

# Endreß Ingenieurgesellschaft mbH

## Brandschutzsachverständige



## Feuer- und Rauchgassimulation

<b>Bauvorhaben</b>	Linie U5 West Baulos 5 West-1 U-Bahnhof Willibaldstraße 80689 München
<b>Auftraggeber / Bauherr</b>	Landeshauptstadt München Baureferat Hauptabteilung Ingenieurbau Friedenstraße 40 81671 München
<b>Ersteller</b>	Dr.-Ing. Anne Kawohl
<b>Projektnummer</b>	5020
<b>Datum</b>	23.11.2023

Dieser Bericht umfasst 72 Seiten.

- Prüfsachverständige für Brandschutz
- Nachweisberechtigte für vorbeugenden Brandschutz
- Brandschutzkonzepte für alle Regel- und Sonderbauten im In- und Ausland
- Ingenieurmethoden des Brandschutzes
- Planung von Feuerlöschanlagen
- Brandschutzbeauftragte / Schulungen
- Flucht- und Rettungspläne
- Feuerwehrpläne

### Geschäftsführer

**Dipl.-Ing. (FH) Tobias Endreß**  
Nachweisberechtigter für vorbeugenden Brandschutz

**Dipl.-Ing. (FH) Carsten Steiner**  
Prüfsachverständiger für Brandschutz  
Nachweisberechtigter für vorbeugenden Brandschutz

**Dipl.-Ing. Frank Bieler**  
M. Eng. Baulicher Brandschutz und Sicherheitstechnik



Zentrale für Deutschland  
Siemensstraße 6  
61352 Bad Homburg v.d.H.



+49 6172 39514-50



[www.brandschutz-gutachter.de](http://www.brandschutz-gutachter.de)



[zentrale@brandschutz-gutachter.de](mailto:zentrale@brandschutz-gutachter.de)



Taunus Sparkasse  
IBAN DE91 5125 0000 0001 0415 41

Commerzbank  
IBAN DE23 5004 0000 0480 0280 00

Amtsgericht: Bad Homburg  
HRB 15700  
Steuernr.: 003 232 41501  
UID-Nr.: DE 265 591 693  
D-U-N-S: 341390634

Qualifikationen / Mitgliedschaften



# Endreiß Ingenieurgesellschaft mbH

## Brandschutzsachverständige

---

### Index

Nr.	Datum	Abschnitt	Vorgang, Änderung	Bearbeiter
-	15.06.2020	Gesamt	Erstmaliges Erstellen der Dokumentation unter Berücksichtigung der Vorgaben aus dem Planfeststellungsverfahren	J. Nestel
1	22.07.2020	Gesamt	Überarbeitung aufgrund geänderter Räumungszeiten	A. Kawohl
2	16.05.2022	Gesamt	Überarbeitung aufgrund geänderter Geometrie der Rauchableitungsöffnungen	A. Kawohl
3	23.11.2023	Gesamt	Überarbeitung aufgrund geänderter Geometrie der Rauchableitungsöffnungen	A. Kawohl

Allgemeines

# Endreiß Ingenieurgesellschaft mbH

## Brandschutzsachverständige

---

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeines.....</b>	<b>6</b>
1.1	Auftrag und Bestimmung der Feuer- und Rauchgassimulation .....	6
1.2	Parameter.....	6
1.3	Randbedingungen der Simulation.....	7
1.4	Verwendete Unterlagen .....	7
<b>2</b>	<b>Ziel .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Methode .....</b>	<b>9</b>
3.1	Allgemeines und Dokumentation .....	9
3.2	Feldmodell .....	9
3.3	Energiedissipation (Very Large Eddy Simulation).....	10
3.4	Verbrennungsmodell.....	11
3.5	Strahlungstransport .....	11
3.6	Wärmeübergang .....	12
3.7	Abgrenzung zu verwandten Methoden .....	12
3.8	Validierung.....	13
<b>4</b>	<b>Geometrisches Modell .....</b>	<b>14</b>
4.1	Modell allgemein.....	14
4.2	Auslegung und Anforderungen an die Aufbauten der Entrauchungsöffnungen.....	16
<b>5</b>	<b>Ersatzbrand und Fahrzeugbemessungsbrand.....</b>	<b>18</b>
5.1	Ersatzbrandszenario.....	18
5.2	Fahrzeugbemessungsbrand .....	20
<b>6</b>	<b>Beschreibung der durchgeführten Simulation.....</b>	<b>23</b>
6.1	Selbstrettungsphase .....	23
6.2	Fremdrettungsphase.....	24
6.3	Zusammenfassung der Randbedingungen des Modells .....	24
<b>7</b>	<b>Analyse.....</b>	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>Ergebnisse und Bewertung .....</b>	<b>29</b>

# Endreiß Ingenieurgesellschaft mbH

## Brandschutzsachverständige

8.1	Ergebnisse der Selbstrettungsphase: Sommerfall .....	29
8.1.1	Optische Dichte: Messpunkte – Selbstrettung/Sommer.....	29
8.1.2	Optische Dichte auf einer Höhe von 2,5 m über dem Bahnsteig – Selbstrettung / Sommer .....	31
8.1.3	Optische Dichte auf einer Höhe von 2,5 m über OKF Verteilerebene – Selbstrettung / Sommerfall .....	32
8.1.4	Optische Dichte im Längsschnitt in Bahnsteigmitte – Selbstrettung / Sommerfall .....	33
8.1.5	Ampelmatrix – Selbstrettung / Sommerfall.....	34
8.1.6	Bewertung im Vergleich zu den Ergebnissen des Räumungsnachweises – Selbstrettung / Sommerfall .....	35
8.2	Ergebnisse der Selbstrettungsphase: Winterfall .....	44
8.2.1	Optische Dichte: Messpunkte – Selbstrettung / Winterfall .....	44
8.2.2	Optische Dichte auf einer Höhe von 2,5 m über dem Bahnsteig – Selbstrettung / Winterfall.....	46
8.2.3	Optische Dichte auf einer Höhe von 2,5 m über OKF Verteilerebene – Selbstrettung / Winterfall.....	47
8.2.4	Optische Dichte im Längsschnitt in Bahnsteigmitte – Selbstrettung / Winterfall.....	48
8.2.5	Ampelmatrix – Selbstrettung / Winterfall.....	49
8.2.6	Bewertung mit Vergleich zu den Ergebnissen des Räumungsnachweises – Selbstrettung / Winterfall.....	50
8.3	Ergebnisse der Fremdrettungsphase: isothermer Fall .....	51
8.3.1	Optische Dichte: Messpunkte – Fremdrettung / isotherm .....	51
8.3.2	Optische Dichte auf einer Höhe von 1,5 m über dem Bahnsteig – Fremdrettung / isotherm .....	53
8.3.3	Optische Dichte auf einer Höhe von 1,5 m über OKF Verteilerebene – Fremdrettung / isotherm .....	55
8.3.4	Optische Dichte im Längsschnitt in Bahnsteigmitte – Fremdrettung / isotherm .....	57
8.3.5	Ampel-Matrix – Fremdrettung / isotherm .....	59
8.3.6	Bewertung der Fremdrettungsphase - isotherm.....	60
8.4	Ergebnisse der Fremdrettungsphase: Sommerfall.....	61

# Endreiß Ingenieurgesellschaft mbH

## Brandschutzsachverständige

---

8.4.1	Optische Dichte: Messpunkte – Fremdrettung / Sommerfall.....	61
8.4.2	Optische Dichte auf einer Höhe von 1,5 m über dem Bahnsteig – Fremdrettung / Sommerfall .....	63
8.4.3	Optische Dichte auf einer Höhe von 1,5 m über OKF Verteilerebene – Fremdrettung / Sommerfall .....	65
8.4.4	Optische Dichte im Längsschnitt in Bahnsteigmitte – Fremdrettung / Sommerfall .....	67
8.4.5	Ampel-Matrix – Fremdrettung / Sommerfall .....	69
8.4.6	Bewertung der Fremdrettungsphase – Sommerfall .....	70
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>71</b>
<b>10</b>	<b>Ausfertigung .....</b>	<b>72</b>

### 1 Allgemeines

#### 1.1 Auftrag und Bestimmung der Feuer- und Rauchgassimulation

Der Endreß Ingenieurgesellschaft mbH, Brandschutzsachverständige, wurde der Auftrag zur Durchführung einer ergänzenden Feuer- und Rauchgassimulation für o.g. Objekt erteilt, um die Wirksamkeit der Öffnungen zur Rauchableitung zur Sicherstellung der Selbst- und Fremdrettung nachzuweisen.

Neben der numerischen Feuer- und Rauchgassimulation wurde eine numerische Räumungssimulation durchgeführt. Anhand einer Gegenüberstellung der beiden Simulationen kann eine Bewertung des Risikos für Personen innerhalb des U-Bahnhofs Willibaldstraße vorgenommen werden.

In dieser Feuer- und Rauchgassimulation werden die Rahmenbedingungen aus dem Anwendungshandbuch „Brandsimulationen für U-Bahnhöfe der Gefährdungsstufe 4 der Stadtwerke München GmbH“ in der Fassung vom 16.10.2020 (Index 2) auftragsgemäß zu Grunde gelegt.

#### 1.2 Parameter

Neben der anzusetzenden Brandlast sind die geometrischen Verhältnisse der baulichen Anlage sowie bauphysikalische Randbedingungen die wesentlichen Parameter für die Feuer- und Rauchgassimulation. Zu den bauphysikalischen Randbedingungen gehören die relative Luftfeuchtigkeit, die Innenraumtemperatur, die Umgebungstemperatur und die Windverhältnisse.

### 1.3 Randbedingungen der Simulation

Die Randbedingungen, welche dieser Simulation zu Grunde liegen, wurden dem Anwendungshandbuch „Brandsimulationen für U-Bahnhöfe der Gefährdungsstufe 4 der Stadtwerke München GmbH“ (Index 2) entnommen<sup>1</sup>. Es wurden weiterhin die neubauspezifischen Änderungen zum Anwendungshandbuch entsprechend der Vorgaben der Leistungsbeschreibung von Seiten des Auftraggebers berücksichtigt. Eine detaillierte Beschreibung und Begründung der Parameter befinden sich im Anwendungshandbuch.

### 1.4 Verwendete Unterlagen

Inhalt, Darstellung	Stand	Maßstab	Ersteller
Grundriss Bahnsteig (Ebene -2)	24.02.2020	1:200	Allmann Sattler Wappner Architekten
Grundriss Verteilerebene (Ebene -1)	24.02.2020	1:200	Allmann Sattler Wappner Architekten
Längsschnitt	24.02.2020	1:200	Allmann Sattler Wappner Architekten
Querschnitte	24.02.2020	1:200	Allmann Sattler Wappner Architekten
Entrauchungsöffnungen: Grundriss, Längsschnitt, Querschnitte	10.10.2023	o. M.	Allmann Sattler Wappner Architekten

Tabelle 1: Verwendete Planunterlagen

Inhalt, Bezeichnung	Autor, Hrsg.	Fassung, Stand
Anwendungshandbuch „Brandsimulationen für U-Bahnhöfe der Gefährdungsstufe 4 der Stadtwerke München GmbH“ Index 2	Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig	16.10.2020
Brandschutzkonzept für die Planfeststellung U-Bahnhof Willibaldstraße	Endreß Ingenieurgesellschaft mbH	25.02.2021
Räumungssimulation U-Bahnhof Willibaldstraße	Endreß Ingenieurgesellschaft mbH	22.07.2020

Tabelle 2: Sonstige verwendete Unterlagen

<sup>1</sup> siehe Abs. 1.4 in Tab. 2

### 2 Ziel

Gemäß Planfeststellungsbeschluss für den Planfeststellungsabschnitt 77 ist für den Bahnhof Willibaldstraße eine ergänzende Feuer- und Rauchgassimulation zu erstellen. Ziel der Simulation ist in erster Linie der Nachweis der ausreichenden Bemessung der Maßnahmen für die Selbst- und Fremdrettungsphasen.

Im Vergleich zu den durchgeführten Simulationsläufen aus den Jahren 2020 und 2022 wird in den hier dargestellten Simulationsläufen eine geänderte Geometrie der Entrauchungsöffnungen zu Grunde gelegt, siehe hierzu Abschnitt 4.2.

In Kombination mit der numerischen Räumungssimulation soll durch die Feuer- und Rauchgassimulation nachgewiesen werden, dass die Maßnahmen zur Selbstrettung ausreichend bemessen wurden. Um dies nachzuweisen, wurde entsprechend den Vorgaben des Anwendungshandbuchs Brandsimulationen<sup>2</sup> das „Ersatzbrandszenario“ im Winter- und Sommerfall berechnet.

Um die ausreichende Bemessung der Maßnahmen für die Fremdrettungsphase nachzuweisen, wurden zwei weitere Simulationsläufe mit dem „Fahrzeuggestandbrand“ im isothermen sowie im Sommerfall durchgeführt<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> vgl. Tabelle 9 „Anwendungshandbuch Brandsimulationen“, S. 31

<sup>3</sup> vgl. Tabelle 10 „Anwendungshandbuch Brandsimulationen“, S. 32

### 3 Methode

#### 3.1 Allgemeines und Dokumentation

Die Berechnungen der Rauchausbreitung im U-Bahnhof Willibaldstraße wurden mit dem Programm „Fire Dynamics Simulator“ (FDS) in der Version 6.7.4<sup>4</sup> durchgeführt, das am National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, Maryland, USA, entwickelt wurde.

Benutzt wurde eine 64-bit-Version mit einem Windows 10-64-Betriebssystem. Alle technischen Details und der vollständige Quellcode sind öffentlich zugänglich:

K. B. McGrattan et al. (Hrsg.): „Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide“, NIST Special Publication 1018-1-3, Sixth Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, March 2020.

K. McGrattan et al. (Hrsg.): „Fire Dynamics Simulator User’s Guide“, NIST Special Publication 1019, Sixth Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, March 2020.

G. P. Forney: „Users Guide for Smokeview – A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data“, NIST Special Publication 1017-1, Sixth Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, March 2020.

Es handelt sich um ein Computermodell zur Berechnung der Strömungsdynamik durch Feuer induzierter Vorgänge.

#### 3.2 Feldmodell

Dabei werden die Navier-Stokes-Gleichungen der Strömungsmechanik unter den Randbedingungen einer Geometrie gelöst, welche von den Anwendern frei vorgegeben werden kann. Es ist ein Feldmodell, das die räumlichen Variationen der Verbrennungsprozesse und des Wärme-

<sup>4</sup> Es handelt sich um die Version von FDS mit denen die Simulationen im Jahr 2020 durchgeführt wurden.

und Materialtransportes in drei Dimensionen, dem natürlichen Raum, berechnet. Die nichtlinearen Navier-Stokes-Gleichungen werden dabei auf einem Gitter gelöst.

Der Auflösung des Gitters entsprechen die kleinsten geometrischen Einheiten, für die noch Werte physikalischer Größen von benachbarten Einheiten unterschieden werden können. Der Auflösung kommt jedoch selbst kein physikalischer Charakter zu: Es ist eine reine Hilfsgröße für die Rechnung, die sich häufig dadurch ergibt, dass eine Rechnung mit feinerer Auflösung nicht mehr durchführbar ist. Eine Verfeinerung der Auflösung führt zu einer überproportional höheren Rechenzeit. Für eine ausgedehnte und komplexe Anlage führt die Rechenzeit schnell an die Grenzen der heute auch an Großrechnern verfügbaren Technik.

### 3.3 **Energiedissipation (Very Large Eddy Simulation)**

Die Navier-Stokes-Gleichungen beschreiben die Dissipation von Energie. Diese führt von großen räumlichen Strukturen, etwa großräumige Ausbreitungen, über mittlere, etwa Wirbelbildungen, bis hin zu den kleinsten Strukturen. Entscheidend für die Dissipation, für die nichtidealen Eigenschaften der Strömungsdynamik, sind allein die kleinsten Strukturen.

Eine direkte numerische Berechnung der nichtlinearen Navier-Stokes-Gleichungen mit einer zwangsläufig endlich großen Auflösung, die um Größenordnungen über diesen kleinsten Strukturen liegt, kann damit die komplette Physik aber nicht beschreiben. Insbesondere die Energieerhaltung wird unvollständig wiedergegeben.

Die Very Large Eddy Simulation korrigiert diese numerische Beschränkung. Dabei werden diese numerisch abgeschnittenen Dissipationsanteile durch ein Modell beschrieben, für das die begrenzte Auflösung der

groben Strukturen ausreicht. Mit diesem Modell werden die Erhaltungsgleichungen korrigiert.

Die Very Large Eddy Simulation erweist sich dabei als Kompromiss zwischen der schnellen aber physikalisch fehlerhaften Berechnung der direkten numerischen Simulation auf dem Gitter und der sehr zeitaufwändigen aber physikalisch zuverlässigen Large Eddy Simulation.

### 3.4 **Verbrennungsmodell**

Dem Modell liegt eine fortgeschrittene Methode, die Verbrennung selbst zu modellieren, zugrunde. Mit dieser Methode wird der Sauerstoffverbrauch durch das Feuer realistisch wiedergegeben. Bei dieser Methode, die als „Mixture Fraction“ bezeichnet wird, wird die Verbrennung als Mischungskontrolliert angenommen, das heißt, die Reaktion von Sauerstoff und Brennstoffen wird als sehr schnell im Vergleich zu anderen Prozessen angesetzt. Die Massenanteile der wichtigsten Reaktionspartner und Reaktionsprodukte können im Rahmen dieses Modells über analytisch und empirisch bestimmte Zustandsgleichungen angegeben werden.

### 3.5 **Strahlungstransport**

Hitzestrahlung ist ein elementares Brandgeschehen: Rund 30 – 40 % der Brandleistung wird als Strahlung, unabhängig von der Gasströmung, im Raum verteilt. Dieser fundamentale Strahlungstransport wird über ein Modell eines grauen Strahlers beschrieben. Die Gleichungen hierfür werden analog zur Methode der Finiten Volumen, wie sie für den Transport durch Konvektion gebräuchlich sind, gelöst. Hierzu werden ca. 100 diskrete Winkelpositionen durchgerechnet, wodurch dieses Strahlungstransportmodell zu ca. 15 % der vom Computer benötigten Zeit beträgt.

### 3.6 Wärmeübergang

Der Wärmeübergang zwischen den Rauchgasen und den Bauteilen sowie auch bei den Bauteilen untereinander spielt für die Abkühlung und damit für die Ausbreitung der Rauchgase eine wichtige Rolle. FDS lässt eine individuelle Modellierung des thermischen Verhaltens jedes Bauteils zu. Um den Wärmeübergang zu bestimmen, ermittelt das Programm nicht nur das thermische Verhalten der Grenzschicht, sondern löst auch für jeden Zeitschritt die Gleichungen für die Wärmeleitung der Bauteile.

### 3.7 Abgrenzung zu verwandten Methoden

Verfügbare Feldmodelle zur Simulation der Rauchausbreitung (Brandsimulation) unterscheiden sich in zweierlei Hinsicht: in der Frage, ob und wie die Energiedissipation korrigiert wird und in dem Umfang, in dem die fundamentalen Brandprozesse im Modell integriert sind. FDS verwendet hier die am weitesten entwickelte Modellierung. Dafür ist aber gegenüber anderen Modellen mit einem deutlich erhöhten Rechenaufwand zu rechnen. Es gibt Brandsituationen, in dem dieser Gewinn an Modellgenauigkeit nicht erforderlich ist. Jedoch bedarf es viel Erfahrung, diese Situationen von den anderen zu unterscheiden. Häufig lässt sich dies vor Ende einer langen numerischen Berechnung nicht zuverlässig einschätzen. Daher ist FDS international zu dem am meisten verwendeten Brandsimulationsmodell geworden und es erwächst daraus quasi ein neuer Standard.

### 3.8 Validierung

Der Nachweis, dass eine ingenieurstechnische Methode die Realität in einem zum Abgleich mit Schutzzielen angemessenen Umfang beschreibt, fehlt bei vielen Computermodellen, da er aufwendig zu führen ist. Die Vorstellungen darüber, wie eine Validierung durchzuführen ist, gehen weit auseinander. Sie müssen jedoch grundsätzlich nachvollziehbar sein. Das heißt auch, dass sie veröffentlicht sein müssen. In den vergangenen Jahren ist die Normung<sup>5</sup>, wie validiert werden soll, weit vorangeschritten. FDS ist zurzeit das einzige Feldmodell, das systematisch im Rahmen einer Norm, ASTM E1355<sup>6</sup>, validiert wurde. Die Ergebnisse sind in Technical User Guide Volume 2 und Volume 3 veröffentlicht.

---

<sup>5</sup> Etwa ISO 16730-1:2015 „Fire safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods“, International Organization for Standardization, Genf

<sup>6</sup> “Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models“, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA

## 4 Geometrisches Modell

### 4.1 Modell allgemein

Als Basis für die Simulation der Rauchausbreitung wurde ein dreidimensionales, digitales Modell mit der Software „blender“ erstellt. Dieses digitale Modell wurde auf Grundlage von zweidimensionalen, elektronischen Plänen aufgebaut. Für die Modellierung wurden die vom Entwurfsverfasser bereitgestellten Pläne sowie das Anwendungshandbuch „Brandsimulationen für U-Bahnhöfe der Gefährdungsstufe 4 der Stadtwerke München GmbH“ (Index 2) zugrunde gelegt.

Für die hier betrachteten Simulationen wurden die Entrauchungsöffnungen entsprechend den Vorgaben vom Baureferat der Landeshauptstadt München vom 10.10.2023 angepasst.

Die geometrische Auflösung des Modells bestimmt die Zahl der Gitterpunkte, an denen alle Größen der Simulation berechnet werden. Die Rechenzeit für eine Simulation hängt quadratisch von der Anzahl dieser Gitterpunkte ab. Um sinnvolle Aussagen und zeitgleich handhabbare Rechenzeiten zu erzielen, muss die Anzahl der Gitterpunkte diesbezüglich optimiert werden. Als Auflösung wurde eine Gittergröße mit einer Kantenlänge von jeweils 0,2 m gewählt. Für die hier durchgeführten Simulationen ist diese Auflösung ausreichend genau.

Um die Rechenzeit zu minimieren, wurde der Bereich des U-Bahnhofes Willibaldstraße und beidseitig 50 m ab Bahnsteigkante des Streckentunnels<sup>7</sup> modelliert. Angrenzende Technikräume sind brand-schutztechnisch abgetrennt und wurden als geschlossen angenommen. Eine Schrägansicht des Schnitts durch das geometrische Modell ist in Abbildung 1 auf der nächsten Seite dargestellt.

---

<sup>7</sup> vgl. Tabelle 1 Anwendungshandbuch Brandsimulationen, S. 38

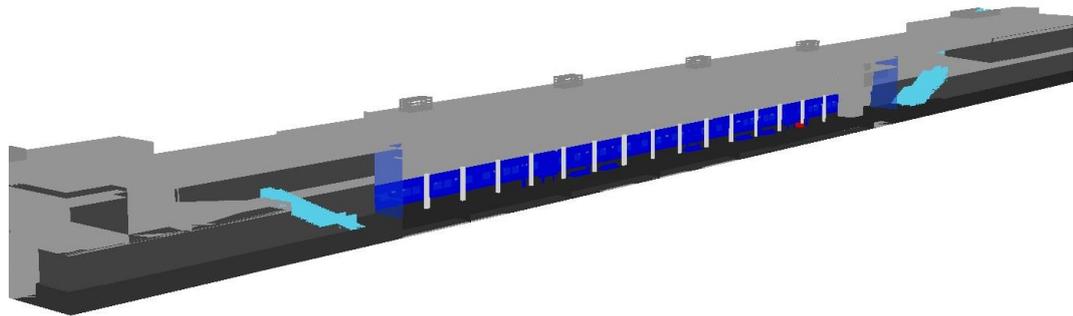


Abbildung 1: Schrägansicht des digitalen Modells (gedrehte Darstellung)

Ebenfalls wesentlich für die Rauchausbreitung sind die Möglichkeiten der Rauchableitung. Hier ist nicht nur die aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche, sondern auch die Anzahl und Positionierung der Öffnungen zur Entrauchung zu berücksichtigen. Im geometrischen Modell wurden daher die Größe und Lage der Öffnungen zur Entrauchung entsprechend der neuen Planunterlagen mit Stand vom 10.10.2023 in die Planung übernommen. Abweichend zu diesem Planstand wurden die Betonkeile im Bereich der Öffnungen oberhalb der Tunneldecke im Übergang zum Schacht, nicht berücksichtigt. Zusätzlich wurden an den Kanten der Öffnungen in der Decke innerhalb des Bahnhofs Fasen von 10 cm x 10 cm integriert. Der Rauch wird über entsprechende Schächte ins Freie geführt. Die seitlichen Öffnungsflächen oberhalb der Geländeoberfläche wurden entsprechend der zur Verfügung gestellten Planunterlagen übernommen. Die wirksame Öffnungsfläche muss für die öffentliche Verkehrsfläche der Ebene E -2 mindestens 23 m<sup>2</sup> betragen<sup>8</sup>. In der Planung wird diese Fläche auf vier Entrauchungsöffnungen mit jeweils 5,76 m<sup>2</sup> freier Öffnungsfläche.

<sup>8</sup> vgl. Abschnitt 13.5.1 Brandschutzkonzept

Um den Bahnsteig vor der Witterung zu schützen, sowie ein gewisses Maß an Schallschutz zu gewährleisten, sollen die Entrauchungsöffnungen mit Aufbauten in Form von Wetterschutzlamellen berücksichtigt werden. Diese haben jedoch den Nachteil, dass sie die freie Strömung der Rauchgase behindern. Hierauf wird in Abschnitt 4.2 im Detail eingegangen.

Die Nachströmung erfolgt über die Tunnel sowie über die Aufgänge zur Straße, solange die Türen zu den Aufgängen zur Verteilerebene offenstehen. Die feuerhemmenden Feuerschutzabschlüsse mit Zusatzfunktion Rauchschutz zur Verteilerebene sind mit Feststellanlagen ausgestattet und wurden als zunächst offen im Modell integriert. Diese Türen schließen nach Abschluss der Selbstrettung (inkl. Sicherheitsbeiwert) automatisch, siehe Abschnitt 6.1<sup>9</sup>.

#### 4.2 Auslegung und Anforderungen an die Aufbauten der Entrauchungsöffnungen

Wie bereits angemerkt schränken Wetterschutzlamellen die freie Öffnungsfläche ein und behindern die Strömung. Zusätzlich führt jede Kante zu lokalen Turbulenzen, was wiederum eine laminare Strömung stört und somit zu einem „Abbremsen“ der Strömung führt. Die Behinderung der Strömung in Abhängigkeit der Öffnungsart wird in der Regel als Strömungsbeiwert bezeichnet. Dieser ist stark von der genauen Geometrie abhängig und kann nur experimentell ermittelt werden.

Die für den Bahnhof Willibaldstraße angedachten Wetterschutzlamellen / Wetterschutzgitter haben meist einen Strömungsbeiwert zwischen 0,4 und 0,5. Vereinfacht bedeutet dies, dass von der Öffnungsfläche nur zwischen 40 % bis 50 % wirksame Öffnungsfläche verbleiben. Dies muss bei der Geometrie der Aufbauten berücksichtigt werden.

---

<sup>9</sup> vgl. auch Tabelle 12 Anwendungshandbuch Brandsimulationen, S. 38

Für jeden der vier Aufbauten muss eine wirksame Öffnungsfläche von 5,76 m<sup>2</sup> erreicht werden. Mit dem konservativen Ansatz eines Strömungsbeiwerts von 0,4 bedeutet dies, dass die vertikalen Außenflächen der Wetterschutzlamellen 14,4 m<sup>2</sup> betragen müssen.

Im geometrischen Modell für die hier betrachteten Simulationen wurde für die Aufbauten eine Sockelhöhe von 0,4 m angenommen<sup>10</sup>. Aufgrund der vorgegebenen Außenabmessungen von 2,2 m auf 4,2 m ergibt sich die Höhe der Wetterschutzlamellen somit zu 1,125 m. Dies wurde im geometrischen Modell auf 1,2 m aufgerundet. Im geometrischen Modell sind so-mit Aufbauten mit einer Gesamthöhe von 1,6 m über OK Gelände angenommen worden.

Je nach geplanter Ausführung bzw. ausgewählten Produkt kann sich die Aufbauhöhe noch marginal verändern.

---

<sup>10</sup> Aufgrund der geometrischen Auflösung des Modells wurde hier ein Vielfaches von 0,2 m gewählt.

### 5 Ersatzbrand und Fahrzeugbemessungsbrand

Die Brandszenarien wurden nach dem Anwendungshandbuch Brandsimulationen im Modell implementiert. Die darin beschriebenen Brandszenarien und Parameter sind im Folgenden kurz beschrieben.<sup>11</sup>

#### 5.1 Ersatzbrandszenario<sup>12</sup>

Gemäß den Angaben des Anwendungshandbuchs Brandsimulationen wird das Ersatzbrandszenario für den Nachweis der Selbstrettungsphase herangezogen. Das Ersatzbrandszenario stellt einen möglichen Brand auf dem Bahnsteig dar. Die Brandverlaufskurve ist in Abbildung 2 dargestellt.

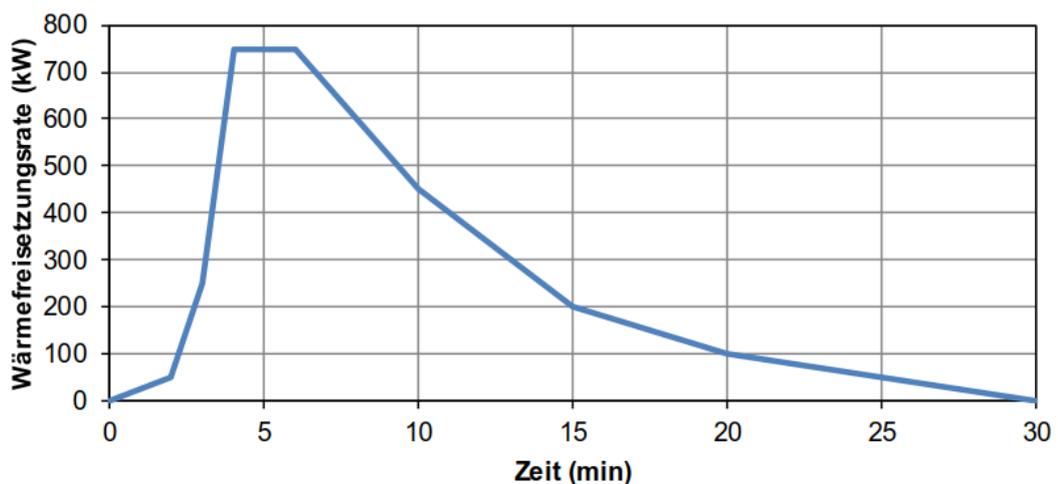


Abbildung 2: Brandverlaufskurve für das Ersatzbrandszenario<sup>13</sup>

<sup>11</sup> Eine ausführliche Beschreibung kann dem Anwendungshandbuch Brandsimulationen entnommen werden.

<sup>12</sup> vgl. Abschnitt 5.2 und 5.3 des Anwendungshandbuchs Brandsimulationen

<sup>13</sup> Abbildung aus Anwendungshandbuch Brandsimulationen, S.13

Folgende Parameter wurden entsprechend den Vorgaben im Modell implementiert:

- Strahlungsanteil der Wärmefreisetzungsrates:  $x_r = 0,35$
- Summenformel:  $C_4H_4O_2$
- Effektiver Heizwert:  $h_{u,eff} = 18,2 \text{ MJ/kg}$
- Rußausbeute:  $Y_{Ru\beta} = 0,04 \text{ kg/kg}$
- CO-Ausbeute:  $Y_{CO} = 0,04 \text{ kg/kg}$
- Maße der Brandquelle:  $1,2 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$
- flächenspezifische Wärmefreisetzungsrates:  $HRR_{PUA} = 260,4 \text{ kW/m}^2$

Der Ersatzbrand wurde im westlichen Drittel in der Nähe des Aufzuges platziert. Durch den Verbindungssteg zum Aufzug in der Verteilerebene ist hier ein, wenn auch nur geringfügig, geringeres Raumvolumen als in den restlichen beiden Dritteln vorhanden. Im Vergleich zu den vorherigen Simulationen aus dem Jahr 2020 wurde die Position etwas weiter östlich platziert. Aufgrund der geänderten Positionierung der Entrauchungsöffnungen war die alte Lage des Brandes nun näher an einer der neuen Entrauchungsöffnungen als dies bei der alten Positionierung der Fall war, vgl. Abbildung 3.

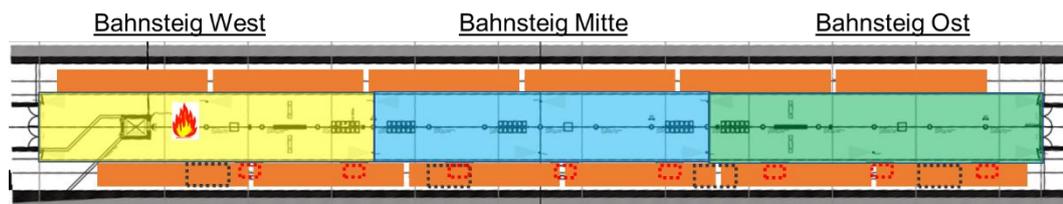


Abbildung 3: Lage des Ersatzbrandes in den Simulationläufen aus dem Jahr 2020 (ungefähre Lage der neuen Entrauchungsöffnungen grau, der alten Öffnungen rot gestrichelt dargestellt)

In der Simulation aus dem Jahr 2020 waren acht Entrauchungsöffnungen mit jeweils einer freien Öffnungsfläche von 2,88 m<sup>2</sup> vorgesehen. Die Lage der Öffnungen ist in Abbildung 3 rot gestrichelt dargestellt. Um die Positionierung der Aufbauten besser in den Straßenraum einzubinden, sind in der neuen Planung nun vier Entrauchungsöffnungen mit jeweils einer freien Öffnungsfläche von 5,76 m<sup>2</sup> vorgesehen (schwarz gestrichelt).

Die neue Position des Brandes liegt nun zwischen den beiden westlichen Entrauchungsöffnungen, vgl. Abbildung 4<sup>14</sup>.

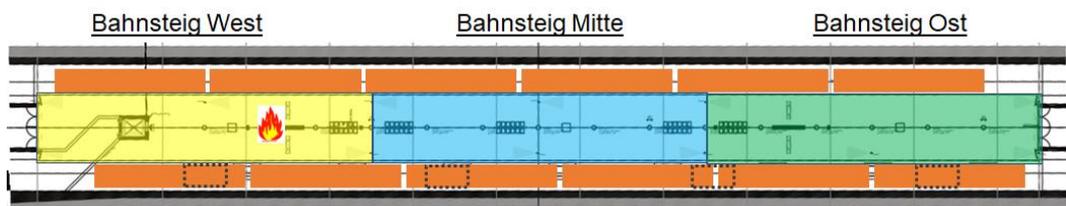


Abbildung 4: Lage des Ersatzbrandes (ungefähre Lage der neuen Entrauchungsöffnungen grau gestrichelt dargestellt)

## 5.2 Fahrzeugbemessungsbrand<sup>15</sup>

Gemäß Anwendungshandbuch Brandsimulationen wird der Fahrzeugbemessungsbrand für den Nachweis der Fremdrettung herangezogen.

Er stellt einen Brand in einem U-Bahnwagen dar und wurde individuell für den B-Wagen der Stadtwerke München GmbH erarbeitet. Es sollen alle U-Bahnfahrzeuge mit Brandbekämpfungsanlagen ausgestattet werden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird die Brandverlaufskurve gemäß Anwendungshandbuch Brandsimulationen<sup>16</sup> um 10 Minuten verzögert angenommen. Die verzögerte Brandverlaufskurve ist in Abbildung 5 auf der nächsten Seite in Rot dargestellt.

<sup>14</sup> Die Position zu den Simulationen aus dem Jahr 2022 wurde beibehalten.

<sup>15</sup> vgl. Abschnitt 5.1 und 5.3 des Anwendungshandbuchs Brandsimulationen

<sup>16</sup> vgl. Abschnitt 5.1 des Anwendungshandbuchs Brandsimulationen, S. 9.

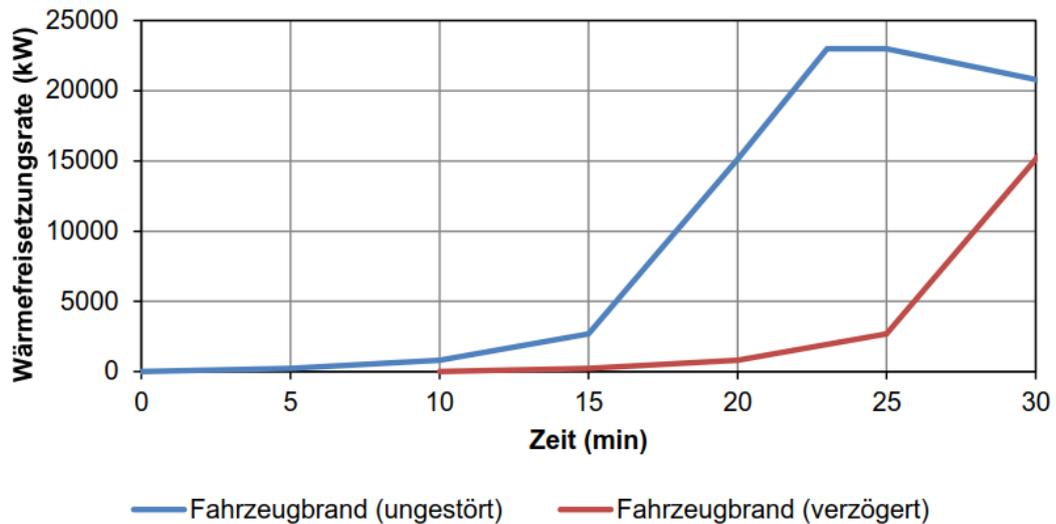


Abbildung 5: Brandverlaufskurve für das Fahrzeugbemessungsbrandes<sup>17</sup>

Die Brandquelle ist in drei Abschnitte Q1, Q2 und Q3 unterteilt. Folgende Parameter wurden entsprechend den Vorgaben im Modell implementiert:

- Strahlungsanteil der Wärmefreisetzungsrate:  $x_r = 0,35$
- Summenformel:  $C_3H_8O_2$
- Effektiver Heizwert:  $h_{u,eff} = 21,49 \text{ MJ/kg}$
- Rußausbeute:<sup>18</sup>  $Y_{Ru\beta} = 0,045 \text{ kg/kg}$
- CO-Ausbeute:  $Y_{CO} = 0,045 \text{ kg/kg}$
- Maße der Brandquelle Q1: 2,4 m x 3,6 m
- Maße der Brandquelle Q2: 2,4 m x 3,6 m
- Maße der Brandquelle Q2: 2,4 m x 10,4 m
- Flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate:  $HRRPUA^{19} = 544,5 \text{ kW/m}^2$

<sup>17</sup> Abbildung aus Anwendungshandbuch Brandsimulationen, S. 9

<sup>18</sup> Da selbstschließende feuerhemmende Rauchschutztüren zur Verteilerebene geplant sind, kann gemäß Anwendungshandbuch Brandsimulationen auf eine Betrachtung von ventilationsgesteuerten Brandbedingungen verzichtet werden. Die Ruß- und CO-Ausbeuten gehen somit als konstant über den gesamten Brandverlauf ein.

<sup>19</sup> Die flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate ergibt sich aus den Angaben der Wärmefreisetzungsrate für Q1, Q2 und Q3 und den dazugehörigen Brandflächen, vgl. S. 11 Anwendungshandbuch Brandsimulationen.

Die Brandquelle wurde in dem von Westen her zweiten Wagen auf dem nördlichen Gleis 1 simuliert. Der Wagen liegt gemäß dem Anwendungshandbuch 15 m bis 20 m von einer Treppe entfernt. Da die Öffnungen zur Entrauchung über dem südlichen Gleis 2 liegen, wird ein Brandszenario im nördlichen Gleis 1 als ungünstiger bewertet. Die Lage des Fahrzeugbemessungsbrandes ist in Abbildung 6 mit einem Flamen-Symbol skizziert.

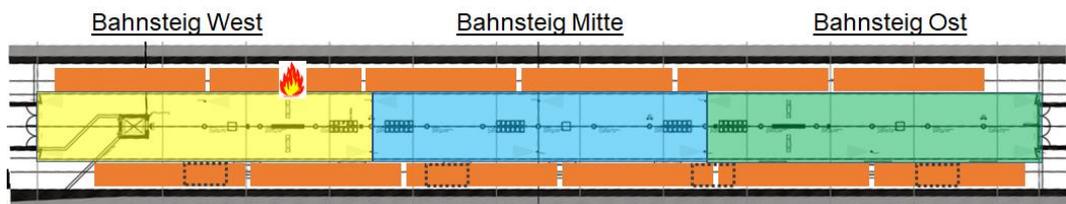


Abbildung 6: Lage des Fahrzeugbemessungsbrandes

Entsprechend den Angaben im Anwendungshandbuch Brandsimulationen sind die dem Bahnsteig zugewandten Türen mit Brandbeginn offen. Die brandbedingte Öffnung der Fenster findet im Zeitraum zwischen 600 s und 1.200 s nach Brandbeginn statt.

## 6 Beschreibung der durchgeführten Simulation

### 6.1 Selbstrettungsphase

Die Simulationsläufe zur Bemessung von Maßnahmen für die Selbstrettung umfassen den in Abschnitt 5.1 dargestellten Ersatzbrand. Es werden zwei Simulationsläufe mit unterschiedlichen thermischen Randbedingungen durchgeführt:

Bemessungsfall	Außentemperatur	Innentemperatur
Sommerfall	25°C	15°C
Winterfall	-5°C	5°C

Tabelle 3: Bemessungsfälle in der Selbstrettungsphase

Die Simulation startet bei  $T = -600$  s. Der Brand beginnt bei  $T = 0$  s. Dadurch kann sich aufgrund der Temperaturunterschiede in den ersten 600 Sekunden eine quasi-stationäre Hintergrundströmung<sup>20</sup> einstellen. Die Türen zur Verteilerebene schließen nach Beendigung der Selbstrettung inklusive Sicherheitsbeiwert bezogen auf den jeweiligen Ausgang. Im vorliegenden Fall schließen die Türen zum gleichen Zeitpunkt:

$$t_{\text{Tür}} = (\Delta t_{\text{Fahrt}} + \Delta t_{\text{Reaktion}} + \Delta t_{\text{Räumung Bahnsteig}}) \times 1,1$$

$$\text{mit: } \Delta t_{\text{Fahrt}} = 2 \text{ min}^{21}$$

$$\Delta t_{\text{Reaktion}} = 2 \text{ min}^{22}$$

$$\Delta t_{\text{Räumung Bahnsteig}} = 6 \text{ min } 50 \text{ s } (410 \text{ s})^{23}$$

ergeben sich die folgenden Zeiten, bei denen die Türen in den Simulationsläufen schließen:

$$t_{\text{Türen Einhausung}} = (120 \text{ s} + 120 \text{ s} + 410 \text{ s}) \times 1,1 = 715 \text{ s}$$

Die Simulationsläufe enden bei  $T = 900$  s.<sup>19</sup> Dies entspricht einer Simulationsdauer von 25 Minuten.

<sup>20</sup> vgl. Abschnitt 6.3 des Anwendungshandbuchs Brandsimulationen, S. 23. (Nomenklatur entsprechend dem Anwendungshandbuch) und Abschnitt 8 Tabelle 12, S.37

<sup>21</sup> vgl. Tabelle 11 Anwendungshandbuch Brandsimulationen, S. 35

<sup>22</sup> vgl. Tabelle 11 Anwendungshandbuch Brandsimulationen, Fußnote 3, S. 35

<sup>23</sup> vgl. Räumungsnachweis U-Bahnhof Willibaldstraße vom 22.07.2020

### 6.2 Fremdrettungsphase

Der Simulationslauf zur Bemessung von Maßnahmen umfasst den in Abschnitt 5.2 dargestellten Fahrzeugbemessungsbrand. Hier wird sowohl der isotherme Fall als auch der Sommerfall betrachtet. Aufgrund der offenen Verbindungen in Form der Rauchableitungsschächten zwischen Bahnsteig und Gelände kann der Sommerfall zu kritischeren Ergebnissen führen. Die Vorlaufzeit zur Einstellung von quasi-stationären Hintergrundströmungen wird hierbei vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass die brandinduzierten Strömungen des Fahrzeugbemessungsbrandes diese überlagern<sup>24</sup>.

Die Simulation und der Brand starten bei  $T = 600$  s. Die Türen zur Verteilerebene schließen nach Beendigung der Selbstrettungsphase, siehe Abschnitt 6.1. Die Simulation endet bei  $T = 2100$  s. Dies entspricht einer Simulationsdauer von 25 Minuten.

### 6.3 Zusammenfassung der Randbedingungen des Modells

Allgemeine Angaben	
Beschreibung des Schutzziels:	Sicherstellung der Selbst- und Fremdrettung
Angaben zum CFD-Modell	
Bezeichnung des Modells:	Fire Dynamics Simulator – FDS
Modelltyp:	6.7.4 für Windows 64 bit
Softwarehersteller:	NIST
Beschreibung der Objektmodellierung	
Netzgenerierung:	von Hand
Art des verwendeten Netzes:	Strukturierte Rechenetze aus Hexaedern; Kantenlänge: 20 cm
Anzahl der Netzelemente:	10.978.000

<sup>24</sup> vgl. Tabelle 10 Anwendungshandbuch Brandsimulationen, S. 32

Anfangsbedingung aller im Modell definierten Volumen	
Lösungsalgorithmus:	Poisson
Umgebungstemperatur:	Sommerfall: 15 °C innen und 25 °C außen Winterfall: 5 °C innen und -5 °C außen Isotherm: 20 °C innen und außen
Anfangsströmung in x-y-z Richtung:	Winter- und Sommerfall: quasi-stationäre Grundströmung stellt sich innerhalb der 600 s vor Brandbeginn ein.
Randbedingungen aller im Modell definierten Oberflächen	
Betonbauteile	Beton mit: spez. Wärmekapazität $C_p = 0,88$ kJ/kgK Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 1,1$ W/mK Rohdichte $\rho = 2.100$ kg/m <sup>3</sup>
Fenster	Glas mit: spez. Wärmekapazität $C_p = 0,84$ kJ/kgK Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,78$ W/mK Rohdichte $\rho = 2.700$ kg/m <sup>3</sup>
Zug und Möbel	Aluminium mit: spez. Wärmekapazität $C_p = 1,02$ kJ/kgK Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 230$ W/mK Rohdichte $\rho = 2.600$ kg/m <sup>3</sup> Emissionsgrad = 0,8
Brandherd:	siehe Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.2
Simulationsdauer:	1.500 Sekunden (25 Minuten)
Anzahl der Einzelbilder:	1.500 (ein Einzelbild jede Sekunde)
Konvergenzkriterium:	Courant Friedrichs-Lewy-Zahl (CFL)
Definition der Fluideigenschaften:	
Dichte:	voreingestellter Parameter in FDS
Viskosität:	voreingestellter Parameter in FDS
Wärmeleitfähigkeit:	voreingestellter Parameter in FDS

Wärmekapazität:	voreingestellter Parameter in FDS
<b>Physikalische / chemische Modelle</b>	
Turbulenzmodell:	Very Large Eddy Simulation (VLES)
Verbrennungsmodell:	Mischungskontrollierte Verbrennung
Strahlungsmodell:	Lösung der Strahlungstransportgleichung für graues Gas mittels Finiter Volumen Methode
Brandverlaufskurve	siehe Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.2
<b>Kennwerte des Bemessungsbrandes / der Bemessungsbrände</b>	
Anteil der Strahlungsleistung:	35 %
Max. Wärmefreisetzungsrate:	Selbstrettungsphase: 750 kW Fremdrettungsphase: 23.000 kW
Darstellung der Brandverlaufskurve:	siehe Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.2

### 7 Analyse

Im Rahmen der hier vorliegenden Simulationen liegt das Hauptaugenmerk auf der Nutzbarkeit der Rettungswege zur Selbst- und Fremdrerettung bei einem Brand. Als Beurteilungsgröße wird hierzu der Parameter optische Dichte herangezogen. Der Räumungsnachweis mittels numerischer Simulation hat eine maximale Räumungszeit von 10 min 50 s bis zum Verlassen des Bahnsteiges und von 15 min 22 s bis zum Erreichen des Freien ergeben.<sup>25</sup> Für die Bewertung der Selbstrettung werden die Räumungszeiten + 10 % (11 min 55 s für den Bahnsteig) und der Grenzwert der optischen Dichte mit  $D_L \leq 0,1 \text{ m}^{-1}$  herangezogen.

Für die Bewertung werden horizontale Analyseschnitte in Höhe von 1,5 m für die Fremdrettungsphase und in Höhe von 2,5 m für die Selbstrettungsphase herangezogen. Ergänzend wird ein vertikaler Analyseschnitt in Bahnsteigmitte dargestellt.

Weiterhin wurden in einer Höhe von 1,5 m und 2,5 m einzelne virtuelle Messpunkte hinsichtlich der optischen Dichte ausgewertet. Die Lage der Messpunkte ist in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt. Die Messpunkte „OD-BS-Gleis 1“, „OD-BS-Mitte“ und „OD-BS-Gleis 2“ in Abbildung 7 sind von links nach rechts durchgezählt, beginnend bei Messpunkt 0.

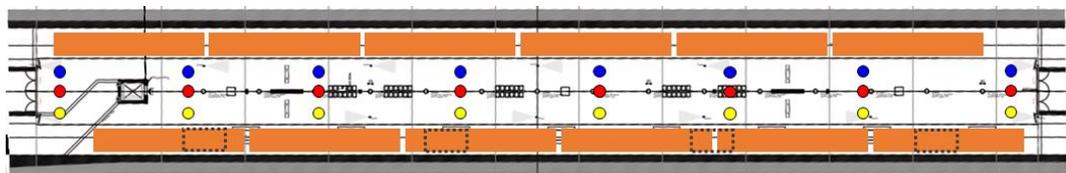


Abbildung 7: Lage der Messpunkte im Bahnsteig  
(Blau: Bahnsteig Gleis 1/ Rot: Bahnsteig Mitte / Gelb: Bahnsteig Gleis 2)

<sup>25</sup> Diese Zeit beinhaltet die Detektions- und Alarmierungszeit, die individuelle Reaktionszeit sowie die Bewegungszeit der einzelnen Personen. Vgl. Räumungsnachweis von Endreß Ing. GmbH vom 22.07.2020

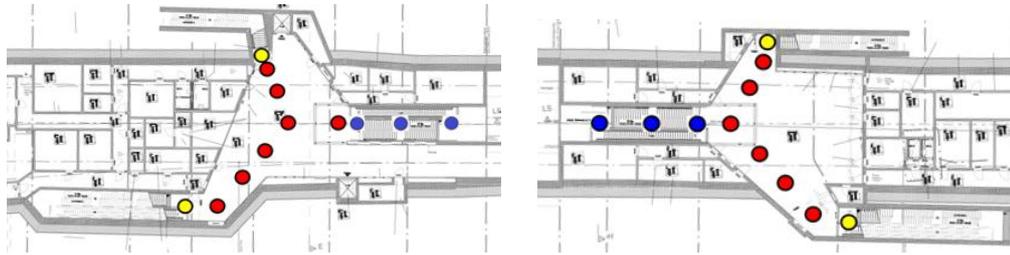


Abbildung 8: Lage der Messpunkte der Verteilerebenen West (links) und Ost (rechts)  
(Gelb: Ausgang / Rot: Verteilerebene / Blau: Aufgang)

Die Ergebnisse aus den Messpunkten und aus den Analyseschnitten werden weiterhin in einer Ampel-Matrix zusammengefasst. Der Bahnsteig wird hierfür in die Bereiche Bahnsteig West, Mitte Bahnsteig und Bahnsteig Ost eingeteilt. Die Einteilung ist in Abbildung 9 dargestellt.

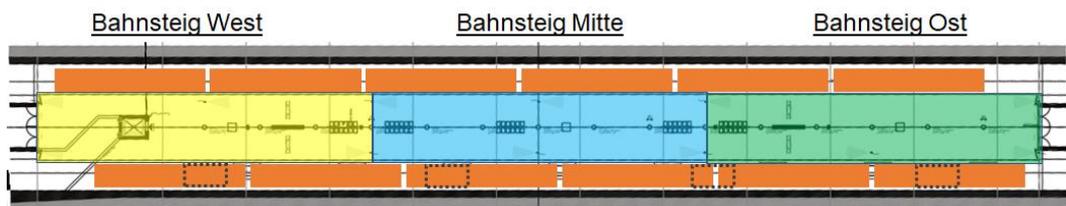


Abbildung 9: Einteilung des Bahnsteigs in Bereich West, Mitte und Ost

### 8 Ergebnisse und Bewertung

Zur besseren Übersicht wurde in den folgenden Darstellungen Werte unterhalb des vorgegebenen Grenzwertes ( $DL = 0,1 \text{ m}^{-1}$ ) in Blautönen und nach Überschreitung des Grenzwertes in Gelb- und Rottönen dargestellt.

#### 8.1 Ergebnisse der Selbstrettungsphase: Sommerfall

##### 8.1.1 Optische Dichte: Messpunkte – Selbstrettung/Sommer

Die folgenden Abbildungen zeigen den zeitlichen Verlauf der optischen Dichte an ausgewählten Punkten auf der Bahnsteigebene sowie der Verteilerebene. Die Messpunkte befinden sich jeweils 2,5 m oberhalb OKFB.

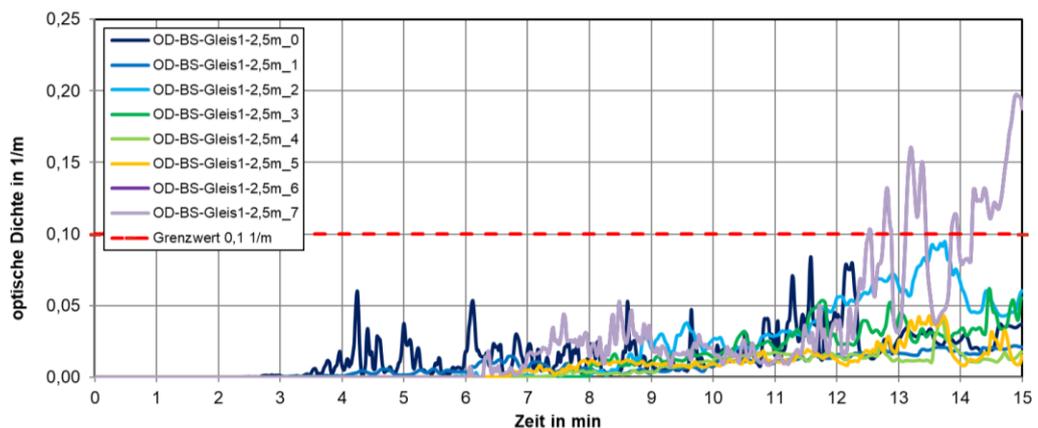


Abbildung 10: Messpunkte Bahnsteig Gleis 1 im Sommerfall

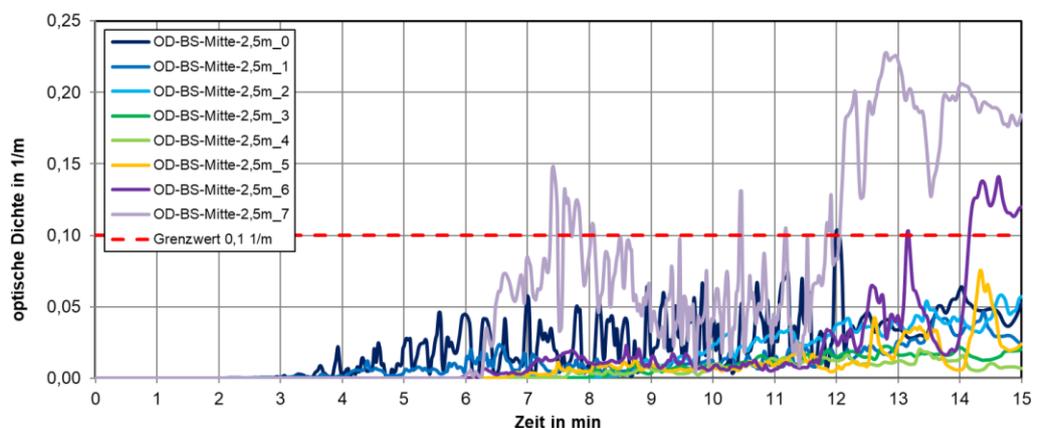


Abbildung 11: Messpunkte Bahnsteig Mitte im Sommerfall

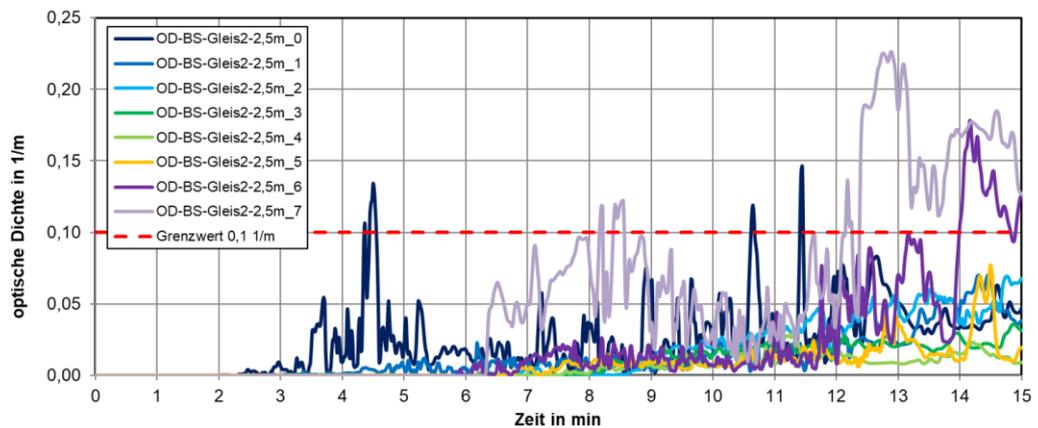


Abbildung 12: Messpunkte Bahnsteig Gleis 2 im Sommerfall

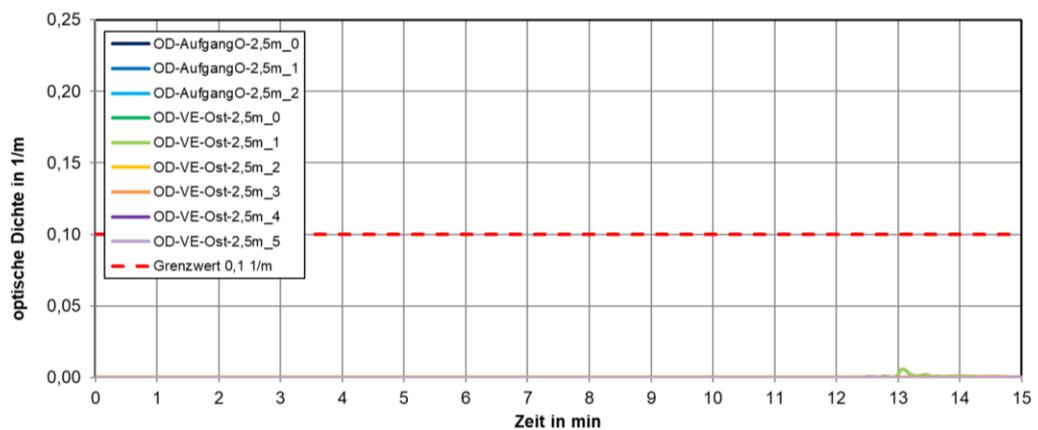


Abbildung 13: Messpunkte Verteilerebene Ost im Sommerfall

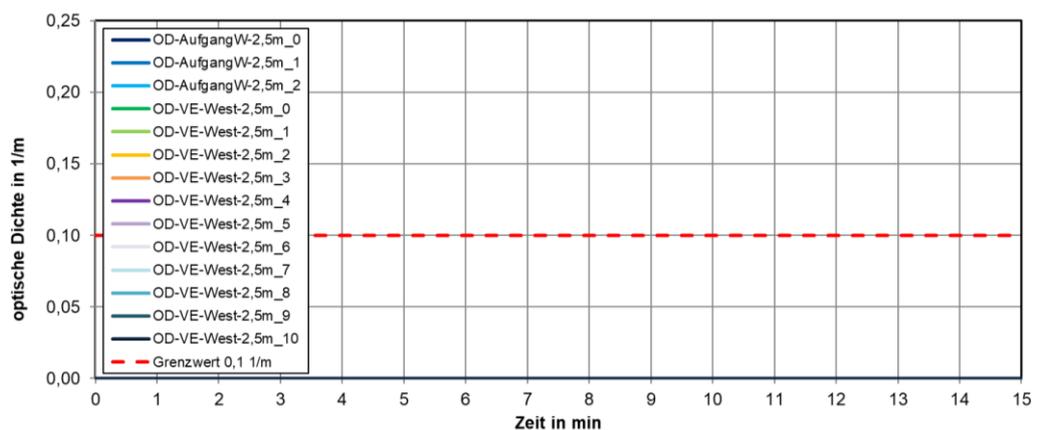
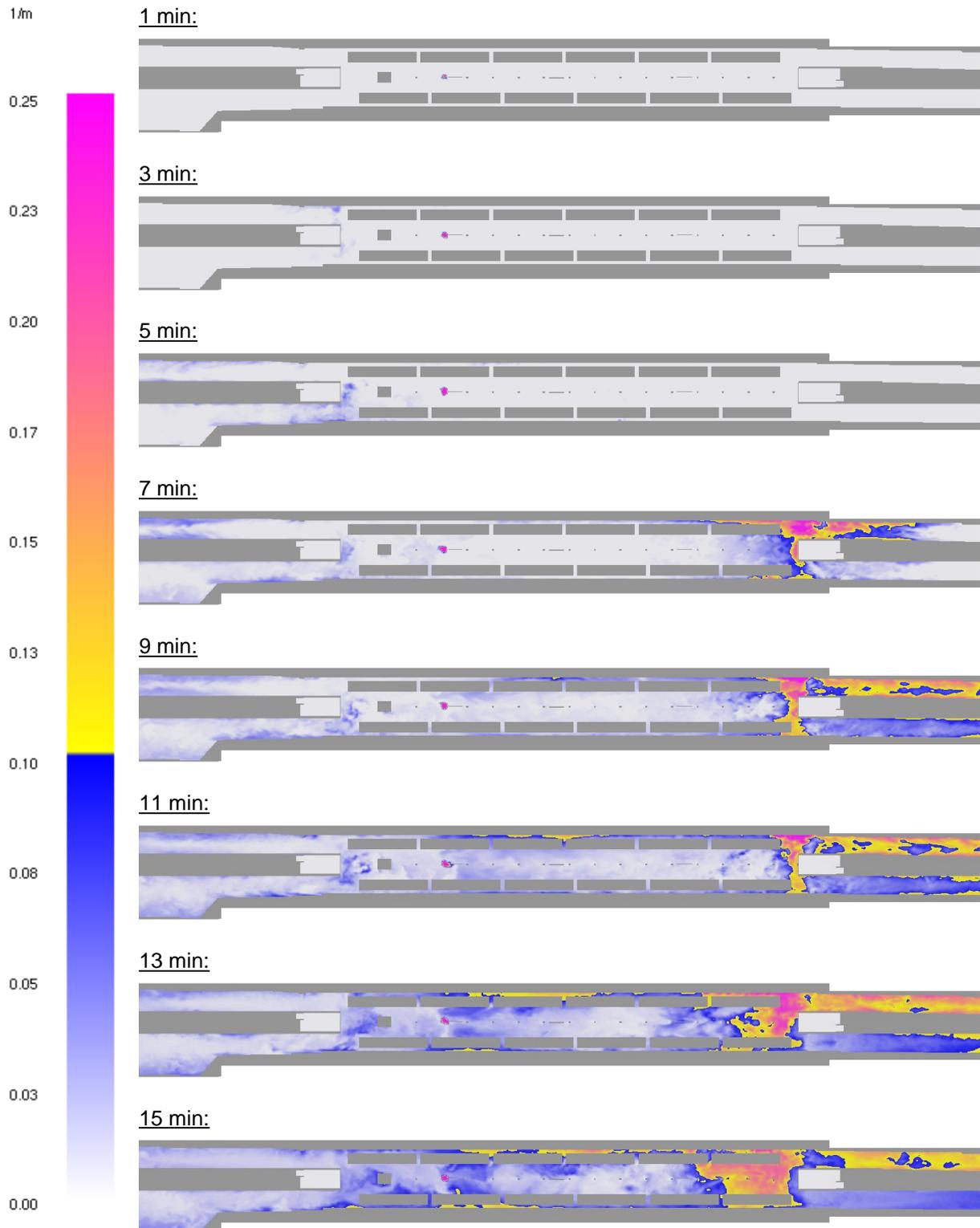
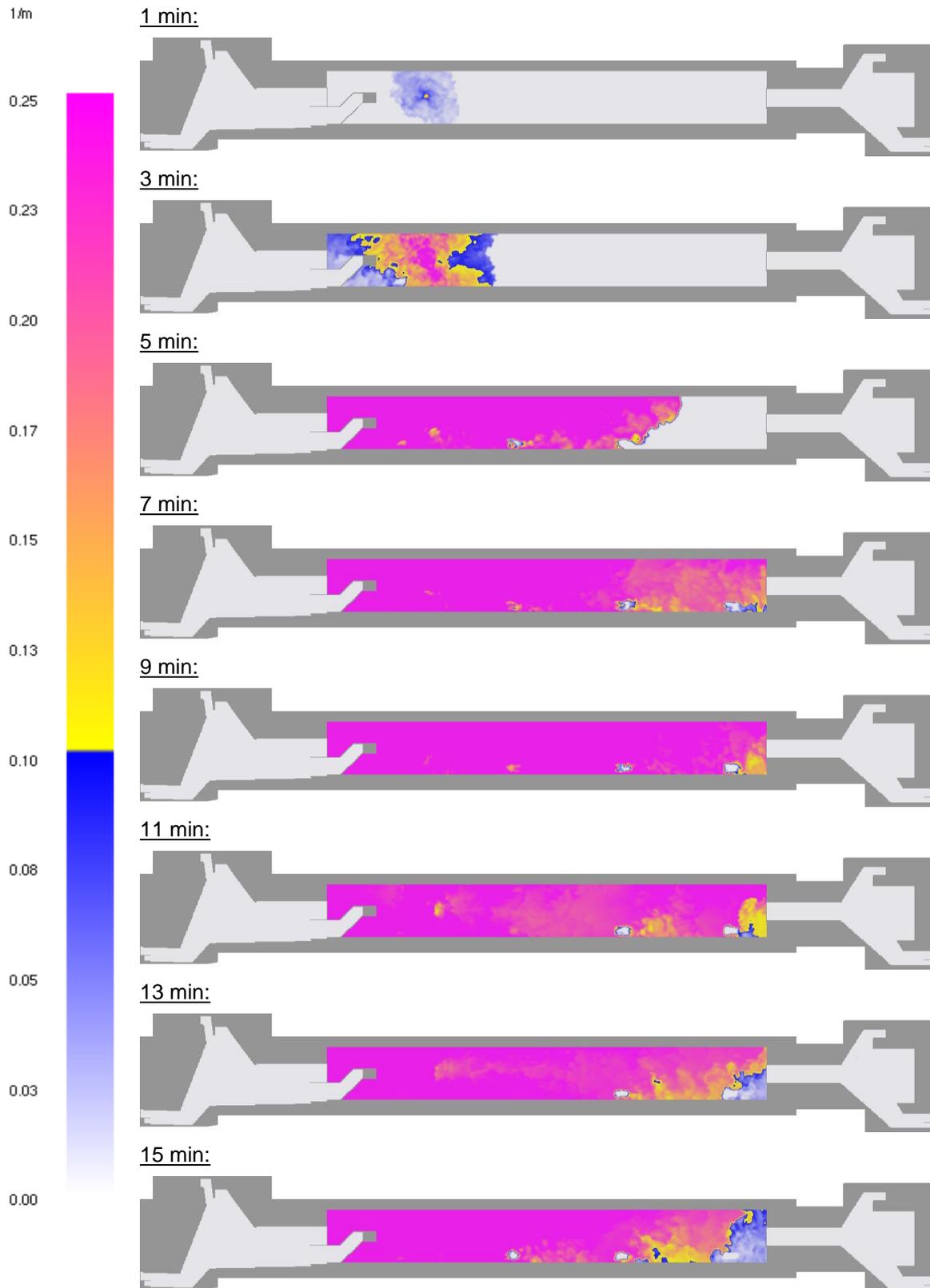


Abbildung 14: Messpunkte Verteilerebene West im Sommerfall

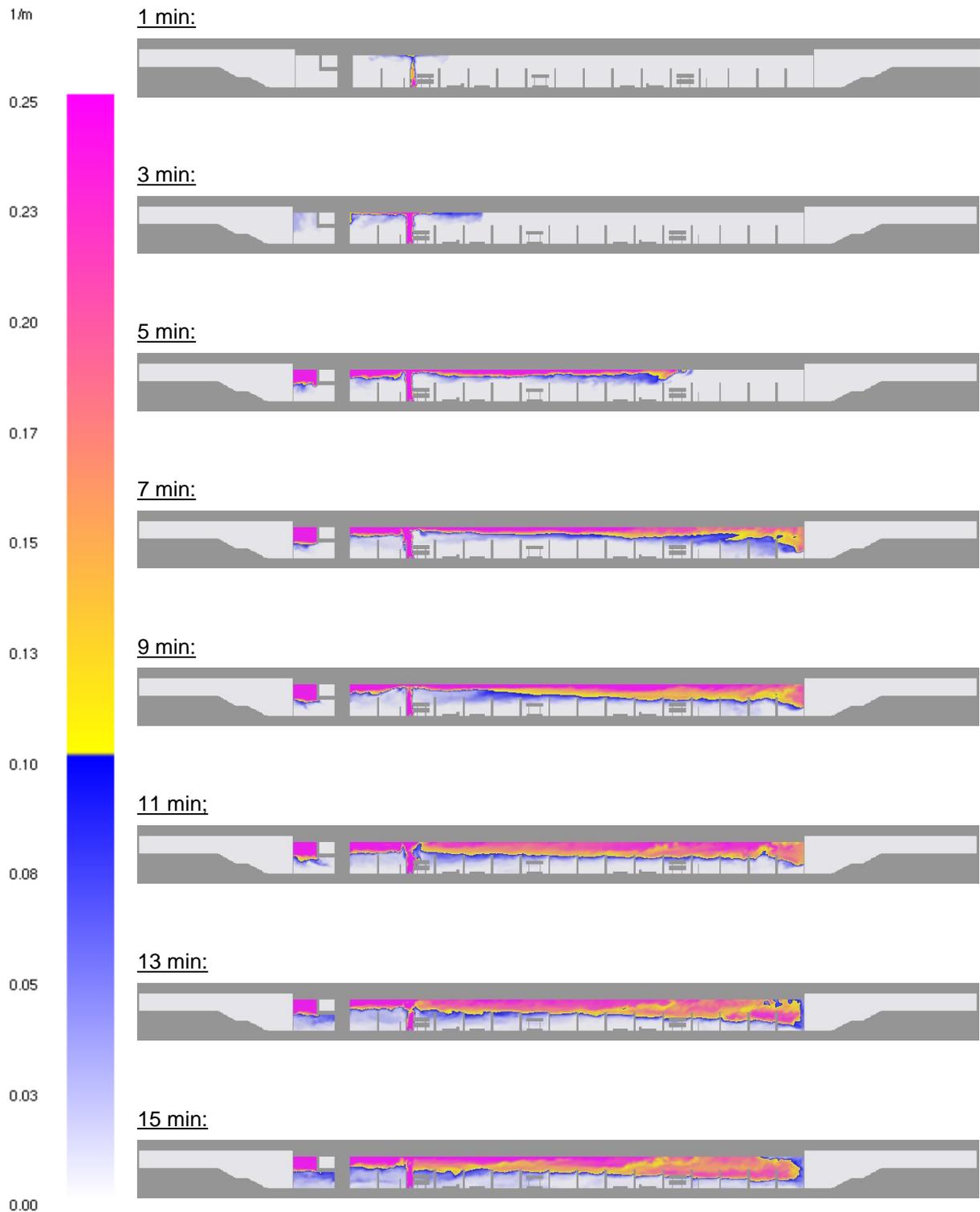
### 8.1.2 Optische Dichte auf einer Höhe von 2,5 m über dem Bahnsteig – Selbstrettung / Sommer



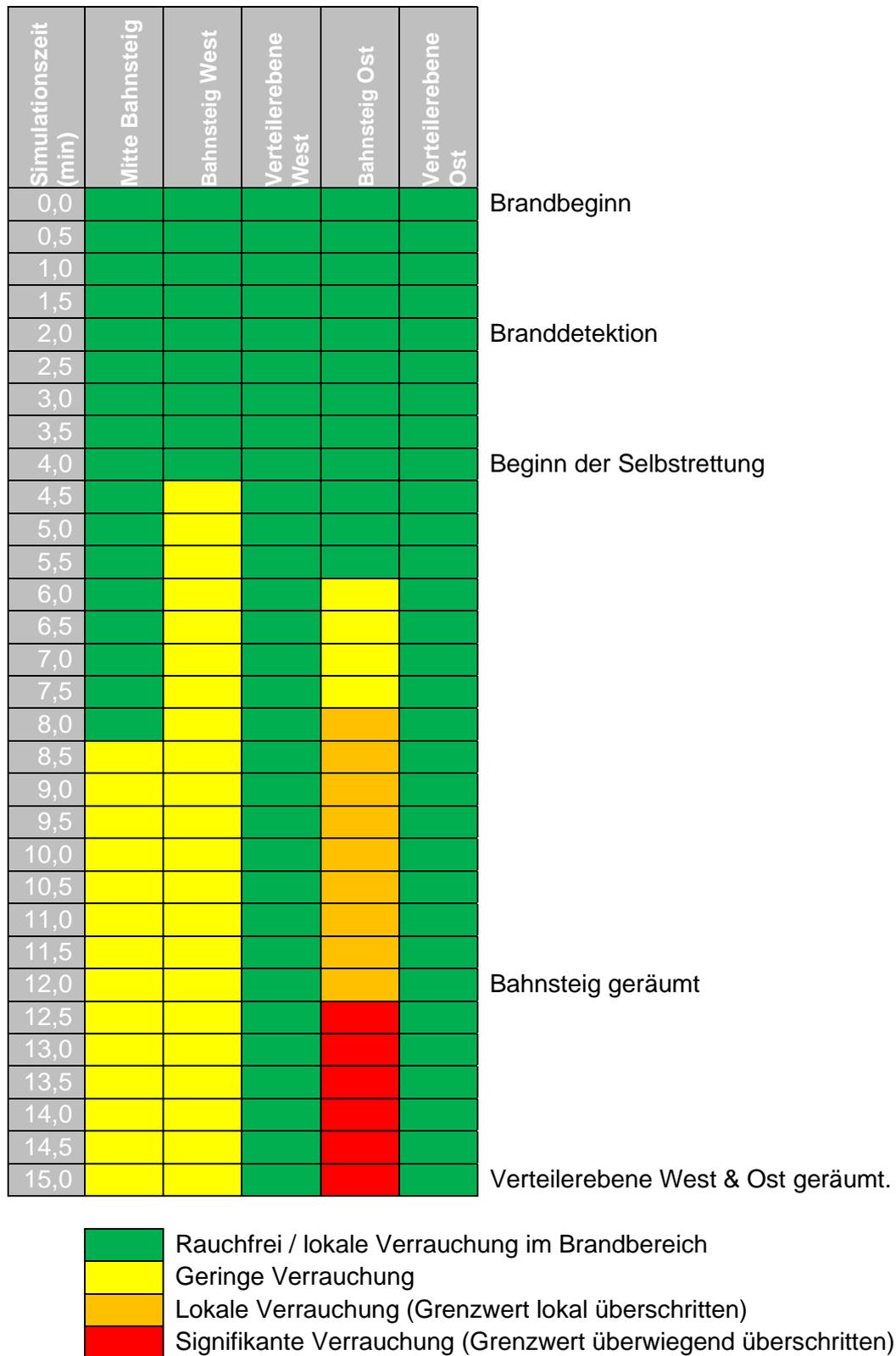
### 8.1.3 Optische Dichte auf einer Höhe von 2,5 m über OKF Verteilerebene – Selbstrettung / Sommerfall



### 8.1.4 Optische Dichte im Längsschnitt in Bahnsteigmitte – Selbstrettung / Sommerfall



### 8.1.5 Ampelmatrix – Selbstrettung / Sommerfall



Ergebnisse und Bewertung

### 8.1.6 Bewertung im Vergleich zu den Ergebnissen des Räumungsnachweises – Selbstrettung / Sommerfall

Im Rahmen des Räumungsnachweises<sup>26</sup> wurde als Räumungszeit bis zum vollständigen Verlassen des U-Bahnhofs mit 15 min 22 s ermittelt. Der Bahnsteig ist bereits in 11 min 55 s geräumt.<sup>27</sup> Diese Räumungszeit beinhaltet sowohl die Detektions- und Alarmierungszeit, die Reaktionszeit, die Bewegungszeit als auch den Sicherheitsbeiwert. Die so ermittelte Räumungszeit ist als auf der sicheren Seite liegend zu beurteilen, da:

- Eine Fahrzeit der U-Bahn bis zu Stillstand von 2 min angenommen wurde.
- Die Reaktionszeit mit 2 min statt 1 min angesetzt wurde.
- Eine Sicherheitsbeiwert von 10 % berücksichtigt wurde.

Der Grenzwert der optischen Dichte  $D_L = 0,1 \text{ m}^{-1}$  wird bis einschließlich 7,5 min nur punktuell kurzzeitig überschritten. Anschließend beginnt der Bereich vor dem östlichen Bahnsteig zu verrauchen. Durch die höheren Außentemperaturen im Vergleich zum Bahnhof kommt es zu Strömungen von außen nach innen. Der Weg des Rauches entlang der „kalten“ (15 °C) Bauteile wie der Decke führt zu einer Abkühlung des Rauches. Der Effekt der Thermik aus dem Brand wird somit, je weiter der Rauch sich vom Brandereignis entfernt, durch die Strömung der „warmen“ Außenluft in den „kalten“ Bahnhof überlagert. Die außermittige Positionierung der Entrauchungsöffnungen tragen ebenfalls geringfügig zu diesem Phänomen bei. Die Temperaturen sind in Abbildung 15 dargestellt und die durch die Entrauchungsöffnungen einströmende Luft ist in Abbildung 16 dargestellt.

<sup>26</sup> Räumungsnachweis von Endreß Ing. GmbH, Stand: 22.07.2020

<sup>27</sup> Der sichere Bereich gilt als erreicht, sobald die feuerhemmenden Rauchschutztüren durchgangen wurden. Der Wert von 11 min 55 s beinhaltet einen Sicherheitsbeiwert von 10 %. Ohne Sicherheitsbeiwert beträgt die Räumungszeit des Bahnsteigs 10 min 50 s.

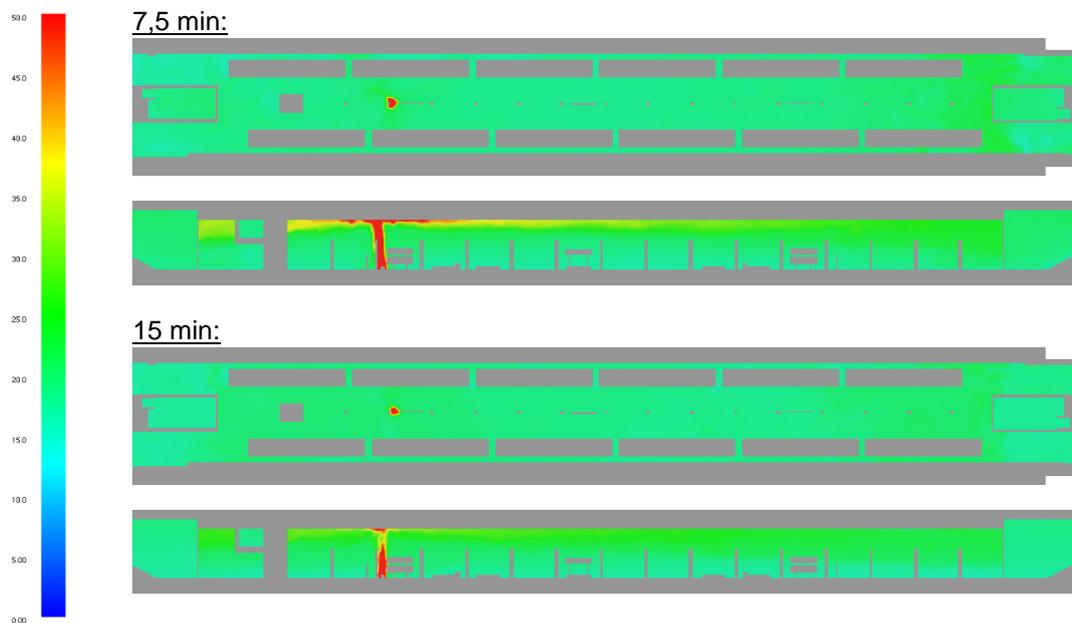


Abbildung 15: Temperaturen im Bahnsteig auf einer Höhe von 2,5 m und im Längsschnitt in Bahnsteigmitte

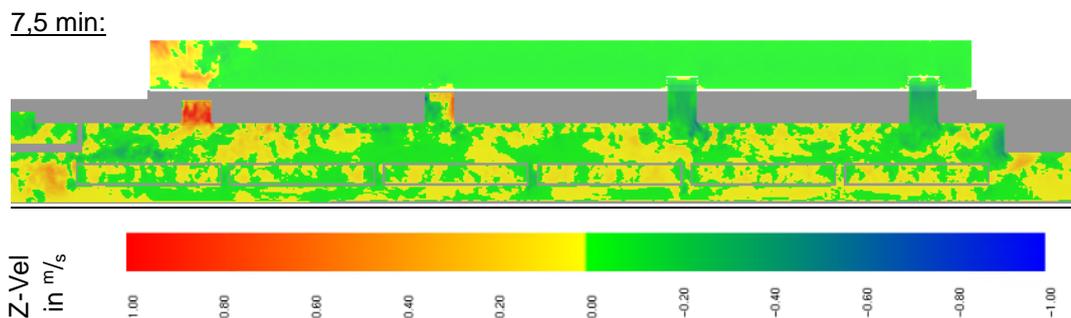
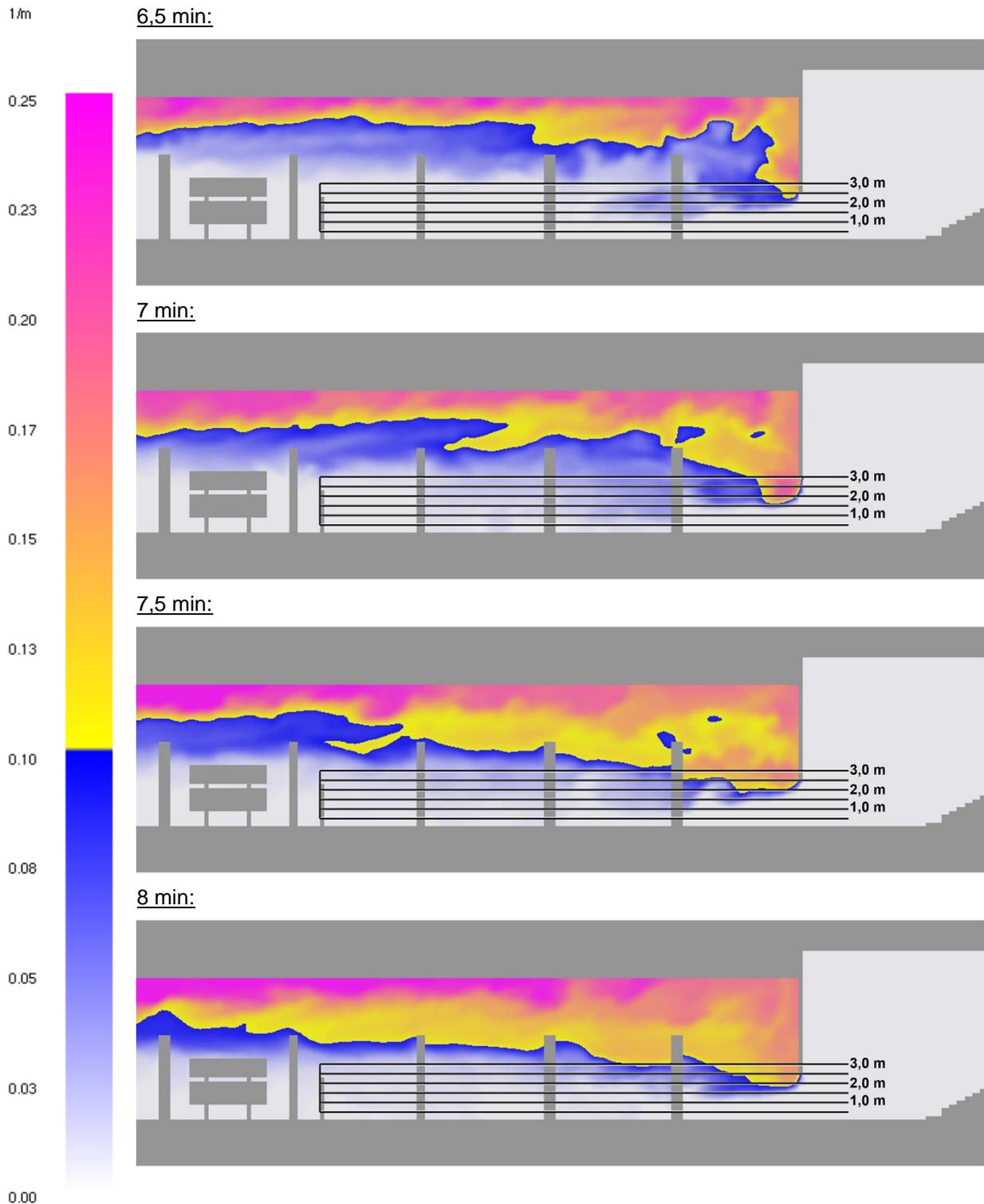
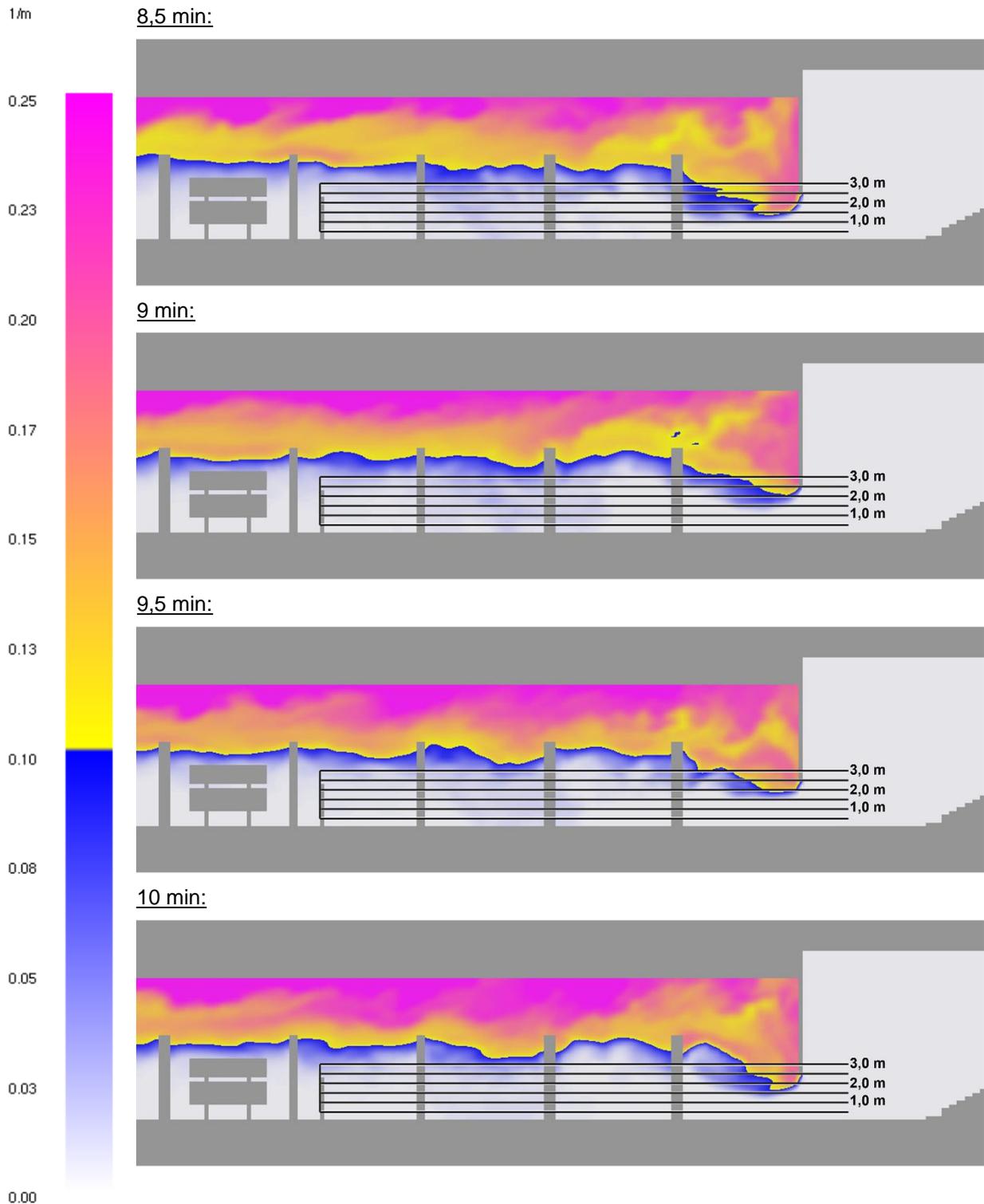
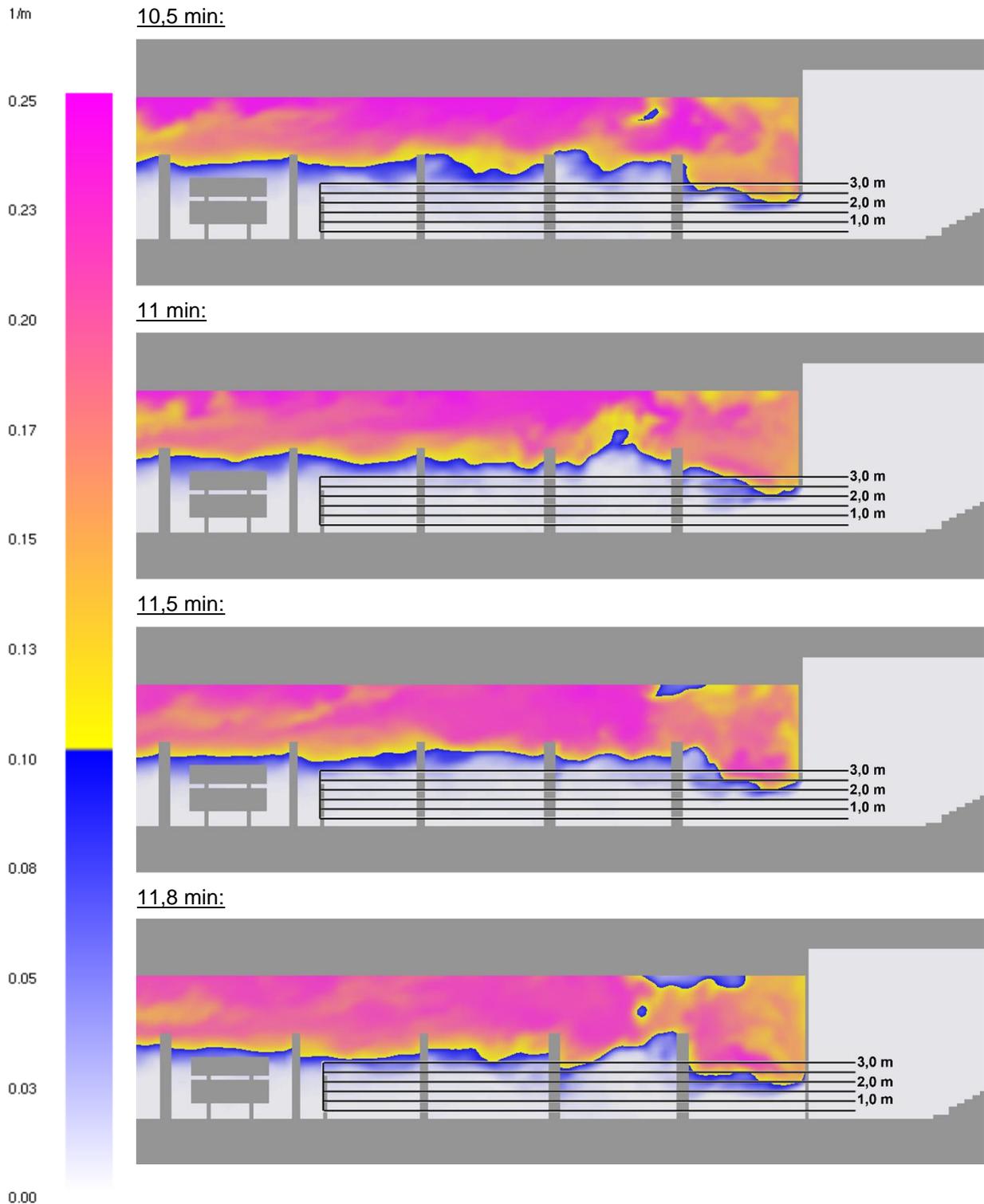


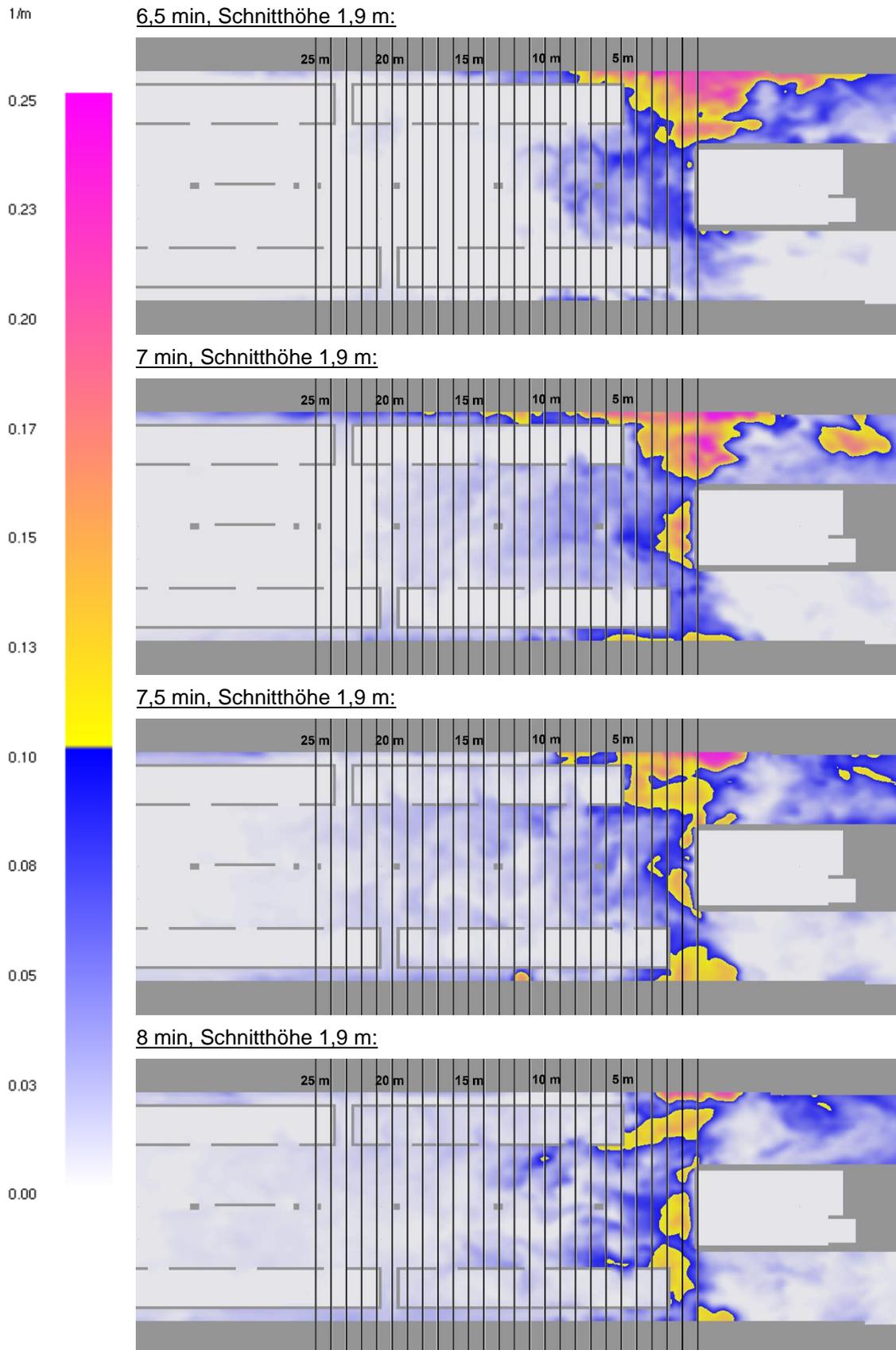
Abbildung 16: Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit in Z-Richtung (Schnitt durch Gleis 2 und Entrauchungsöffnungen)

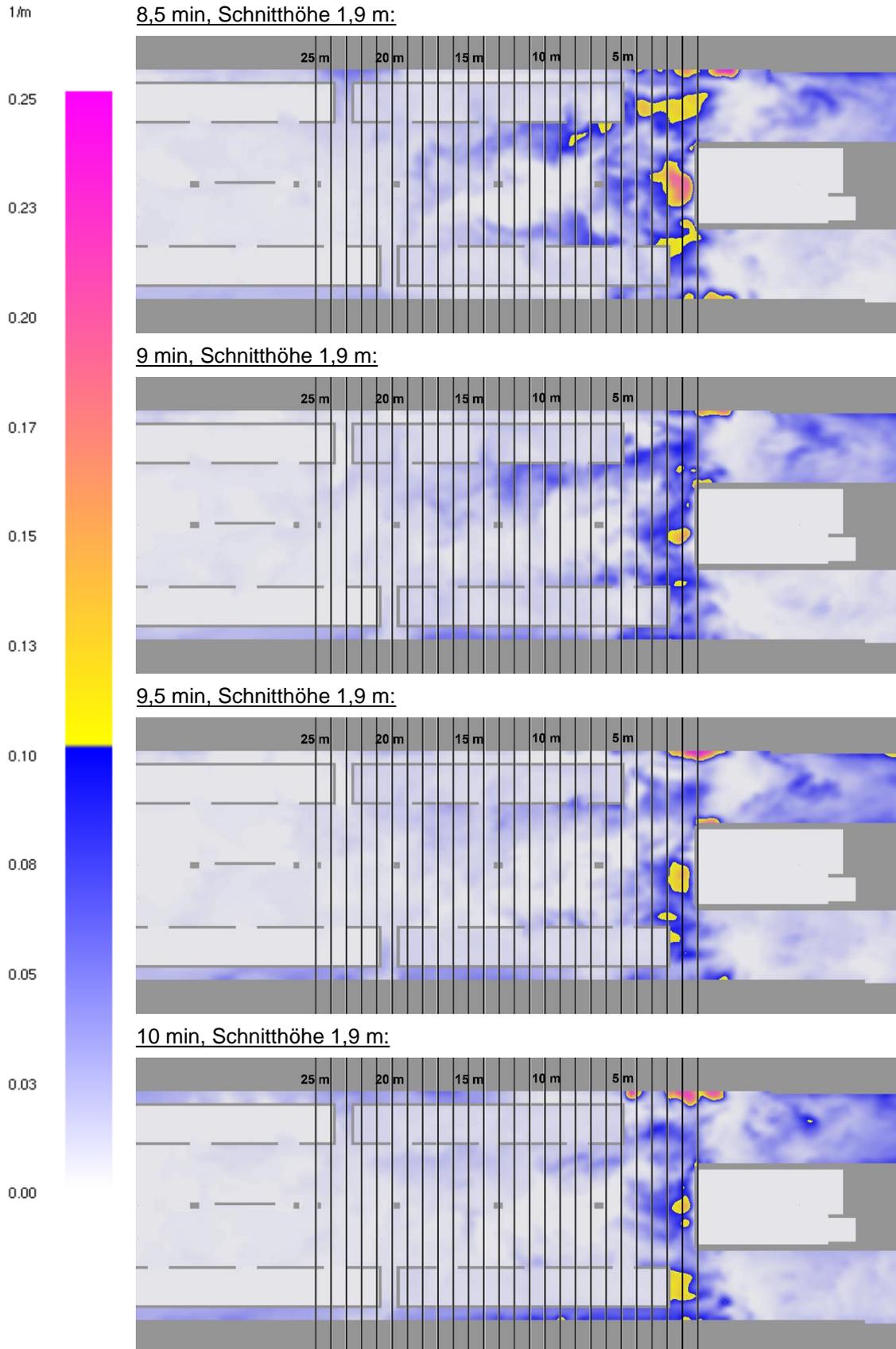
Die letzte Person verlässt im ungünstigsten Fall, inklusive des Sicherheitsbeiwertes, nach 11 min 55 s (715 s) den Bahnsteig durch den östlichen Ausgang. Der Bereich vor dem östlichen Ausgang bedarf daher einer genaueren Betrachtung im Zeitraum zwischen dem Überschreiten des Grenzwertes und der Räumungszeit des Bahnsteigs. Im Folgenden sind daher ein detaillierter Ausschnitt des Längsschnitts in Bahnsteigmitte sowie ein Schnitt auf Höhe von 1,9 m über Bahnsteigoberkante in 30 s-Schritten im Zeitraum zwischen Beginn der Verrauchung am Ausgang Ost und dem Schließen der Türen der Einhausung dargestellt.

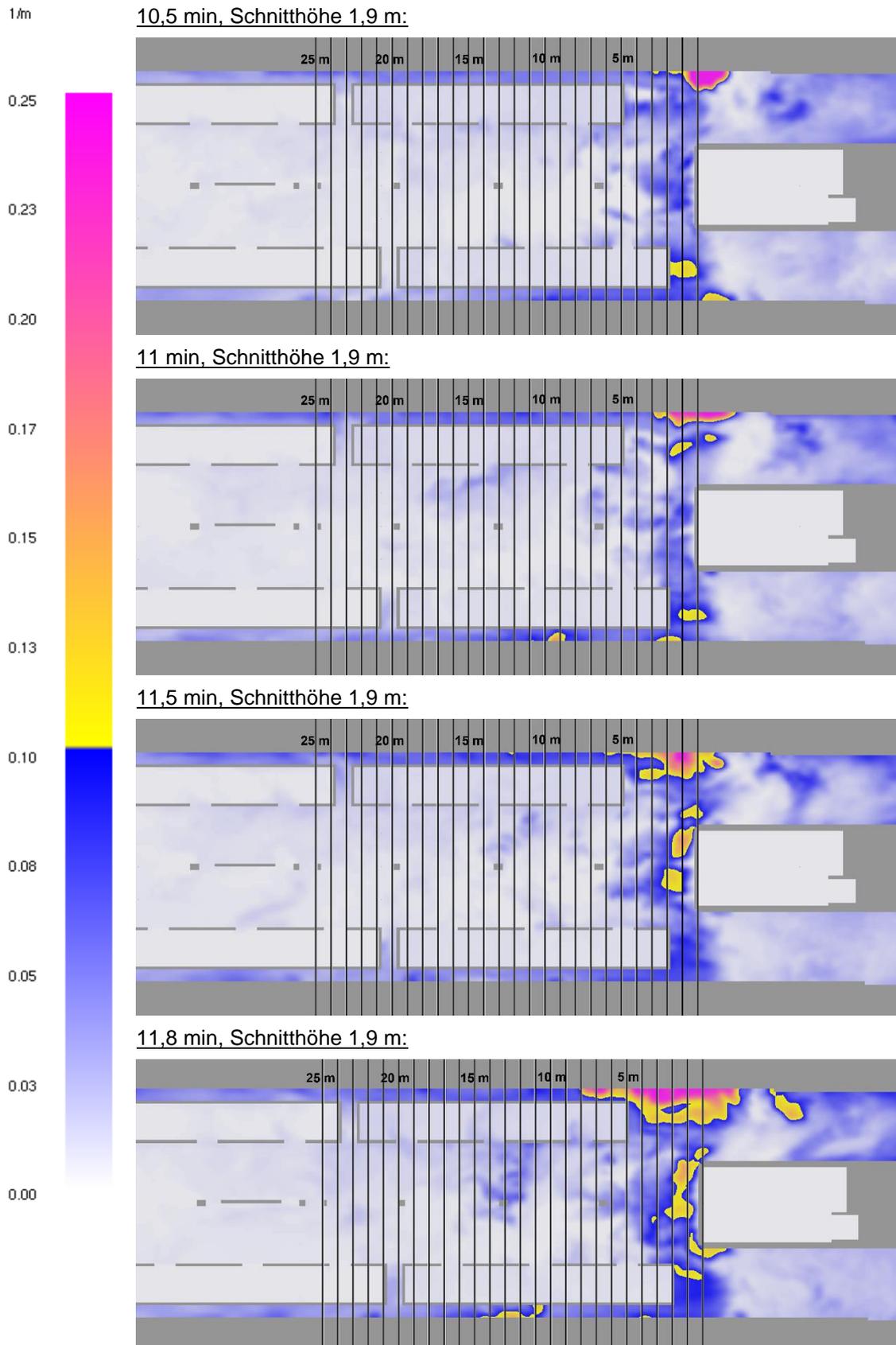












Aus den detaillierten Längsschnitten wird ersichtlich, dass der oben beschriebene Effekt der Nachströmung der Außenluft in den U-Bahnhof im Bereich der Treppe für die Selbstrettung positiv zu bewerten ist. Die Nachströmung der Außenluft über die Türanlage führt zu einem raucharmen Bereich vor der Tür. In den detaillierten Horizontalschnitten ist ersichtlich, dass es zu lokalen Grenzwertüberschreitungen in einer Entfernung bis ca. 5 m von der Treppeneinhausung kommt. Die Situation kann zwar nicht als ideal bewertet werden, eine Selbstrettung ist dennoch möglich.

Der westliche Ausgang und der mittlere Bereich des Bahnsteiges bleiben während der simulierten Zeit von 15 Minuten unterhalb des Grenzwertes von  $D_L = 0,1 \text{ m}^{-1}$ .

Der Nachweis der ausreichenden Bemessung der Maßnahmen zur Selbstrettungsphase im Sommerfall ist damit erbracht.

Insgesamt führen die neue Positionierung und Ausgestaltung der Entrauchungsöffnungen zu ähnlichen Ergebnissen wie in den Simulationen aus dem Jahr 2022.

### 8.2 Ergebnisse der Selbstrettungsphase: Winterfall

#### 8.2.1 Optische Dichte: Messpunkte – Selbstrettung / Winterfall

Die folgenden Abbildungen zeigen den zeitlichen Verlauf der optischen Dichte an ausgewählten Punkten auf der Bahnsteigebene sowie der Verteilerebene. Die Messpunkte befinden sich jeweils 2,5 m oberhalb OKFB.

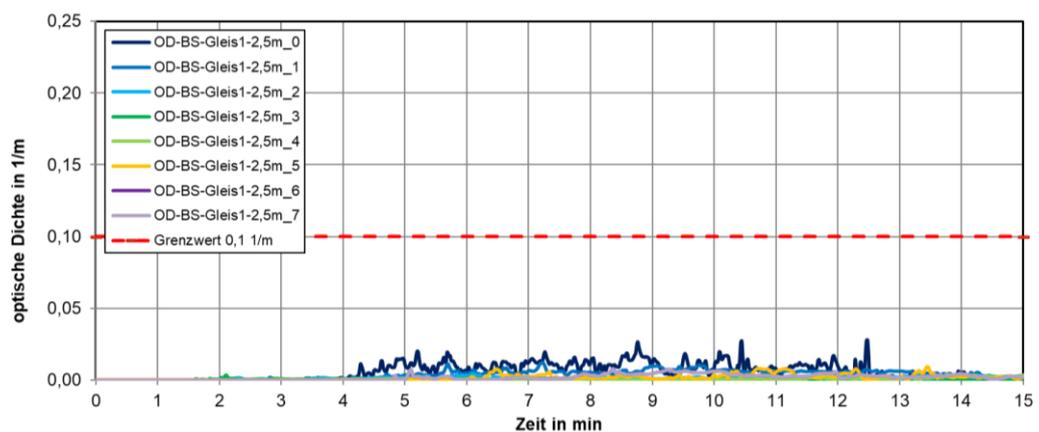


Abbildung 17: Messpunkte Bahnsteig Gleis 1 im Winterfall

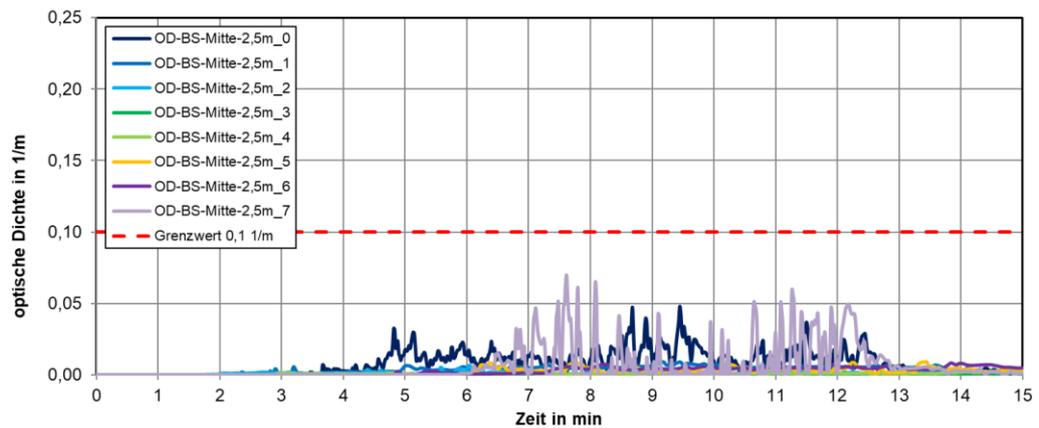


Abbildung 18: Messpunkte Bahnsteig Mitte im Winterfall

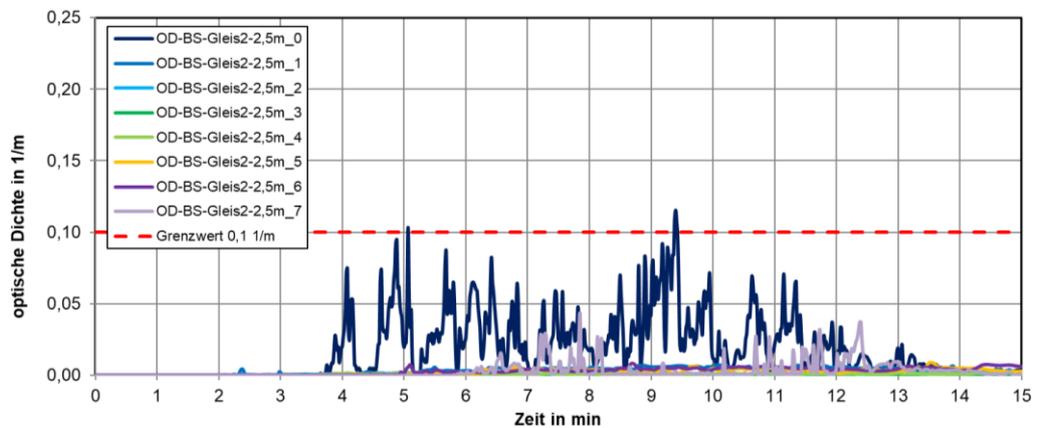


Abbildung 19: Messpunkte Bahnsteig Gleis 2 im Winterfall

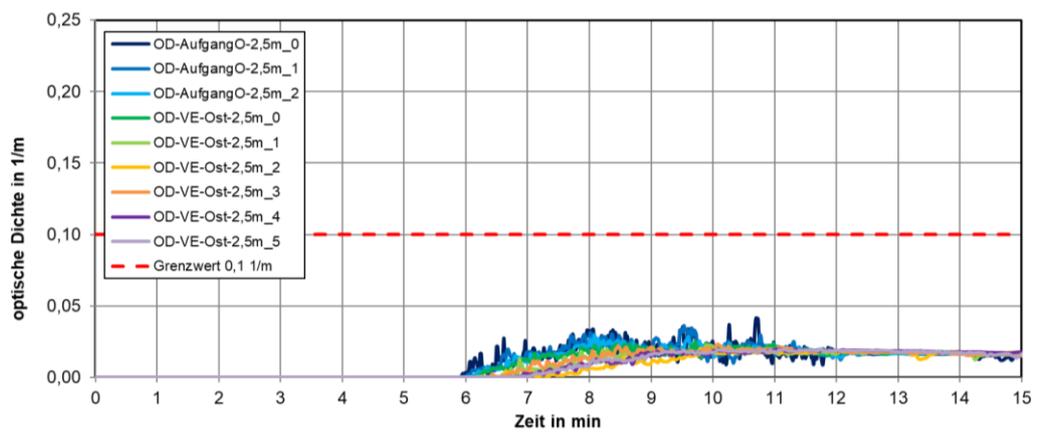


Abbildung 20: Messpunkte Verteilerebene Ost im Winterfall

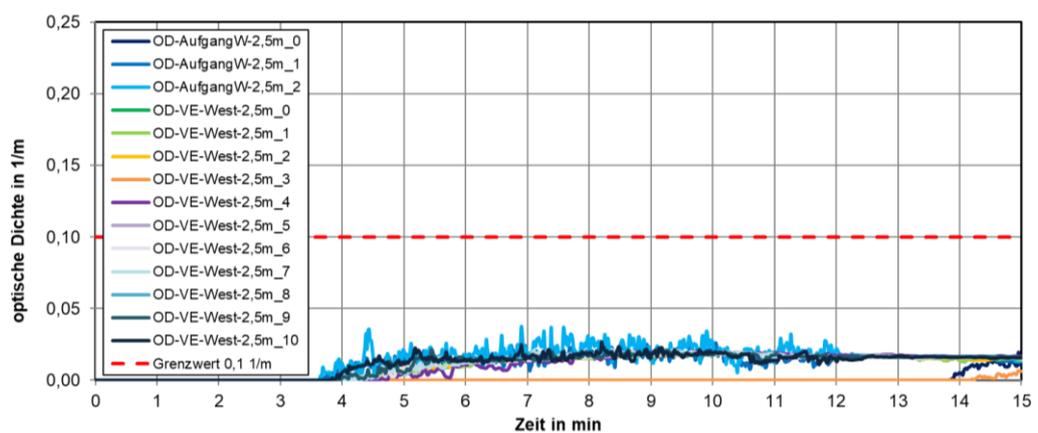
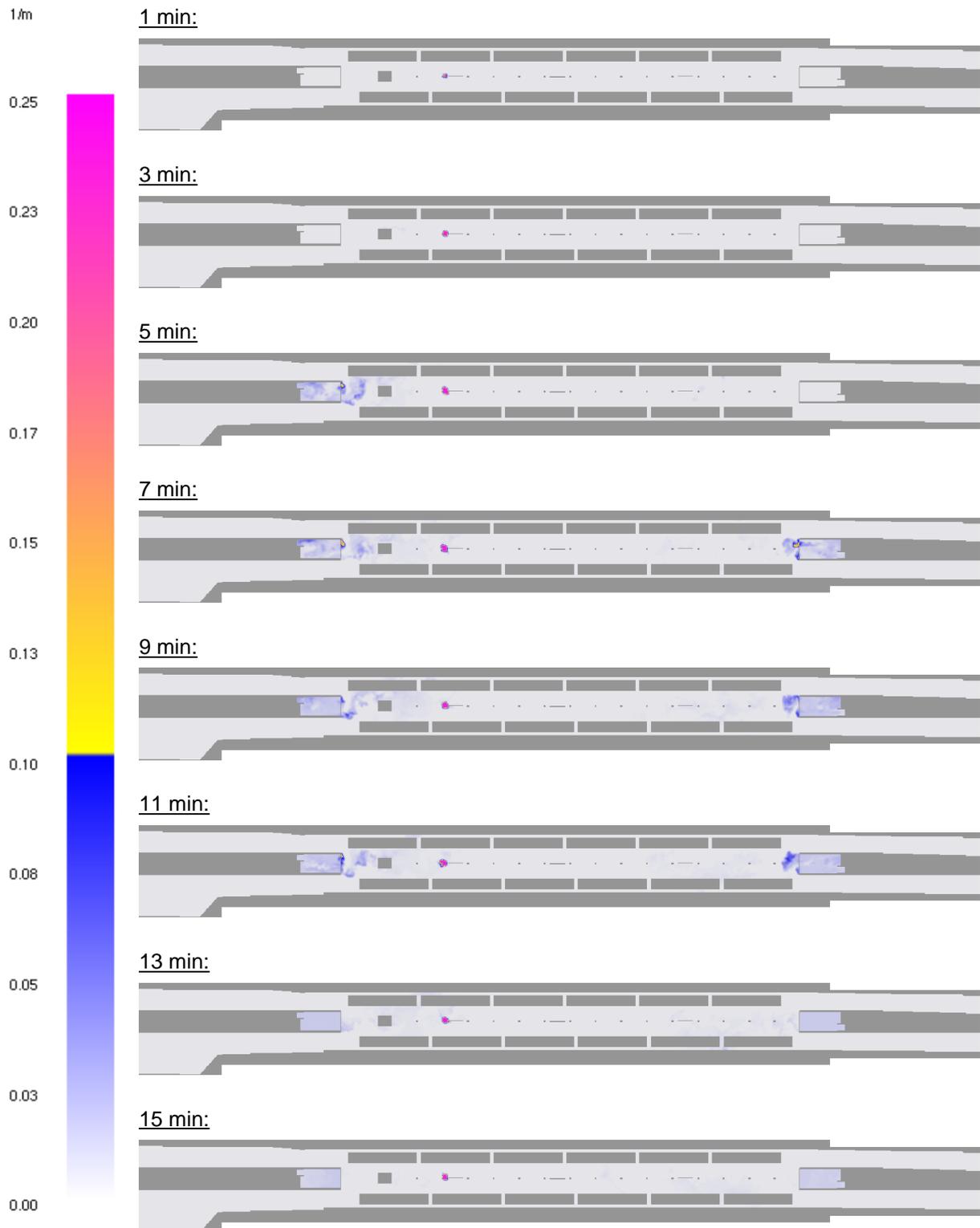
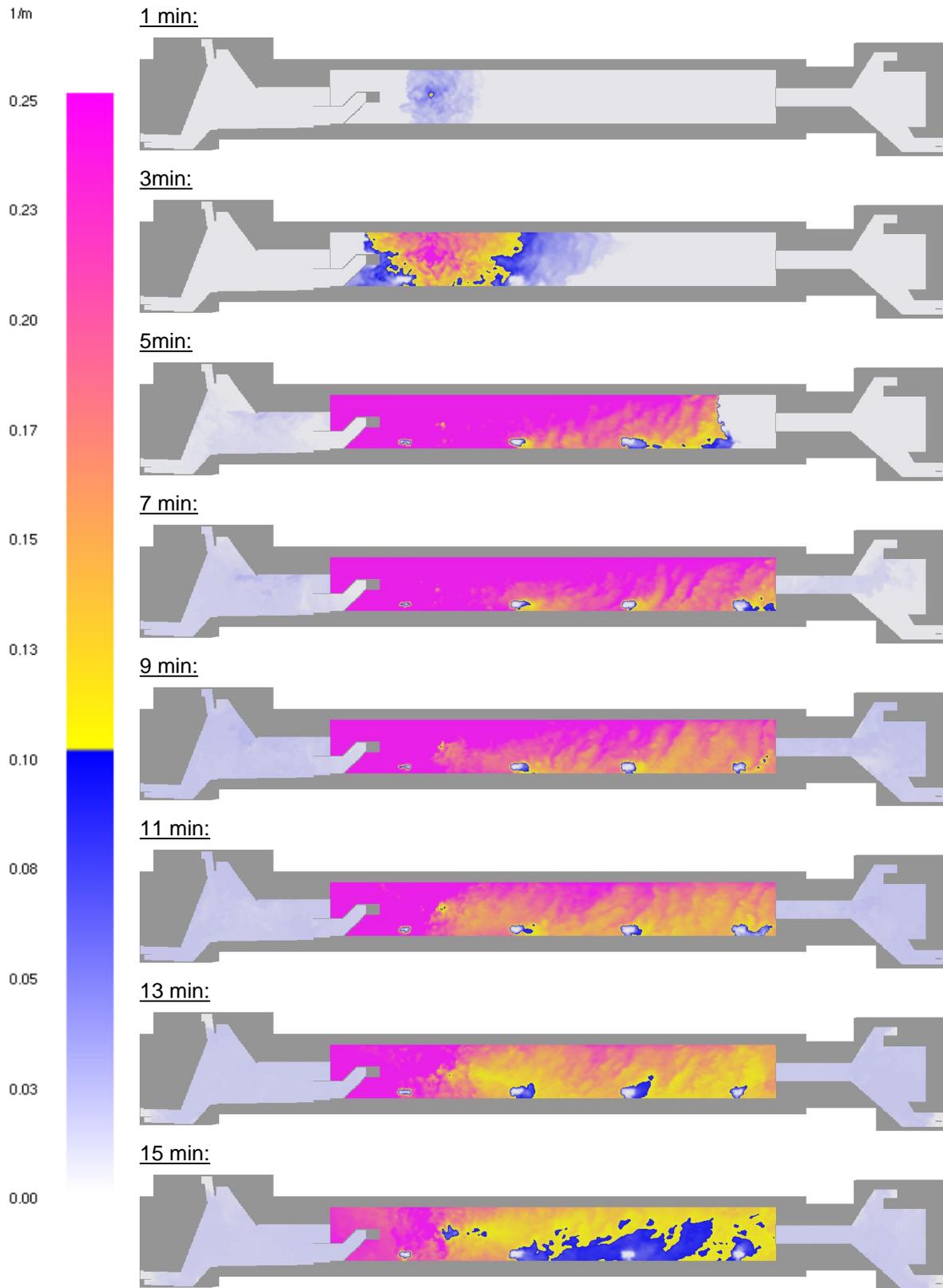


Abbildung 21: Messpunkte Verteilerebene West im Winterfall

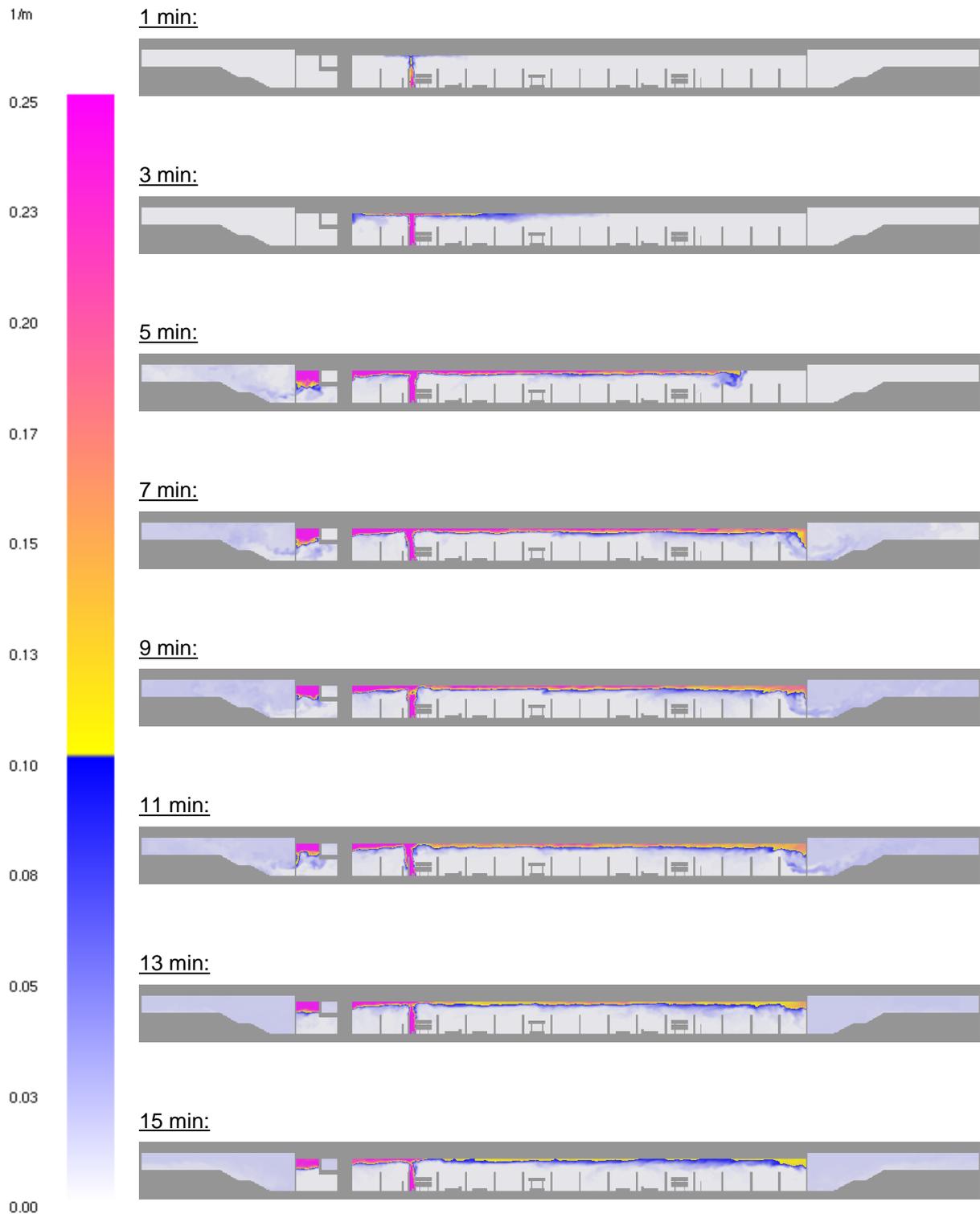
### 8.2.2 Optische Dichte auf einer Höhe von 2,5 m über dem Bahnsteig – Selbstrettung / Winterfall



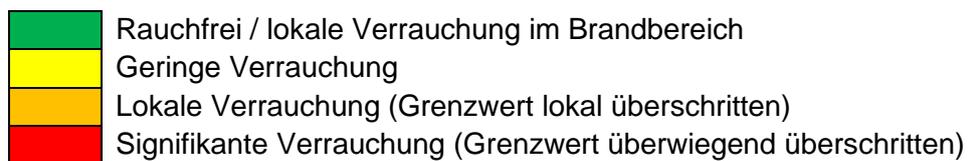
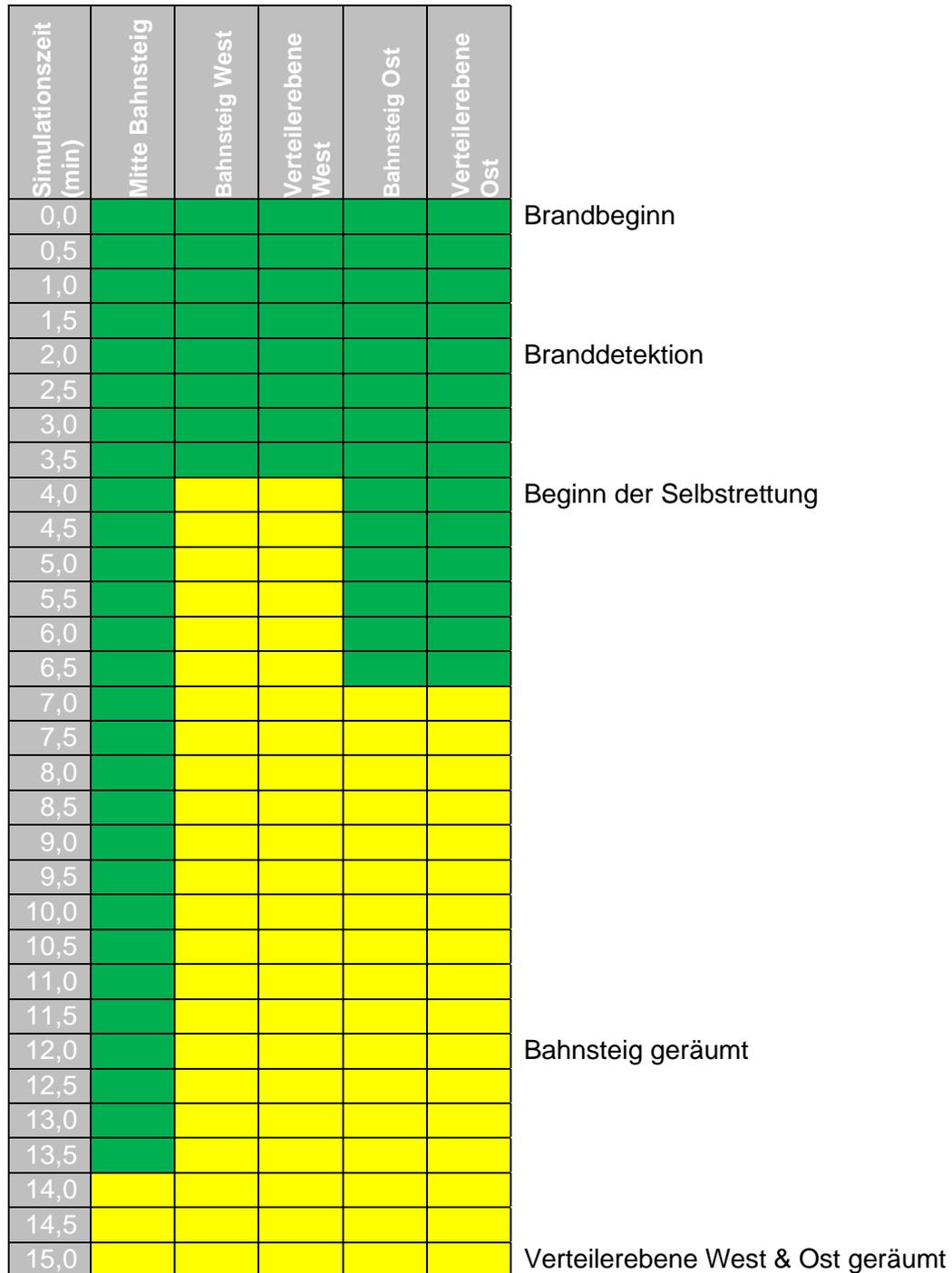
### 8.2.3 Optische Dichte auf einer Höhe von 2,5 m über OKF Verteilerebene – Selbststrettung / Winterfall



### 8.2.4 Optische Dichte im Längsschnitt in Bahnsteigmitte – Selbstrettung / Winterfall



### 8.2.5 Ampelmatrix – Selbstrettung / Winterfall



### 8.2.6 Bewertung mit Vergleich zu den Ergebnissen des Räumungsnachweises – Selbstrettung / Winterfall

Im Rahmen des Räumungsnachweises<sup>28</sup> wurde als Räumungszeit bis zum vollständigen Verlassen des U-Bahnhofs mit 15 min 22 s ermittelt. Der Bahnsteig ist bereits in 11 min 55 s geräumt.<sup>29</sup> Diese Räumungszeit beinhaltet sowohl die Detektions- und Alarmierungszeit, die Reaktionszeit, die Bewegungszeit als auch den Sicherheitsbeiwert. Die so ermittelte Räumungszeit ist als auf der sicheren Seite liegend zu beurteilen, da:

- Eine Fahrzeit der U-Bahn bis zu Stillstand von 2 min angenommen wurde.
- Die Reaktionszeit mit 2 min statt 1 min angesetzt wurde.
- Eine Sicherheitsbeiwert von 10 % berücksichtigt wurde.

Der Grenzwert der optischen Dichte  $D_L = 0,1 \text{ m}^{-1}$  wird über die gesamte Dauer des Simulationslaufs nur an Bahnsteig 2 kurzzeitig, punktuell überschritten.

Der Nachweis zur ausreichenden Bemessung der Maßnahmen zur Selbstrettungsphase im Winterfall ist somit erbracht.

---

<sup>28</sup> Räumungsnachweis von Endreß Ing. GmbH, Stand: 22.07.2020

<sup>29</sup> Der sichere Bereich gilt als erreicht, sobald die feuerhemmenden Rauchschutztüren durchgangen wurden. Der Wert von 11 min 55 s beinhaltet einen Sicherheitsbeiwert von 10 %. Ohne Sicherheitsbeiwert beträgt die Räumungszeit des Bahnsteigs 10 min 50 s.

### 8.3 Ergebnisse der Fremdrettungsphase: isothermer Fall

Die folgenden Abbildungen zeigen den zeitlichen Verlauf der optischen Dichte an ausgewählten Punkten auf der Bahnsteigebene sowie der Verteilerebene. Die Messpunkte befinden sich jeweils 1,5 m oberhalb OKFB.

#### 8.3.1 Optische Dichte: Messpunkte – Fremdrettung / isotherm

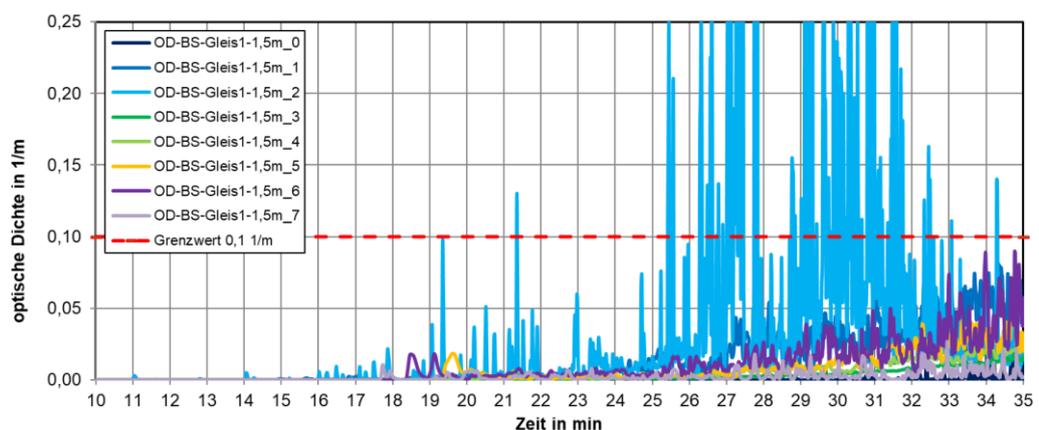


Abbildung 22: Messpunkte Bahnsteig Gleis 1 im isothermen Fall

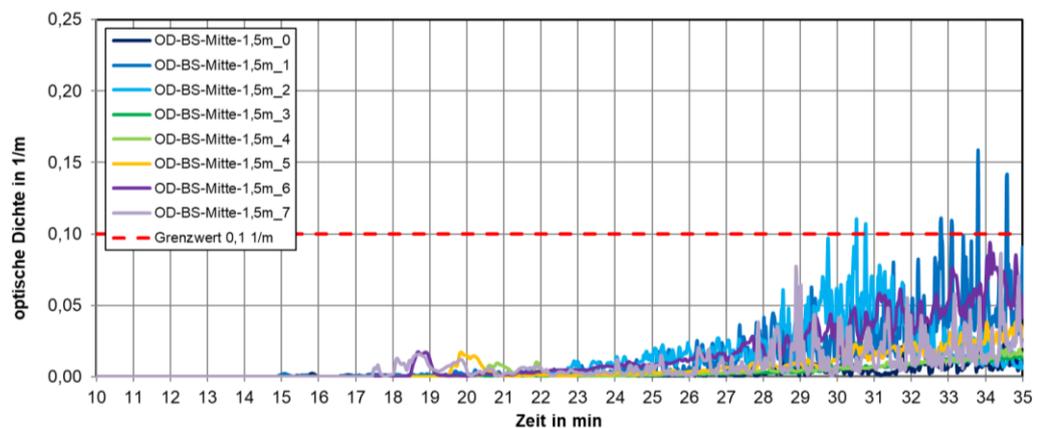


Abbildung 23: Messpunkte Bahnsteig Mitte im isothermen Fall

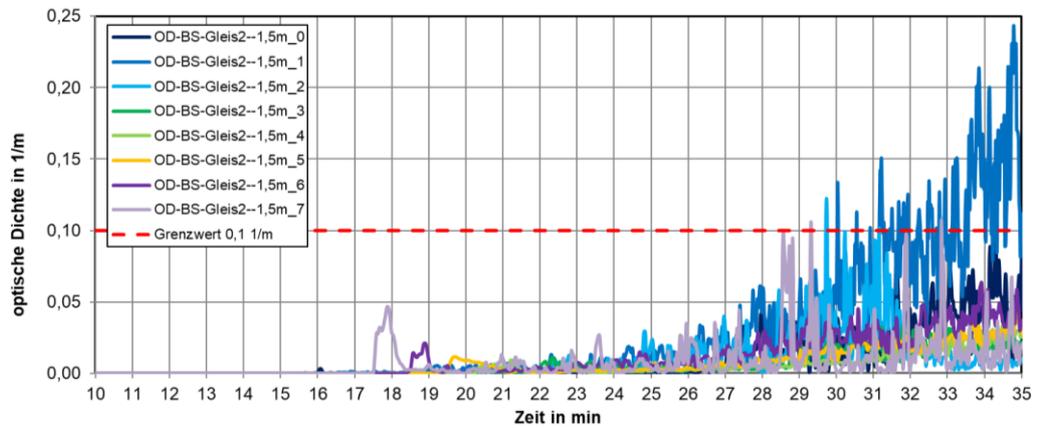


Abbildung 24: Messpunkte Bahnsteig Gleis 2 im isothermen Fall

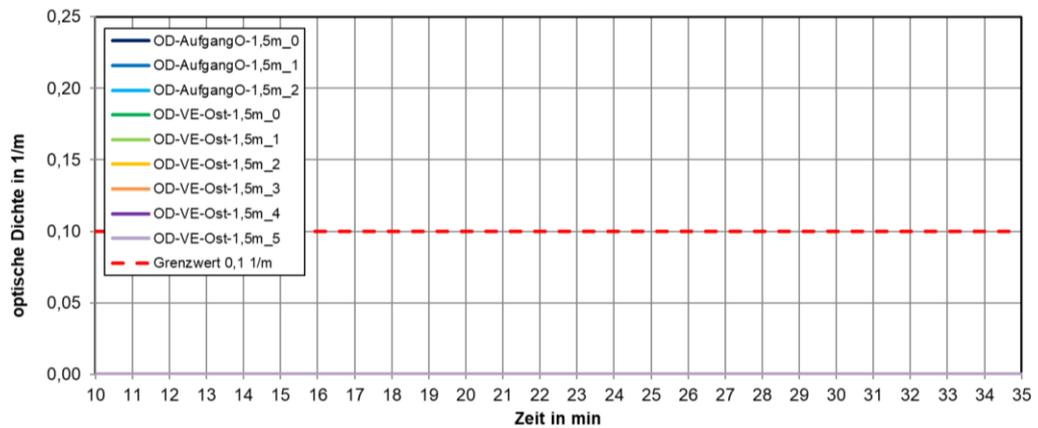


Abbildung 25: Messpunkte Verteilerebene Ost im isothermen Fall

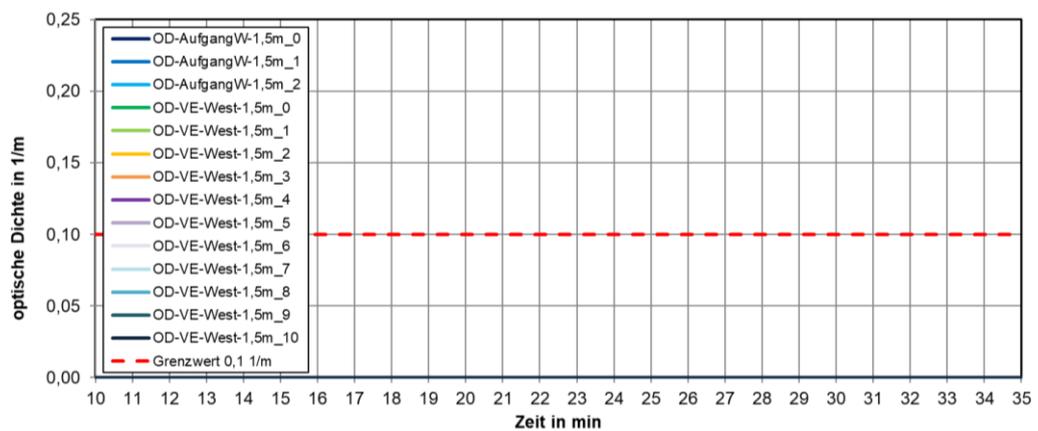
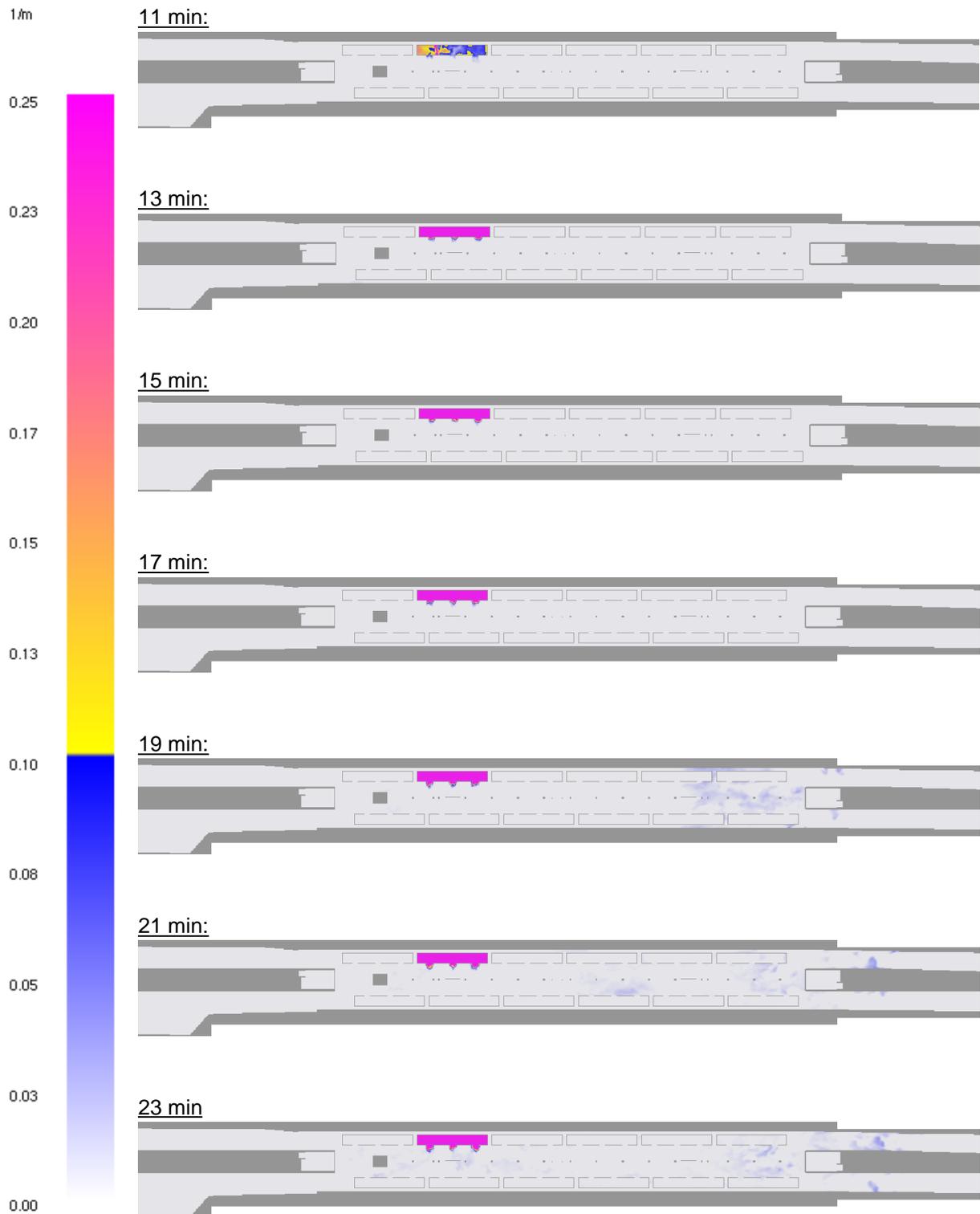
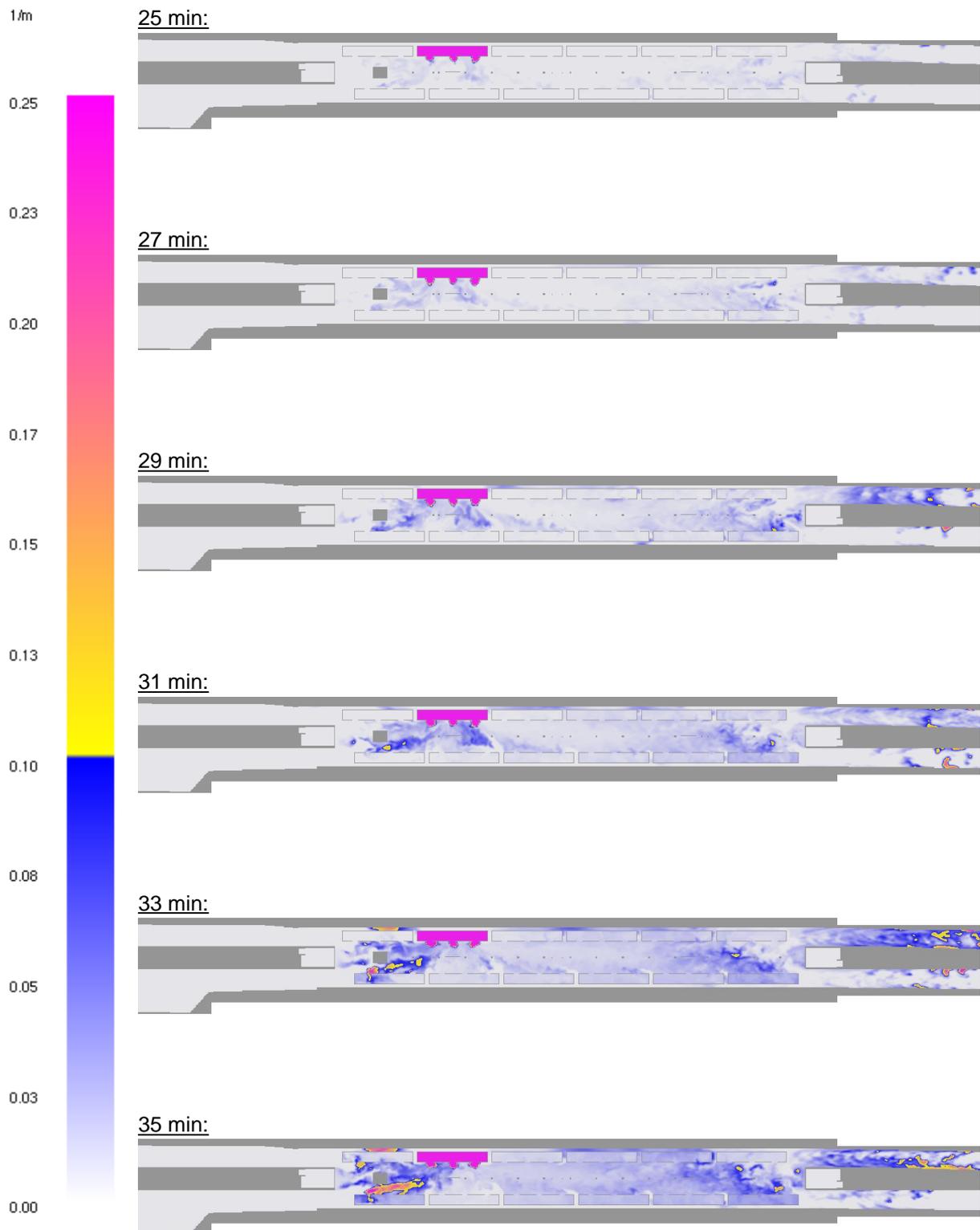


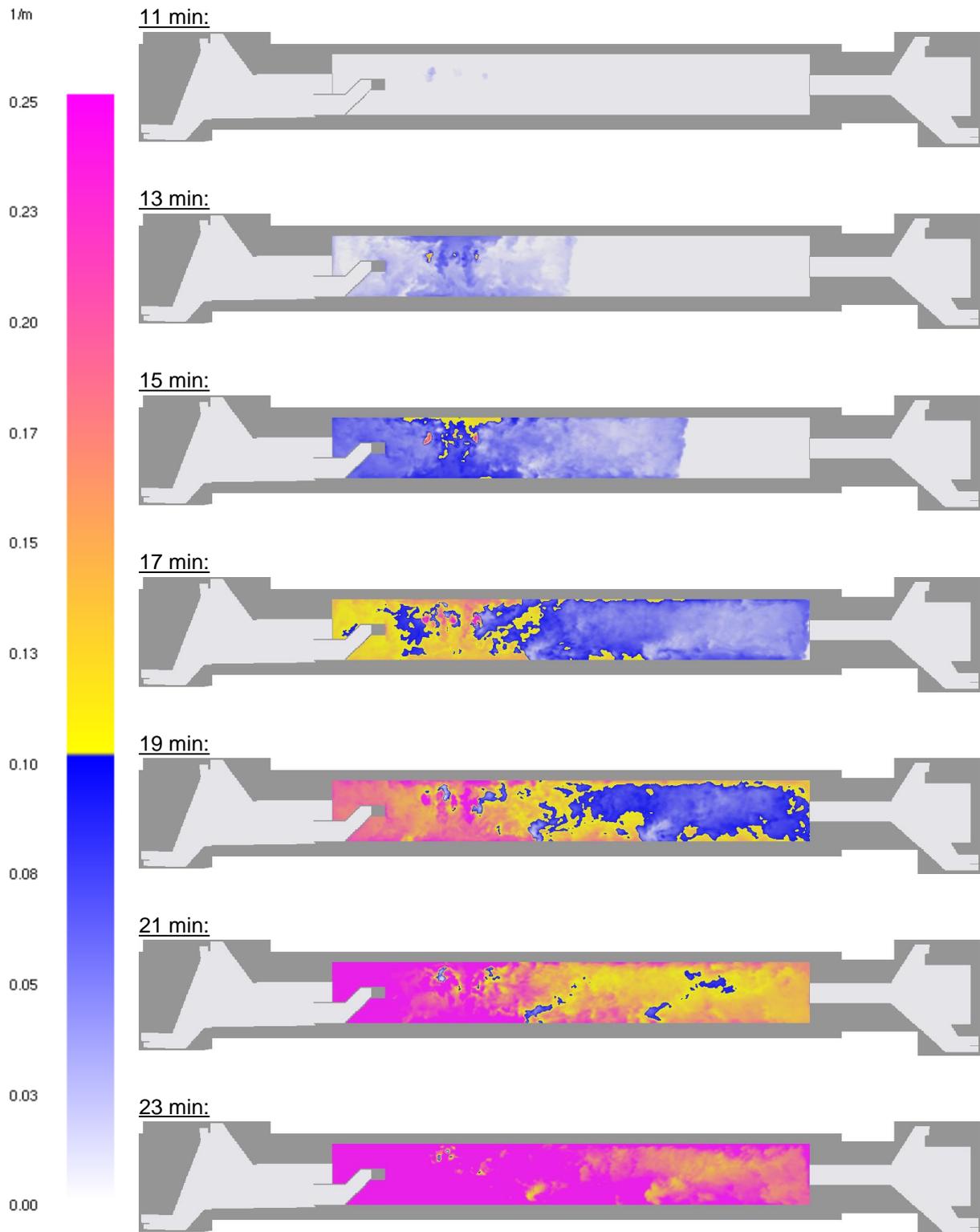
Abbildung 26: Messpunkte Verteilerebene West im isothermen Fall

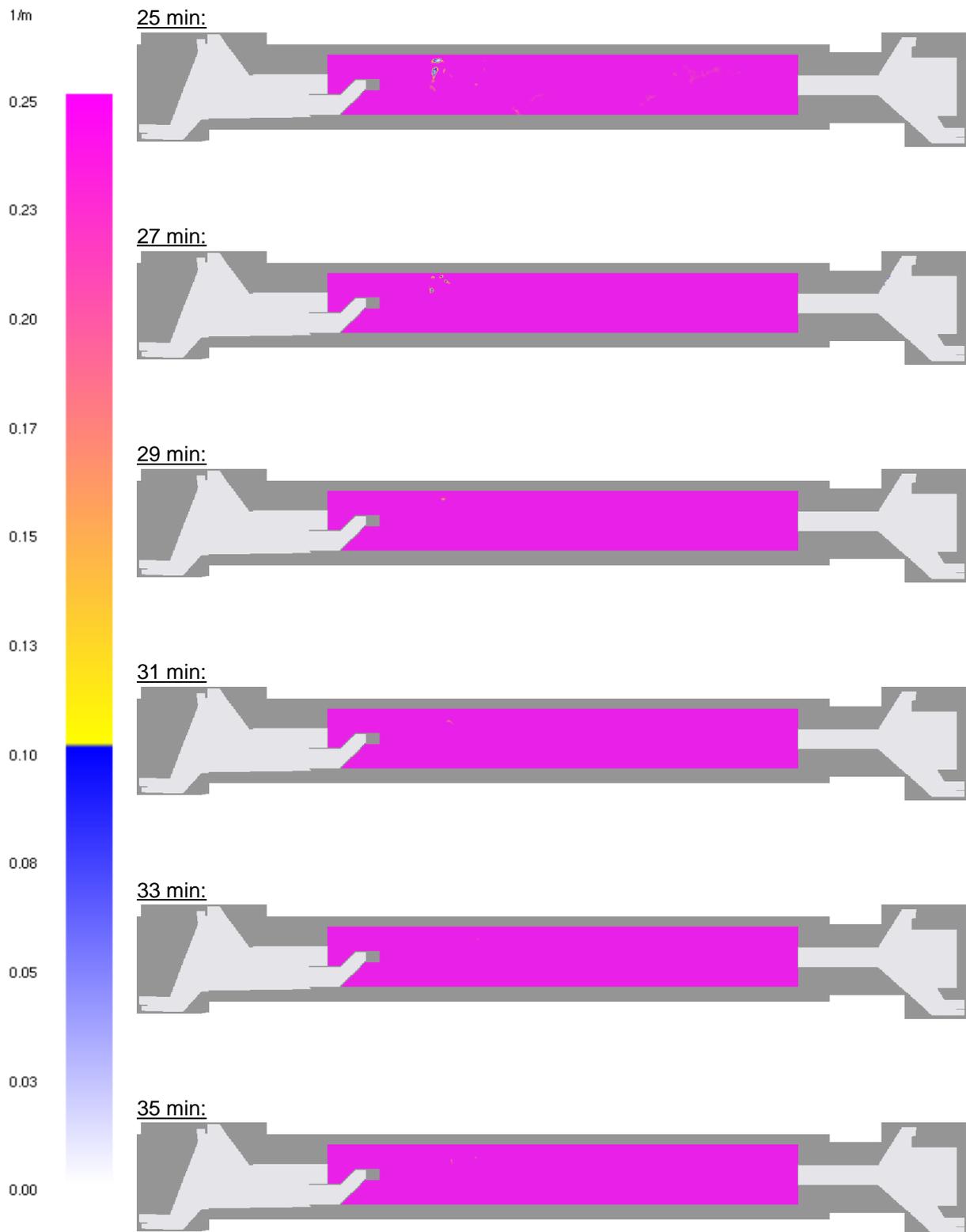
### 8.3.2 Optische Dichte auf einer Höhe von 1,5 m über dem Bahnsteig – Fremddrettung / isotherm



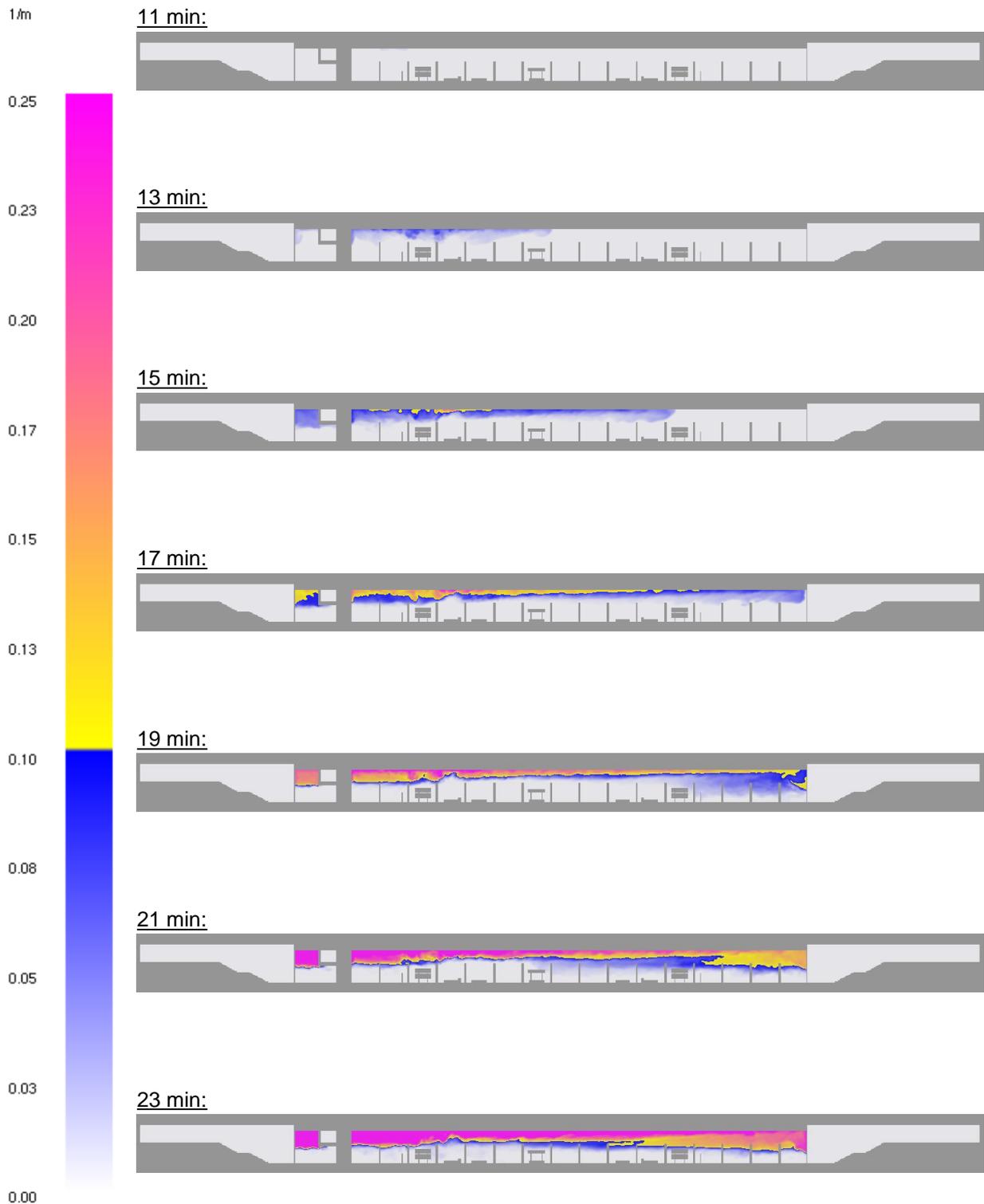


### 8.3.3 Optische Dichte auf einer Höhe von 1,5 m über OKF Verteilerebene – Fremddrettung / isotherm



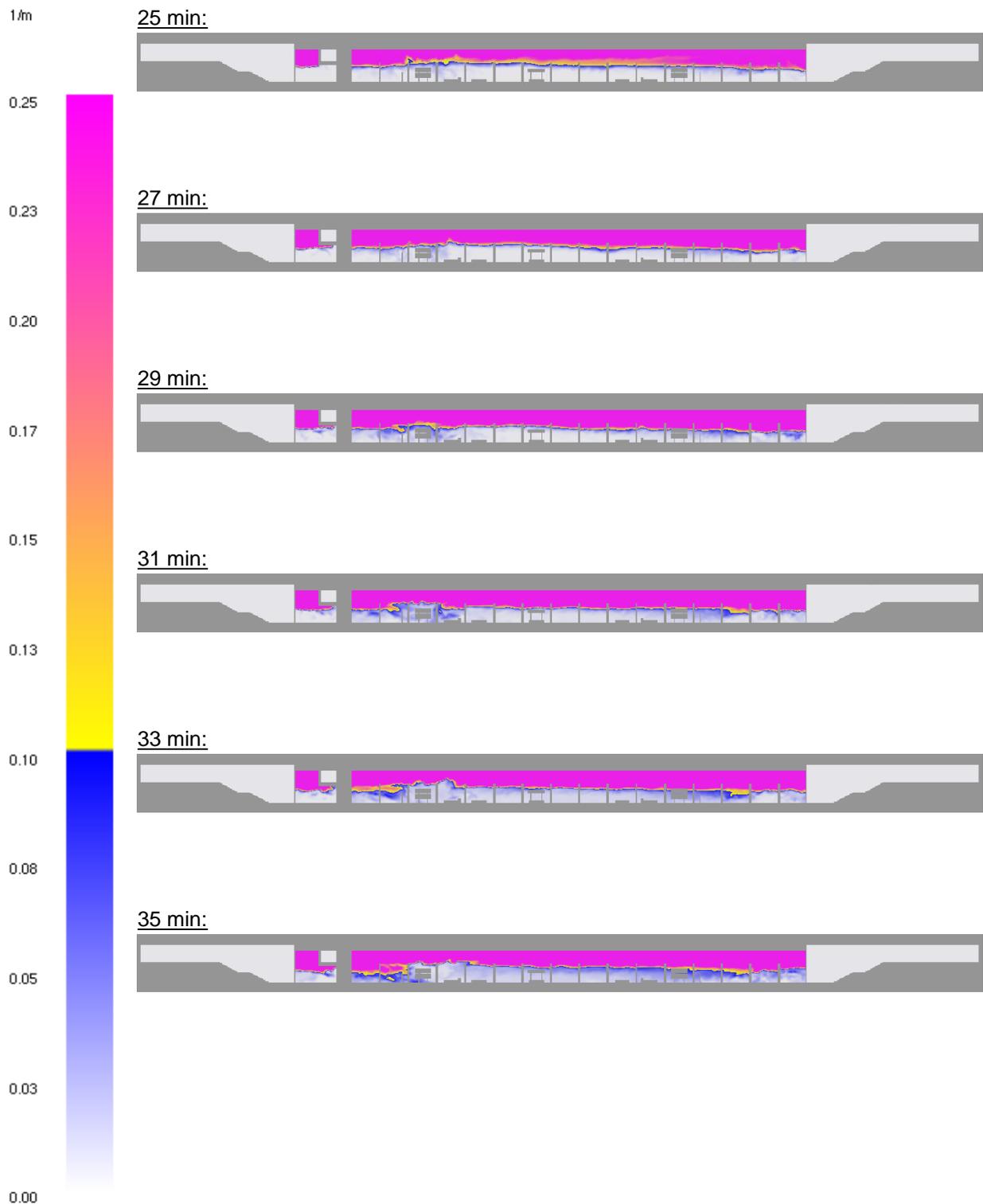


### 8.3.4 Optische Dichte im Längsschnitt in Bahnsteigmitte – Fremdrettung / isotherm



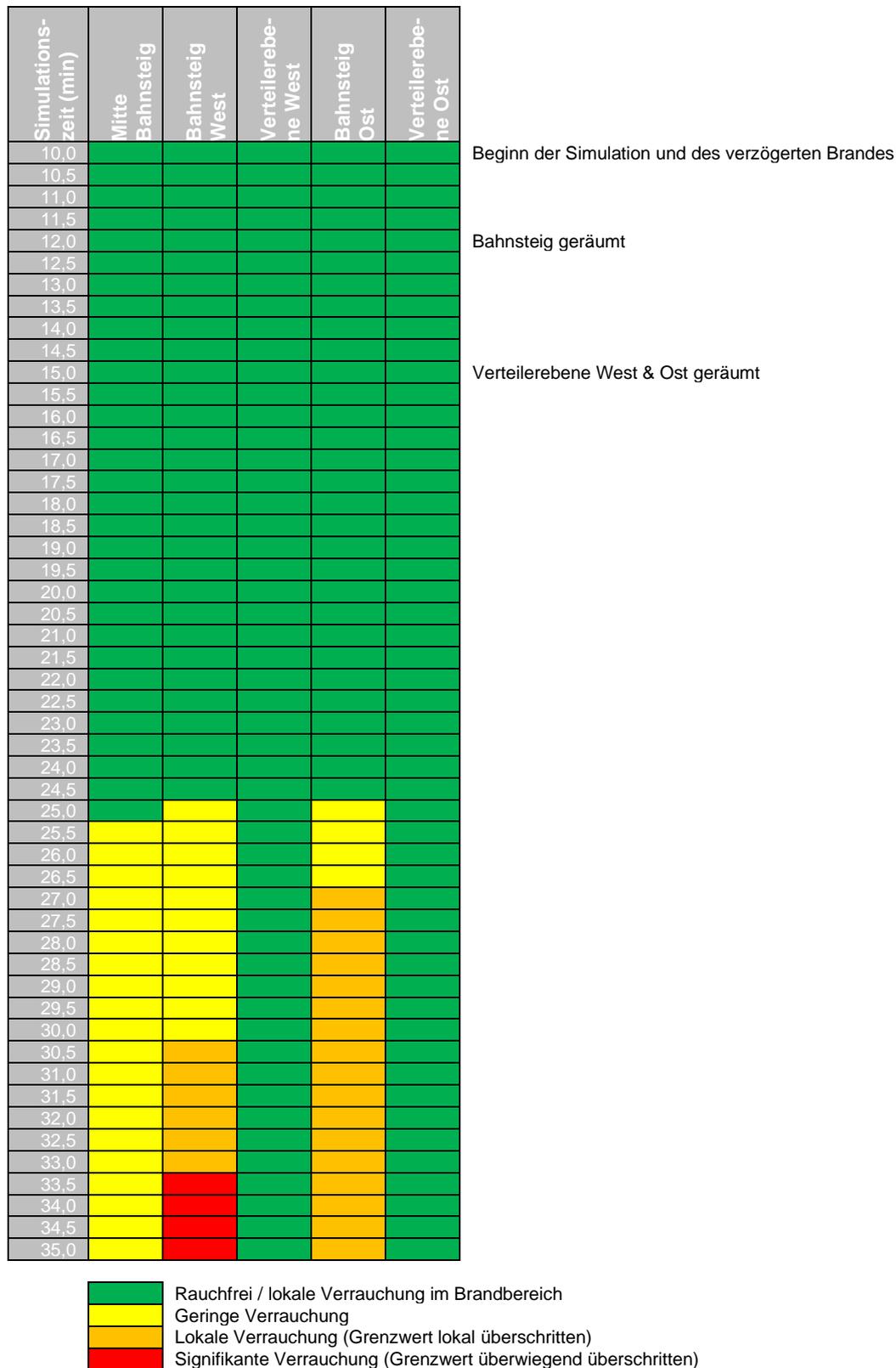
# Endreiß Ingenieurgesellschaft mbH

## Brandschutzsachverständige



Ergebnisse und Bewertung

### 8.3.5 Ampel-Matrix – Fremdrettung / isotherm



### 8.3.6 Bewertung der Fremdrettungsphase - isotherm

Der Grenzwert der optischen Dichte  $D_L = 0,1 \text{ m}^{-1}$  wird im Bereich des Bahnsteiges bis einschließlich 26 min nicht überschritten, anschließend verraucht der westliche und östliche Bahnsteig lokal. Der westliche Bereich verraucht erst nach 33 min signifikant. Die Verteilerebenen bleiben rauchfrei.

Aus Sicht der Unterzeichner werden die definierten Schutzziele erfüllt, da

- eine signifikante Verrauchung nur im Bereich des Brandes (westlicher Bahnsteig) stattfindet und
- der Zugang zum Bahnsteig über die Verteilerebenen rauchfrei bleibt.

Der Nachweis der ausreichenden Bemessung der Maßnahmen zur Fremdrettungsphase ist somit erbracht.

### 8.4 Ergebnisse der Fremdrettungsphase: Sommerfall

Die folgenden Abbildungen zeigen den zeitlichen Verlauf der optischen Dichte an ausgewählten Punkten auf der Bahnsteigebene sowie der Verteilerebene. Die Messpunkte befinden sich jeweils 1,5 m oberhalb OKFB.

#### 8.4.1 Optische Dichte: Messpunkte – Fremdrettung / Sommerfall

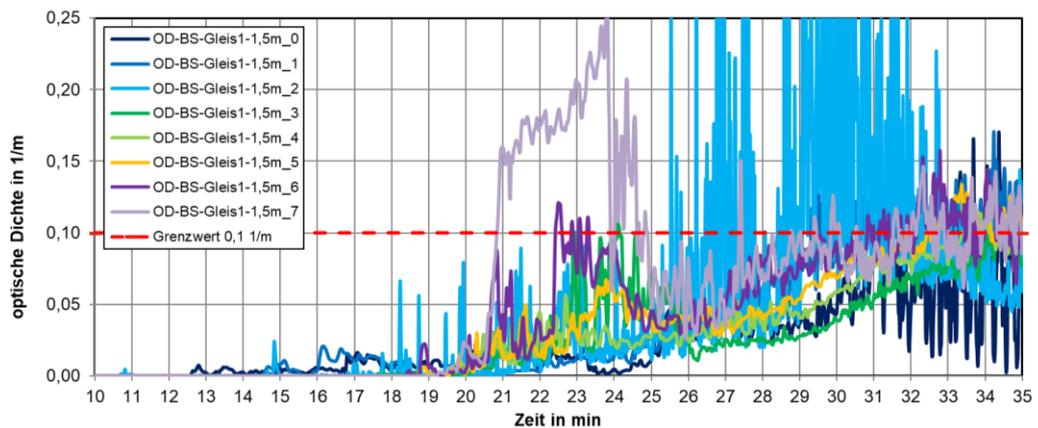


Abbildung 27: Messpunkte Bahnsteig Gleis 1 im Sommerfall

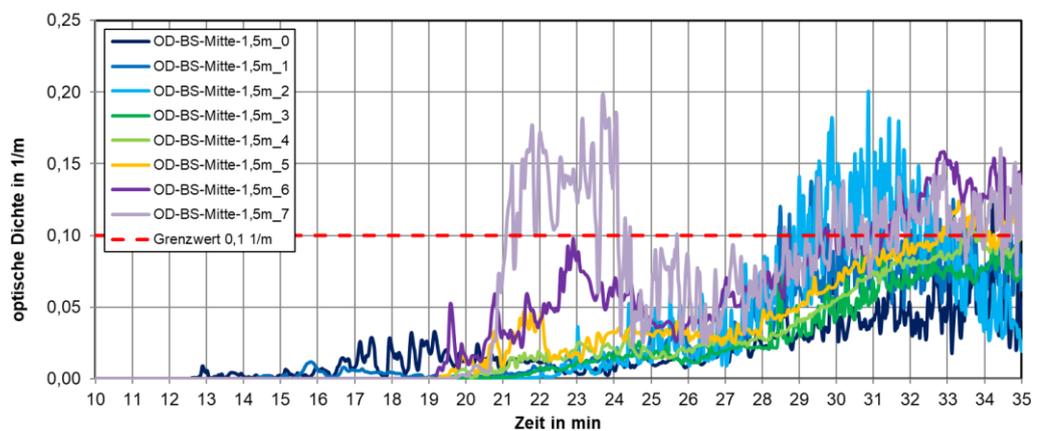


Abbildung 28: Messpunkte Bahnsteig Mitte im Sommerfall

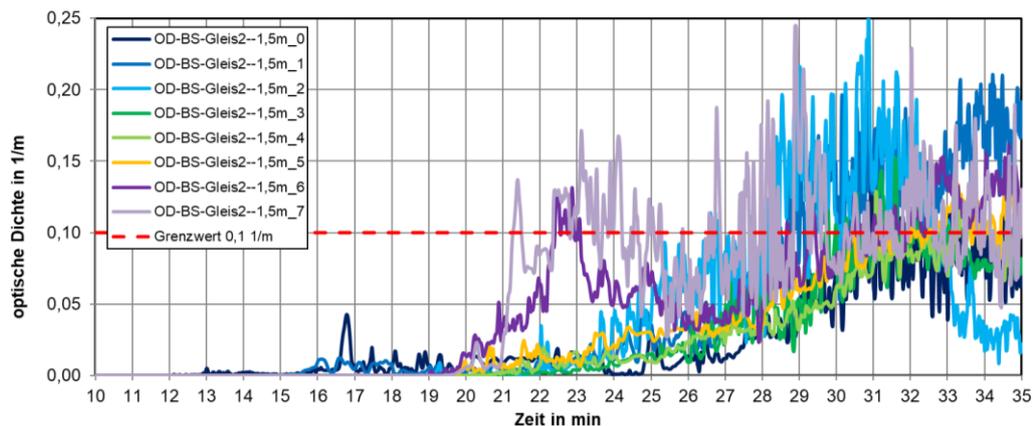


Abbildung 29: Messpunkte Bahnsteig Gleis 2 im Sommerfall

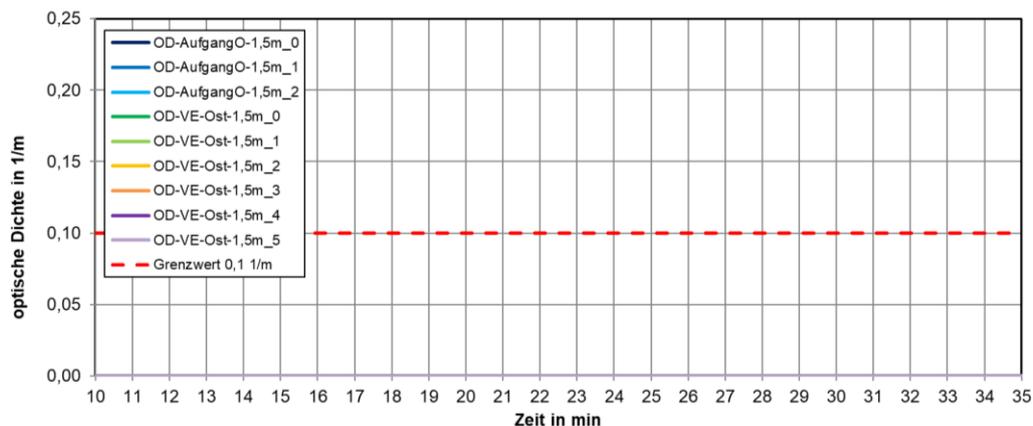


Abbildung 30: Messpunkte Verteilerebene Ost im Sommerfall

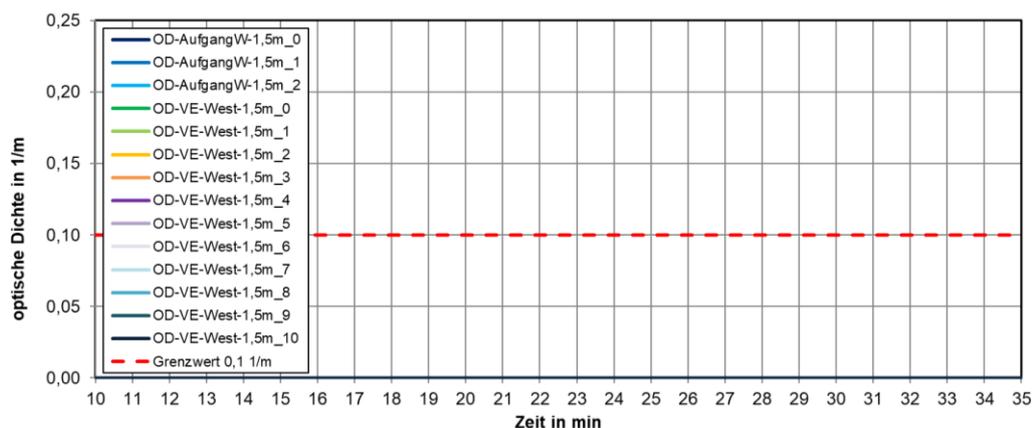
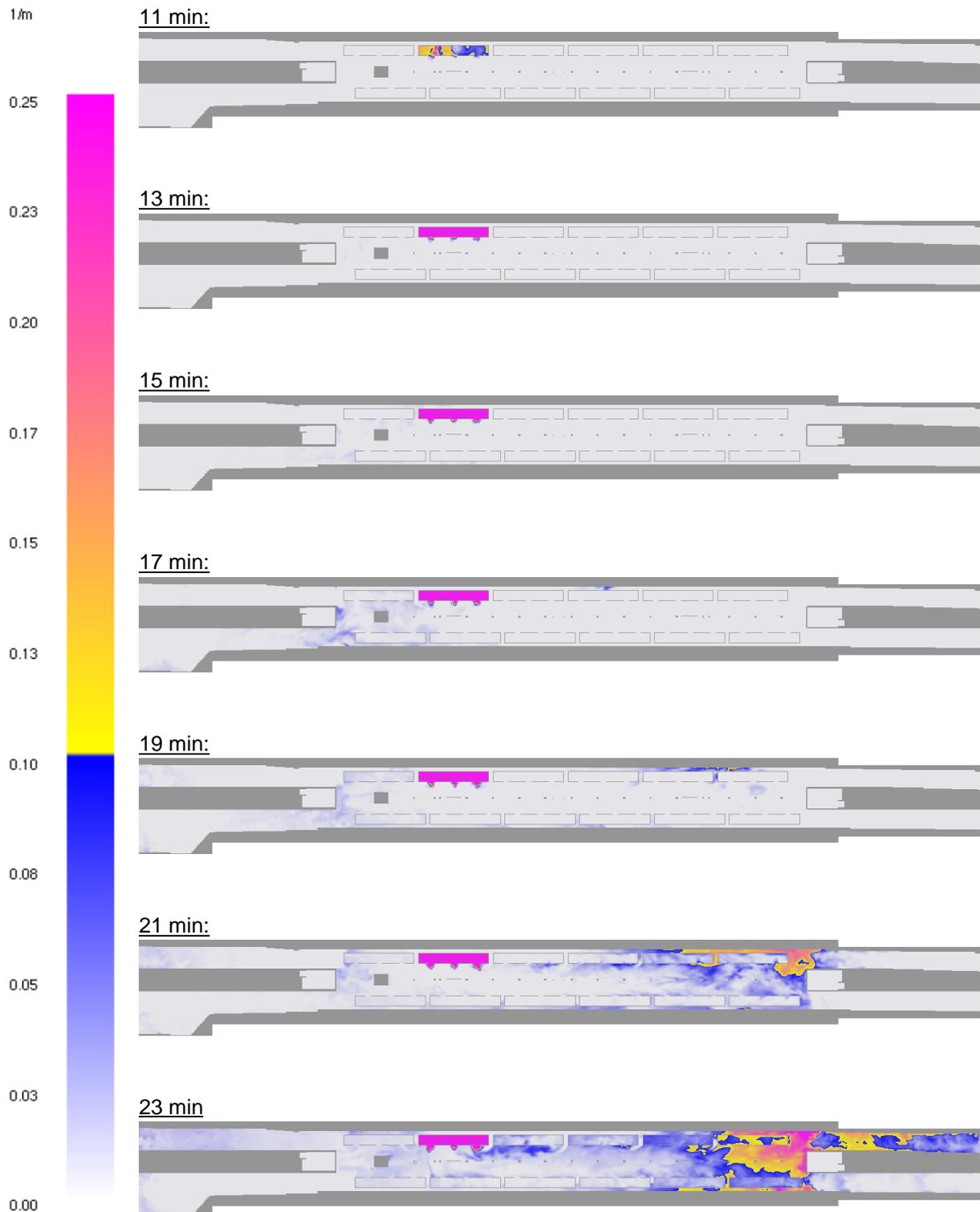
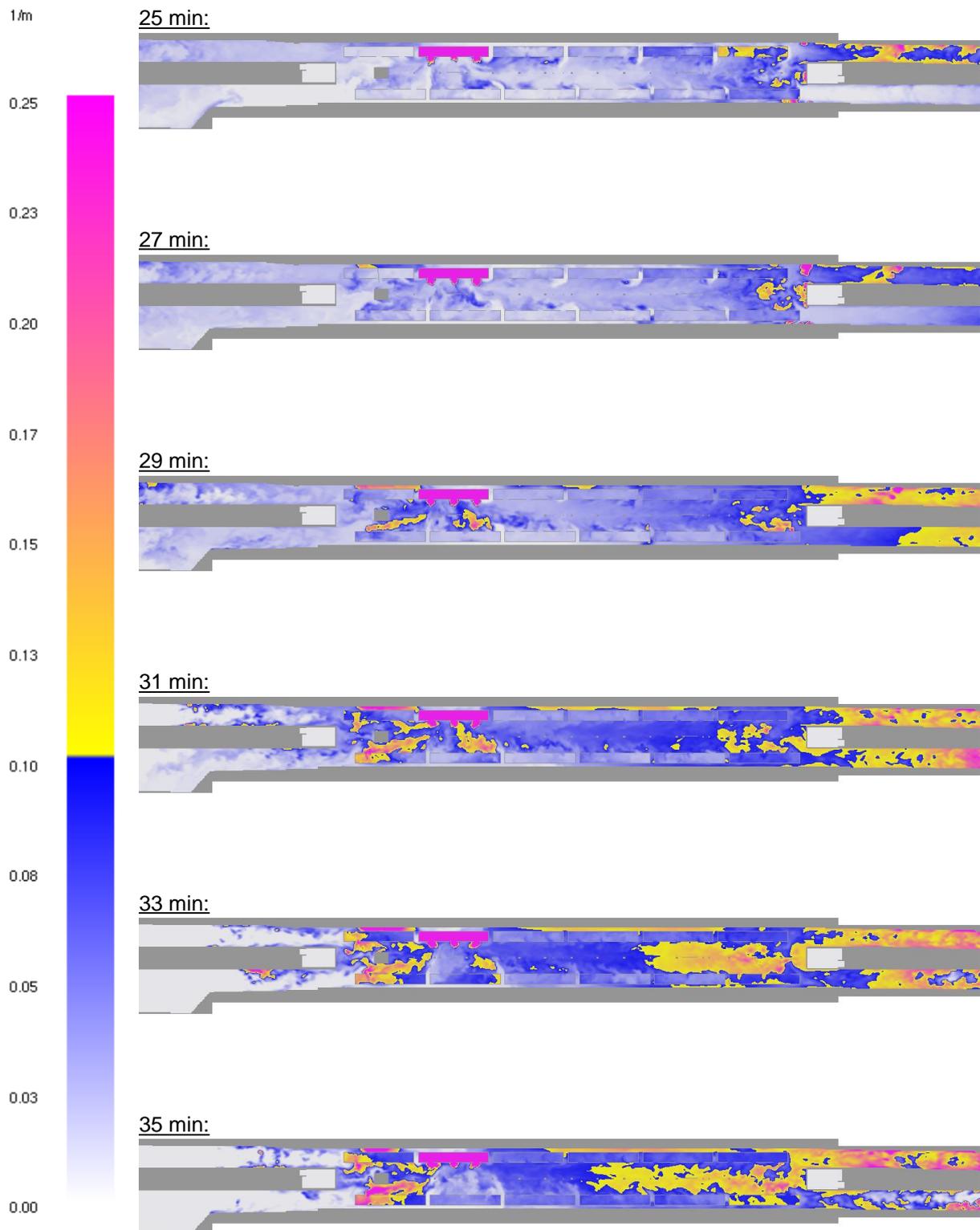


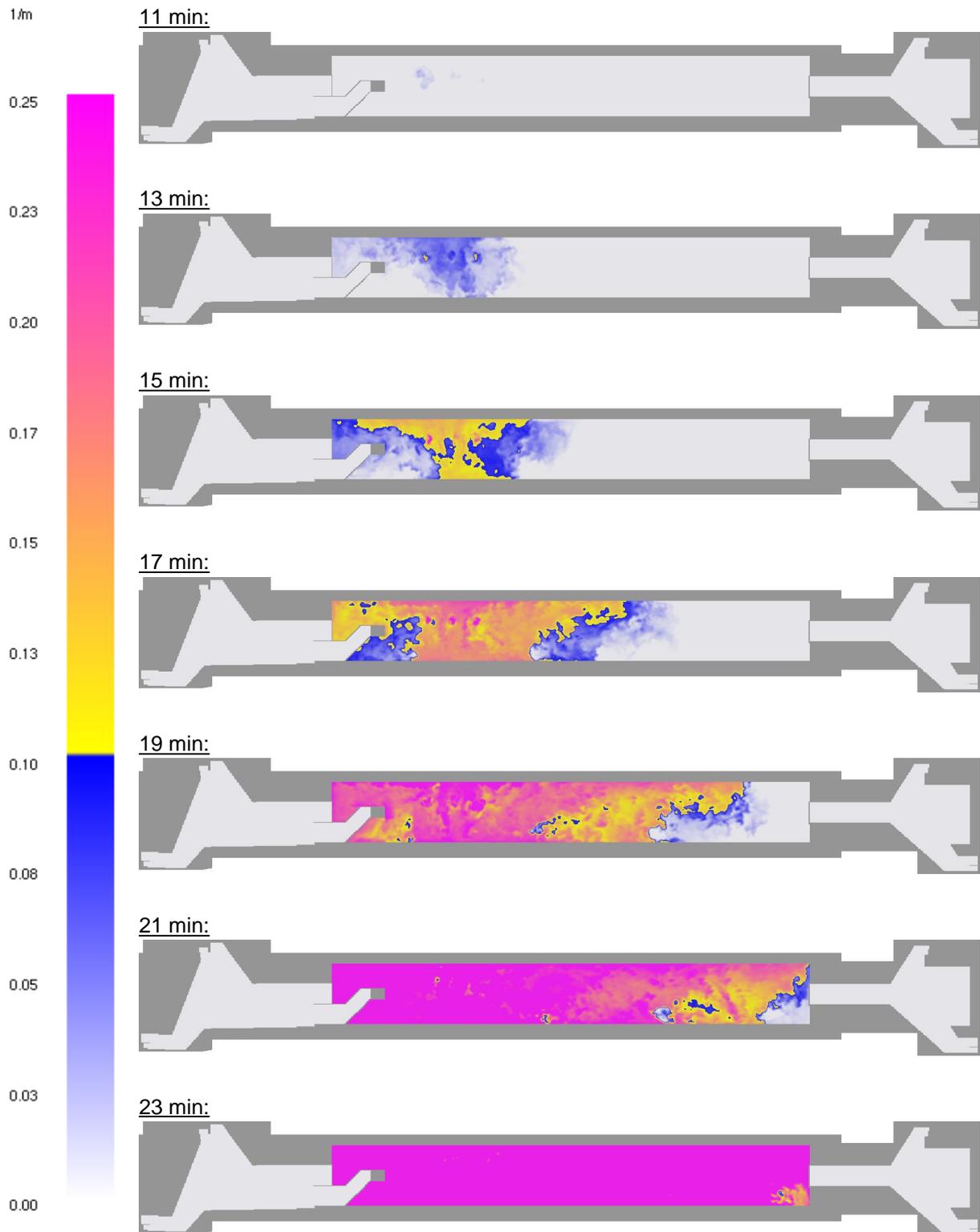
Abbildung 31: Messpunkte Verteilerebene West im Sommerfall

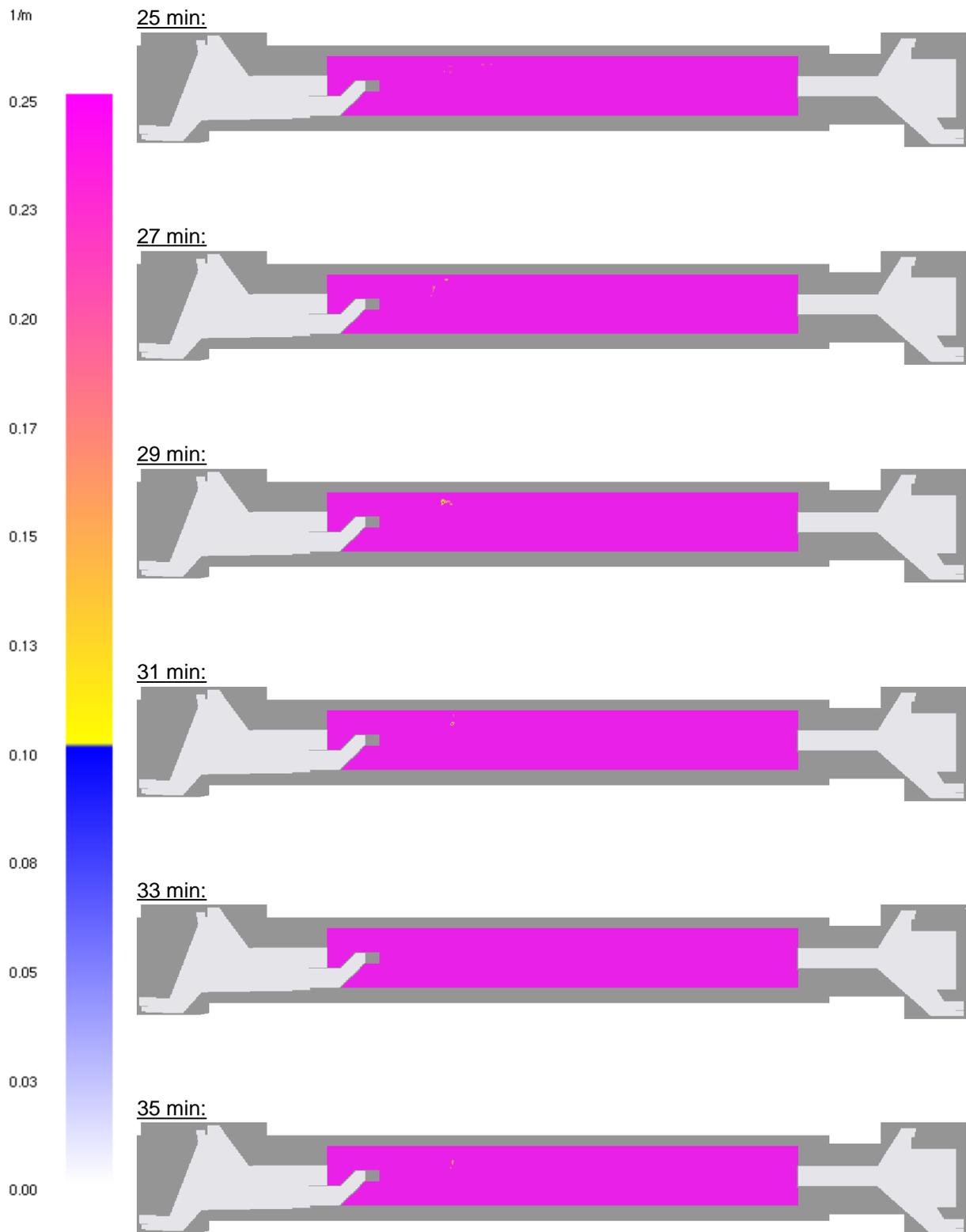
### 8.4.2 Optische Dichte auf einer Höhe von 1,5 m über dem Bahnsteig – Fremddrettung / Sommerfall





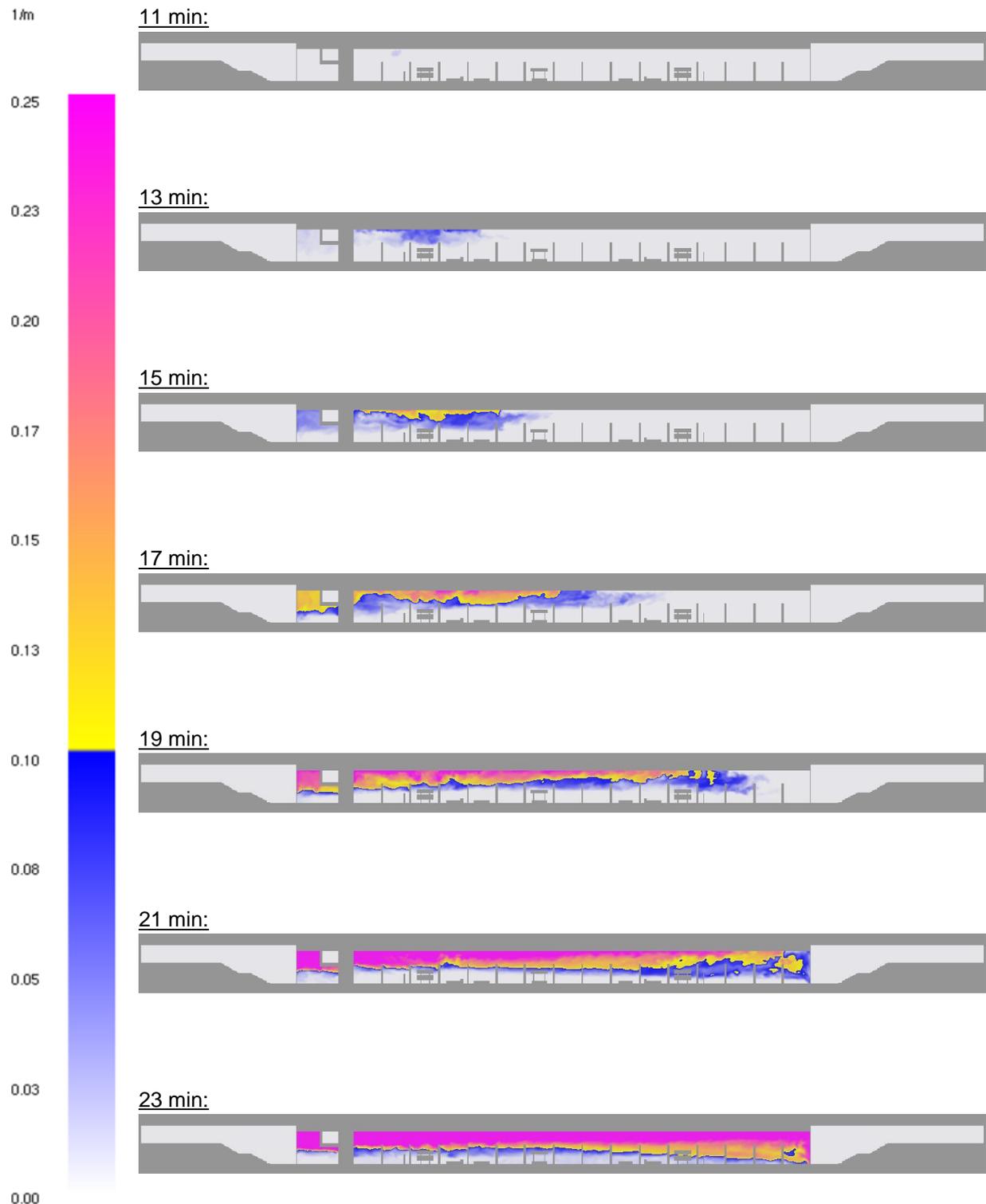
### 8.4.3 Optische Dichte auf einer Höhe von 1,5 m über OKF Verteilerebene – Fremdrehtung / Sommerfall





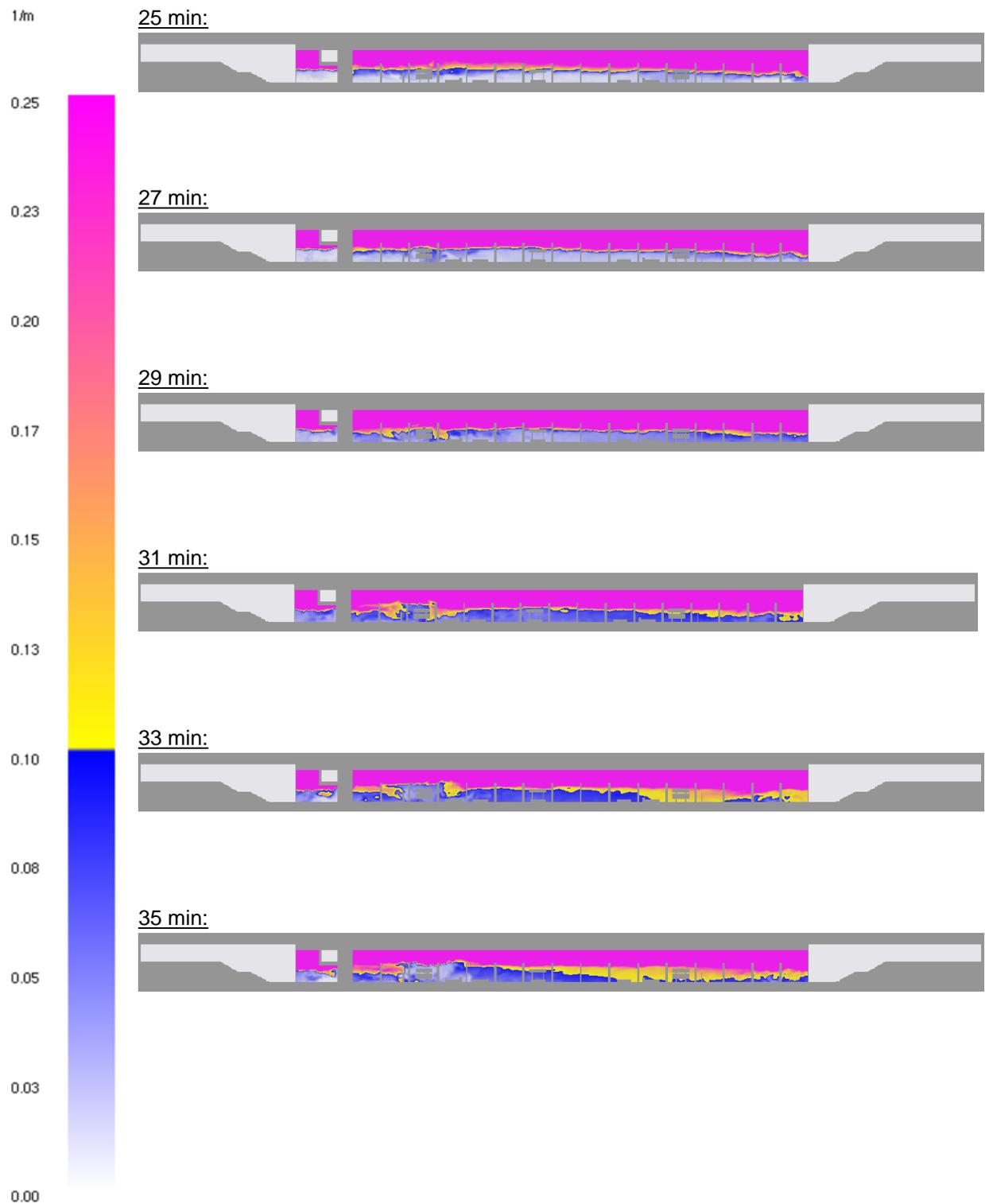
Ergebnisse und Bewertung

### 8.4.4 Optische Dichte im Längsschnitt in Bahnsteigmitte – Fremdrettung / Sommerfall



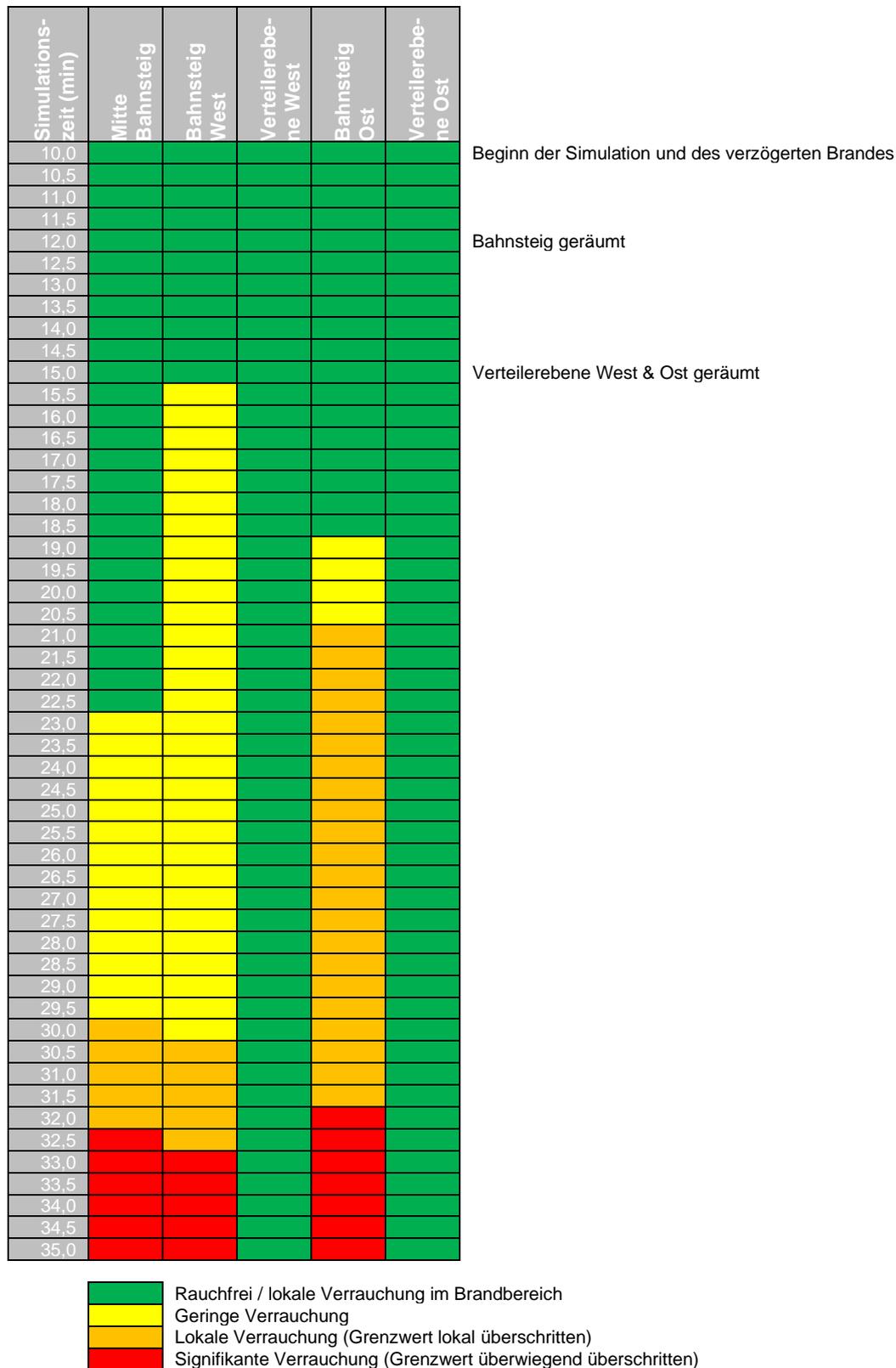
# Endreiß Ingenieurgesellschaft mbH

## Brandschutzsachverständige



Ergebnisse und Bewertung

### 8.4.5 Ampel-Matrix – Fremdrettung / Sommerfall



### 8.4.6 Bewertung der Fremdrettungsphase – Sommerfall

Der Grenzwert der optischen Dichte  $D_L = 0,1 \text{ m}^{-1}$  wird im Bereich des Bahnsteiges bis einschließlich 20 min nicht überschritten.<sup>30</sup> Anschließend verraucht der östliche Bahnsteig zunächst lokal, ab ca. 31 min signifikant<sup>31</sup>. Ab etwa 32 min verrauchen der mittlere sowie westliche Bahnsteig stärker. Die Verteilerebenen bleiben rauchfrei.

Aus Sicht der Unterzeichner werden die definierten Schutzziele erfüllt, da

- aufgrund der geplanten Treppeneinhausung der Betrachtungszeitraum auf 25 min verkürzt werden kann, in diesem Zeitraum kommt es nicht zu einer signifikanten Verrauchung,
- der Zugang zum Bahnsteig über die Verteilerebenen rauchfrei bleibt und
- der Bahnsteig über den westlichen Zugang für die Feuerwehr erreichbar bleibt.

Der Nachweis der ausreichenden Bemessung der Maßnahmen zur Fremdrettungsphase ist somit erbracht.

---

<sup>30</sup> Ausgenommen hiervon ist der Messpunkt Nr. 2 von Bahnsteig Gleis 1, welcher sich in der Nähe des Brandes befindet.

<sup>31</sup> Analog zum betrachteten Sommerfall für die Selbstrettungsphase, verraucht aufgrund der vorhandenen klimatischen Bedingungen zunächst der vom Brand entfernte Bereich des Bahnsteigs.

### 9 Zusammenfassung

Es wurden computerbasierte Simulationen mit FDS für die Rauchausbreitung im U-Bahnhof Willibaldstraße durchgeführt. Dabei wurde das Anwendungshandbuch „Brandsimulationen für U-Bahnhöfe der Gefährdungsstufe 4 der Stadtwerke München GmbH“ zu Grunde gelegt. Es wurden zwei Schutzziele betrachtet:

#### **Selbstrettungsphase**

Ziel der Feuer- und Rauchgassimulationen des Ersatzbrandes ist der Nachweis der Nutzbarkeit der Rettungswege für die Selbstrettung innerhalb des U-Bahnhofs. Zur Bewertung werden die Ergebnisse der numerischen Simulation der Rauchgasausbreitung den Ergebnissen der numerischen Räumungssimulation gegenübergestellt.

Anhand der Ergebnisse aus den Simulationsläufen der Selbstrettungsphase im Sommer- und Winterfall sowie deren Gegenüberstellung mit dem Räumungsnachweises wird der Nachweis der ausreichenden Bemessung der Maßnahmen für die Selbstrettungsphase erbracht.

#### **Fremdrettungsphase**

Ziel der Feuer- und Rauchgassimulationen des Fahrzeugbemessungsbrandes ist der Nachweis der Nutzbarkeit der Rettungswege für die Fremdrettung innerhalb des U-Bahnhofs.

Anhand der Ergebnisse aus den Simulationen der Fremdrettungsphase im isothermen Fall sowie im Sommerfall wird der Nachweis ausreichenden Bemessung der Maßnahmen für die Fremdrettungsphase erbracht.

### 10 Ausfertigung

Für diesen Bericht beanspruchen wir den gesetzlichen Urheberschutz. Vervielfältigungen sind nur ungekürzt und/oder mit unserer Zustimmung zulässig. Dieser Nachweis darf nur für Zwecke verwendet werden, die mit dem Brandschutz der o.g. Baumaßnahme des U-Bahnhofs Willibaldstraße zusammenhängen.

Bad Homburg v.d.Höhe, 23.11.2023  
Endreß Ingenieurgesellschaft mbH  
Brandschutzsachverständige

erstellt:



i.V. M.Eng. Ann-Katrin Kranz  
Standortleiterin München / Memmingen



i.V. Dr.-Ing. Anne Kawohl  
Leiterin Ingenieurmethoden  
Fachplanerin für vorb. Brandschutz (IngKH)