

## 1. Revision der Gutachtlichen Detailstellungnahme 87awk17-G2 Rauchschutznachweis für den U-Bahnhof Grenzallee

---

Der Betriebsleiter

**Datum:** 19.12.2017 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 51 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.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Anlass und Auftrag</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Grundlagen der Beurteilung</b> .....	<b>4</b>
2.1    Verwendete Unterlagen.....	4
2.2    Literatur.....	4
<b>3 Ausgangssituation</b> .....	<b>6</b>
<b>4 Beschreibung des verwendeten CFD-Modells</b> .....	<b>7</b>
4.1    Allgemeines.....	7
4.2    Fehlergrenzen der Methodik.....	8
<b>5 Schutzziele</b> .....	<b>10</b>
<b>6 Geometrische Randbedingungen</b> .....	<b>14</b>
<b>7 Brandszenarien</b> .....	<b>18</b>
<b>8 3D-Volumenmodell des Simulationsbereiches</b> .....	<b>20</b>
<b>9 Ergebnisse</b> .....	<b>23</b>
9.1    Allgemeines.....	23
9.2    Brandszenario 1 Brand eines Triebwagens in der Mitte von Gleis 2 .....	24
9.3    Brandszenario 2 Brand eines Triebwagens im südlichen Drittel von Gleis 2.....	32
9.4    Brandszenario 3 Brand eines Triebwagens im nördlichen Drittel von Gleis 2 .....	40
9.5    Schlussfolgerungen.....	48
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>50</b>
<b>Anlage 1</b>	<b>CD-ROM mit Videoclips (Darstellung der optischen Rauchdichte und der Erkennungsweite)</b>
<b>Anlage 2</b>	<b>Erläuterung der 24 Videoclips auf der CD-ROM</b>
<b>Anlage 3</b>	<b>Berechnung der Räumungszeiten</b>
<b>Anlage 4</b>	<b>Papierausdrucke der verwendeten Planunterlagen</b>

## **1 ANLASS UND AUFTRAG**

Wir wurden von den Berliner Verkehrsbetrieben mit der Erarbeitung der 1. Revision des Rauchschutznachweises für den U-Bahnhof Grenzallee beauftragt.

Die vorliegende 1. Revisionsfassung Gutachtliche Detailstellungnahme untersucht die Rauchausbreitung im U-Bahnhof im Falle eines Triebwagenbrandes und dient als Nachweis, dass die geplanten 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 Erstellung der Gutachtlichen Detailstellungnahme wurden folgende Planunterlagen verwendet:

Planbezeichnung (Bauteil) / Dateiname	Zg.-Nr.:	Datum	Maßstab
Grundriss Bahnsteig, Trompeten und Schalterhallen	MH_H141_Gz_UE200	20.02.2013	1:200
Aufzug – Entwurf Grundrisse und Schnitte	Gz_PG_003	26.07.2016	1:100

- Evakuierungsberechnung für den U-Bahnhof Grenzallee vom 14.12.2017, 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, 3<sup>rd</sup> 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 – F 74
- [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 Forschungs-

stelle 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

### 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 gesamte U-Bahnhof Grenzallee inklusive der Schalterhalle I mit einem Ausgang im Norden sowie die oberirdische Schalterhalle II mit einem Ausgang im Süden innerhalb von 6,7 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. 6,7 Minuten muss eine ausreichend hohe raucharme Schicht vorhanden sein.

Die vorliegende 1. Revision des Rauchschutznachweises wurde notwendig, da die Erfüllung der Schutzziele in der Fassung der Gutachtlichen Detailstellungnahme 87awk17-G1 vom 15.11.2016 nicht vollumfänglich nachgewiesen werden konnte. An den Aufgängen vom Bahnsteig in die Schalterhallen wurden daraufhin Rauchschürzen eingeplant, so dass sich veränderte Ventilationsbedingungen ergeben. Zusätzlich wurde ein drittes Brandszenario zur Absicherung des Nachweises ausgewertet.

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 soll nachgewiesen werden, dass für eine Zeitspanne von mind. 6,7 Minuten (Evakuierungszeit) eine ausreichend hohe raucharme Schicht auf dem Bahnsteig und in den Schalterhallen aufrechterhalten bleibt.

## 4 BESCHREIBUNG DES VERWENDETEN CFD-MODELLS

### 4.1 Allgemeines

Bei dem für die Berechnung der Rauchausbreitung beim U-Bahnhof Grenzallee 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 Tech-  
nik 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 berück-  
sichtigt werden, dass auch Experimente aufgrund von naturgemäß vorhandenen Messfehlern  
gewissen Unsicherheiten unterworfen sind.

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

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

mit

$\eta$  Modellunsicherheitsfaktor für die Beschreibung der Rauchausbreitung [-]

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

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

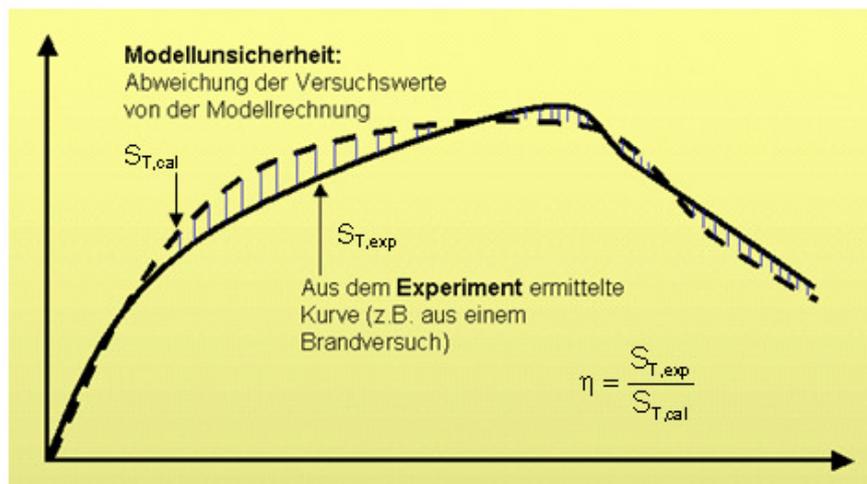


Abb. 1 Beschreibung von Modellunsicherheiten durch einen multiplikativen Ansatz

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  $\geq 10$  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 <sub>2</sub> -Konzentration	1 Vol.-%	2 Vol.-%	3 Vol.-%
HCN-Konzentration <sup>(1)</sup>	8 ppm	16 ppm	40 ppm
Wärmestrahlung	1,7 kW/m <sup>2</sup>	2,0 kW/m <sup>2</sup>	< 2,5 kW/m <sup>2</sup>
Gastemperatur <sup>(2)</sup>	45 °C	50 °C	50 °C
Rauchdichte $D_L$	0,1 m <sup>-1</sup>	0,1 m <sup>-1</sup> / 0,15 m <sup>-1</sup> <sup>(3)</sup>	0,1 m <sup>-1</sup> / 0,2 m <sup>-1</sup> <sup>(3)</sup>
Erkennungsweite <sup>(4)</sup>	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:

$\sigma_s$  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

$S = C / k$  für nicht reizenden Rauch bzw.

$S = C / k (0.133 - 1.47 \log k)$  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 (6,7 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: Bahnsteige, Schalterhallen, Treppen und Ausgänge) 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 6,7 Minuten ausgegangen, bis zu der sich die Personen aus dem Gefahrenbereich entfernt haben.

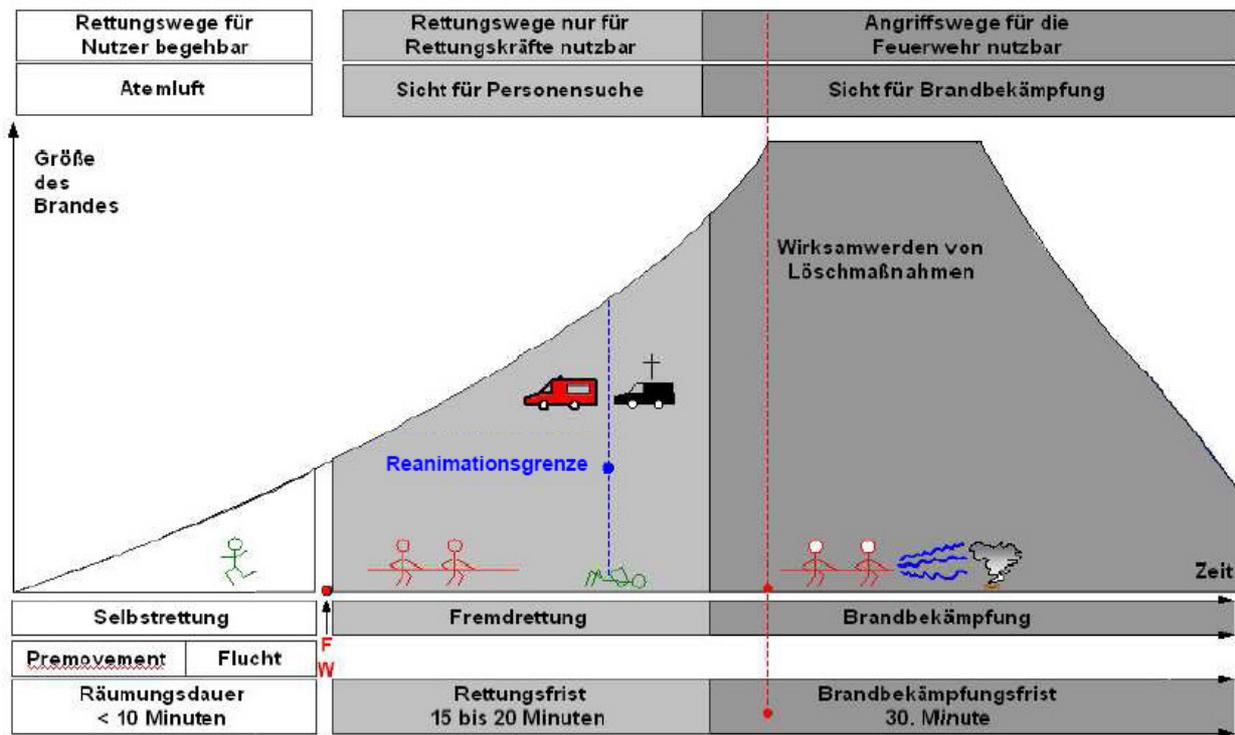


Abb. 3 Brandphasen mit zugeordneten Hauptnutzungen der Rettungswege



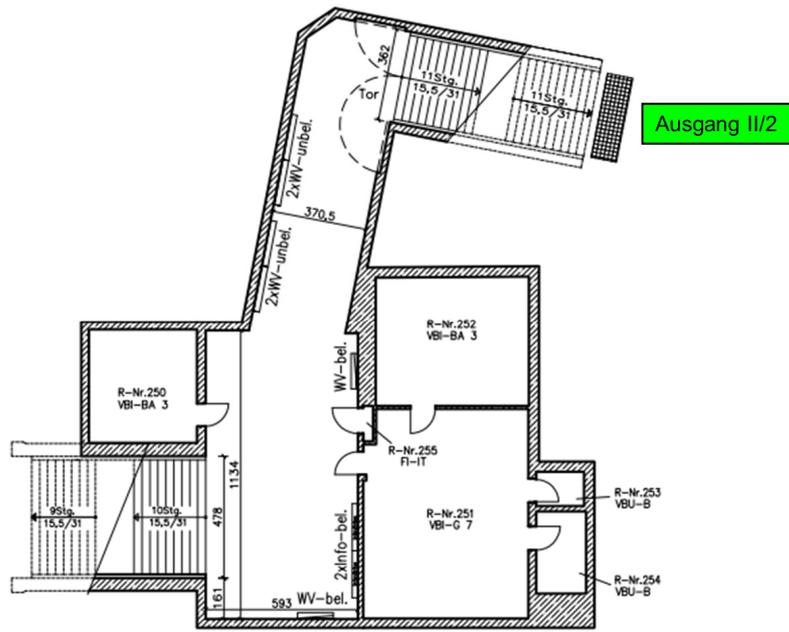


Abb. 6 Schalterhalle II mit Ausgang II/2

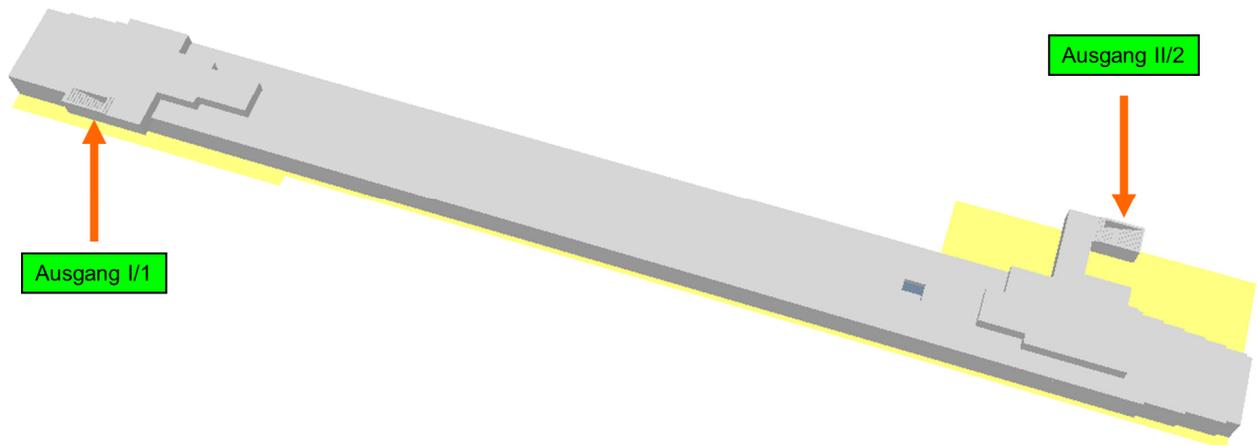


Abb. 7 alle Ausgänge im Modell

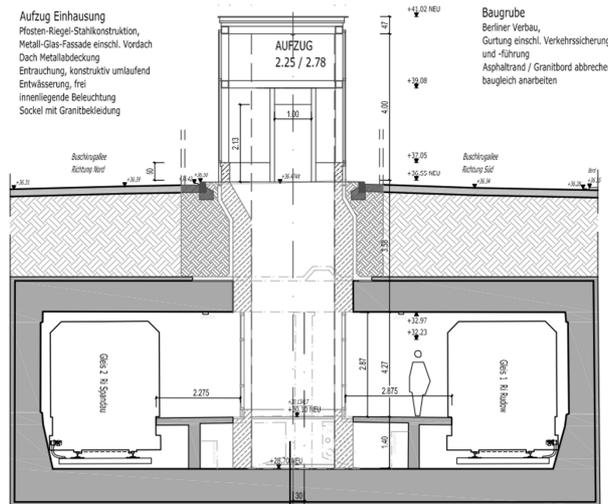


Abb. 8 Querschnitt durch den Bahnhof

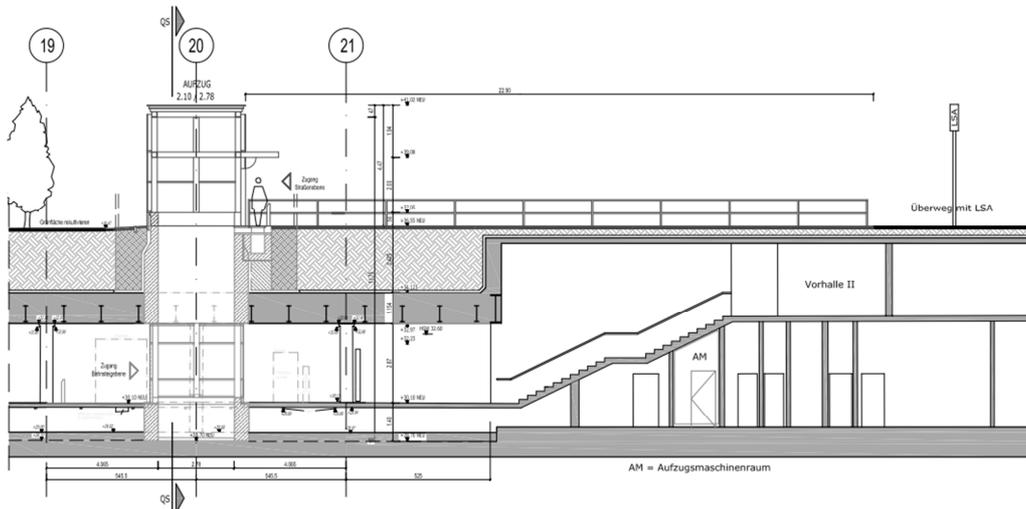


Abb. 9 Längsschnitt durch den südlichen Bahnhof

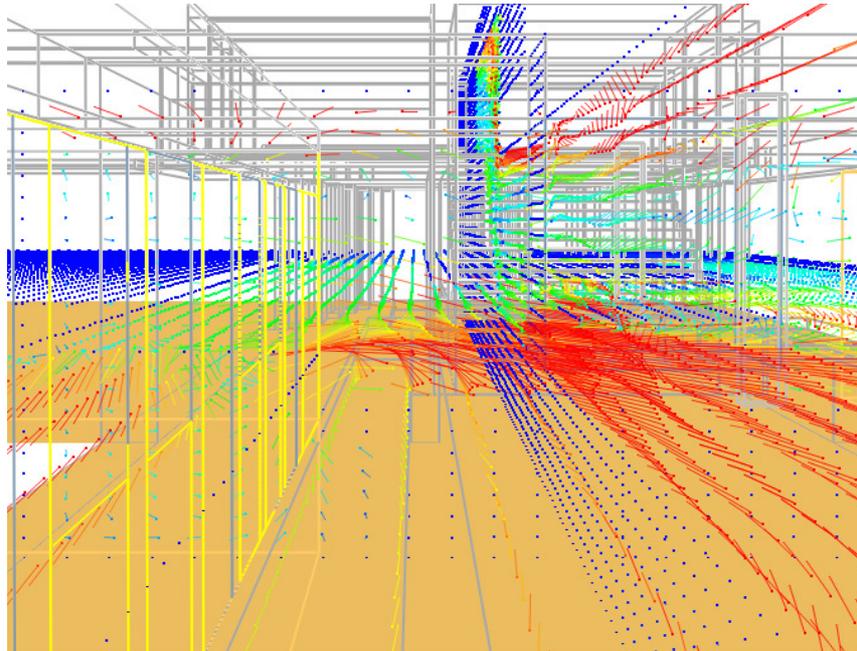
In der vorliegenden 1. Revisionsfassung der Gutachtlichen Detailstellungnahme wurden direkt vor den Aufgängen in die Schalterhallen Rauchschürzen berücksichtigt. Die Positionen können der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.



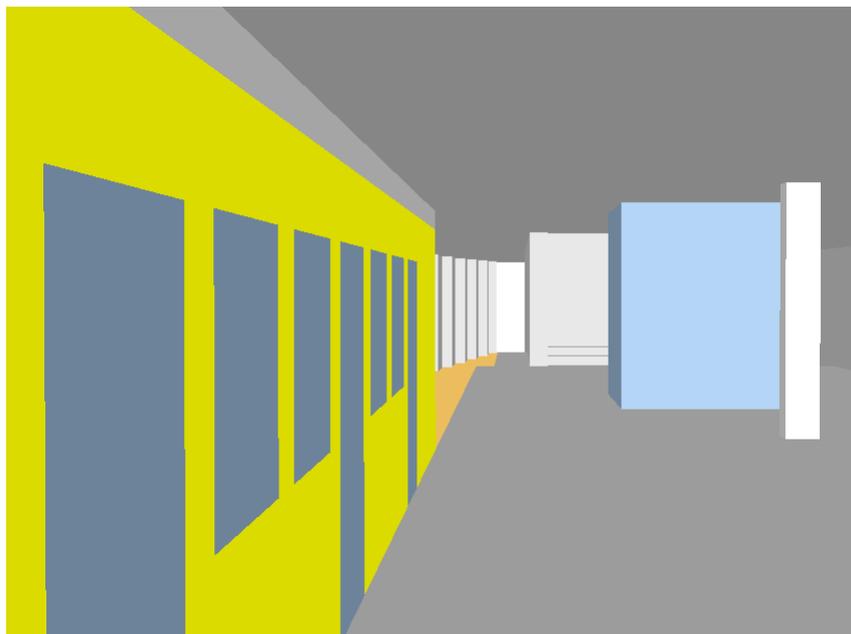
Abb. 10 neue Rauchschürzen an den Treppenaufgängen in die Schalterhallen

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 Schalterhallen und von dort direkt über die Ausgänge ins Freie.

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



*Abb. 11 Strömung in der Ebene des brennenden Triebwagens im Gleis*



*Abb. 12 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 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].

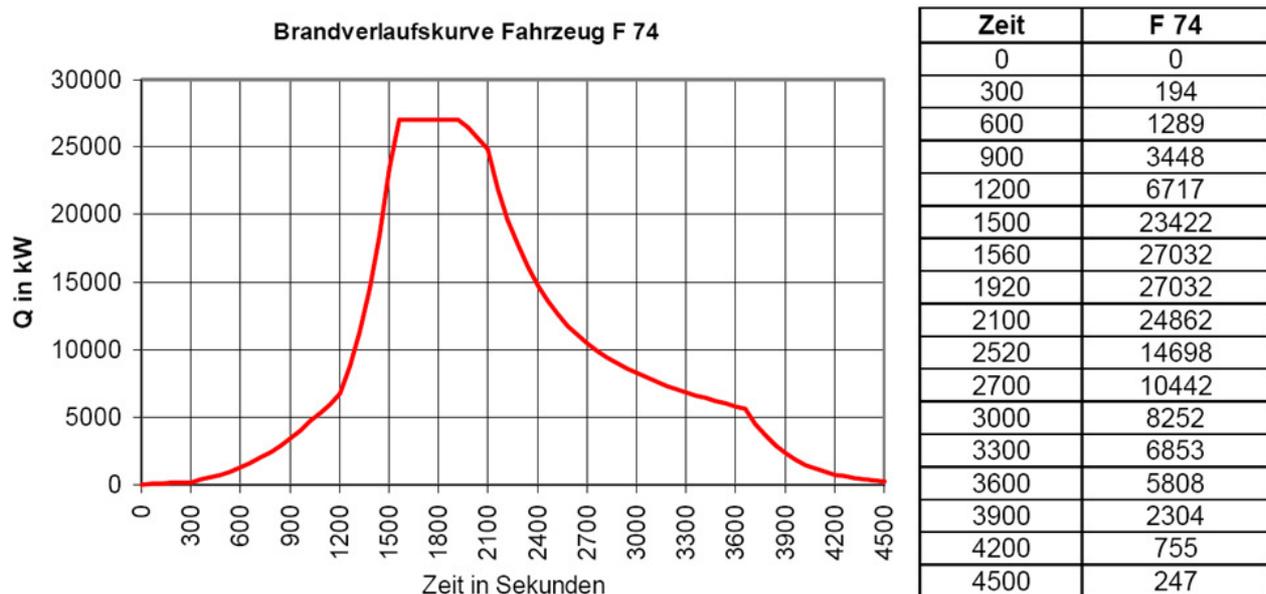


Abb. 13 Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate für den Brand eines Triebwagens F 74

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 Neukölln zum Bahnhof Grenzallee 70 Sekunden. Für die Gegenrichtung vom Bahnhof Grenzallee zum Bahnhof Blaschkoallee ist  $t_1$  mit 100 Sekunden angegeben. Somit muss hier die maßgebliche Fahrzeit  $t_1 = 100$  Sekunden in die Simulationsberechnung einfließen.

Konservativ wurde der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsrate nach Abb. 13 so angepasst, dass die Simulationszeit zum Zeitpunkt 100 Sekunden nach Brandbeginn startet. Zum Simulationszeitpunkt  $t = 0$  Sekunden liegt somit bereits eine Wärmefreisetzungsrate von ca. 65 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 Rauchaussbeuten nach [7]

Gasanteil	Dimension	bis 720 sec.	> 720 sec.
y-CO <sub>2</sub>	g / g	1,034	1,5
y-CO	g / g	0,023	0,045
y-s	g / g	0,046	0,154
Dm	m <sup>2</sup> / 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
- Wärmeleitzahl in W/mK 230
- Wärmekapazität in kJ/kgK 1,02
- Emissivität 0,8
- Dichte in kg/m<sup>3</sup> 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 südlichen Drittel im Bahnhof
- Brandszenario 3: brennender Triebwagen im nördlichen 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. 14 Position des brennenden Triebwagens für Szenario 1, 2 und 3

## 8 3D-VOLUMENMODELL DES SIMULATIONSBEREICHES

Der bezüglich der Rauchausbreitung zu beurteilende U-Bahnhof Grenzallee 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 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 das Stützen und Unterzüge wurden 1:1 im Modell berücksichtigt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das CFD-Modell des Bahnhofs aus verschiedenen Perspektiven.

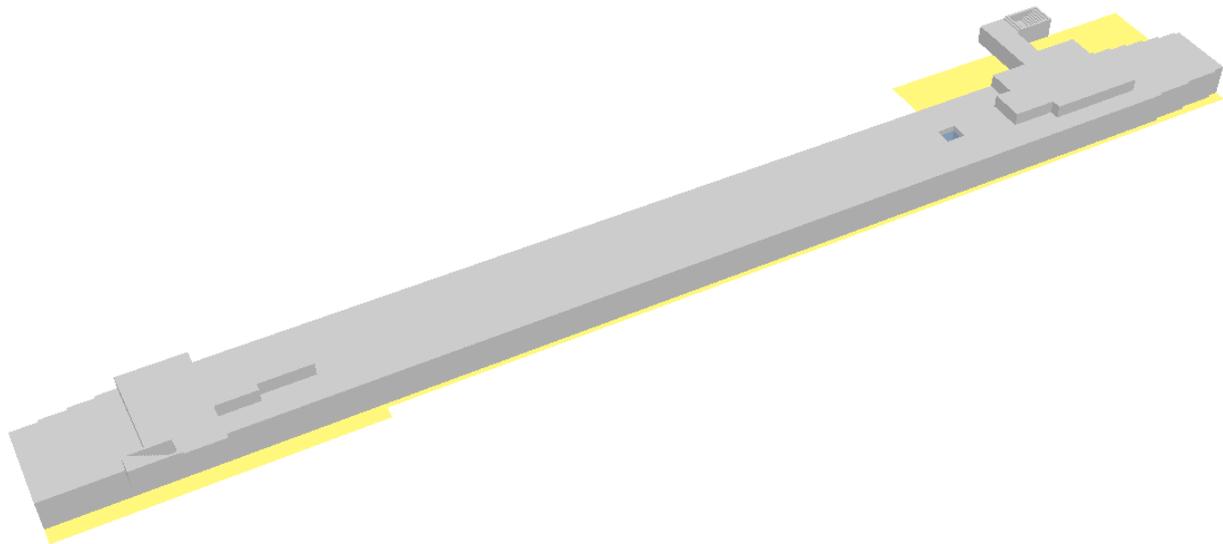


Abb. 15 Ansicht des simulierten Raumes

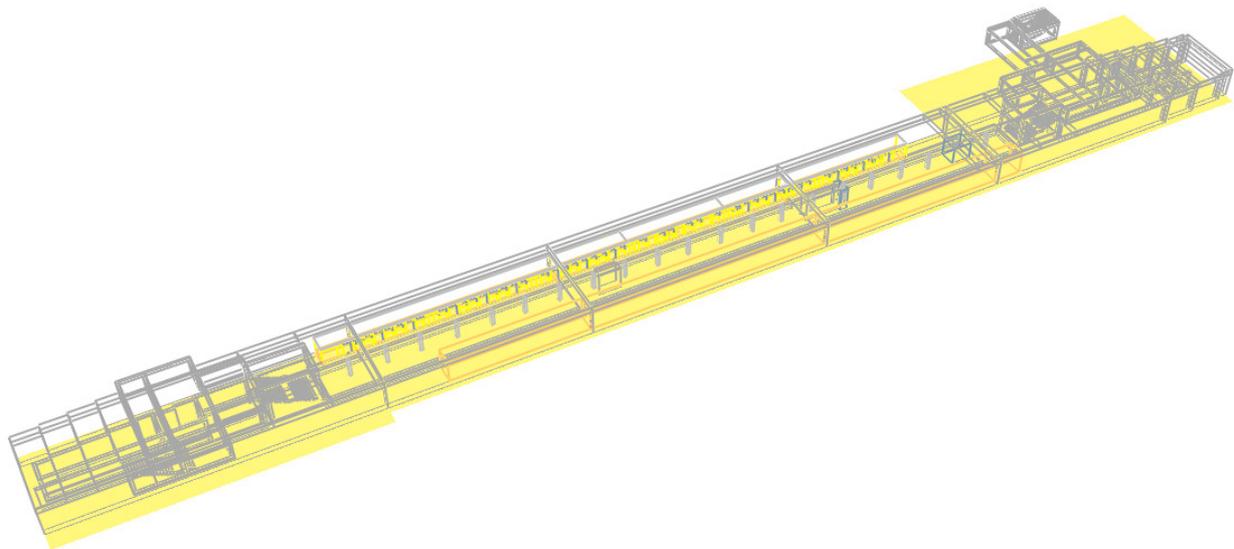
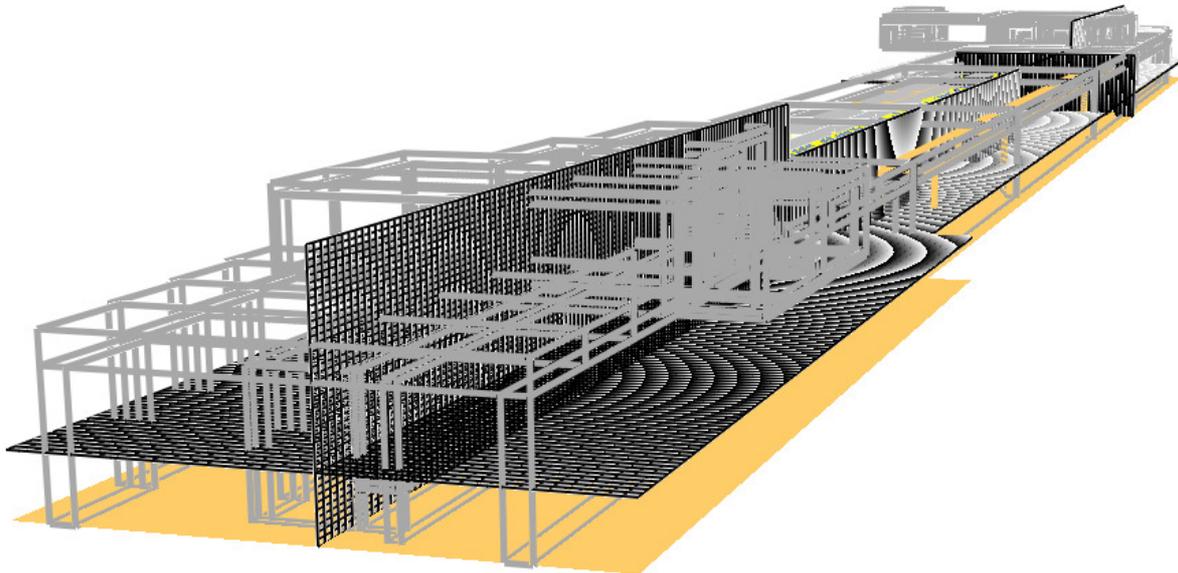


Abb. 16 Ansicht des simulierten Raumes

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 Wärmefreisetzungsrates) 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 über 1,6 Millionen Zellen (siehe Abb. 17).



*Abb. 17* Verwendetes Rechengitter für die CFD-Simulation des U-Bahnhofes mit 1.684.800 Zellen

Die Brandsimulationszeit wird auf maximal 20 Minuten begrenzt, da zu diesem Zeitpunkt bereits alle Ebenen vollständig verraucht 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 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
- $t = 6,7$  Minuten (399 Sekunden - Evakuierungszeit).

Zusätzlich wird der Parameter „Optische Rauchdichte“ zu den Zeitpunkten dargestellt, ab denen die Räumung auf dem Bahnsteig und in den Schalterhallen abgeschlossen sein muss.

Die Parameter „Erkennungsweite“ und „Optische Rauchdichte“ werden jeweils im Horizontalschnitt in einer Höhe von 2,0 m über der Fußbodenebene des Bahnsteigs, der Schalterhallen I und II sowie im Vertikalschnitt ausgewertet.

Ergänzt werden die Einzelbilder durch 16 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

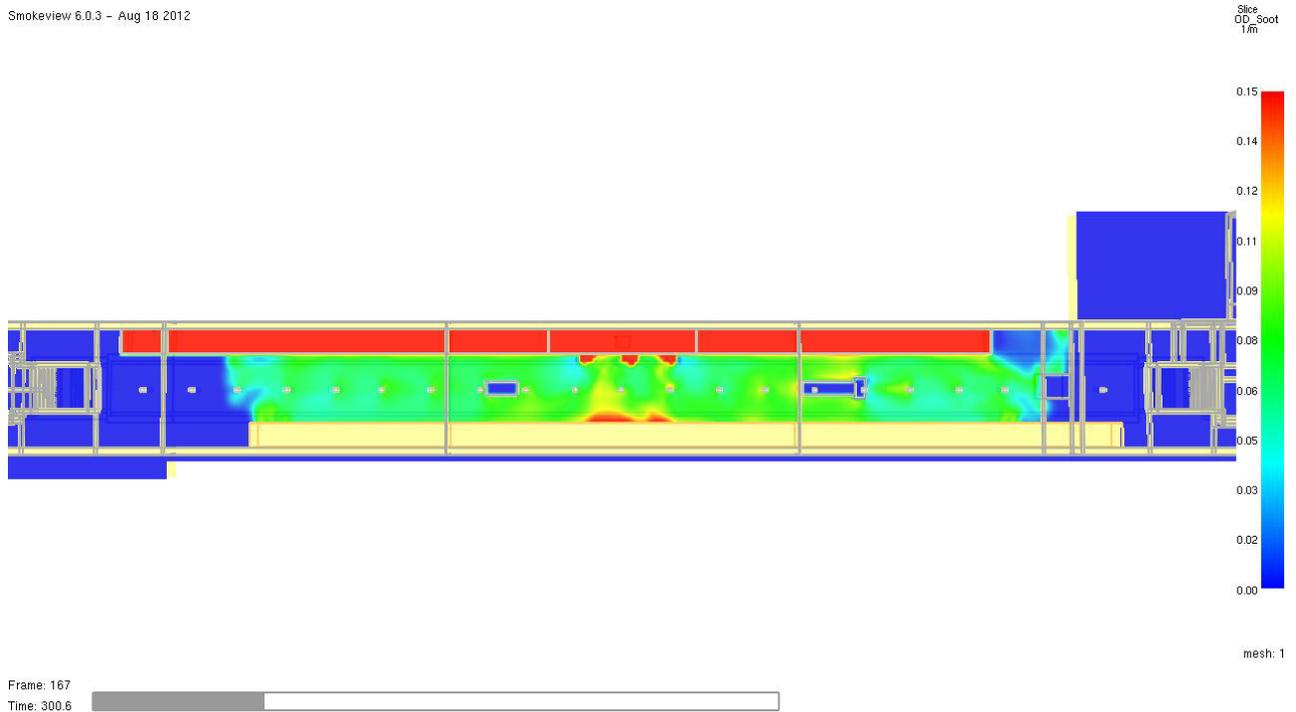


Abb. 18 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt erfüllt.

Smokeview 6.0.3 – Aug 18 2012

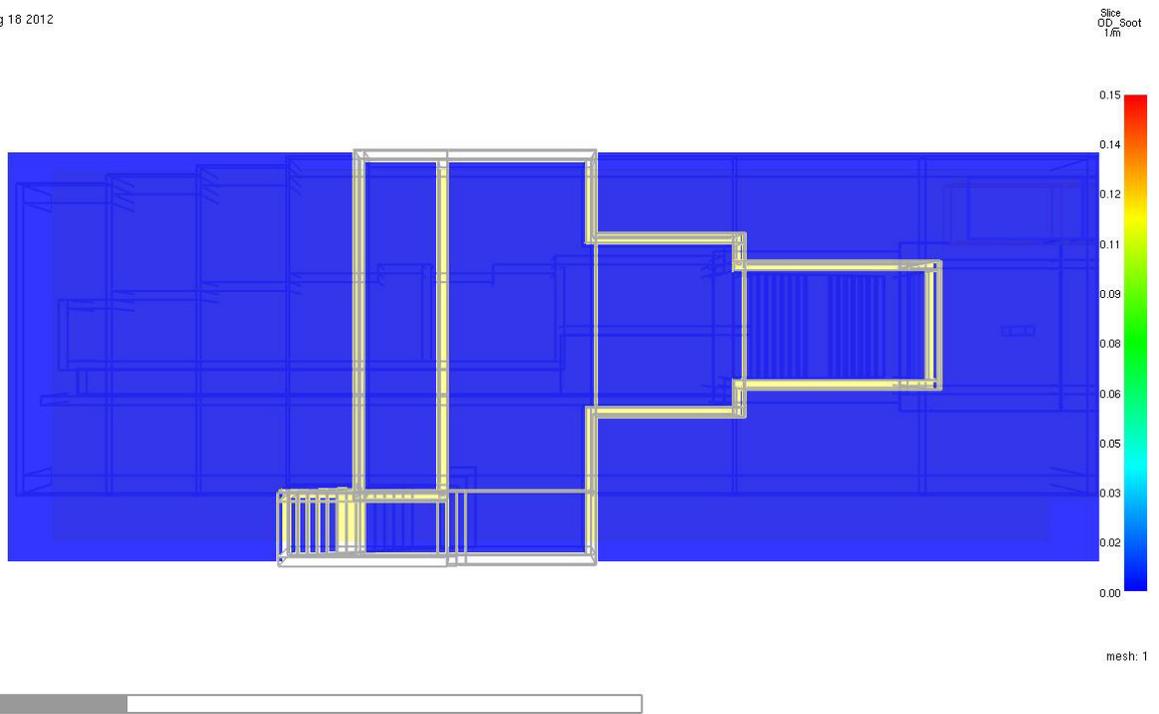


Abb. 19 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle I**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012

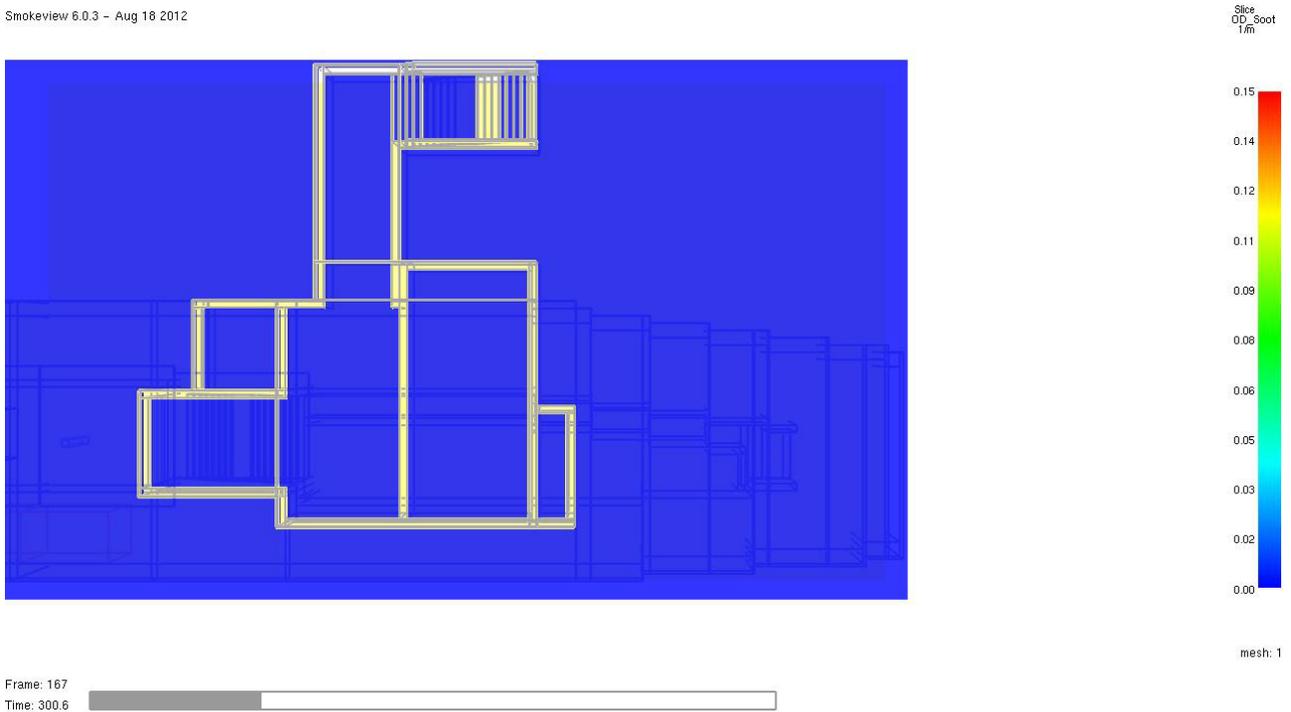


Abb. 20 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle II**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012

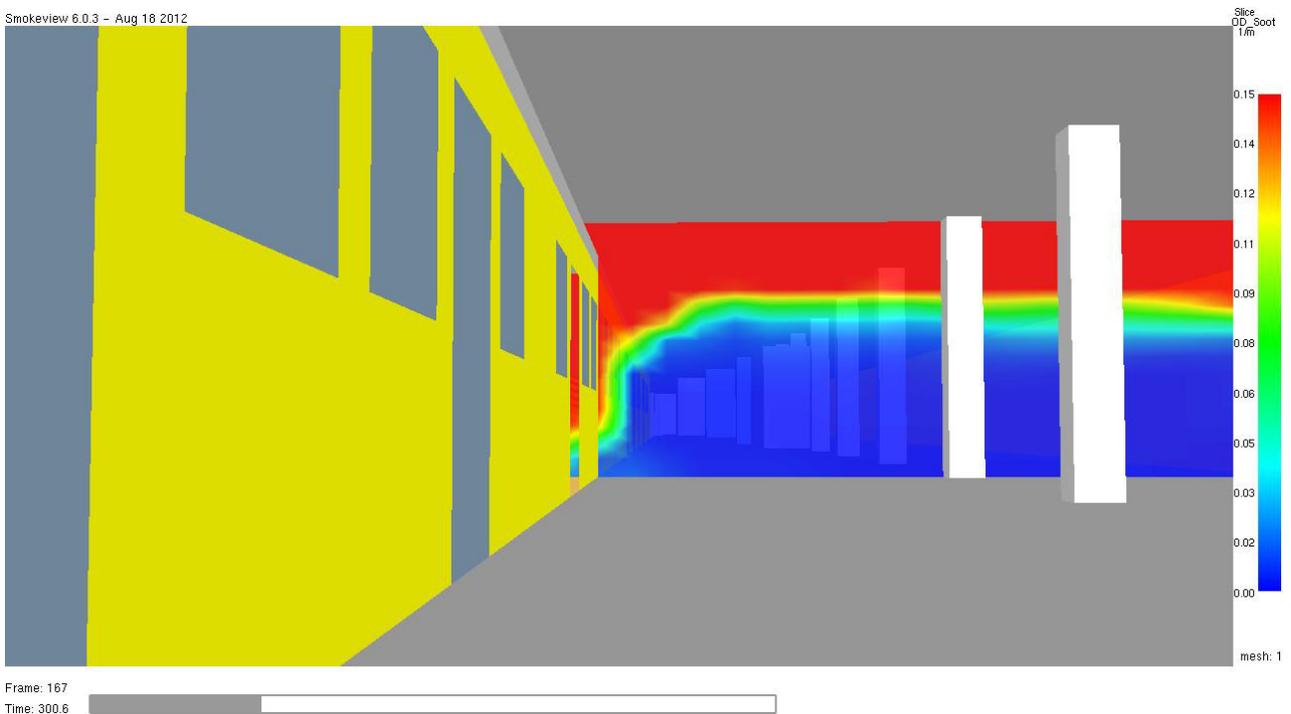


Abb. 21 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Vertikalschnitt durch den Brandherd und den Bahnhof. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

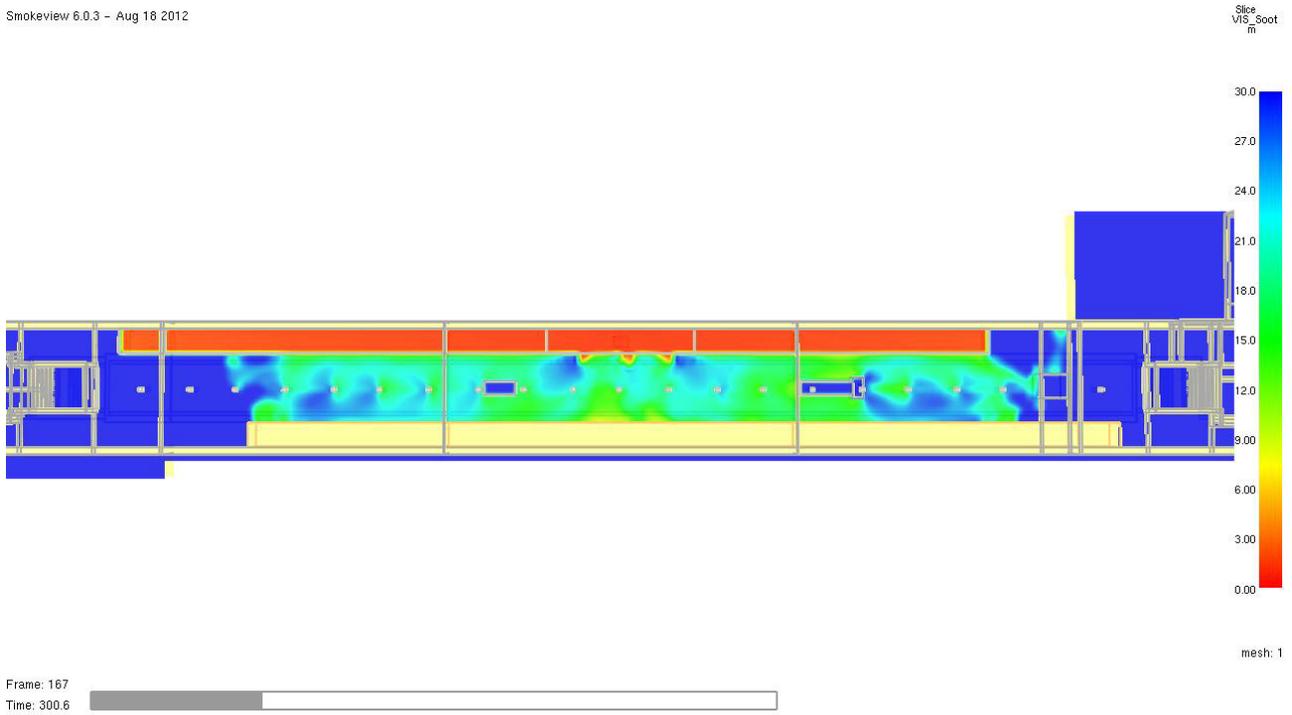


Abb. 22 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt  $t = 300$  Sekunden im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

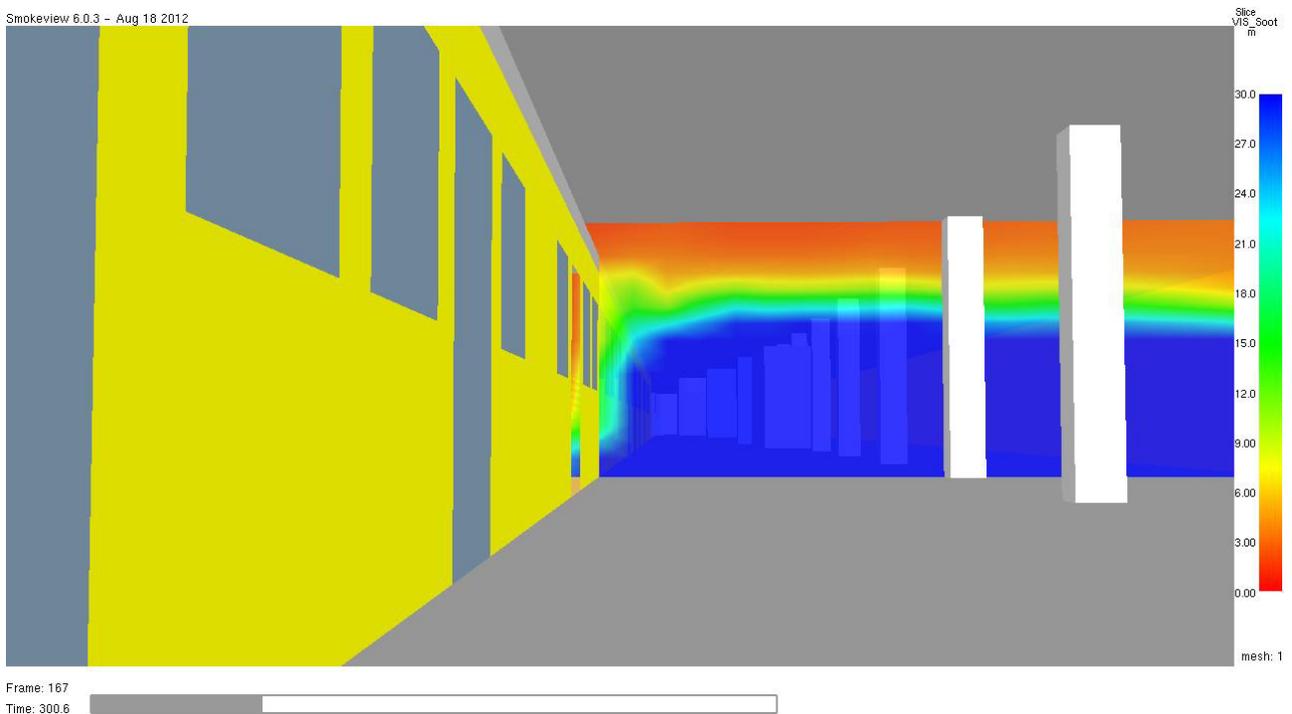
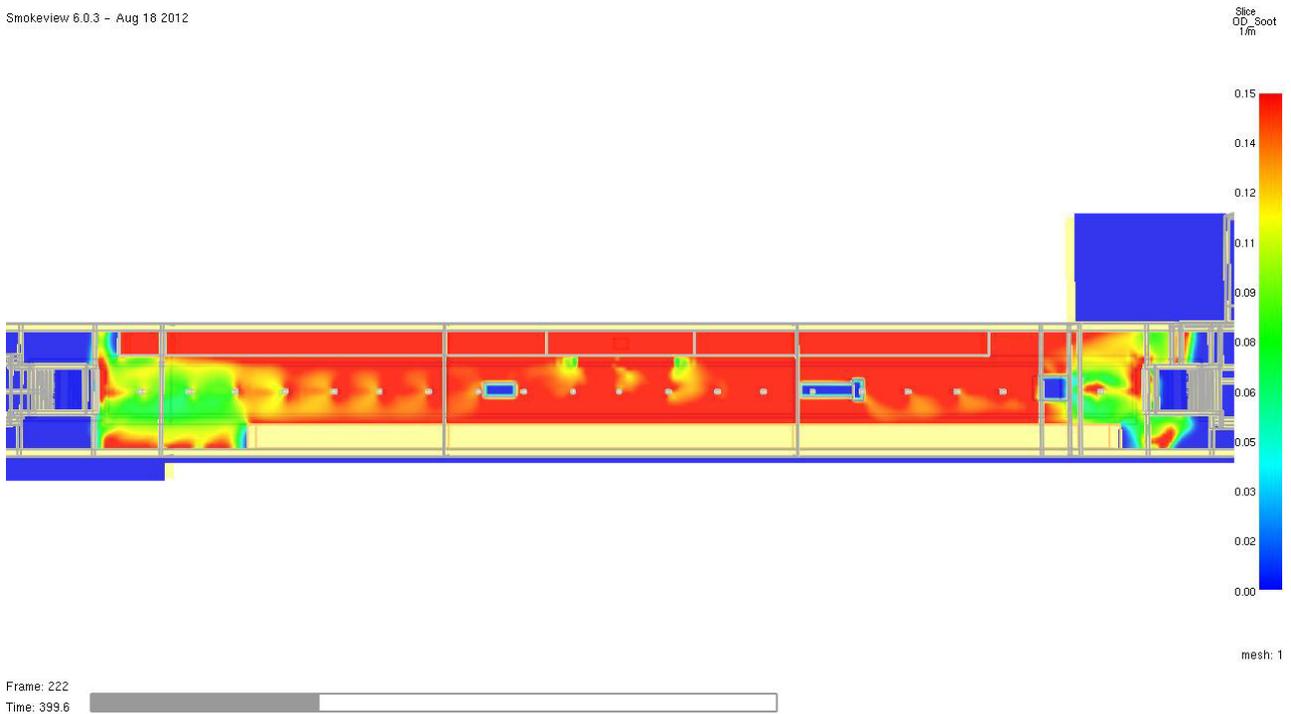


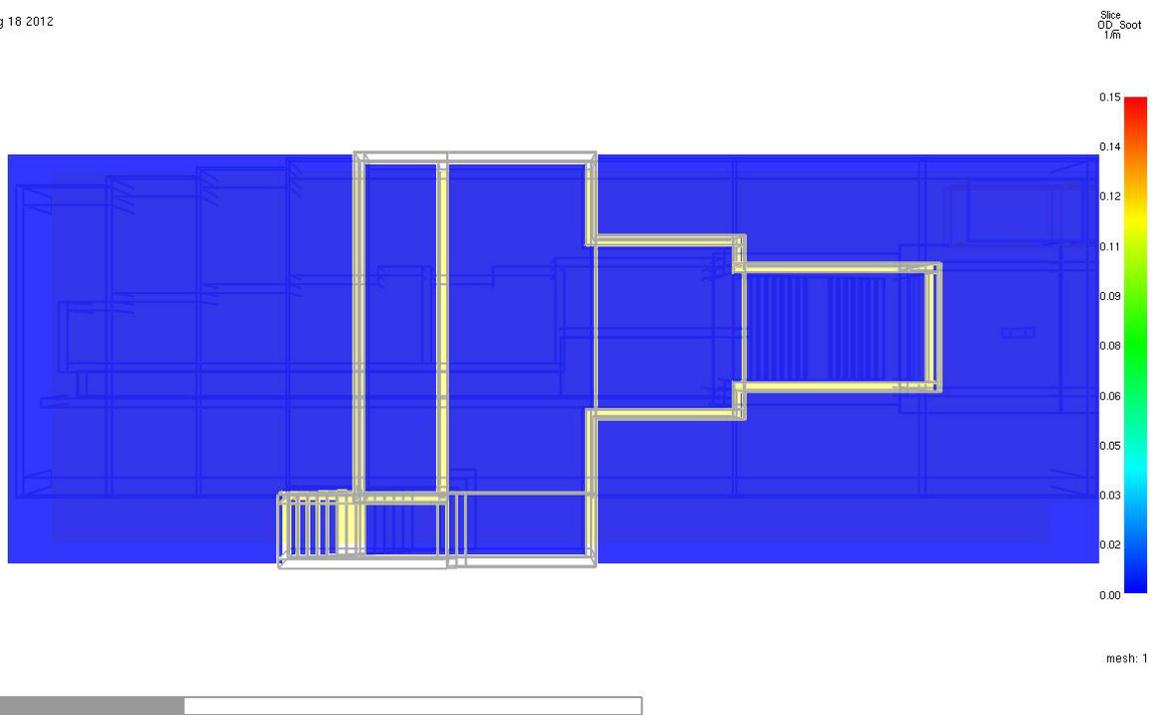
Abb. 23 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt  $t = 300$  Sekunden im Vertikalschnitt durch den Brandherd und den Bahnhof

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012



**Abb. 24** **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Der Grenzwert von 0,15 1/m wird fast auf der gesamten Ebene erreicht. Die flüchtenden Personen befinden sich zu diesem Zeitpunkt im Freien.

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012



**Abb. 25** **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle I**. Der Grenzwert von 0,15 1/m wird in der gesamten Ebene erreicht. Die flüchtenden Personen befinden sich zu diesem Zeitpunkt im Freien.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

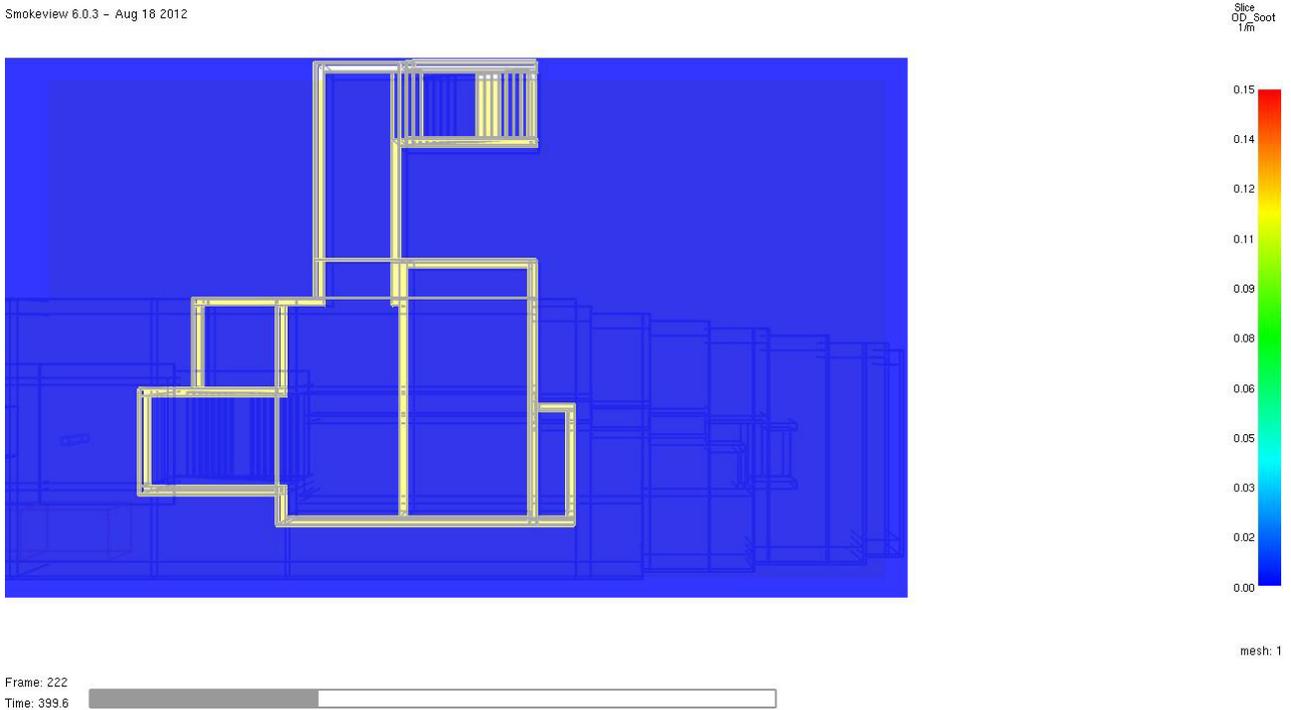


Abb. 26 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle II**. Der Grenzwert von 0,15 1/m wird in der gesamten Ebene erreicht. Die flüchtenden Personen befinden sich zu diesem Zeitpunkt im Freien.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

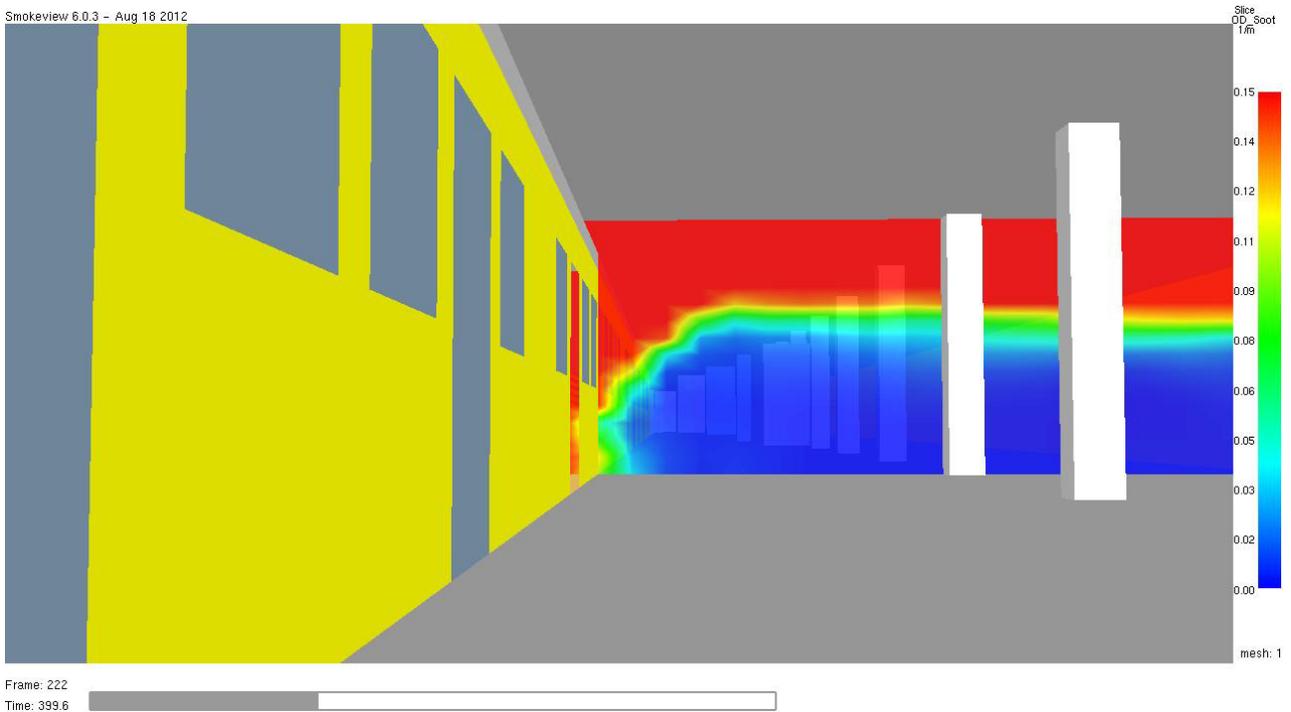


Abb. 27 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Vertikalschnitt durch den Brandherd und den Bahnhof.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

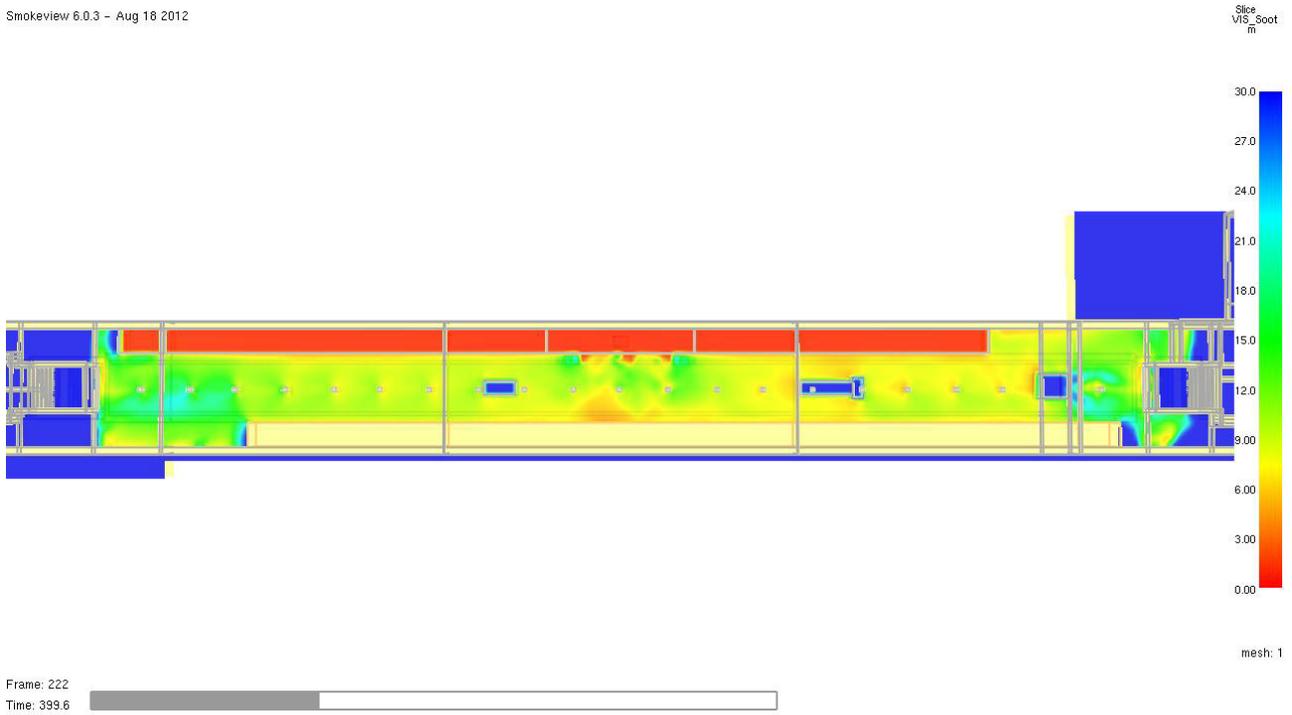


Abb. 28 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird nicht mehr erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

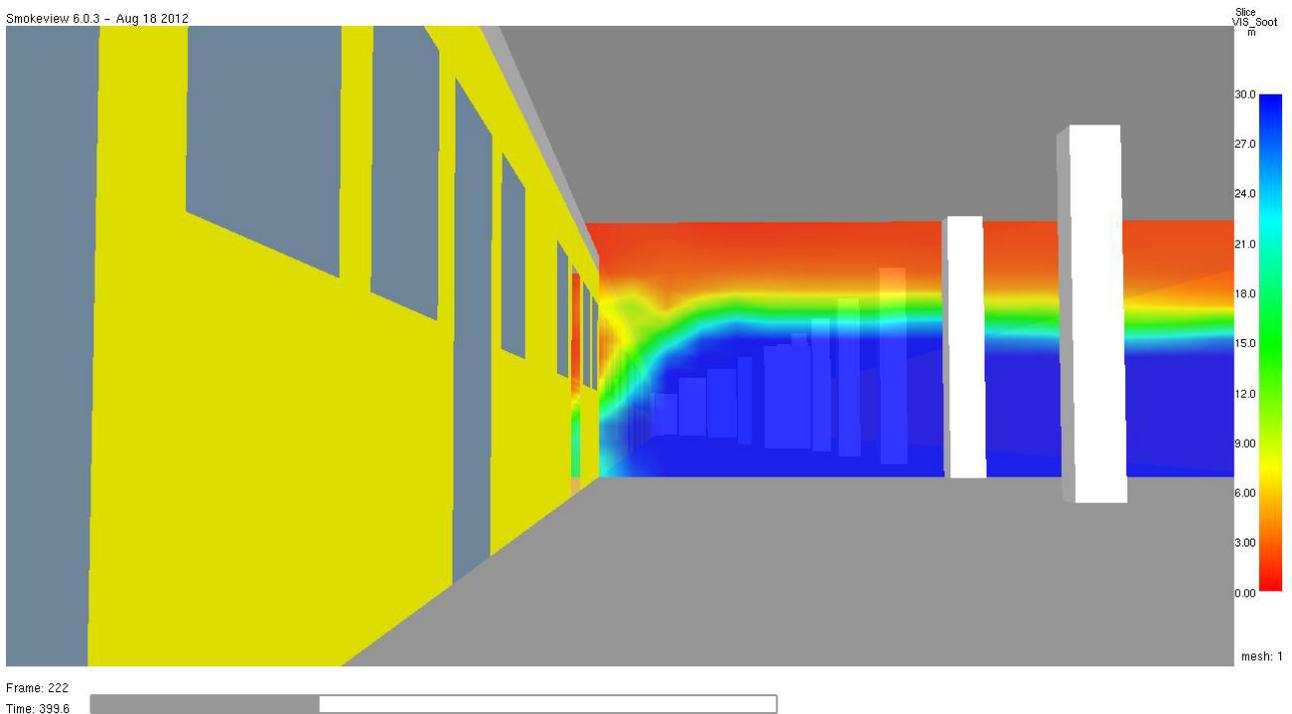


Abb. 29 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Vertikalschnitt durch den Brandherd und den Bahnhof.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

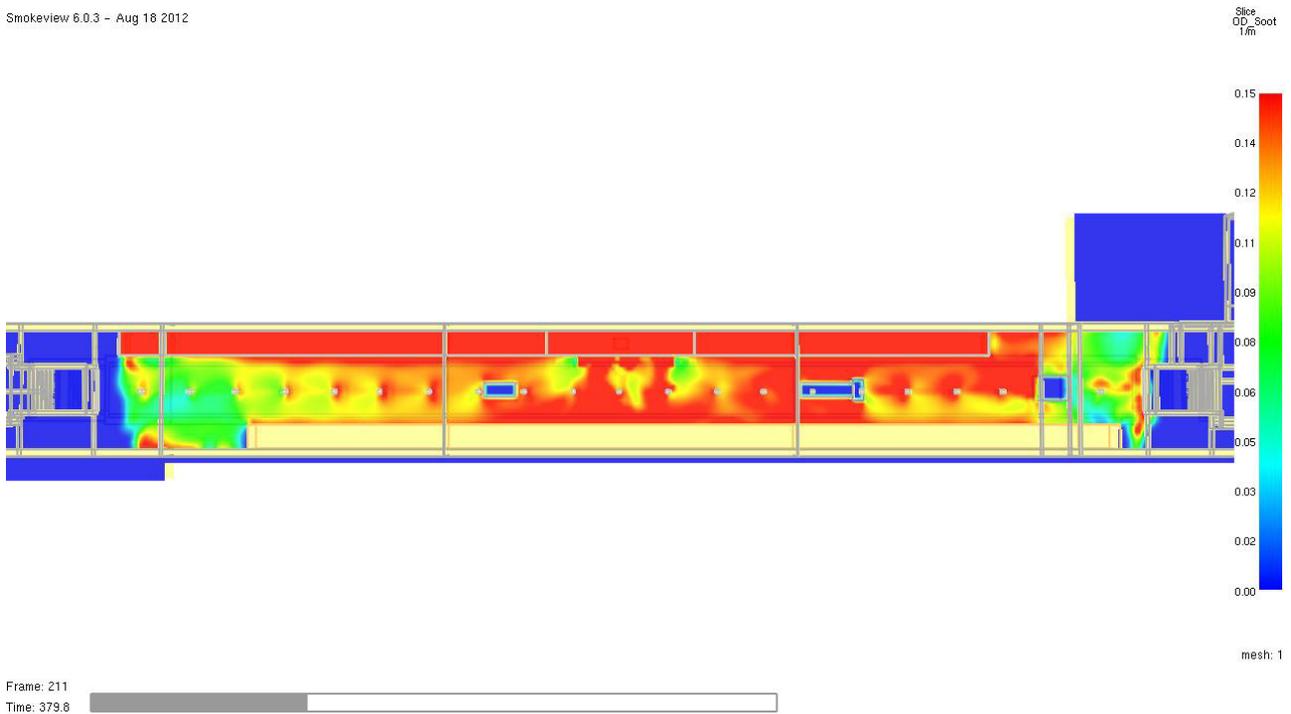


Abb. 30 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 380 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der Bahnsteig nicht mehr passierbar, da der mittlere Bereich der Bahnsteigebene ver-raucht ist.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

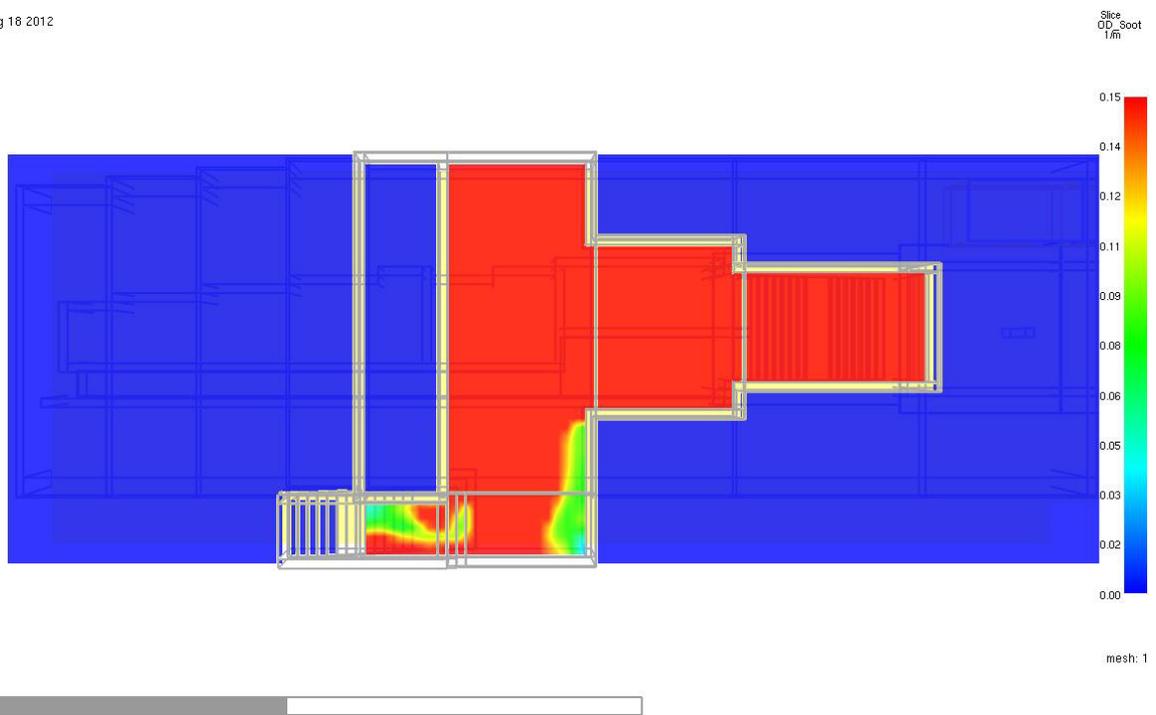


Abb. 31 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 560 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle I**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der größte Bereich der Schalterhalle ver-raucht. Der Ausgang ist gerade noch nutzbar.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



Abb. 32 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 590 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle II**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der größte Bereich der Schalterhalle verraucht. Der Ausgang ist gerade noch nutzbar.

### 9.3 Brandszenario 2 Brand eines Triebwagens im südlichen Drittel von Gleis 2

Smokeview 6.0.3 – Aug 18 2012

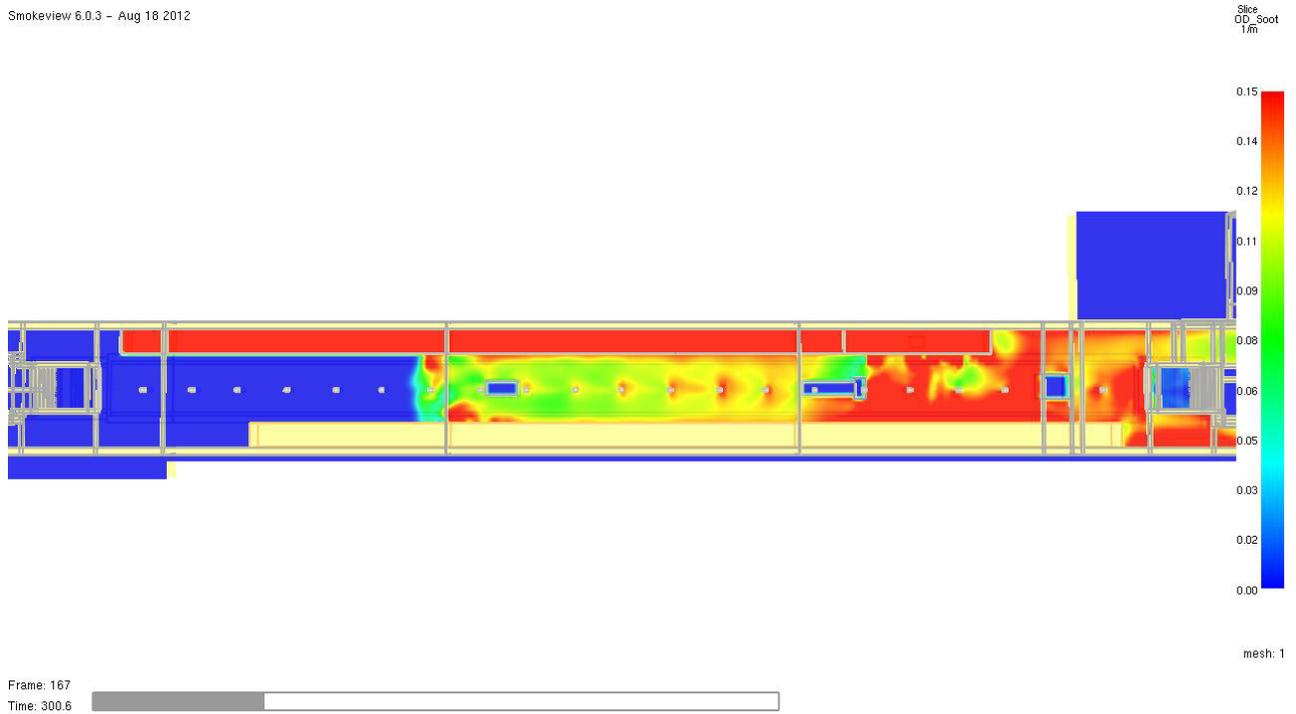


Abb. 33 **Optische Rauchdichte in 1/m zum Zeitpunkt  $t = 300$  Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird ab diesem Zeitpunkt im südlichen Bereich nicht mehr erfüllt.

Smokeview 6.0.3 – Aug 18 2012

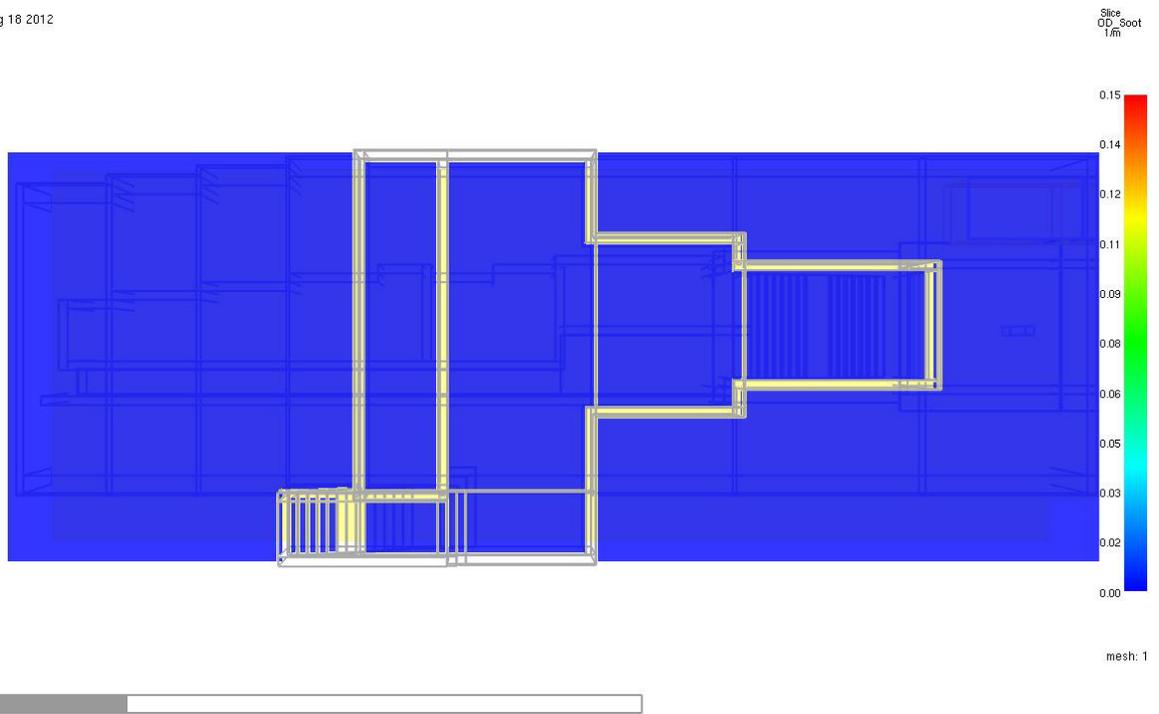


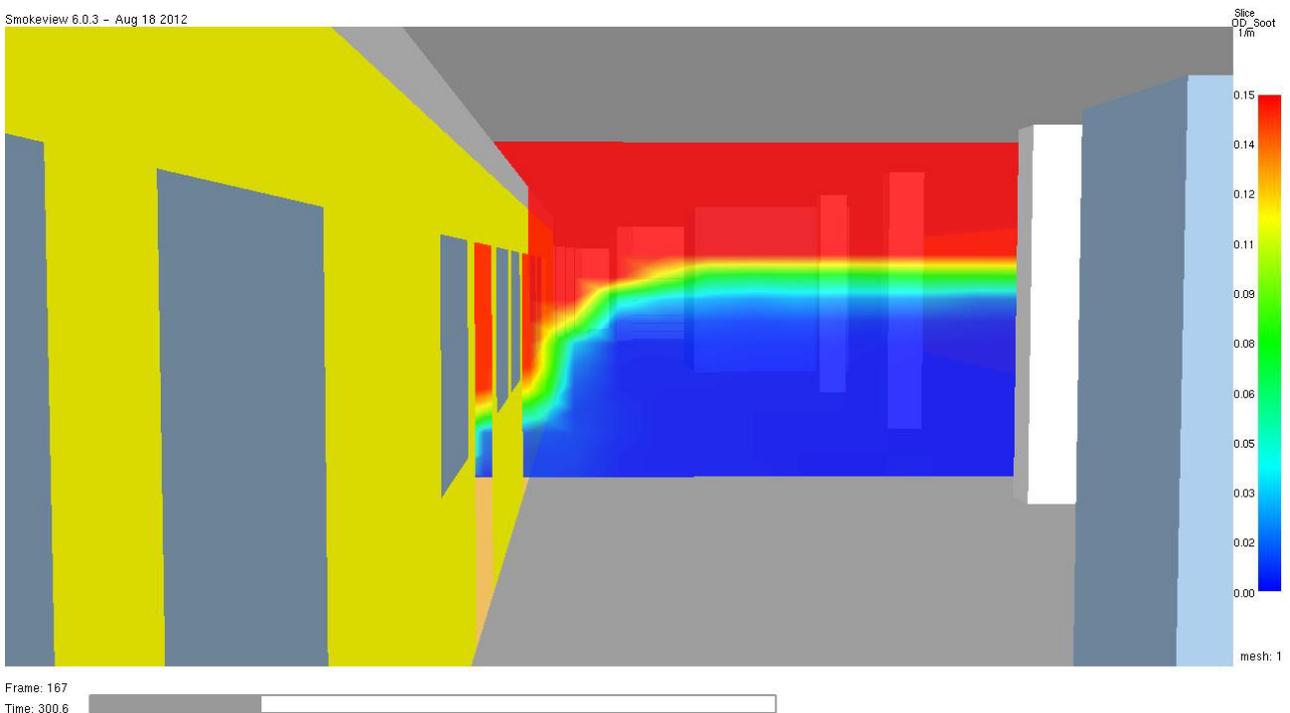
Abb. 34 **Optische Rauchdichte in 1/m zum Zeitpunkt  $t = 300$  Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle I**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



**Abb. 35** *Optische Rauchdichte in 1/m zum Zeitpunkt  $t = 300$  Sekunden im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle II**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt erfüllt. Lediglich oberhalb der Treppenanlage zum Bahnsteig wird der Grenzwert punktuell erreicht.*

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



**Abb. 36** *Optische Rauchdichte in 1/m zum Zeitpunkt  $t = 300$  Sekunden im Vertikalschnitt durch den Brandherd und den Bahnhof. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.*

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

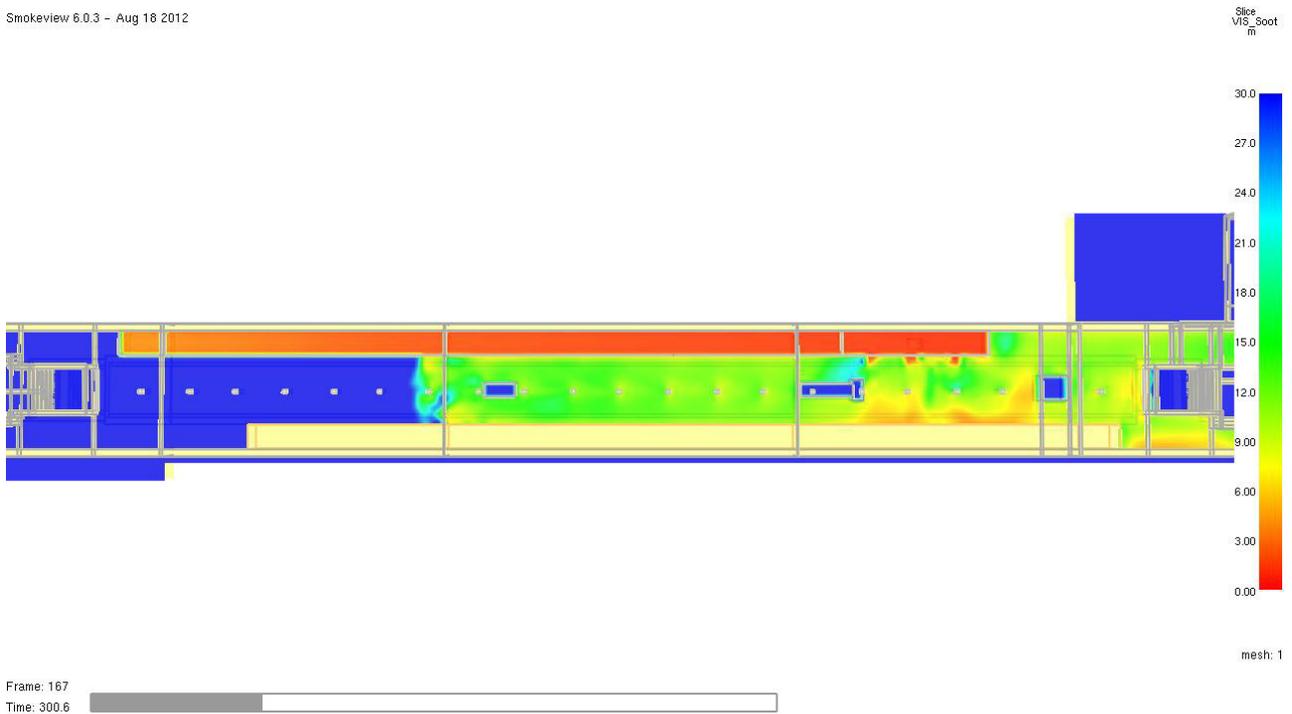


Abb. 37 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt gerade noch erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

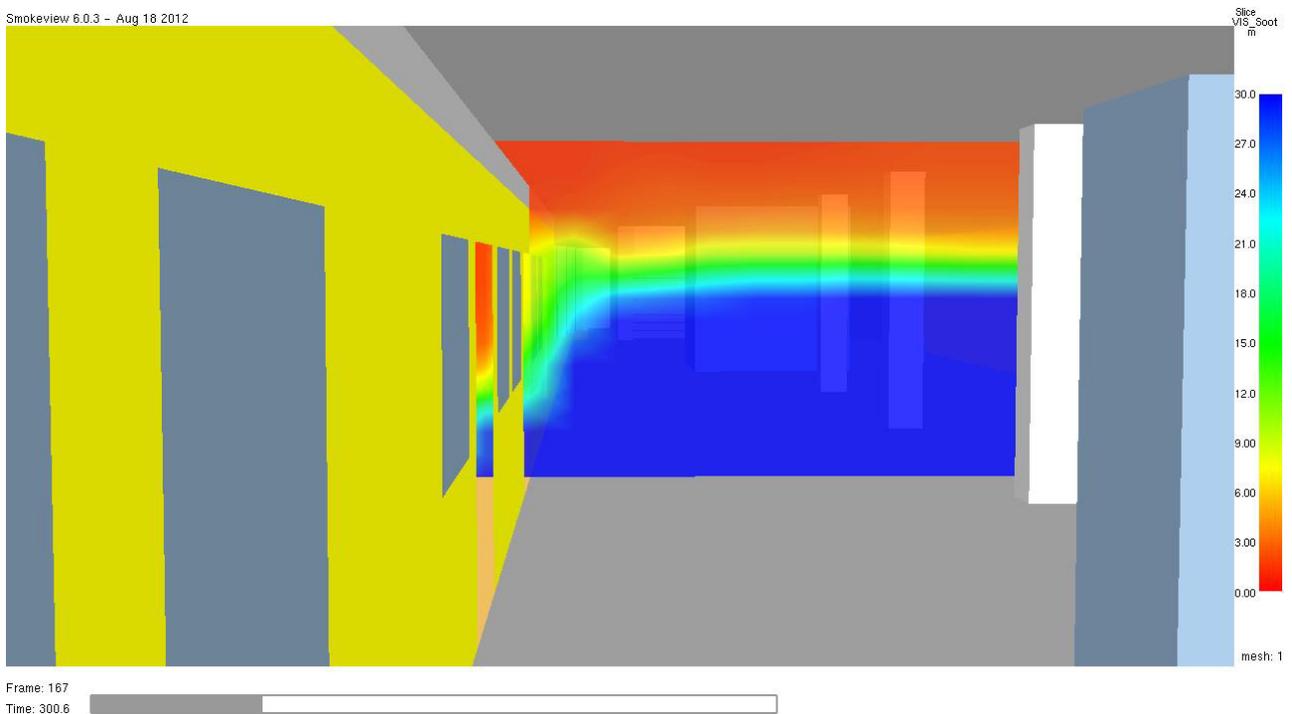
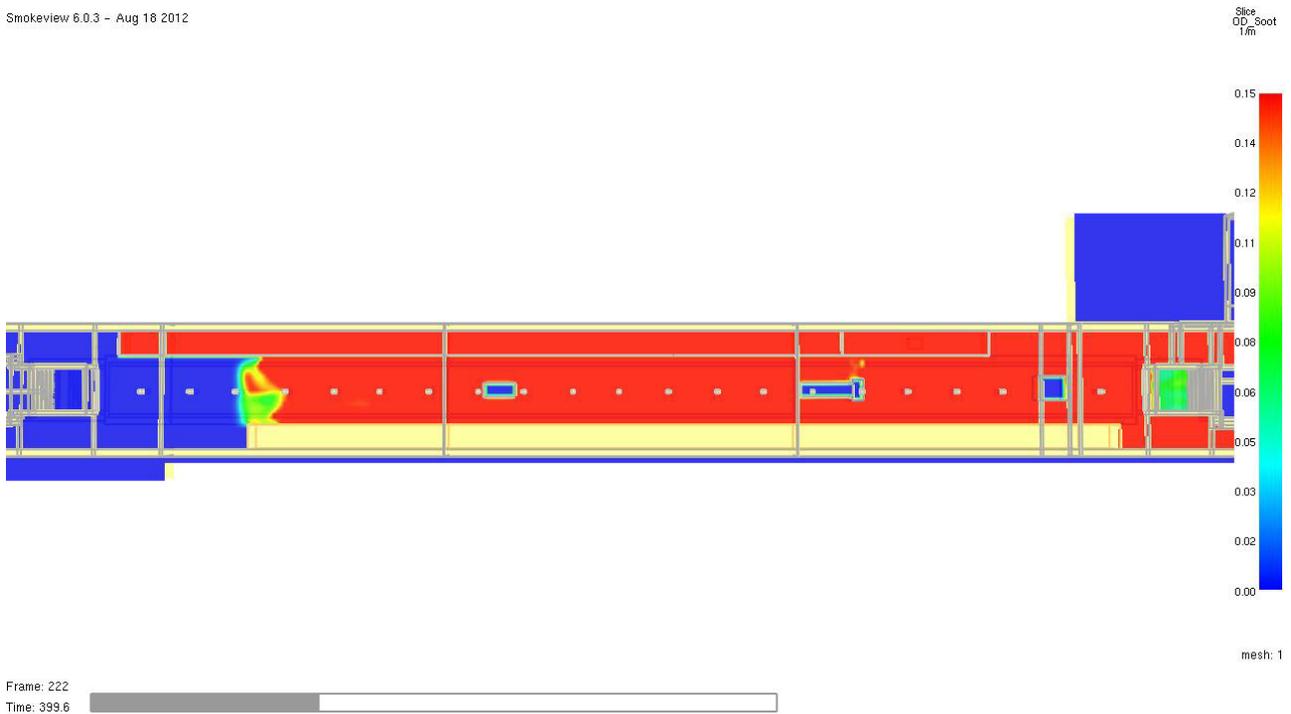


Abb. 38 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Vertikalschnitt durch den Brandherd und den Bahnhof

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



**Abb. 39** *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnhofs**. Der Grenzwert von 0,15 1/m wird fast in der gesamten Ebene erreicht. Die flüchtenden Personen befinden sich zu diesem Zeitpunkt schon im Freien.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



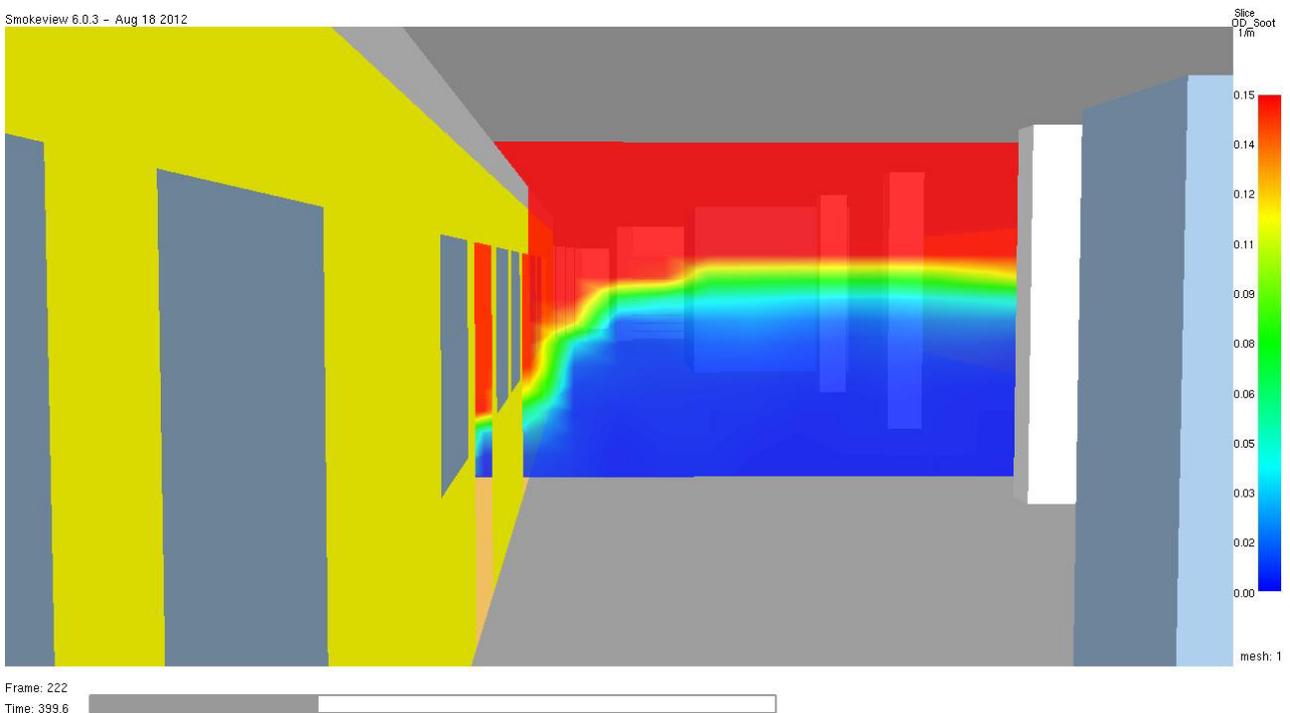
**Abb. 40** *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle I**. Das Schutzziel wird vollumfänglich erfüllt. Die flüchtenden Personen befinden sich zu diesem Zeitpunkt schon im Freien.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



**Abb. 41** *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle II**. Der Grenzwert von 0,15 1/m wird in großen Bereichen der Ebene erreicht. Die flüchtenden Personen befinden sich aber zu diesem Zeitpunkt bereits im Freien.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



**Abb. 42** *Optische Rauchdichte* in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Vertikalschnitt durch den Brandherd und Bahnhof.

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012

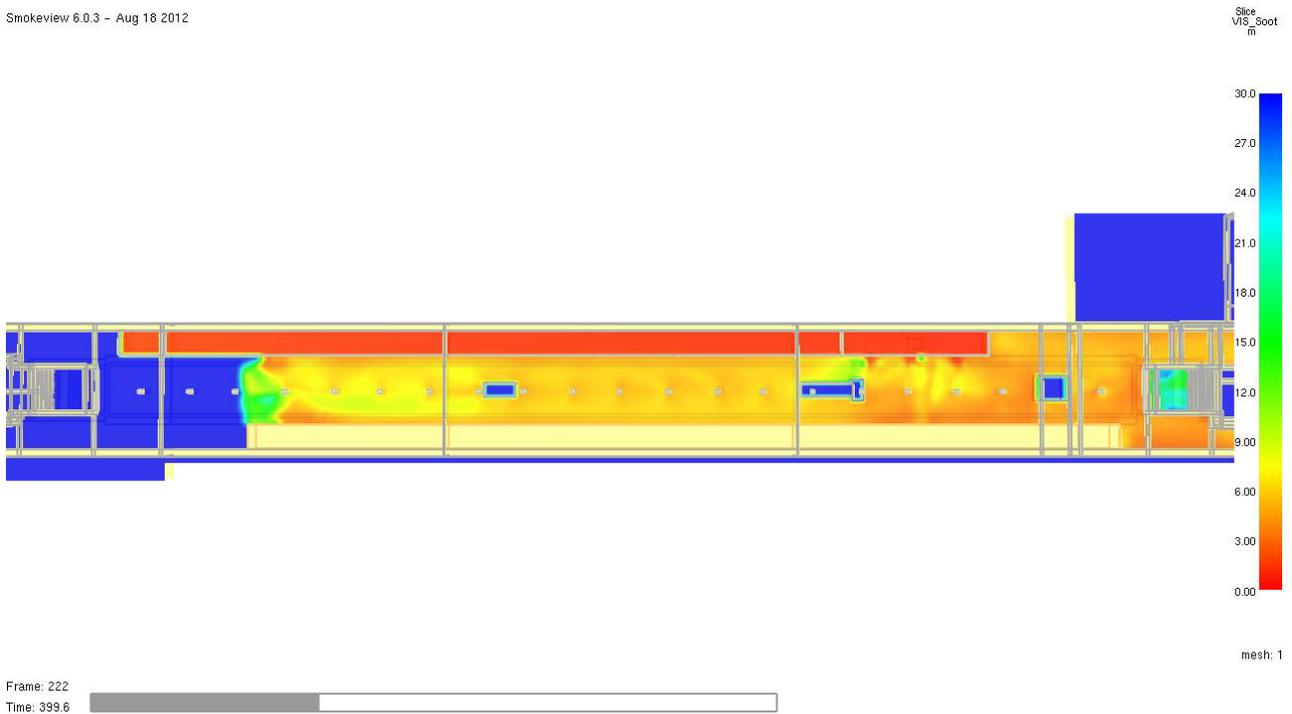


Abb. 43 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird fast in der gesamten Ebene nicht mehr erfüllt.

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012

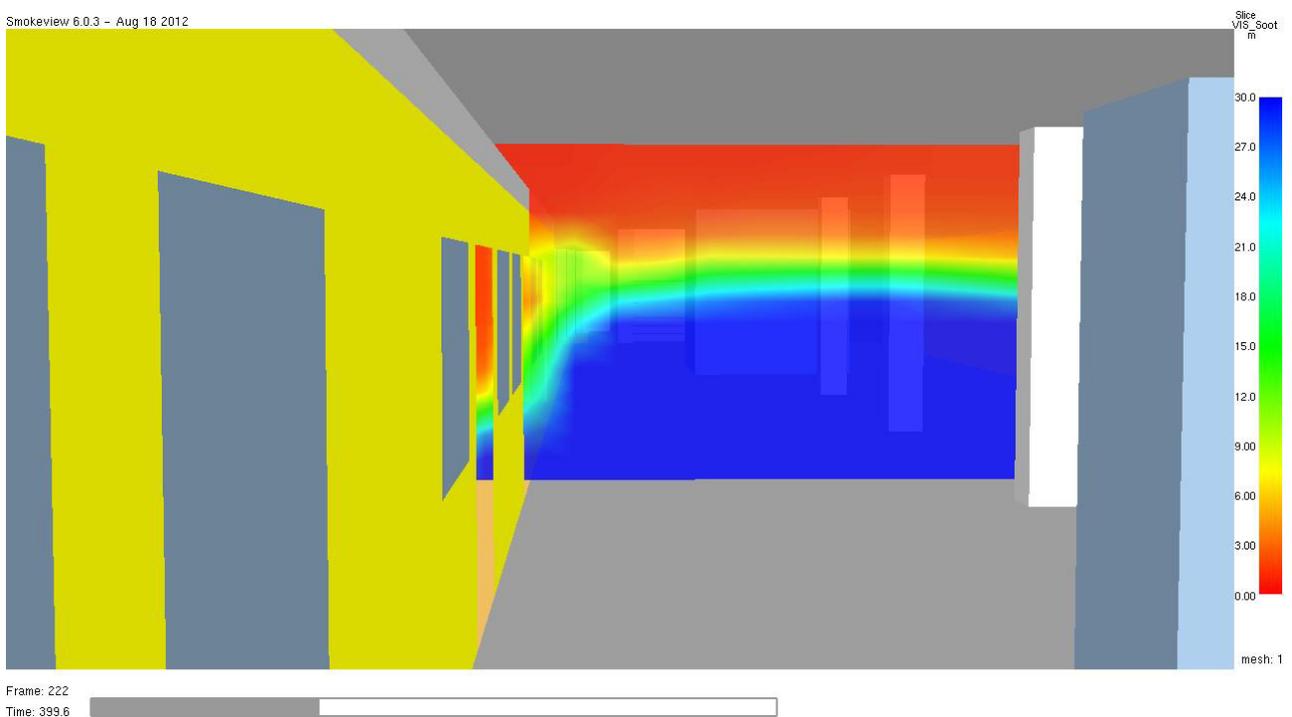


Abb. 44 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Vertikalschnitt durch den Brandherd und den Bahnhof.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

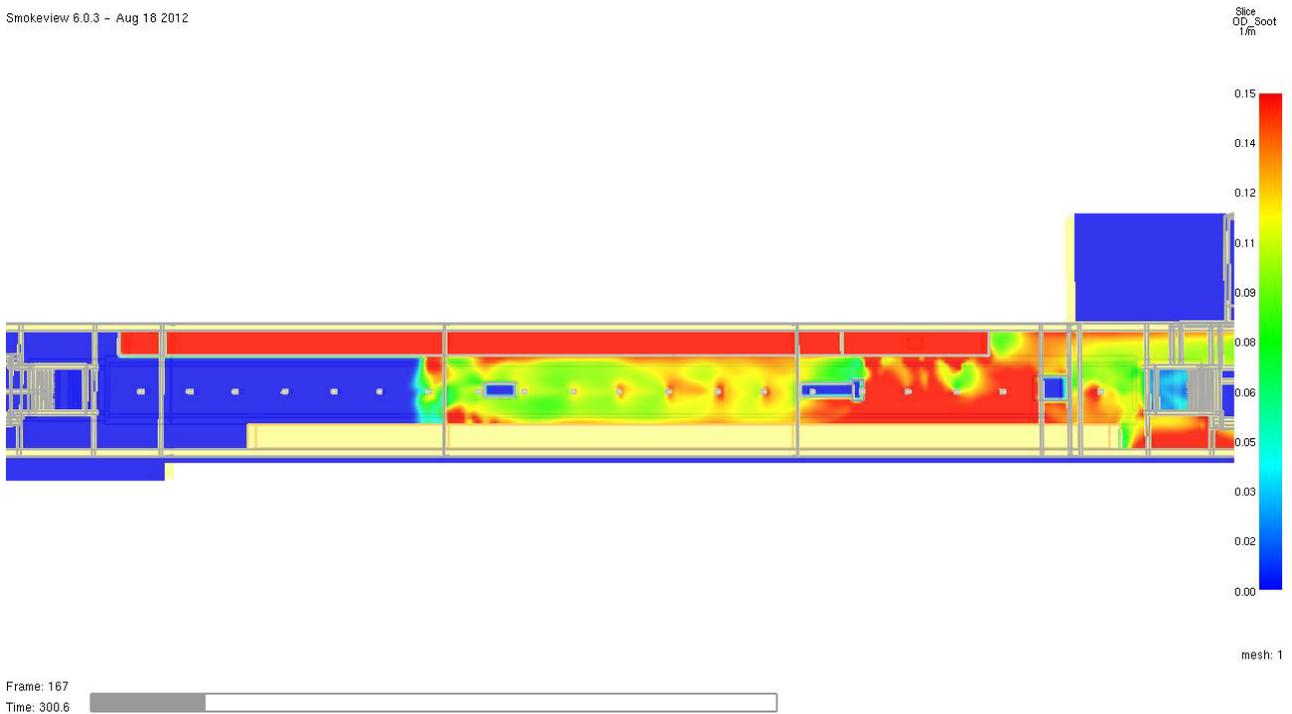


Abb. 45 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der Bahnsteig nicht mehr passierbar, da der südliche Bereich großflächig verraucht ist.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

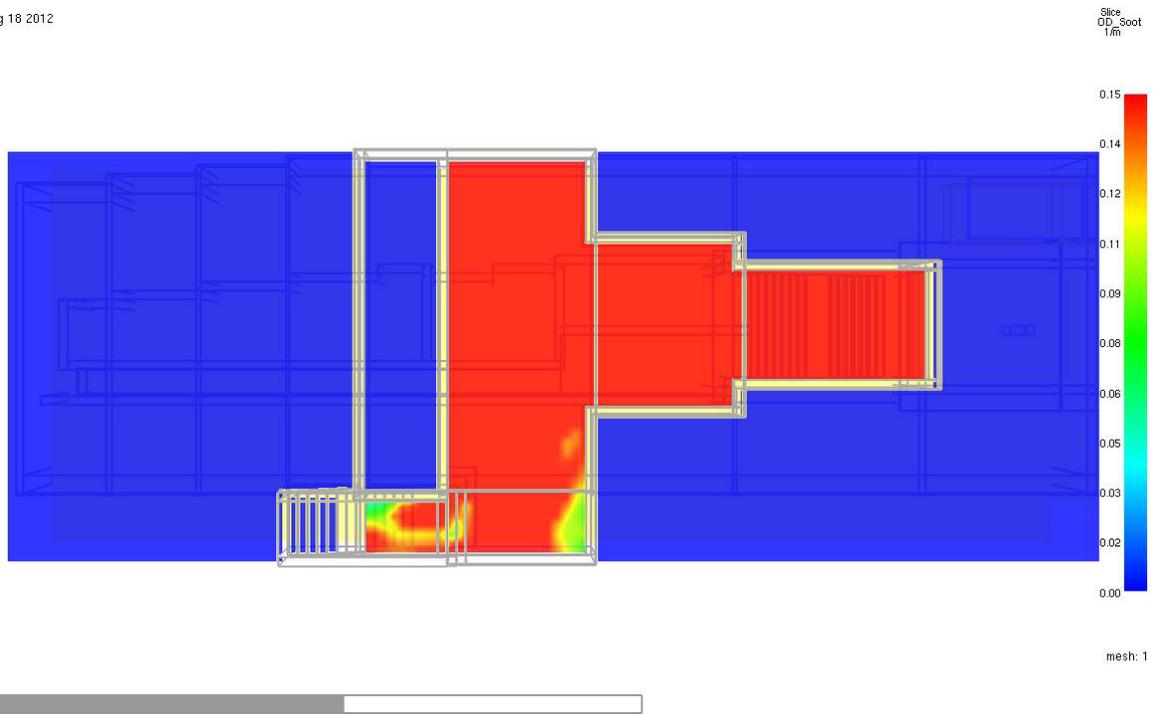


Abb. 46 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 680 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle I**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der größte Bereich der Schalterhalle verraucht. Der Ausgang ist gerade noch nutzbar.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



Abb. 47 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 450 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle II**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der größte Bereich der Schalterhalle verraucht. Der Ausgang ist gerade noch nutzbar.

## 9.4 Brandszenario 3 Brand eines Triebwagens im nördlichen Drittel von Gleis 2

Smokeview 6.0.3 – Aug 18 2012

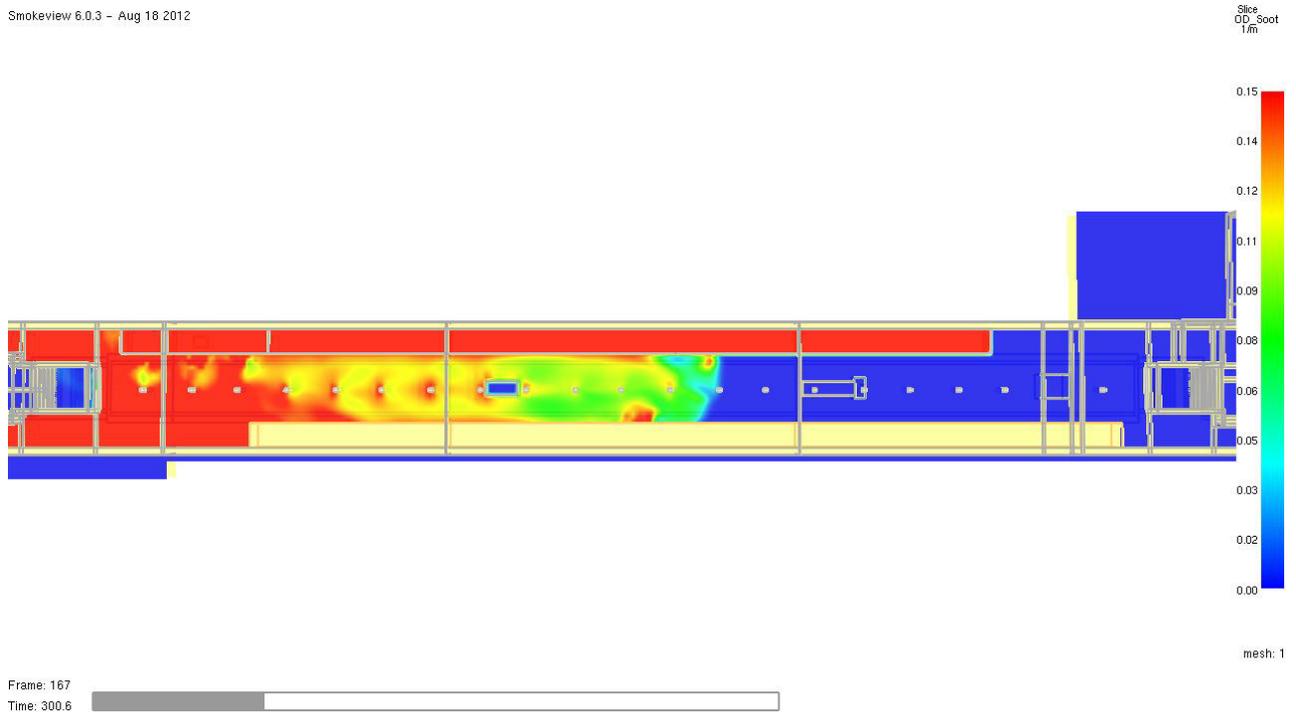


Abb. 48 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird ab diesem Zeitpunkt im nördlichen Bereich nicht mehr erfüllt.

Smokeview 6.0.3 – Aug 18 2012

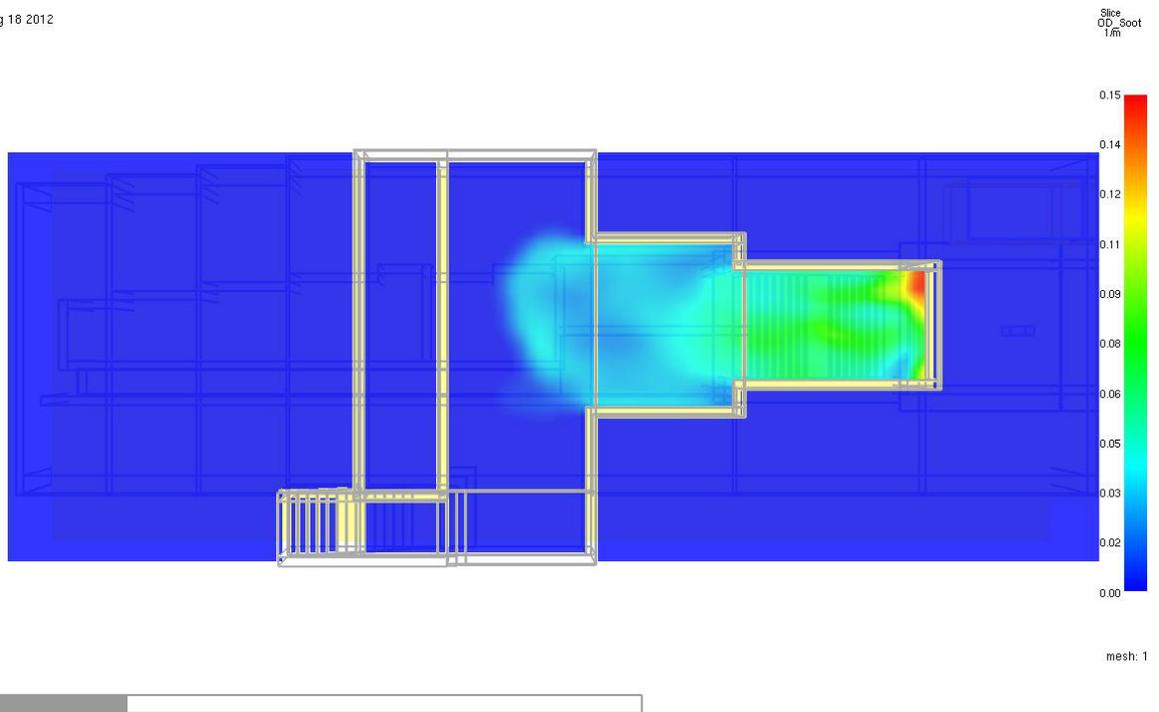


Abb. 49 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle I**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

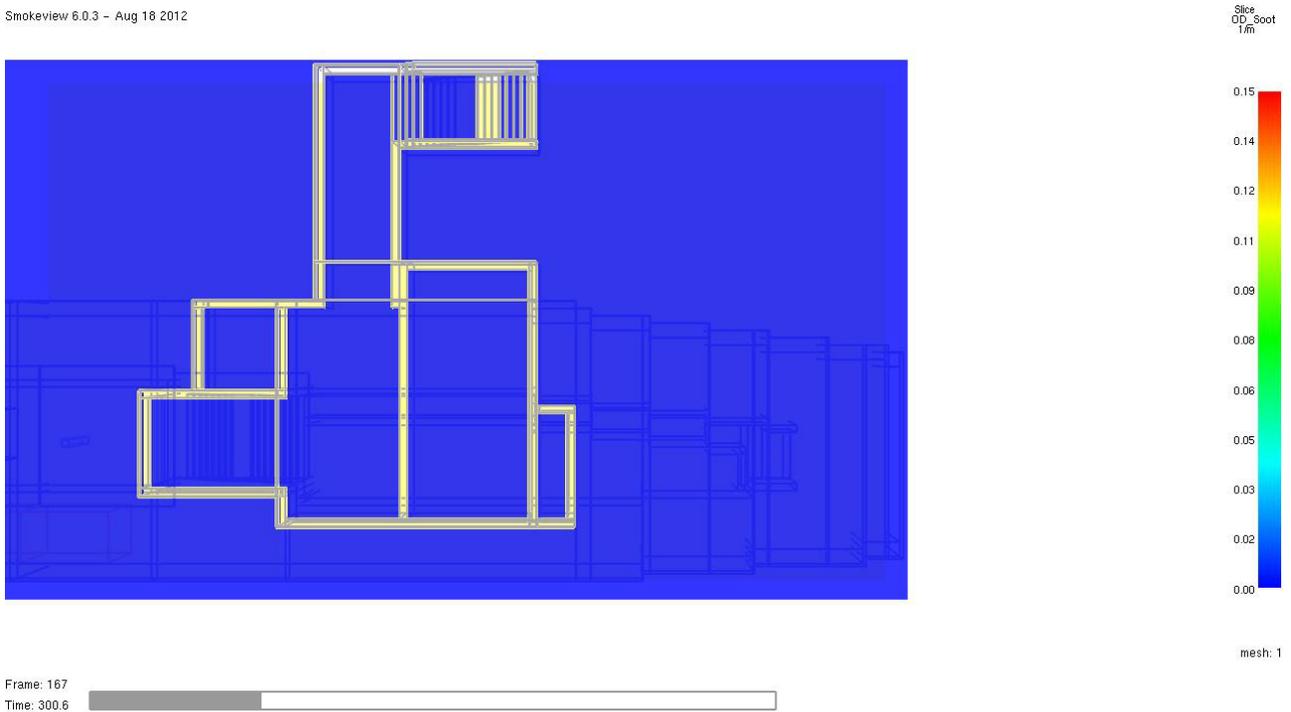


Abb. 50 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle II**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

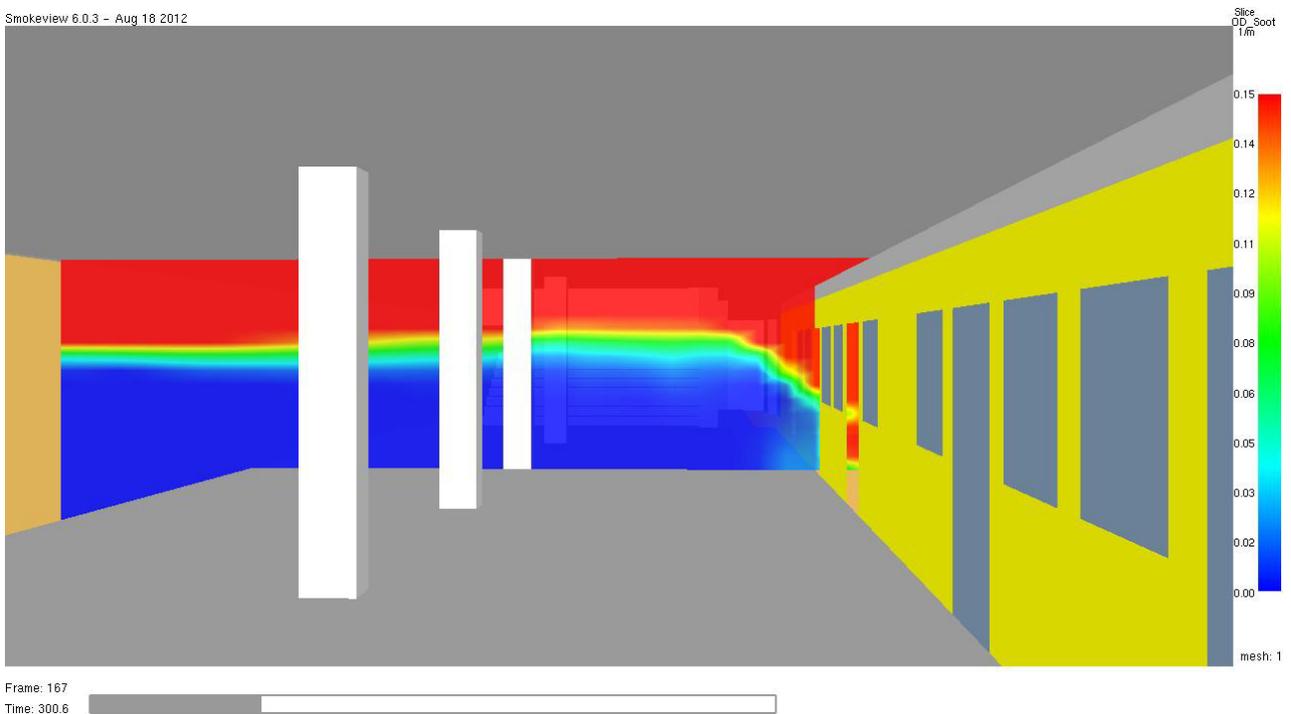
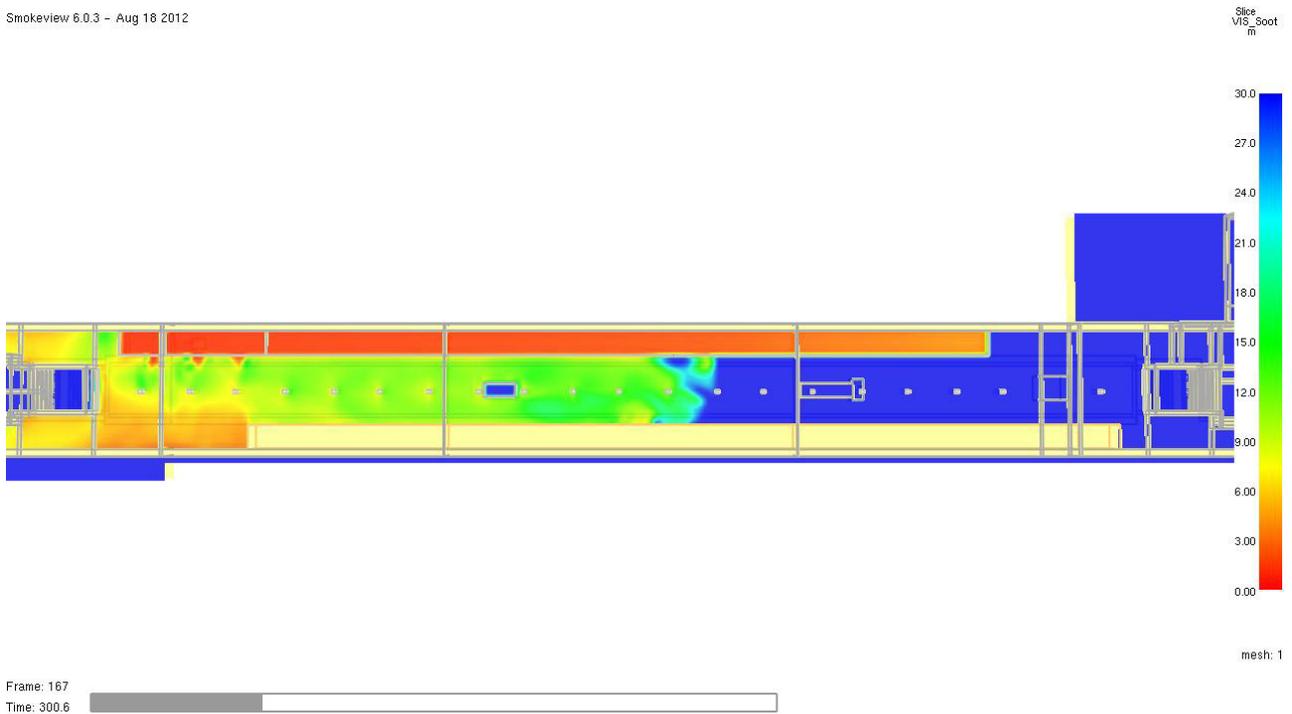


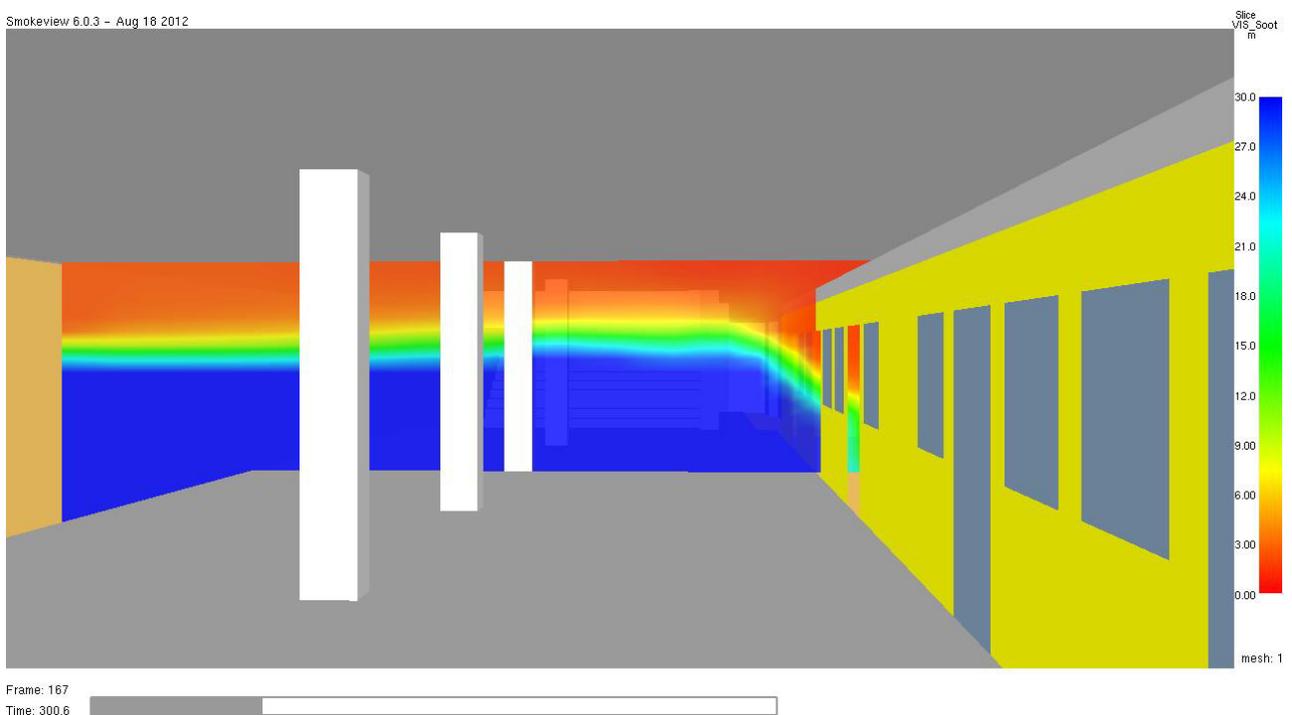
Abb. 51 **Optische Rauchdichte in 1/m** zum Zeitpunkt **t = 300 Sekunden** im Vertikalschnitt durch den Brandherd und den Bahnhof. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt vollumfänglich erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



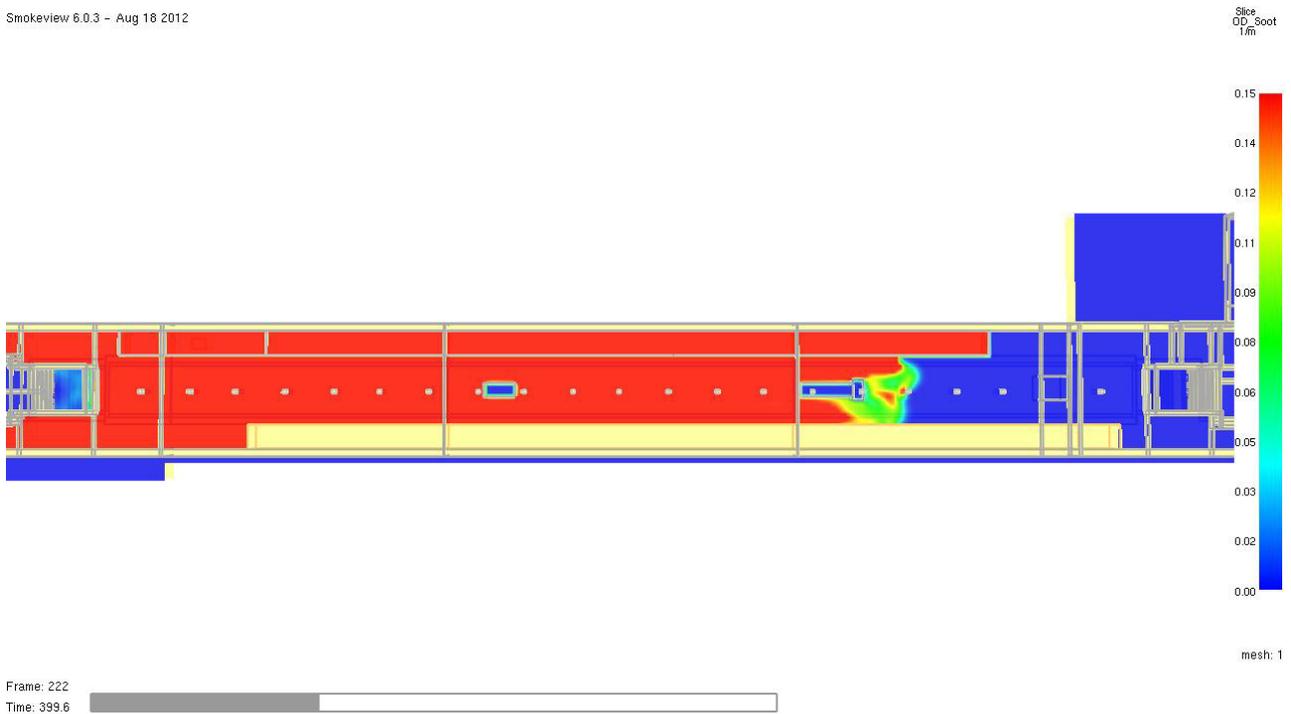
**Abb. 52** *Erkennungsweite in m* zum Zeitpunkt  $t = 300$  Sekunden im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird zu diesem Zeitpunkt gerade noch erfüllt. Lediglich am nördlichen Bahnsteigende ist eine leicht verringerte Erkennungsweite vorhanden.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



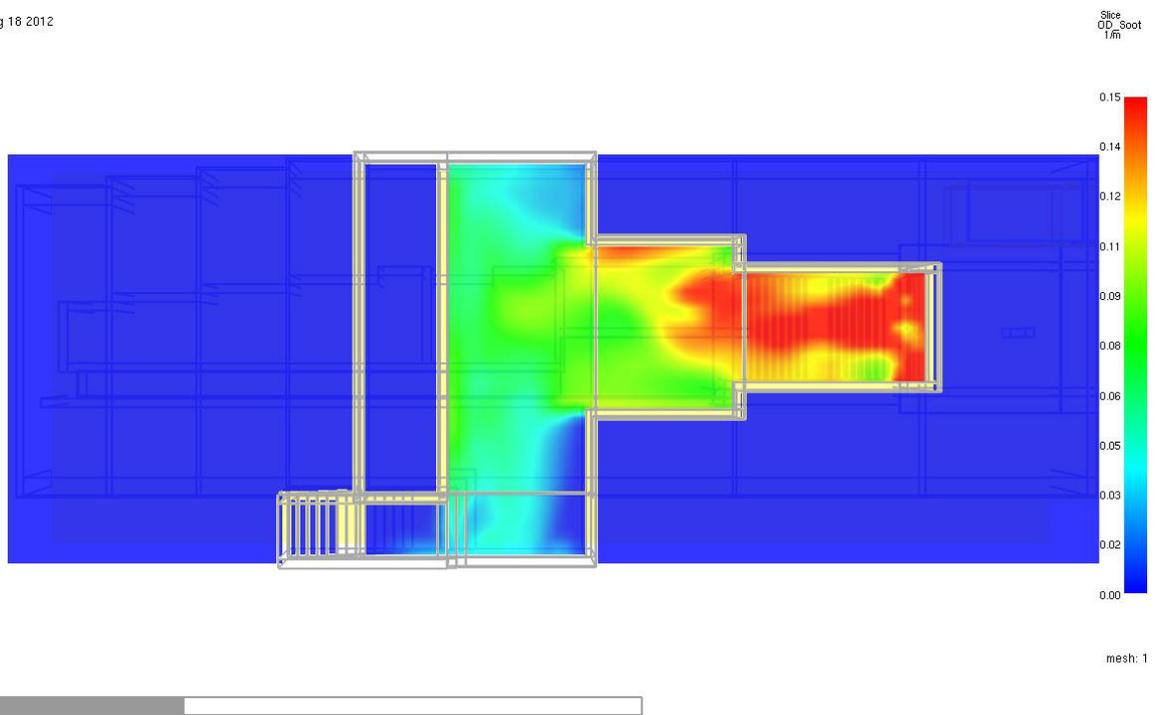
**Abb. 53** *Erkennungsweite in m* zum Zeitpunkt  $t = 300$  Sekunden im Vertikalschnitt durch den Brandherd und den Bahnhof.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



**Abb. 54** **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Der Grenzwert von 0,15 1/m wird fast in der gesamten Ebene erreicht. Die flüchtenden Personen befinden sich zu diesem Zeitpunkt schon im Freien.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



**Abb. 55** **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle I**. Der Grenzwert von 0,15 1/m wird nur oberhalb des Treppenaufganges erreicht. Die flüchtenden Personen befinden sich zu diesem Zeitpunkt bereits im Freien.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

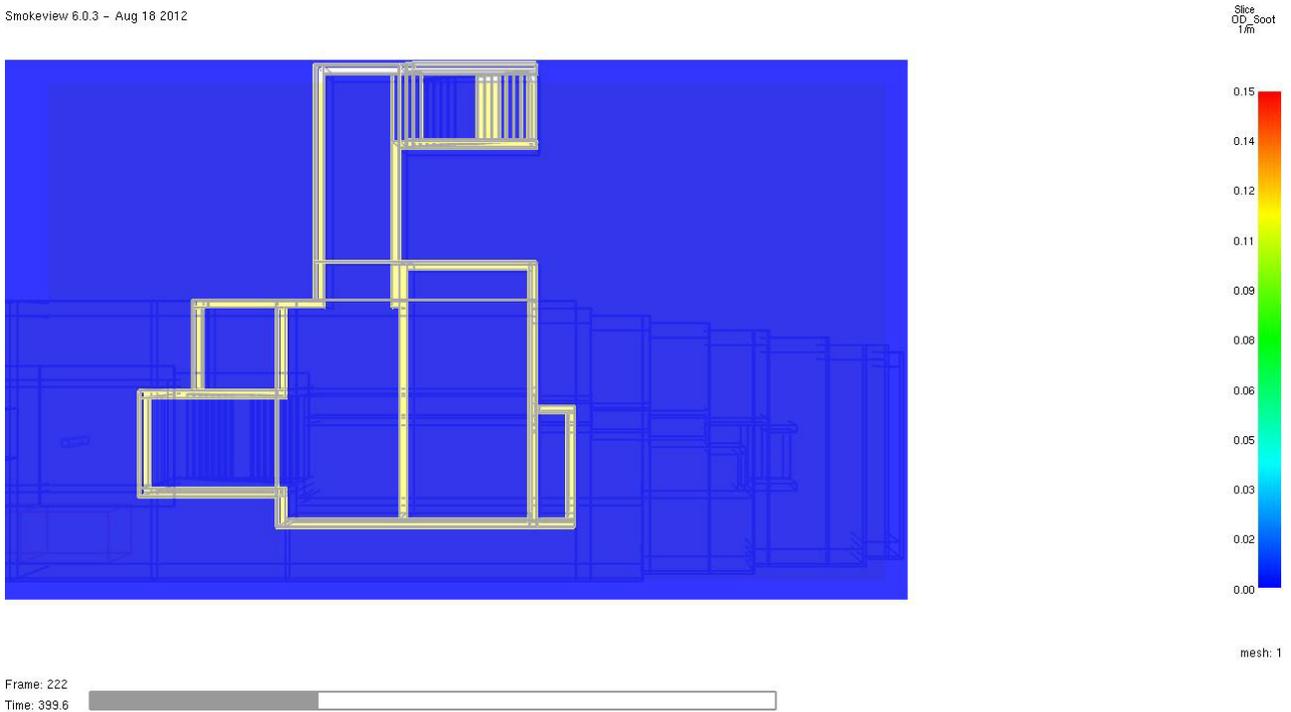


Abb. 56 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle II**. Das Schutzziel wird vollumfänglich erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

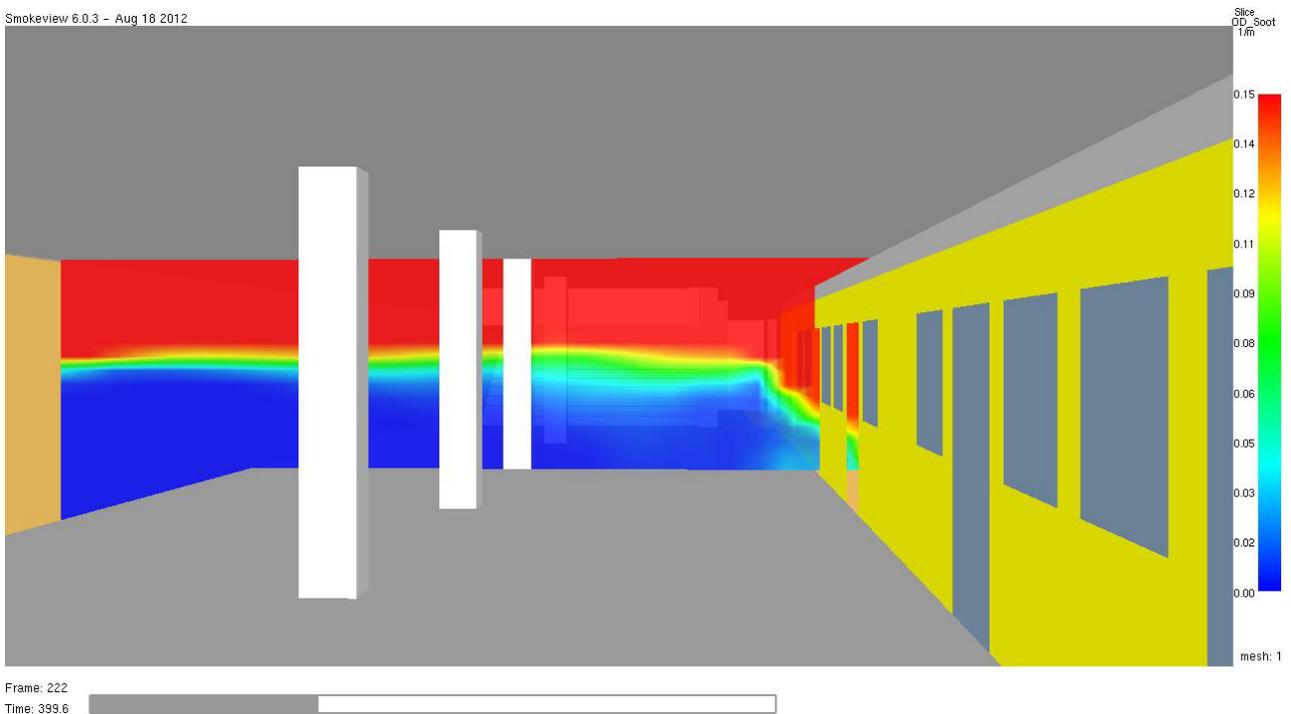


Abb. 57 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Vertikalschnitt durch den Brandherd und Bahnhof.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

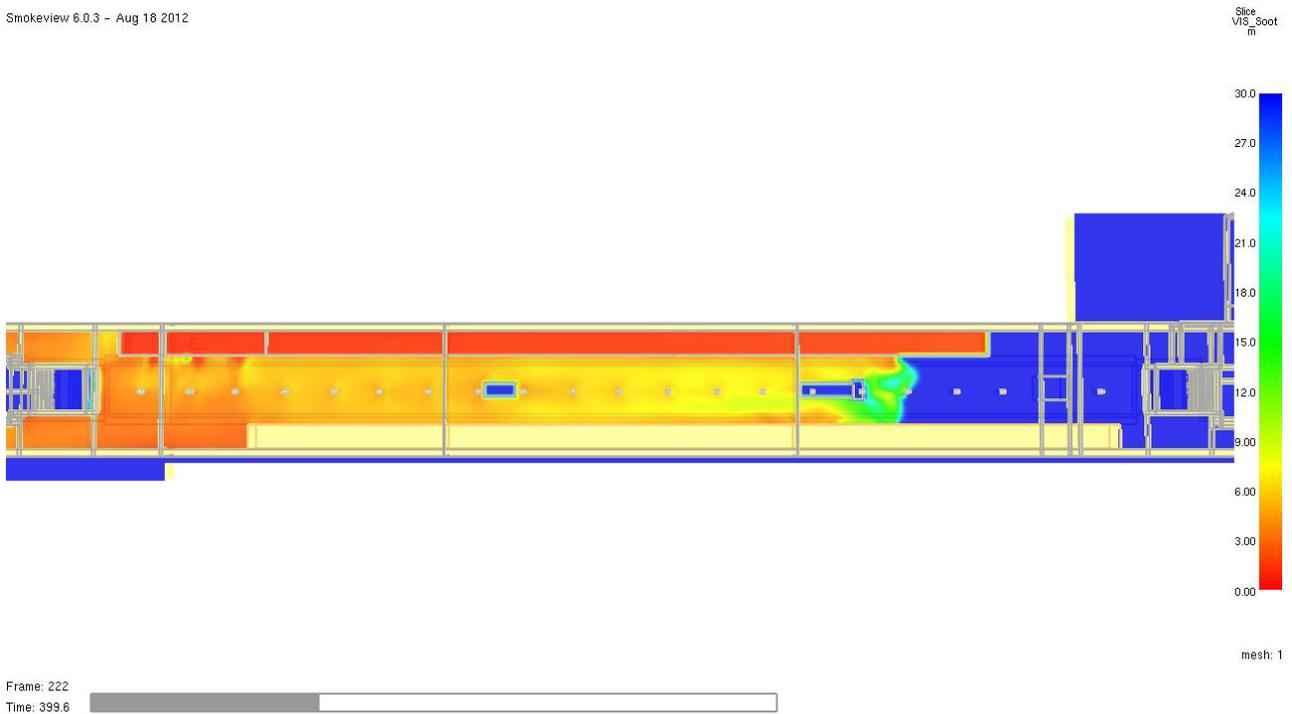


Abb. 58 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Das Schutzziel wird fast in der gesamten Ebene nicht mehr erfüllt.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012

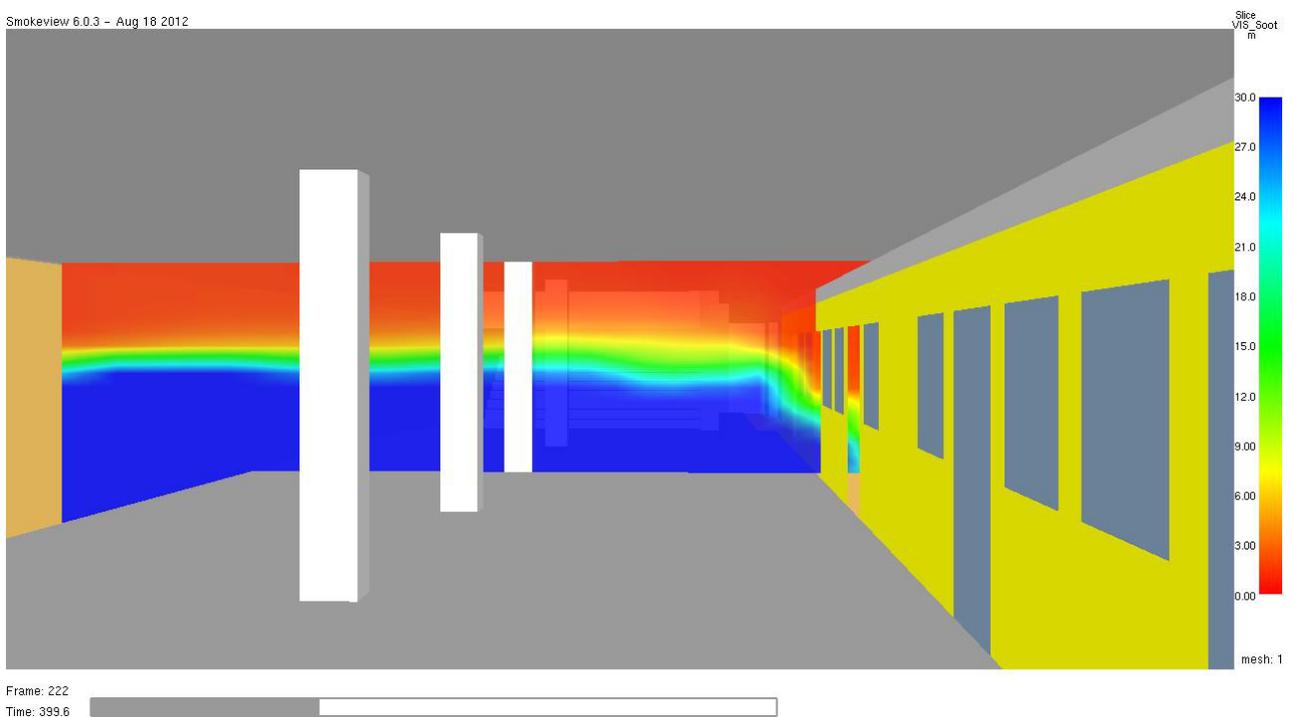


Abb. 59 **Erkennungsweite in m** zum Zeitpunkt **t = 399 Sekunden** (6,7 Minuten = Evakuierungszeit) im Vertikalschnitt durch den Brandherd und den Bahnhof.

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012

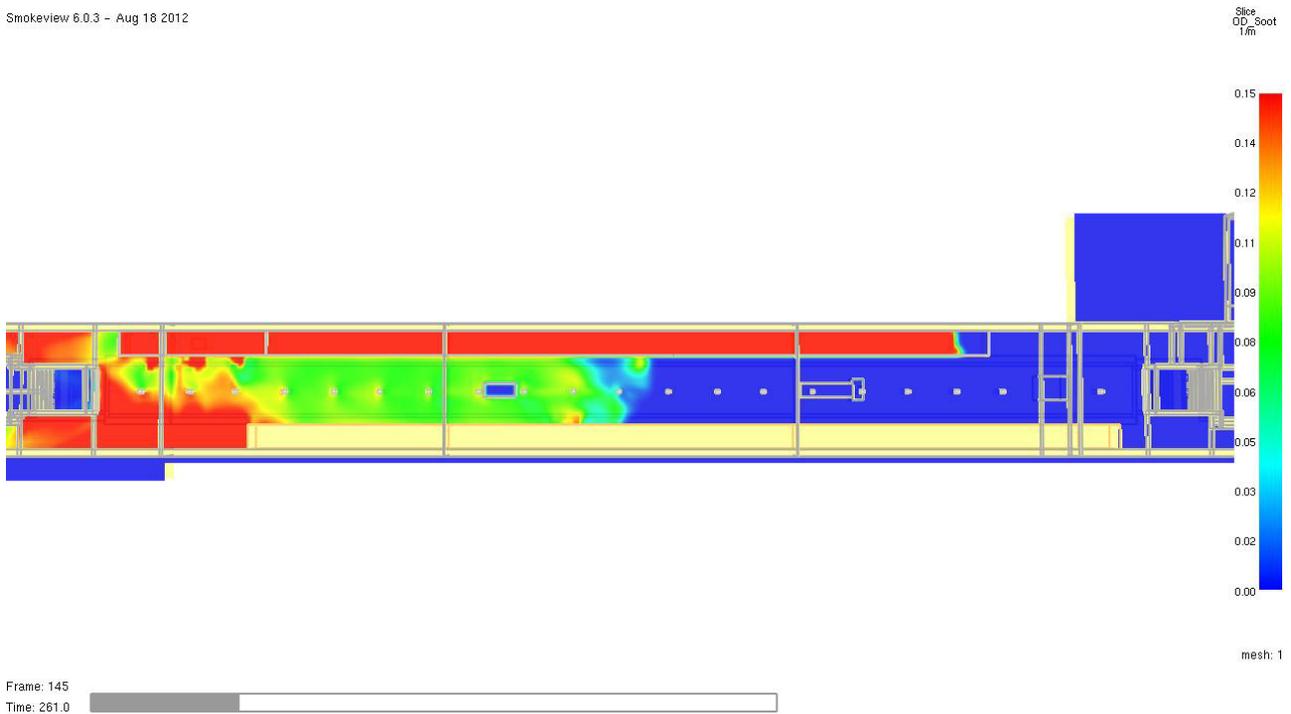


Abb. 60 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 260 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden des **Bahnsteigs**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der Bahnsteig nicht mehr passierbar, da der südliche Bereich großflächig verrauchert ist.

Smokeyview 6.0.3 - Aug 18 2012

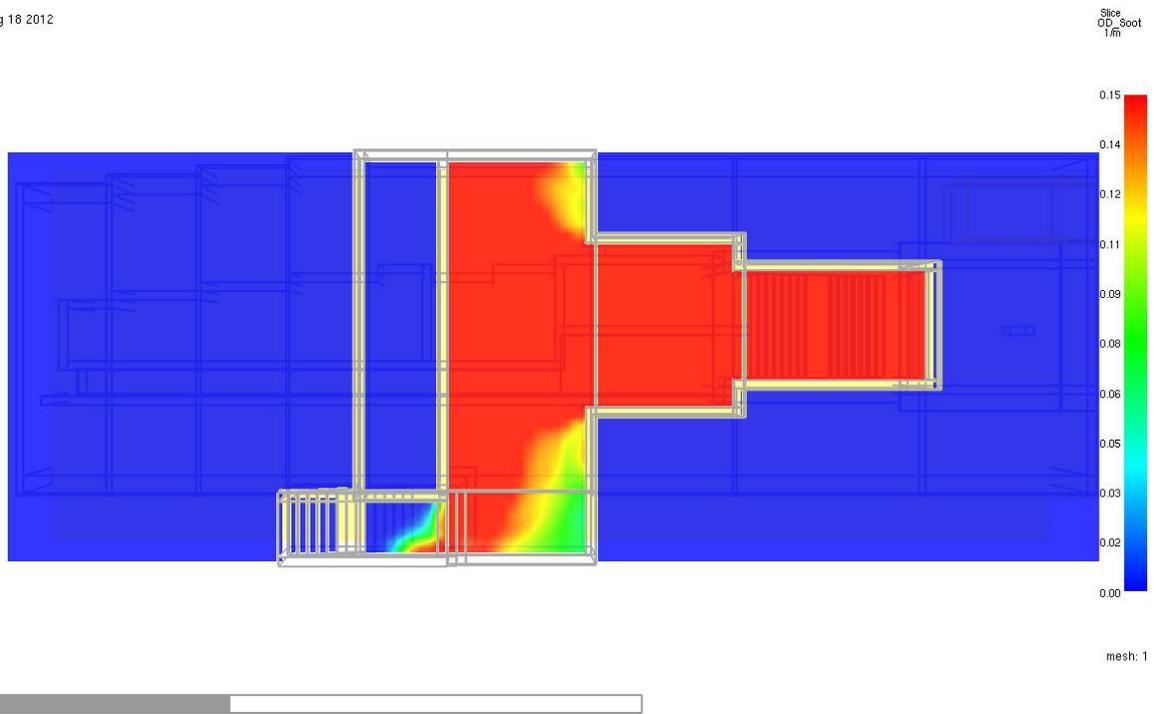


Abb. 61 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 480 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle I**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der größte Bereich der Schalterhalle verrauchert. Der Ausgang ist gerade noch nutzbar.

Smokeview 6.0.3 - Aug 18 2012



Abb. 62 **Optische Rauchdichte** in 1/m zum Zeitpunkt **t = 700 Sekunden** im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der **Schalterhalle II**. Ab ca. diesem Zeitpunkt ist der größte Bereich der Schalterhalle verraucht. Der Ausgang ist gerade noch nutzbar.

## 9.5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die im Bestand vorhandenen Öffnungen zur Rauchableitung eine mindestens 2,0 m hohe raucharme Schicht für einen Zeitraum von mind. 6,7 Minuten nicht in allen Ebenen des Bahnhofs gewährleisten.

Beim **Brandszenario 1** (brennender Wagen mittig im Bahnhof) werden die Schutzziele mindestens für den erforderlichen Zeitraum der Evakuierung (6,7 Minuten) in den Schalterhallen I und II erfüllt.

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

- Bahnsteigebene: ca. 380 Sekunden
- Schalterhalle I: ca. 580 Sekunden
- Schalterhalle II: ca. 590 Sekunden

Beim **Brandszenario 2** (brennender Wagen im südlichen Drittel des Bahnhofs) werden die Schutzziele mindestens für den erforderlichen Zeitraum der Evakuierung (6,7 Minuten) nur in den Ebenen Schalterhalle I und II erfüllt.

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

- Bahnsteigebene: ca. 300 Sekunden
- Schalterhalle I: ca. 680 Sekunden
- Schalterhalle II: ca. 450 Sekunden

Beim **Brandszenario 3** (brennender Wagen im nördlichen Drittel des Bahnhofs) werden die Schutzziele mindestens für den erforderlichen Zeitraum der Evakuierung (6,7 Minuten) ebenfalls nur in den Ebenen Schalterhalle I und II erfüllt.

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

- Bahnsteigebene: ca. 260 Sekunden
- Schalterhalle I: ca. 480 Sekunden
- Schalterhalle II: ca. 700 Sekunden

Aufgrund der Evakuierungsberechnung ist davon auszugehen, dass der Bereich Bahnsteigebene vor der berechneten Evakuierungszeit von 399 Sekunden (6,7 Minuten) geräumt ist.

$$RZ_{\text{Bahnsteigebene}} = T1 + T2 + W1$$

$$\text{mit } W1_{\text{Bahnsteig}} = (S1 - T1) = (3,6 - 1,6) = 2,0 \text{ Minuten}$$

$$RZ_{\text{Bahnsteigebene}} = 95 + 12 + 120 = 227 \text{ Sekunden}$$

Die Bahnsteigebene ist nach 227 Sekunden geräumt. Die Personen befinden sich schon in den Schalterhallen. Die Schutzziele werden bis ca. 260 Sekunden auf dem Bahnsteig noch eingehalten.

### **Nachweis:**

Die rechnerisch nachgewiesene zur Verfügung stehende Zeitspanne einer ausreichend hohen raucharmen Schicht von mind. 6,7 Minuten entspricht nicht in allen Bereichen des U-Bahnhofes Grenzallee der erforderlichen Evakuierungszeit von 6,7 Minuten. Im Zusammenhang mit der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Evakuierungsberechnung kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die betreffenden Bereiche, die VOR dem Zeitpunkt  $t = 6,7$  Minuten verraucht sind, bereits geräumt sind.

## ZUSAMMENFASSUNG

Wir wurden von den Berliner Verkehrsbetrieben mit der Erarbeitung der 1. Revision des Rauchschutznachweises für den U-Bahnhof Grenzallee beauftragt.

Es wurde nachgewiesen, dass mit den im Bestand vorhandenen Öffnungen zur Rauchableitung in Verbindung mit den oben genannten neuen Rauchschürzen vor den Treppenaufgängen die Schutzzielkriterien des vfdb-Leitfadens „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ in den Schalterhallen I und II für den Zeitraum der Evakuierung (einschließlich Fahrzeit und Reaktionszeit) von mindestens 6,7 Minuten erfüllt werden. Für den Bereich des Bahnsteigs werden die Schutzzielkriterien bis zur Räumung der betreffenden Bereiche eingehalten.

Des Weiteren wurden die maximalen Zeitspannen ermittelt, für die eine ausreichend hohe raucharme Schicht in den sonstigen Bereichen aufrechterhalten werden kann.

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

Zusammenfassend wird zusätzlich festgestellt:

- Die Rauchableitung erfolgt über die im Bestand vorhandenen Öffnungen des U-Bahnhofs, weitere Öffnungen sind nicht erforderlich.
- Anlagen zur Rauchrückhaltung an den Treppenaufgängen sind in der Haltestelle erforderlich.
- Für die Räumungszeit aus dem U-Bahnhof von 6,7 Minuten steht uneingeschränkt eine ausreichend hohe raucharme Schicht in den Schalterhalle I und II zur Verfügung. Für die Räumungszeit der Bahnsteigebene von 3,8 Minuten steht ebenfalls eine ausreichend hohe raucharme Schicht in diesem Bereich 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 Haltstellen werden erfüllt.

Berlin, 19. Dezember 2017



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

## **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 Schalterhalle I.avi

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

#### Szenario 1 OD Schalterhalle II.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der optischen Rauchdichte in 1/m im Horizontalschnitt in 2,0 m Höhe über dem Fußboden der Schalterhalle II 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 durch den Bahnhof bei einem Brandszenario in einem Triebwagen mittig auf Gleis 2.

#### 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 Schalterhalle I.avi

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

#### Szenario 1 VIS Schalterhalle II.avi

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

#### Szenario 1 VIS Vertikalschnitt.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Vertikalschnitt durch den Bahnhof bei einem Brandszenario in einem Triebwagen mittig auf dem Gleis 2.

## **Brandszenario 2 Brand eines Triebwagens im südlichen 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 südlichen Drittel auf Gleis 2.

### Szenario 2 OD Schalterhalle I.avi

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

### Szenario 2 OD Schalterhalle II.avi

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

### Szenario 2 OD Vertikalschnitt.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der optischen Rauchdichte in 1/m im Vertikalschnitt durch den Bahnhof bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im südlichen Drittel auf Gleis 2.

### 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 südlichen Drittel auf Gleis 2.

### Szenario 2 VIS Schalterhalle I.avi

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

### Szenario 2 VIS Schalterhalle II.avi

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

### Szenario 2 VIS Vertikalschnitt.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Vertikalschnitt durch den Bahnhof bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im südlichen Drittel auf Gleis 2.

## **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 nördlichen Drittel auf Gleis 2.

### Szenario 3 OD Schalterhalle I.avi

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

### Szenario 3 OD Schalterhalle II.avi

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

### Szenario 3 OD Vertikalschnitt.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der optischen Rauchdichte in 1/m im Vertikalschnitt durch den Bahnhof bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im nördlichen Drittel auf Gleis 2.

### 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 nördlichen Drittel auf Gleis 2.

### Szenario 3 VIS Schalterhalle I.avi

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

### Szenario 3 VIS Schalterhalle II.avi

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

### Szenario 3 VIS Vertikalschnitt.avi

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Erkennungsweite in m im Vertikalschnitt durch den Bahnhof bei einem Brandszenario in einem Triebwagen im nördlichen Drittel auf Gleis 2.

## **Anlage 3      Berechnung der Räumungszeiten**

### **Berechnung der Bemessungszeit nach TR Strab BS**

Die Bemessungszeit ergibt sich aus:

Fahrzeit (t1) + Reaktionszeit (t2) + Selbstrettungszeit = Bemessungszeit (TR Strab BS 5.2.1 Seite 25)

Für die Fahrzeit zur Haltestelle ist der in Abhängigkeit von der Richtung der Einfahrt ungünstigste Wert anzunehmen. Es wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug beim Verlassen der Haltestelle anfängt zu brennen. Die BVG verfügt über planmäßige Durchfahrtszeiten auf Linien. Von diesen Durchfahrtszeiten wurden 20 Sekunden Haltezeit abgezogen (Fahrgastwechselzeit und Schließen der Türen). Dieser Wert ist relativ kurz, in der Praxis kann es länger dauern. Dadurch liegt die Ermittlung der Fahrzeit auf der sicheren Seite. Die TR Strab Brandschutz sieht als Mindestwert 60 Sekunden Fahrzeit vor.

Im Fall U-Bahnhof Grenzallee ergibt sich damit t1 zu 100 Sekunden.

Die Handlungsabläufe während der Bemessungszeit finden nach TR Strab BS teilweise gleichzeitig statt. Für die Berliner U-Bahn ist grundsätzlich eine Reaktionszeit von t2 = 2 Minuten anzusetzen (1 Minute Reaktionszeit und 1 Minute Räumung des Fahrzeugs). Im Anschluss daran muss die längste Gehzeit zum Treppenaufgang auf dem Bahnhof in Ansatz gebracht werden. Im Falle des U-Bhf. Grenzallee beträgt diese Gehzeit nach der Berechnung der BVG vom 07.09.2017 (NFPA130) T1 = 1,6 Minuten.

In Summe von t2 = 2 Minuten und T1 von 1,6 Minuten ergibt sich eine Zeit von 3,6 Minuten in der alle Fahrgäste alarmiert sind, den Zug verlassen haben und einen Aufgang vom Bahnsteig zu einem (temporär) sicheren Bereich erreicht haben. Dieser Wert ist größer als die nach NFPA130 ermittelte Stauzeit von 2,2 Minuten an den Treppen vom Bahnsteig zu den Schalterhallen. Somit ist in diesem Fall die Bemessungszeit nach TR Strab BS von 3,6 Minuten die maßgebende Zeitspanne für die Selbstrettung des Bahnhofs.

Fazit: Im BSK muss die Fahrzeit von t1 = 100 Sekunden für die Simulation Berücksichtigung finden. Der Wert t2 (Reaktionszeit) ist in der Gesamtbetrachtung der nach NFPA130 errechneten Selbstrettungszeit von 6,7 Minuten bereits enthalten.

<b>Zeitabschnitte der Räumung</b>	<b>65%-Auslastung</b>	<b>Dauer (Sek.)</b>	<b>Dauer (Min.)</b>
<b>Gz</b>			

**Gehzeiten der zuletzt fliehenden Personen:**

<b>T1:</b> Zeit zum Erreichen der Treppenaufgänge auf Bahnsteigebene : (ca. 60m / 0,63m/s)	<b>95</b>	<b>1.6</b>
<b>T2:</b> Zeit zum Überwinden des vertikalen Höhenunterschiedes zwischen Bahnsteigebene und Zwischengeschoss (ca. 3,10m / 0,25 m/s):	<b>12</b>	<b>0.2</b>
<b>T3:</b> Zeit zum Erreichen der Treppen zur Oberfläche im Zwischenge- schoss : (ca. 16m / 1m/s)	<b>16</b>	<b>0.3</b>
<b>T4:</b> Zeit zum Überwinden des vertikalen Höhenunterschiedes zwischen Zwischengeschoss und Oberfläche (ca. 3,41m / 0,25 m/s):	<b>14</b>	<b>0.2</b>
<b>T5:</b> Gehzeit an der Oberfläche (ca. 10m / 1 m/s):	<b>10</b>	<b>0.2</b>

**Schleusungszeiten an den Treppenaufgängen:**

**S1:** Schleusungszeit an den Treppen vom Bahnsteig zum Zwischenge-  
schoss 2,2 Minuten (*siehe Nebenrechnung 1*)

=> **Reaktionszeit t2= 2 Minuten + T1 = 3,6 Minuten maßgebend**

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

**Reaktionszeit t2 = "Min. + 1,6 Minuten = 3,6 Minuten ist maßgebend**

**Wartezeiten an den Treppenaufgängen:**

Treppenaufgänge Bahnsteigebene: <b>W1</b> = (S1-T1) = (3,6 - 1,6) min	<b>120</b>	<b>2.0</b>
Treppenaufgänge Zwischengeschoss: <b>W2</b> = (S2-S1) = (5,8 - 3,6) min	<b>132</b>	<b>2.2</b>

**Räumungszeit: RZ=T1+T2+T3+T4+T5+W1+W2                      399                      6.7**

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

beide Treppenanlagen identisch!

Jeweils Kapazität feste Treppe 4,80 m breit  $\rightarrow$  4,80 m/0,6m  $\rightarrow$  8 Fluchtspuren  $\rightarrow$  8\*33=  
**264 Personen/Minute**

S1 je Seite: 575 P / 264 P/min = **2,2 Minuten**

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

Entscheidend ist die Treppe mit der größeren Schleusungszahl!

Ausgang II/2: Kapazität feste Treppe 3,62 m breit  $\rightarrow$  3,62m/0,6m  $\rightarrow$  6 Fluchtspuren  $\rightarrow$  6\*33=  
**198 Personen/Minute**

Ausgang I/1: Kapazität feste Treppe 2,30 m breit  $\rightarrow$  2,30m/0,6m  $\rightarrow$  3 Fluchtspuren  $\rightarrow$  3\*33=  
**99 Personen/Minute**

S2 Ausgang II/2: 575 P / 198 P/min = 2,9 Minuten

S2 Ausgang I/1: 575 P / 99 P/min = **5,8 Minuten**



