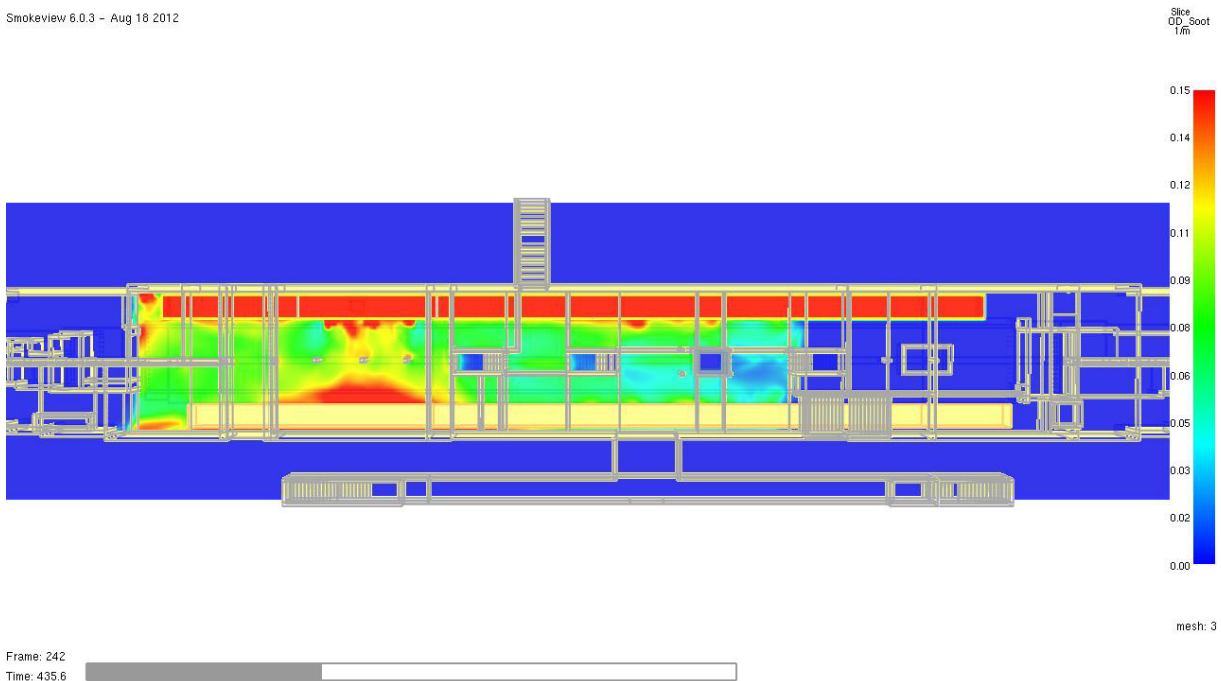


Abb. 33 *Optische Rauchdichte in 1/m zum Zeitpunkt $t = 436$ Sekunden (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Bis zu diesem Zeitpunkt wird das Schutzziel auf dem Bahnsteig fast ohne Einschränkung erfüllt. Es bestehen keine brandschutztechnischen Bedenken, da das Erreichen des Grenzwertes der optischen Dichte lokal sehr begrenzt bleibt.*

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012

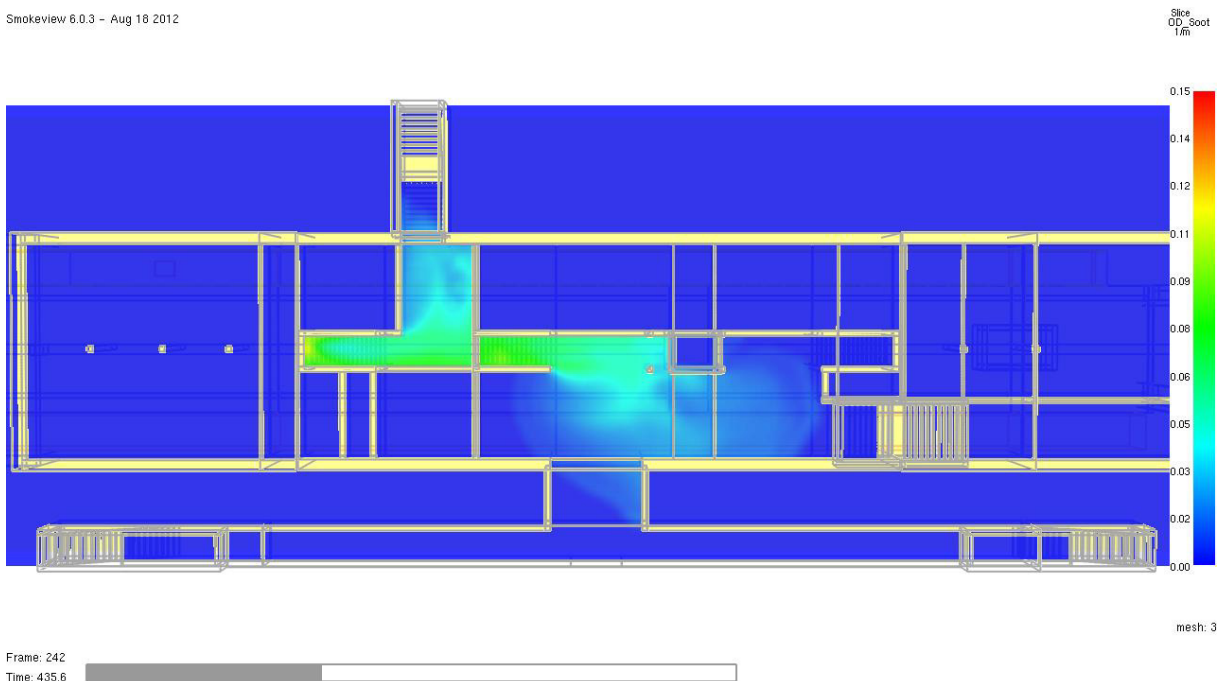


Abb. 34 *Optische Rauchdichte in 1/m zum Zeitpunkt $t = 436$ Sekunden (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerbene**. Das Schutzziel wird erfüllt.*

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

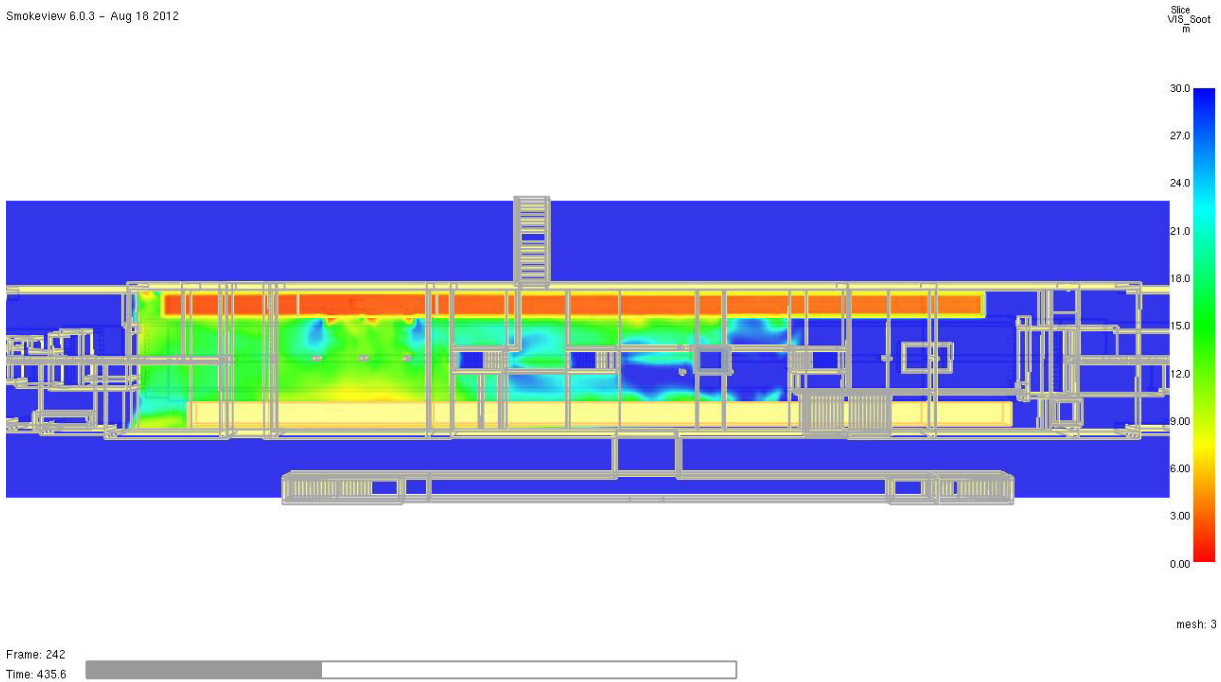


Abb. 35 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 436 Sekunden** (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Bis zu diesem Zeitpunkt wird das Schutzziel auf dem Bahnsteig fast ohne Einschränkung erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

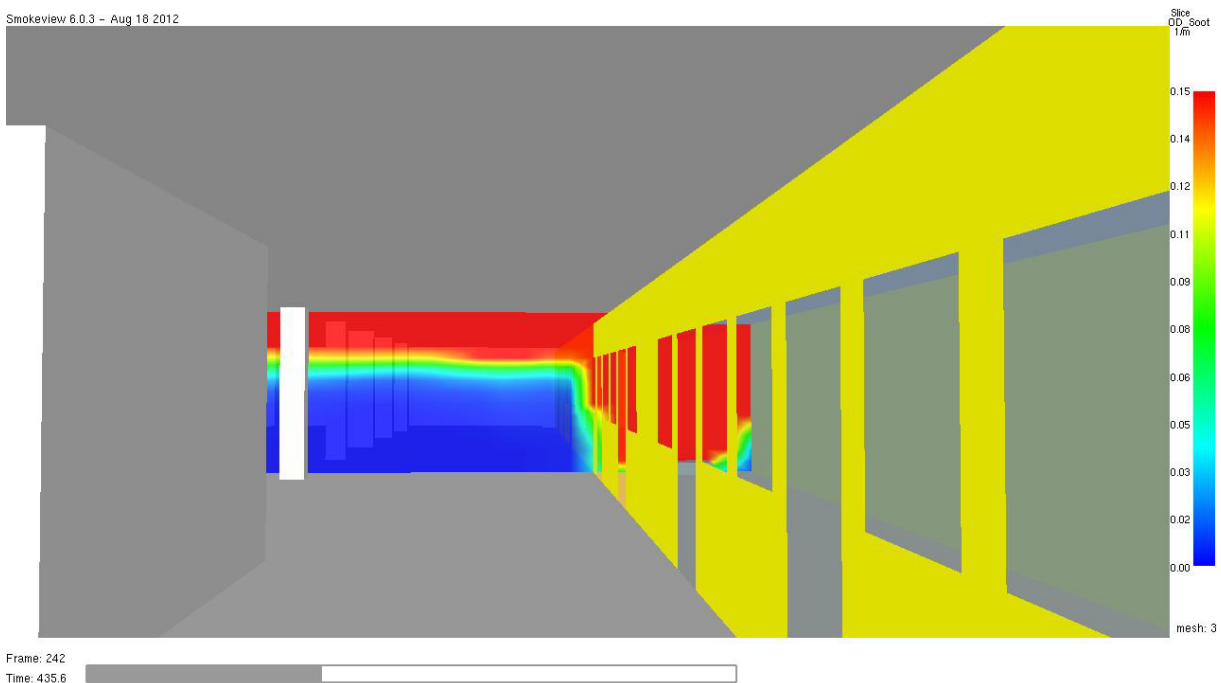


Abb. 36 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 436 Sekunden** (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen. Das Schutzziel wird erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

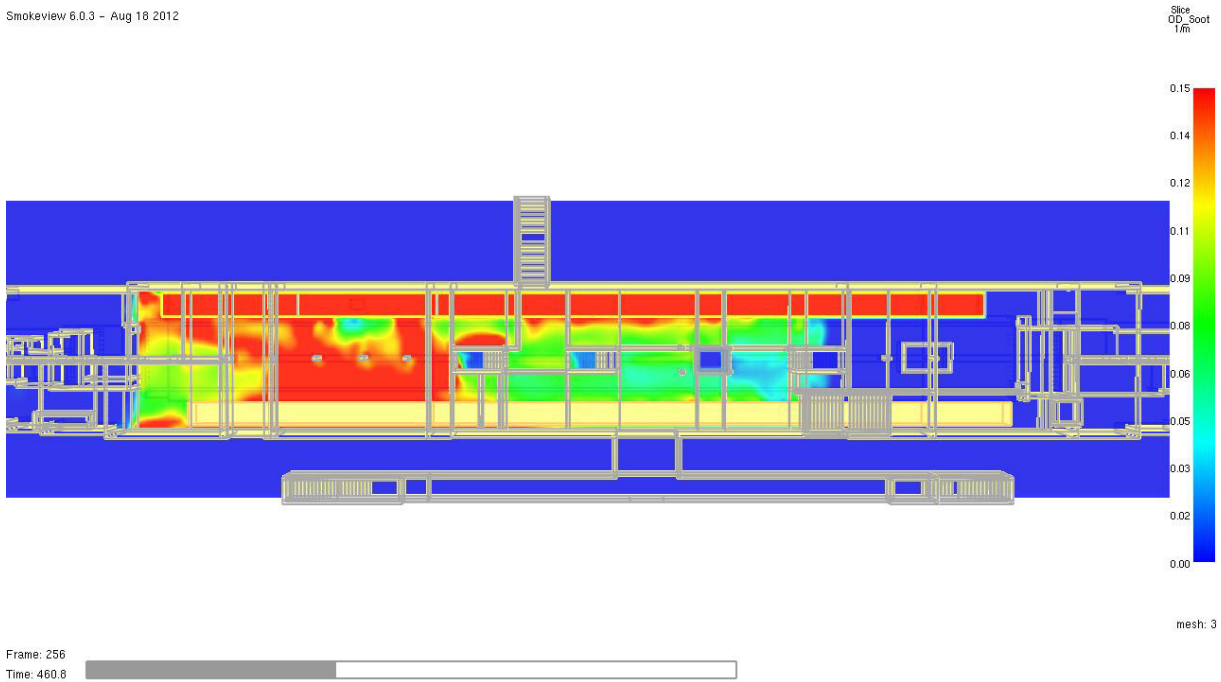


Abb. 37 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 460 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der Bahnsteig nicht mehr passierbar.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

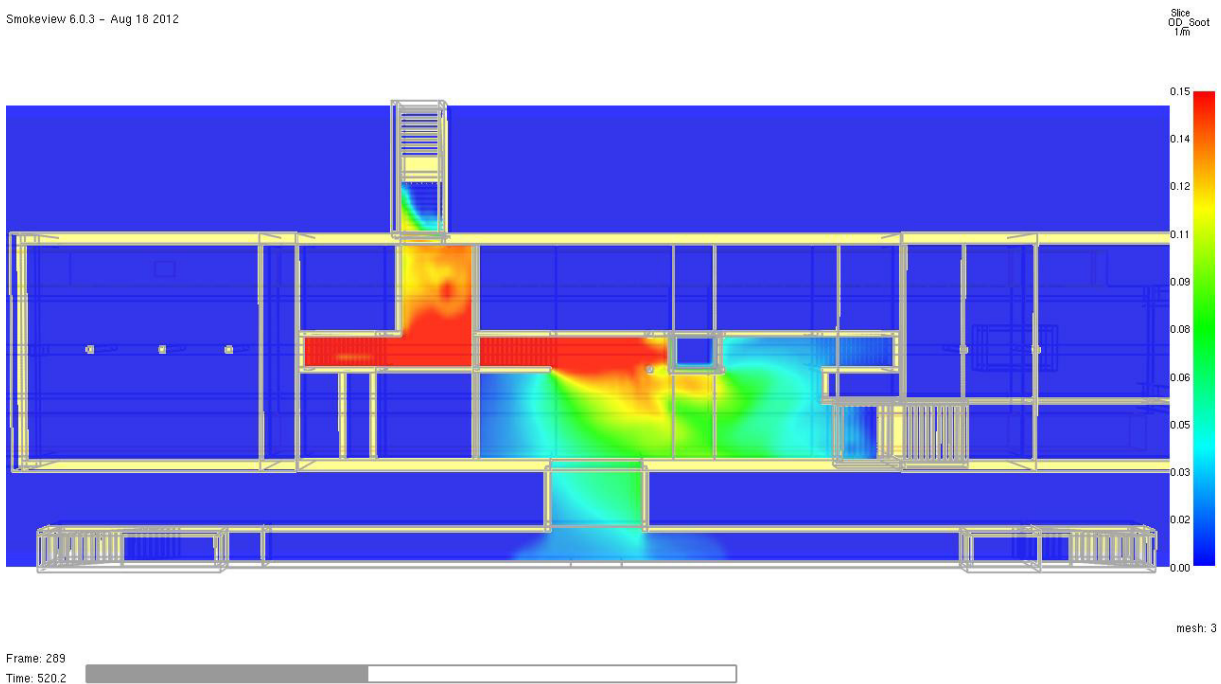


Abb. 38 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 520 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist die Erreichbarkeit des geänderten Notausgangs nicht mehr gegeben.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

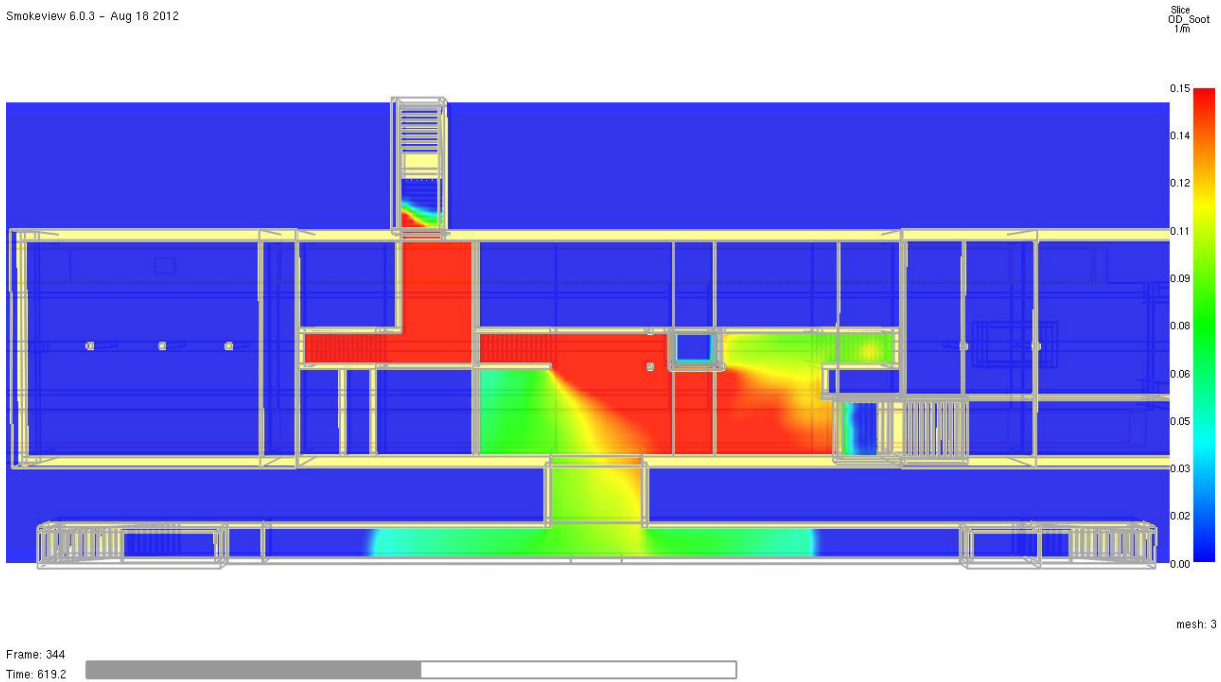


Abb. 39 *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 620 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist die Erreichbarkeit des Ausgangs III / 1 nicht mehr gegeben.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

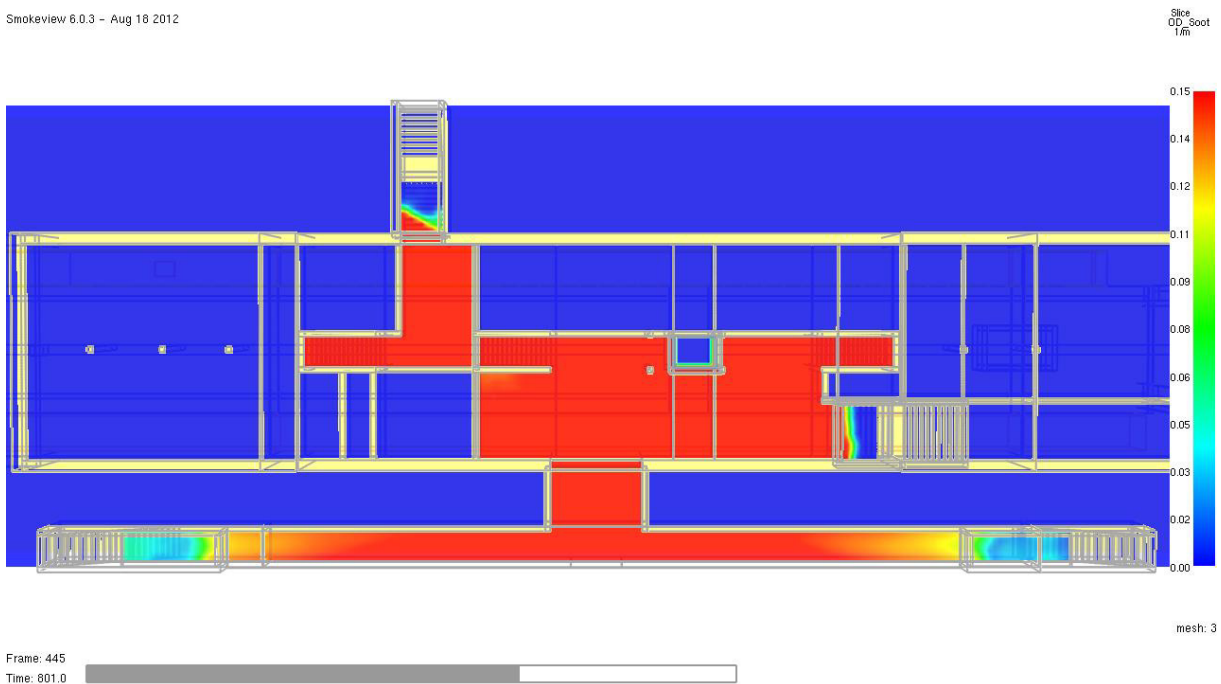


Abb. 40 *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 860 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist die Erreichbarkeit der Ausgänge I / 1 und II / 1 nicht mehr gegeben.

9.4 Brandszenario 3 Brand eines Triebwagens im südlichen Drittel des Gleises

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

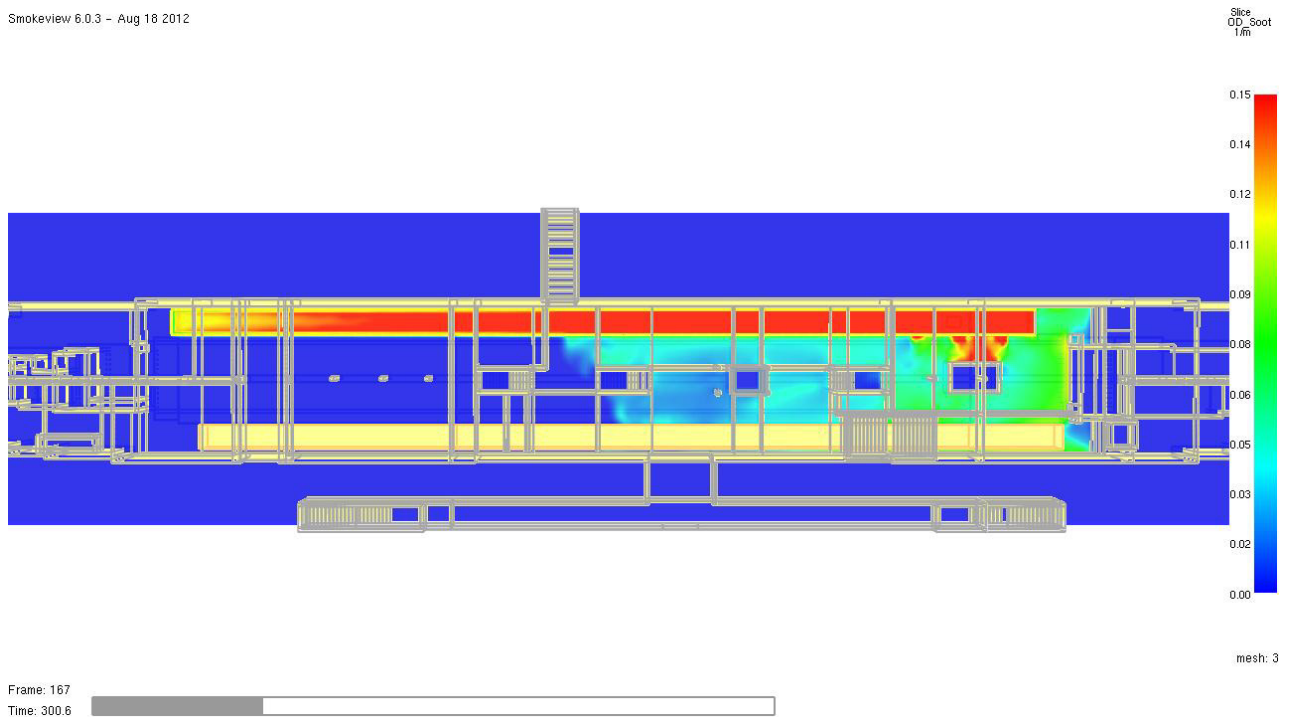


Abb. 41 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt noch erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

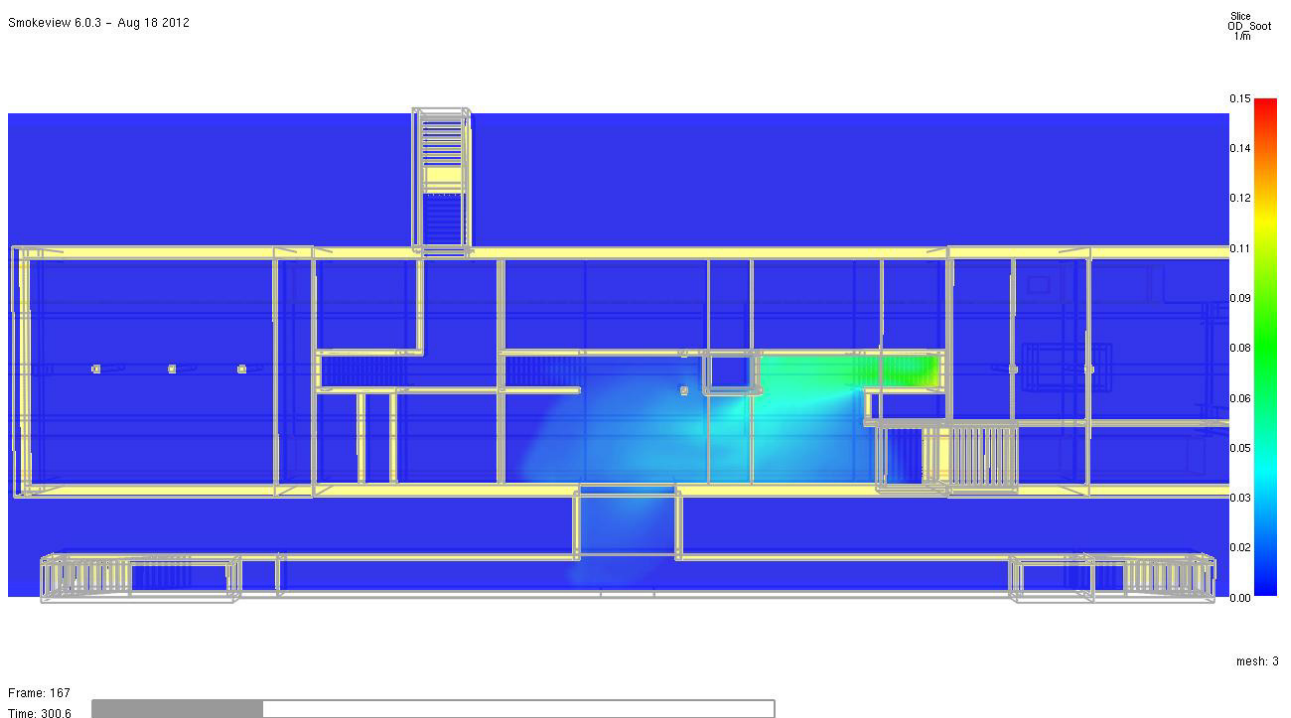


Abb. 42 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

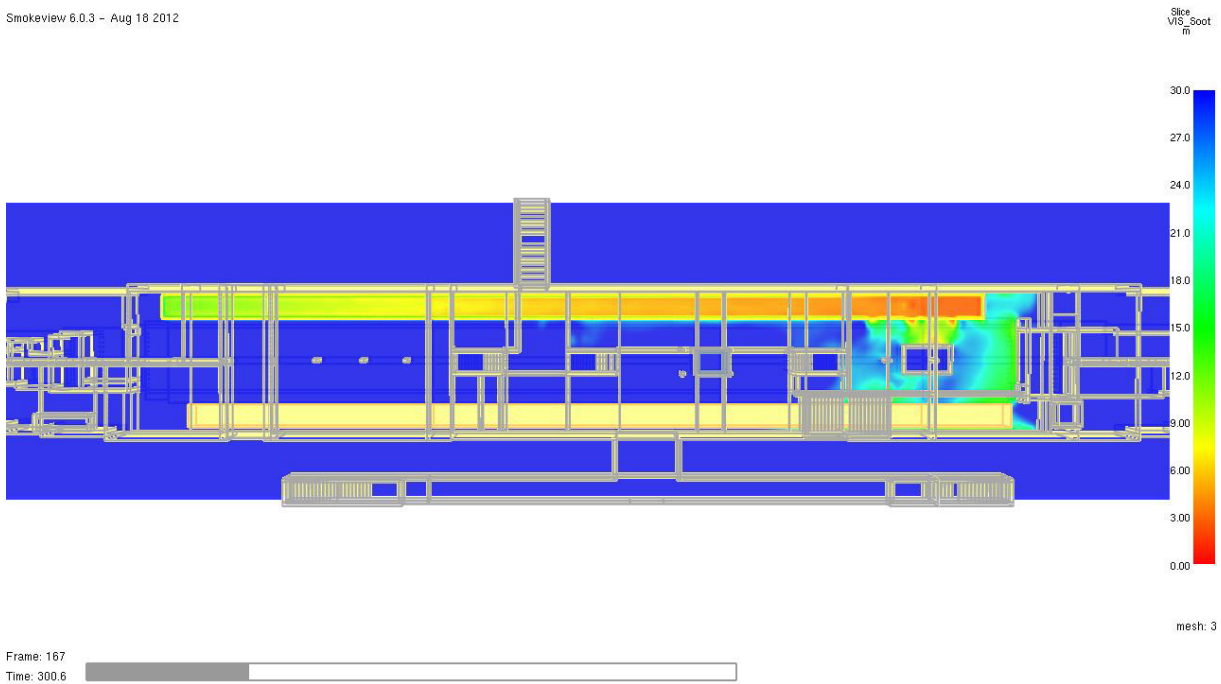


Abb. 43 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

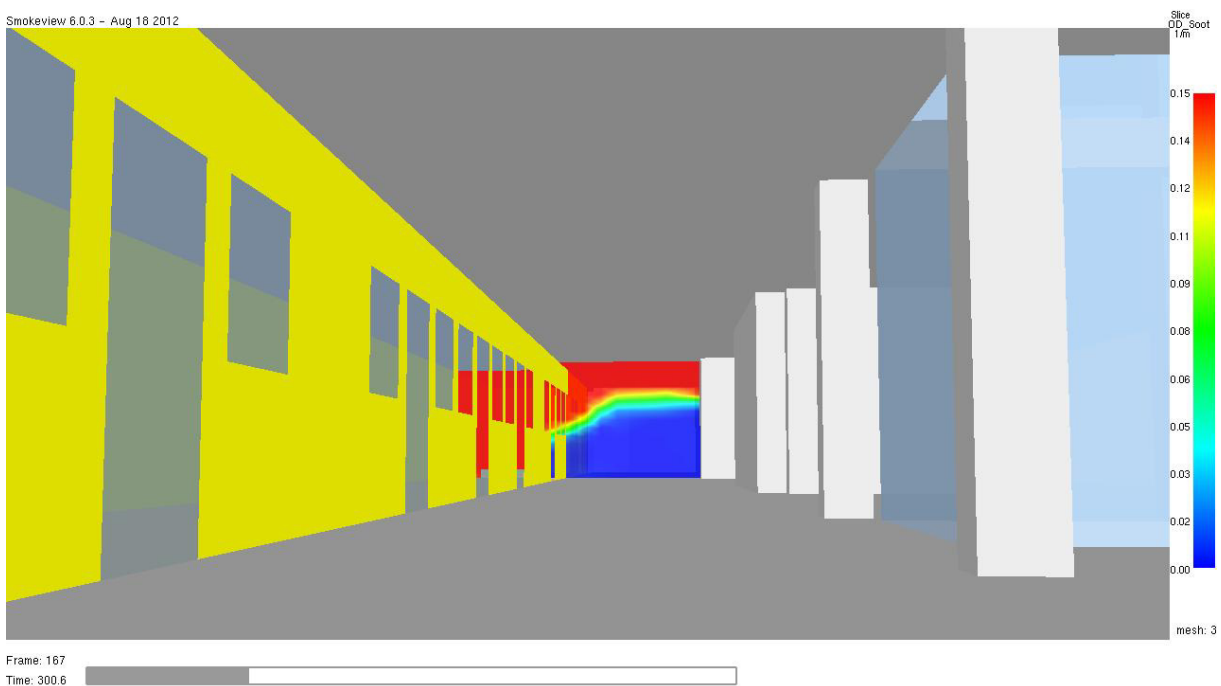


Abb. 44 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt erfüllt.

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012

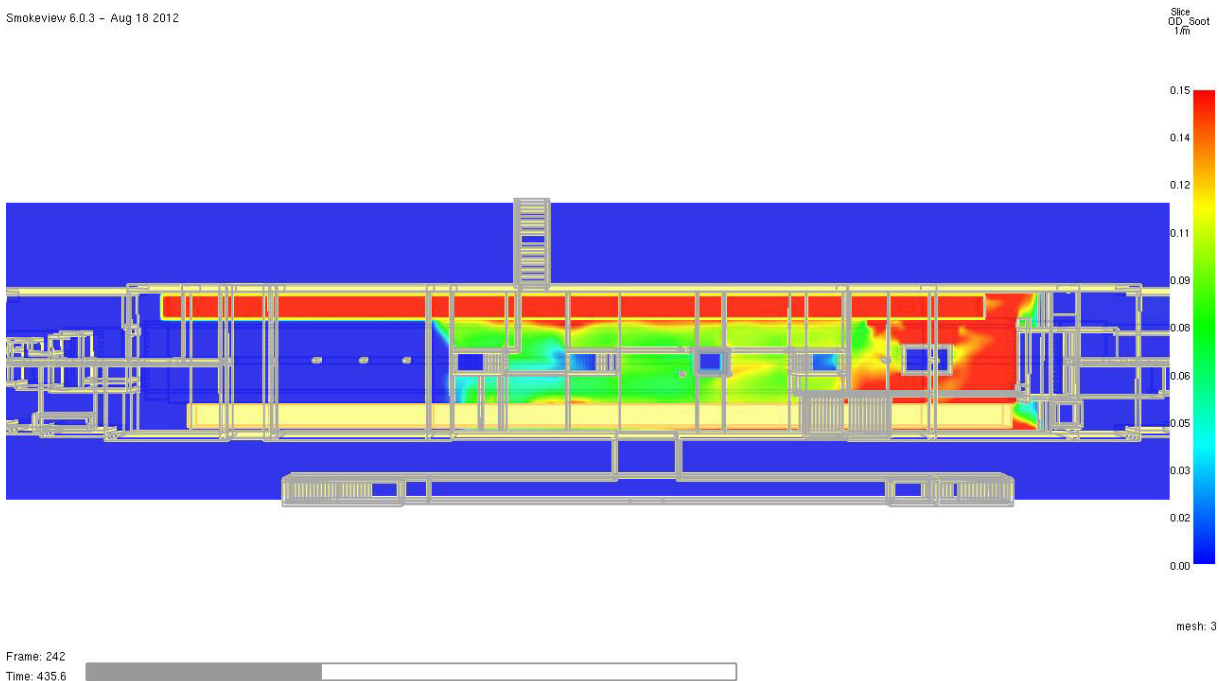


Abb. 45 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 436 Sekunden** (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Der Grenzwert wird nur direkt vor dem Brandherd erreicht. Alle Aufgänge in die Verteilerebene sind noch nutzbar. Zudem befinden sich zu diesem Zeitpunkt alle Personen bereits im Freien.

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012

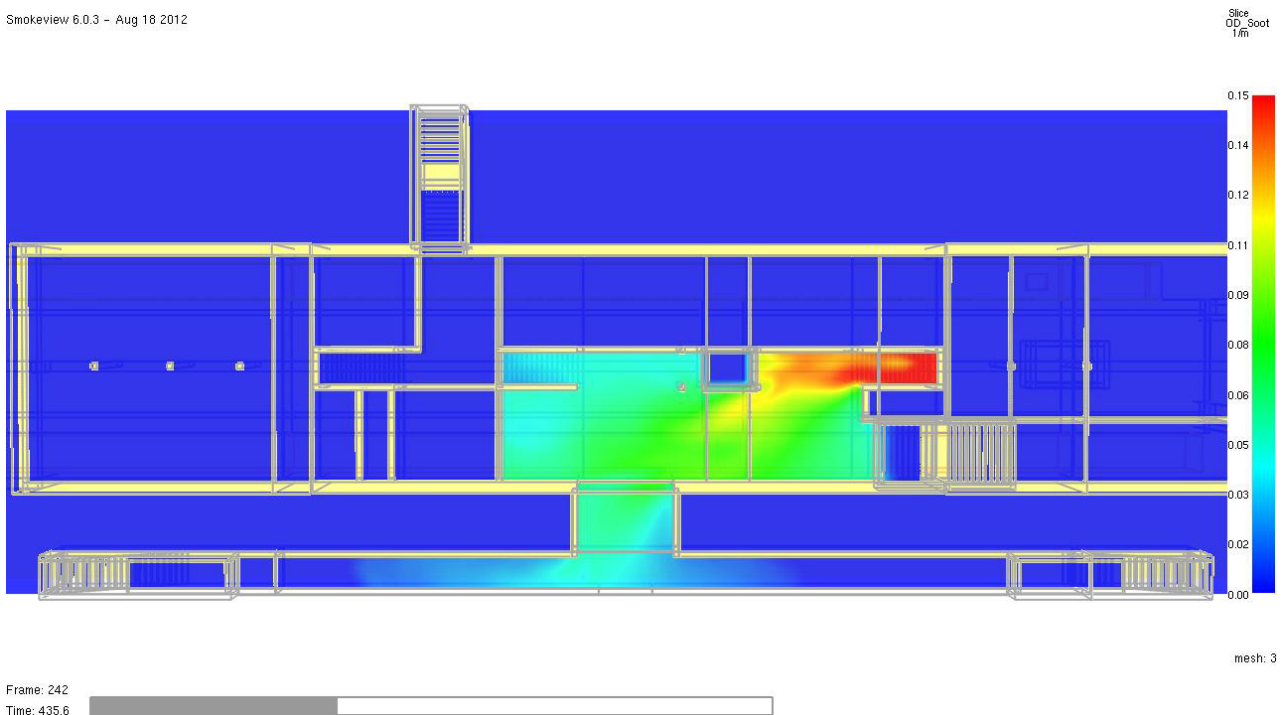


Abb. 46 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 436 Sekunden** (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Das Schutzziel wird erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

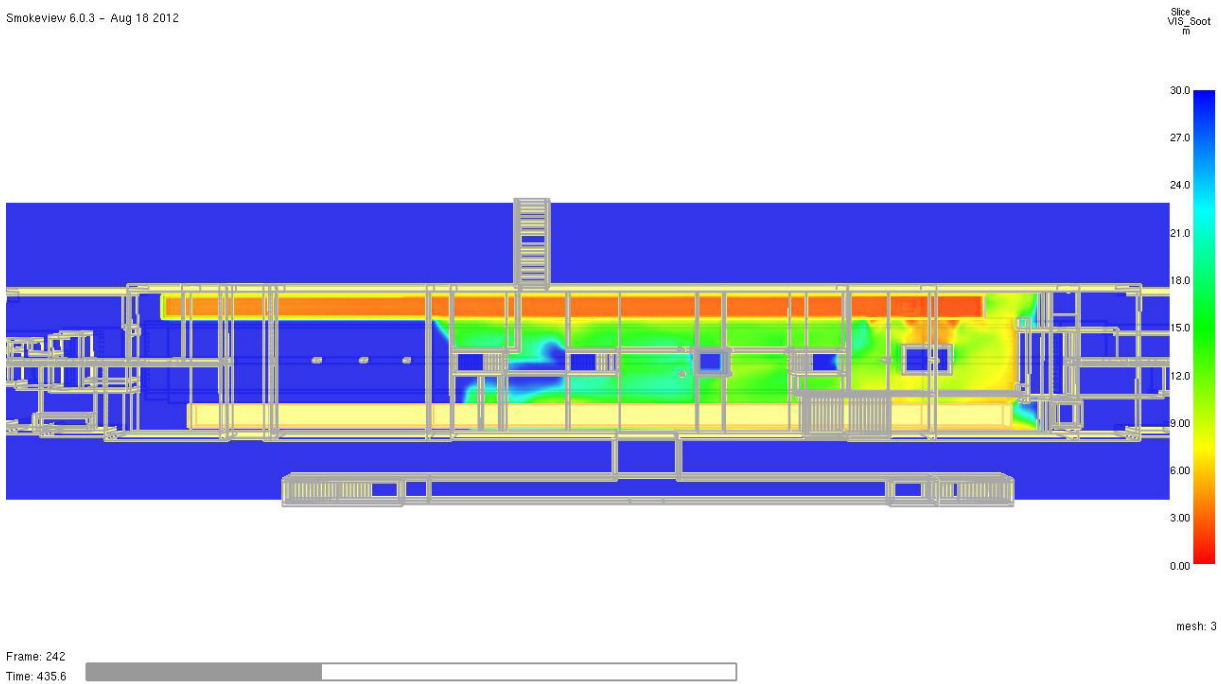


Abb. 47 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 436 Sekunden** (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Bis zu diesem Zeitpunkt wird das Schutzziel auf dem Bahnsteig noch erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

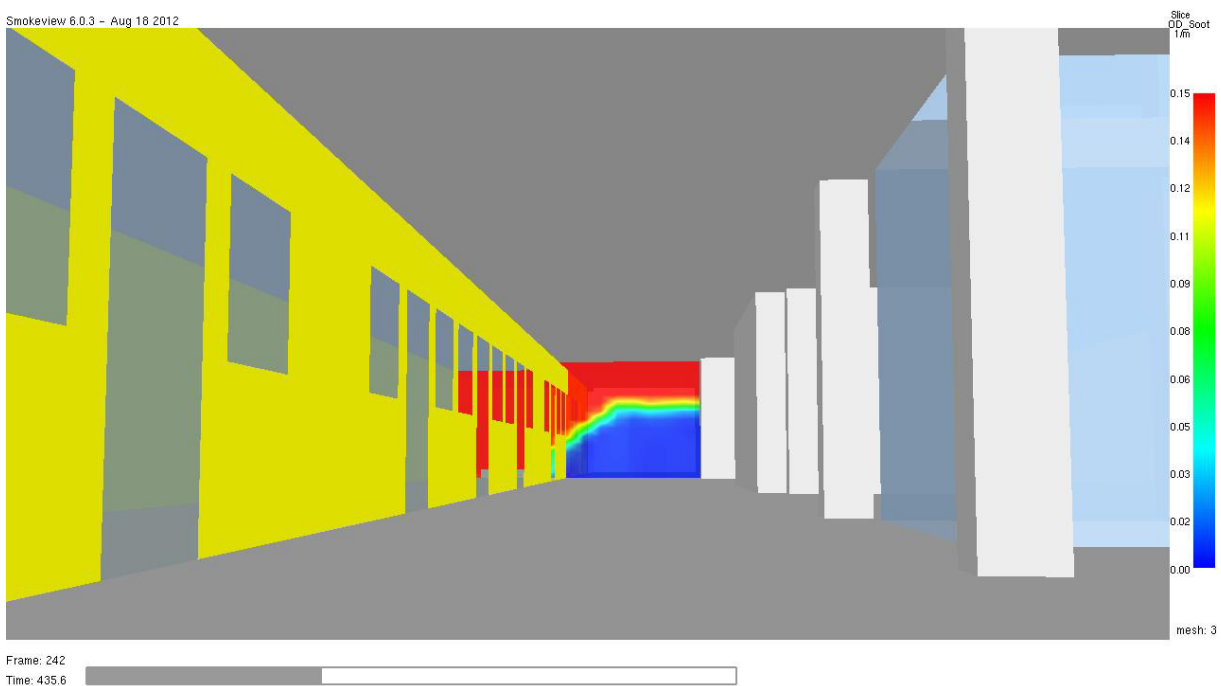


Abb. 48 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 436 Sekunden** (7,3 Minuten = Evakuierungszeit) im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen. Das Schutzziel wird erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

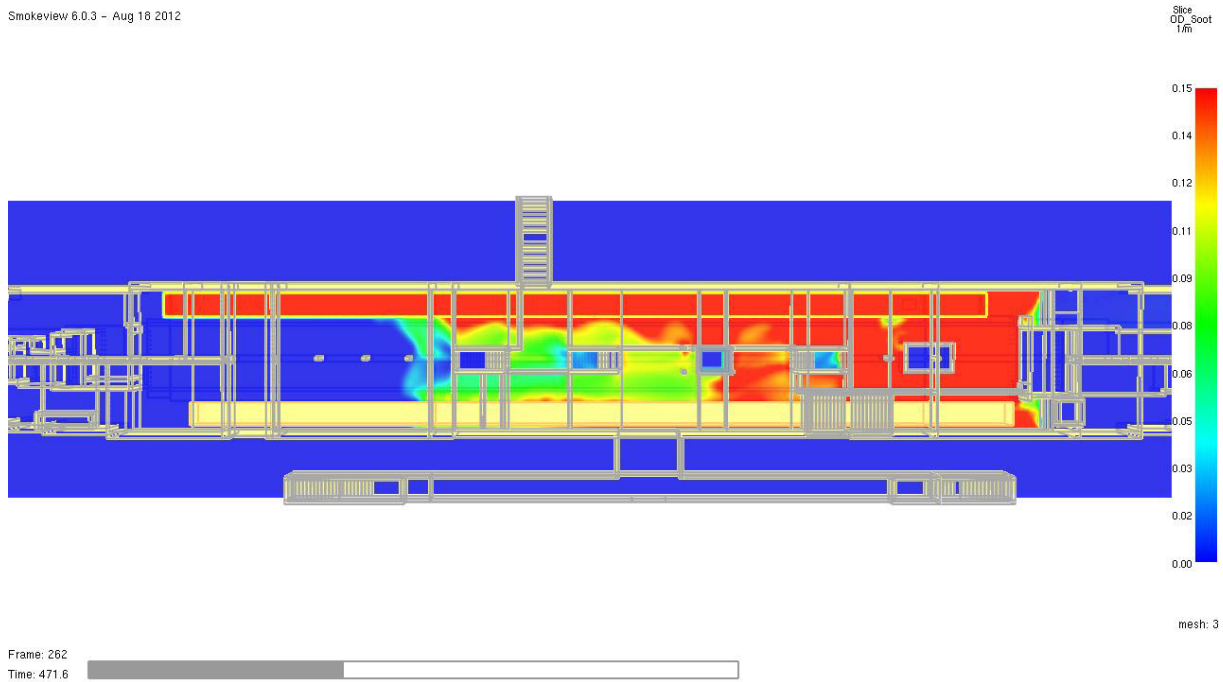


Abb. 49 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 470 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der Bahnsteig nicht mehr passierbar.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

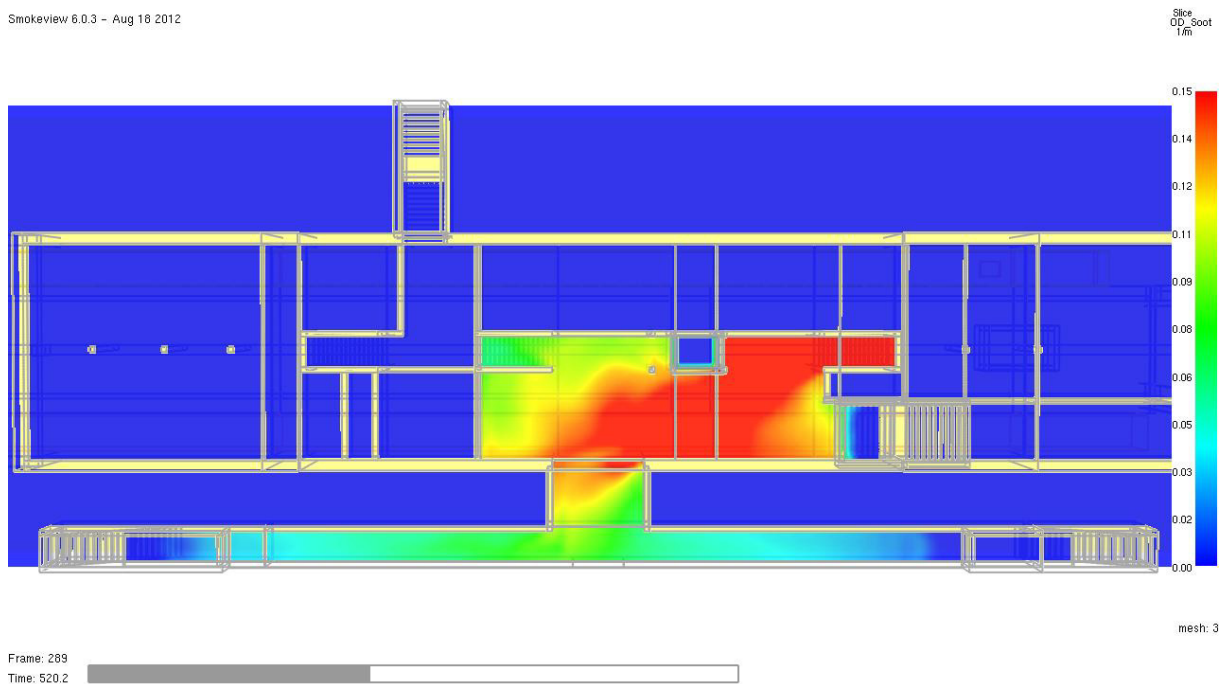


Abb. 50 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 520 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist die Erreichbarkeit des Ausgangs III / 1 nicht mehr gegeben.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



Abb. 51 *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 680 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist die Erreichbarkeit der Ausgänge I / 1 und II / 1 nicht mehr gegeben.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



Abb. 52 *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 1.000 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Verteilerebene**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist die Erreichbarkeit des geänderten Notausgangs nicht mehr gegeben.

9.5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die im Bestand vorhandenen Öffnungen zur Rauchableitung in Verbindung mit den zwei Entrauchungsschächten mit den oben genannten Entrauchungsquerschnitten eine mindestens 2,0 m hohe raucharme Schicht für einen Zeitraum von mind. 7,3 Minuten gewährleisten.

Beim Brandszenario 1 (brennender Wagen mittig im Bahnhof) werden die Schutzziele mindestens für den erforderlichen Zeitraum der Evakuierung (7,3 Minuten) ohne nennenswerte Einschränkung erfüllt.

Im Folgenden ist der Zeitpunkt je betrachteter Ebene aufgelistet, ab dem die Schutzziele in der Ebene nicht mehr eingehalten werden.

- Bahnsteigebene: ca. 460 Sekunden
- Verteilerebene mit Ausgang III / 2: ca. 620 Sekunden
- Verteilerebene mit geändertem Notausgang: ca. 700 Sekunden
- Verteilerebene mit Ausgängen I / 1 und II / 1: ca. 800 Sekunden

Beim Brandszenario 2 (brennender Wagen im nördlichen Drittel des Bahnhofs) werden die Schutzziele ebenfalls mindestens für den erforderlichen Zeitraum der Evakuierung (7,3 Minuten) ohne nennenswerte Einschränkung erfüllt.

Im Folgenden ist der Zeitpunkt je betrachteter Ebene aufgelistet, ab dem die Schutzziele in der Ebene nicht mehr eingehalten werden.

- Bahnsteigebene: ca. 460 Sekunden
- Verteilerebene mit Ausgang III / 2: ca. 620 Sekunden
- Verteilerebene mit geändertem Notausgang: ca. 520 Sekunden
- Verteilerebene mit Ausgängen I / 1 und II / 1: ca. 800 Sekunden

Beim Brandszenario 3 (brennender Wagen im südlichen Drittel des Bahnhofs) werden die Schutzziele auch mindestens für den erforderlichen Zeitraum der Evakuierung (7,3 Minuten) erfüllt.

Im Folgenden ist der Zeitpunkt je betrachteter Ebene aufgelistet, ab dem die Schutzziele in der Ebene nicht mehr eingehalten werden.

- Bahnsteigebene: ca. 470 Sekunden
- Verteilerebene mit Ausgang III / 2: ca. 520 Sekunden
- Verteilerebene mit geändertem Notausgang: ca. 1.000 Sekunden
- Verteilerebene mit Ausgängen I / 1 und II / 1: ca. 680 Sekunden

Nachweis:

Die rechnerisch nachgewiesene zur Verfügung stehende Zeitspanne einer ausreichend hohen raucharmen Schicht von mind. 7,3 Minuten entspricht der erforderlichen Evakuierungszeit von 7,3 Minuten.

10 ZUSAMMENFASSUNG

Wir wurden von den Berliner Verkehrsbetrieben mit der Erarbeitung der 2. Revision des Rauchschutznachweises für den U-Bahnhof Paradesstraße beauftragt.

Es wurde nachgewiesen, dass mit den im Bestand vorhandenen Öffnungen zur Rauchableitung in Verbindung mit den zwei Entrauchungsschächten die Schutzzielkriterien des vfdb-Leitfadens „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ auf dem Bahnsteig und Verteilerebene für einen Zeitraum von 7,3 Minuten erfüllt werden.

Des Weiteren wurden für die drei betrachteten Brandszenarien die Zeitspannen ermittelt, für die die Schutzziele in den jeweiligen Bereichen gerade noch erfüllt werden.

Zusammenfassend wird zusätzlich festgestellt:

- Die Rauchableitung erfolgt über die vorhandenen Öffnungen des U-Bahnhofs, zusätzlich sind die zwei oben beschriebenen Entrauchungsschächte erforderlich.
- Anlagen zur Rauchrückhaltung an den Treppenaufgängen sind in der Haltestelle nicht erforderlich.
- Für die Räumungszeit aus dem U-Bahnhof von 7,3 Minuten steht uneingeschränkt eine ausreichend hohe raucharme Schicht in allen Ebenen des Bahnhofes zur Verfügung. Die Selbstrettung ist für den gesamten Bahnhof sichergestellt.
- Die Schutzziele der Technischen Regeln von Straßenbahnen, Brandschutz in unterirdischen Betriebsanlagen (TRStrab Brandschutz) für bestehende Haltestellen werden erfüllt.

Wegen der Rauchabführung in der Phase der Selbstrettung im U-Bahnhof Paradesstraße bestehen daher keine brandschutztechnischen Bedenken.

Berlin, 21. November 2018



Dr.-Ing. Michael Dehne

Von der Ingenieurkammer Niedersachsen
öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger für
Vorbeugenden Brandschutz



Dipl.-Ing. Th. Koch

Von der Baukammer Berlin
öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger für
Vorbeugenden Brandschutz
bauvorlagenberechtigt gemäß § 66 (3) BauO Bln

Anlage 2 Erläuterung der Videoclips auf der CD-ROM (Anlage 1)

Brandszenario 1 Brand eines Triebwagens in der Mitte von Gleis 2

Szenario 1 OD Bahnsteig.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der optischen Rauchdichte in 1/m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Bahnsteig bei einem Brandszenario in einem Triebwagen mittig auf Gleis 2.

Szenario 1 OD Verteilerebene.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der optischen Rauchdichte in 1/m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über der Verteilerebene bei einem Brandszenario in einem Triebwagen mittig auf Gleis 2.

Szenario 1 OD Vertikalschnitt.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der optischen Rauchdichte in 1/m im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen bei einem Brandszenario in einem Triebwagen mittig auf dem Gleis.

Szenario 1 VIS Bahnsteig.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Bahnsteig bei einem Brandszenario in einem Triebwagen mittig auf Gleis 2.

Szenario 1 VIS Verteilerebene.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der Verteilerebene bei einem Brandszenario in einem Triebwagen mittig auf dem Gleis.

Szenario 1 VIS Vertikalschnitt.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen bei einem Brandszenario in einem Triebwagen mittig auf Gleis 2.

Brandszenario 2 Brand eines Triebwagens im nördlichen Drittel von Gleis 2

Szenario 2 OD Bahnsteig.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der optischen Rauchdichte in 1/m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Bahnsteig bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im nördlichen Drittel auf Gleis 2.

Szenario 2 OD Verteilerebene.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der optischen Rauchdichte in 1/m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über der Verteilerebene bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im nördlichen Drittel des Gleises.

Szenario 2 OD Vertikalschnitt.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Rauchdichte in 1/m im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im nördlichen Drittel des Gleises.

Szenario 2 VIS Bahnsteig.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Bahnsteig bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im nördlichen Drittel des Gleises.

Szenario 2 VIS Verteilerebene.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über der Verteilerebene bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im nördlichen Drittel des Gleises.

Szenario 2 VIS Vertikalschnitt.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im nördlichen Drittel des Gleises.

Brandszenario 3 Brand eines Triebwagens im nördlichen Drittel von Gleis 2

Szenario 3 OD Bahnsteig.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der optischen Rauchdichte in 1/m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Bahnsteig bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im südlichen Drittel auf Gleis 2.

Szenario 3 OD Verteilerebene.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der optischen Rauchdichte in 1/m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über der Verteilerebene bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im südlichen Drittel des Gleises.

Szenario 3 OD Vertikalschnitt.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Rauchdichte in 1/m im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im südlichen Drittel des Gleises.

Szenario 3 VIS Bahnsteig.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Bahnsteig bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im südlichen Drittel des Gleises.

Szenario 3 VIS Verteilerebene.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über der Verteilerebene bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im südlichen Drittel des Gleises.

Szenario 3 VIS Vertikalschnitt.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Vertikalschnitt (quer) durch den vom Brand betroffenen Triebwagen bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im südlichen Drittel des Gleises.

Anlage 3 Berechnung der Räumungszeiten

Zeitabschnitte der Räumung Ps unter Berücksichtigung der neuen Zugänge

Dauer (Sek.) Dauer (Min.)

Gehzeiten der zuletzt fliehenden Personen:

T1: Zeit zum Erreichen des Treppenaufganges auf Bahnsteigebene : (ca. 30 m / 0,63 m/s)	48	0.8
T2: Zeit zum Überwinden des vertikalen Höhenunterschiedes zwischen Bahnsteigebene und Zwischengeschoss (ca.3,04 m / 0,25 m/s):	12	0.2
T3: Zeit zum Erreichen der Treppenaufgänge vom Zwischengeschoss zur Oberfläche : (ca. 49 m / 1m/s)	49	0.8
T4: Zeit zum Überwinden des vertikalen Höhenunterschiedes zwischen Zwischengeschoss und Oberfläche (ca. 4,32m / 0,25 m/s):	17	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 **5,8 Minuten** (siehe Nebenrechnung 1)

S2: Schleusungszeit an den Treppen vom Zwischengeschoss zur Oberfläche **5,8 Minuten** (siehe Nebenrechnung 2)

Wartezeiten an den Treppenaufgängen:

Treppenaufgang Bahnsteigebene: W1 = (S1-T1) = (5,8 - 0,8) min	300	5.0
Treppenaufgänge Zwischengeschoss: W2 = (S2-S1) = (5,8 - 5,8) min » » Ansatz =, da negativer Wert!	0	0.0

Räumungszeit: RZ=T1+T2+T3+T4+T5+W1 **436** **7.3**

Nebenrechnung 1 zur Schleusungszahl S1: (S=Personenzahl vor der Treppenanlage / Kapazität der Treppenanlage in Personen pro Minute)

Entscheidend ist die Treppe mit der größten Schleusungszahl!

Alle Treppen haben die gleiche Breite: Jeweils Kapazität feste Treppe 2,30 m breit \rightarrow 2,30 m/0,6m \rightarrow 3 Fluchtspuren \rightarrow $3 \cdot 33 = 99$ **Personen/Minute**

S1 neue Treppe: 575 P / 99 P/min = **5,8 Minuten**

S1 vorhandene Treppe: 575 P / 99 P/min = 5,8 Minuten

S1 neue Treppe 3: 575 P / 99 P/min = 5,8 Minuten

Nebenrechnung 2 zur Schleusungszahl S2: (S=Personenzahl vor der Treppenanlage / Kapazität der Treppenanlage in Personen pro Minute)

Entscheidend ist die Treppe mit der größten Schleusungszahl!

Vorh. Ausgänge I/1 und II/1 jeweils Kapazität Treppen 2,10 m breit \rightarrow 2,10 m/0,6m \rightarrow 3 Fluchtspuren \rightarrow $3 \cdot 33 = 99$ **Personen/Minute**

Neuer Ausgang III/2: Kapazität Treppen 3,80 m breit \rightarrow 4,20 m/0,6m \rightarrow 7 Fluchtspuren \rightarrow $7 \cdot 33 = 231$ **Personen/Minute**

Neuer Ausgang III/4: Kapazität Treppe 2,30 m breit \rightarrow 2,30 m/0,6m \rightarrow 3 Fluchtspuren \rightarrow $3 \cdot 33 = 99$ **Personen/Minute**

S2 neuer Ausgang III/4: 575 P / 99 P/min = **5,8 Minuten**

S2 neuer Ausgang III/2: 575 P / 231 P/min = 2,5 Minuten

S2 jeweils Ausgang I/1 und II/1: 288 P / 99 P/min = 2,9 Minuten

Anlage 4 Papiaerausdrucke der verwendeten Planunterlagen



