

TRAM Westtangente Projektteil UVR München

23. August 2022

Projekt-Nr. 2019009

Bericht-Nr. 2019009-SCBE-042

Auftrag der

SWM – Stadtwerke München GmbH

Emmy-Noether-Straße 2

80992 München

an die

STUVAtec

Studiengesellschaft für

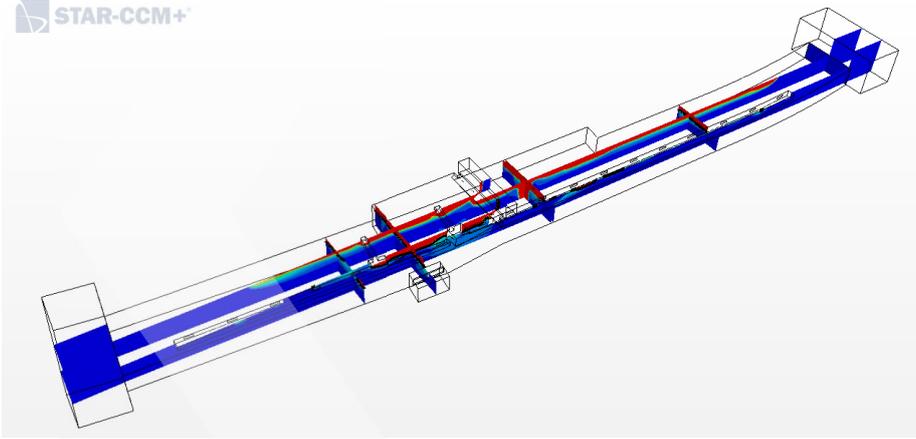
Tunnel und Verkehrsanlagen mbH

Mathias-Brüggen-Straße 41

50827 Köln

Entrauchungsgutachten





Vorgang: 1850-006-G-0091-rog.doc Ki - MI - MI

Stand: 01.02.2022 Rev. A.0

Brandsimulationsbericht

Projekt: Umweltverbundröhre, München-Laim

Auftrag: Landeshauptstadt München
Baureferat HA Tiefbau
Friedenstraße 40
81671 München

Thema: Untersuchung zur maschinellen Rauchableitung aus dem Tunnelluftraum

Inhalt: Dokumentation der Randbedingungen und Ergebnisse der durchgeführten CFD-Brandsimulationsberechnungen

Kersken + Kirchner GmbH

Beratende Ingenieure VBI,
Sachverständige für
baulichen Brandschutz

Pienzenauerstraße 7
D-81679 München

T +49 89.98 10 789-0
F +49 89.98 10 789-90
E office@kk-fire.com

Geschäftsführung
Dipl.-Ing. Thilo A. Hoffmann, M.Eng.
Dipl.-Ing. (FH) Florian Mödl, M.Eng.
Dipl.-Ing. (FH) Udo Kirchner

Sitz der Gesellschaft München
Registergericht AG München
HRB 104031
Ust-IdNr. DE 811578970

HypoVereinsbank München
IBAN DE57700202700659535289
BIC HYVEDEMMXXX

www.kk-fire.com

Inhalt

1	Aufgabenstellung und Abgrenzung	3
1.1	Anlass und Auftrag	3
1.2	Grundsätze und Grundlagen	4
1.3	Abstimmungsergebnisse mit den Projektbeteiligten und Behörden	5
1.4	Revisionen	6
2	Identifizierung und Konkretisierung von Schutzzielen	7
2.1	Schutzziele und funktionale Anforderungen.....	7
2.2	Leistungskriterien	8
3	Qualitative Entwurfsanalyse	11
4	Gefahren- und Risikoanalyse	13
5	Festlegung der relevanten Brandszenarien	14
5.1	Brandszenario „Bus“	14
5.2	Brandszenario „Tram“	18
6	Durchführung der Brandsimulationsberechnungen.....	21
6.1	Methodik und Wahl des Berechnungsverfahrens.....	21
6.2	Geometrische Modellbildung	22
6.3	Äußere Randbedingungen	26
6.4	Untersuchte Berechnungsfälle	28
7	Sicherheitskonzept.....	30
8	Ergebnisse der Brandsimulationsberechnungen.....	31
8.1	Berechnungsergebnisse für Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“	31

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 2

8.2	Berechnungsergebnisse für Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“	54
8.3	Berechnungsergebnisse für Trambrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“	78
9	Zusammenfassung	98

1 Aufgabenstellung und Abgrenzung

1.1 Anlass und Auftrag

Im Zuge des Planungs- und Genehmigungsverfahrens für die Realisierung des Verkehrsprojekts Umweltverbundröhre (UVR) als Unterführung für den Personennahverkehr der Gleisanlagen an der S-Bahn-Haltestelle „Laim“ im Stadtgebiet München ist in der Frage der ausreichenden Rauchableitung im Brandfall ein entsprechender Nachweis auf Basis von Brandsimulationsberechnungen erforderlich.

Mit der Durchführung dieser Brandsimulationsberechnungen unter Anwendung von computergestützter CFD-Strömungssimulation wurde das Unterzeichnerbüro durch das Baureferat der Stadt München entsprechend beauftragt.

Im Planungszeitraum 2019/20 wurde zunächst eine geplante natürliche Rauchableitung im Rahmen der Brandsimulationsuntersuchung betrachtet. Die Ergebnisse dieser Brandsimulationsberechnungen sowie die zugehörigen wesentlichen Anfangs- und Randbedingungen der seinerzeit durchgeführten Brandsimulationsberechnungen wurden erstmals im Brandsimulationsbericht (1850-006-G-0028_Ml.doc) mit Datum vom 07.10.2019 dokumentiert.

Im fortgeschriebenen Brandsimulationsbericht (1850-006-G-0055_Ml.doc) mit Revisionsnummer A.1 und Datum vom 07.04.2020 wurde ein erweiterter Betrachtungsumfang, hinsichtlich variiertes Lage der Brandquelle bei Brandszenario „Bus“, zusätzlich dargestellt.

Da die vorgelegten Ergebnisse der Brandsimulationsuntersuchung auf Basis der natürlichen Rauchableitungsmaßnahmen keine abschließende Akzeptanz hinsichtlich einer ausreichenden Zielerreichung bei den Genehmigungsstellen fanden, wurde eine veränderte Planung auf Basis von Maßnahmen einer maschinellen Entrauchung vorgelegt. Diese Planung wurde in entsprechenden Brandsimulationsberechnungen zugrunde gelegt und berücksichtigt.

Im vorliegenden Brandsimulationsbericht werden die wesentlichen Anfangs- und Randbedingungen sowie die Ergebnisse des letzten Standes der durchgeführten Brandsimulationsberechnungen mit maschineller Rauchableitung dargestellt.

1.2 Grundsätze und Grundlagen

Die Bearbeitung der Frage einer ausreichenden Rauchableitung aus der Umweltverbundröhre im Brandfall erfordert eine schutzzielorientierte Nachweisführung. Entsprechend werden für den konkret zu betrachtenden Einzelfall sowohl die möglichen Brandgefahren als auch die entsprechend der erarbeiteten Brandschutzkonzeption vorgesehenen Schutzmaßnahmen sowie die Nutzungsumstände in den jeweiligen Brandszenarien berücksichtigt.

Die Ergebnisse des vorliegenden Brandsimulationsberichts werden dann bezüglich der Einhaltung der aus den Schutzzieleforderungen abgeleiteten Leistungskriterien für die im konkreten Fall erforderliche Räumungszeit, welche aus den weiterführenden Betrachtungen der STUVAtec hervorgeht, abgeglichen und bewertet. Dieser Abgleich und die sich hieraus ergebende brandschutztechnische Bewertung ist nicht Gegenstand des vorliegenden Brandsimulationsberichts.

Bezüglich der Ableitung von funktionalen Anforderungen und konkreten Leistungskriterien für die Nachweisführung hinsichtlich einer ausreichenden Rauchableitung werden zunächst die entsprechenden Auswertekenngrößen der Technischen Regeln für Straßenbahnen - Brandschutz in unterirdischen Betriebsanlagen (TRStrab Brandschutz) mit Stand Juni 2014 zugrunde gelegt.

Die Grundlage für die Erarbeitung der Brandsimulationsuntersuchung bilden folgende Unterlagen:

- Planunterlagen „2. S-Bahn Stammstrecke München - VE 10 Hauptbaumaßnahmen West oberirdisch EÜ Wotanstraße Umweltverbundröhre (UVR) mit Nord- und Südportal, Bau-km 101,3+47“, Grundriss sowie Schnitte, Draufsichten, erstellt durch Lahmeyer Ingenieurgesellschaft mbH, München, jeweils mit Planstand Mai 2018;
- Lüftungsschema zu den geplanten Absaugkanälen „Verteilung der Absaugung entlang der UVR“, erstellt durch Kündig Planungsbüro, Dübendorf (CH) mit Datum vom 21.05.2021.

Außerdem wurden folgende Richtlinienpapiere und Quellen aus internationaler Fachliteratur, insbesondere zur Definition des hier betrachteten Brandszenarios für den Bus-Brand, herangezogen:

- BLFA BOStrab: Technische Regeln für Straßenbahnen - Brandschutz in unterirdischen Betriebsanlagen (TRStrab Brandschutz) mit Stand vom 24.06.2014;

- Hammarström, Rolf; Axelsson, Jesper; Försth, Michael; Johansson, Patrik; Sundström, Björn (2008): Bus Fire Safety, SP Technical Research Institute of Sweden, Boras (SP Report, 2008:41);
- Hansen, Rickard: Methodologies for calculating the overall heat release rate of a vehicle in an underground structure, Mälardalen University, Västerås, veröffentlicht in: "Proceedings from the fifth international symposium on tunnel safety and security", New York, USA, March 14-16, 2012;
- Ingason, Haukur; Gustavsson, Sören; Dahlberg, Martin (1994): Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires, BRANDFORSK project 723-924, SP Technical Research Institute of Sweden, Boras (SP Report, 1994:08);
- Ingason, Haukur; Li, Ying Zhen; Lönnemark, Anders (2014): Tunnel Fire Dynamics, 2015. Aufl., Springer Verlag.

1.3 Abstimmungsergebnisse mit den Projektbeteiligten und Behörden

Im Rahmen der Erarbeitung der Brandsimulationsuntersuchung zur zunächst geplanten, natürlichen Rauchableitung aus der Umweltverbundröhre fanden am 20.12.2018 sowie am 08.03.2019 Besprechungs- und Abstimmungstermine unter Beteiligung jeweils eines Vertreters des Baureferats der Stadt München als Auftraggeber, der Münchner Verkehrsgesellschaft, des Vorbeugenden Brandschutzes der Branddirektion München sowie Vertretern des Unterzeichnerbüros statt. Hierbei wurden die im Rahmen der zunächst durchzuführenden Brandsimulationsuntersuchung mit natürlicher Rauchableitung relevanten Randbedingungen, einschließlich der nachweisrelevanten Brandszenarien, und die für die Schutzzielerreichung hinsichtlich der Selbstrettung von Personen nachzuweisenden Leistungskriterien abgestimmt. Diese abgestimmten Randbedingungen und Leistungskriterien wurden den zunächst durchgeführten Brandsimulationsberechnungen, dokumentiert in den Brandsimulationsberichten vom 07.10.2019 sowie vom 07.04.2020, zugrunde gelegt.

Für den nun verfolgten Planungsansatz einer maschinellen Rauchableitung für die UVR, zur Verbesserung der Entrauchung insbesondere in der Phase der Selbstrettung, wurden erneut die Randbedingungen und Ergebnisse der hierzu durchgeführten Brandsimulationsberechnungen Vertretern des Baureferats der Stadt München als Auftraggeber sowie der Münchner Verkehrsgesellschaft sowie dem Brandschutzkonzeptersteller der STUVAtec GmbH in mehreren Online-Besprechungen im Jahr 2021 vorgestellt.

Die Randbedingungen und Ergebnisse der abschließenden Berechnungsvarianten dieser Brandsimulationsuntersuchung mit maschineller Entrauchung wurden dem zuständigen Ver-

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 6

treter des Vorbeugenden Brandschutzes der Branddirektion München, ebenfalls im Rahmen von Online-Besprechungen, am 08.09.2021, am 30.11.2021 sowie am 09.12.2021, vorgestellt und die Inhalte besprochen. Bei den Besprechungsterminen am 30.11.2021 sowie am 09.12.2021 nahm ebenfalls ein Vertreter der Technische Aufsichtsbehörde (TAB) teil. Die im Rahmen dieser Online-Besprechungen vorgestellten und besprochenen Berechnungsfälle, letztmalig ausführlich dokumentiert in der Ergebnispräsentation mit Datum vom 31.08.2021, erstellt durch das Unterzeichnerbüro, stimmen somit mit den nachfolgend dargestellten Fällen überein und werden an dieser Stelle lediglich ausführlicher und mit entsprechender textlicher Würdigung dargestellt.

In der im Zuge der fortgeführten Planung erfolgten Abstimmung mit der Branddirektion und der mittlerweile im Planungsprozess beteiligten TÜV SÜD Rail GmbH am 09.12.2021 wurde die bislang eingesetzte Brandleistungskurve für das Brandszenario „Bus“ als weiterhin für die Brandsimulationsuntersuchung geeignet und entsprechend anwendbar bewertet. Auf die hierfür erforderliche Voraussetzung des Einsatzes von Linienbussen, welche den Anforderungen der ECE-R 118 hinsichtlich der eingesetzten Materialien entsprechen, wird entsprechend hingewiesen. Entsprechend ist das in den nachfolgend dargestellten Brandsimulationsberechnungen berücksichtigte Bus-Brandszenario hinsichtlich des ausbreitungsspezifischen und energetischen Verlaufs sowie der berücksichtigten Rußausbeute identisch mit dem Brandszenario „Bus“ in den bereits vorgelegten, beiden Brandsimulationsberichten mit natürlicher Rauchableitung mit Datum vom 07.10.2019 sowie 07.04.2020.

1.4 Revisionen

Der Brandsimulationsbericht ist in folgenden Revisionen erstellt bzw. fortgeschrieben:

Index	Datum	Inhalt
A.0	01.02.2022	Basisbearbeitung - Brandsimulationsbericht zur maschinellen Entrauchung der UVR

2 Identifizierung und Konkretisierung von Schutzzielen

2.1 Schutzziele und funktionale Anforderungen

Die in einem konkreten Fall zu betrachtenden funktionalen Anforderungen ergeben sich aus der Identifizierung und Konkretisierung von Schutzzielen. Diese Schutzziele werden über das öffentlich-rechtliche Schutzinteresse definiert und in der Regel in den jeweiligen Bewertungsgrundlagen genannt.

Funktionale Anforderungen beschreiben die erforderliche Leistungsfähigkeit eines zu bewertenden Teils einer baulichen Anlage oder einer geforderten Maßnahme in sicherheitsrelevanten Zeiträumen.

Für den konkreten Betrachtungsfall der Umweltverbundröhre (UVR) ergeben sich nachfolgend genannte, primäre Schutzzielanforderungen aus den Technischen Regeln für Straßenbahnen - Brandschutz in unterirdischen Betriebsanlagen (TRStrab Brandschutz) und aus den Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h (EABT-80/100), Ausgabe 2019.

Für die hier zu betrachtende Frage der ausreichend leistungsfähigen Rauchableitung aus dem Verkehrstunnel sind insbesondere die Schutzzielanforderungen der Rettung von Menschen sowie der Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten relevant. Aus diesen Schutzzielanforderungen können dann im Weiteren konkrete funktionale Anforderungen abgeleitet werden, welche zur Erreichung der Schutzzielanforderungen zu erfüllen und entsprechend nachzuweisen sind.

Aus der Schutzzielanforderung der Rettung von Menschen erfolgt prinzipiell die Aufteilung der Betrachtung in die Phase der so genannten Selbstrettung sowie die Phase der so genannten Fremdrettung. In der **Selbstrettungsphase** bringen sich in Gebäuden oder baulichen Anlagen befindliche Personen nach erfolgter Wahrnehmung der Gefahrensituation bzw. Alarmierung selbständig in Sicherheit, beispielsweise durch Verlassen des Objekts ins Freie oder in einen baulich entsprechend gesicherten Bereich. Die Möglichkeit zur Selbstrettung wird dabei insbesondere begünstigt durch eine klare und eindeutige Führung von Flucht- und Rettungswegen, durch die Begrenzung von gefährdeten Bereichen, welche im Rahmen der Selbstrettung begangen werden müssen oder durch Maßnahmen zur Reduzierung von Gefährdungen während dieser Selbstrettungsphase. Hierzu zählen insbesondere eine klare Kennzeichnung sowie eine ausreichende Beleuchtung von Flucht- und Rettungswegen, eine zeitnahe und eindeutige Aufforderung/Information der Personen zum Verlassen des Gebäu-

des bzw. der baulichen Anlage sowie eine Reduzierung von Rettungsweglängen in einen sicheren Bereich.

In der **Fremdrettungsphase** erfolgt das Suchen und In-Sicherheit-bringen von noch in einem Gebäude oder in einer baulichen Anlage befindlichen Personen durch Rettungskräfte. Auch die Fremdrettung wird durch eine übersichtliche und eindeutige Gebäudestruktur sowie eine Unterteilung von Gebäuden und baulichen Anlagen in brandschutztechnisch abgetrennte Bereiche begünstigt, um die im Zuge der Fremdrettung abzusuchenden Bereiche so zu vereinfachen und zu begrenzen, dass eine Personensuche und ggf. -rettung möglichst rasch erfolgen kann. Im gleichen Zug sind Maßnahmen zur Unterstützung der Feuerwehr bei der Fremdrettung in der Regel auch als Maßnahmen zur Unterstützung bei der Brandbekämpfung als Einsatzerleichterung wirksam.

Durch geeignete Maßnahmen zur Rauchableitung kann eine verlängerte Nutzbarkeit von Flucht- und Rettungswegen erreicht werden. Diese Nutzbarkeit bezieht sich im Wesentlichen auf Sichtverhältnisse, aber auch auf die Konzentration von Verbrennungsproduktion sowie auf thermische Einwirkungen über den direkten Kontakt mit hohen Temperaturen und über Wärmestrahlung. Entsprechend dieses Zusammenhangs fordert auch die TRStrab Brandschutz die Untersuchung der möglichen Einschränkung der Möglichkeit zur Selbst- und Fremdrettung für unterirdische Betriebsanlagen durch Brände und insbesondere durch Brandrauch und ggf. eine Dimensionierung von ausreichend leistungsfähigen Maßnahmen zur Rauch- und Wärmeableitung. Diesen funktionalen Anforderungen wurden nachfolgend entsprechend nachzuweisende Leistungskriterien zugeordnet.

2.2 Leistungskriterien

Um die funktionalen Anforderungen von ausreichenden Bedingungen im Zuge der Selbstrettungsphase sowie der Fremdrettungsphase zu erzielen, definiert die TRStrab Brandschutz folgende Anforderungen:

„Neue unterirdische Haltestellen sind so auszulegen, dass während der Selbstrettungsphase (Phase 4 des Zeitstrahls gemäß Kap. 5.2.1) eine raucharme Schicht im Mittel von 2,5 m Höhe über der Bahnsteigebene erhalten bleibt. Dieses Maß gilt auch für Treppenanlagen und anschließende Fluchtwegabschnitte. Für die raucharme Schicht ist der Nachweis der ausreichenden Erkennungsweite von 10 bis 20 m im Verlauf des gesamten Fluchtweges zu führen. Die Wirkungszeit der Rauchschutzmaßnahmen muss 10 % länger, mindestens jedoch eine Minute länger als die Bemessungszeit (siehe Kap. 5.2.1) sein. In der anschließenden Fremdrettungsphase muss bis zur 30. Minute ab Brandbeginn eine mindestens 1,50 m hohe raucharme Schicht vorhanden sein.“

Gemäß Abstimmung mit der zuständigen Brandschutzdienststelle erfolgt bezüglich des Leistungsmerkmals von ausreichend raucharmen Verhältnissen bzw. ausreichender Erkennungsweite von 10 bis 20 m eine Zuordnung der im vorliegenden Simulationsbericht ausgewerteten Berechnungsgröße der optischen (Rauch-)Dichte von $0,13 \text{ m}^{-1}$.

Für die **Selbstrettungsphase** wird entsprechend der Auswertegrenzwert einer optischen Dichte von $0,13 \text{ m}^{-1}$ als Bewertung für eine raucharme Schicht im Mittel von 2,5 m über dem, zu beiden Tunnelportalen hin ansteigenden, jeweiligen Straßenniveau definiert. Diese Auswertehöhe wird regelkonform für die Bewertung der Selbstrettungsphase nachfolgend herangezogen. Darüber hinaus wird als Orientierungshilfe auch eine Auswertehöhe von 2,0 m berücksichtigt, um das Brandsimulationsergebnis in Bereichen mit lokal höherer Rauchgaskonzentration in einer Auswertehöhe von 2,5 m hinsichtlich des Ausmaßes möglicher Einschränkungen auf die Rettungswegführung besser bewerten zu können. Dabei sind bei der Bewertung der Brandsimulationsergebnisse brandnahe Bereiche (in der Nähe des brennenden Fahrzeugs) nicht zu betrachten, da hier die vorgegebenen Grenzwerte aufgrund der Brandortnähe ohnehin nicht einzuhalten sind und davon ausgegangen werden kann, dass Personen aus diesem brandnahen Bereich bereits geflüchtet sind.

Neben dem Grenzwert der Brandrauchkonzentration und dem nachzuweisenden Mindesthöheniveau für ausreichend raucharme Verhältnisse muss der erforderliche Nachweiszeitraum definiert werden, für welchen diese Anforderungen mindestens erfüllt werden müssen. In der vorliegenden Projektbearbeitung erfolgt die Ermittlung der erforderlichen Nachweiszeiträume, sprich Räumungszeiten, in weiterführenden Betrachtungen der STUVAtec GmbH. Auf dieser Basis werden die Ergebnisse des vorliegenden Brandsimulationsberichts mit den erforderlichen Räumungszeiten abgeglichen und aus brandschutztechnischer Sicht bewertet. Dieser Abgleich und die sich hieraus ergebende brandschutztechnische Bewertung sind nicht Gegenstand des vorliegenden Brandsimulationsberichts.

Insgesamt sind bei der Bewertung der Selbstrettungsmöglichkeit nicht nur die Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Rauchausbreitung im Tunnelraum und einer hierdurch bedingten Sichteinschränkung, sondern auch die Komplexität der baulichen Anlagen bezüglich der Orientierungsmöglichkeit für Personen und die Art der Führung der Rettungswege relevant. Entsprechend ist anzumerken, dass die Umweltverbundröhre, aufgrund der Ausgestaltung als Straßentunnel, an beiden Seiten ebenerdig betreten und verlassen werden kann. Eine Führung von Flucht- und Rettungswegen über Zwischen- oder Verteilerebenen und den jeweils dazwischenliegenden Treppenanlagen, wie in der Regel bei unterirdischen Betriebsanlagen für Straßen- bzw. U-Bahnen, erfolgt hier nicht. Somit kann das ebenerdige Verlassen des Tunnels an den beiden Tunnelportalen ins Freie als Erreichen eines sicheren Bereichs definiert werden. Im Gegensatz zu einer möglichen ausgedehnten, sich über mehrere unterirdische Geschosse erstreckenden Verkehrsanlage kann die hier zu bewertende Situation

bezüglich der Übersichtlichkeit und Eindeutigkeit der Flucht- und Rettungswegsituation als relativ günstig bewertet werden.

An die Phase der Selbstrettung schließt entsprechend dem Zeitschema der TRStrab Brandschutz die **Fremdrettungsphase** an. Für diese ist dort ein abgeschwächtes Anforderungskriterium für die erforderliche bzw. nachzuweisende Höhe der angestrebten raucharmen Schicht von mindestens 1,5 m Höhe definiert. Der Anforderung bezüglich ausreichend raucharmer Verhältnisse wird wieder der Auswertegrenzwert der optischen (Rauch-)Dichte von $0,13 \text{ m}^{-1}$ zugeordnet. Auch hier bezieht sich die Anforderung nicht auf den unmittelbaren Nahbereich des Brandes. Auch nennt die TRStrab Brandschutz einen Nachweiszeitraum bezüglich der Schutzzielanforderung für die Fremdrettung. Hier wird der Zeitraum unmittelbar nach Abschluss der Selbstrettungsphase bis zur 30. Minute ab Brandbeginn genannt.

Aufgrund der bereits dargestellten günstigen Situation mit überschaubarer Tunnelgeometrie mit geringer Ausdehnung auf nur ein und gleichzeitig über zwei Seiten zugängliches Straßen- bzw. Bahnsteigniveau, ist im weiteren Planungsprozess, insbesondere in Abstimmung mit der zuständigen Brandschutzdienststelle, zu bewerten, ob hier entsprechend die sich in strikter Umsetzung der Anforderungen der TRStrab Brandschutz ergebene Anforderung bezüglich des Nachweiszeitraums bis zur 30. Minute nach Brandbeginn als relevant zu bewerten, oder ob aufgrund der objektspezifischen Besonderheiten in Verbindung mit den anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen eine verkürzte Nachweisdauer oder eine teilweise geringere Nachweishöhe für den hier zu betrachtenden konkreten Einzelfall ausreichend ist.

Um einer solchen abschließenden Bewertung im weiteren Planungsprozess nicht vorzugreifen, wird für die nachfolgende Auswertung der Berechnungsergebnisse zunächst als Leistungskriterium zur ausreichenden Möglichkeit einer Fremdrettung von Personen durch die Einsatzkräfte der Feuerwehr aus dem Tunnelbauwerk der Umweltverbundröhre (UVR) eine raucharme Schicht von 1,5 m Höhe mit einem Auswertegrenzwert einer optischen (Rauch-)Dichte von maximal $0,13 \text{ m}^{-1}$ bis zur 30. Minute ab Brandbeginn definiert. Diese Auswertehöhe (1,5 m) wird regelkonform für die Bewertung der Fremdrettungsphase nachfolgend herangezogen. Darüber hinaus wird als Orientierungshilfe auch eine Auswertehöhe von 1,0 m berücksichtigt, um das Brandsimulationsergebnis in Bereichen mit lokal höherer Rauchgaskonzentration in einer Auswertehöhe von 1,5 m hinsichtlich des Ausmaßes möglicher Einschränkungen hinsichtlich die Fremdrettungsmöglichkeit besser bewerten zu können. Dieses so definierte Leistungskriterium für die Fremdrettung ist ebenfalls für den Nachweis von ausreichenden Verhältnissen zur Unterstützung der Feuerwehr bei der Brandbekämpfung geeignet.

3 Qualitative Entwurfsanalyse

Bei der hier zu betrachtenden baulichen Anlage der Umweltverbundröhre (UVR) handelt es sich um ein Tunnelbauwerk, welches als Unterführung der Bahngleise an der S-Bahn-Haltestelle „Laim“ ausgeführt wird. Die durchgehende Tunnelröhre weist dabei eine Länge von etwa 200 m auf. Ein Zugang zum parallellaufenden Straßentunnel für den öffentlichen Kraftfahrzeug-Individualverkehr besteht an einer Stelle auf etwa halber Tunnellänge. Dieser Zugang ist jedoch nicht öffentlich und im Rahmen der Flucht- und Rettungswegführung im Zuge der Selbstrettung nicht nutzbar.

Die Umweltverbundröhre kann über die beiden Tunnelportale, am nördlichen und südlichen Ende, ebenerdig betreten und verlassen werden. Ebenso besteht für die Fahrzeuge des ÖPNV die Möglichkeit zur Ein- und Ausfahrt an beiden Tunnelenden.

In diesem Tunnel erfolgt die Nutzung durch den öffentlichen Fußgänger- und Radverkehr sowie die Führung von Buslinien und Straßenbahnen (Trambahnen) des ÖPNV durch die Umweltverbundröhre. Für den Busverkehr sowie den Trambahnverkehr wird in beiden Fahrtrichtungen jeweils eine Haltestelle im Tunnel vorgesehen.

Die Tunnelröhre verfügt auf etwa halber Länge über einen offenen Tunnelabzweig. Hier kann über das Zugangsbauwerk Ost die an der Geländeoberfläche angeordnete S-Bahn-Haltestelle „Laim“ erreicht werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt Planausschnitte des Grundrisses sowie des Längsschnitts durch den geplanten Verkehrstunnel der Umweltverbundröhre.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 12

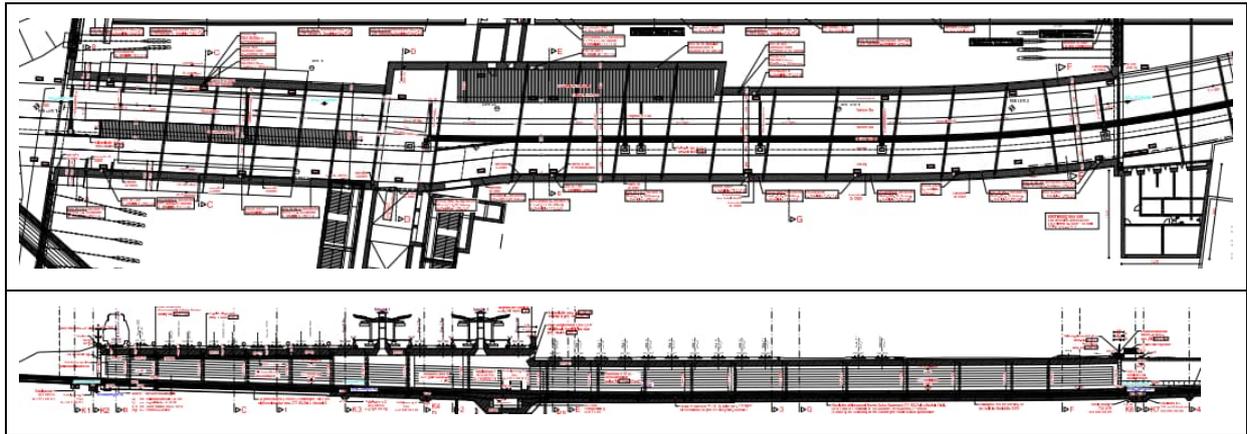


Abbildung 1 Planausschnitte der Umweltverbundröhre (UVR), Grundriss (oben) und Längsschnitt (unten); Planstand: Mai 2018

Aus den dargestellten Planausschnitten werden zum einen die geradlinige und übersichtliche Geometrie des Tunnelbauwerks, der horizontale Verlauf des Deckenniveaus mit Sprung etwa im Bereich der halben Tunnellänge sowie das zu beiden Tunnelportalen hin ansteigende Straßenniveau ersichtlich. Es ergeben sich hierdurch lichte Höhen in der Umweltverbundröhre von etwa 4,6 m bis etwa 6,9 m.

Zur Rauchableitung aus der UVR stehen neben den beiden permanenten Öffnungen der Tunnelportale ein zweigeteilter Absaugkanal für die maschinelle Entrauchung und eine freie Öffnungsfläche im zentralen Deckenbereich der Tunnelröhre zur natürlichen Rauchableitung zur Verfügung. Die freie Öffnungsfläche ist im Bereich des Höhenversprungs des Deckenniveaus, etwa im Bereich der halben Tunnellänge, nahezu über die vollständige Breite des Tunnels angeordnet.

Am offenen Zugang zum S-Bahn-Bahnsteig (Zugangsbauwerk Ost) ist eine feste Rauchschürze mit einer Höhe der Unterkante von maximal 2,5 m über dem dortigen Fußbodenniveau angeordnet, um eine Rauchgaseinströmung von der Umweltverbundröhre in das Zugangsbauwerk zu behindern.

4 Gefahren- und Risikoanalyse

Im Sinne der hier zu betrachtenden Aufgabenstellung, der Untersuchung der Wirksamkeit der vorgesehenen Maßnahmen zur Rauchableitung zur Unterstützung der Selbst- und Fremdrerettungsmöglichkeit von Personen aus dem Verkehrstunnel der Umweltverbundröhre (UVR) sowie zur Einsatzerleichterung der Feuerwehr bei der Brandbekämpfung, sind insbesondere Gefahren durch Brände von Fahrzeugen des ÖPNV betrachtungsrelevant. Aufgrund der geplanten Führung von Buslinien und Trambahnen (Straßenbahnen) stellen diese die nachweisrelevanten Brandobjekte dar. Zwar sind Brände an stationären technischen Einrichtungen des Tunnelbauwerks sowie Brände in den Nutzungsbereichen im angrenzenden offenen Zugangsbauwerk Ost zum S-Bahn-Bahnsteig (Ladenlokale) möglich, jedoch stellen diese in Bezug auf die Rauchausbreitung und Rauchableitung aus der Umweltverbundröhre nachrangige Szenarien in Bezug auf die aufgezeigte Schutzzielanforderung für Personen in der UVR dar. Auch Kleinbrände von Müllbehältern treten zwar mit großer Häufigkeit auf, stellen jedoch aufgrund des geringen Brandrisikos keine bemessungsrelevanten Brandszenarien dar. Somit ergibt die Gefahren- und Risikoanalyse für den Tunnelbaukörper der Umweltverbundröhre im Wesentlichen Brände von Fahrzeugen des ÖPNV (Bus oder Tram) als relevante Brandszenarien. Durch die hohe Zahl von während des üblichen Betriebs im Tunnel befindlichen Personen, seien es unmittelbar von einem solchen Brandereignis betroffenen Fahrzeug befindliche Personen, aber auch wartende Personen an den Haltestellen oder sonstige passierende Personen auf den Fuß- und Radwegen in der Umweltverbundröhre, besteht ein relevantes Schadensausmaß bezüglich möglicher Personenschäden im Brandfall. Aus dieser Kombination der relevanten Brandszenarien mit dem zugehörigen, zu erwartenden Schadensausmaß stellt sich zunächst jeweils für beide Fahrzeugarten, Linienbus und Straßenbahn (Trambahn), ein entsprechende Brandszenario als betrachtungsrelevant dar. Aus dieser Bewertung heraus wurde sowohl ein Busbrandszenario als auch ein Trambrandszenario als betrachtungsrelevant festgelegt.

5 Festlegung der relevanten Brandszenarien

Auf Basis der Gefahren- und Risikoanalyse wurden als maßgebliche Brandszenarien ein Busbrand sowie ein Trambahnbrand (Straßenbahnbrand) festgelegt. Entsprechend wurden für diese beiden Szenarien die Bemessungsbrände definiert, welche nachfolgend dargestellt werden.

5.1 Brandszenario „Bus“

Für die Entwicklung des Brandszenarios „Bus“ erfolgte eine Recherche in Fachveröffentlichungen und Fachliteratur des Brandschutzingenieurwesens. Hierbei wurden insbesondere experimentelle Untersuchungen zu Fahrzeugbränden von Bussen in den Fokus genommen. Als Ergebnis der Literaturrecherche wurden experimentell ermittelte Brandleistungskurven zusammengetragen und gegenübergestellt. Aus dieser Gegenüberstellung wurden folgende Feststellungen abgeleitet:

- Brandleistungskurven in Fachveröffentlichungen zeigen jeweils qualitativ ähnliche Brandleistungsentwicklungen, welche über einen quadratischen Anstieg gut angenähert werden können;
- älterer Tunnelbrandversuch (vgl. Ingason) zeigt sehr schnelle Brandentwicklung, jedoch sind hierbei der genaue Versuchsaufbau und die Zündbedingungen nicht bekannt, somit wird hier ein Zündinitial einer Flüssigkeitslache außerhalb des Fahrzeugs vermutet;
- neuere Brandversuche (vgl. Hammarström, Hansen) zeigen bei bekanntem Zündinitial im Motorraum bzw. Gepäckraum eine moderatere Brandentwicklung.

Zur Veranschaulichung eines beispielhaften, experimentellen Brandverlaufs für einen Busbrand werden in der nachfolgenden Abbildung Fotoaufnahmen vom Brandversuch, dokumentiert und veröffentlicht von Hammarström, dargestellt.



Abbildung 2 Aufnahmen zum zeitlichen Verlauf eines Brandversuchs mit Reisebus
(Quelle: Hammarström et al.: Bus Fire Safety)

Aufgrund der oben genannten Feststellungen wurden folgenden Grundparameter für die Erstellung der Brandverläufe bei einem Busbrand definiert:

- Modellierung des quadratischen Anstiegs durch radiale Brandausbreitung bei einer flächenspezifischen Brandleistung von 500 kW/m²;
- horizontale radiale Brandausbreitungsgeschwindigkeit 0,25 m/min in Anlehnung an die mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit nach DIN 18232-2;
- maximale Brandleistung 30 MW.

Die sich aus diesen genannten Parametern ergebende zeitliche Entwicklung des Brandleistungsverlaufs ist in der nachfolgenden Abbildung, zusammen mit anderen Brandleistungskurven aus der Fachliteratur, in Diagrammform dargestellt.

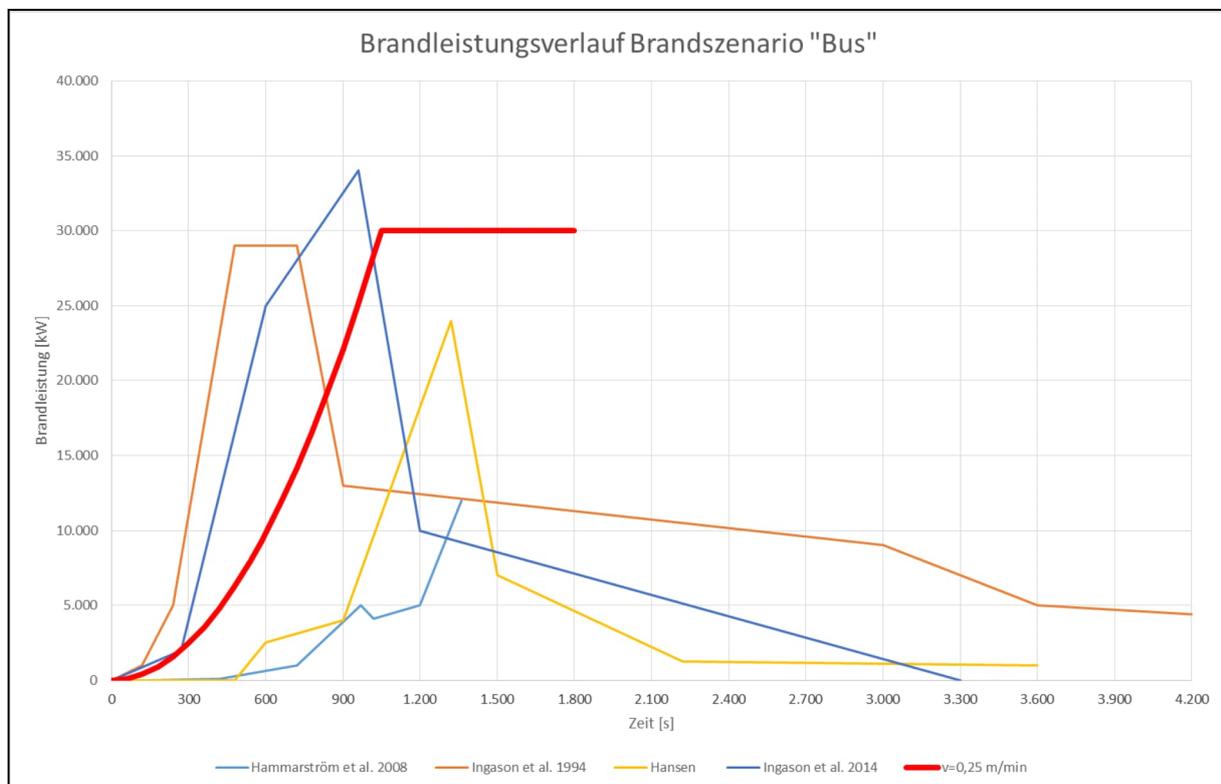


Abbildung 3 Gegenüberstellung der Brandleistungskurve des Brandszenarios „Bus“ mit jenen aus experimentellen Untersuchungen von Busbränden

Aus den dargestellten Verläufen der Brandleistung ist zu erkennen, dass der gewählte Brandleistungsanstieg für die durchzuführenden Brandsimulationsberechnungen (dicke rote Line) rascher erfolgt als die experimentell ermittelten Brandleistungsanstiege in den neueren Brandversuchen mit bekannten Zündinitialen mit Brandentstehungsort im Motorraum bzw.

Gepäckraum (vgl. Hammarström, Hansen). Somit stellt die Festlegung des zu berücksichtigenden Brandentwicklungsverlaufs einen konservativen Ansatz gegenüber den experimentell ermittelten Brandverlaufskurven dar, wodurch Unsicherheiten bezüglich unterschiedlicher Bustypen, Zündinitiale und des Brandentstehungsorts sowie der Tatsache, dass die Ableitung der Brandverlaufskurve auf nur einer experimentellen Untersuchung beruht, als ausreichend mit abgedeckt bewertet werden.

Die Festlegung der zu berücksichtigenden maximale Brandleistung von 30 MW liegt auf dem Niveau der experimentell ermittelten Werte und wird im Rahmen der Brandsimulationsberechnung nach Abschluss der Brandentwicklungs- bzw. Brandausbreitungsphase auf diesem Maximalwert bis zum Ende des längsten Betrachtungszeitraums von 30 Minuten in der Brandsimulation konstant gehalten. Eine Abnahme der Brandleistung durch das Wirksamwerden von Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr, wie es in diesem Zeitrahmen bereits zu erwarten wäre, wurde im Rahmen der Brandsimulationsberechnung nicht angesetzt. Diese Randbedingung stellt ebenfalls einen konservativen Ansatz bezüglich des zu berücksichtigenden Brandleistungsverlaufs dar.

Neben der Definition des zeitlichen Verlaufs der Brandleistung bzw. Wärmefreisetzungsrate ist ebenso die Festlegung der durch die Verbrennung freiwerdenden Rußmenge erforderlich, um die zur erwartende Rauchausbreitung und Rauchableitung hinsichtlich der gewählten Leistungskriterien auswerten und bewerten zu können. Hier wurde aufgrund der nicht experimentell ermittelten oder zumindest nicht veröffentlichten Werte der Rußausbeute (soot yield) bei den Busbrandversuchen der Wert aus der TRStrab Brandschutz für vollentwickelte Brände von 0,129 g/g bei einem Heizwert von 18.770 kJ/kg herangezogen. Dieser Wert ist für eine Mischbrandlast aufgrund des relativ hohen Werts der Rußausbeute bei gleichzeitig relativ niedrigem Heizwert als deutlich konservativer Ansatz hinsichtlich der Rußfreisetzung im Rahmen der durchgeführten Brandsimulationsberechnungen zu bewerten. Das Verhältnis der Rußausbeute gegenüber der freigesetzten Brandenergie ist dabei sogar noch etwas ungünstiger als bei einer ausreichend ventilierten Verbrennung von reinem Polyurethan (PU), was bei Fragen bezüglich der Rauchausbreitung und Rauchableitung im Hochbau als eine der kritischsten Brennstoffdefinitionen bewertet wird.

Diese Randbedingungen bezüglich des zu berücksichtigenden Brandleistungsverlaufs sowie der Ausbeutefaktoren für das Brandszenario „Bus“ wurden im Zuge der Erstellung der Brandsimulationsuntersuchung für die zunächst geplante, rein natürliche Rauchableitung der zuständigen Brandschutzdienststelle vorgestellt und mit dieser als zu berücksichtigende Berechnungsparameter abgestimmt. Für die nun vorliegende Brandsimulationsuntersuchung zur maschinellen Entrauchung der UVR wurde die Beibehaltung und Verwendung der identischen Parameter zur Definition des Brandszenarios „Bus“ mit der Brandschutzdienststelle abgestimmt.

5.2 Brandszenario „Tram“

Auch für das Brandszenario „Tram“ wurde die Festlegung des Brandleistungsverlaufs als Eingangswert für die Brandsimulationsberechnung erforderlich. Hierbei wurde die allgemeingültige Brandleistungskurve der TRStrab Brandschutz herangezogen, da eine typenspezifische Brandleistungskurve für den einzusetzenden Fahrzeugtyp der Trambahn bzw. Straßenbahn derzeit noch nicht vorliegt.

Zur Entwicklung der zu berücksichtigenden Brandleistungskurve sind entsprechende Formelansätze in der TRStrab Brandschutz dargestellt, mit welchen sich für die unterschiedlichen Brandphasen, eines sich zunächst entwickelnden Brandes, eines anschließend vollentwickelten sowie wieder abklingenden Brandes, die jeweils zur Betrachtungszeit zugehörige Brandleistung berechnen lässt. In der nachfolgenden Abbildung sind die beispielhaften Brandleistungskurven für Schienenfahrzeuge für die Fahrzeuglängen von 20 m, 30 m und 40 m beispielhaft dargestellt. Diese Abbildung wurde unmittelbar der TRStrab Brandschutz entnommen.

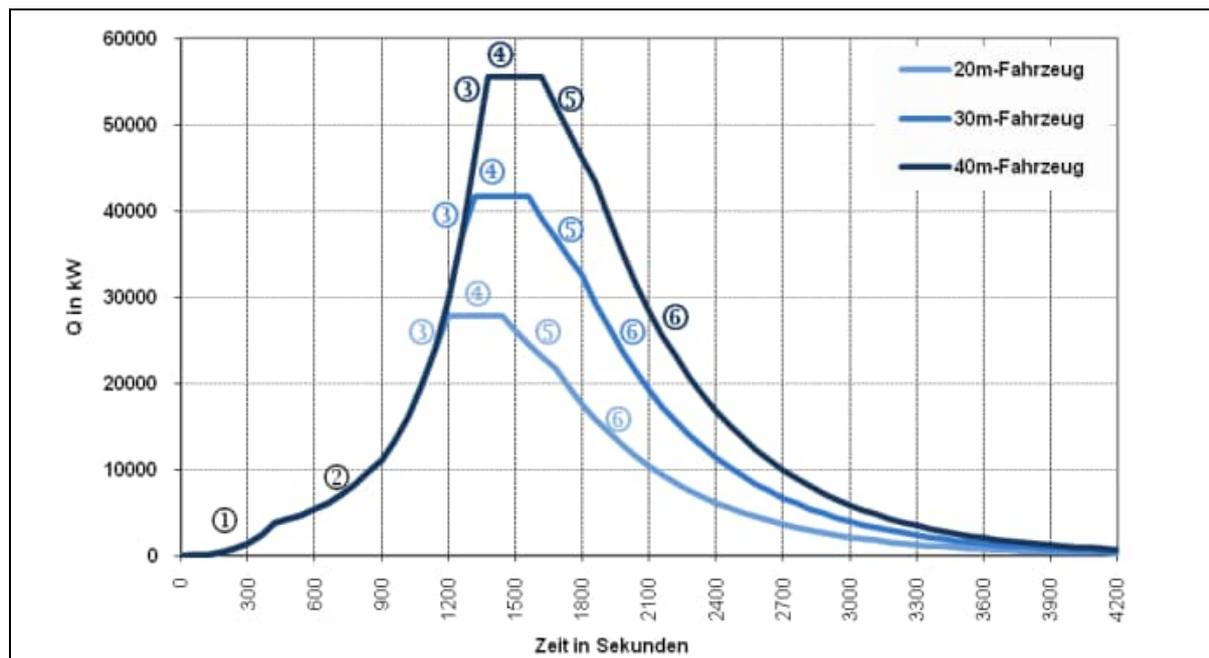


Abbildung 4 Brandverlaufskurven entsprechend Formelansätzen der TRStrab Brandschutz für unterschiedliche Fahrzeuglängen; Quelle: TRStrab Brandschutz, Stand Juni 2014

Auf Basis der Berechnungsformeln der TRStrab Brandschutz wurde für die vorgesehenen Trambahntypen im Linienverlauf der hier zu betrachtenden Umweltverbundröhre eine Fahr-

zeuglänge von 48 m berücksichtigt. Die sich hieraus ergebende Brandleistungskurve ist in der nachfolgenden Abbildung in Diagrammform dargestellt.

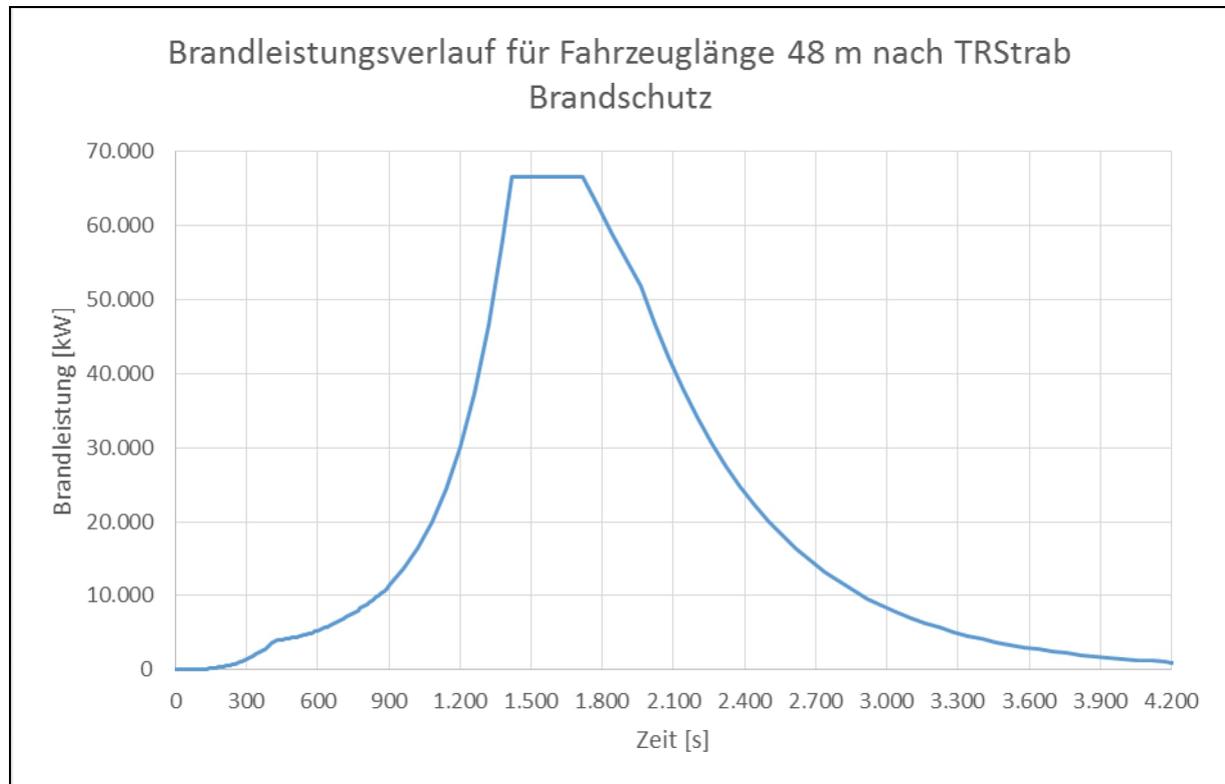


Abbildung 5 Zeitlicher Verlauf der Brandleistung für 48m-Fahrzeug nach TRStrab Brandschutz

Der in vorstehender Abbildung dargestellte zeitliche Verlauf der Brandleistung wurde dem in der Brandsimulationsberechnung berücksichtigten Verlauf zugrunde gelegt. Der in der Simulation berücksichtigte Verlauf verläuft entsprechend dieser Kurve - weist jedoch abweichend nach 1720 s keinen Leistungsabfall auf, sondern bleibt bis zum Simulationsende nach 1800 s auf dem Maximalniveau von 66 MW. Somit berücksichtigt auch diese Brandverlaufskurve keine Wirkung von ggf. bereits eingeleiteten Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr.

Für die Modellierung des Brandherdes wurde ebenfalls eine flächenspezifische Brandleistung von ebenfalls 500 kW/m² zugrunde gelegt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde entsprechend so gesteuert, dass sich hierbei der vordefinierte Brandleistungsverlauf ergibt.

Bezüglich der bei der Verbrennung freiwerdenden Rußmenge werden in der TRStrab Brandschutz bei Anwendung des allgemeingültigen Bemessungsbrandverlaufs ebenfalls Vorgaben gemacht. So ist für den Zeitraum ab Brandbeginn bis zur zehnten Berechnungsminute ein Wert für die Rußausbeute von 0,056 g/g und für die Simulationsdauer ab der zehnten Be-

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 20

rechnungsmminute ein Wert von 0,129 g/g zu berücksichtigen. Der Heizwert wurde dabei entsprechend der TRStrab Brandschutz mit 18.770 kJ/kg angesetzt.

Diese Randbedingungen bezüglich des zu berücksichtigenden Brandleistungsverlaufs sowie der Ausbeutefaktoren für das Brandszenario „Tram“ wurden ebenfalls im Zuge der Erstellung der Brandsimulationsuntersuchung für die zunächst geplante, rein natürliche Rauchableitung der zuständigen Brandschutzdienststelle vorgestellt und mit dieser als zu berücksichtigende Berechnungsparameter abgestimmt. Für die nun vorliegende Brandsimulationsuntersuchung zur maschinellen Entrauchung der UVR wurde die Beibehaltung und Verwendung der identischen Parameter zur Definition des Brandszenarios „Tram“ mit der Brandschutzdienststelle abgestimmt, da eine typenspezifische Brandleistungskurve für den einzusetzenden Fahrzeugtyp der Trambahn bzw. Straßenbahn derzeit erarbeitet wird, jedoch noch nicht vorliegt.

6 Durchführung der Brandsimulationsberechnungen

Wie bereits dargestellt, wurden in der Frage der Rauchausbreitung und ausreichenden Rauchableitung in bzw. aus der Umweltverbundröhre (UVR) zwei maßgebliche bzw. nachweisrelevante Brandszenarien ermittelt und hierfür die entsprechenden Brandleistungsverläufe und Eingangswerte definiert. Diese Randbedingungen bilden die Eingangswerte für die durchgeführten Brandsimulationsberechnungen. Hierdurch kann die zu erwartende Rauchausbreitung und Rauchableitung unter den definierten Brandszenarien berechnet und im Abgleich mit den festgelegten Leistungskriterien bewertet werden.

Im vorliegenden Brandsimulationsbericht werden sowohl für das Brandszenario „Bus“ als auch das Brandszenario „Tram“, jeweils mit Anordnung der Brandquelle in Tunnellängsmittte, unter Ansatz einer maschinellen Rauchableitung die durchgeführten Berechnungen dargestellt. Für das Brandszenario „Bus“ wird neben der Variante mit maschineller Entrauchung und Anordnung des zweigeteilten Absaugkanals in Tunnellängsrichtung eine weitere Berechnungsvariante unter zusätzlicher Anordnung einer festen Rauchschürze entlang der fahrbahnseitigen Außenkante des Absaugkanals mit einer Unterkante der Rauchschürze in einer Höhe von 2,5 m über dem jeweiligen Bodenniveau und einer Weiterführung bis zu beiden Tunnelportalen dargestellt.

Bevor jedoch die wesentlichen Anfangs- und Randbedingungen der jeweiligen Berechnungsläufe dokumentiert werden, erfolgt eine Darstellung zum Vorgehen und zur Wahl des Berechnungsverfahrens bzw. Berechnungsmodells.

6.1 Methodik und Wahl des Berechnungsverfahrens

Zur Untersuchung der Rauchausbreitung im und der Rauchableitung aus dem Tunnelbauwerk der Umweltverbundröhre wurden computergestützte Brandsimulationsberechnungen unter Einsatz einer Strömungssimulationssoftware durchgeführt. Dies wird auch als CFD-Berechnung, für „Computational Fluid Dynamics“, kurz CFD, bezeichnet. Als Berechnungsprogramm wurde die kommerzielle, universelle CFD-Simulationssoftware „STAR-CCM+“ in der Version 13.06 eingesetzt, welche international starke Anwendung in verschiedensten Bereichen der numerischen Strömungssimulation findet. Die Validierung und Verifizierung der Modellansätze in der genannten, für den Anwender fertig kompilierten und ausführbaren Berechnungssoftware findet über den Softwareentwickler und den Softwarevertrieb der SIEMENS Product Lifecycle Management Software Inc. statt.

Bei computergestützten Brandsimulationsberechnungen mittels CFD-Berechnungsmethoden werden nach Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen, wie beispielsweise die physikalischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile, die Anfangstemperatur im Raum sowie die Definition der Brandquelle, für jede im Berechnungsgebiet definierte numerische Gitterzelle die Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls, die so genannten Navier-Stokes-Gleichungen, sowie Energie gelöst. Des Weiteren werden Turbulenz und gegebenenfalls zusätzliche Lösungsverfahren mit Hilfe gekoppelter partieller Differentialgleichungen gelöst, welche die zeitliche und räumliche Ableitung physikalischer Größen, wie Temperatur, Druck, Geschwindigkeit und Wärmestrahlung beschreiben. Da die Bedingungen in einer Zelle von den benachbarten Zellen abhängig sind, werden die gekoppelten Differentialgleichungssysteme iterativ gelöst. Die Modellierung der Brandquelle liefert neben der freiwerdenden Wärmeleistung auch die Menge der entstehenden Rußpartikel als Maß für die sich ergebende lokale Rauchgaskonzentration.

Bei den nachfolgend dargestellten Brandsimulationsberechnungen wurde je Berechnungsfall das jeweilige, vordefinierte Brandszenario modelliert und die sich hierbei ergebende zeitliche Entwicklung der Rauchausbreitung im Luftraum der Umweltverbundröhre und die Rauchableitung an den Austrittsöffnungen berechnet.

6.2 Geometrische Modellbildung

Zur Berechnung der Rauchausbreitung im Luftraum der Umweltverbundröhre und der Wirkung der maschinellen Entrauchung in Verbindung mit den natürlichen Öffnungen der Tunnelportale und der vertikalen Öffnung am Höhengsprung der Tunneldecke mittels CFD-Strömungssimulation ist die Erstellung eines geometrischen Computermodells der betrachtungsrelevanten Tunnelgeometrie erforderlich. Entsprechend wurde auf Basis der übersandten Planunterlagen mit Planstand Mai 2018 ein dreidimensionales Volumenmodell mit der strömungstechnisch erforderlichen Detailtreue erstellt. Dabei entspricht die Lage des südlichsten Bereichs des Südportals einer Position mit Kilometrierung km 6+844.

Die nachfolgende Abbildung zeigt jeweils eine grafische Darstellung des geometrischen Berechnungsmodells des betrachtungsrelevanten Luftraums der Umweltverbundröhre für die beiden Geometrievarianten, ohne und mit starrer Rauchschräge in Tunnellängsrichtung. Die Darstellung zeigt jeweils die Lage des Brandherdes, welche für die hier dargestellten Berechnungsfälle identisch ist, die Lage des zweigeteilten Absaugkanals sowie die Lage der freien Öffnungsflächen im Bereich des Höhenversprungs des Deckenniveaus und an den Tunnelportalen und den offenen Bahnsteigzugang. In unterer Grafik ist entsprechend zusätzlich die Lage der Rauchschräge in Tunnellängsrichtung dargestellt. Die exakte Lage der Brandquelle mit Angabe der Kilometrierung findet sich im nachfolgenden Abschnitt 6.4 „Untersuchte Berechnungsfälle“.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 23

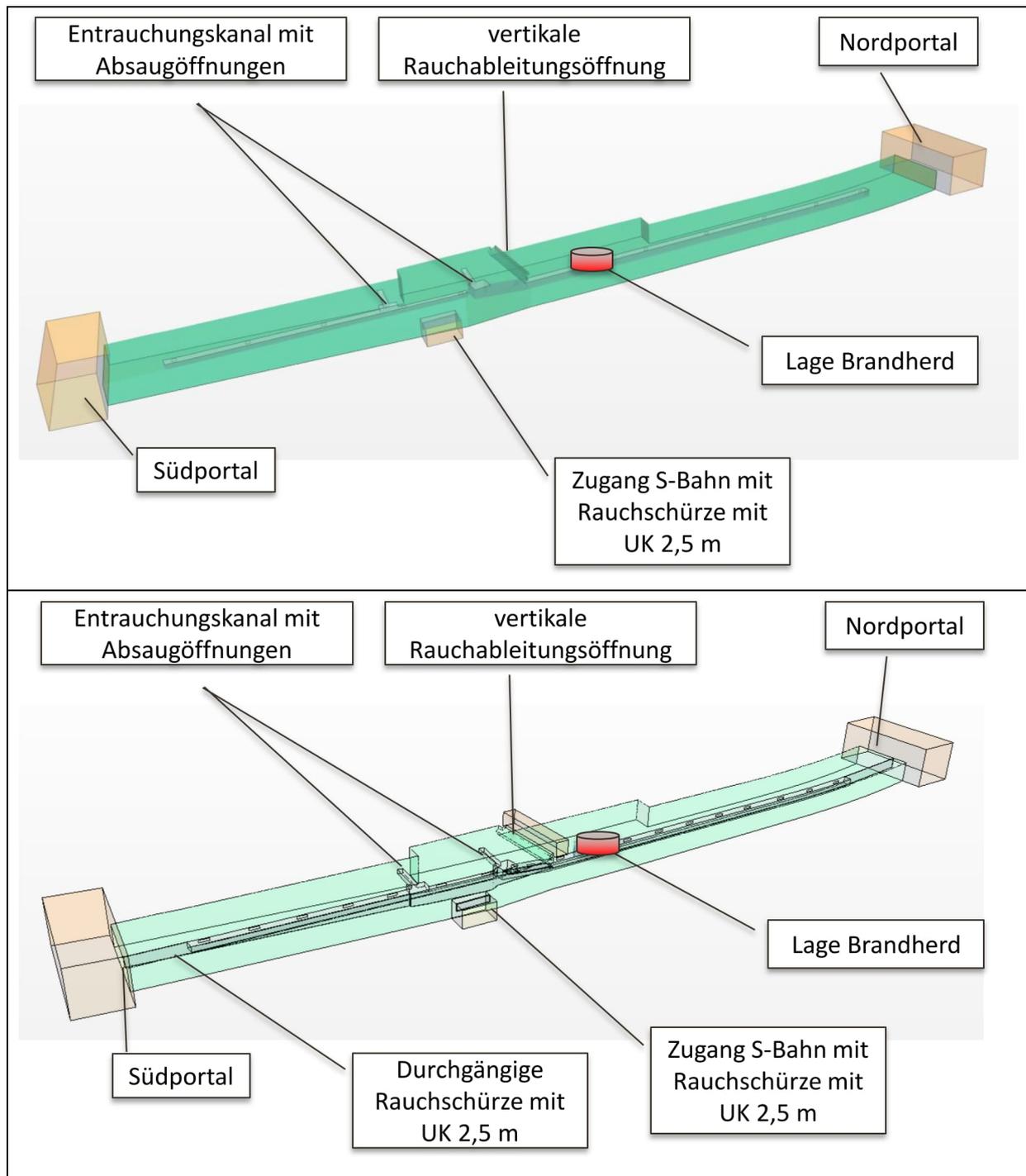


Abbildung 6 Grafische Darstellung des eingesetzten Geometriemodells in der Variante ohne (Grafik oben) und mit zusätzlicher Rauchschürze in Tunnellängsrichtung (Grafik unten)

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 24

Für die maschinelle Entrauchung wird in Tunnellängsrichtung ein zweigeteilter Absaugkanal unter der Tunneldecke über dem Bereich des Rad- und Fußwegs angeordnet. Der Entrauchungskanal erstreckt sich im südlichen Tunnelteil von km 6+854 bis km 6+914 sowie im nördlichen Teil von km 6+915 bis km 7+020. Hieraus ergibt sich ein Abstand zwischen der südlichen Kante des Absaugkanals und dem Südportal von etwa 10 m. Auf der Nordseite weist die nördliche Kante des Absaugkanals einen Abstand von etwa 20 m zum Nordportal auf. Als Abluftvolumenstrom wird für den südlichen Entrauchungskanal ein Gesamtwert von 40 m³/s vorgesehen, welcher sich auf sieben Absaugstellen mit je einer Absaugöffnung von 1,0 m Breite und 0,5 m Höhe verteilt. Für den nördlichen Absaugkanal beträgt der Absaugvolumenstrom insgesamt 50 m³/s, welcher auf elf Absaugöffnungen, mit jeweils mit 1,0 m Breite und 0,5 m Höhe, verteilt wird. Der Absaugvolumenstrom für die maschinelle Entrauchung der Umweltverbundröhre ist entsprechend mit einem Gesamtwert von 90 m³/s bzw. 324.000 m³/h vorgesehen und wurde entsprechend in den durchgeführten Brandsimulationsberechnungen angesetzt. Der Absaugvolumenstrom wird in den durchgeführten Berechnungen nach einer Minute ab Simulationsbeginn aktiviert. Der jeweils zu berücksichtigende Absaugvolumenstrom an den einzelnen Absaugstellen wurde entsprechend der vorgelegten Fachplanung des Planungsbüros Kündig gemäß dem Lüftungsschema vom 21.05.2021 in den durchgeführten Brandsimulationsberechnungen berücksichtigt.

Neben der maschinellen Rauchableitung wurde im Bereich des Deckenversprunges im zentralen Tunnelbereich, etwa an Position bei km 6+928, weiterhin eine vertikale Rauchableitungsöffnung, mit einem freien Öffnungsquerschnitt von etwa 10,2 m² modelliert.

Im eingesetzten Geometriemodell wurde auch der Verlauf des zu den beiden Tunnelportalen hin ansteigenden Straßenniveaus entsprechend den zugrunde liegenden Planunterlagen berücksichtigt. Dies ist in der nachfolgenden Abbildung mit Eintragungen von lichten Höhen an den jeweiligen beispielhaften Stellen im Tunnel dargestellt.

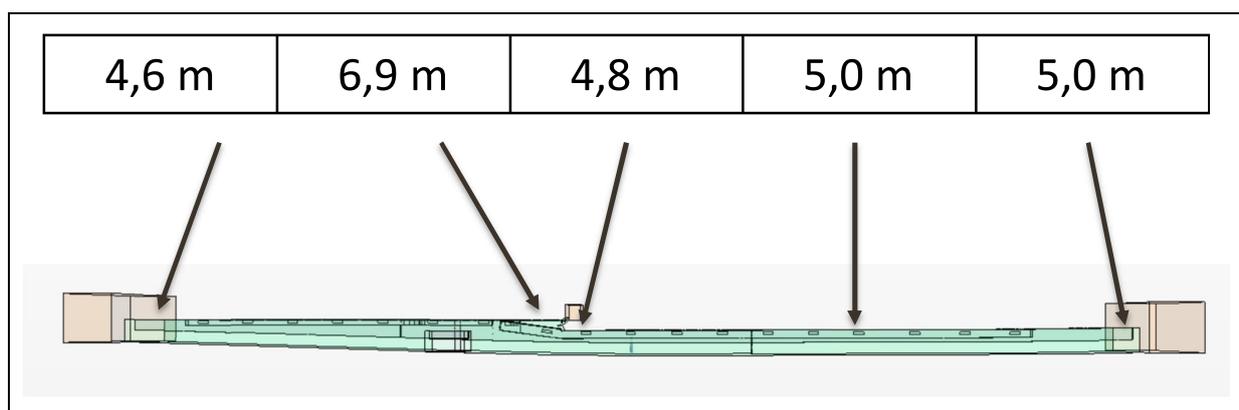


Abbildung 7 Angabe von lichten Höhen über dem Straßenniveau in Tunnellängsrichtung

Zur Berechnung der sich aufgrund des Brandgeschehens und der Entrauchungsmaßnahmen einstellenden Strömungen und damit auch der Ausbreitung von Brand- und Rauchgasen im Luftraum der Umweltverbundröhre im Rahmen der CFD-Brandsimulation wurde das Berechnungsgebiet in diskrete Berechnungsvolumina unterteilt.

Hierzu wurde ausgehend von einem Oberflächennetz aus Dreiecken ein Volumennetz aus Polyedern aufgebaut, welches den gesamten Berechnungsraum umfasst. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt des Geometriemodells des Berechnungsgebiets mit Darstellung des Berechnungsgitters in Vertikalschnitten durch den Tunnelraum. Hier ist auch die Verfeinerung des Berechnungsgitters im Bereich des Brandherdes sowie im Bereich der vertikalen Rauchableitungsöffnung zu erkennen.

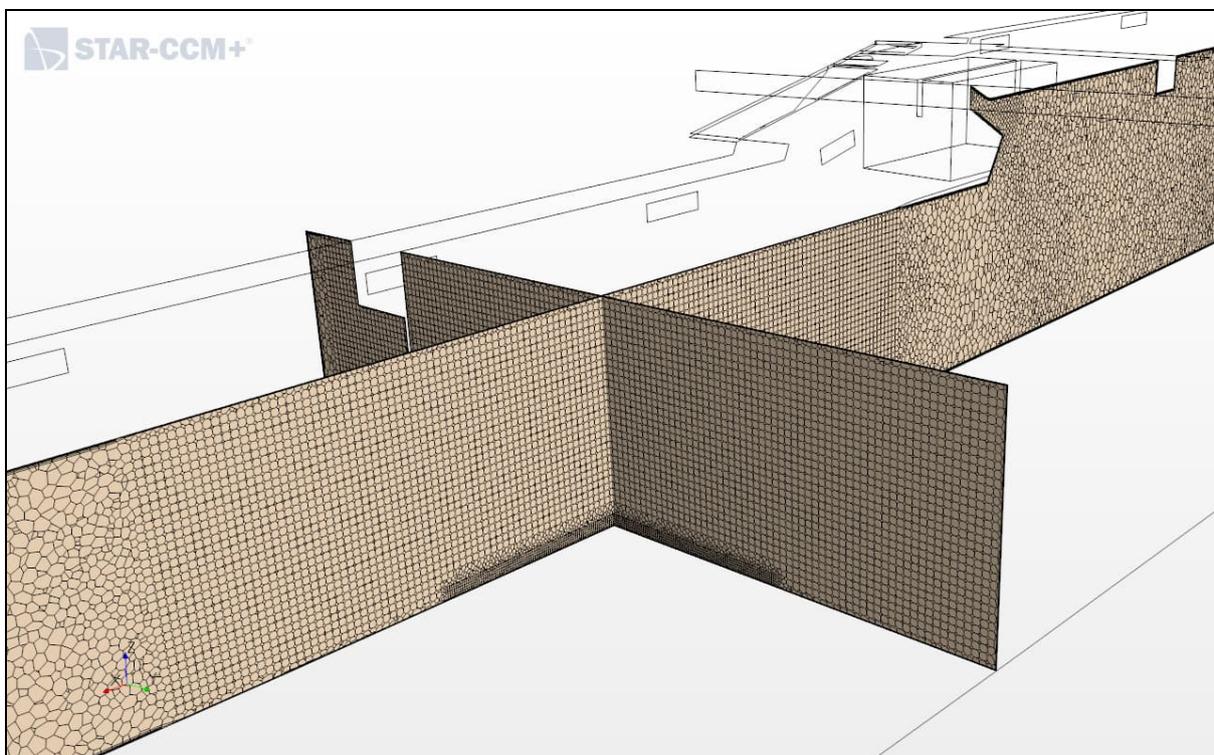


Abbildung 8 Ausschnitt des geometrischen Computermodells mit Darstellung des Berechnungsgitters in Vertikalschnitten

Das Berechnungsgebiet wurde mit einem Berechnungsgitter aus Polyedern als Volumenzellen diskretisiert, deren Größe sich ausgehend von einer Richtgröße, der so genannten Base Size, hier mit einem Wert von 20 cm festgelegt, ergibt. Des Weiteren wurde das Berechnungsgitter in Bereichen der Rauchableitungsöffnung, der Tunnelportale sowie im Plumbereich der unmittelbar über dem Brandherd aufsteigenden Heißgassäule mit einem Berechnungsgitter der Base Size von 15 cm und im Bereich der Brandquelle mit einer Base Size von 5 cm ver-

feinert. Aufgrund dieser Größeneinteilung der Berechnungszellen ergibt sich ein Berechnungsgitter mit etwa 8,5 Millionen Berechnungszellen.

Als thermische Randbedingung an den Umfassungsbauteilen wurde eine Wärmeableitung in massive Bauteile mit einer Starttemperatur von 20°C berücksichtigt, was auch gleichzeitig der Starttemperatur im Luftraum des Berechnungsgebiets zu Simulationsbeginn und der Außentemperatur der Nachströmung entspricht.

Wie bereits dargestellt, sind die vertikale Rauchableitungsöffnung, der Zugang zum Bahnsteig der S-Bahn (Zugangsbauwerk Ost) sowie die Öffnungen der Tunnelportale stets geöffnet, so dass diese entsprechend bereits zu Beginn des jeweiligen Berechnungslaufs geöffnet waren.

6.3 Äußere Randbedingungen

In Zusammenhang mit Fragestellungen zur Rauchableitung, bei welchen natürliche Öffnungsflächen beteiligt sind, sind im Allgemeinen auch äußere Randbedingungen, wie beispielsweise die Winddruckverteilung an einem Gebäude oder an einer baulichen Anlage, und deren möglicher Einfluss auf die Rauchausbreitung und Rauchableitung zu prüfen und ggf. in geeigneter Weise zu berücksichtigen.

Bei Untersuchungen zur Rauchausbreitung und Rauchableitung bei unterirdischen Verkehrsanlagen, wie beispielsweise U-Bahnnetzen, stellen sich typischerweise stetige Grundströmungen ein, welche sich aufgrund von unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zwischen den Tunnelsystemen und der äußeren Umgebung in Verbindung mit unterschiedlicher Höhenanordnung von Öffnungen zur äußeren Umgebung ergeben. Für den hier zu betrachtenden konkreten Fall der Umweltverbundröhre wurden solche Effekte aufgrund der relativ geringen Tunnellänge und der Anordnung der beiden Tunnelportale auf etwa identischer Höhenlage als für die zu untersuchende Fragestellung nicht relevant bewertet.

Neben dem Effekt von druck- bzw. strömungstechnisch kommunizierenden Röhren bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen kann, wie aufgezeigt, auch durch Wind eine ungleichmäßige Außendruckverteilung an einem Gebäude oder einer baulichen Anlage entstehen. Hierdurch können ebenfalls die Rauchausbreitung im Gebäude sowie die Rauchableitung beeinflusst werden. Da das hier zu betrachtende Tunnelbauwerk zum einen in Nord-Süd-Richtung und somit nicht in westlicher Hauptwindrichtung ausgerichtet ist und zum anderen durch das außerhalb des Tunnels an beiden Portalbereichen hin deutlich ansteigende Straßen- bzw. Geländeniveau die UVR sich in einer Senke befindet, werden die beiden

Tunnelportale nicht unmittelbar einem Windeinfluss ausgesetzt, weshalb ein äußerer Windeinfluss für die hier vorliegende Fragestellung als vernachlässigbar bewertet wird.

In Tunnelbauwerken und unterirdischen Verkehrsanlagen bewirkt der so genannte Kolbeneffekt teilweise eine deutliche Bewegung der Luftmasse in diesen Anlagen. Hierbei wird durch ein sich bewegendes Fahrzeug die Luftmasse vor einem Fahrzeug verdrängt und aufgrund eines geringen, verbleibenden freien Querschnitts zwischen dem Fahrzeugprofil und der Tunnelwandung die Luftmasse an der seitlichen Umströmung des Fahrzeugs behindert und so ein Teil der zu verdrängenden Luftmasse vor dem Fahrzeug durch eine Tunnelanlage vor sich hergeschoben. Die sich hinter dem Fahrzeug ergebende Drucksinke bewirkt im Tunnelquerschnitt eine Nachströmung von Luft ebenfalls in Fahrtrichtung des sich bewegenden Fahrzeugs. Somit kann ein sich bewegendes Fahrzeug in einem Tunnelbauwerk eine Luftströmung in Tunnellängsrichtung bewirken. Der Grad der sich ergebenden Luftströmung und somit die Stärke des so genannten Kolbeneffekts ist dabei im Wesentlichen anhängig vom Strömungsprofil des Fahrzeugs, der Fahrgeschwindigkeit und des verbleibenden freien Querschnitts im Tunnelprofil bei der Fahrzeugdurchfahrt. Aufgrund des relativ gesehen großflächigen freien Tunnelquerschnitts der Umweltverbundröhre, bedingt durch die Ausgestaltung der Fahrbahn mit zwei Fahrspuren sowie der Anordnung des östlich des Fahrstreifens verlaufenden, relativ breiten Fußgänger- und Radwegs, auch bei einer Fahrzeugdurchfahrt sowie dem Umstand von geringen Fahrtgeschwindigkeiten aufgrund der Anordnung der Haltestellenbereiche in der UVR wird allgemein der Kolbeneffekt und eine sich hieraus ergebende Querströmung im Tunnel als gering eingeschätzt. Hinzu kommt der Umstand, dass im Brandfall durch entsprechende Leitstellenkommunikation und Signalanlagensteuerung eine Fahrzeugbewegung im Tunnel eingestellt wird und somit im Wesentlichen nicht mehr erfolgt. Entsprechend erfolgt die Bewertung, dass der Kolbeneffekt durch den geplanten Bus- und Tramverkehr für die hier zu untersuchende Fragestellung keinen relativen Einfluss auf die zu berechnende Rauchausbreitung und Rauchableitung aus der Umweltverbundröhre hat und dieser Effekt im Rahmen der durchzuführenden Brandsimulationsberechnungen somit ebenfalls als vernachlässigbar bewertet wird.

Entsprechend dieser Bewertung wurde im Rahmen der durchgeführten Brandsimulationsberechnungen keine Grund- bzw. Hintergrundströmung in der Umweltverbundröhre angesetzt und entsprechend bei den CFD-Berechnungen Strömungsverhältnisse berechnet, die allein aufgrund der Eigenthermik des Brandgeschehens und der Wirkung der maschinellen Entrauchung induziert werden.

6.4 Untersuchte Berechnungsfälle

Im Rahmen der durchgeführten Brandsimulationsuntersuchung zur maschinellen Entrauchung der Umweltverbundröhre wurden zunächst sowohl das Bus-Brandszenario als auch das Brandszenario für die Tram berechnet und ausgewertet. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse führte zur Entscheidung, die Maßnahmen zur maschinellen Rauchableitung um eine starre Rauchschräge in Tunnellängsrichtung zu ergänzen, um für das Bus-Brandszenario in der Phase der Selbstrettung den Nachweiszeitraum weiter vergrößern zu können. Da sich im Zeitraum der Selbstrettungsphase unter dem Tram-Brandszenario die Verhältnisse als günstiger gegenüber dem Bus-Brandszenario darstellen, wurde der Einfluss der zusätzlich zur maschinellen Entrauchung angeordneten, festen Rauchschräge nur für das Bus-Brandszenario untersucht. Somit werden im vorliegenden Brandsimulationsbericht die Ergebnisse von insgesamt drei Berechnungsfällen dargestellt. Diese Berechnungsfälle sind jeweils hinsichtlich der geometrischen Randbedingungen sowie der Maßnahmen zur Rauchableitung identisch. Sie unterscheiden sich lediglich durch das berücksichtigte Brandszenario und für das Brandszenario „Bus“ zusätzlich in der Variation mit oder ohne eine Berücksichtigung der zusätzlichen Rauchschräge in Tunnellängsrichtung. In der nachfolgenden Tabelle sind die Bezeichnungen der untersuchten Berechnungsfälle unter Nennung des angesetzten Brandszenarios sowie der Lage der Brandquelle aufgeführt.

Tabelle 1 Untersuchte Berechnungsfälle, Bezeichnung und Lage der Brandquelle

Bezeichnung Berechnungsfall	Brand- szenario	Lage der Brandquelle
Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“	Bus	Brandquelle auf halber Tunnellänge, im niedrigeren Tunnelbereich (Kilometrierung km 6+940; Abstand vom südlichen Tunnelportal ca. 100 m)
Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“	Bus	Brandquelle auf halber Tunnellänge, im niedrigeren Tunnelbereich (Kilometrierung km 6+940; Abstand vom südlichen Tunnelportal ca. 100 m)
Trambrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“	Tram	Brandquelle auf halber Tunnellänge, im niedrigeren Tunnelbereich (Kilometrierung km 6+940; Abstand vom südlichen Tunnelportal ca. 100 m)

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 29

Die Lage der Brandquelle bei den drei untersuchten Berechnungsfällen begründet sich in der Anordnung der Brandquelle exakt in der Mitte der angesetzten Tunnellänge. Hierdurch wird der erforderliche Strömungsweg für Brand- und Rauchgase von der Brandquelle zu den beiden Tunnelportalen als wesentliche Öffnungsquerschnitte zur Rauchableitung maximiert. Entsprechend werden bezüglich des abzuführenden Rauchgasmassenstroms, aufgrund des maximierten Strömungswegs und der laufenden Lufteinmischung in die Rauchsicht, auch bei horizontaler Strömung unter der Tunneldecke, ungünstige Randbedingungen erzeugt, die im Sinne der hier zu bearbeitenden Fragestellung zu konservativen Ergebnissen bezüglich der zu ermittelnden Verrauchungssituation führen. Diese Einschätzung und Bewertung konnte bereits für die zuvor geplante, ausschließlich natürliche Rauchableitung durchgeführte Brandsimulationsuntersuchung und die hierbei explizit berücksichtigten, variierten Anordnungen der Lage der Brandquelle gezeigt werden. Diese Bewertung wird auch für die nun geplante maschinelle Entrauchung als weiterhin gültig angesehen. Entsprechend wurden bislang hierfür keine alternativen Anordnungen der Brandquelle für die maschinelle Entrauchung untersucht und werden entsprechend hier nicht dargestellt.

Bei allen Berechnungsfällen wurde die Brandquelle auf dem lokalen Bodenniveau angeordnet. Hierdurch ergibt sich eine maximale Aufstiegshöhe der Rauchgase im Plume senkrecht bis unter die Tunneldecke und somit eine maximale Einmischung von Umgebungsluft, sprich eine Maximierung des abzuführenden Rauchgasmassenstroms bzw. Rauchgasvolumenstroms. Dies stellt im Rahmen der hier zu untersuchenden Fragestellung der Rauchausbreitung und Rauchableitung einen konservativen Ansatz gegenüber einer erhöhten Anordnung der Brandquelle über Bodenniveau dar. Auch wurde die Brandquelle frei im Tunnellufttraum modelliert, um hinsichtlich der seitlichen Einmischung von Umgebungsluft in die aufsteigende Rauchsäule keine Abschirmung einer ggf. anzunehmenden Fahrzeugkarosserie und keine hierbei ggf. zu berücksichtigende Erhöhung der Brandquelle zu haben.

Bezüglich der erforderlichen Betrachtungszeiträume liefert die bereits dargestellte Ableitung bzw. Festlegung der funktionalen Anforderungen sowie der zugehörigen Leistungskriterien aus der Schutzzielkonkretisierung den zeitlichen Rahmen. Somit erfolgte die Untersuchung und Auswertung der Rauchausbreitung und Rauchableitung für die dargestellten Berechnungsfälle, aufgrund der Betrachtung der Selbst- sowie der Fremdrettungsphase gemäß der TRStrab Brandschutz, über 30 Minuten nach Simulationsbeginn, welcher jeweils auch den Beginn des Brandverlaufes darstellt.

7 Sicherheitskonzept

Aufgrund von fehlenden konkreten Angaben zu den Streuungen bei den berücksichtigten Randbedingungen und Berechnungsergebnissen für die untersuchten Berechnungsfälle (keine großangelegte Parameterstudie) sind bei der Festlegung der zu berücksichtigenden Randbedingungen und insbesondere bei der Festlegung der Parameter von Brandszenarien konservative Festlegungen erforderlich. Entsprechend müssen ausreichend große Brandleistungswerte sowie konservative Ansätze beim zeitlichen Brandverlauf, der Lage der Brandquelle sowie bei den Ausbeuten der wesentlichen Brandprodukte berücksichtigt werden.

Bei der Festlegung des Brandszenarios für den Busbrand wurden konservative Parameter bezüglich der Brandentwicklungsgeschwindigkeit und insbesondere hinsichtlich des Rußausbeutefaktors in Verbindung mit einem relativ geringen Heizwert gewählt. Eine Löschtechnik im Bus selbst wurde dabei ebenfalls nicht berücksichtigt.

Bei der Festlegung des zeitlichen Verlaufs des Trambahnbrandes wurde der allgemeingültige Brandverlauf der TRStrab Brandschutz berücksichtigt. Entsprechend wird hier aufgrund der Möglichkeit der allgemeinen Verwendbarkeit dieses Brandleistungsverlaufs unterstellt, dass es sich hierbei um eine ausreichend konservative Abschätzung des zu erwartenden Brandverlaufs für typische Schienenfahrzeuge in diesem Bereich handelt.

Außerdem wurde bei beiden Bemessungsbrandszenarien keine Wirkung von Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr berücksichtigt, so dass sich eine ergebende brandmindernde Wirkung im Rahmen der Brandsimulationsberechnungen nicht berücksichtigt wurde.

Insgesamt werden die hier genannten Festlegungen bei den berücksichtigten Brandszenarien und insbesondere bei den Brandleistungsverläufen und den Rußausbeuten als ausreichend konservativ im Sinne eines robusten Ingenieurnachweises bewertet.

8 Ergebnisse der Brandsimulationsberechnungen

Die beiden zuerst dargestellten Berechnungsfälle beruhen auf dem identischen Busbrandszenario und berücksichtigen eine maschinelle Rauchableitung mit einem Abluftvolumenstrom von 324.000 m³/h. Diese beiden ersten Berechnungsfälle unterscheiden sich insofern nur bezüglich der Berücksichtigung einer zusätzlichen Rauchschürze über die gesamte Tunnellänge mit Ausrichtung entlang der fahrbahnseitigen Außenkante des zweiteiligen Absaugkanals, somit einem horizontalen Abstand von etwa vier Metern von der östlichen Tunnelwand, und einer Unterkante der Schürze in einer Höhe von 2,5 m über dem jeweiligen Bodenniveau.

Der dritte dargestellte Berechnungsfall berücksichtigt das Brandszenario für die Tram sowie die identischen Maßnahmen zur Rauchableitung, jedoch ohne die Anordnung der durchgehenden Rauchschürze in Tunnellängsrichtung.

8.1 Berechnungsergebnisse für Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“

In der Frage der Rauchausbreitung und wirksamen Rauchableitung werden zunächst die Berechnungsergebnisse zu den sich einstellenden Strömungsverhältnissen und Geschwindigkeiten in den jeweiligen freien Öffnungen des Berechnungsgebiets sowie an den Absaugstellen der maschinellen Entrauchung beispielhaft im zeitlichen Abstand von fünf Minuten über die gesamte Simulationsdauer von 30 Minuten dargestellt.

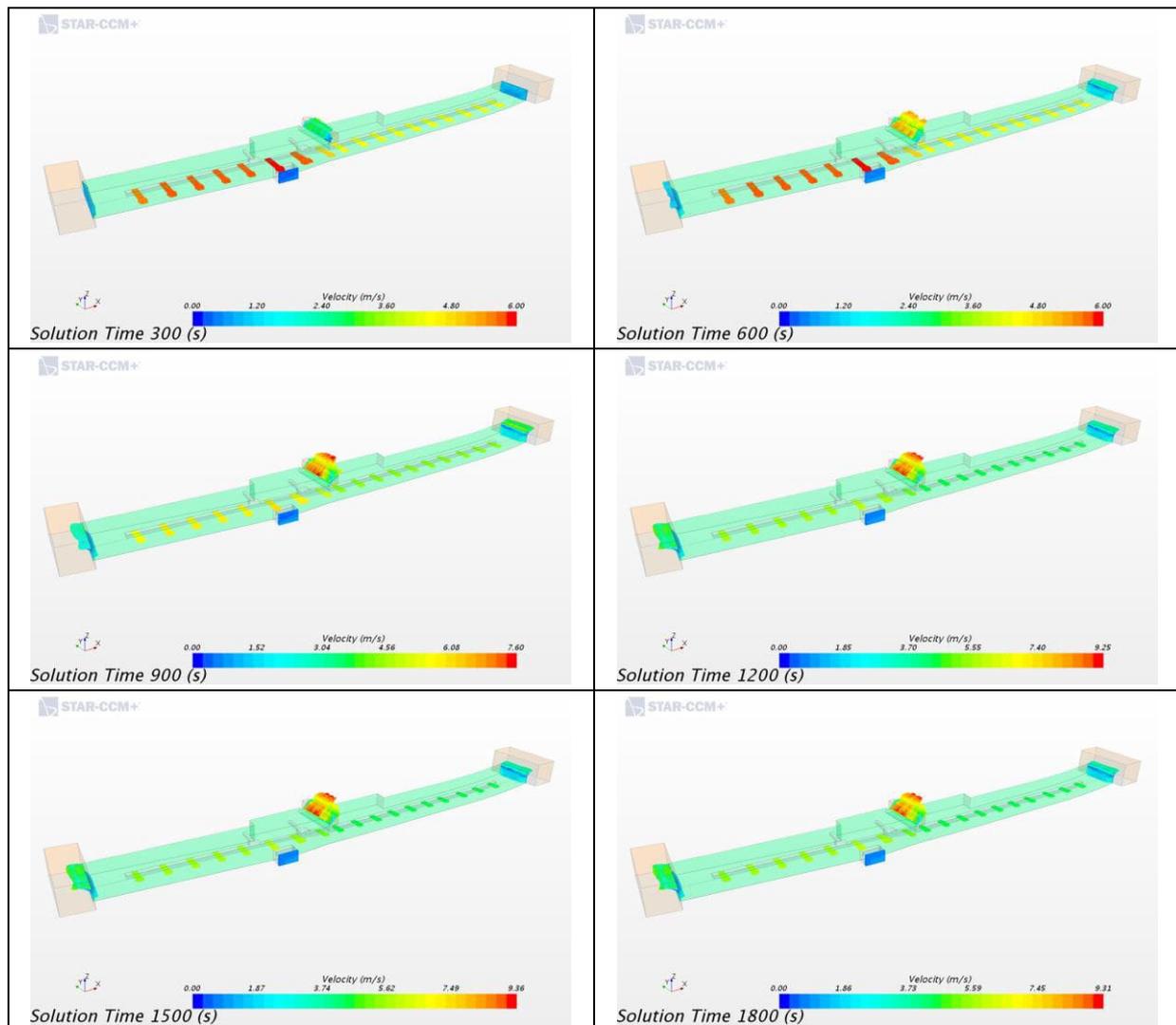


Abbildung 9 Strömungsverhältnisse in den freien Öffnungen und an den Absaugstellen der MRA zur 5., 10., 15., 20., 25. und 30. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“

Die Auswertung der Strömungsverhältnisse zeigt, dass sowohl über die maschinelle Entrauchung als auch die ständigen Öffnungsquerschnitte der Tunnelportale sowie die vertikale Rauchableitungsöffnung am Höhenversprung der Tunneldecke eine Rauchableitung erfolgt. Wobei durch das frühzeitige Aktivieren der maschinellen Rauchableitung und der gleichmäßigen Verteilung der Absaugstellen über die Tunnellängsrichtung, deren Wirkung bereits frühzeitig einsetzt. Die Wirkung der Rauchableitung über die vertikale Rauchableitungsöffnung sowie die Tunnelportale setzt entsprechend der Rauchausbreitung und dem hierfür erforderlichen thermischen Überdruck an den Öffnungen erst zeitversetzt ein und steigert sich dann aber mit zunehmender Temperatur und Stärke der Rauchsicht, welche wiederum von der jeweils vorliegenden Brandleistung abhängig sind. Auch zeigt sich, dass an den beiden Tun-

nelportalen sich sowohl eine Abströmung im oberen Bereich der Öffnungen sowie eine Einströmung von Außenluft im unteren Bereich der Öffnungen einstellt. Im Bereich des offenen Zugangs zum S-Bahn-Bahnsteig (Zugangsbauwerk Ost) werden durch die dortige feste Rauchschräge Brand- und Rauchgase an einem Überströmen von der UVR in das Zugangsbauwerk Ost wirksam gehindert, weshalb diese Öffnung als reine Nachströmöffnung für Außenluft wirksam wird. Diese Strömungsverteilung kann auch über die Bilanzgröße des Massenstroms für die jeweiligen Öffnungen bzw. die Absaugstellen der maschinellen Entrauchung dargestellt werden, welche in Diagrammform in der nachfolgenden Abbildung gezeigt ist.

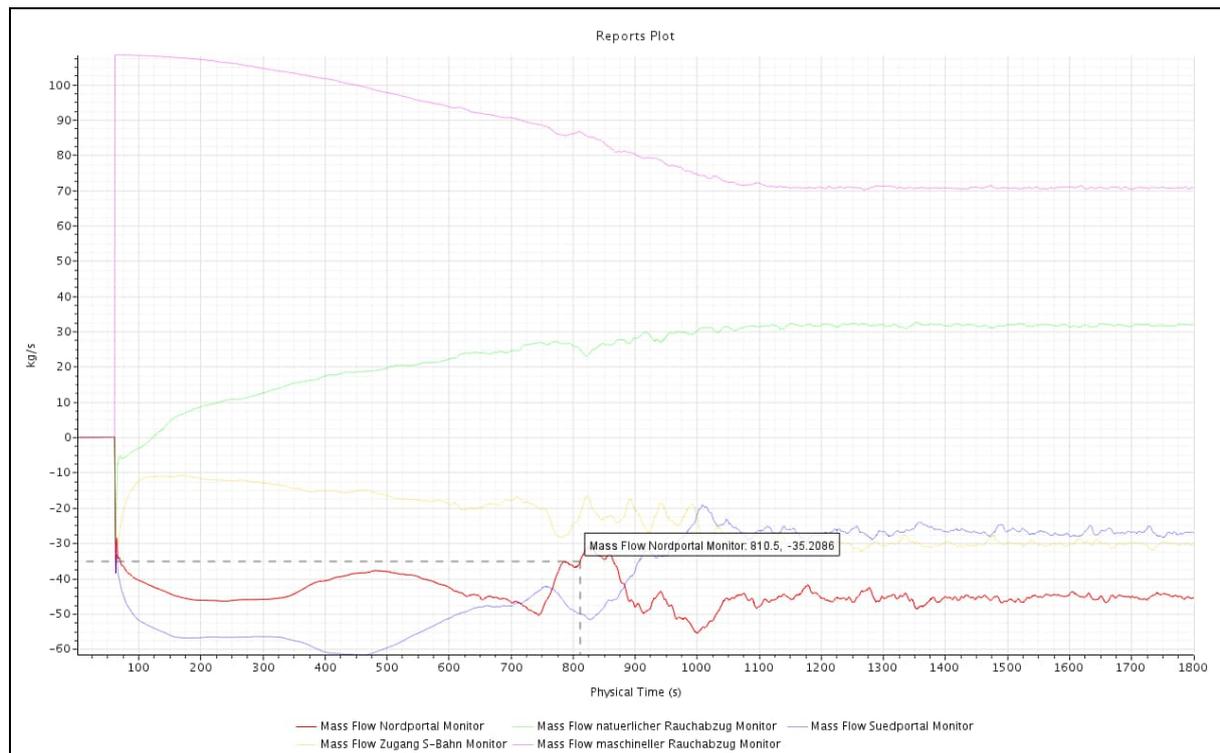


Abbildung 10 Massenstrombilanz an den freien Öffnungsflächen und den Absaugstellen der MRA bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“

Diese Auswertung zeigt die nach Aktivierung unmittelbar einsetzende Wirkung der maschinellen Absaugung. Die Abnahme des absaugten Massenstroms ergibt aufgrund der steigenden Gastemperatur der abgeführten Luft und somit der temperaturbedingten Reduzierung der Dichte. Auch ist anzumerken, dass zu Beginn zunächst nur im zentralen Tunnelbereich Rauchgase vorhanden sind und abgeführt werden. Die Wirkung der vertikalen Rauchableitungsoffnung wird ebenfalls anhand der Massenstrombilanz sichtbar. So setzt nach einer kurzen Phase ohne ausreichend anstehende Heißgase die wirksame Rauchableitung ein. Nach Erreichen der maximalen Brandleistung und dem anschließenden Verbleiben der Brandleistung auf dem Maximalniveau stellt sich an allen Öffnungen sowie an den Absaugstellen eine in wesentlichen stationäre Massenstrombilanz ein.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 34

Um die Ausbreitung der heißen Brandgase im Tunnelluftraum und die sich hierdurch ergebende Entwicklung der Temperaturen aufzuzeigen, werden in der nachfolgenden Abbildung die Gastemperaturen im Luftraum, erneut beispielhaft im zeitlichen Abstand von fünf Minuten über die gesamte Simulationsdauer von 30 Minuten, dargestellt.

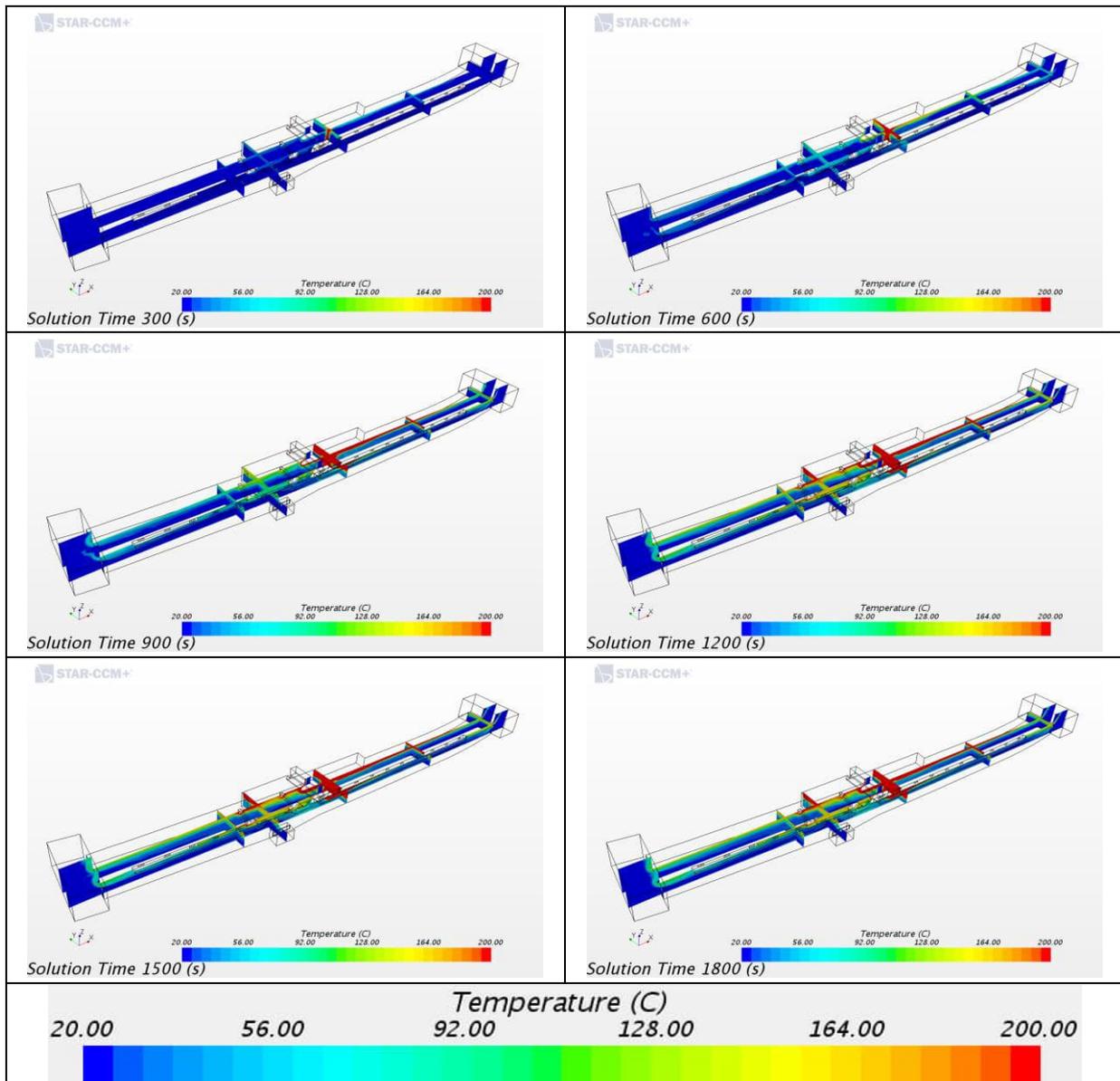


Abbildung 11 Temperaturen im Luftraum der Umweltverbundröhre zur 5., 10., 15., 20., 25. und 30. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“

Die Auswertung der Gastemperaturen zeigt über die gesamte Simulationsdauer eine stabile Temperaturschichtung unter der Tunneldecke. Entsprechend können die dargestellten Strömungsverhältnisse mit der Temperaturverteilung gut in Übereinstimmung gebracht werden,

was die Plausibilität der dargestellten Strömungsverhältnisse und auch der nachfolgend dargestellten Rauchausbreitung und Rauchableitung zeigt.

Nachfolgend werden entsprechend die Rauchausbreitung und Rauchableitung aus dem Luftraum der Umweltverbundröhre über die Auswertung der optischen (Rauch-)Dichte dargestellt. Die Berechnungsergebnisse werden dabei in einer Schnittfläche in einer Höhe von 2,5 m über dem jeweiligen Bodenniveau dargestellt. Die Schnittfläche folgt somit dem zu beiden Tunnelportalen hin ansteigenden Bodenverlauf. Darüber hinaus werden als Orientierungshilfe die Ergebnisse auch in einer Höhe von 2,0 m dargestellt, um das Brandsimulationsergebnis in kritischen Bereichen besser bewerten zu können. Die Einfärbung ist dabei einem Berechnungswert der optischen Dichte zugeordnet, welcher in der ebenfalls dargestellten Farb-Werte-Skala ersichtlich ist. Hierbei wurde bewusst ein Skalenbereich gewählt, welcher über den Auswertegrenzwert von $0,13 \text{ m}^{-1}$ hinausgeht, um eine Abschätzung zum Verlauf der optischen Dichte über dem Grenzwert in gewissem Rahmen zu ermöglichen. Zur besseren Erkennbarkeit wurde der Auswertegrenzwert von $0,13 \text{ m}^{-1}$ durch eine schwarze Einfärbung im Farbverlauf hervorgehoben.

Die bezüglich des zu führenden Nachweises, der ausreichenden Verhältnisse in der Phase der Selbstrettung, besonders relevanten Abbildungen zwischen der sechsten und zehnten Simulationsminute sind zur verbesserten Detailbetrachtung noch einmal in der Anlage in einem größeren Format dargestellt.

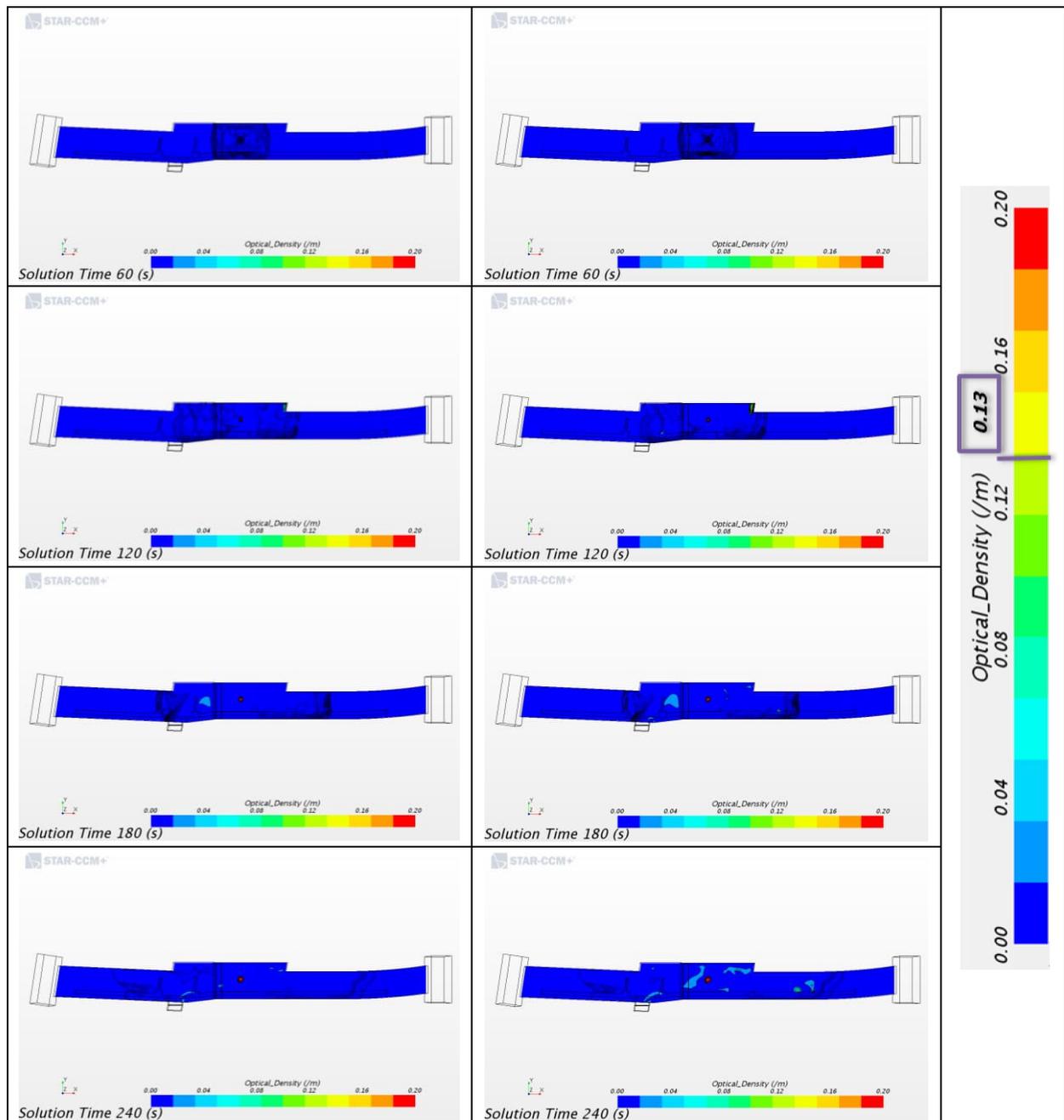


Abbildung 12 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 1. und 4. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

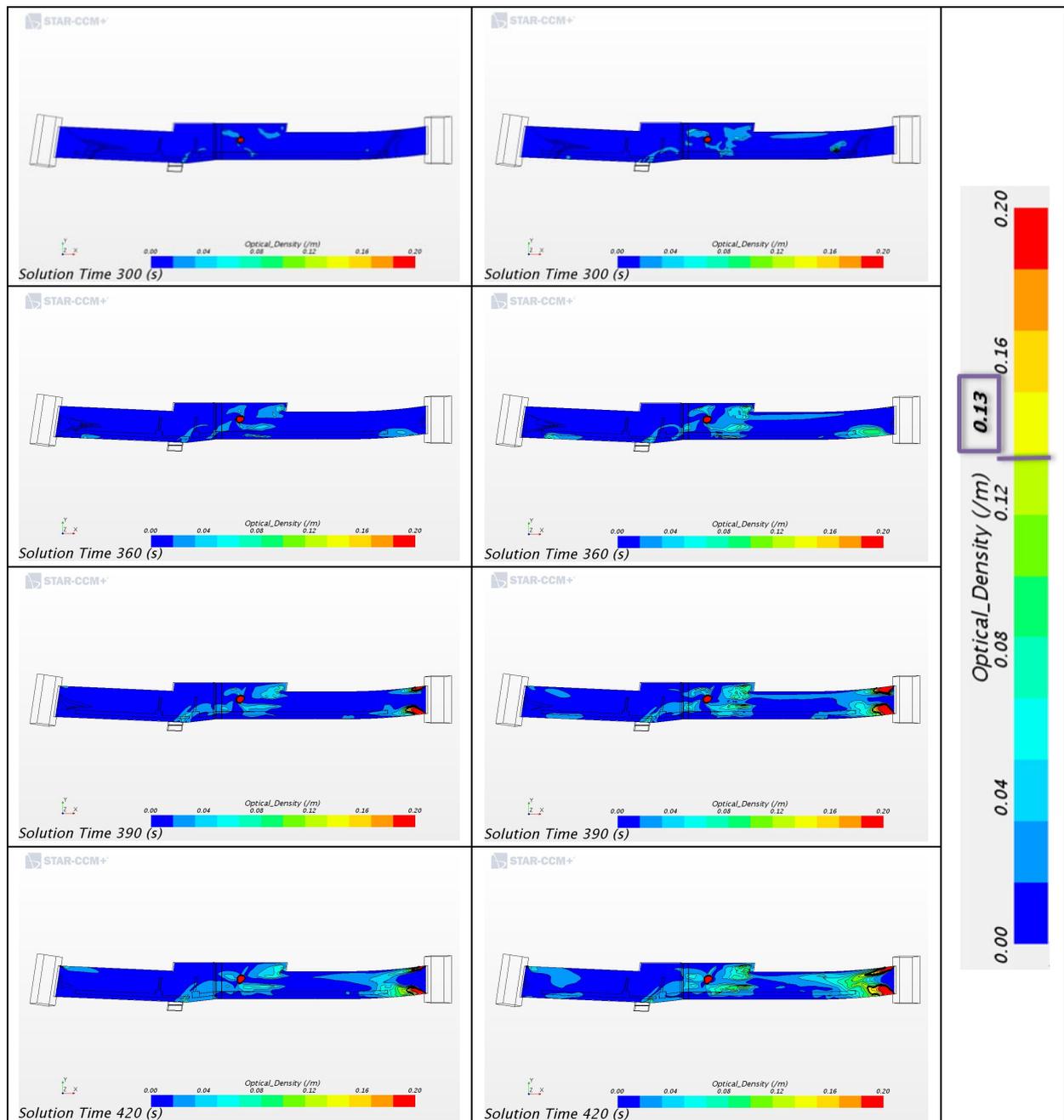


Abbildung 13 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 5. und 7. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

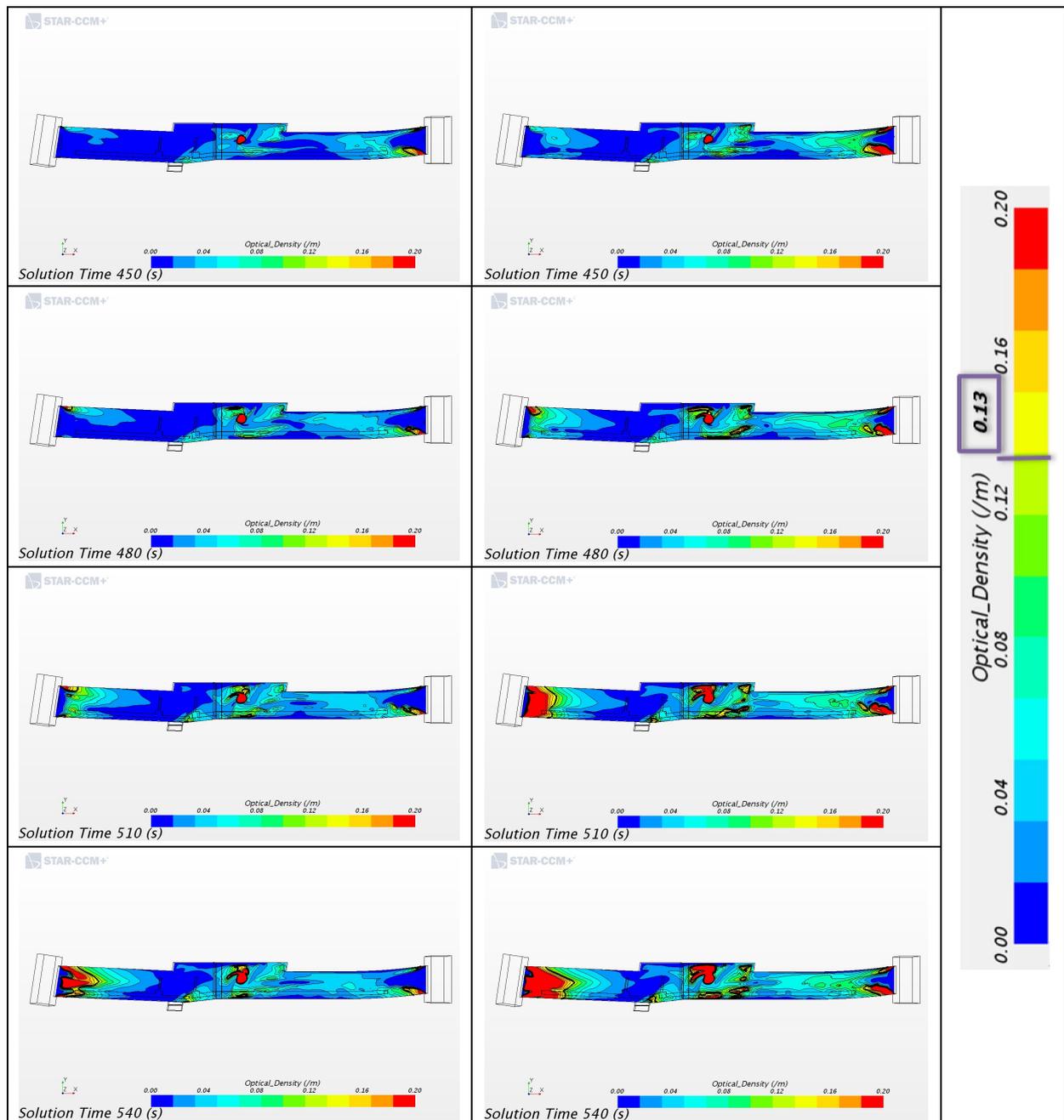


Abbildung 14 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 7,5. und 9. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 39

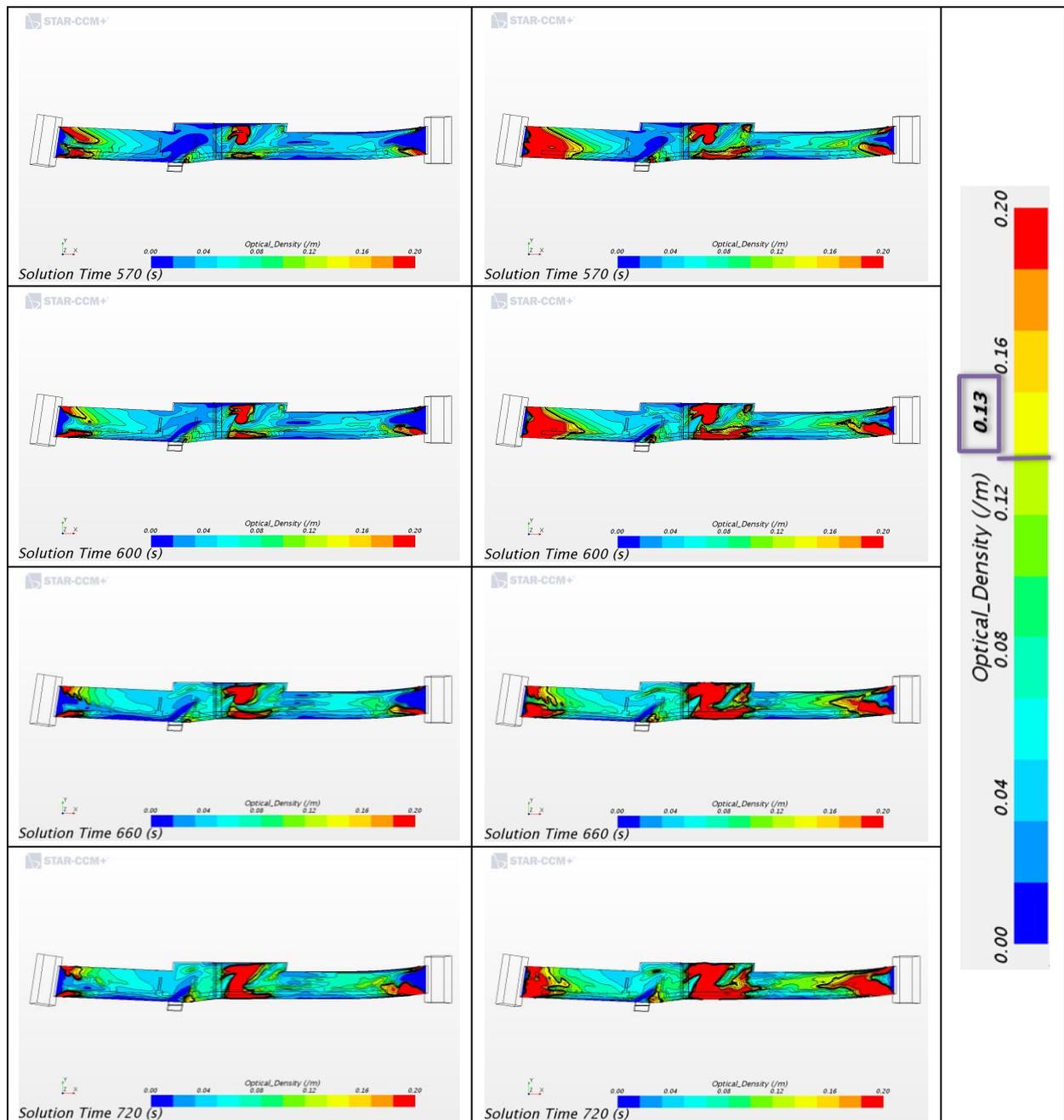


Abbildung 15 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 9,5. und 12. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 40

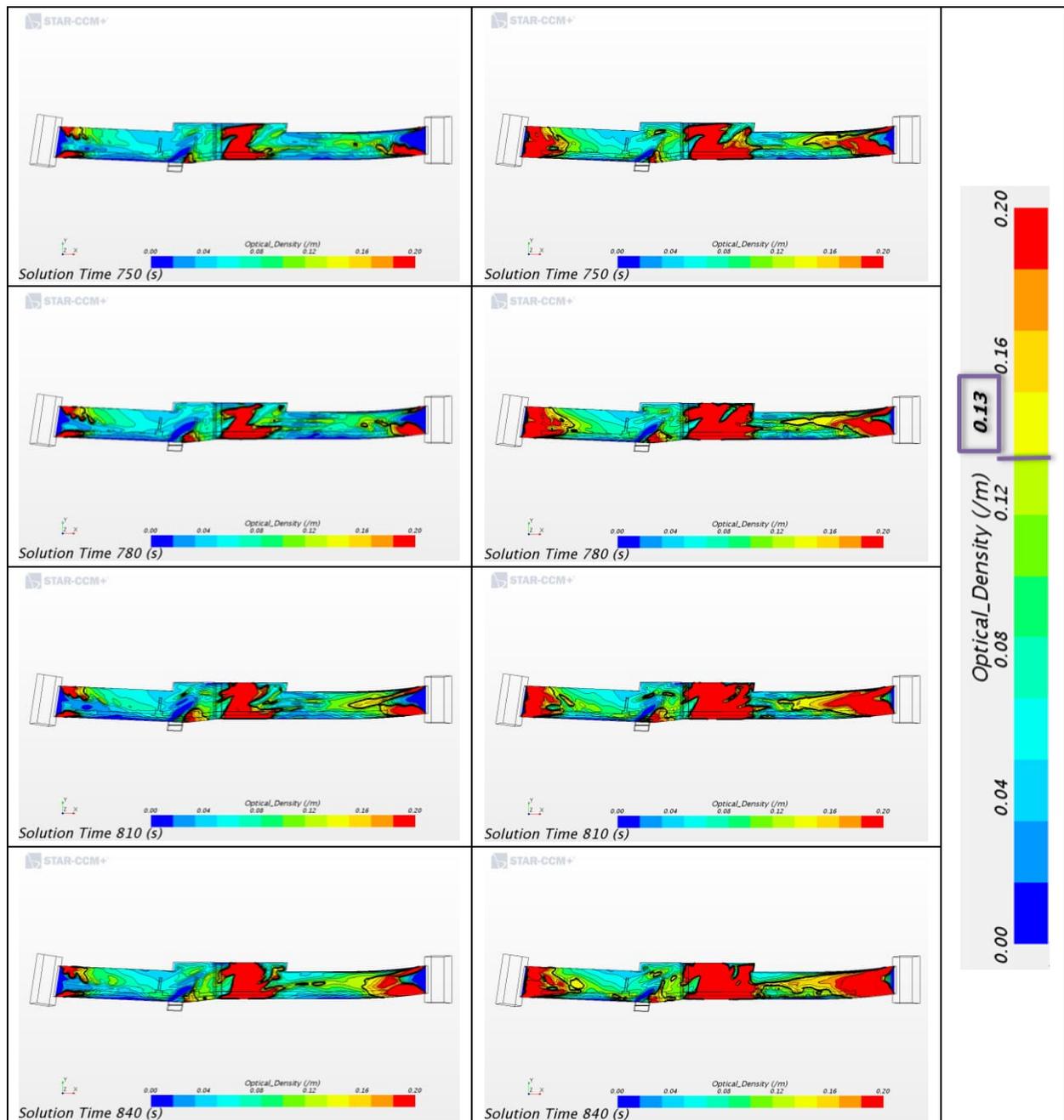


Abbildung 16 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 12,5. und 14. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

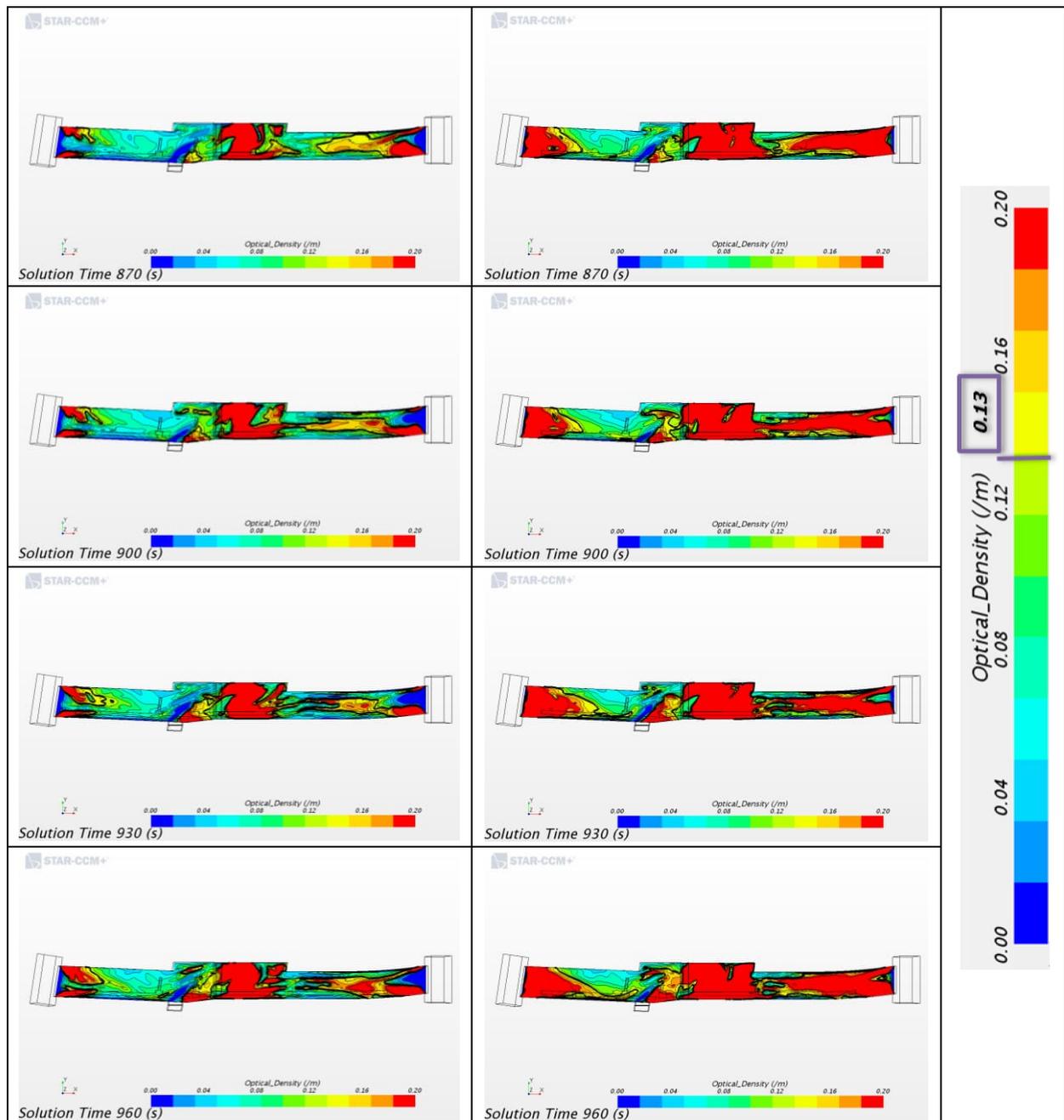


Abbildung 17 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 14,5. und 16. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

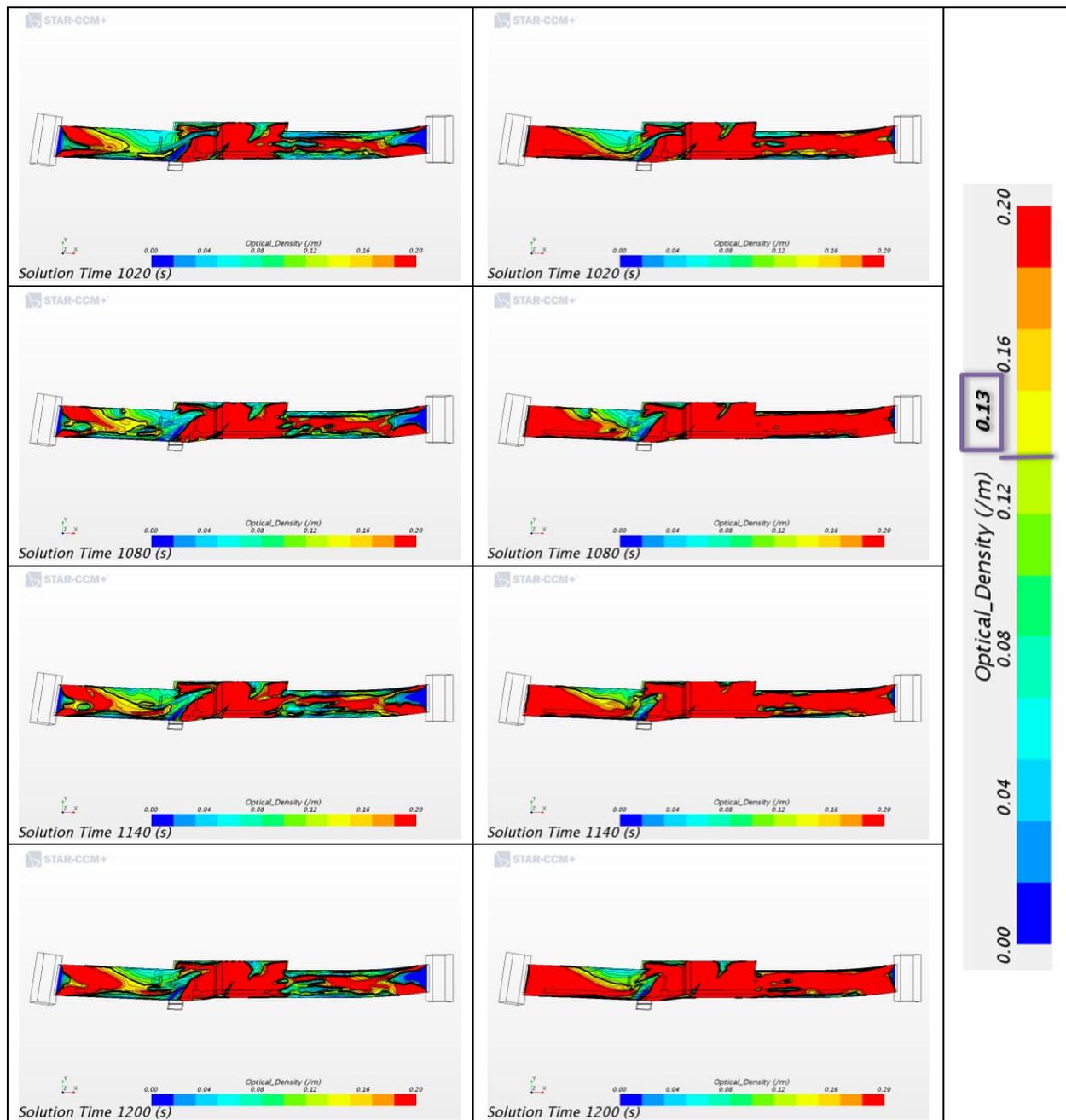


Abbildung 18 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 17. und 20. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

Die Auswertung der zeitlichen Entwicklung der Rauchausbreitung im Luftraum der Umweltverbundröhre zeigt mit fortschreitender Branddauer und somit auch mit stark ansteigender Brandleistung die Ausbildung einer Heißgasschicht unter der Tunneldecke, welche aufgrund

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 43

der Brandausbreitung in ihrer Stärke zunimmt und somit immer tiefer im Luftraum nach unten reicht. Auch entsteht eine Scherströmung zwischen zu den Tunnelportalen hin strömenden Rauchgasen und der zur Brandquelle hin einströmenden Zuluft, wodurch zusätzlich ein Raucheintrag in tiefere Bereiche erfolgt.

Ab etwa achteinhalb Minuten wird am Südportal das Grenzkriterium für die Selbstrettungsphase in einer Höhe von 2,5 m über die gesamte Tunnelbreite nicht mehr erfüllt. In den übrigen Bereichen wird der Grenzwert bis etwa zur zehnten Minute bis auf lokal begrenzte Randbereiche des nördlichen Tunnelportals unterschritten bzw. nicht erreicht. Die Auswertung in einer Höhe von 2,0 m zeigt dabei deutlich kleinere Bereiche, in welchen der Auswertegrenzwert der optischen Dichte erreicht oder überschritten wird, so dass trotz lokal erhöhter Rauchkonzentration das Leistungskriterium von ausreichend raucharmen Verhältnissen im Mittel von 2,5 m Höhe über die genannten Zeiträume als erfüllt angesehen werden kann.

Nachfolgend werden zur Bewertung der Verrauchungsverhältnisse hinsichtlich der Fremddretungsphase die Berechnungsergebnisse der optischen Dichte für die Auswertehöhen regelkonform von 1,5 m und ferner als Orientierungshilfe für kritische Bereiche auch für 1,0 m dargestellt.

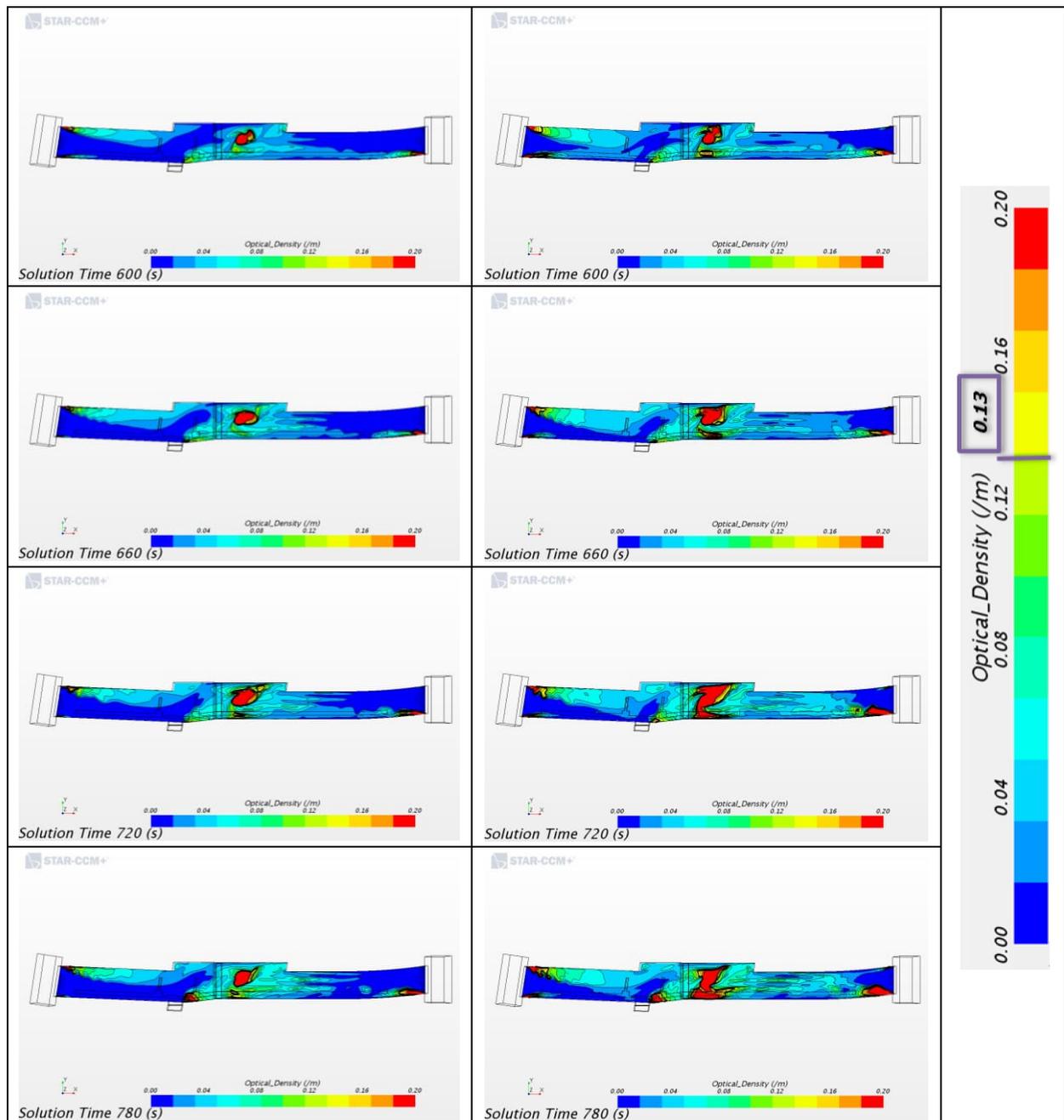


Abbildung 19 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 10. und 13. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 45

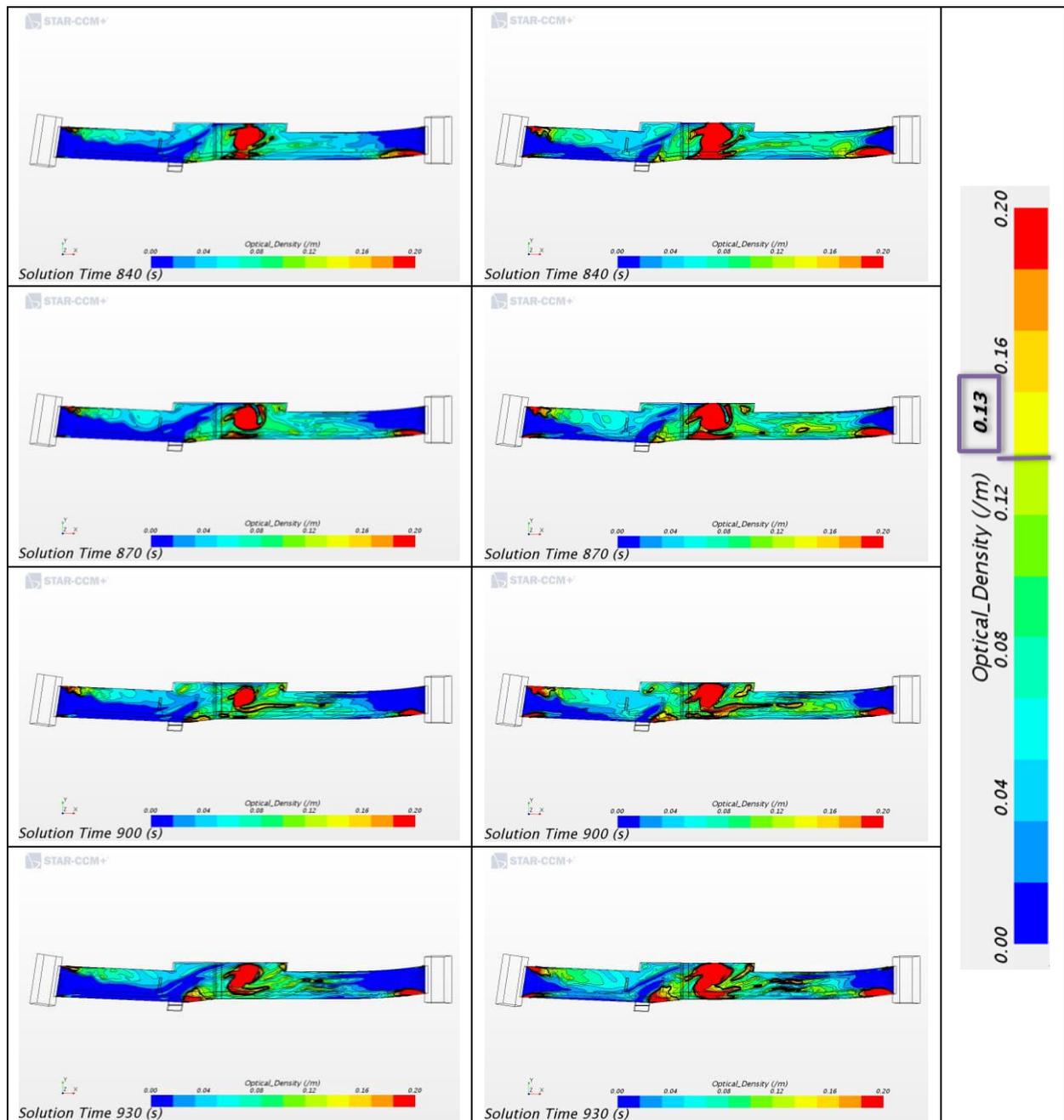


Abbildung 20 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 14. und 15,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

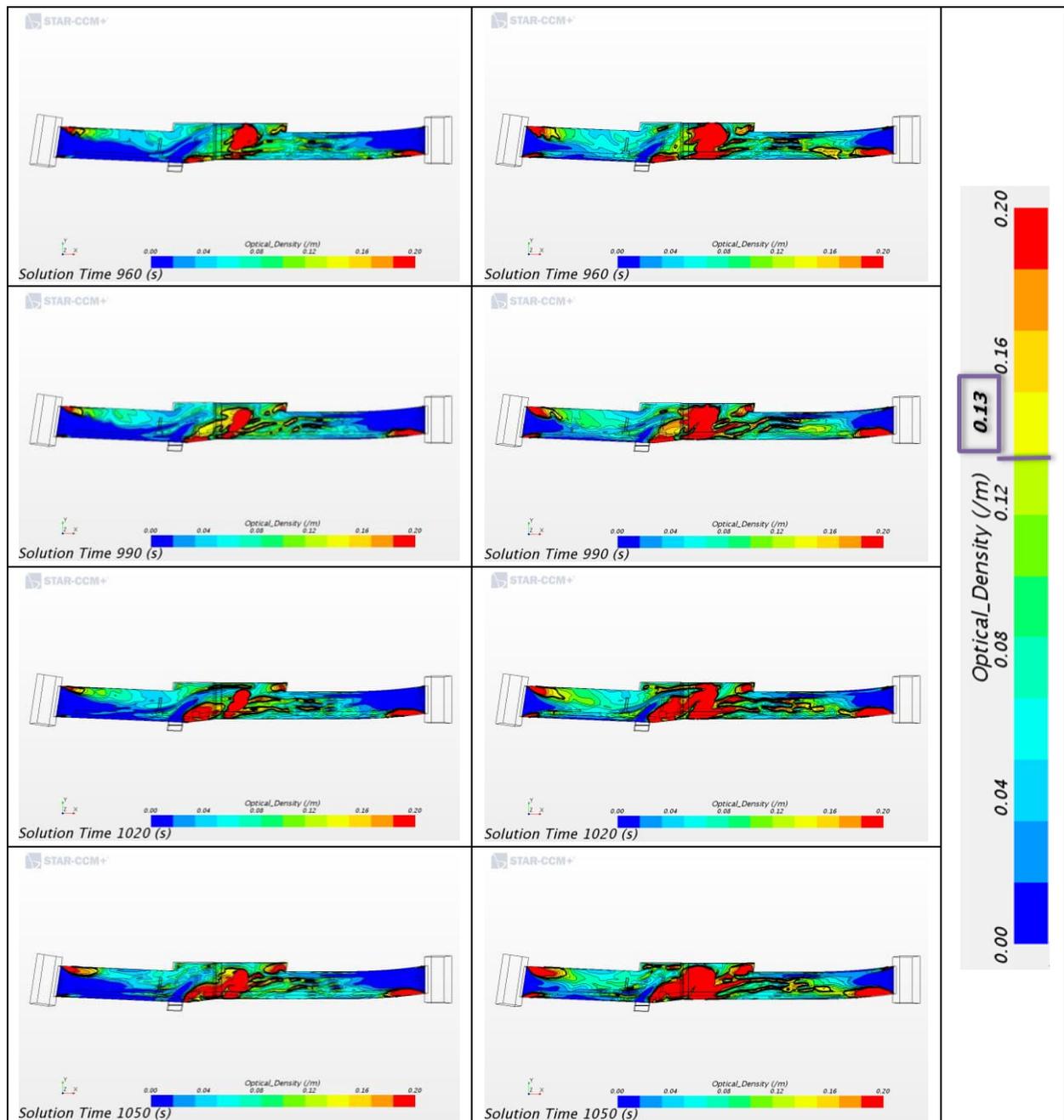


Abbildung 21 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 16. und 17,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“ links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 47

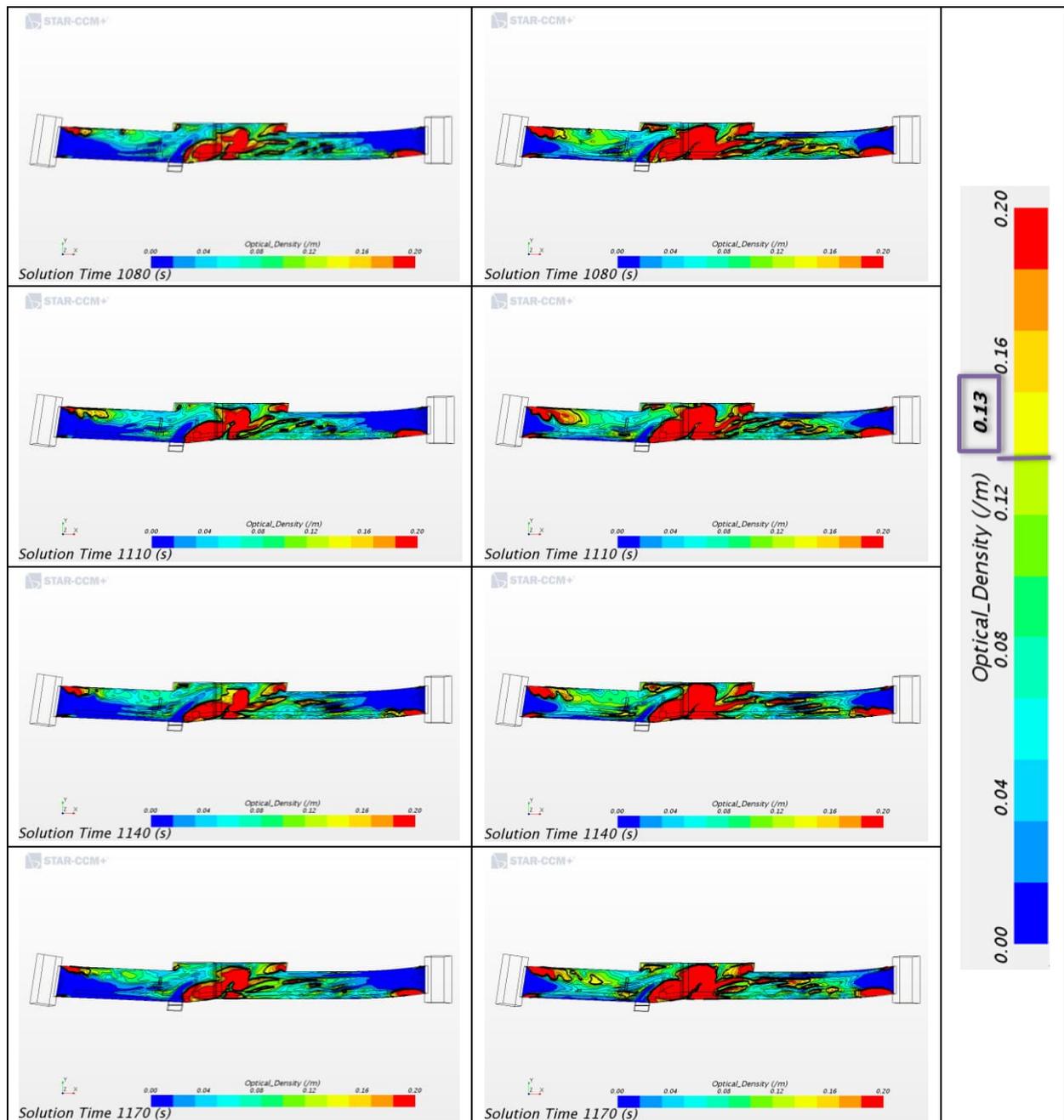


Abbildung 22 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 18. und 19,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

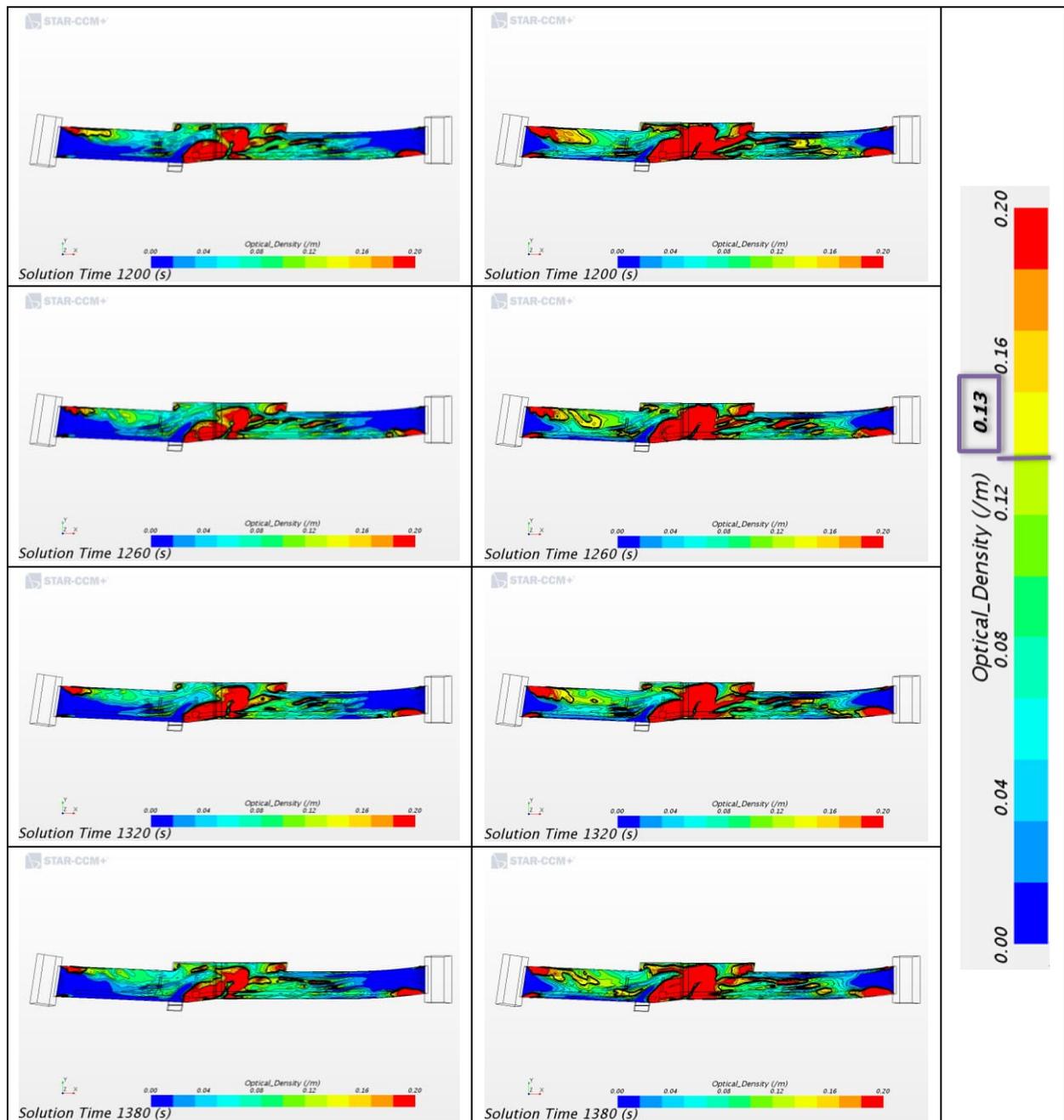


Abbildung 23 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 20. und 23. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“ links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

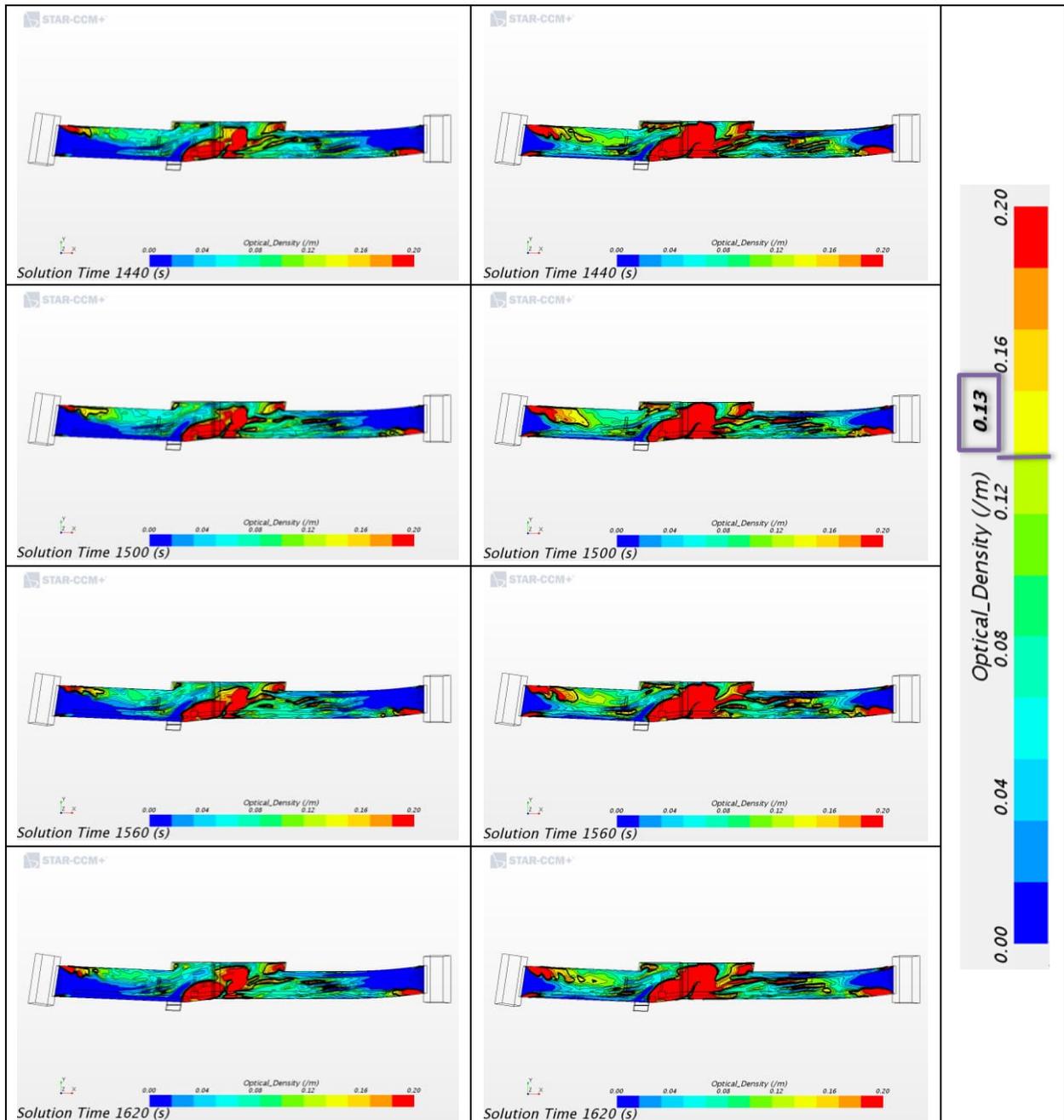


Abbildung 24 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 24. und 27. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 50

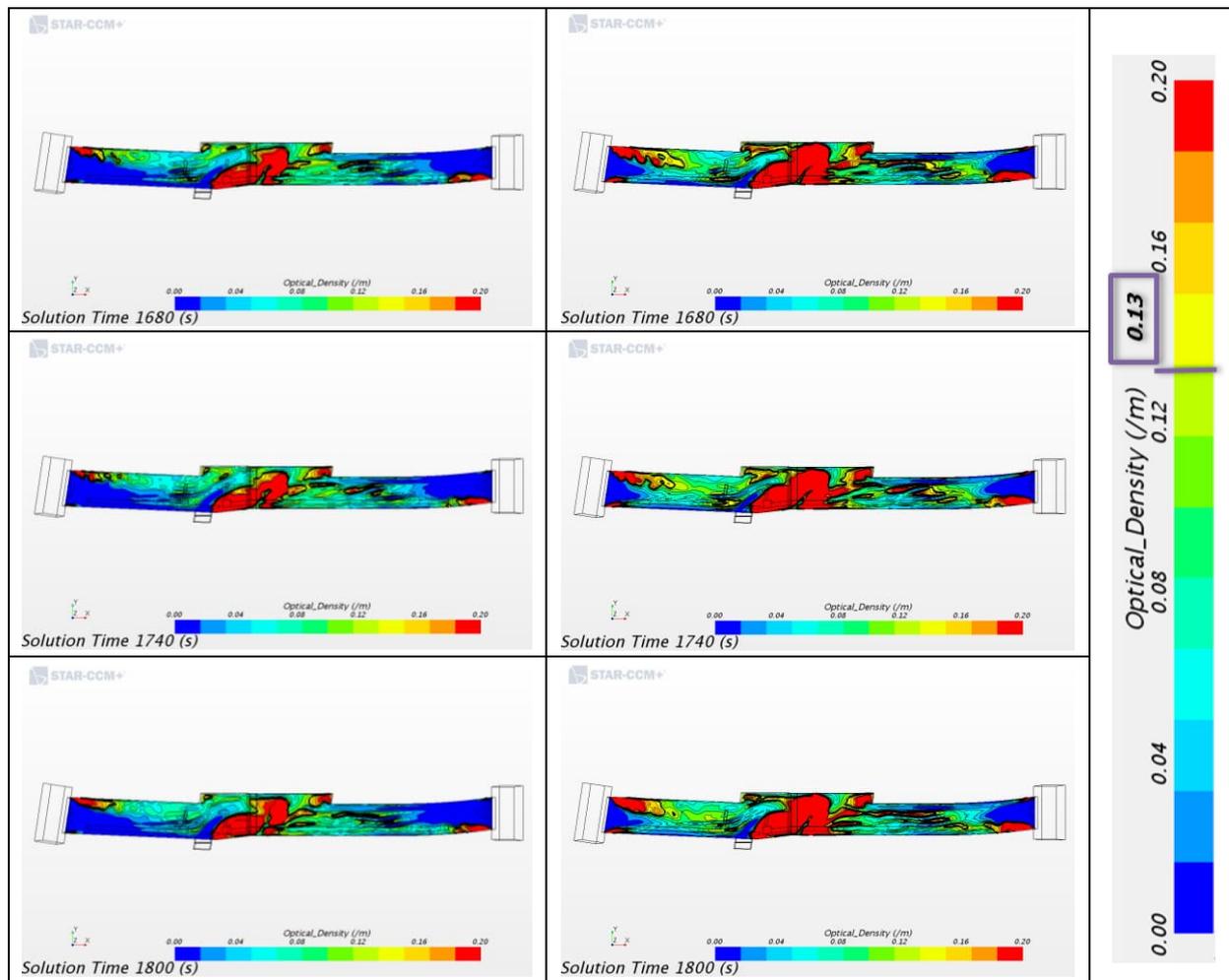


Abbildung 25 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 28. und 30. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“; links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

Die Darstellung der Ergebnisse der optischen Rauchdichte in der Auswertehöhe von 1,5 m über dem jeweiligen Bodenniveau zeigt, ebenso wie die übrigen bisher gezeigten Auswertung des Berechnungsfalls, einen Anstieg der Rauchkonzentration mit zunehmender Branddauer und somit entsprechend einer steigenden Brandleistung. Ab dem Erreichen der maximalen Brandleistung nach rund 18 Minuten bleiben die Ergebnisse im Wesentlichen auf einem konstanten Niveau bis zum Ende der Betrachtungsdauer von 30 Minuten. Das Grenzkriterium für die optische Dichte in einer Auswertehöhe von 1,5 m wird dabei lokal begrenzt erreicht oder überschritten. Jedoch sind diese Bereiche im Wesentlichen auf dem Brandherdnahbereich sowie die wandnahen Bereiche an den Tunnelportalen begrenzt. Auch zeigt hier die zusätzliche Auswertung in einer Höhe von 1,0 m über dem jeweiligen Bodenniveau, dass

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 51

es sich um lokal begrenzte Bereiche und keine generelle Überschreitung der Leistungsgrenze handelt.

Um die dargestellte Auswertung der Rauchausbreitung entlang der gezeigten Schnitthöhen, insbesondere hinsichtlich der Bewertung der Ergebnisse bezüglich nur lokal begrenzter Überschreitungen, zu plausibilisieren und die räumliche Verteilung der Brand- und Rauchgase einfacher nachvollziehen zu können, werden nachfolgend ergänzende Ergebnisdarstellungen der Berechnungsgröße der optischen Dichte in Vertikalschnitten im zeitlichen Verlauf gezeigt.

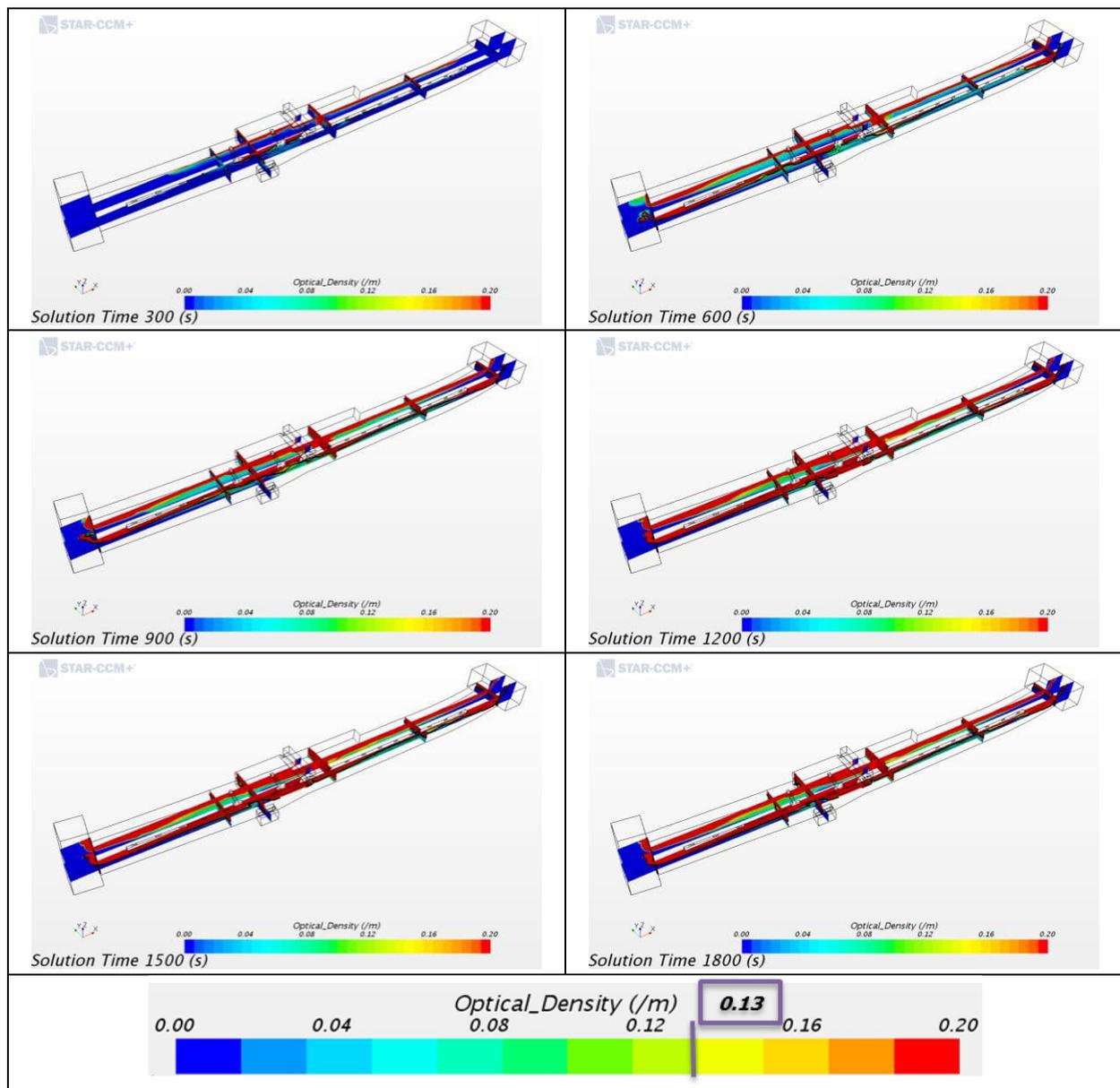


Abbildung 26 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte mit Darstellung in Vertikalschnitten Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 52

Diese Auswertung der optischen Dichten entlang der vertikalen Schnittebenen im Tunnelverlauf zeigt deutlich die sich ausbildende stabile Rauchsichtung unter der Tunneldecke, welche sich mit zunehmender Branddauer und Brandintensität weiter in Richtung der Tunnelportale ausbreitet. Eine stabile Rauchsichtung bleibt dabei über die Betrachtungsdauer erhalten. Zeitlich und lokal begrenzte Bereiche mit erhöhter Rauchkonzentration können teilweise auf die sich ausbreitende Front der Rauchsichtung (Rauchwalze) zurückgeführt werden.

Um insbesondere die Situation der lokal begrenzten stärkeren Verrauchung in den wandnahen Bereiche des südlichen Tunnelportals im Zeitraum zwischen der achten und zehnten Simulationsminute noch einmal genauer auswerten zu können, sind in der nachfolgenden Abbildung eine Detailauswertung der Grenzfläche für eine optische Dichte mit dem Wert $0,13 \text{ m}^{-1}$ als so genanntes Iso-Surface (Verbindung aller Punkte mit identischem Wert zu einer Auswertefläche) mit der Auswertehöhe von 2,5 m bezüglich der optischen Dichte kombiniert. Auch diese Auswertung findet sich noch einmal in vergrößerter Darstellung in der Anlage.

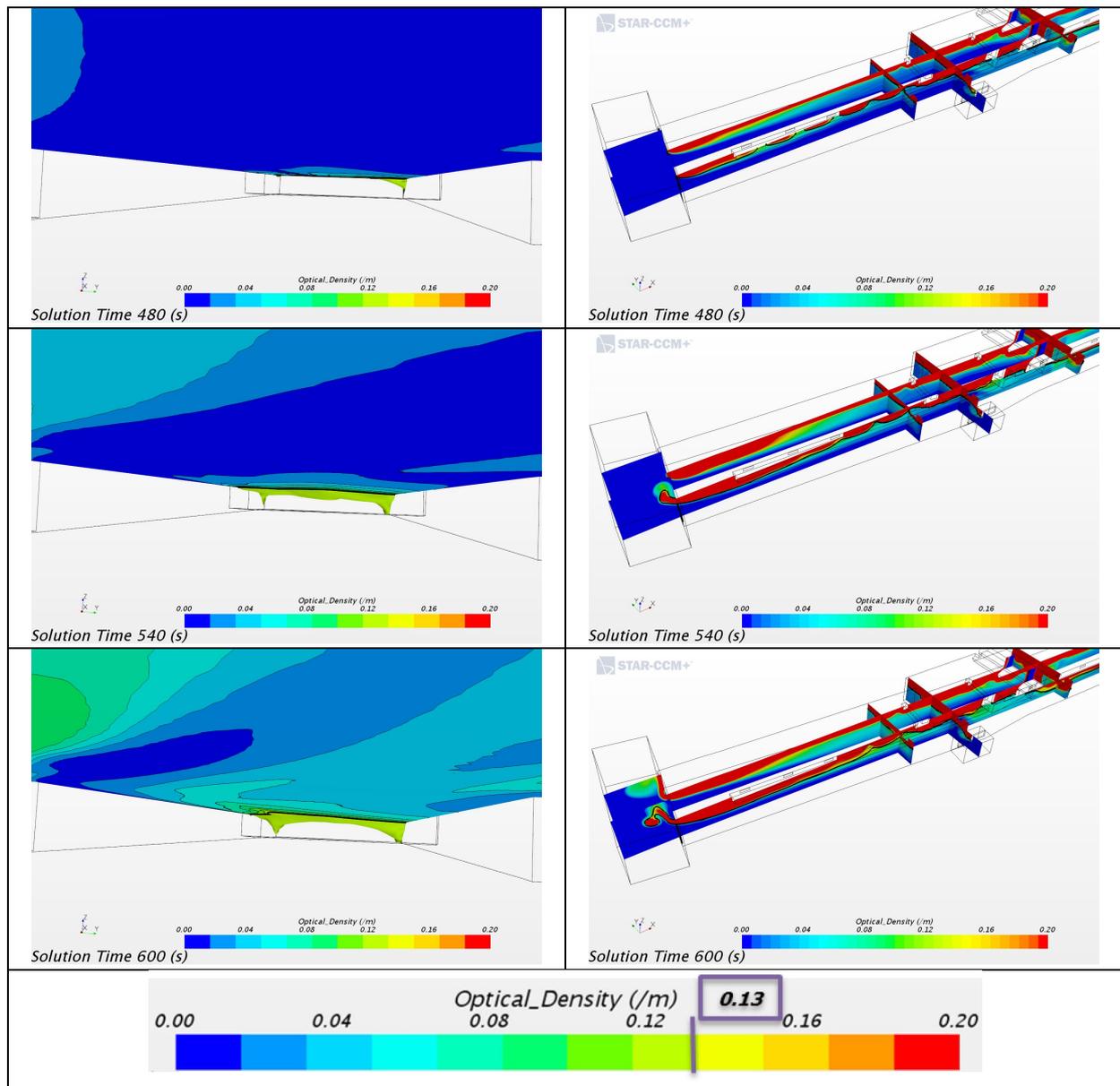


Abbildung 27 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte, Detailbetrachtung der 8. - 10. Simulationsminute Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“, links: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, rechts: Vertikalschnitte

Auch diese Auswertung bestätigt die Bewertung einer nur lokal erhöhten Rauchkonzentration in den wandnahen Bereichen, welche tiefer herabreicht. Die sich über die gesamte Tunnelbreite einstellende erhöhte Rauchgaskonzentration reicht nach der achten Minute über die Auswertehöhe von 2,5 m herab, ohne jedoch eine vollständige Verrauchung des gesamten Portalbereichs darzustellen.

8.2 Berechnungsergebnisse für Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“

Für diesen Berechnungsfall mit Berücksichtigung der durchgehenden Rauchschürze in Tunnelängsrichtung werden erneut zunächst die sich einstellenden Strömungsverhältnisse aufgrund der Rauchausbreitung sowie der Maßnahmen zur Rauchableitung im Zeitintervall von fünf Minuten über die Betrachtungsdauer von 30 Minuten dargestellt.

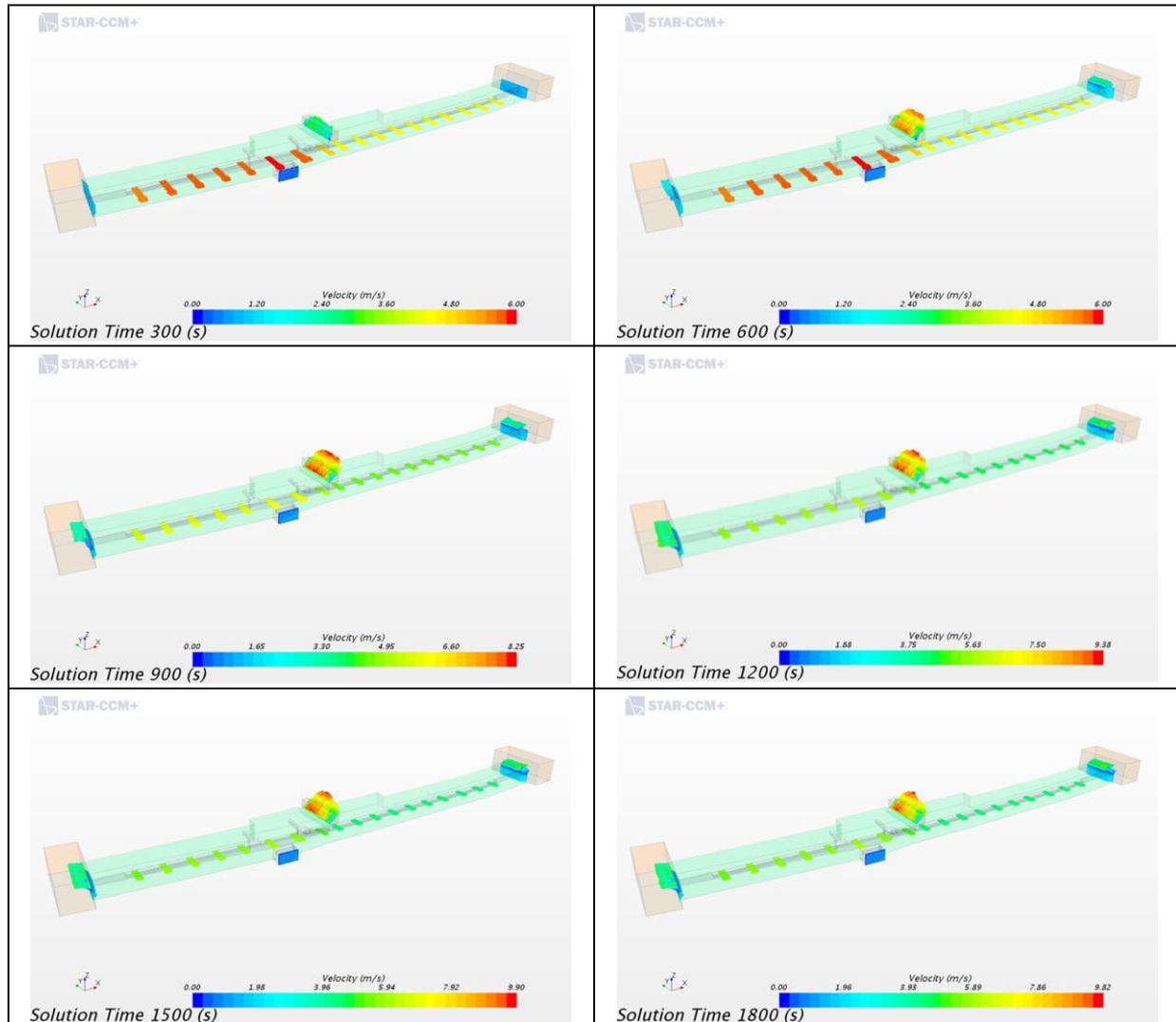


Abbildung 28 Strömungsverhältnisse in den freien Öffnungen und an den Absaugstellen der MRA zur 5., 10., 15., 20., 25. und 30. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“

Bezüglich der sich einstellenden Strömungsverhältnisse zeigt sich im Abgleich zum vorgeannten Berechnungsfall eine sehr ähnliche Situation hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung

und der dabei erreichten Strömungsgeschwindigkeiten. Eine Abweichung zeigt sich im Bereich der Ausströmung der Rauchgase an den Tunnelportalen, welche bis etwa zur 15. Simulationsminute durch die Anordnung der Rauchschrürze jeweils deutlich vom östlichen Bereich des Rad- und Fußwegs abgehalten wurde.

Auch für diesen Berechnungsfall ist die Bilanzgröße des Massenstroms für die jeweiligen Öffnungen bzw. die Absaugstellen der maschinellen Entrauchung in Diagrammform dargestellt.

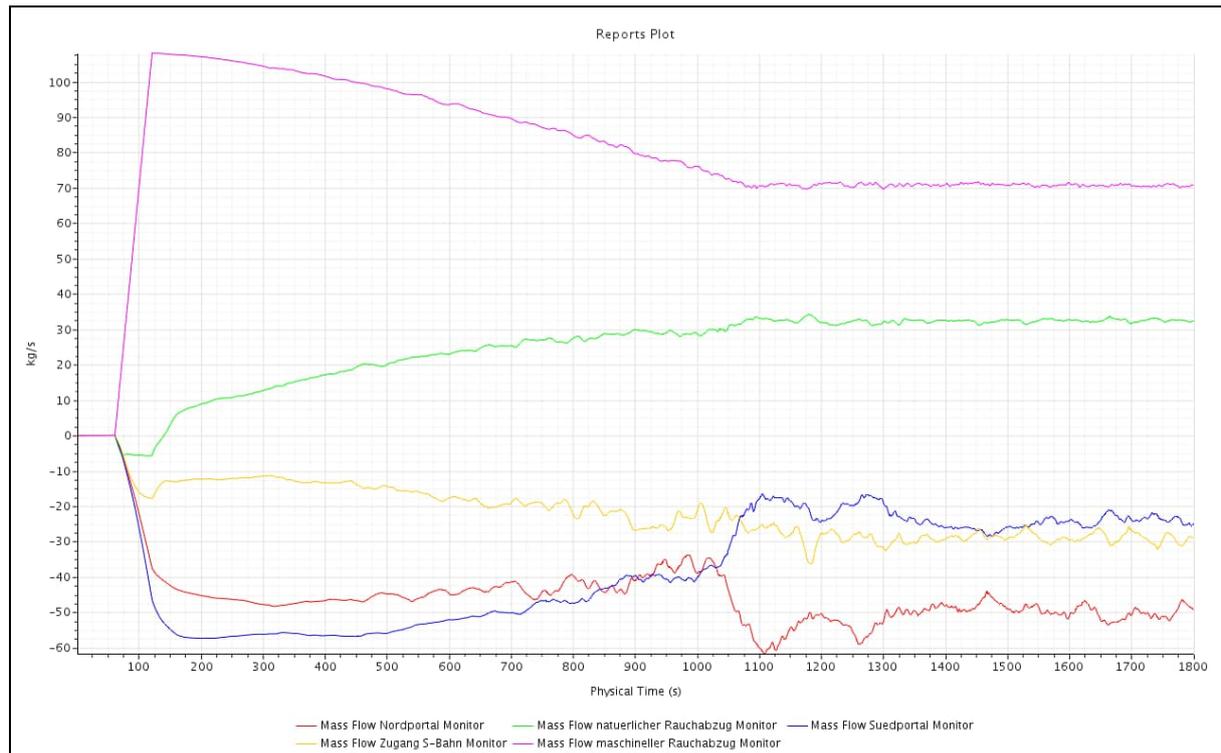


Abbildung 29 Massenstrombilanz an den freien Öffnungsflächen und den Absaugstellen der MRA bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“

Die Auswertung der Massenstrombilanz zeigt ebenfalls gegenüber dem vorhergehenden Berechnungsfall sehr ähnliche Verläufe. Somit hat die Anordnung der Rauchschrürze in Tunnel-längsrichtung keinen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtbilanz der Rauchableitung aus dem Luftraum der Umweltverbundröhre.

Für den Massenstromverlauf der maschinellen Absaugung ist die in diesem Berechnungsfall zusätzlich berücksichtigte Anlaufzeit des Absaugsystems mit einer zeitlichen Entwicklung des Absaugvolumenstroms ab der Aktivierung nach einer Simulationsdauer von einer Minute linear von Null innerhalb einer weiteren Minute auf den maximalen Abluftvolumenstrom zu erkennen.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 56

Die sich einstellende Entwicklung der Gastemperaturen im Tunnelraum sind in der nachfolgenden Abbildung erneut beispielhaft im zeitlichen Abstand von fünf Minuten über die gesamte Simulationsdauer von 30 Minuten dargestellt.

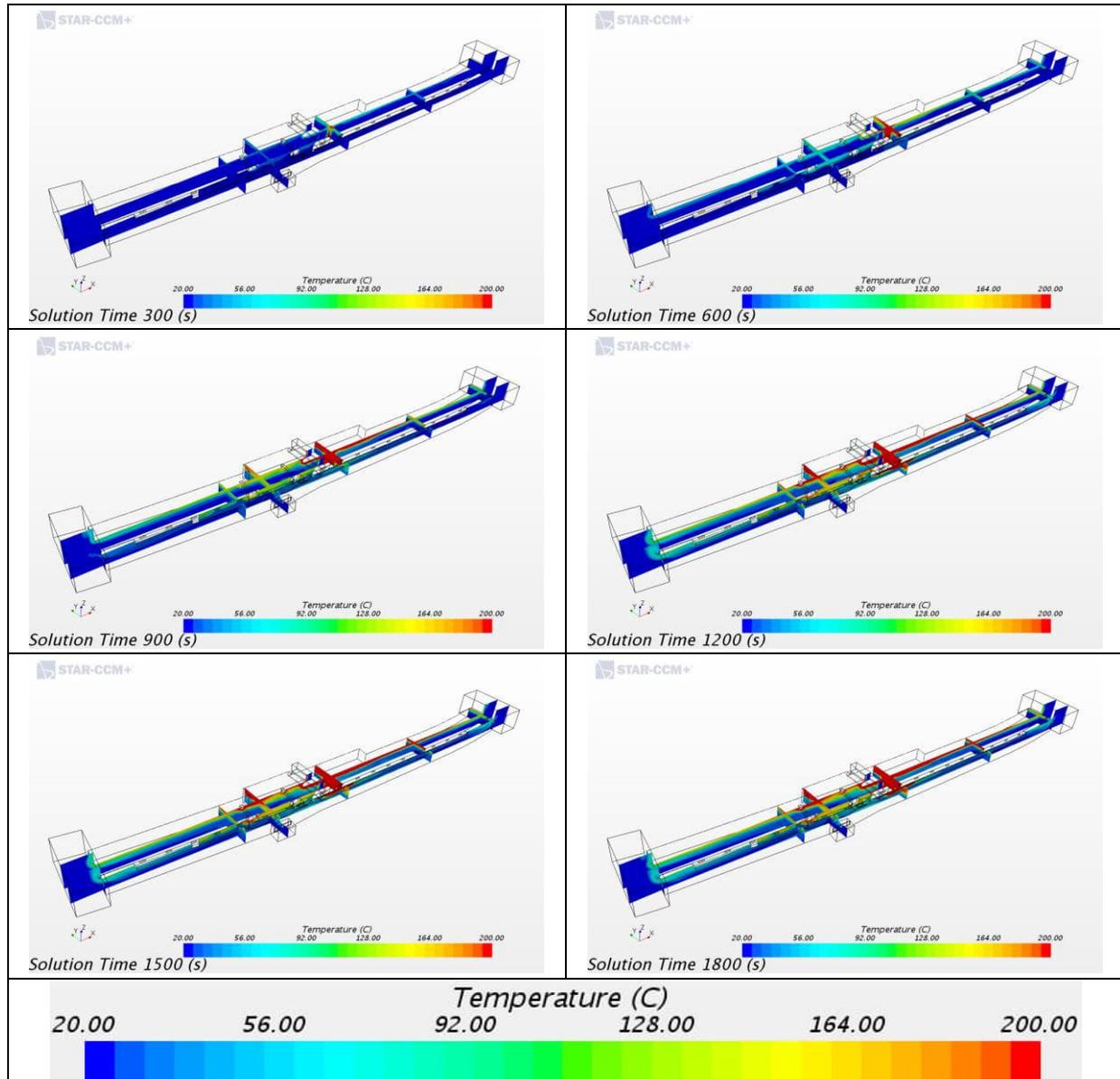


Abbildung 30 Temperaturen im Luftraum der Umweltverbundröhre zur 5., 10., 15., 20., 25. und 30. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“

Auch die Auswertung der zeitlichen Entwicklung der Gastemperaturen zeigt sich gegenüber den Ergebnissen des Berechnungsfalls ohne Rauchschürze als sehr ähnlich. Im Unterschied kann in diesem Fall durch die Anordnung der Rauchschürze für die dargestellten Zeitpunkte der fünften und zehnten Simulationsminute eine wirksame Begrenzung der horizontalen Rauchausbreitung durch die Rauchschürze in den Bereich des Fuß- und Radwegs festgestellt

werden. Insgesamt stellt sich auch bei diesem Berechnungsfall im Luftraum eine stabile thermische Schichtung der heißen Brand- und Rauchgase unter der Tunneldecke ein, so dass diese von dort wirksam über die maschinelle Entrauchung und die natürlichen Öffnungsflächen abgeführt werden können.

In der nachfolgenden Darstellung der Auswertung der optischen Dichte zur Bewertung der Verrauchungsverhältnisse werden erneut die Berechnungswerte in einer Auswertehöhe von 2,5 m sowie als Orientierungshilfe bei der Bewertung von lokalen Effekten zusätzlich in einer Auswertehöhe von 2,0 m über dem jeweiligen Bodenniveau dargestellt. Auch hier wurde zur besseren Erkennbarkeit der Auswertegrenzwert von $0,13 \text{ m}^{-1}$ durch eine schwarze Einfärbung im Farbverlauf hervorgehoben.

Die bezüglich des zu führenden Nachweises, der ausreichenden Verhältnisse in der Phase der Selbstrettung, besonders relevanten Abbildungen zwischen der zwölften und 16. Simulationsminute sind zur verbesserten Detailbetrachtung noch einmal in der Anlage in einem größeren Format dargestellt.

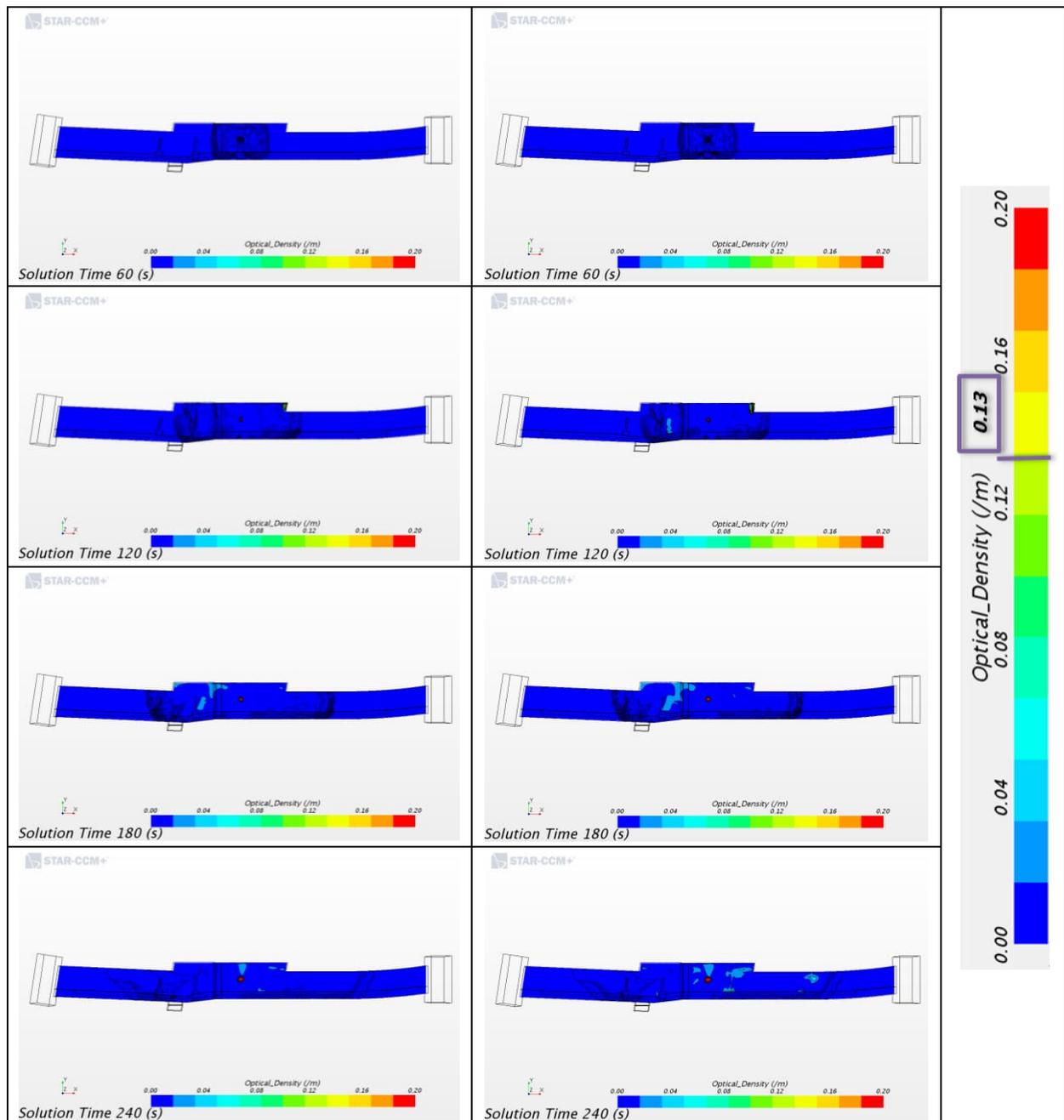


Abbildung 31 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 1. und 4. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 59

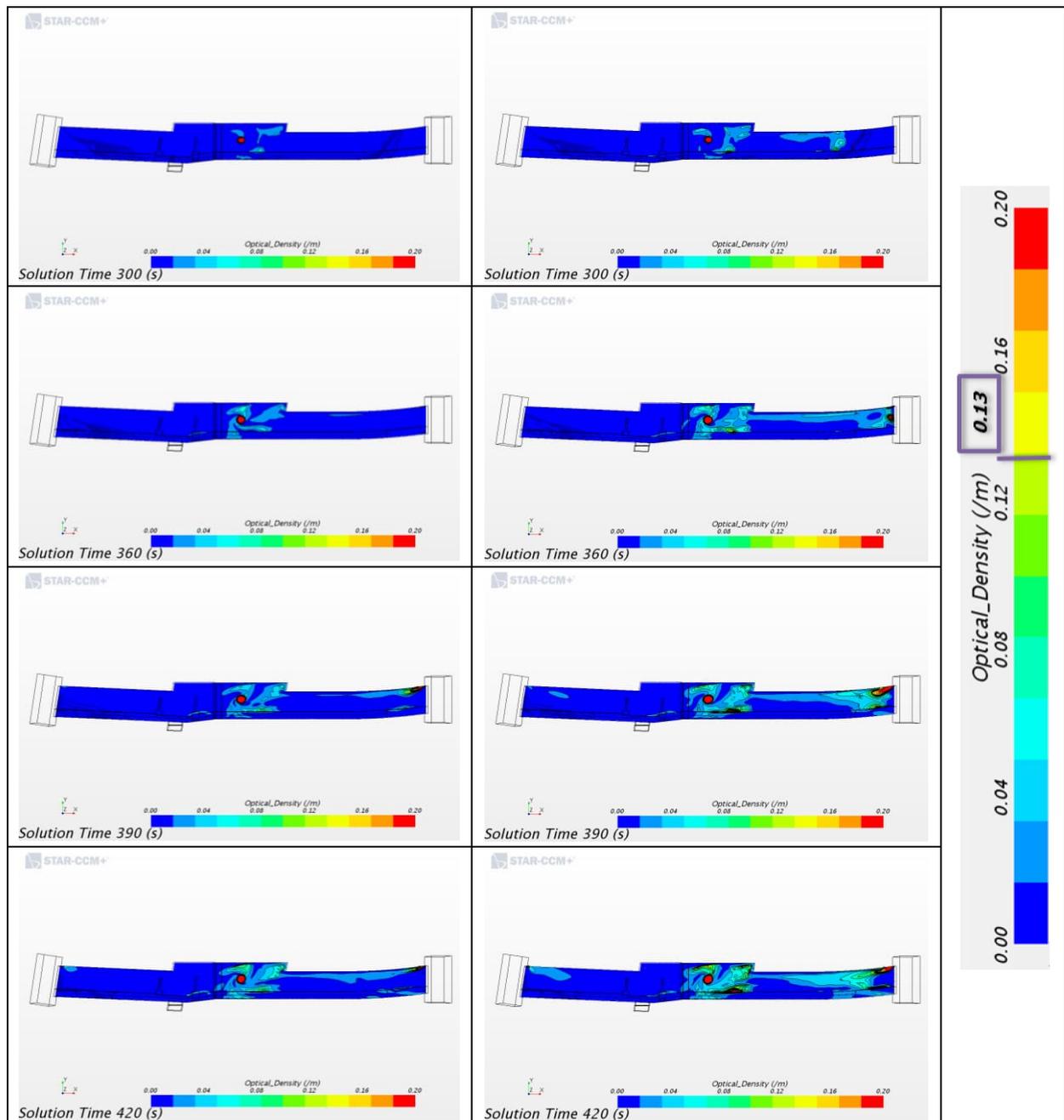


Abbildung 32 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 5. und 7. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

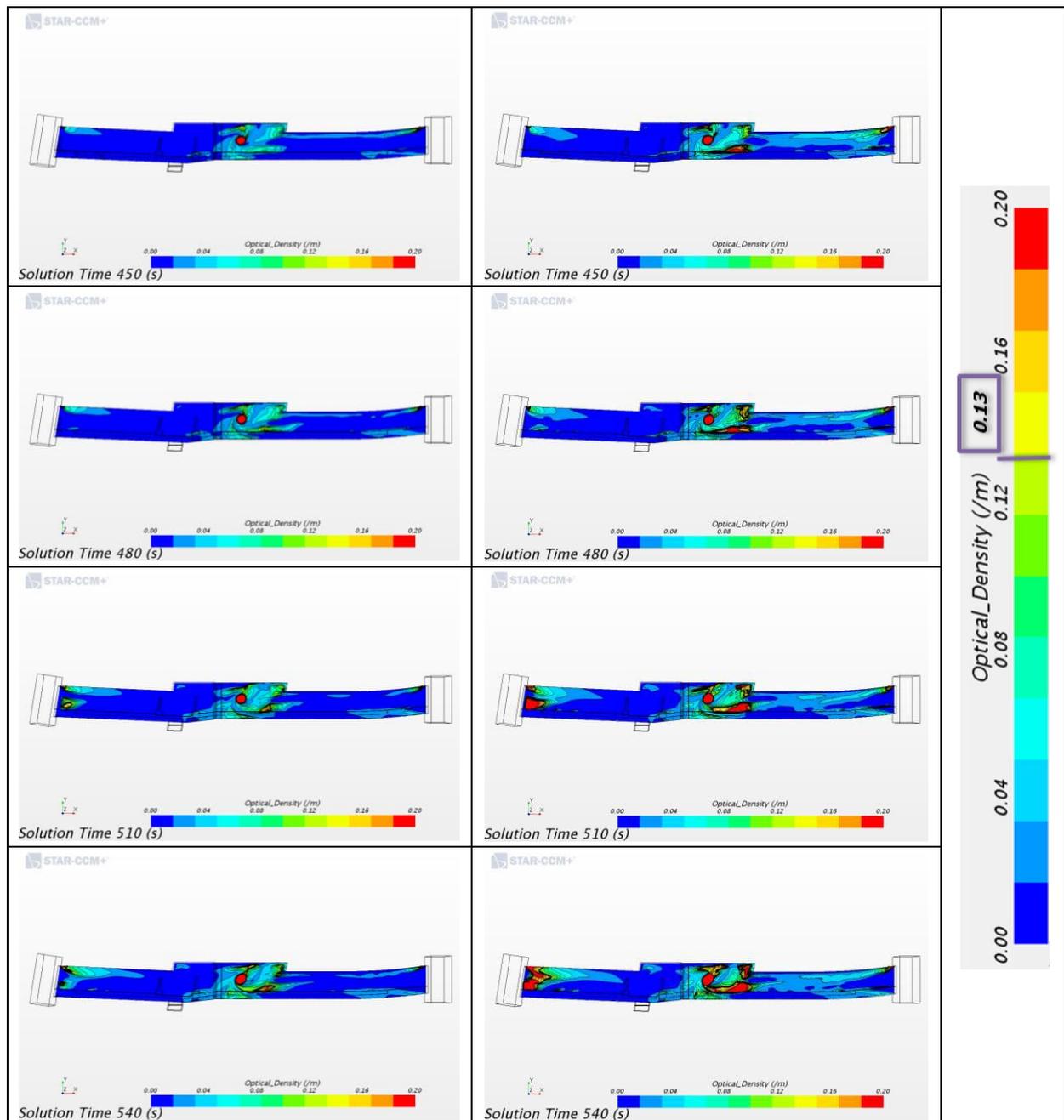


Abbildung 33 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 7,5. und 9. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 61

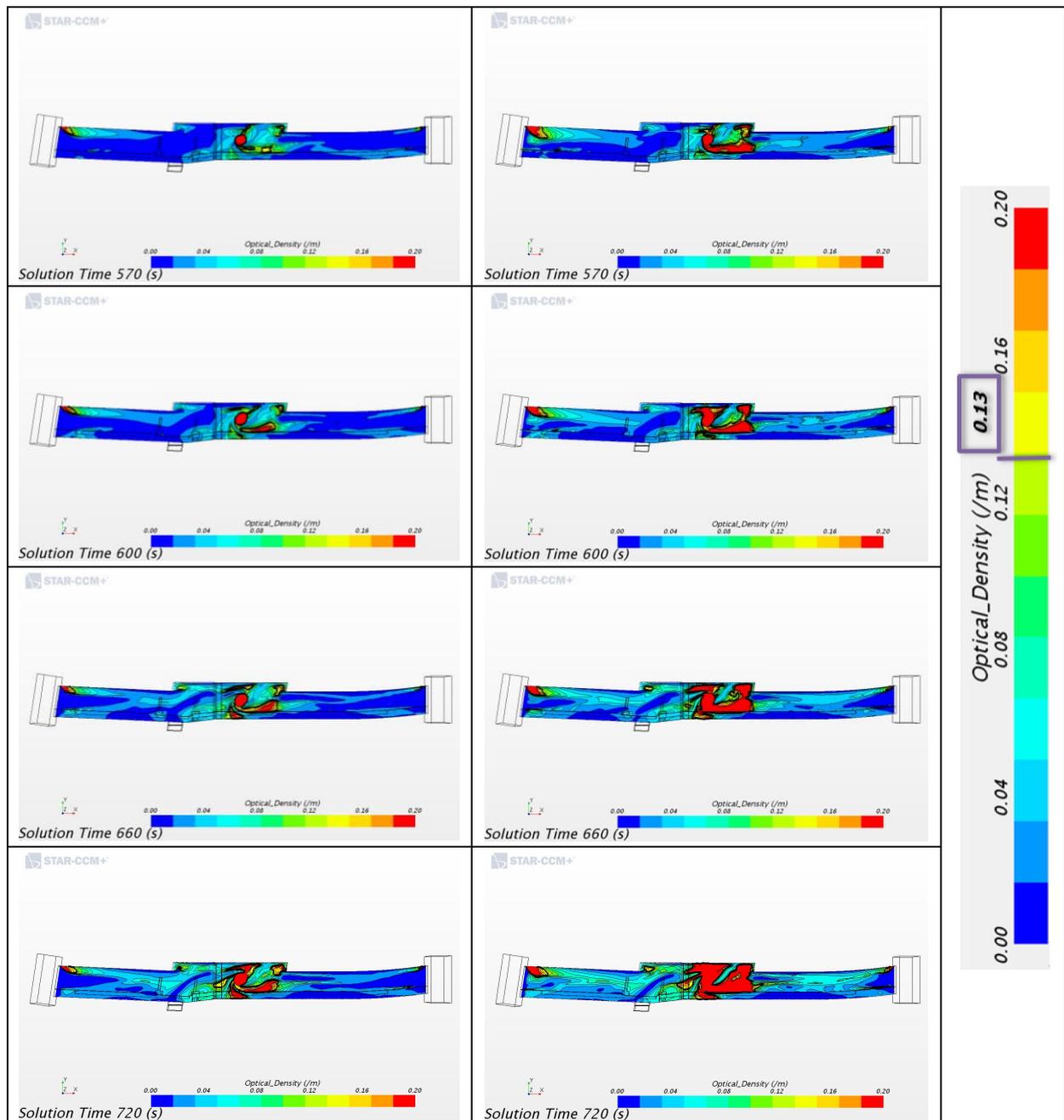


Abbildung 34 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 9,5. und 12. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 62

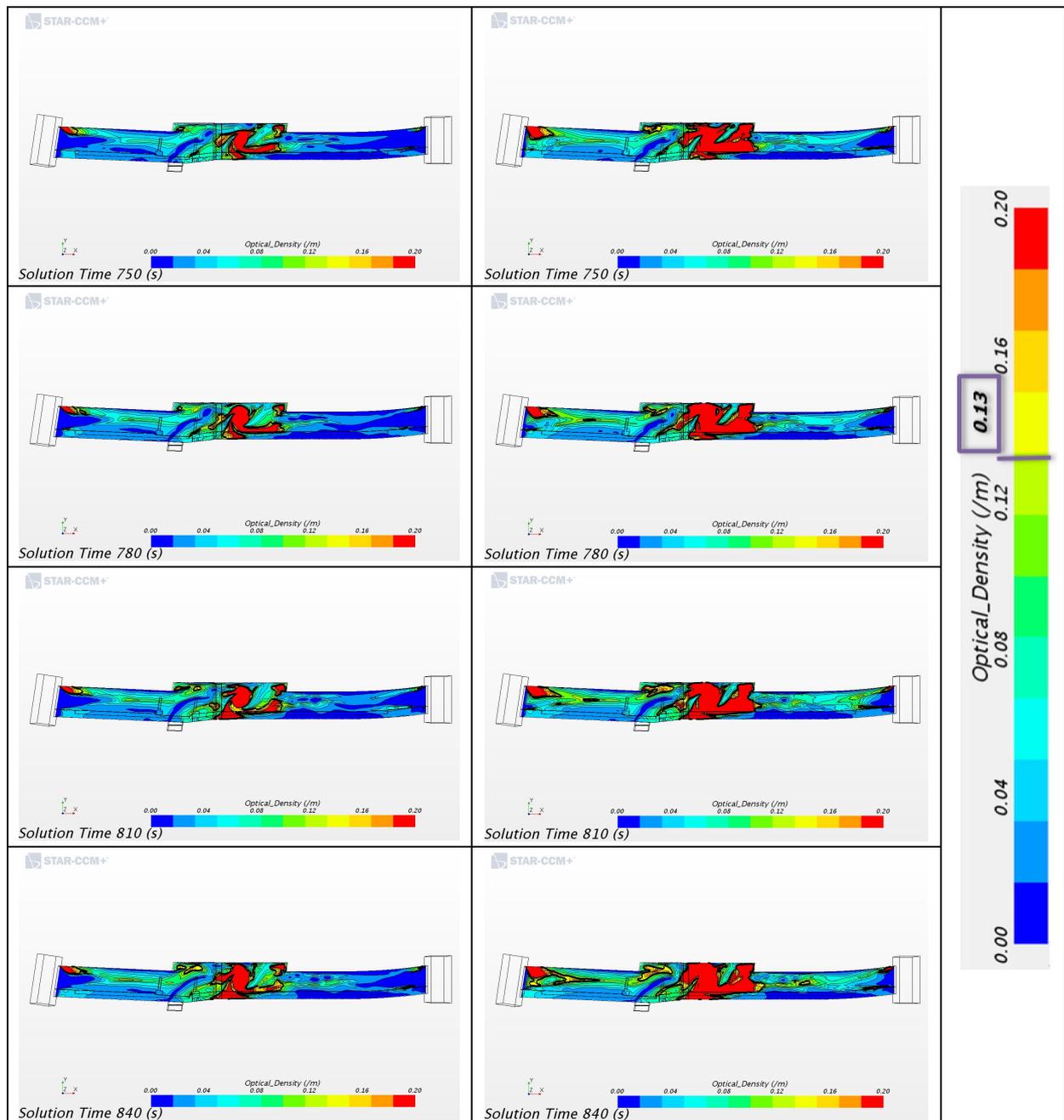


Abbildung 35 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 12,5. und 14. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

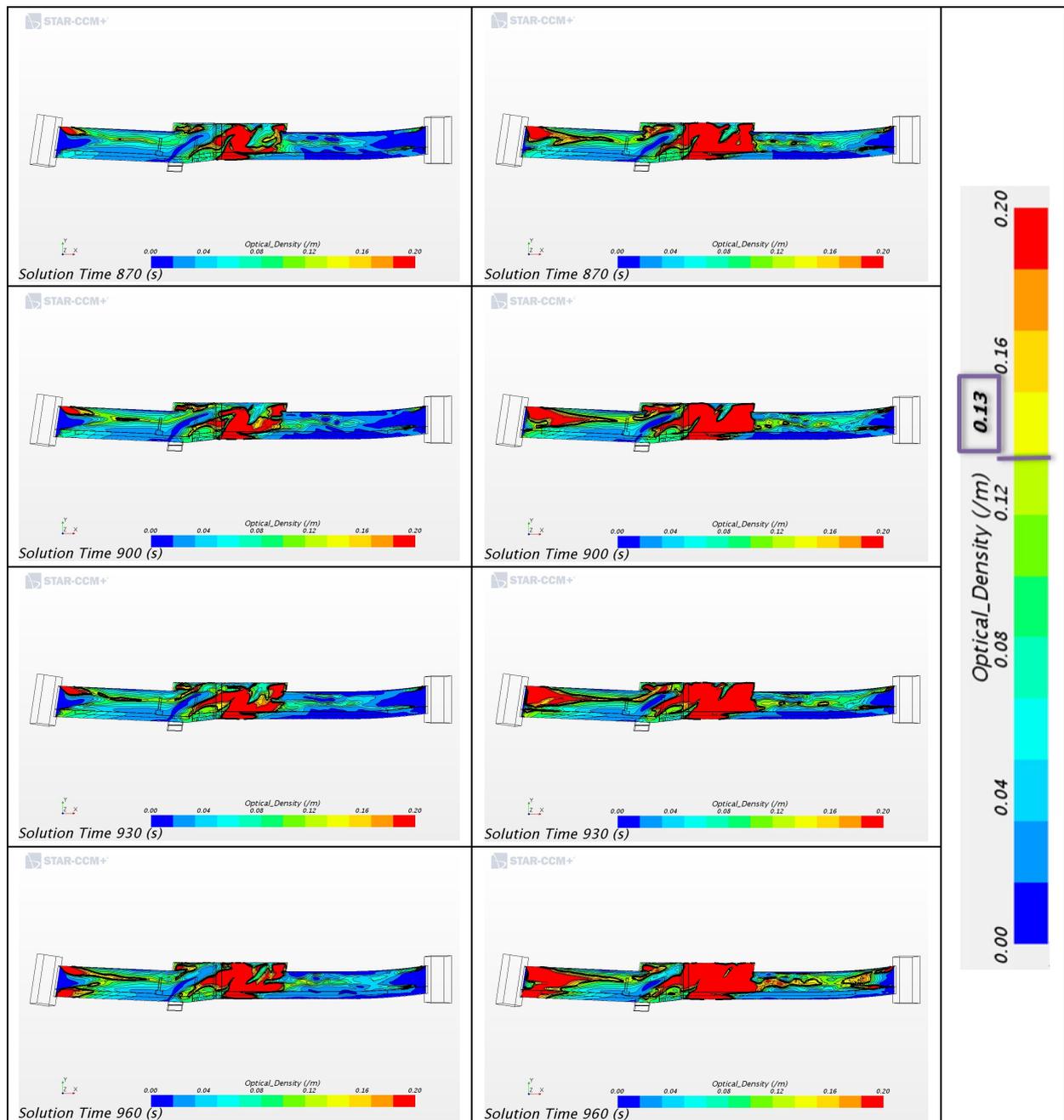


Abbildung 36 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 14,5. und 16. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

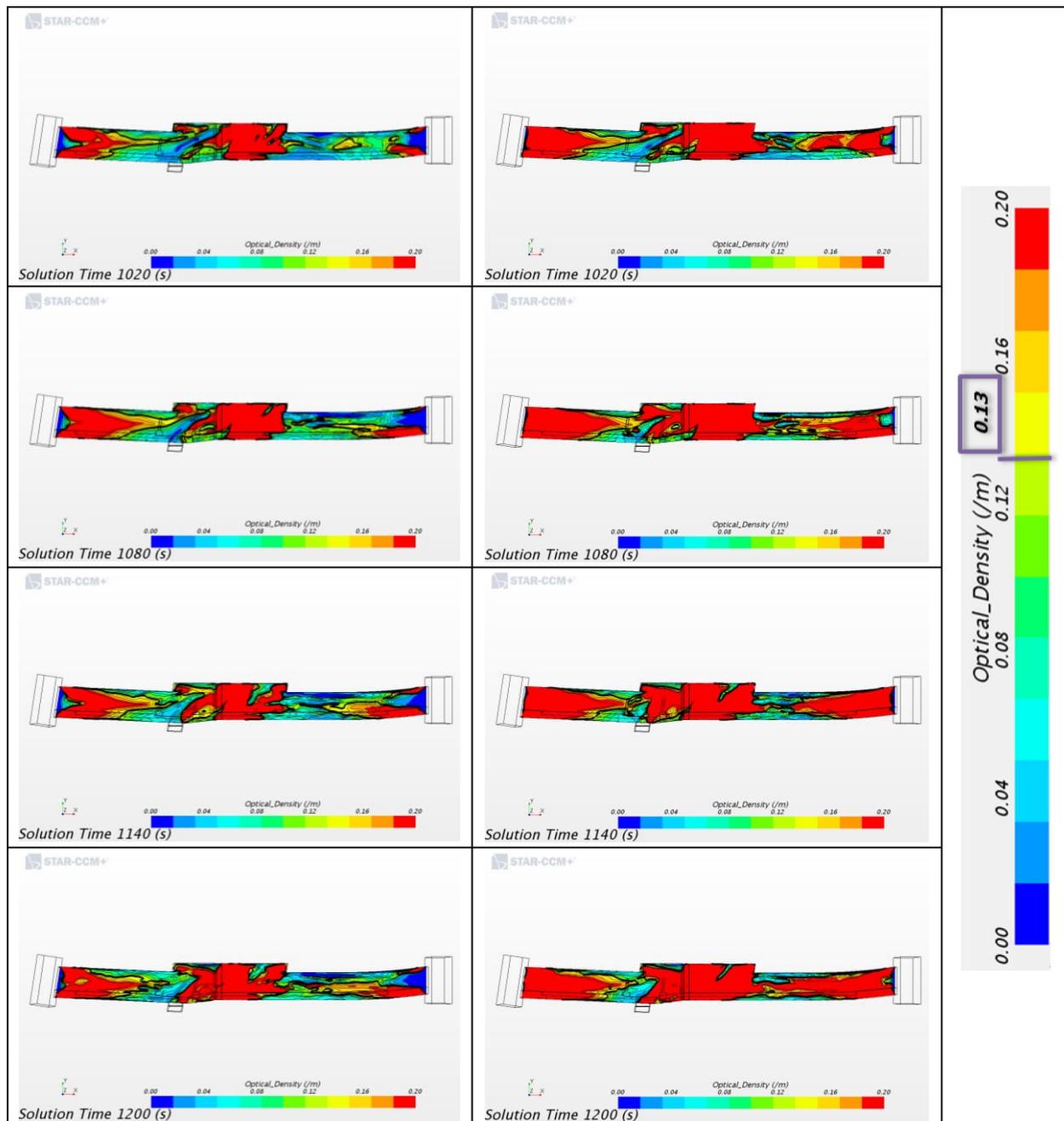


Abbildung 37 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 17. und 20. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

Die Auswertung der zeitlichen Entwicklung der Rauchausbreitung im Luftraum der Umweltverbundröhre zeigt erneut mit fortschreitender Branddauer und somit auch mit stark ansteigender Brandleistung die Ausbildung einer Heißgasschicht unter der Tunneldecke, welche

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 65

aufgrund der Brandausbreitung in ihrer Stärke zunimmt und somit immer tiefer im Luftraum nach unten reicht. Durch die Anordnung der Rauchschürze an der fahrbahnseitigen Außenkante des zweiteiligen Lüftungskanals, welche bis zu einer Höhe von 2,5 m über dem jeweiligen Bodenniveau herabreicht, kann hierdurch im Bereich des Fuß- und Radwegs über eine Zeit von rund 15 Minuten eine wesentliche Rauchausbreitung verhindert werden. Im Bereich der Fahrbahn zeigt sich etwa zur neunten Simulationsminute im Bereich des Südportals ein zeitlich und lokal begrenzter erhöhter Raucheintrag in der Auswertehöhe von 2,5 m. Dies ist durch die Ausbreitung der Frontwalze der Rauchsicht bei Erreichen des Südportals begründet. Jedoch weist die Auswertung in einer Höhe von 2,0 m über dem Bodenniveau dabei immer noch eine ausreichend geringe Rauchkonzentration auf und im weiteren zeitlichen Verlauf, zwischen der zehnten und dreizehnten Minute, verbessert sich dieser Situation wieder, so dass diese kurzzeitige Einschränkung im Sinne der Schutzzielerreichung als akzeptabel bewertet wird.

Nach etwa 13 Minuten und über die restliche Betrachtungsdauer wird dann das Grenzkriterium am Südportal über die gesamte Fahrbahnbreite nicht mehr erfüllt. Die im Zeitraum zwischen der zehnten und dreizehnten Minute erhöhte Unterschreitung des Grenzkriteriums an der westlichen Ecke des südlichen Tunnelportals ist als lokal begrenzte Unterschreitung zu sehen und steht somit nicht im Widerspruch zur nachzuweisenden Leistungsanforderung einer ausreichenden Rauchableitung für die Phase der Selbstrettung.

Nachfolgend werden zur Bewertung der Verrauchungsverhältnisse hinsichtlich der Fremdrettungsphase die Berechnungsergebnisse der optischen Dichte für die Auswertehöhen, regelkonform von 1,5 m und ferner als Orientierungshilfe für kritische Bereiche auch für 1,0 m, dargestellt.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 66

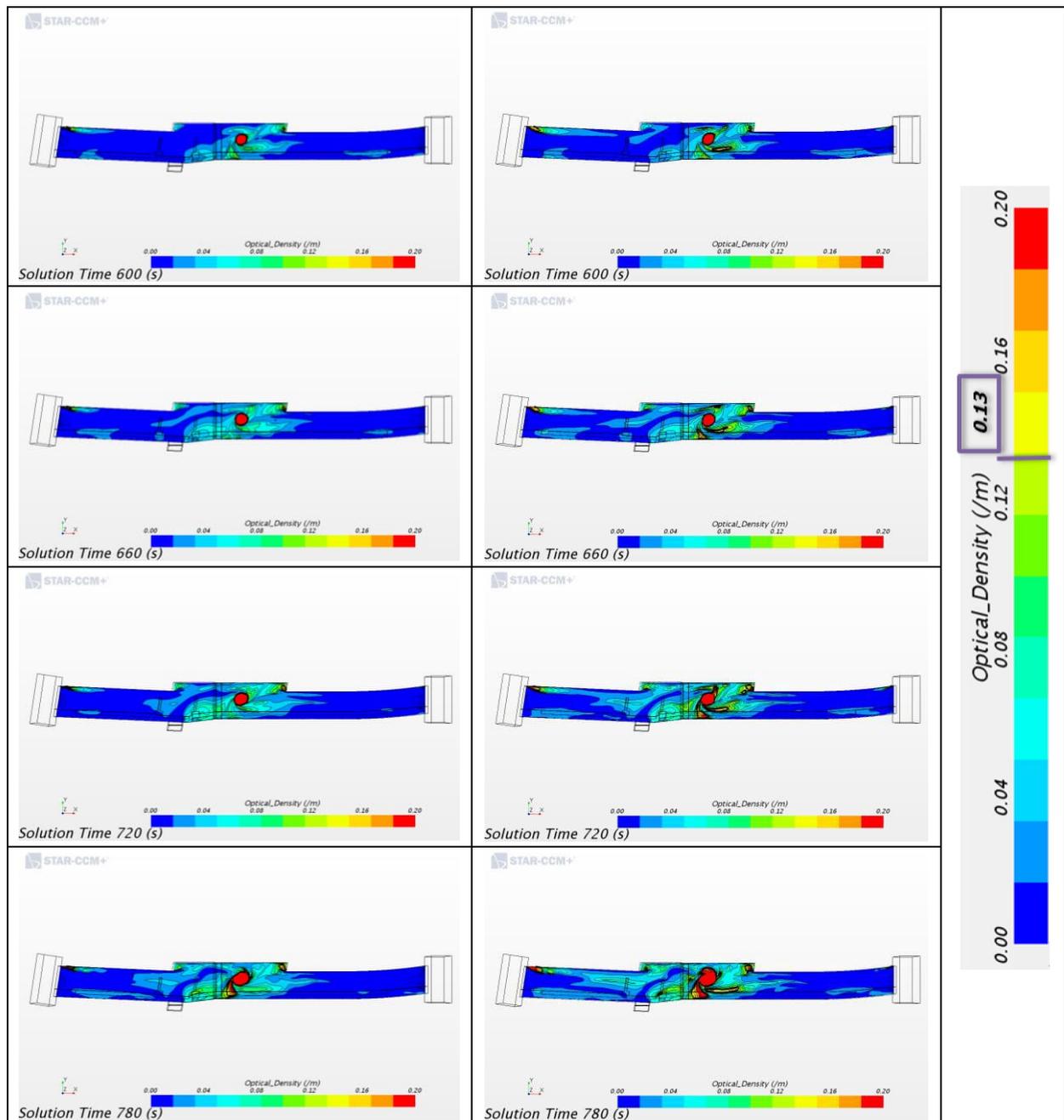


Abbildung 38 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 10. und 13. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 67

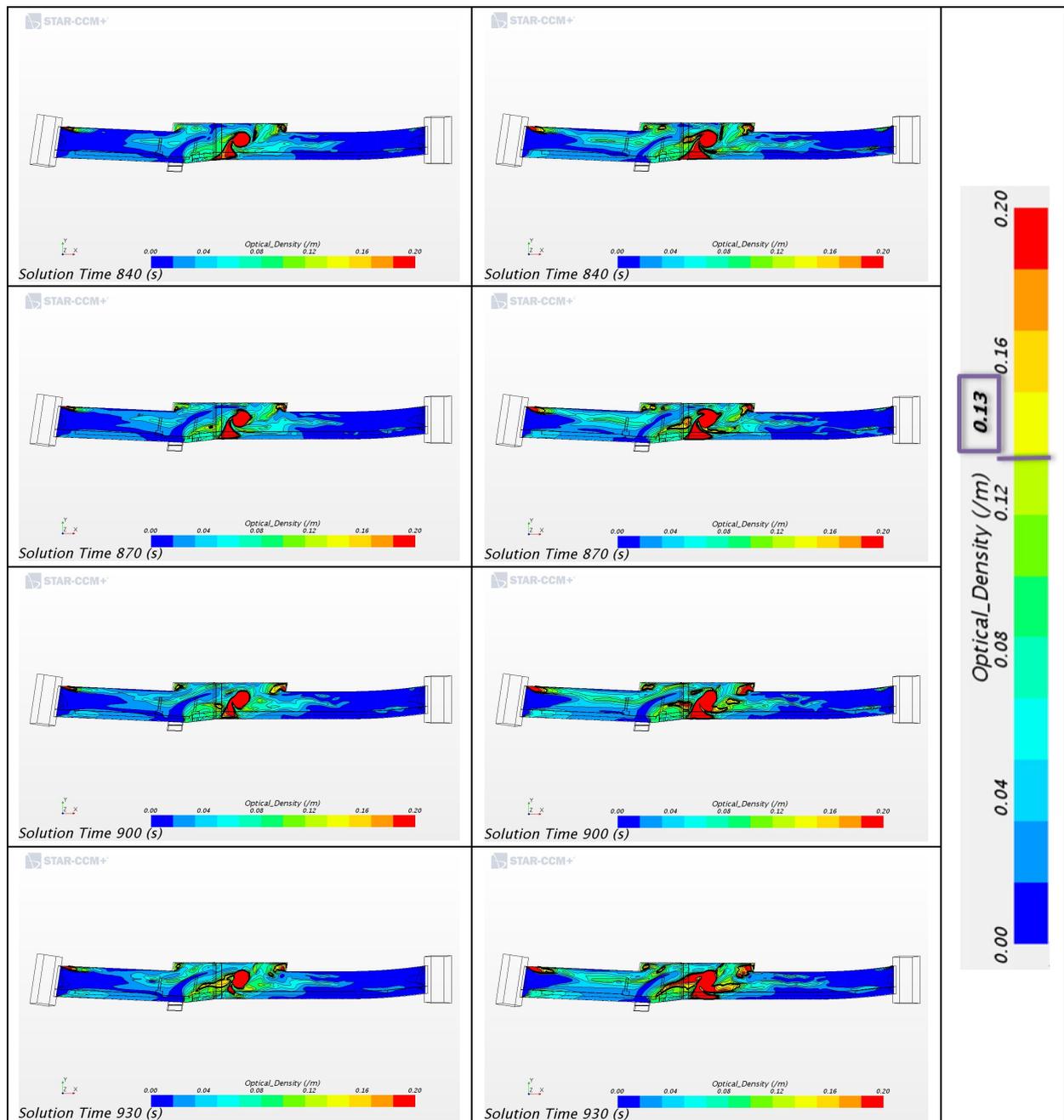


Abbildung 39 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 14. und 15,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 68

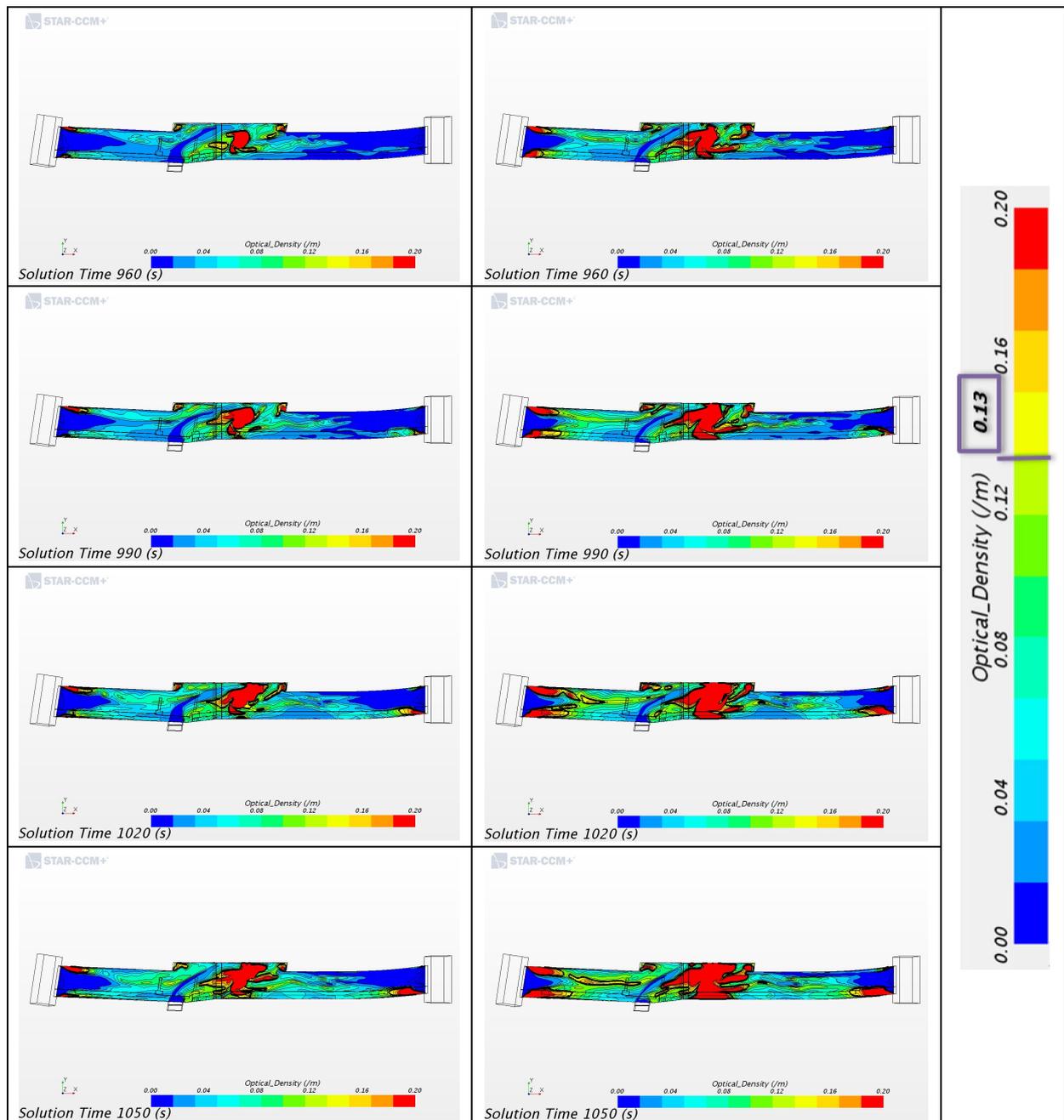


Abbildung 40 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 16. und 17,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

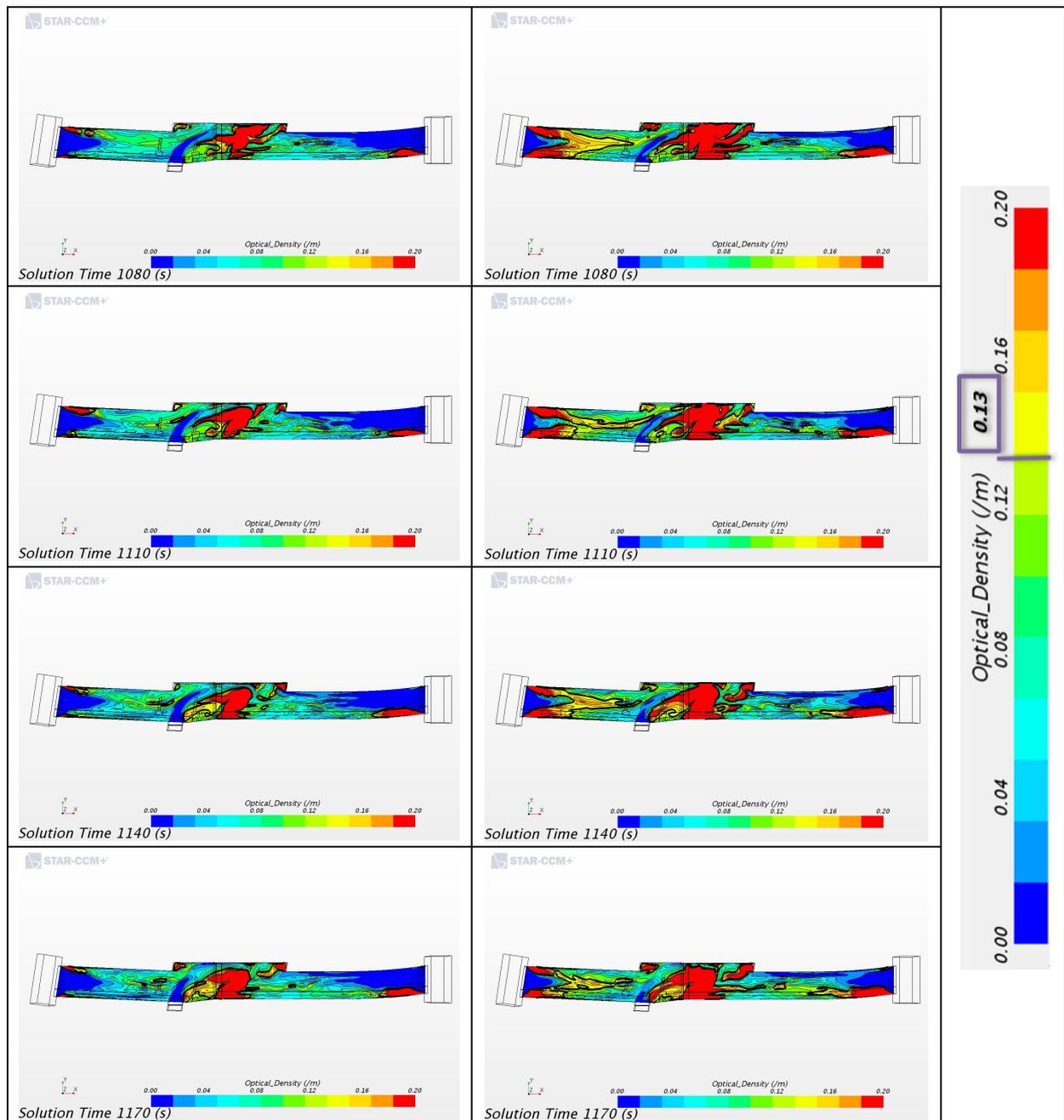


Abbildung 41 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 18. und 19,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

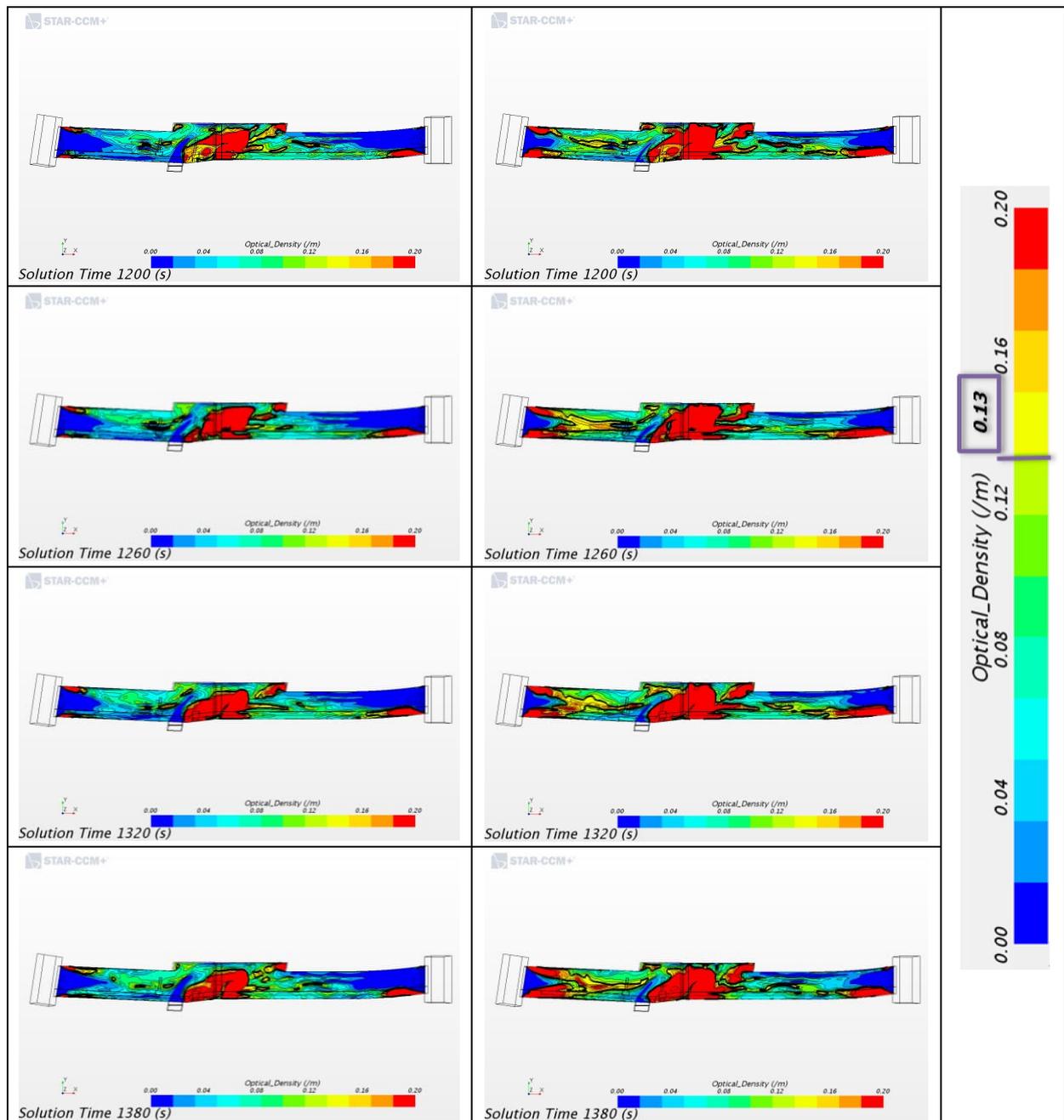


Abbildung 42 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 20. und 23. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 71

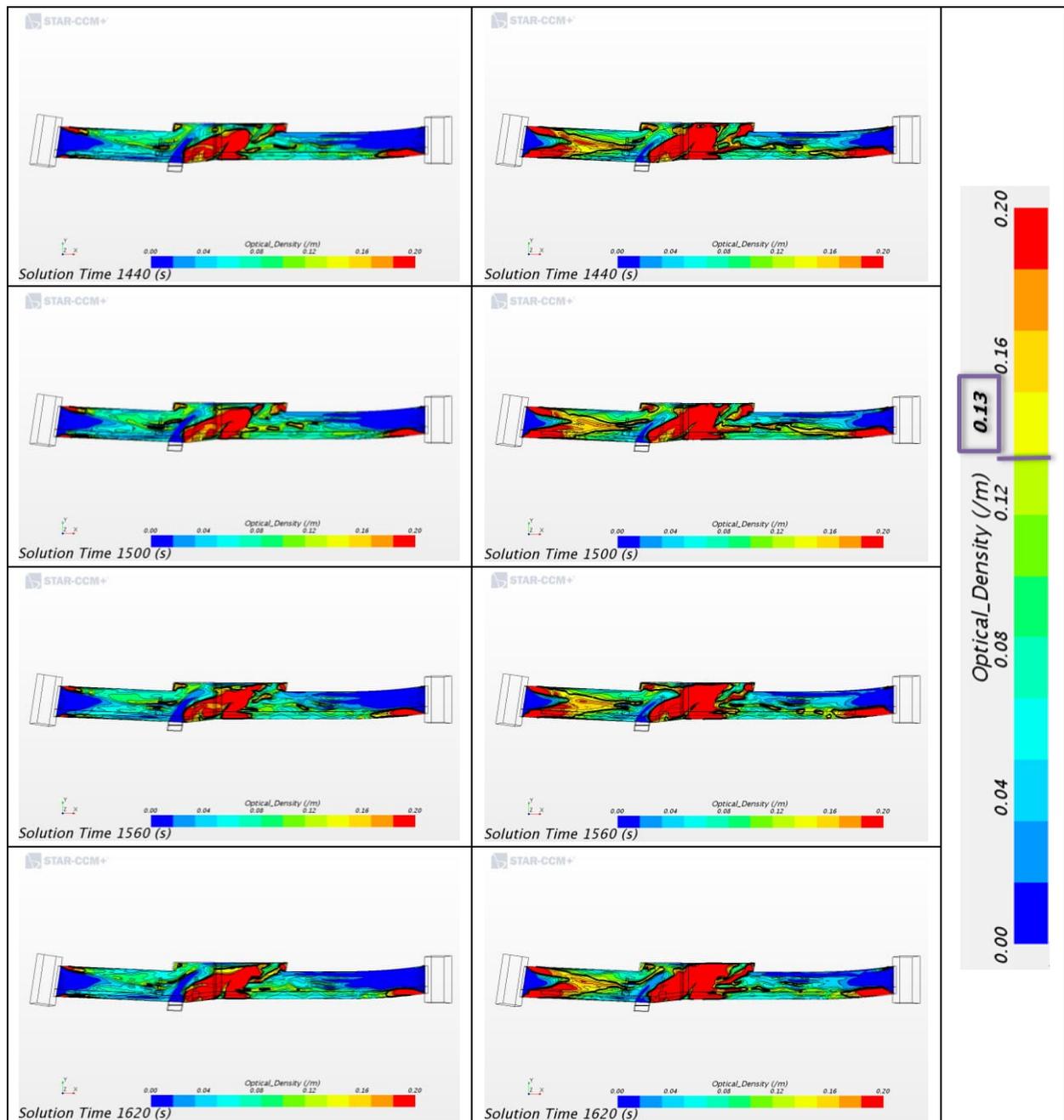


Abbildung 43 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 24. und 27. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 72

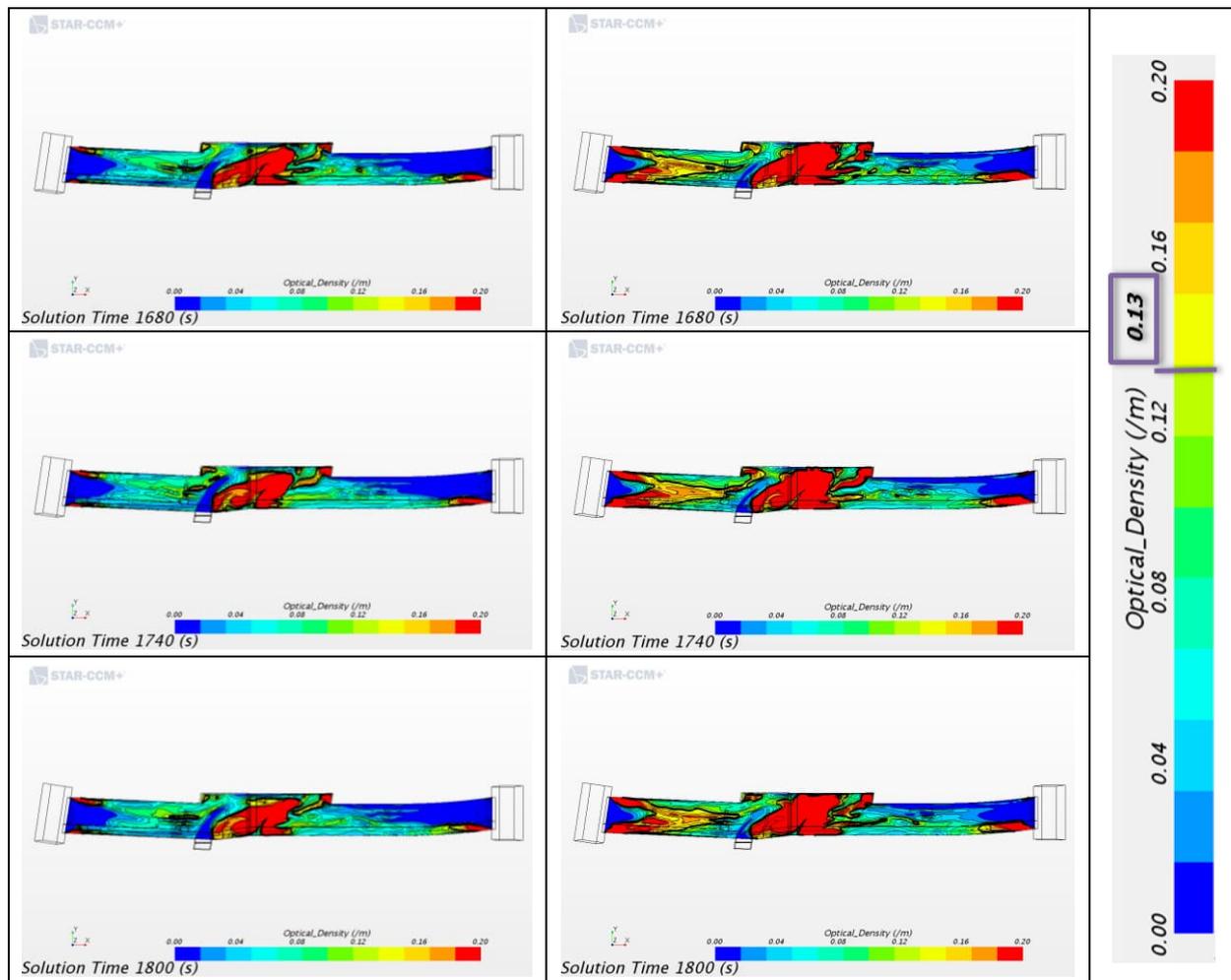


Abbildung 44 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 28. und 30. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“; links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

Auch die Auswertung der Ergebnisse der optischen Rauchdichte in der Auswertehöhe von 1,5 m über dem jeweiligen Bodenniveau zeigt mit zunehmender Brandleistung einen Anstieg der Rauchkonzentration bis zum Zeitpunkt des Endes der Brandausbreitung nach etwa 18 Minuten. Anschließend stellen sich aufgrund der konstanten maximalen Brandleistung im Wesentlichen gleichbleibende Verrauchungsverhältnisse ein. Das Grenzkriterium wird dabei in einer Auswertehöhe von 1,5m bis auf lokal begrenzte Bereiche am Südportal über eine Dauer von 16 Minuten erfüllt. Danach stellt sich in der südlichen Tunnelhälfte eine Verrauchung ein, welche das Grenzkriterium in einer Höhe von 1,5 m relativ knapp unterläuft, wie dies die zusätzliche Auswertung in der Höhe von 1,0 m zeigt. Für diese Auswertehöhe von 1,0 m kann das Grenzkriterium über die gesamte Betrachtungsdauer, ausgenommen lokale Randbereich der Tunnelportale und im Brandherdnahbereich, erfüllt werden.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 73

Um den zeitlichen Verlauf der in den Schnitthöhen dargestellten Rauchausbreitung im Gesamtzusammenhang mit der Ausbildung und Ausbreitung der Rauchschicht im Tunnelluft-raum besser nachvollziehen zu können, werden nachfolgend erneut ergänzende Ergebnisdarstellungen der Berechnungsgröße der optischen Dichte in Vertikalschnitten im zeitlichen Verlauf gezeigt.

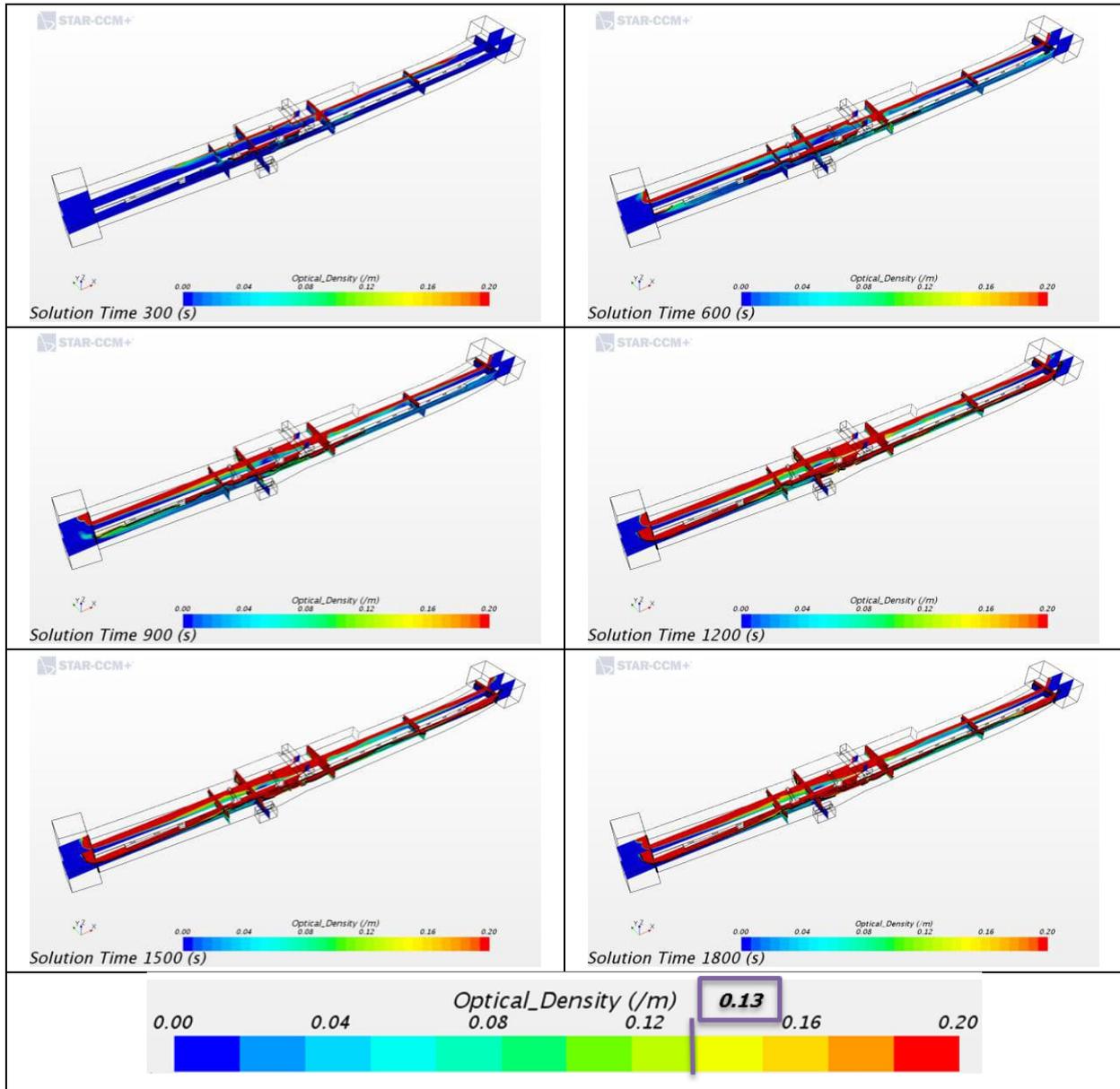


Abbildung 45 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte mit Darstellung in Vertikalschnitten Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“

Aus der Ergebnisdarstellung in den vertikalen Schnittebenen wird deutlich, dass es sich bei den gezeigten Überschreitungen des Auswertekriteriums jeweils um ein nur etwas tieferes

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 74

Herabreichen der Rauchsicht handelt und nicht um eine vollständige Verrauchung eines gesamten Abschnitts bis zum jeweilige Bodenniveau. Diese Bewertung wird durch die nachfolgende Detailauswertung zur Situation am Südportal zwischen der achten und zehnten Simulationsminute (dem Zeitraum des kurzzeitig erhöhten Raucheintrags beim Erreichen der Frontwalze der Rauchsicht am Südportal) sowie zwischen der 13. und 16. Simulationsminute (dem Zeitraum mit Erreichen einer dauerhaften Überschreitung des Grenzkriteriums in einer Auswertehöhe von 2,5 m im Bereich des Südportals) ergänzt. Dabei werden erneut die Grenzfläche für eine optische Dichte mit dem Wert $0,13 \text{ m}^{-1}$ als Iso-Fläche mit der Auswertung in der Höhe von 2,5 m bezüglich der optischen Dichte kombiniert. Auch diese Auswertung findet sich noch einmal in vergrößerter Darstellung in der Anlage.

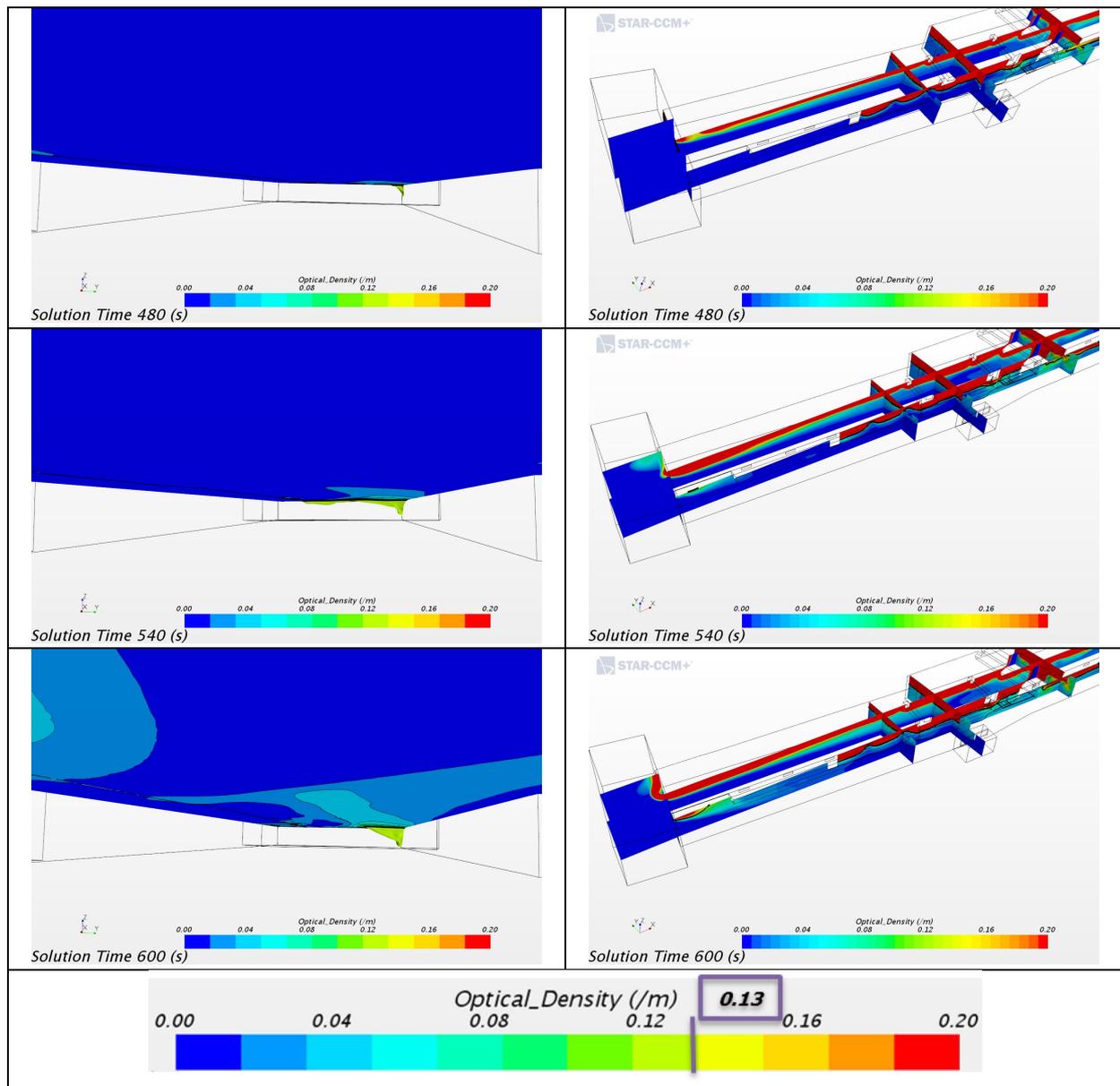


Abbildung 46 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte, Detailbetrachtung der 8. - 10. Simulationsminute Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“, links: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, rechts: Vertikalschnitte

Diese Auswertung verdeutlicht noch einmal die vorstehende Bewertung, dass der sich etwa zur neunten Simulationsminute gezeigte, erhöhte Rauchgaseintrag die Auswertehöhe von 2,5m nur geringfügig und kurzzeitig unterschreitet, weshalb dies im Rahmen des Nachweises für die Selbstrettung als akzeptabel bewertet wird.

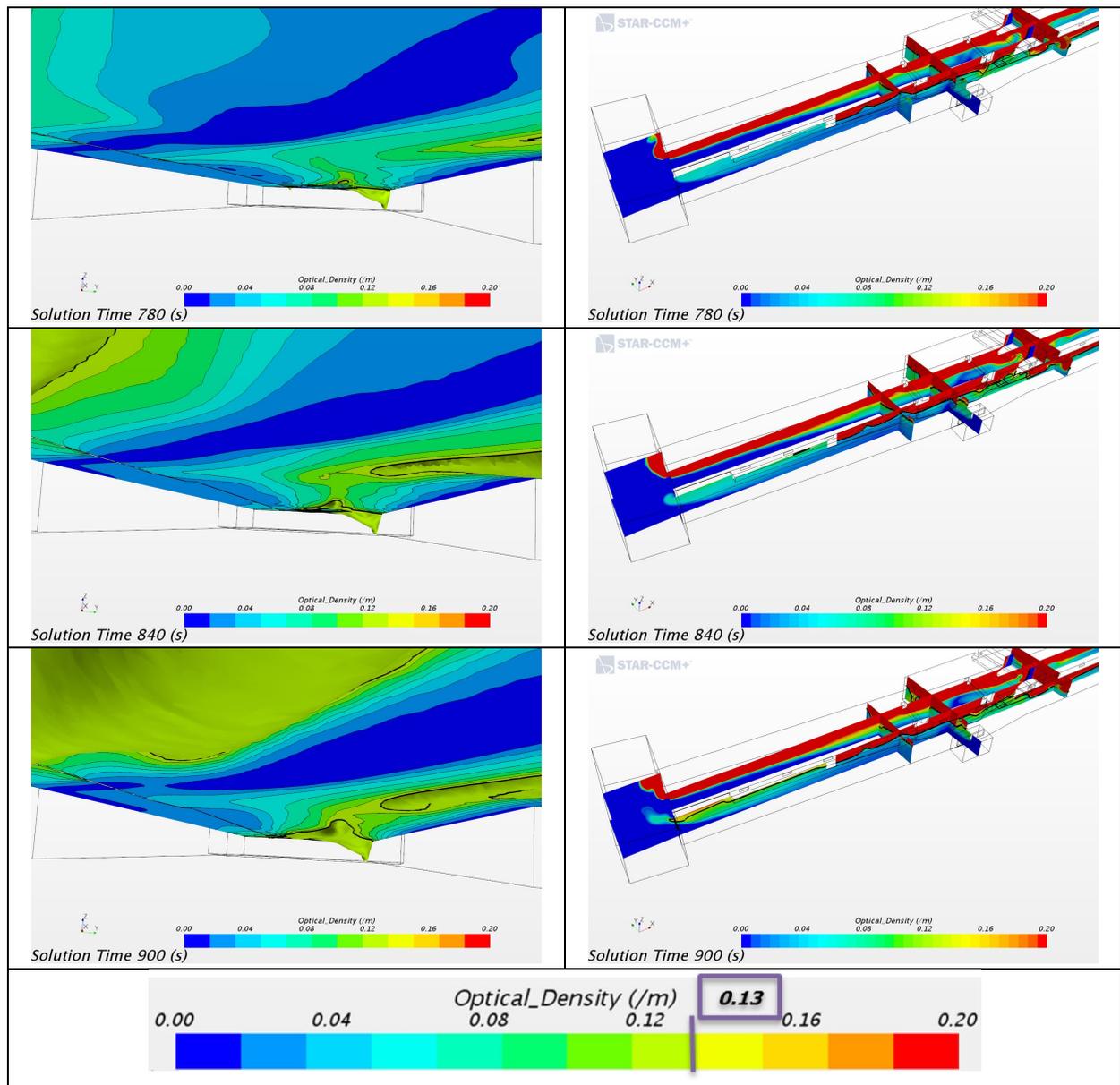


Abbildung 47 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte, Detailbetrachtung der 13. - 15. Simulationsminute Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“, links: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, rechts: Vertikalschnitte

Auch diese Auswertung bestätigt die Bewertung, dass über einen Zeitraum bis zur 13. Minute das Kriterium für eine ausreichende Selbstrettungsmöglichkeit eingehalten und dies im Weiteren, ausgehend von Südportal, nicht mehr durchgehend erreicht werden kann. Jedoch findet diese zunehmende Verrauchung kontinuierlich und nicht schlagartig statt. Die Rauchschichtung bleibt auch über den Zeitpunkt der 13. Minute hinaus bestehen.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 77

Für den Zeitpunkt des Erreichens des Auswertekriteriums in einer Höhe von 1,5 m für den Nachweis der Fremdrettungsphase wurde ebenfalls eine solche Detailauswertung vorgenommen. Hierbei wurde jedoch im Zeitraum zwischen der 16. und 18. Simulationsminute die Iso-Fläche für den Wert der optischen Dichte von $0,13 \text{ m}^{-1}$ mit der Auswertung in der Höhe von 1,5 m bezüglich der optischen Dichte kombiniert. Auch diese Auswertung findet sich noch einmal in vergrößerter Darstellung in der Anlage.

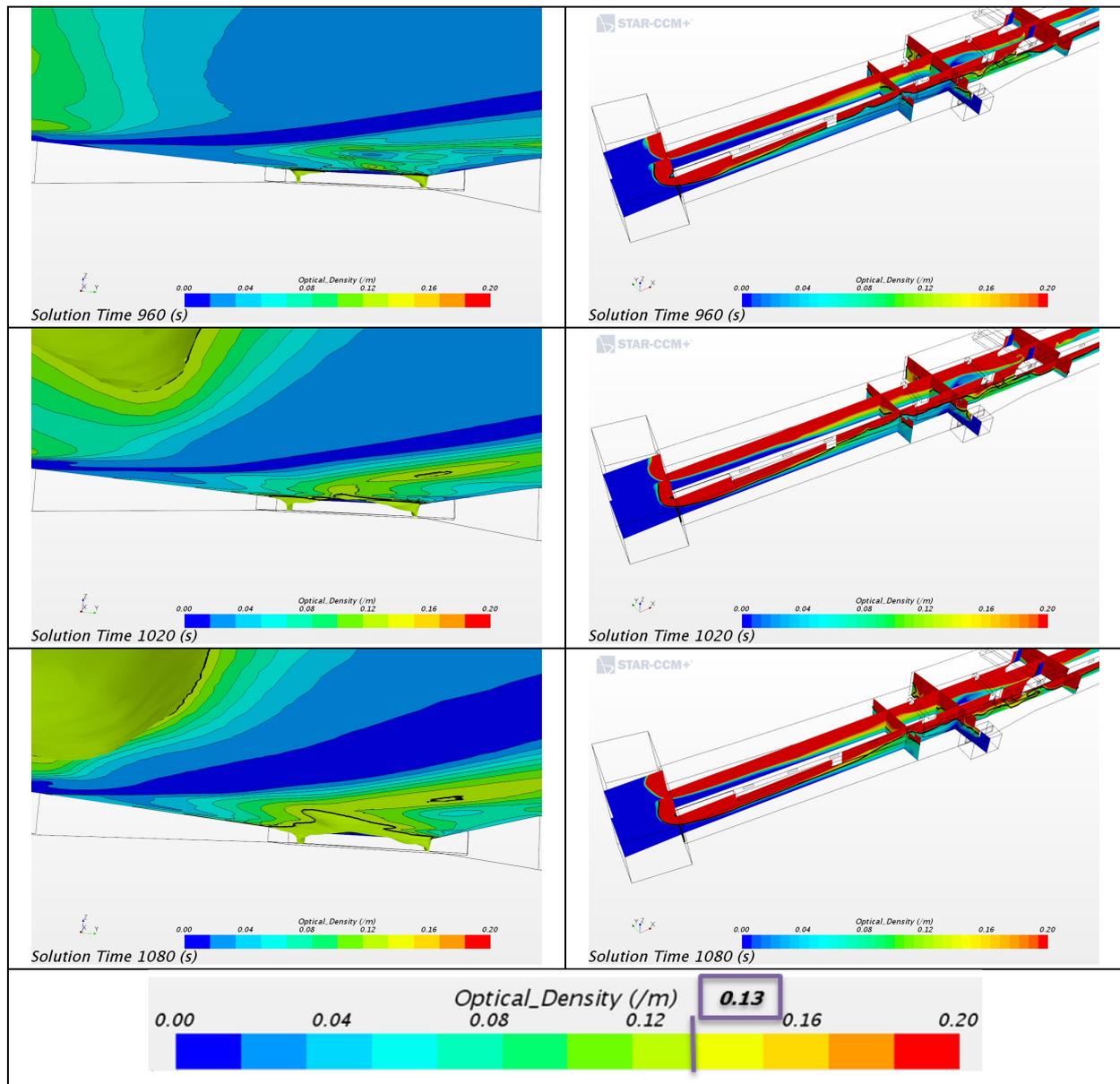


Abbildung 48 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte, Detailbetrachtung der 16. - 18. Simulationsminute Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“, links: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 1,5 m, rechts: Vertikalschnitte

8.3 Berechnungsergebnisse für Trambrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“

Die nachfolgenden Ergebnisse stellen die Verhältnisse der Rauchausbreitung und Rauchableitung unter dem Brandszenario des Trambrandes dar. Dabei wurden ebenfalls die Maßnahmen zur maschinellen Entrauchung berücksichtigt, jedoch ohne eine Anordnung der durchgehenden Rauchschrürze über die gesamte Tunnellänge.

Wie in den beiden zuvor dargestellten Ergebnisvorstellungen werden zunächst die sich für diesen Berechnungsfall einstellenden Strömungsverhältnisse im Zeitintervall von fünf Minuten über die Betrachtungsdauer von 30 Minuten dargestellt.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 79

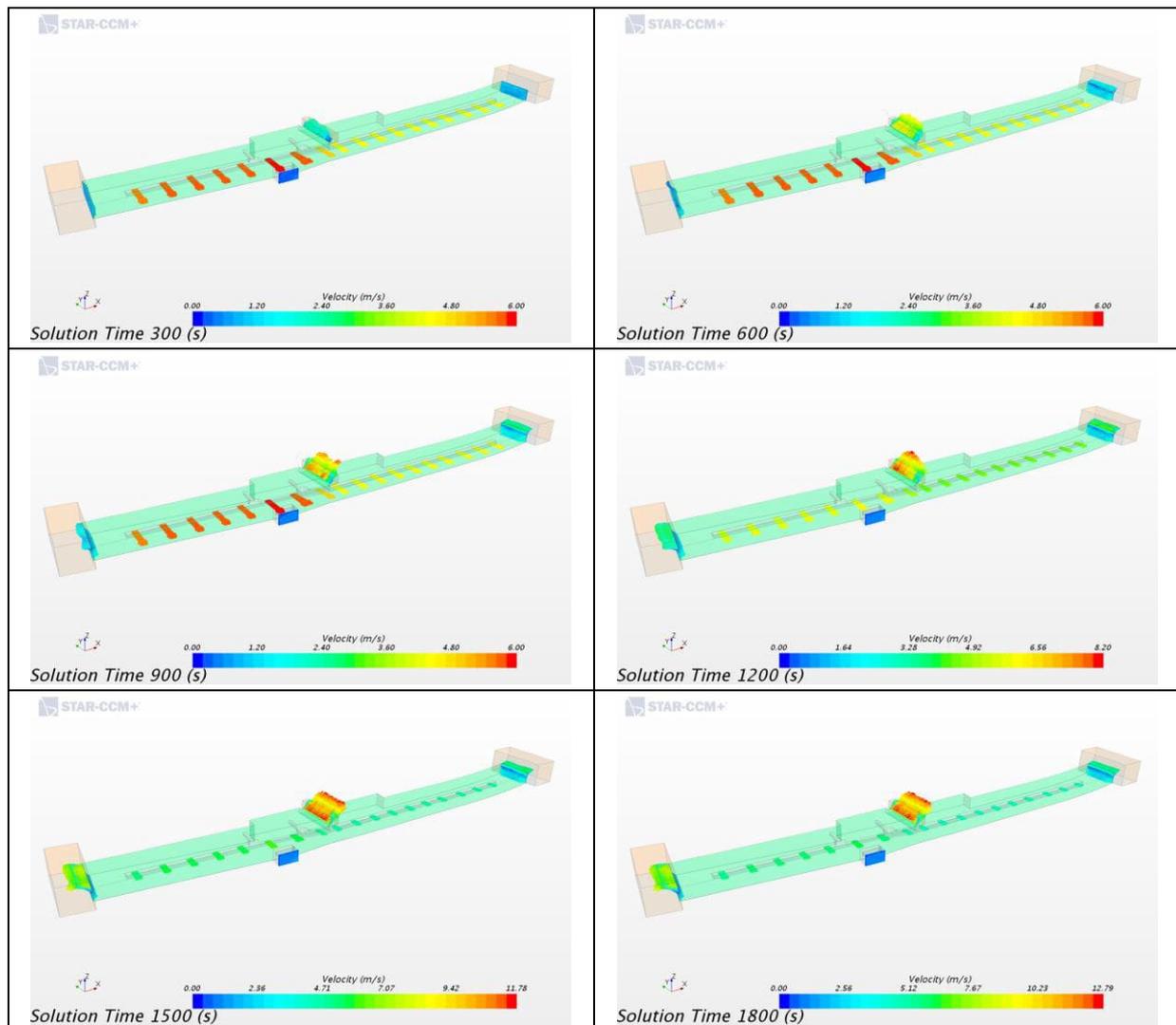


Abbildung 49 Strömungsverhältnisse in den freien Öffnungen & der MRA zur 5., 10., 15., 20., 25. und 30. Simulationsminute des Trambrandes

Die berechneten Strömungsverhältnisse zeigen für das Brandszenario des Trambrandes über die gesamte Simulationsdauer von 30 Minuten einen sehr ähnlichen Verlauf wie die beiden zuvor dargestellten Berechnungsfälle des Busbrandes. Im Detail ergeben sich an den Maximalgeschwindigkeiten der Abströmung über die natürlichen Öffnungsflächen abweichende Werte, welche auf den unterschiedlichen Verlauf der Brandleistungsentwicklung bei beiden Brandszenarien und somit auch die Ausbildung der Heißgasschichtung im Tunnelraum zurückzuführen ist. So liegen die Geschwindigkeiten der frei abströmenden Rauchgase innerhalb etwa der ersten 20 Minuten beim Trambrandszenario unterhalb derjenigen bei den dargestellten beiden Busbrandszenarien und übersteigen dann im Weiteren in der Phase zwischen der 20. und 30. Simulationsminute diese, was den unterschiedlichen zeitlichen Leistungsverläufen der jeweils angesetzten Brandszenarien entspricht.

Der zeitliche Verlauf der Massenstrombilanz an den Abzugsöffnungen der maschinellen Absaugung sowie an den freien Öffnungsflächen zeigen ebenfalls den Einfluss der ab etwa der 15. Simulationsminute stark ansteigenden Brandleistung, wie der nachstehenden Abbildung zu entnehmen ist.

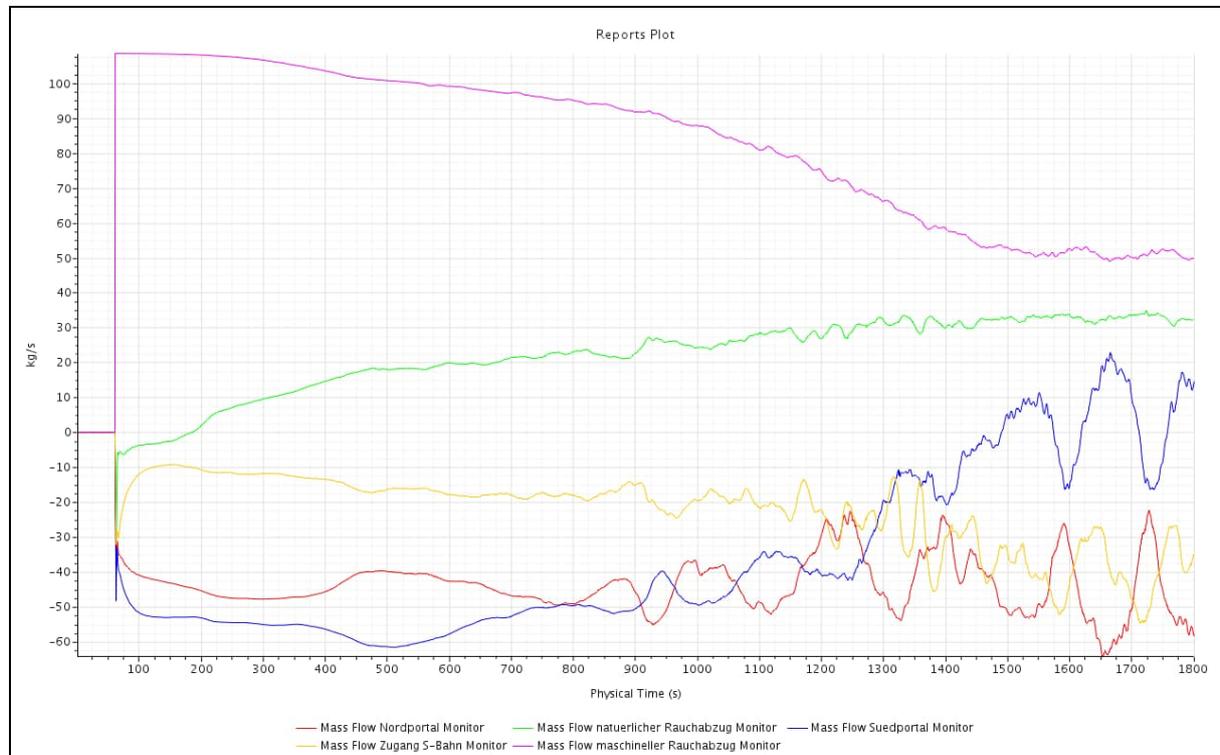


Abbildung 50 Massenstrombilanz an den freien Öffnungsflächen und den Absaugstellen der MRA beim Berechnungsfall des Trambrandes

Aus obigem Diagramm ist dabei deutlich der Einfluss der Temperatur der Rauchgase auf die Wirkung der maschinellen Rauchableitung zu erkennen, welcher mit ansteigenden Gastemperatur zurückgeht. Im Gegenzug stellt sich die natürliche Rauchableitung über die vertikale Rauchableitungsöffnung auch bei deutlich steigender Brandleistung als im Wesentlichen konstant dar, da die temperaturabhängige Dichteabnahme einen steigenden thermischen Auftrieb bewirkt, welcher wiederum die Abströmgeschwindigkeit entsprechend erhöht.

Die sich einstellende Entwicklung der Gastemperaturen im Tunnelluftraum sind in der nachfolgenden Abbildung, erneut beispielhaft im zeitlichen Abstand von fünf Minuten über die gesamte Simulationsdauer von 30 Minuten, dargestellt.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 81

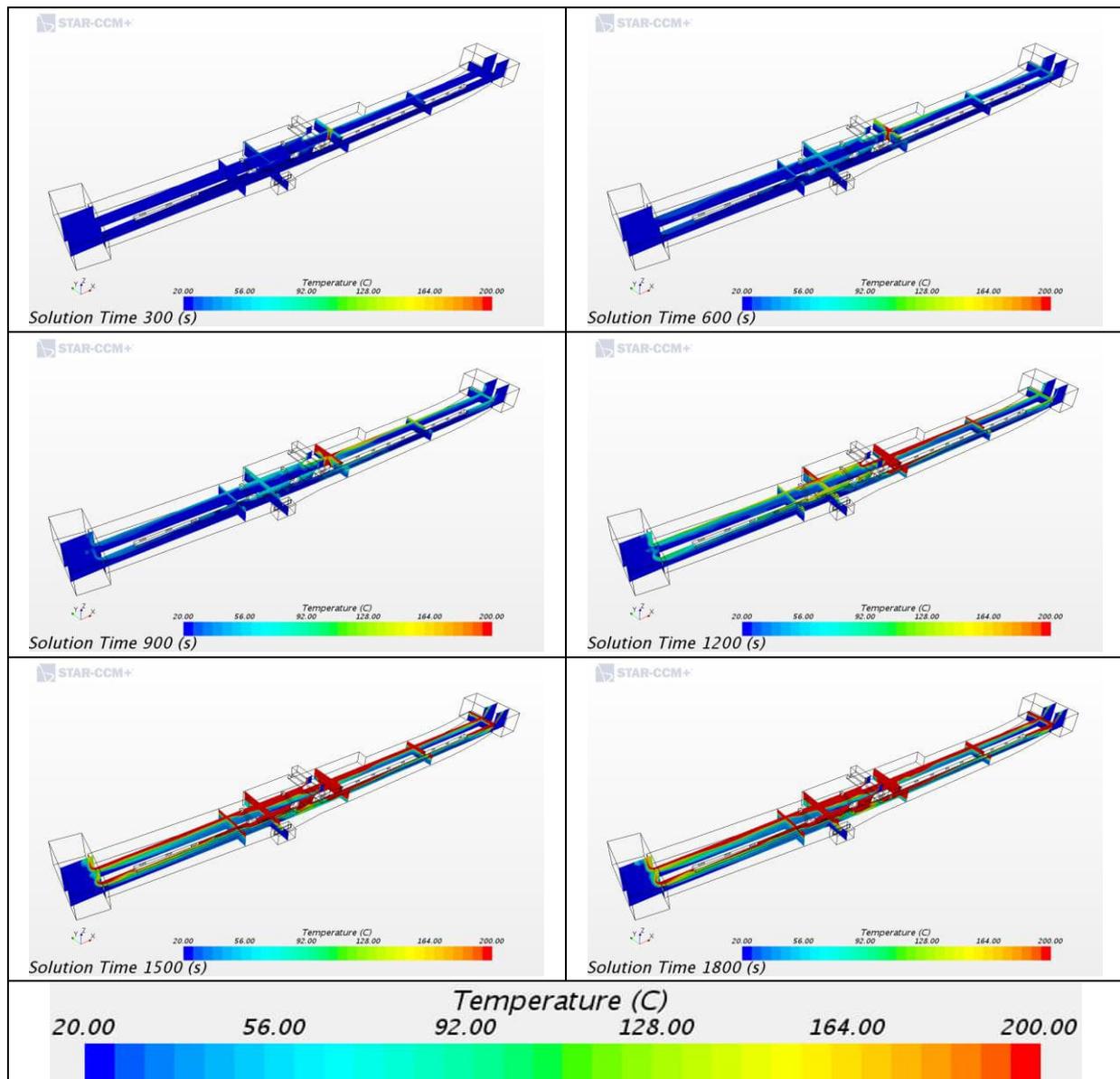


Abbildung 51 Temperaturen im Luftraum der Umweltverbundröhre zur 5., 10., 15., 20., 25. und 30. Simulationsminute des Trambrandes

Die Auswertung der Gastemperaturen zeigt ebenfalls eine Ausbildung einer Heißgasschicht im Tunnelluftraum, welche sich im Simulationsfortschritt über die Tunnellänge ausbreitet und im Weiteren an den Tunnelportalen ins Freie abströmt. Insgesamt setzt die Abströmung an den Tunnelportalen gegen über dem Busbrandszenario aufgrund der geringeren Brandleistungsentwicklung in der Phase bis zur 20. Minute für das hier betrachtete Trambrandszenario etwas später ein. Die thermische Schichtung bleibt dabei über die gesamte Betrachtungsdauer erhalten, jedoch reicht diese im Zeitraum ab etwa der 15. Minute im Vergleich zu den Busbrandberechnungen tiefer im Luftraum herab.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 82

Zur Bewertung der Selbstrettungsphase werden nachfolgend die Ergebnisse zur Berechnungsgröße der optischen Dichte in einer Höhe von 2,5 m sowie in einer Höhe von 2,0 m über dem jeweiligen Bodenniveau im zeitlichen Verlauf dargestellt.

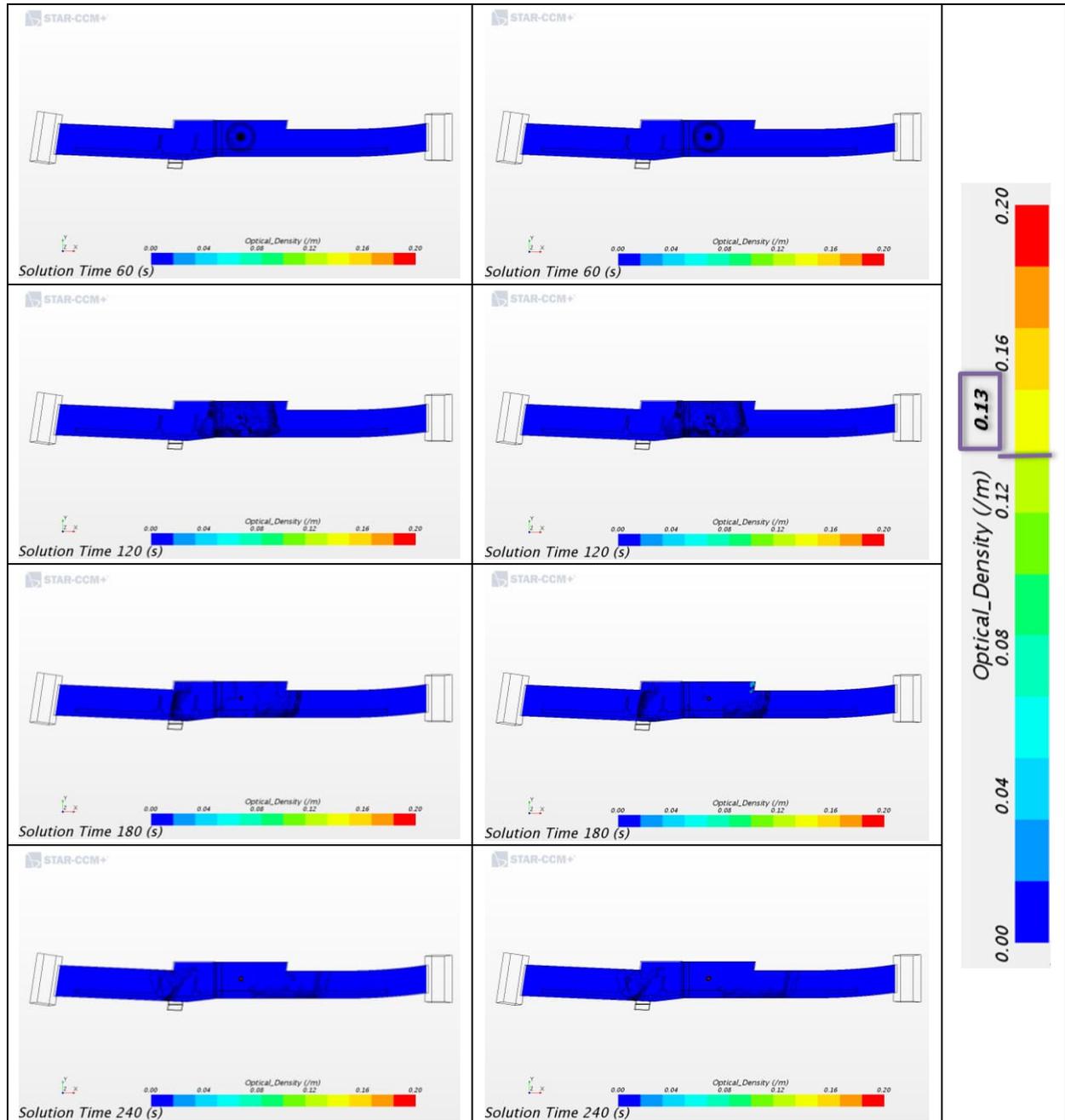


Abbildung 52 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 1. und 4. Simulationsminute des Trambrandes;
links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

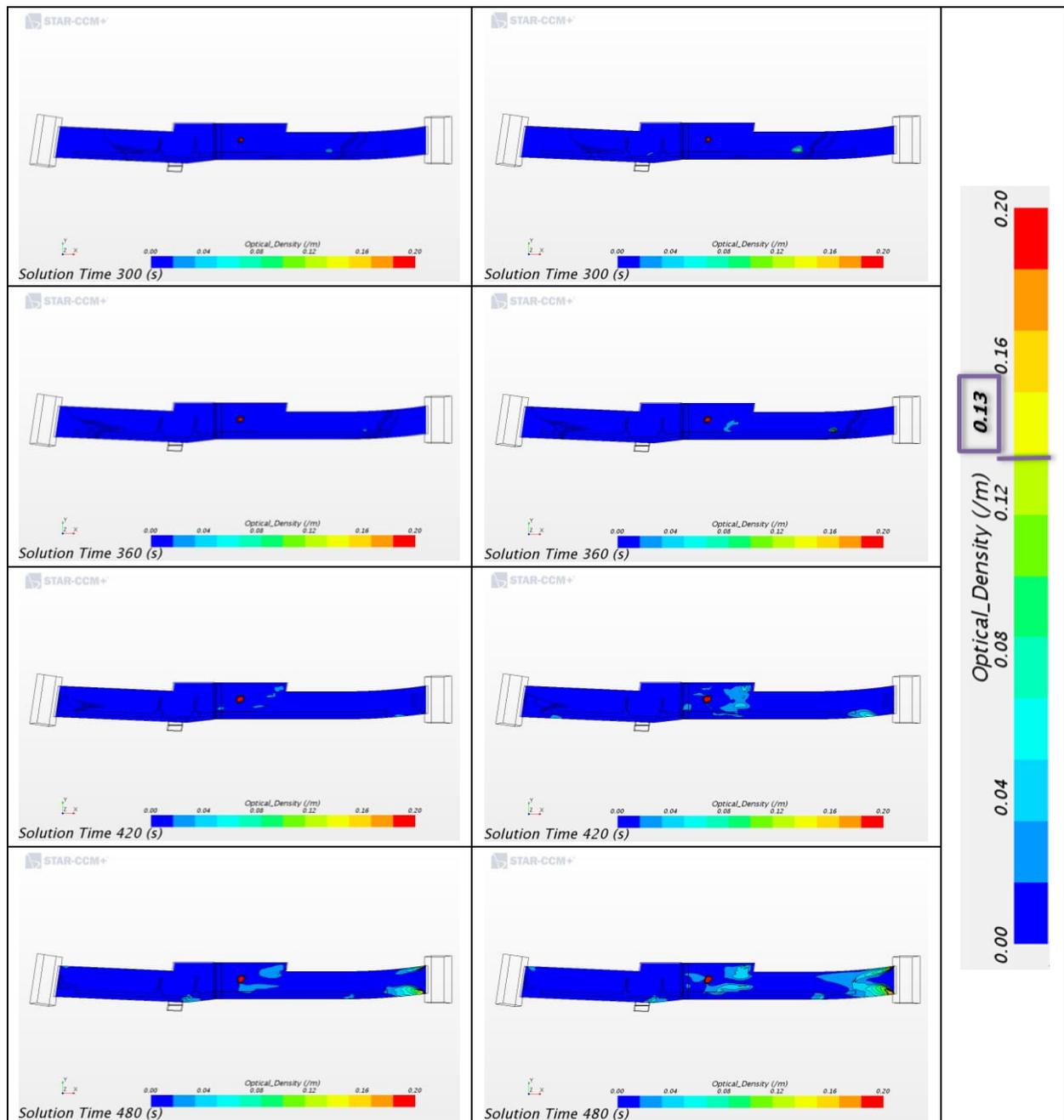


Abbildung 53 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 4. und 8. Simulationsminute des Trambrandes;
links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

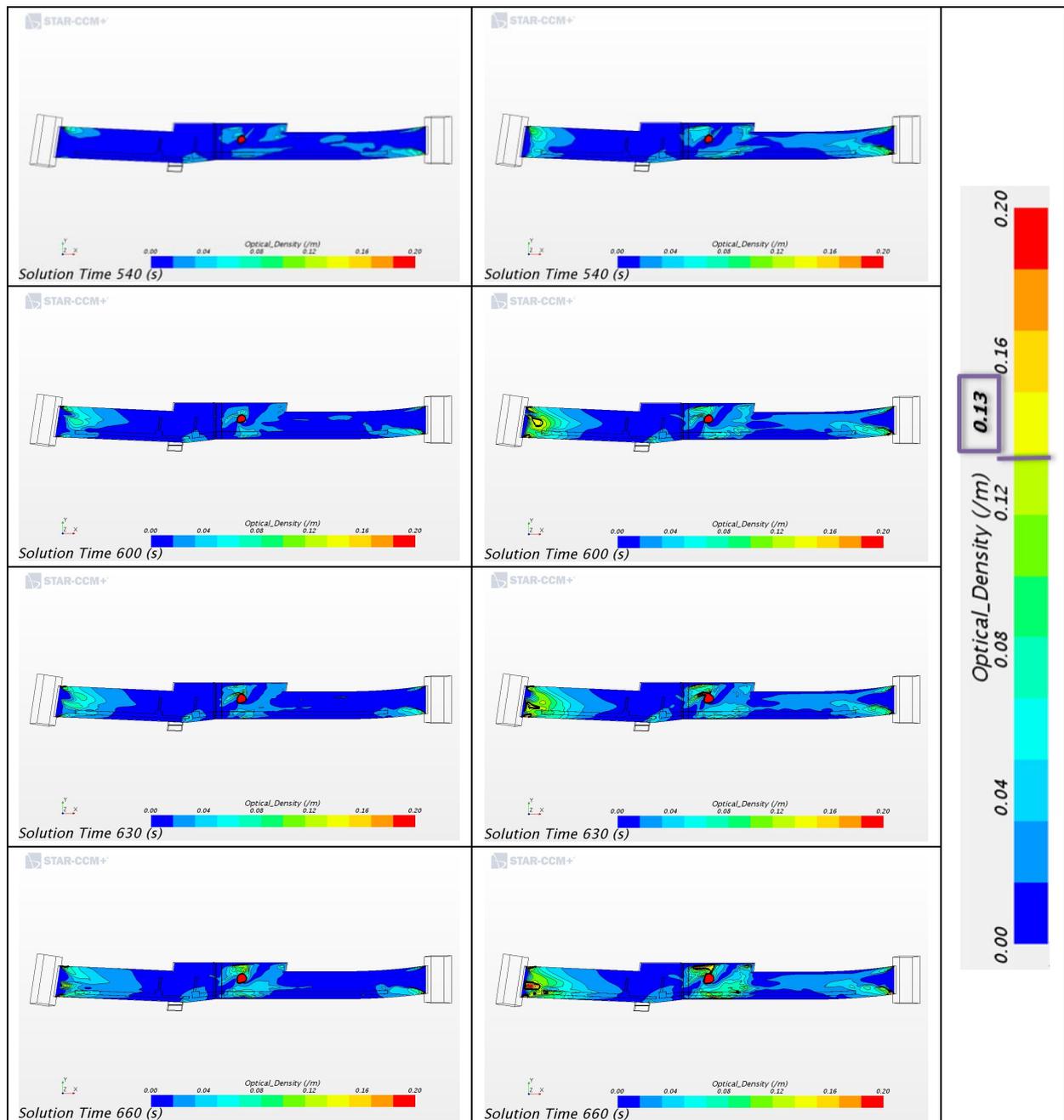


Abbildung 54 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 9. und 11. Simulationsminute des Trambrandes;
 links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 85

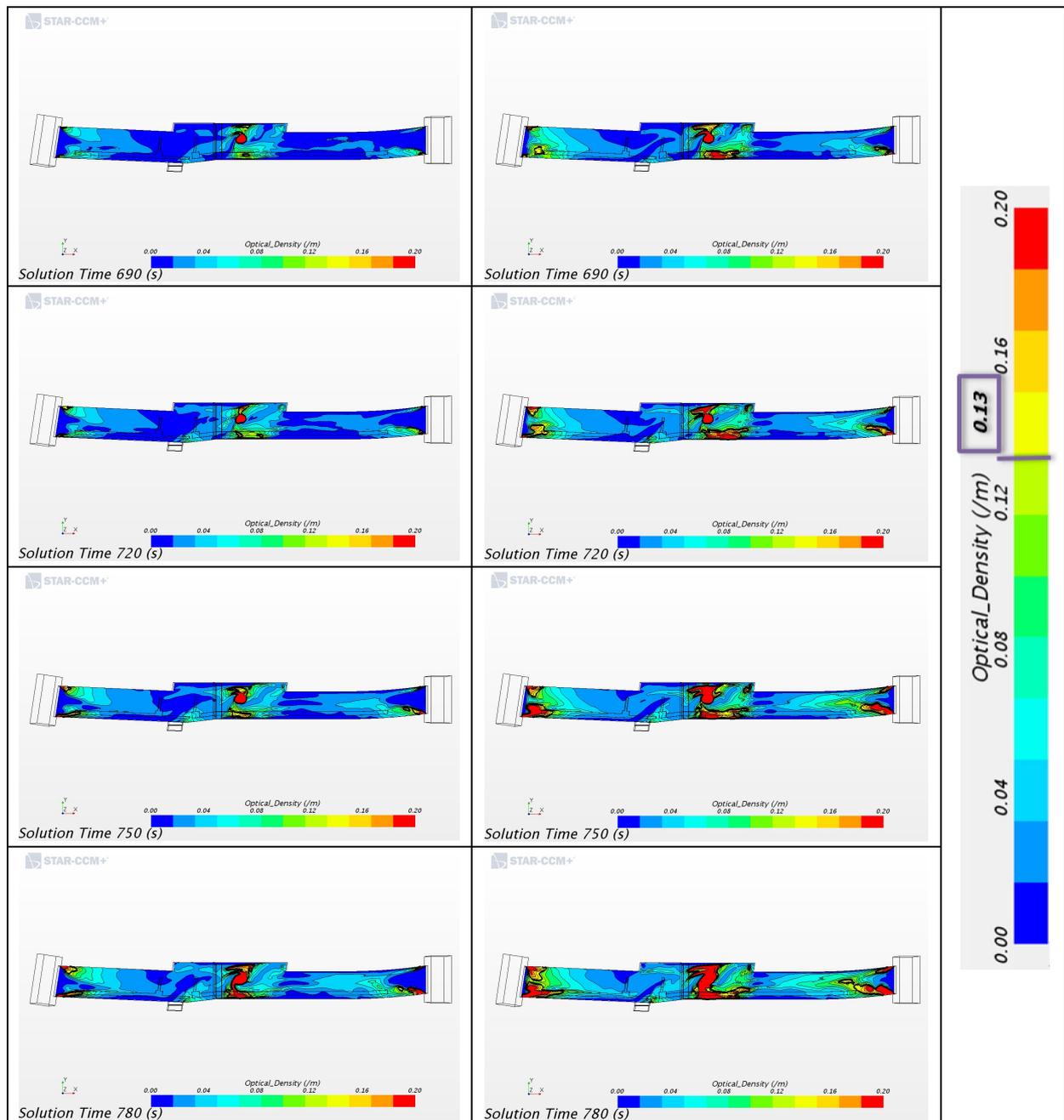


Abbildung 55 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 11,5. und 13. Simulationsminute des Trambrandes;
links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 86

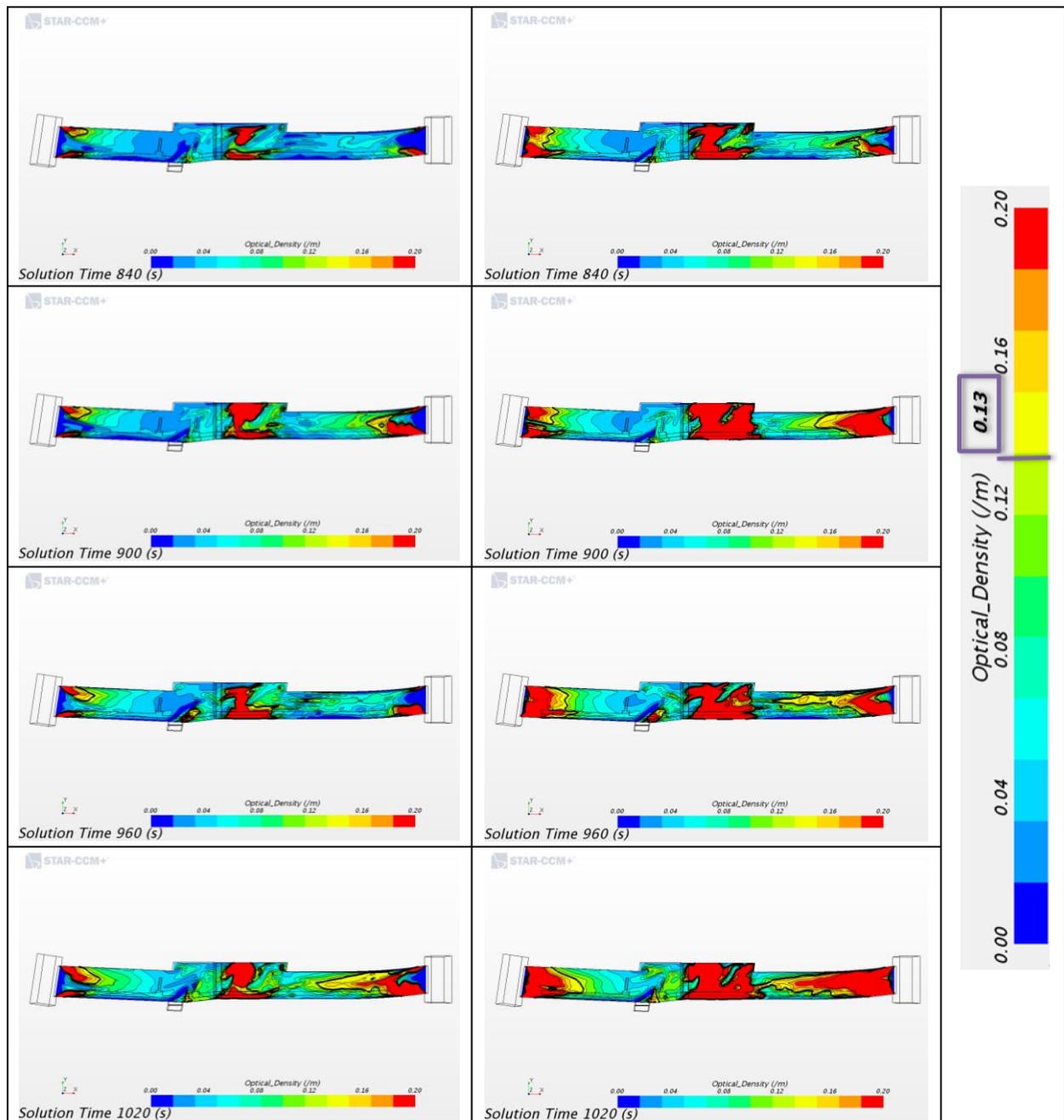


Abbildung 56 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 14. und 17. Simulationsminute des Trambrandes;
links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

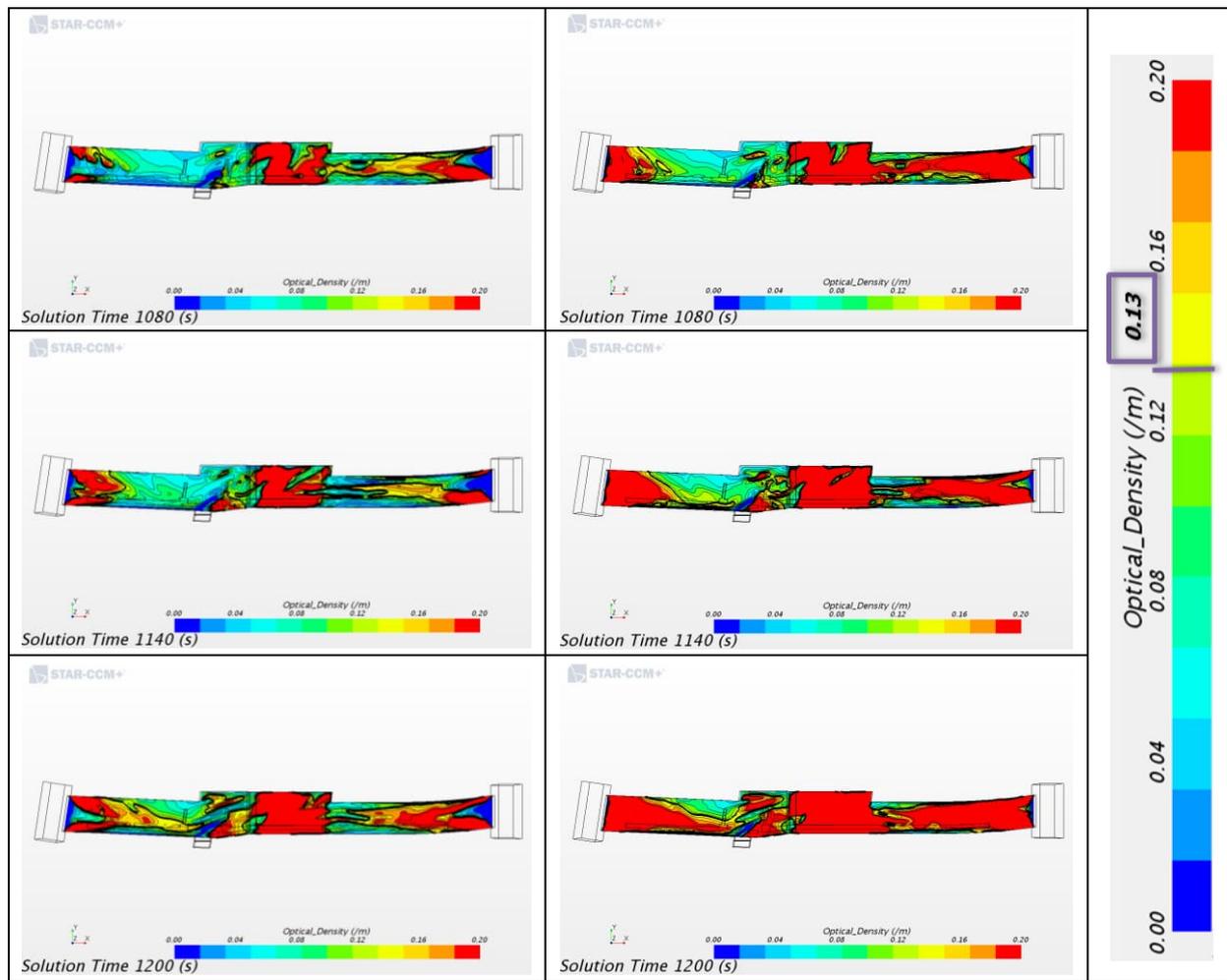


Abbildung 57 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 18. und 20. Simulationsminute des Trambrandes;
links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

Die Auswertung der optischen Dichte in der Auswertehöhe von 2,5 m zeigt über die Betrachtungsdauer einen Anstieg der Berechnungswerte. Der Beurteilungsgrenzwert für die Bewertung von ausreichend raucharmen Verhältnissen für die Selbstrettung wird zur zehnten Simulationsminute in einer Höhe von 2,5 m erreicht bzw. überschritten. Ausgehend von dieser zunächst lokalen Überschreitung am Südportal wird nach einer Simulationsdauer von etwa 13 Minuten über fast die gesamte Tunnelbreite am Südportal das Auswertekriterium überschritten. Zu diesem Zeitpunkt wird das Grenzkriterium auch zunehmend in der nördlichen Tunnelhälfte erreicht bzw. überschritten. Insgesamt können auch hier wieder in der Auswertehöhe von 2,0 m deutlich geringere Rauchgaskonzentrationen festgestellt werden, was die Ausbildung einer stabilen Rauchschiebung ohne eine schlagartige vollständige Verrauchung von Tunnelbereichen zeigt.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 88

Nachfolgend werden zur Bewertung der Verrauchungsverhältnisse hinsichtlich der Fremdre-
 tungsphase die Berechnungsergebnisse der optischen Dichte für die Auswertehöhen, regel-
 konform von 1,5 m und ferner als Orientierungshilfe für kritische Bereiche auch für 1,0 m,
 dargestellt.

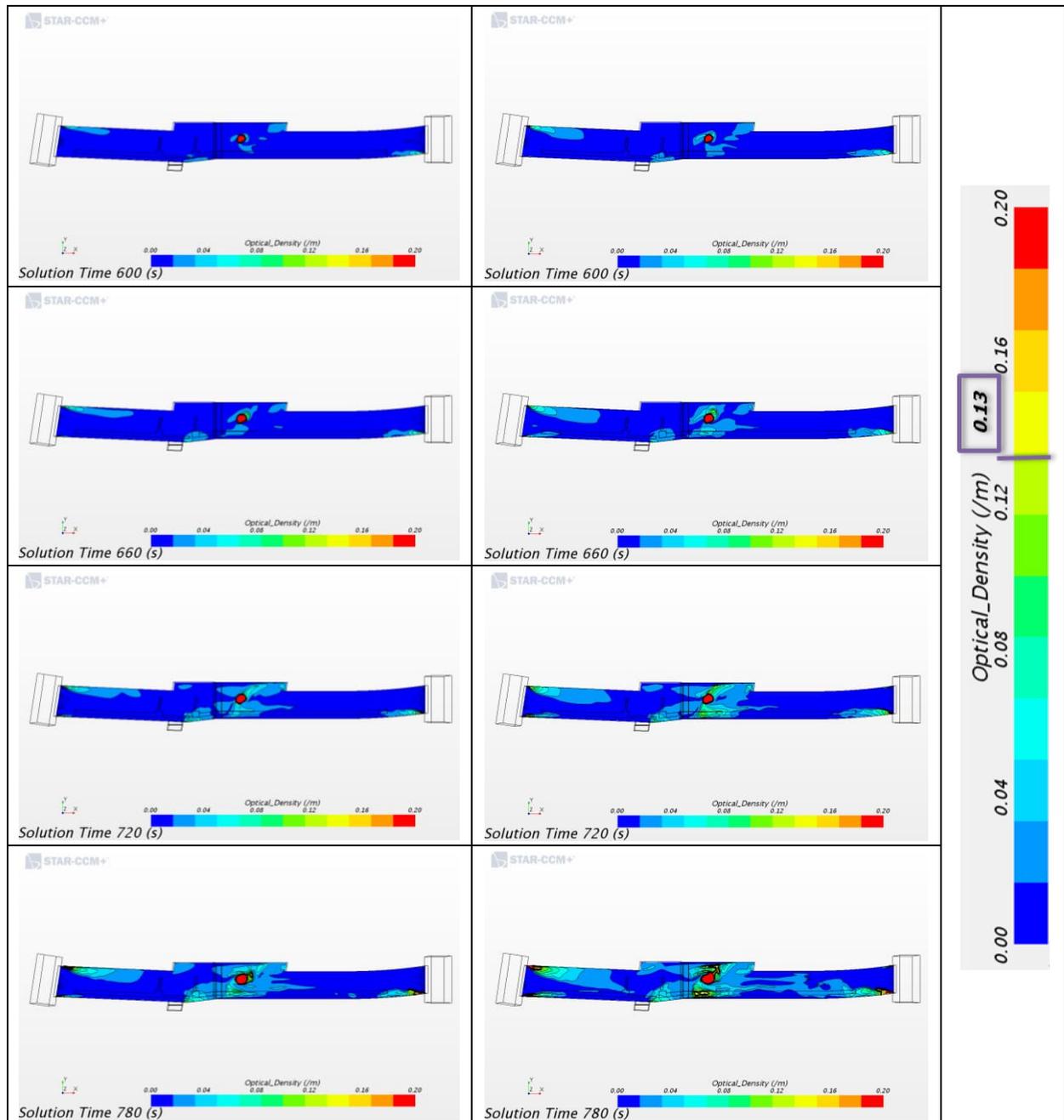


Abbildung 58 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 10. und 13. Simulationsminute des Trambrandes;
 links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

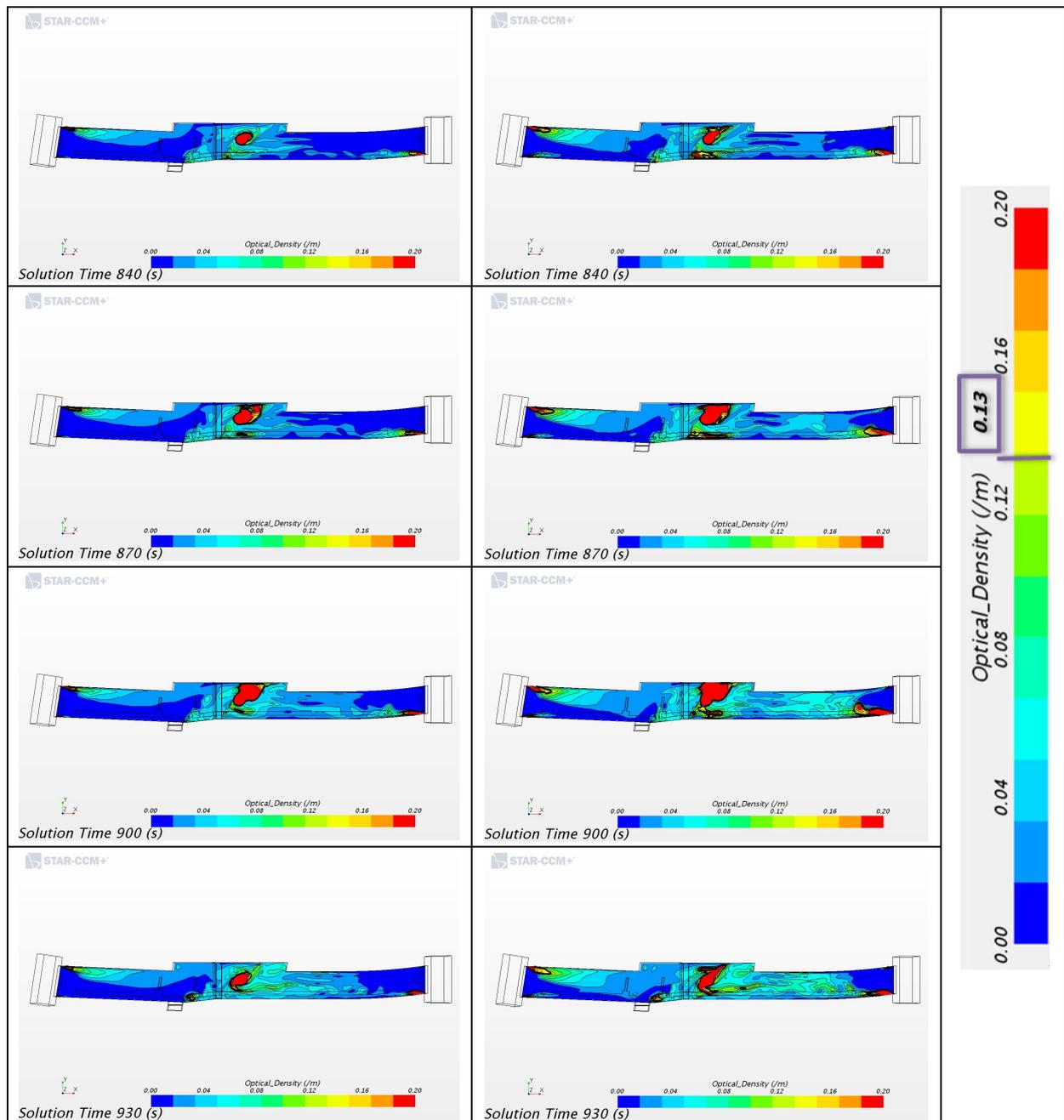


Abbildung 59 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 14. und 15,5. Simulationsminute des Trambrandes;
 links: Auswertehöhe 2,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 2,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 90

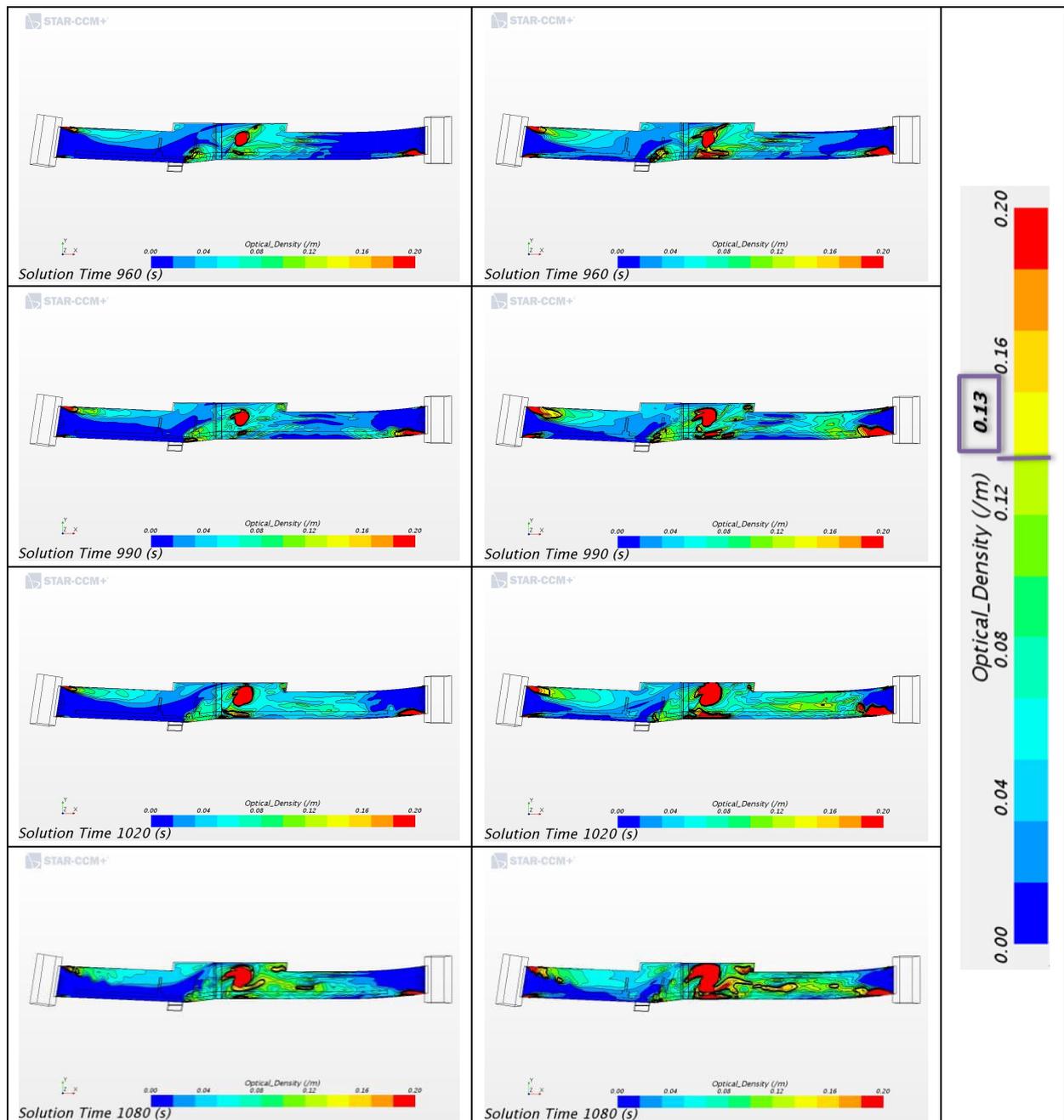


Abbildung 60 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 16. und 18. Simulationsminute des Trambrandes;
 links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

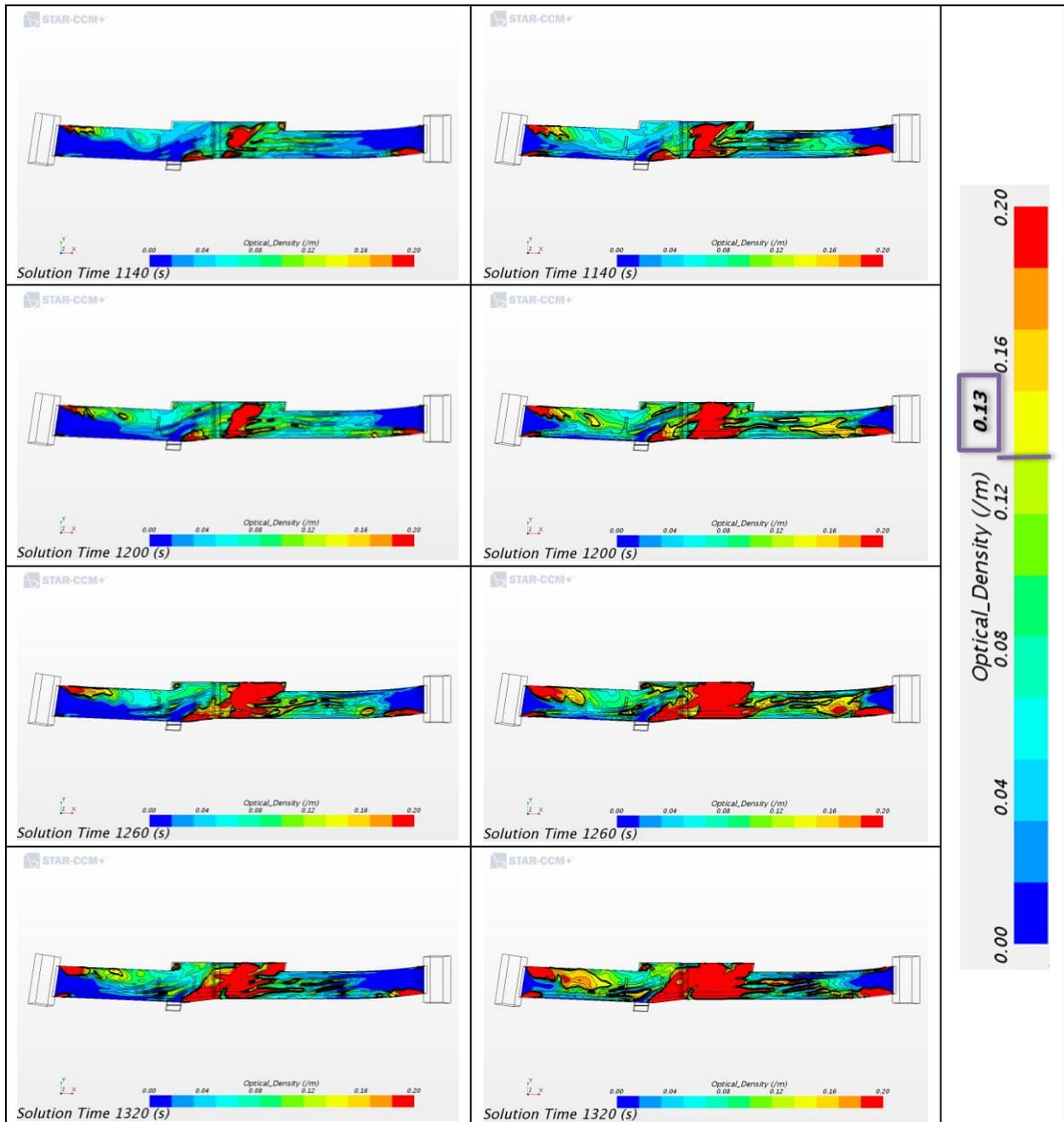


Abbildung 61 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 19. und 22. Simulationsminute des Trambrandes;
links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 92

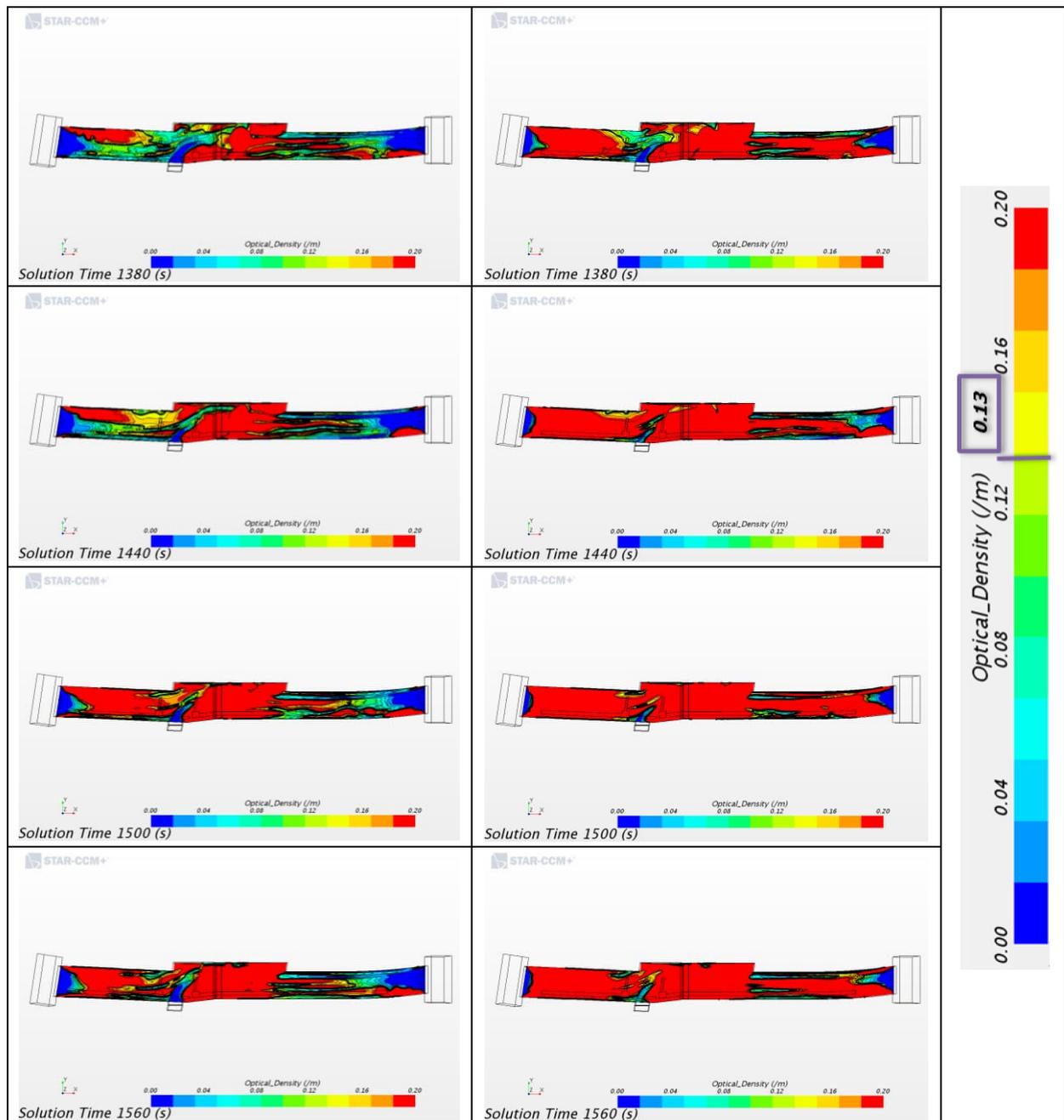


Abbildung 62 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 23. und 26. Simulationsminute des Trambrandes;
 links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

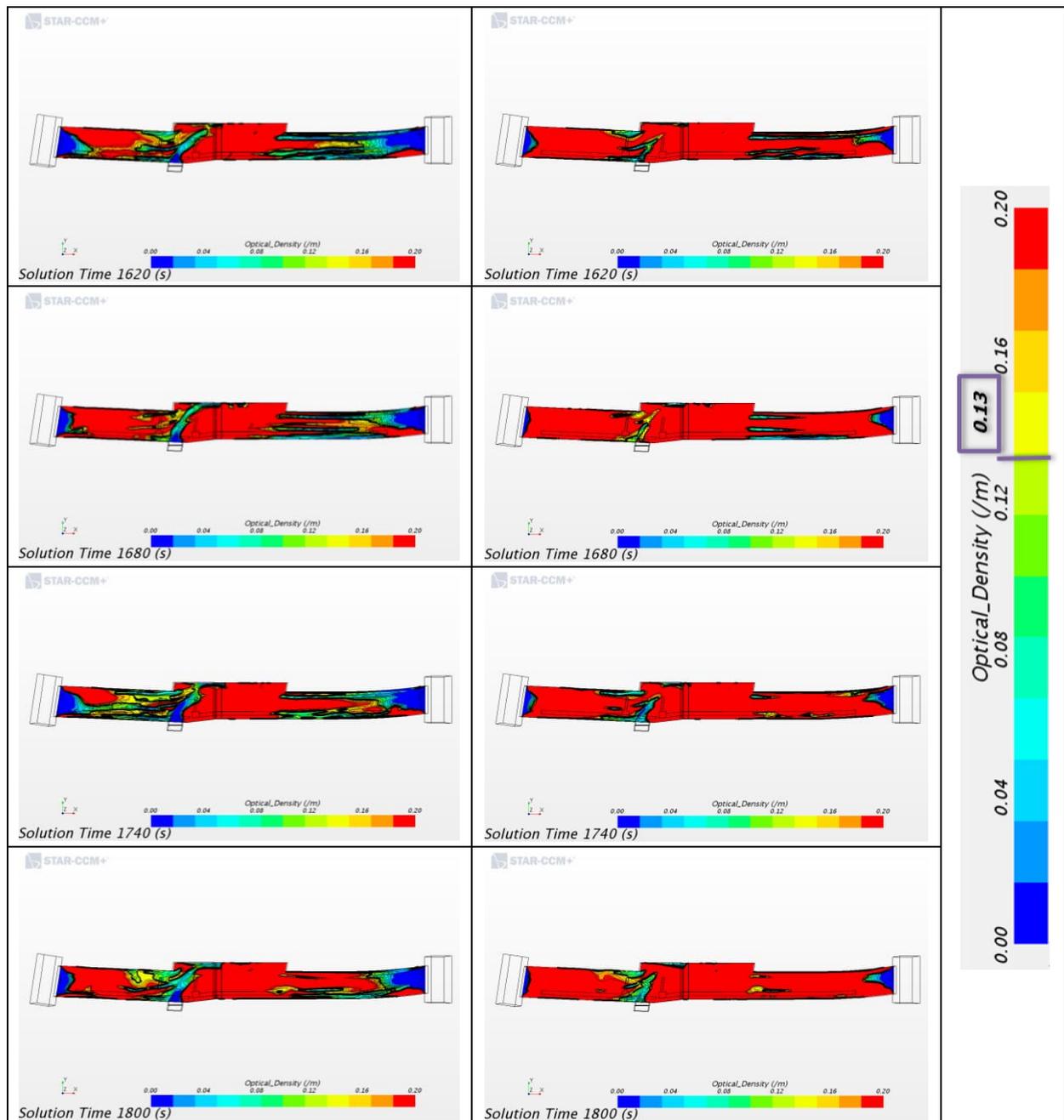


Abbildung 63 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte zwischen der 27. und 30. Simulationsminute des Trambrandes;
links: Auswertehöhe 1,0 m zur Orientierung; rechts: Auswertehöhe 1,5 m zur Bewertung

Auch die Auswertung der Ergebnisse der optischen Rauchdichte in der Auswertehöhe von 1,5 m über dem jeweiligen Bodenniveau zeigt erneut mit zunehmender Brandleistung einen Anstieg der Rauchkonzentration. Das Grenzkriterium wird dabei in einer Auswertehöhe von

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 94

1,5m bis mindestens 15 Minuten nach Simulationsbeginn erfüllt. Im Weiteren stellt sich in dieser Auswertehöhe ein zunehmender Raucheintrag mit wesentlicher Rauchgaskonzentration ein. Ab rund 20 Minuten wird dieses Auswertekriterium fast flächendeckend im gesamten Tunnelluftraum überschritten. Durch die bis fast zum Ende der Betrachtungsdauer ansteigende Brandleistung steigt die Rauchkonzentration entsprechend auch weiter an. Das Leistungskriterium für die Fremdrettungsphase kann somit für diesen Bemessungsbrandverlauf nicht über eine Betrachtungsdauer von 30 Minuten nachgewiesen werden.

Für diesen Berechnungsfall erfolgt ebenfalls eine Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Rauchausbreitung im Tunnelluftraum über die Berechnungsgröße der optischen Dichte in Vertikalschnitten.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 95

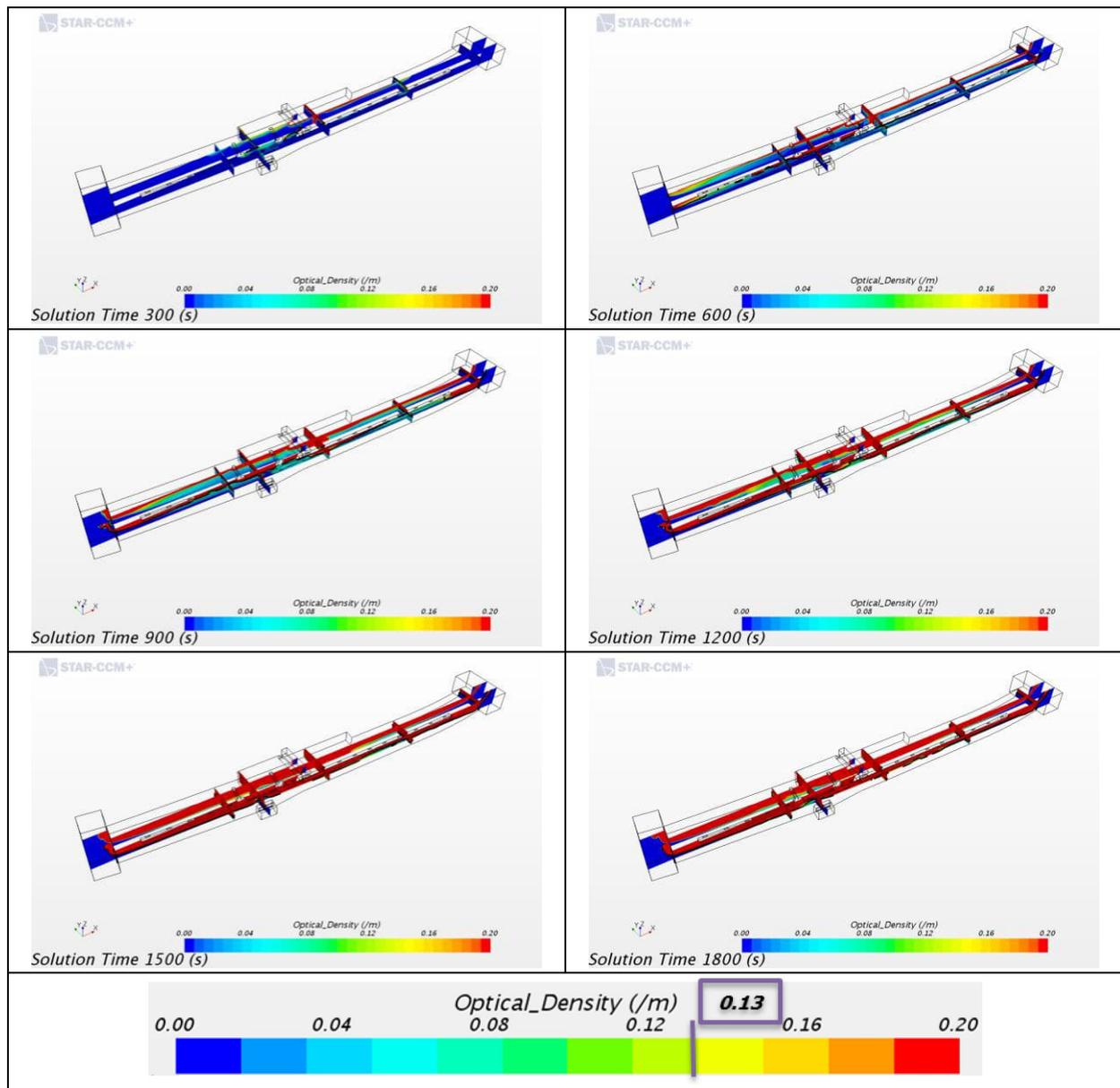


Abbildung 64 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte mit Darstellung in Vertikal-schnitten Trambrand

Diese Auswertung zeigt, wie bereits die Darstellung der Rauchausbreitung in den definierten Auswertehöhen, eine über den Brandverlauf zunehmende Stärke der Rauchsicht mit fortschreitender Branddauer und Brandleistung. Die bewertungsrelevante Rauchausbreitung reicht dabei zum Ende der Simulationsdauer in großen Teilen des Tunnellufttraums bis auf das Bodenniveau herab.

Um jedoch noch einmal die lokale Situation im Zeitbereich der Überschreitung des Auswertekriteriums für die Selbstrettungsphase sowie die Fremdrettungsphase besser bewerten zu

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 96

können, wurden auch hier wieder die kombinierten Darstellungen einer Iso-Fläche für den Wert der optischen Dichte von $0,13 \text{ m}^{-1}$ und der Auswertehöhe von 2,5 m bzw. 1,5 m erstellt, welche nachfolgend für die Zeitbereiche zwischen der zehnten und zwölften bzw. zwischen der 14. und 16. Simulationsminute abgebildet sind. Hiervon vergrößerte Abbildung dieser Darstellungen finden sich ebenfalls im Anhang.

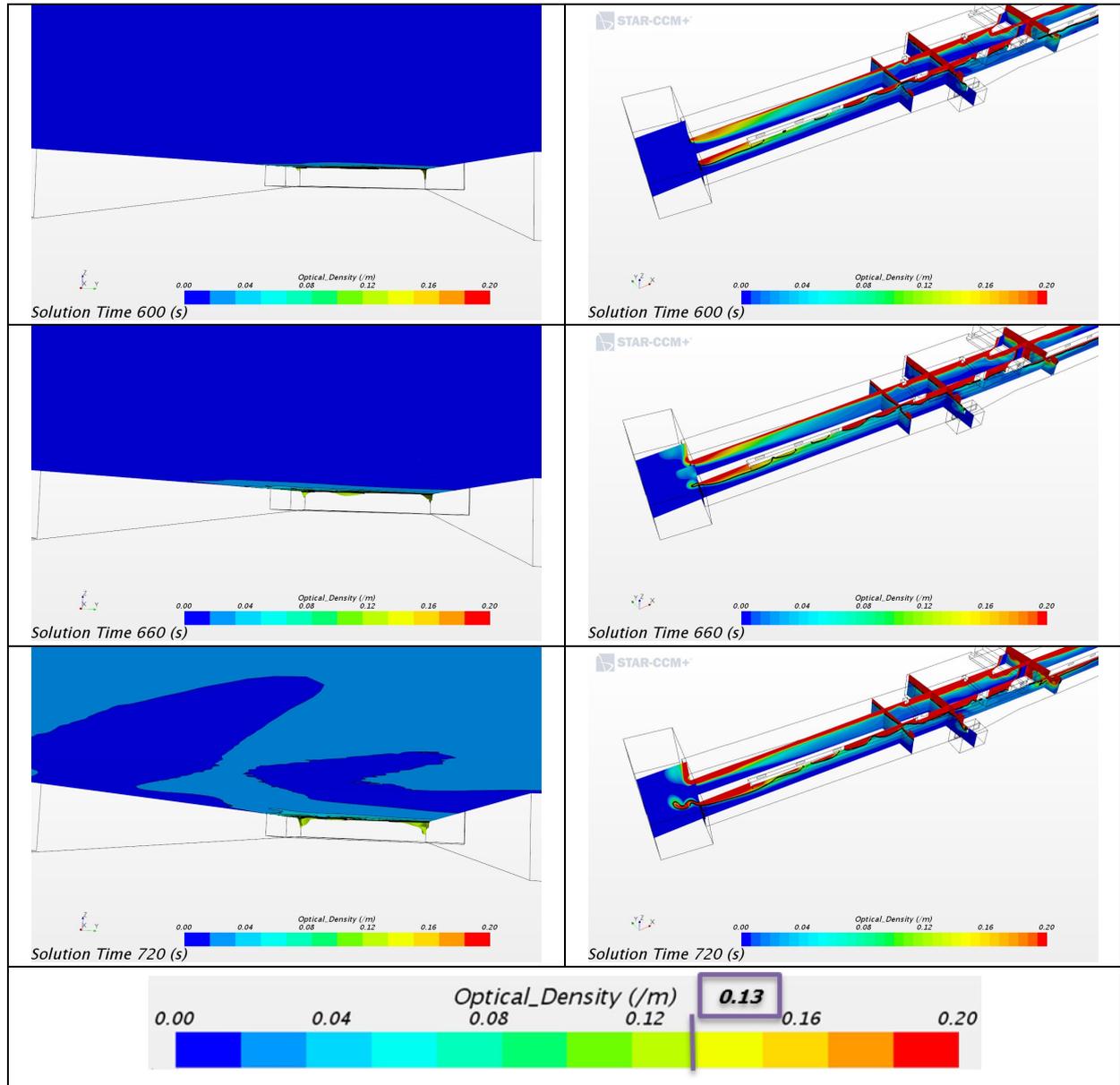


Abbildung 65 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte, Detailbetrachtung der 10. - 12. Simulationsminute Trambrand, links: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, rechts: Vertikalschnitte

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 97

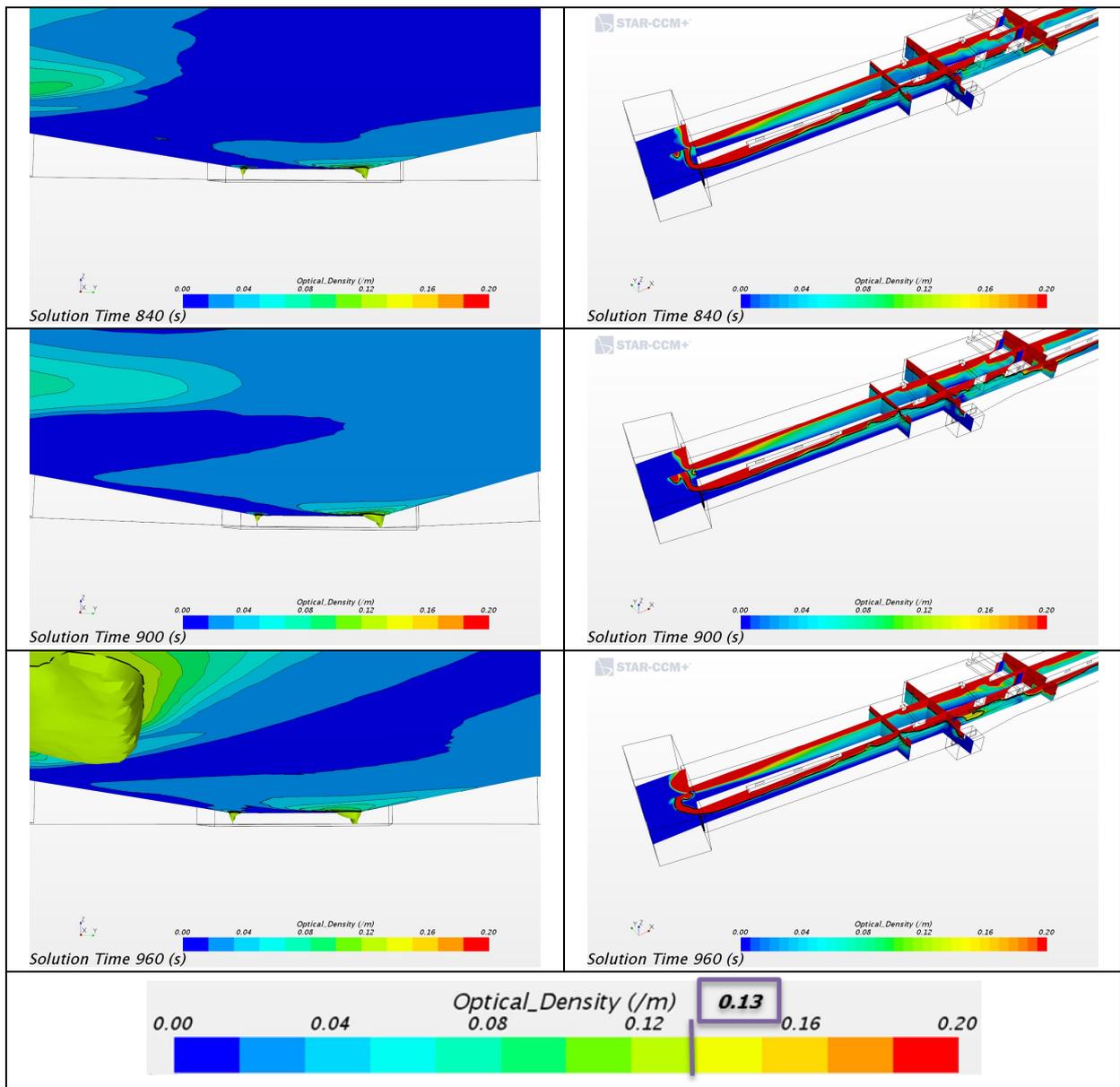


Abbildung 66 Zeitliche Entwicklung der optischen (Rauch-)Dichte, Detailbetrachtung der 14. - 16. Simulationsminute Trambrand, links: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 1,5 m, rechts: Vertikalschnitte

9 Zusammenfassung

Im Zuge des Planungs- und Genehmigungsverfahrens für die Realisierung des Verkehrsprojekts Umweltverbundröhre (UVR) in München als Unterführung für den Personennahverkehr der Gleisanlagen an der S-Bahn-Haltestelle „Laim“ wurde das Unterzeichnerbüro in der Frage der ausreichenden Rauchableitung im Brandfall mit der Durchführung von Brandsimulationsberechnungen beauftragt.

Im Planungszeitraum 2019/20 wurde zunächst eine geplante natürliche Rauchableitung im Rahmen der Brandsimulationsuntersuchung betrachtet. Die Ergebnisse sowie die zugehörigen wesentlichen Anfangs- und Randbedingungen der seinerzeit durchgeführten Brandsimulationsberechnungen wurden in entsprechenden Brandsimulationsberichten dokumentiert. Da die vorgelegten Ergebnisse der Brandsimulationsuntersuchung auf Basis der natürlichen Rauchableitungsmaßnahmen keine abschließende Akzeptanz hinsichtlich einer ausreichenden Zielerreichung bei den Genehmigungsstellen fanden, wurde eine veränderte Planung auf Basis von Maßnahmen einer maschinellen Entrauchung vorgelegt. Diese Planung wurde in entsprechenden Brandsimulationsberechnungen zugrunde gelegt und berücksichtigt.

Im vorliegenden Brandsimulationsbericht wurden zunächst die Schutzzielanforderungen und die hieraus abgeleiteten, konkreten Leistungskriterien sowie die beiden nachweisrelevanten Brandszenarien, „Szenario Bus“ und „Szenario Tram“, beschrieben. Anschließend wurden die Wahl des Berechnungsverfahrens, die wesentlichen Anfangs- und Randbedingungen sowie die Ergebnisse von insgesamt drei Berechnungsfällen dargestellt.

Als zentrale Ergebniswerte der durchgeführten Brandsimulationsberechnungen wurden folgende Zeitpunkte ermittelt, zu welchen der Grenzwert der optischen Dichte von $0,13 \text{ m}^{-1}$, als Maß für die Bewertung von noch ausreichend raucharmen Verhältnissen, noch ausreichend eingehalten wird.

Für Berechnungsfall Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze:

- für die Selbstrettungsphase: 8 Minuten;
- für die Fremdrettungsphase: > 30 Minuten.

Für Berechnungsfall Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze:

- für die Selbstrettungsphase: 13 Minuten;
- für die Fremdrettungsphase: 16 Minuten.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Seite 99

Für Berechnungsfall Trambrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze:

- für die Selbstrettungsphase: 10 Minuten;
- für die Fremdrettungsphase: 14 Minuten.

Die aus den Berechnungsergebnissen ermittelten Zeitdauern, für welche das Nachweiskriterium für die Selbstrettungsphase im jeweiligen Berechnungsfall eingehalten wird, bilden die Basis für den Abgleich mit der erforderlichen Räumungszeit, welche aus den weiterführenden Betrachtungen der STUVatec GmbH hervorgeht.

Bezüglich einer für den konkreten Einzelfall der Umweltverbundröhre möglichen Zulässigkeit der geringfügigen Überschreitungen des Auswertegrenzwerts hinsichtlich von ausreichend raucharmen Verhältnissen für die Fremdrettung, unter Ansatz der maschinellen Entrauchung in Verbindung mit der durchgehenden Rauchschräge in Tunnellängsrichtung, ist in Abstimmung mit den zuständigen Genehmigungsstellen zu entscheiden.

Die hier dargestellten Berechnungsergebnisse ergeben sich unter den genannten Anfangs- und Randbedingungen des konkreten Betrachtungsfalls. Eine Übertragbarkeit der Berechnungsergebnisse bei Änderungen der Anfangs- und Randbedingungen ist durch den Unterzeichner zu prüfen und zu bewerten.


Dipl.-Ing. (FH)
Udo Kirchner
BaykaBau
Nachweisberechtigter
für Verb. Brandschutz
51836
ÖFFENTLICHEN BEREICH DER BAYERISCHEN INGENIEURKAMMER UND KUNDENSCHUTZ DES ÖFFENTLICHEN BEREICHES

Udo Kirchner

von der IHK Aachen
Öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger für vorbeugenden Brandschutz

Staatlich anerkannter Sachverständiger
für die Prüfung des Brandschutzes



Andreas Müller

Brandschutzingenieur

Der vorliegende Brandsimulationsbericht umfasst 99 Seiten und eine Anlage.

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlagen

Anlagen

A1 **Vergrößerte Berechnungsplots zur verbesserten
Detailbetrachtung**

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1

**A1 Vergrößerte Berechnungsplots zur verbesserten
Detailbetrachtung**

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-1

Busbrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-2

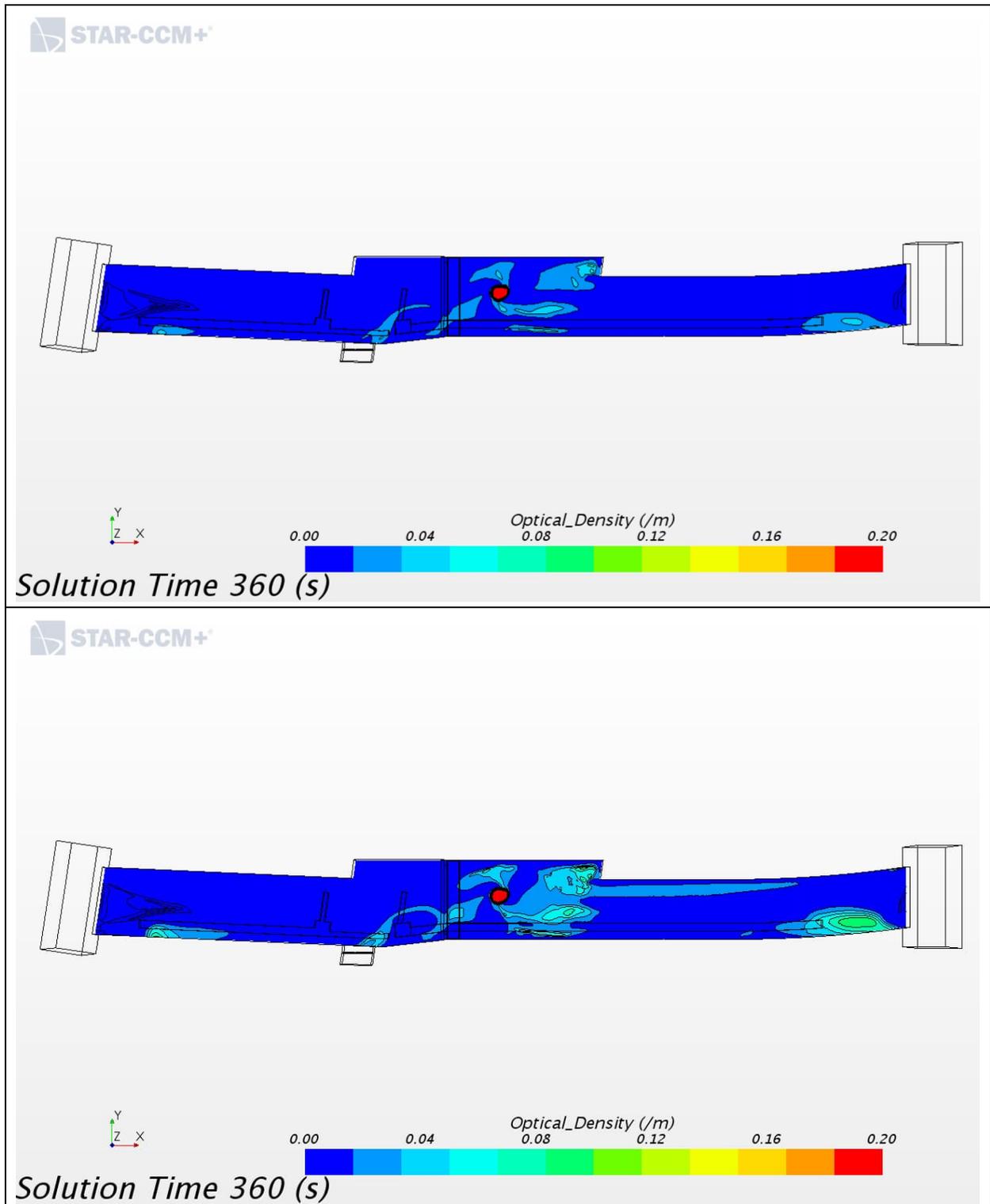


Abbildung A1- 1 Optische (Rauch-)Dichte zur 6. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-3

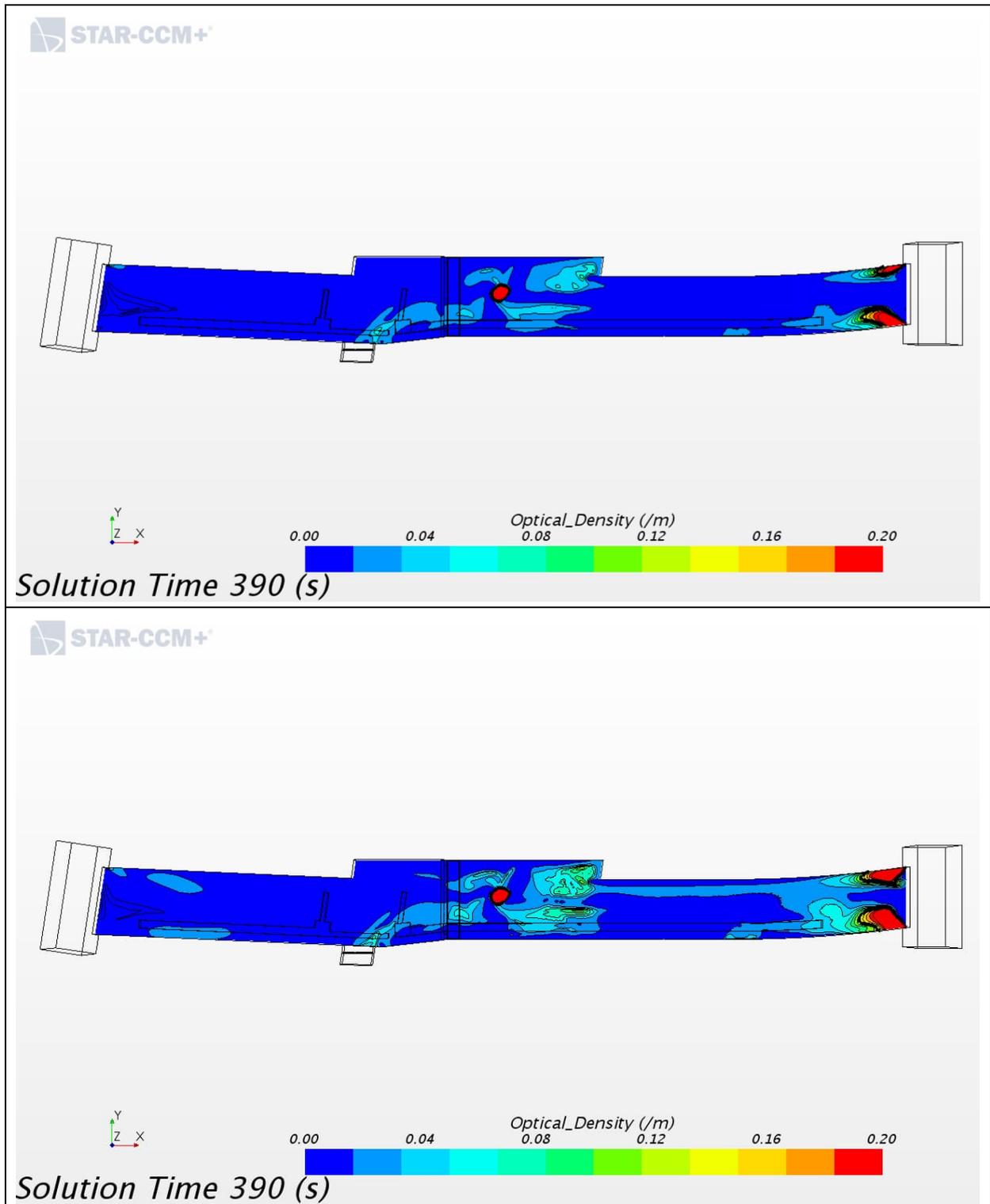


Abbildung A1- 2 Optische (Rauch-)Dichte zur 6,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-4

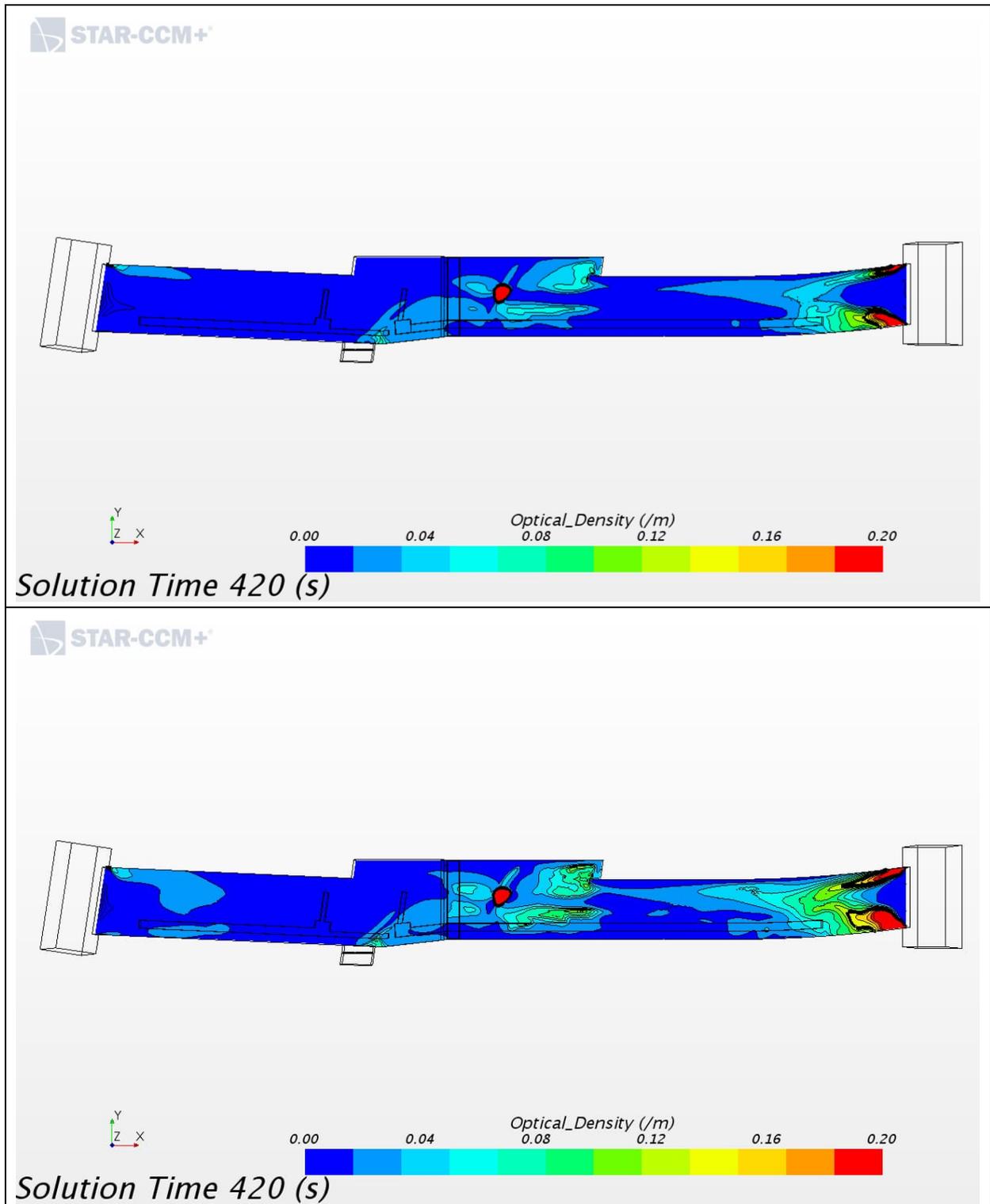


Abbildung A1- 3 Optische (Rauch-)Dichte zur 7. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-5

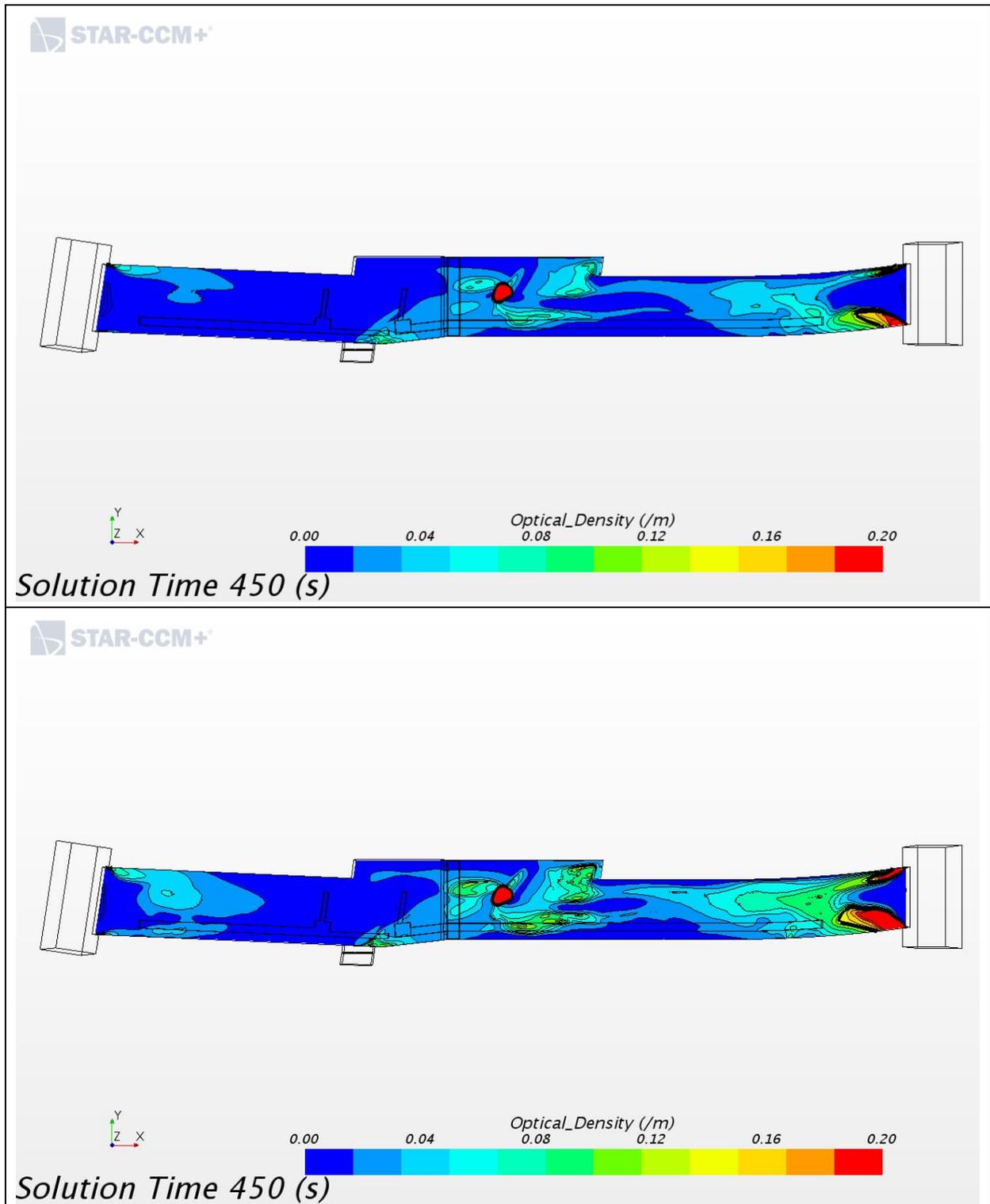


Abbildung A1- 4 Optische (Rauch-)Dichte zur 7,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-6

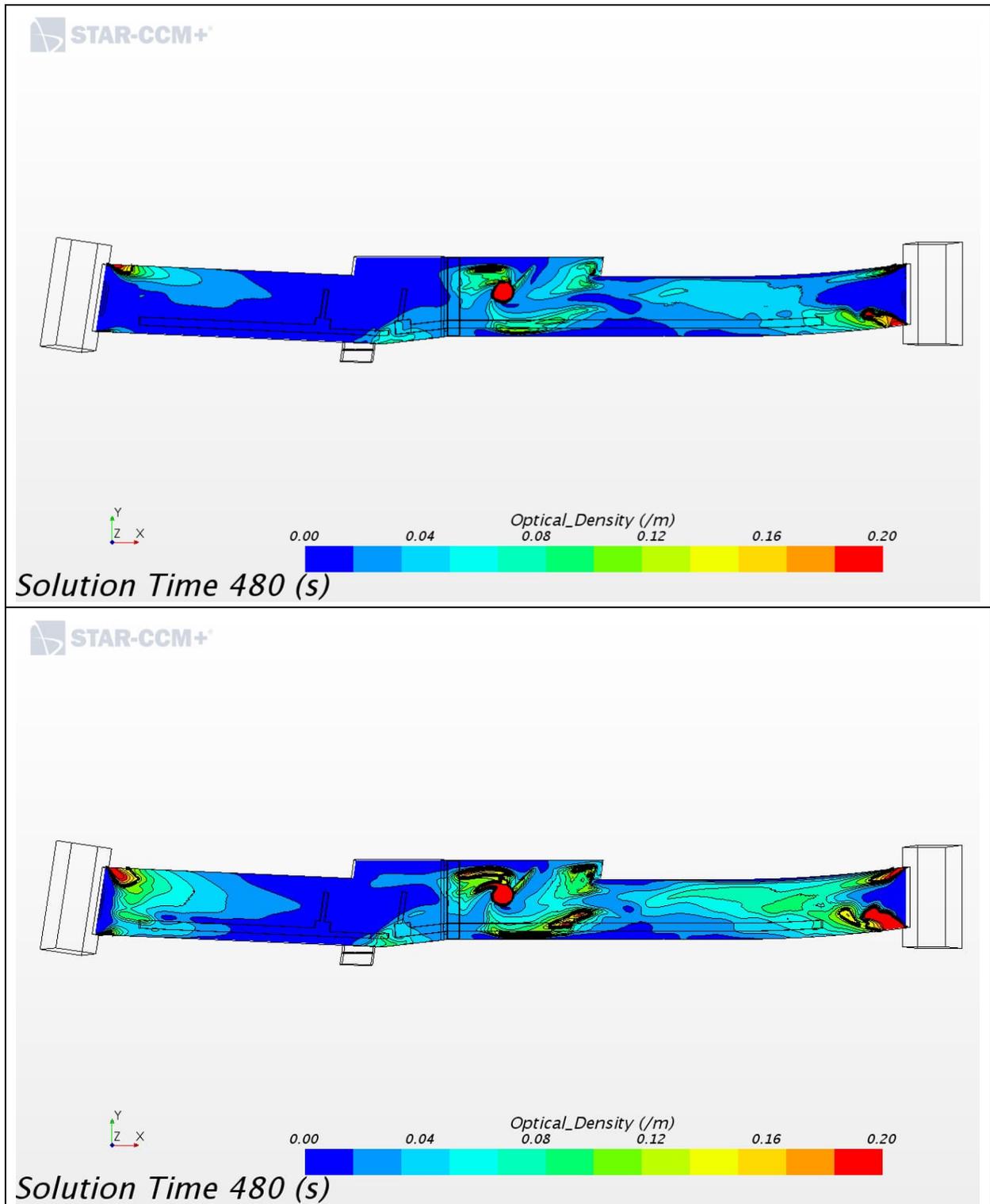


Abbildung A1- 5 Optische (Rauch-)Dichte zur 8. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-7

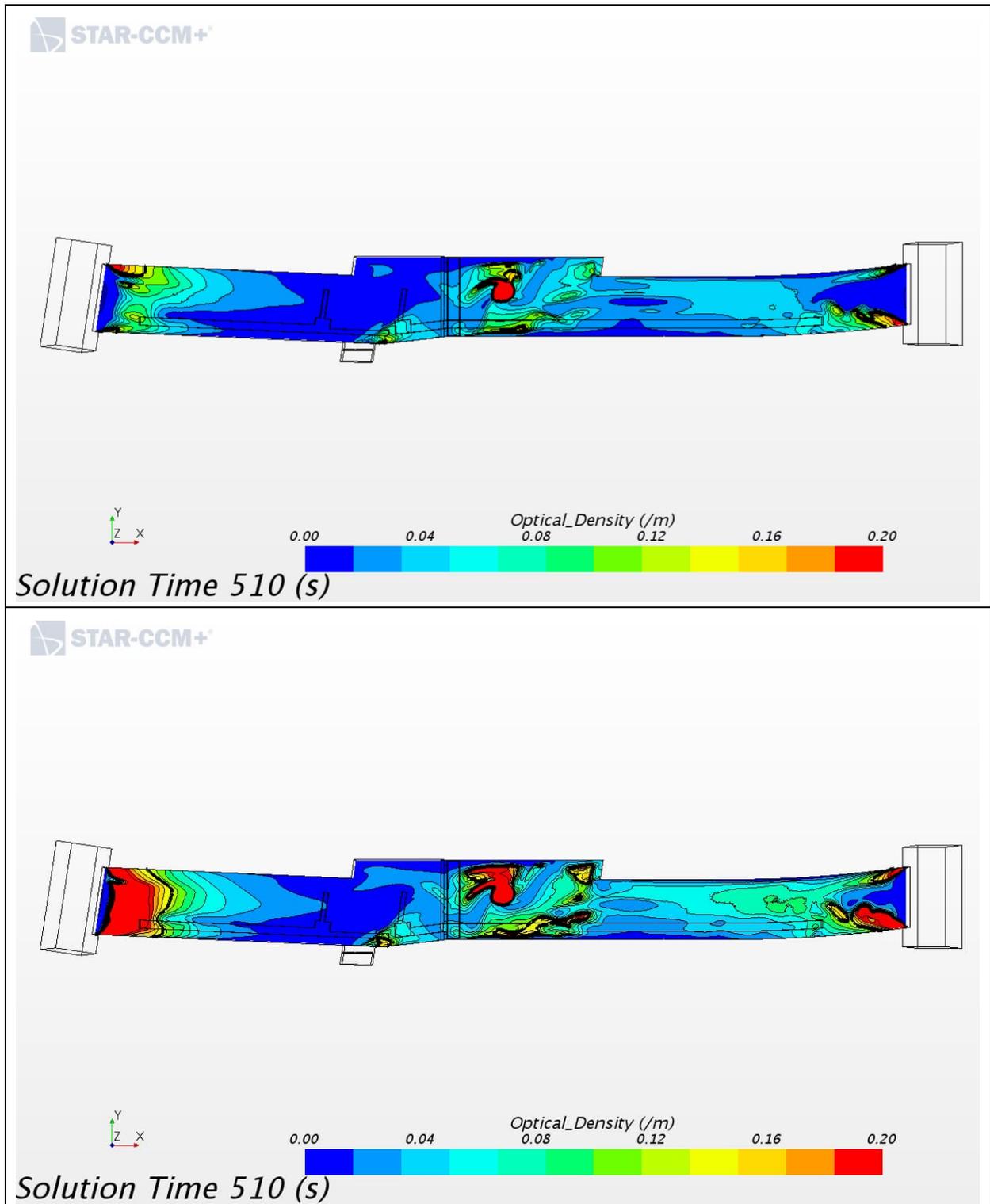


Abbildung A1- 6 Optische (Rauch-)Dichte zur 8,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-8

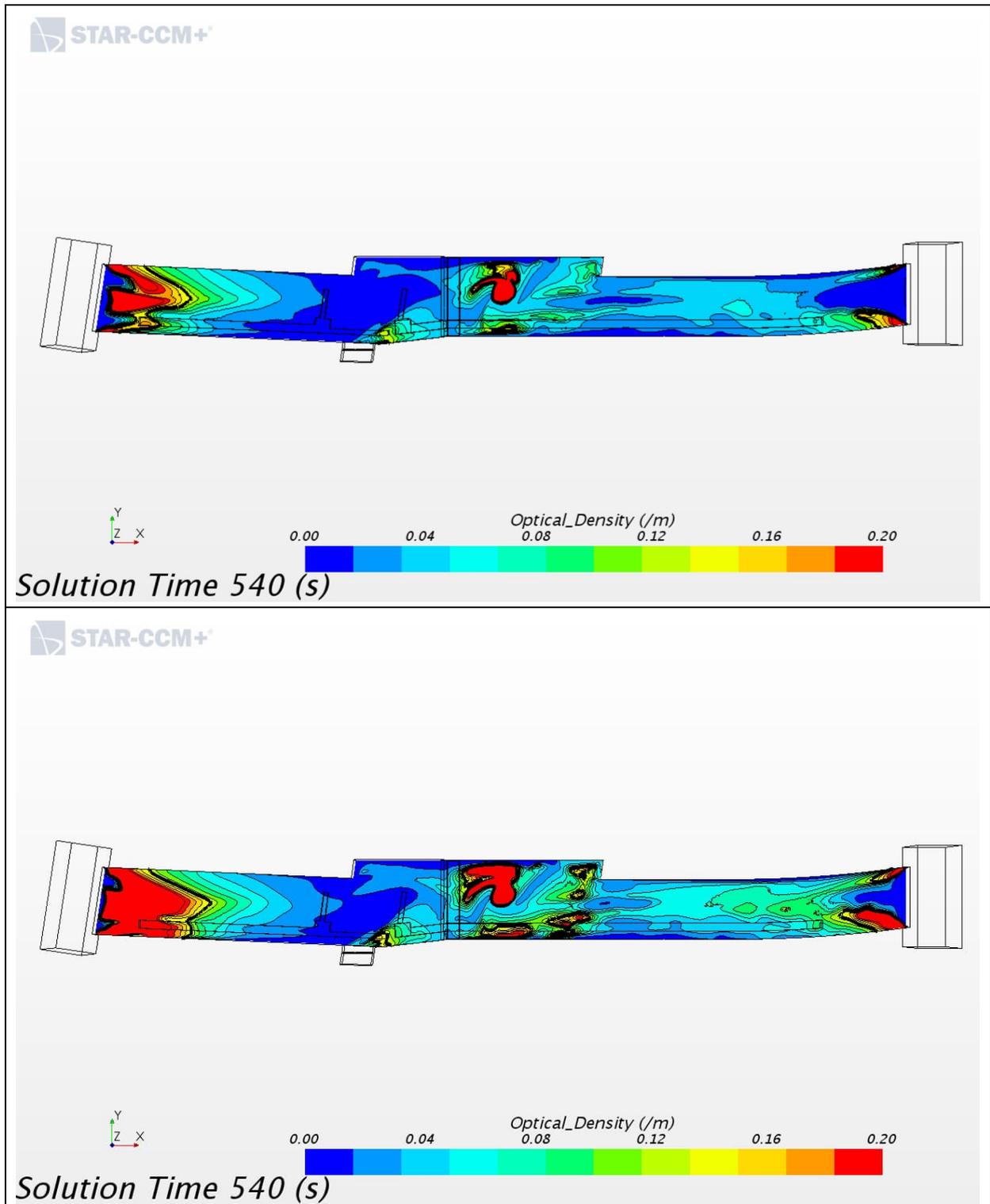


Abbildung A1- 7 Optische (Rauch-)Dichte zur 9. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-9

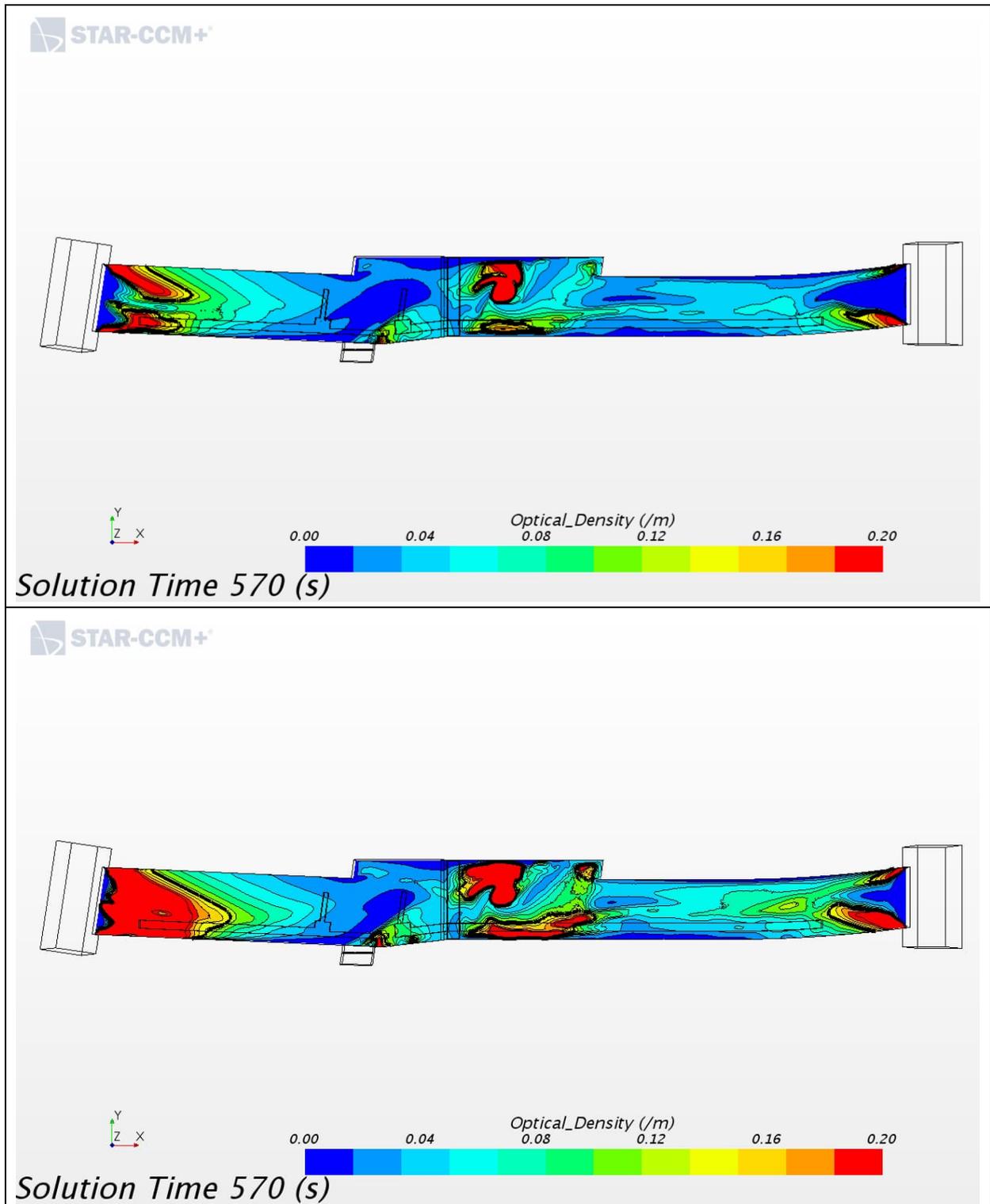


Abbildung A1- 8 Optische (Rauch-)Dichte zur 9,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-10

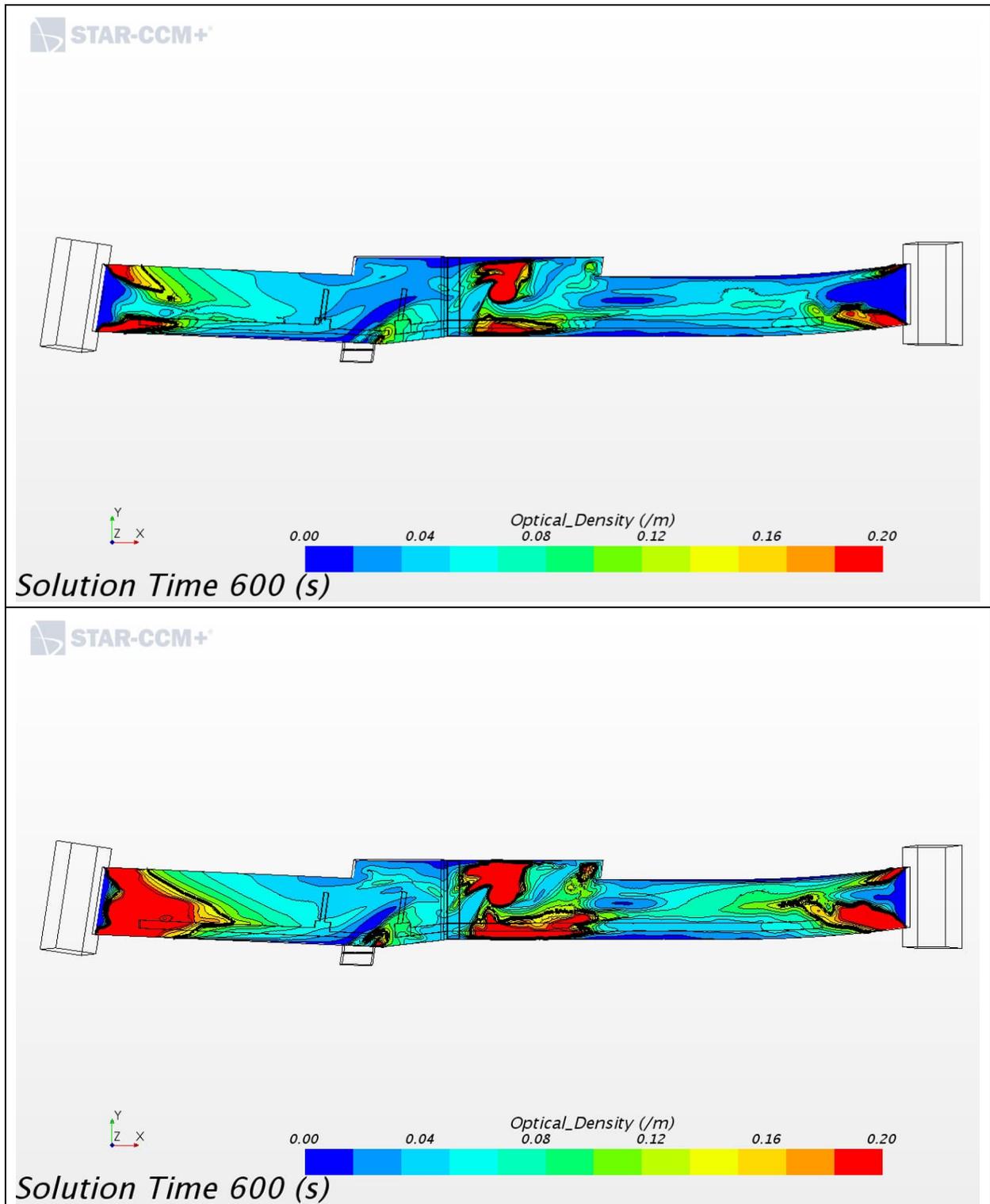


Abbildung A1- 9 Optische (Rauch-)Dichte zur 10. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 1;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-11

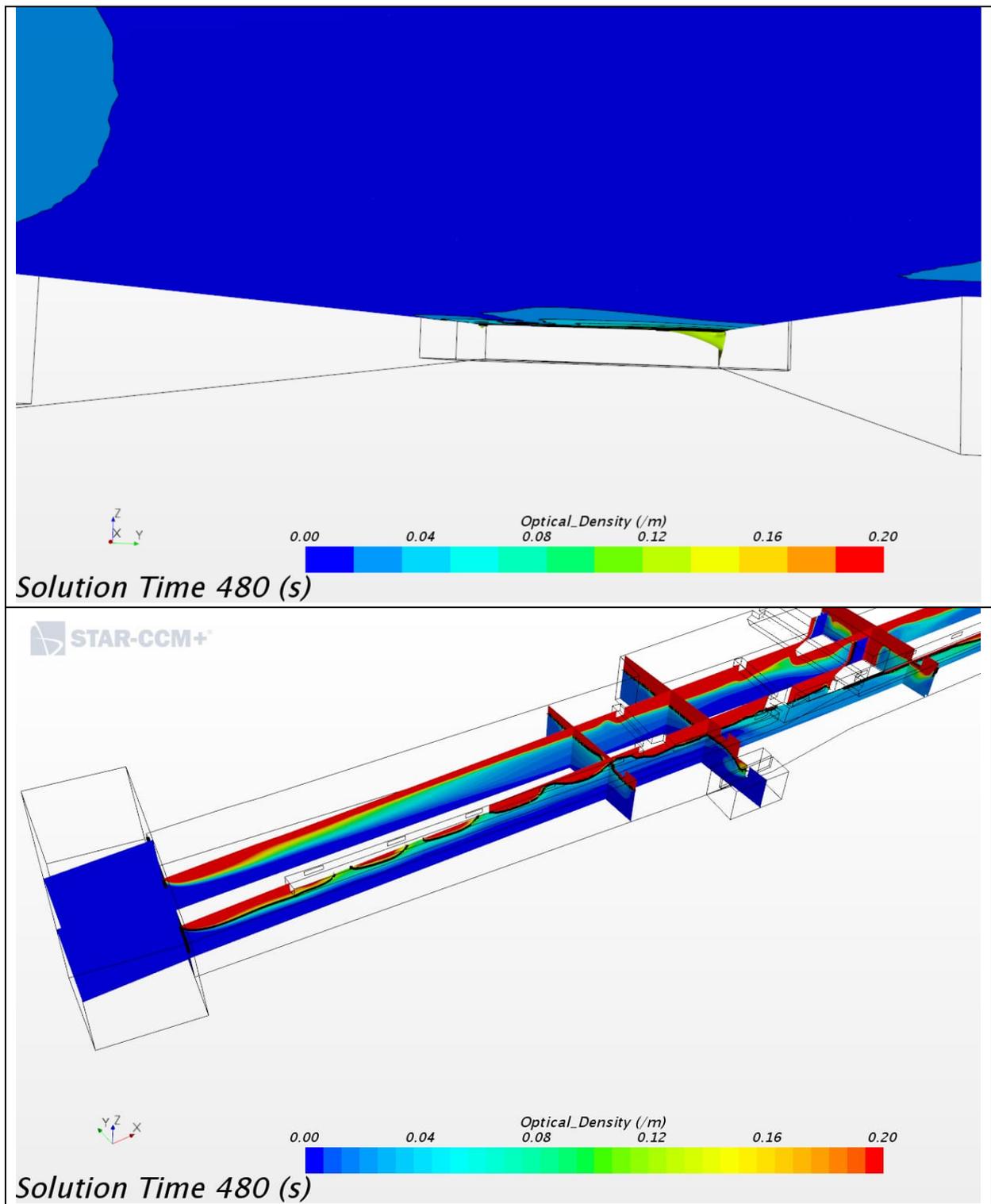


Abbildung A1- 10 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 1 Detailbetrachtung zur 8. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-12

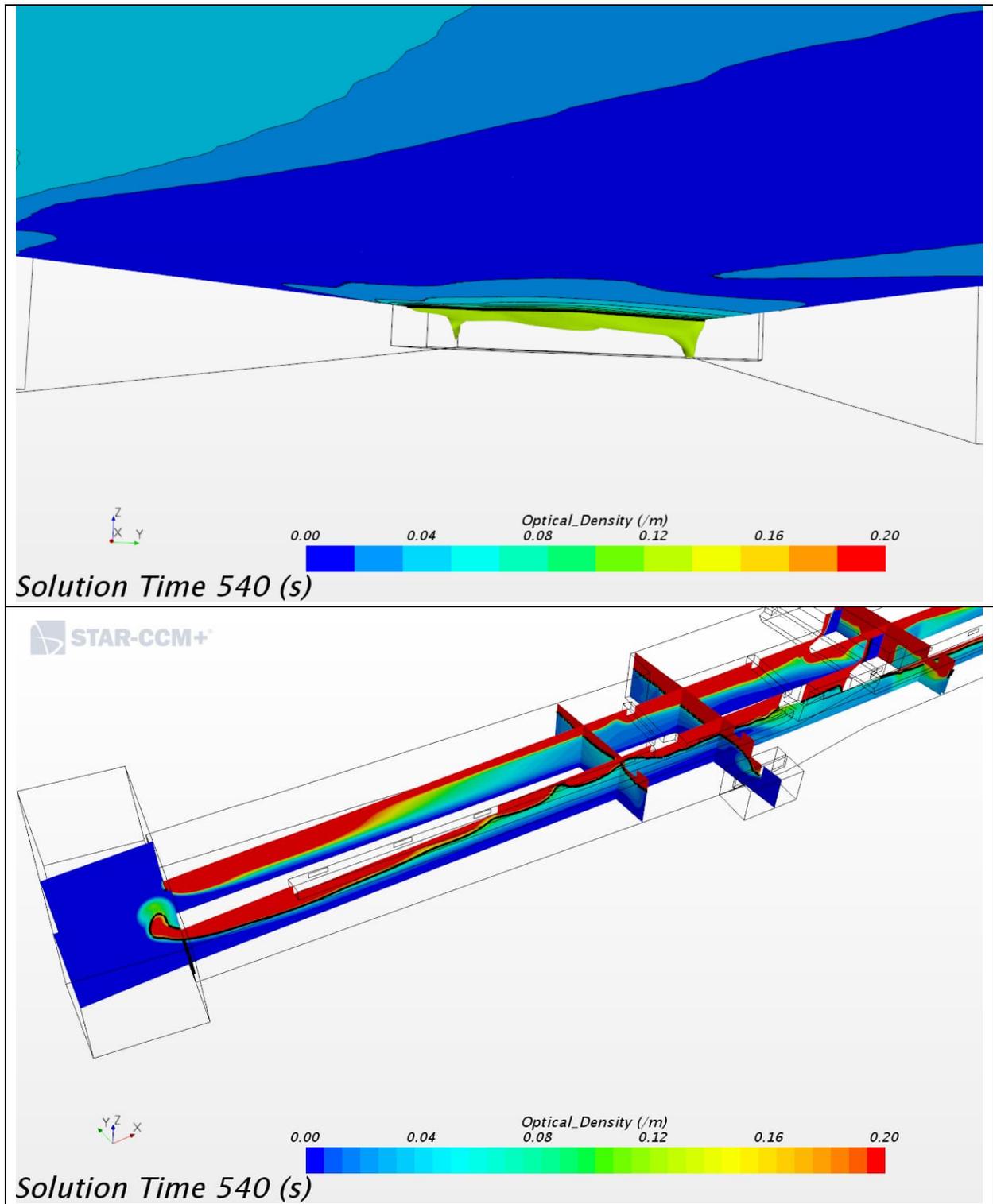


Abbildung A1- 11 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 1 Detailbetrachtung zur 9. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-13

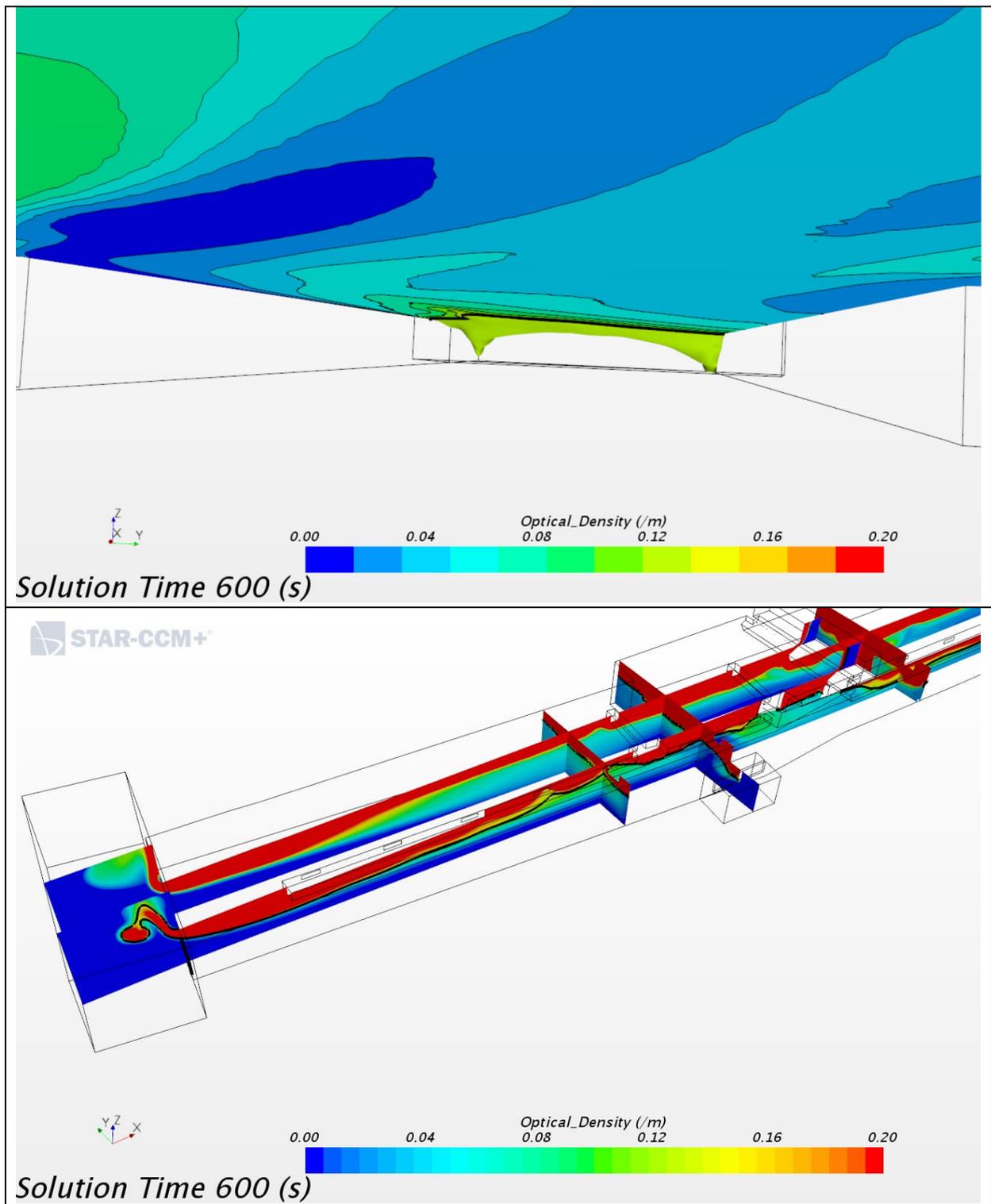


Abbildung A1- 12 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 1 Detailbetrachtung zur 10. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-14

Busbrand: MRA-Variante 2 „Mit Schürze“

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-15

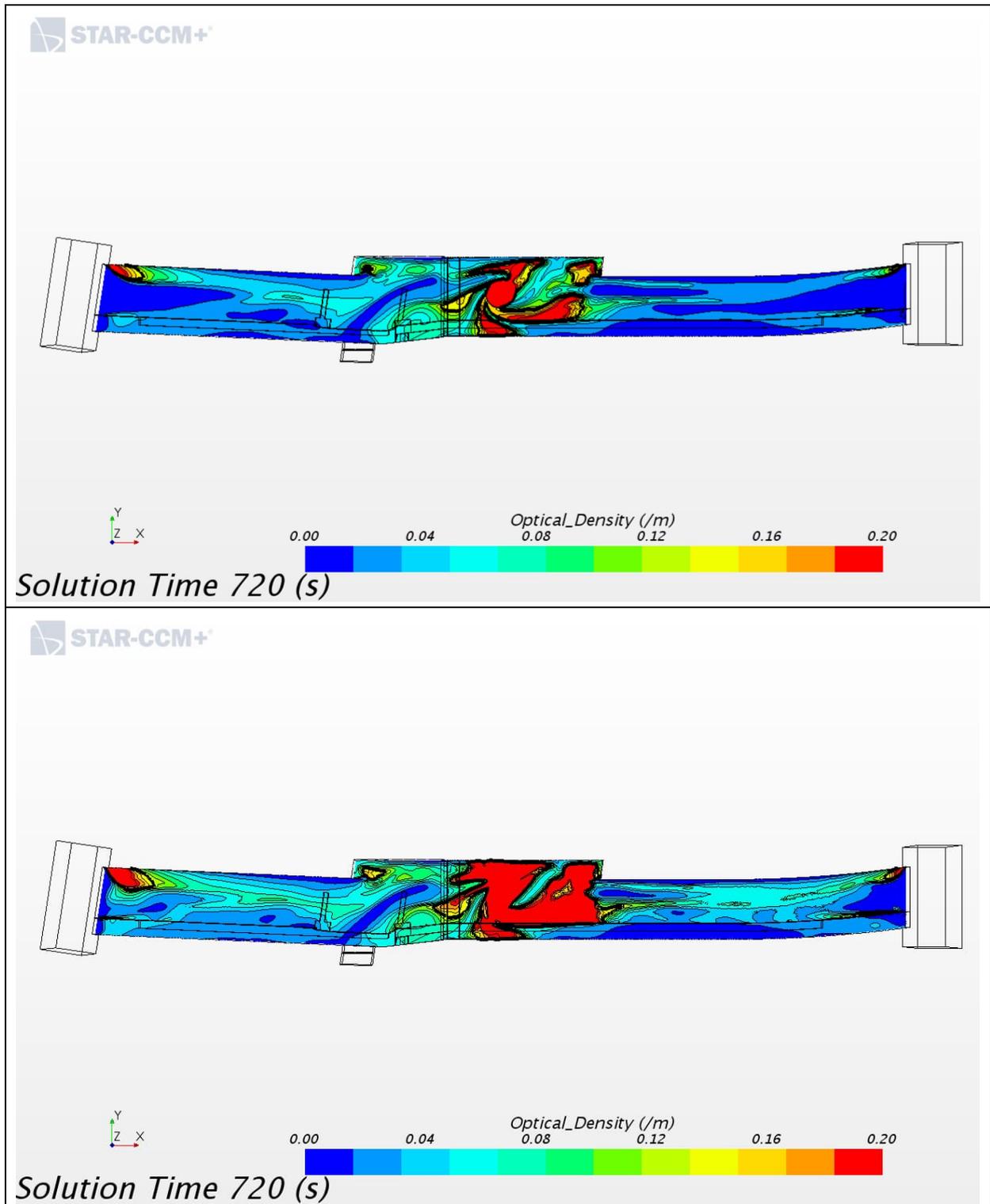


Abbildung A1- 13 Optische (Rauch-)Dichte zur 12. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-16

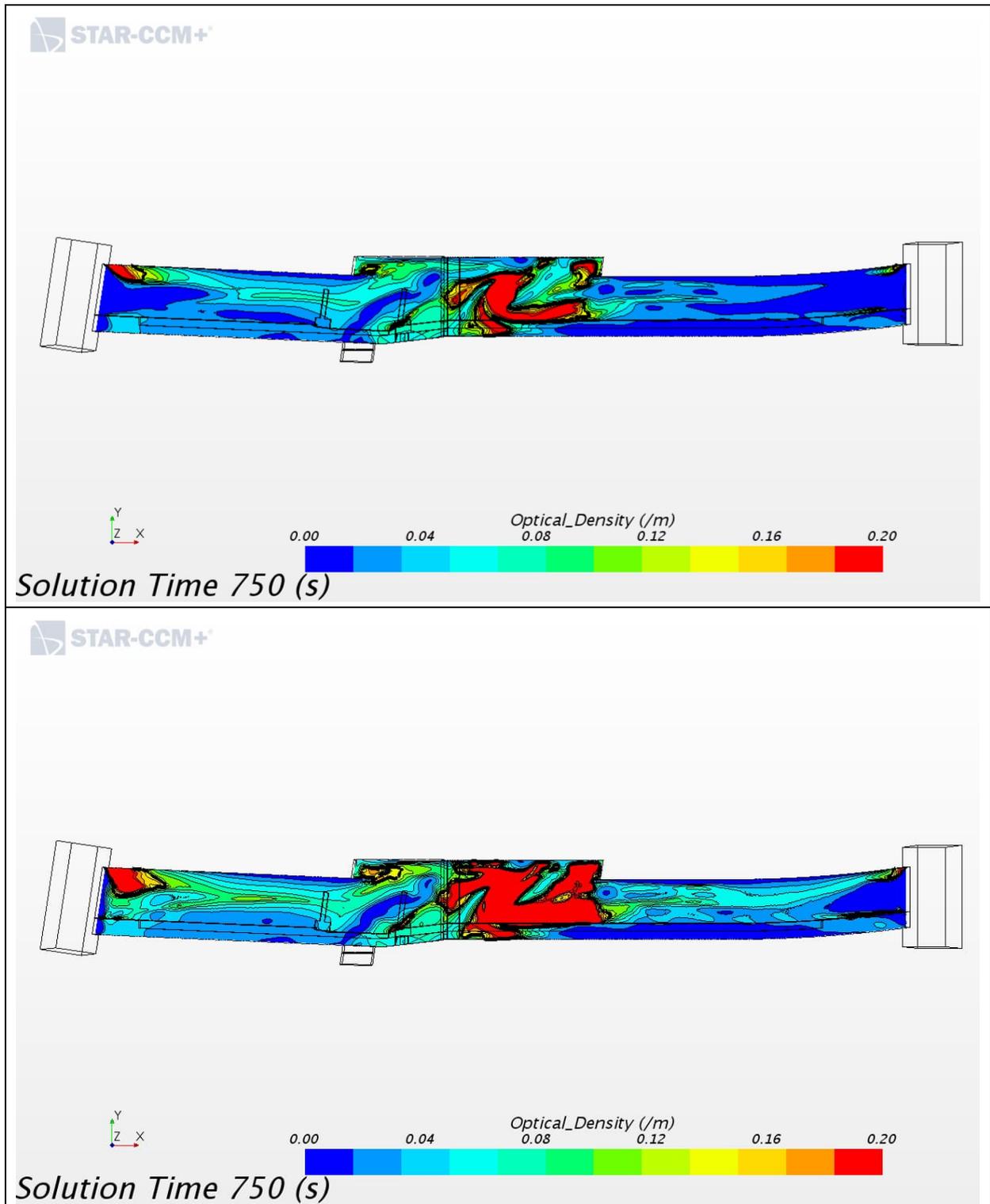


Abbildung A1- 14 Optische (Rauch-)Dichte zur 12,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2; oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-17

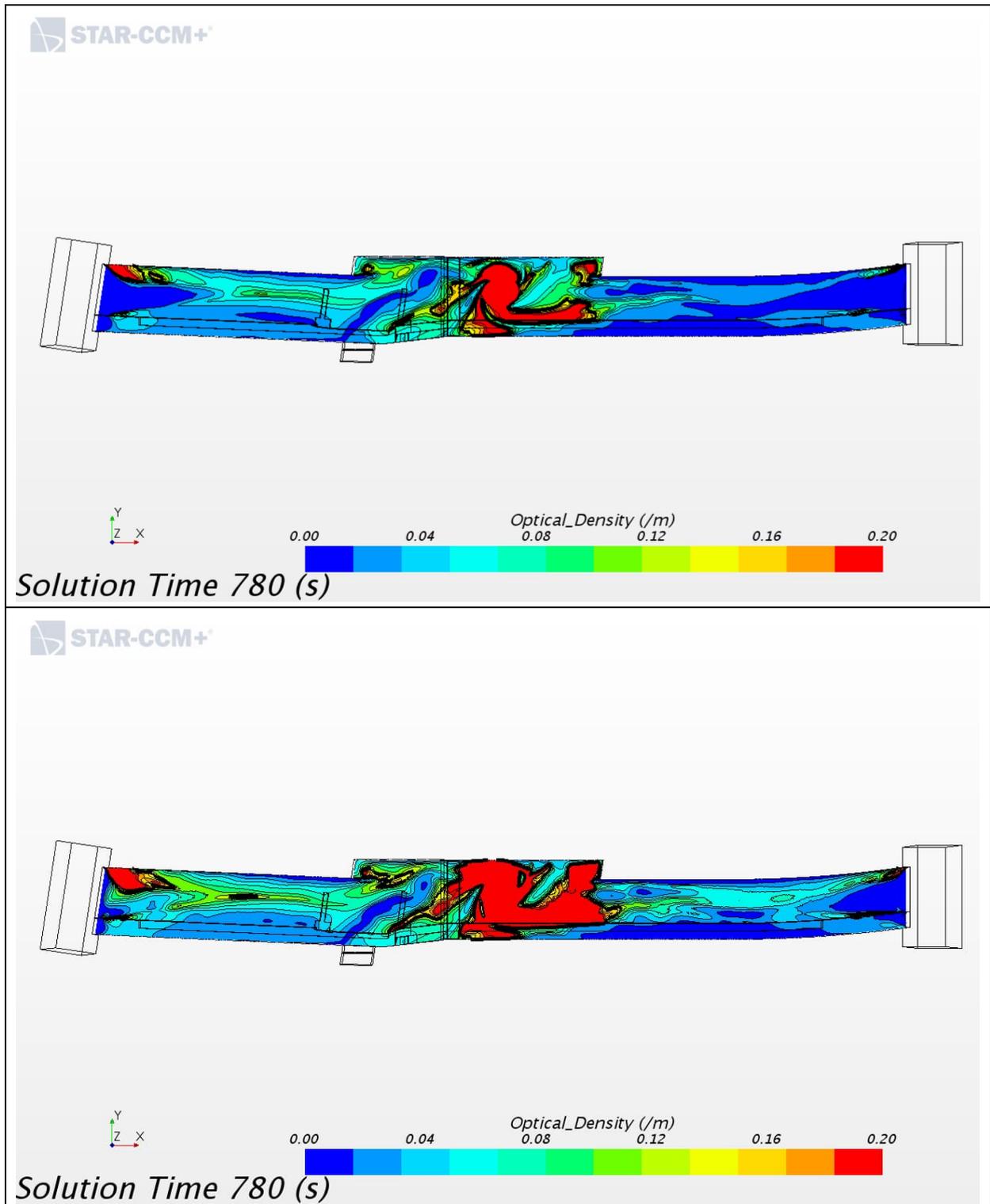


Abbildung A1- 15 Optische (Rauch-)Dichte zur 13. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-18

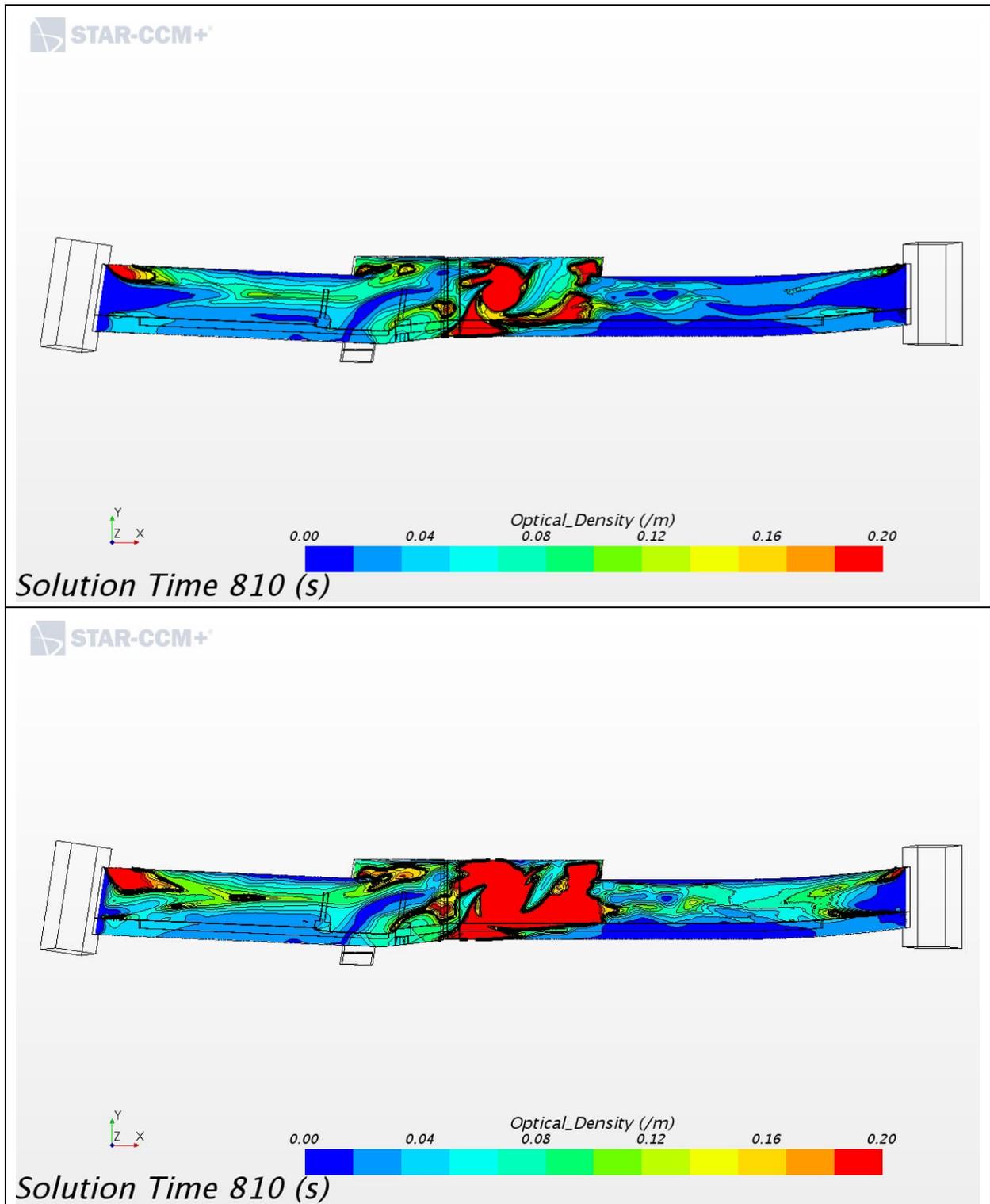


Abbildung A1- 16 Optische (Rauch-)Dichte zur 13,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2; oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-19

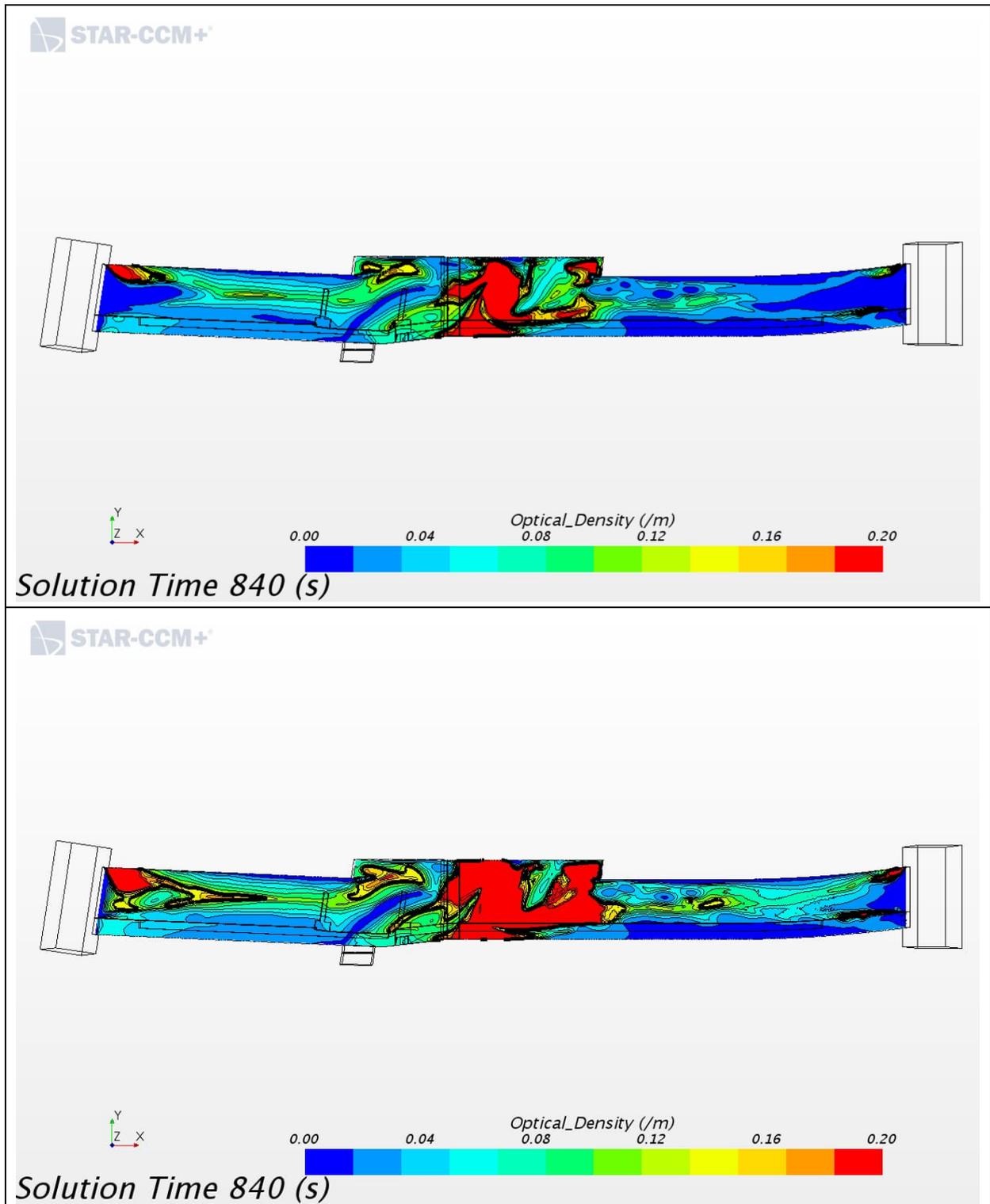


Abbildung A1- 17 Optische (Rauch-)Dichte zur 14. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-20

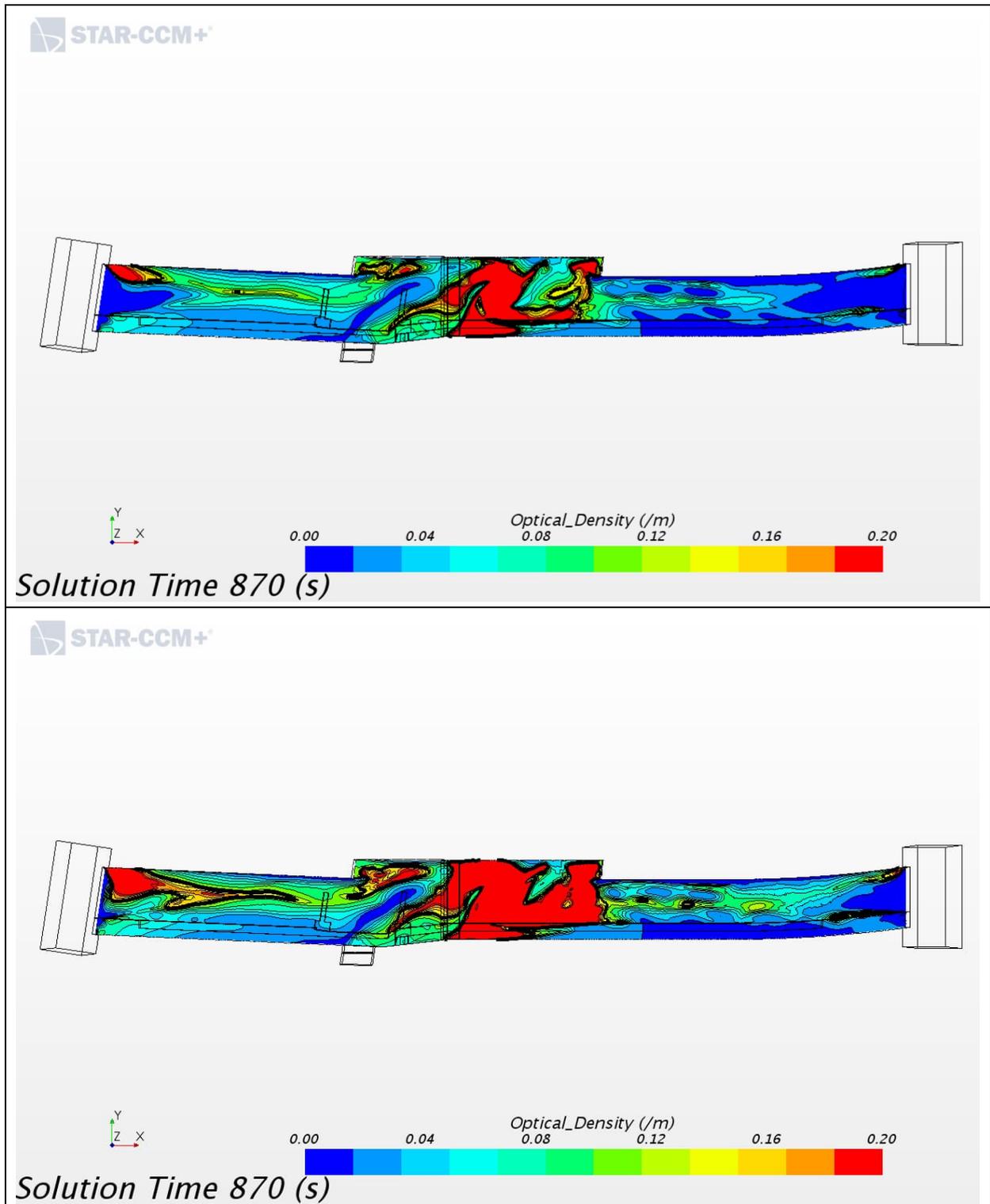


Abbildung A1- 18 Optische (Rauch-)Dichte zur 14,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2; oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-21

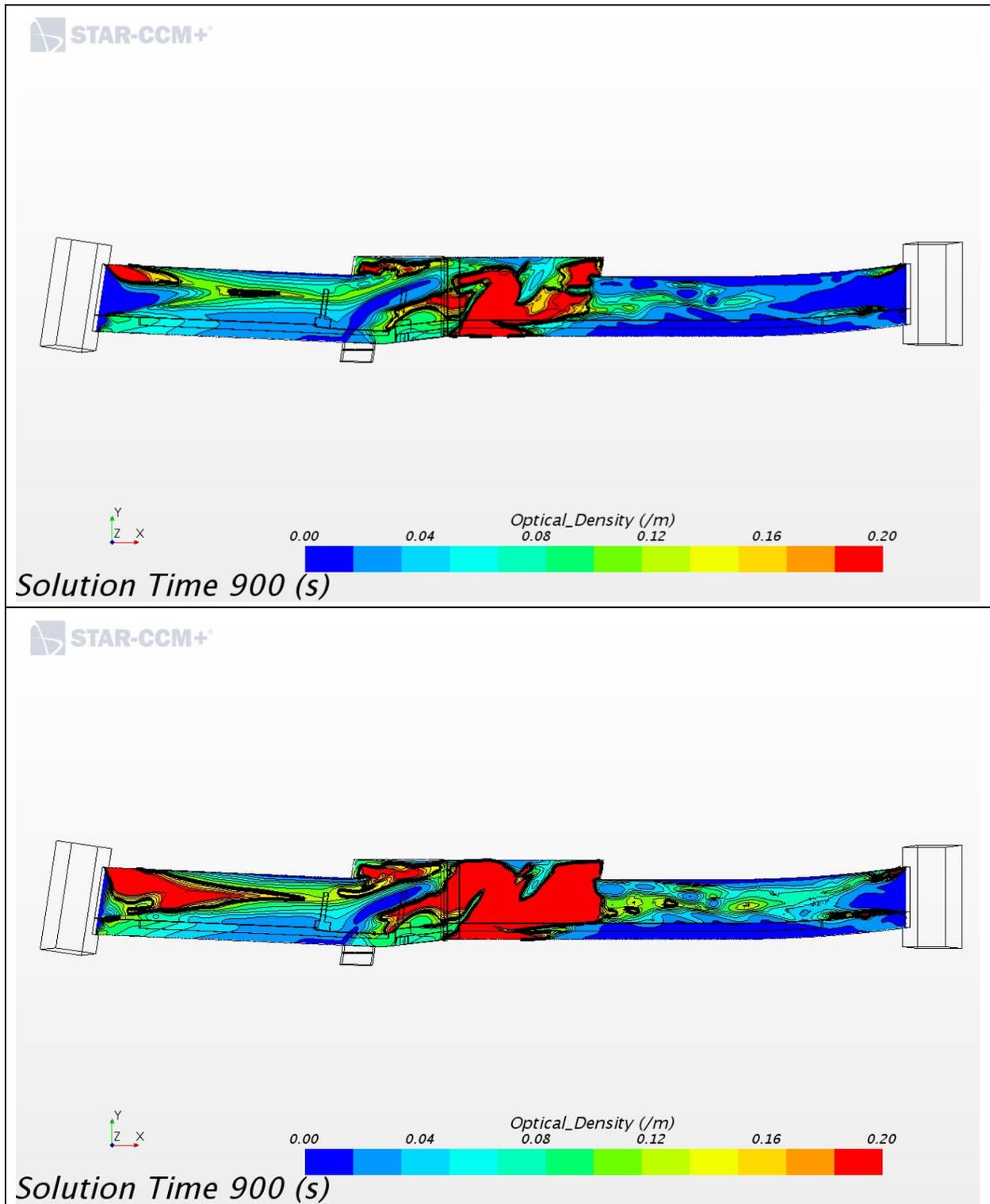


Abbildung A1- 19 Optische (Rauch-)Dichte zur 15. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-22

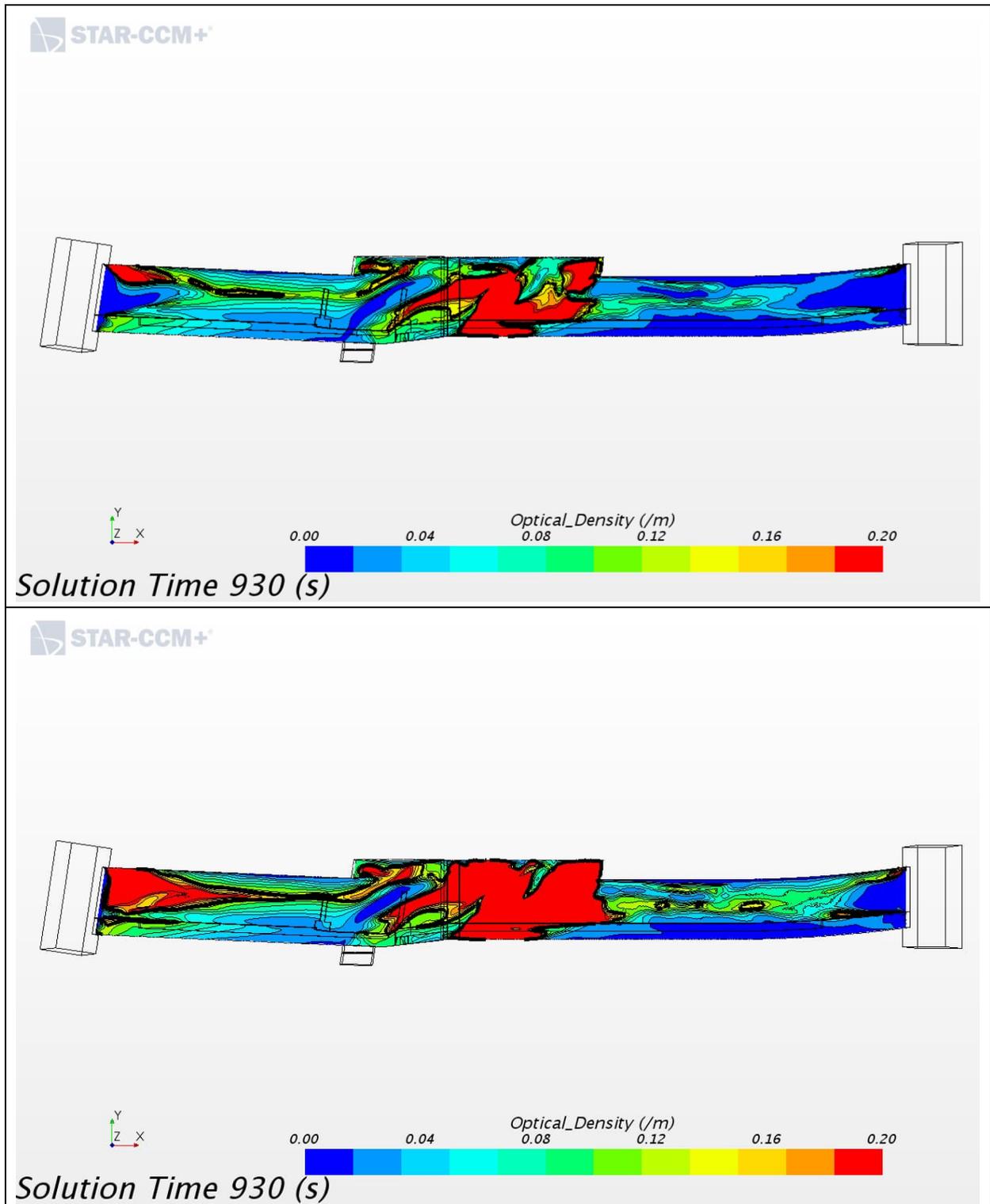


Abbildung A1- 20 Optische (Rauch-)Dichte zur 15,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2; oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-23

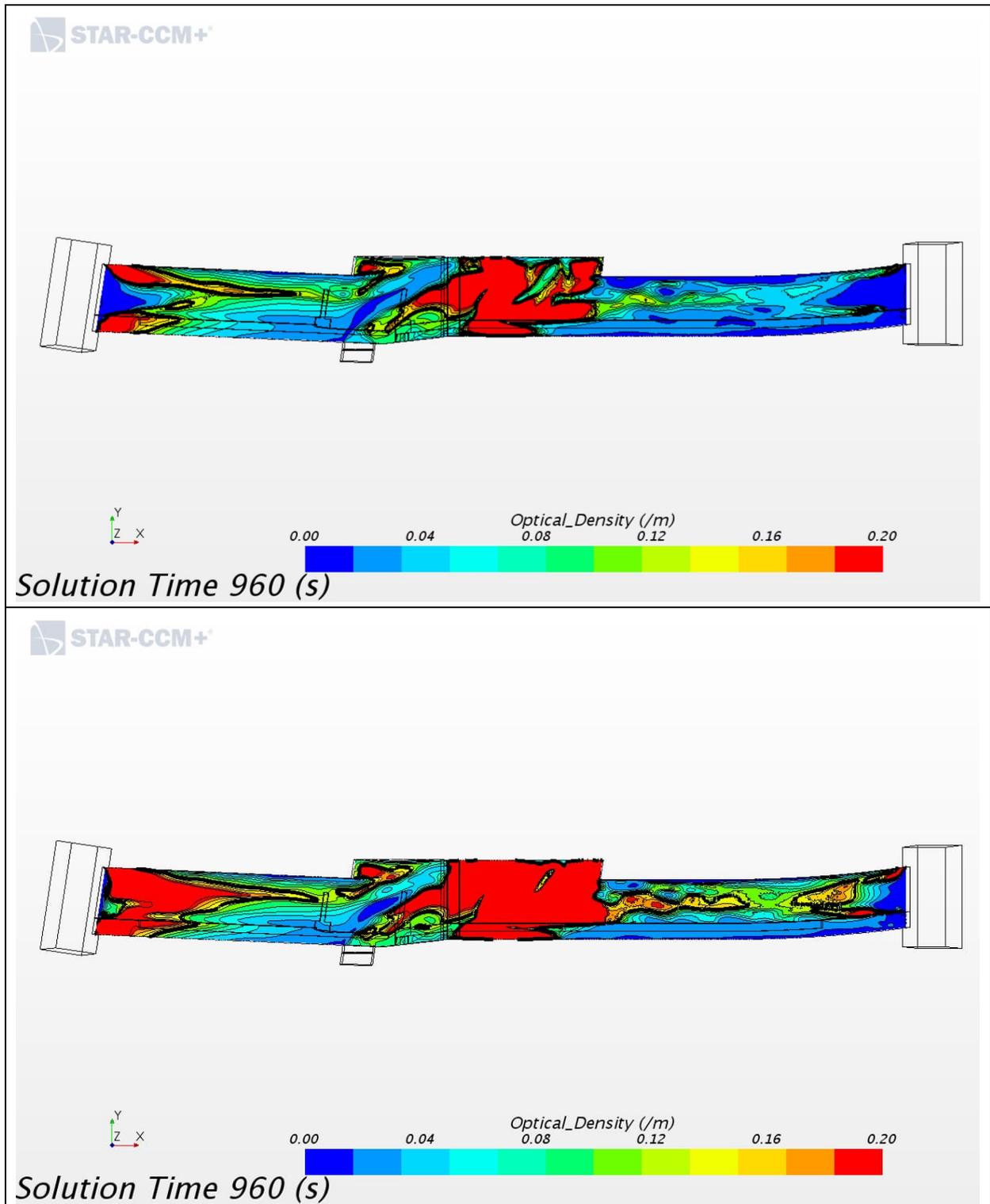


Abbildung A1- 21 Optische (Rauch-)Dichte zur 16. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2; oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-24

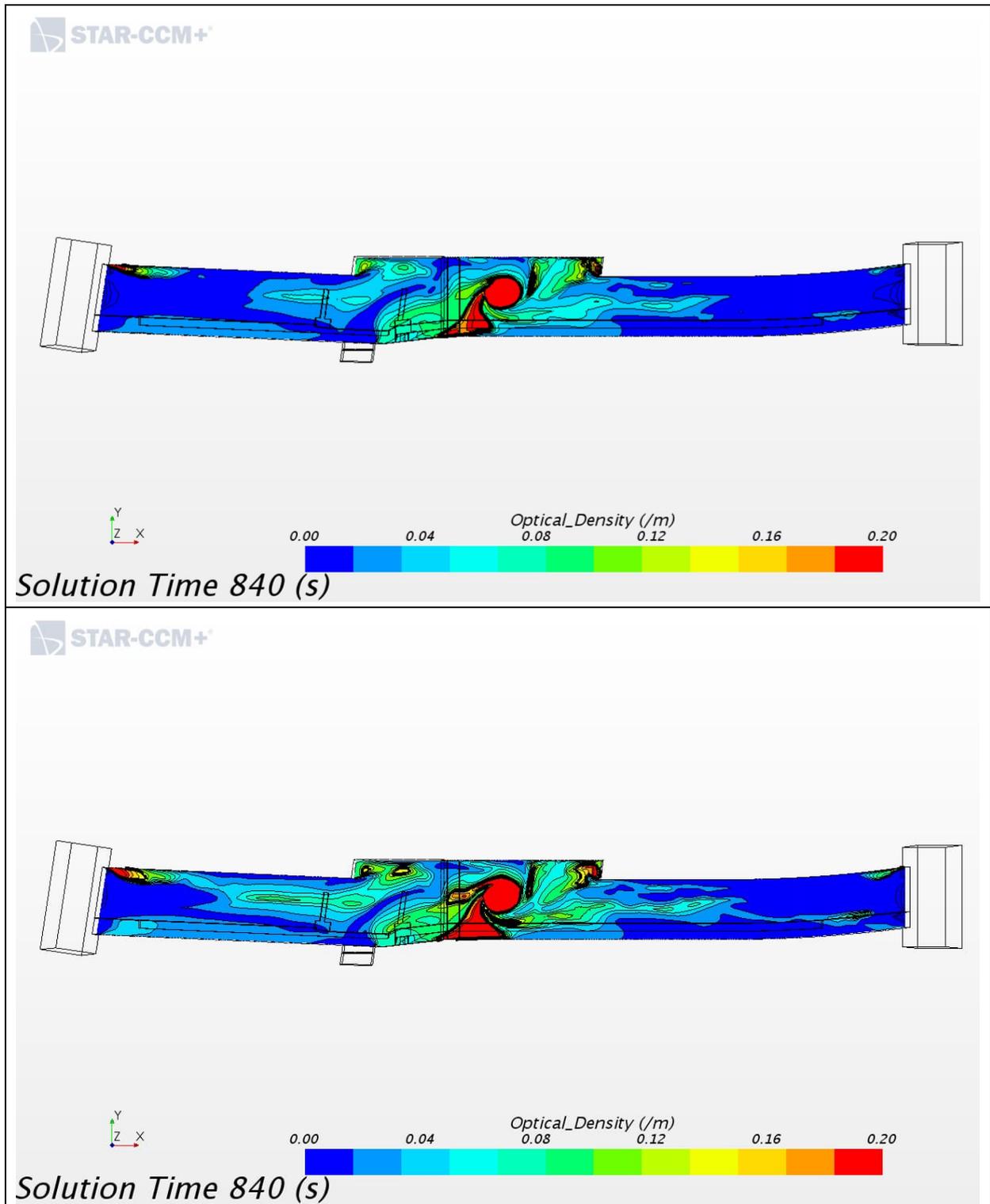


Abbildung A1- 22 Optische (Rauch-)Dichte zur 14. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2;
oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-25

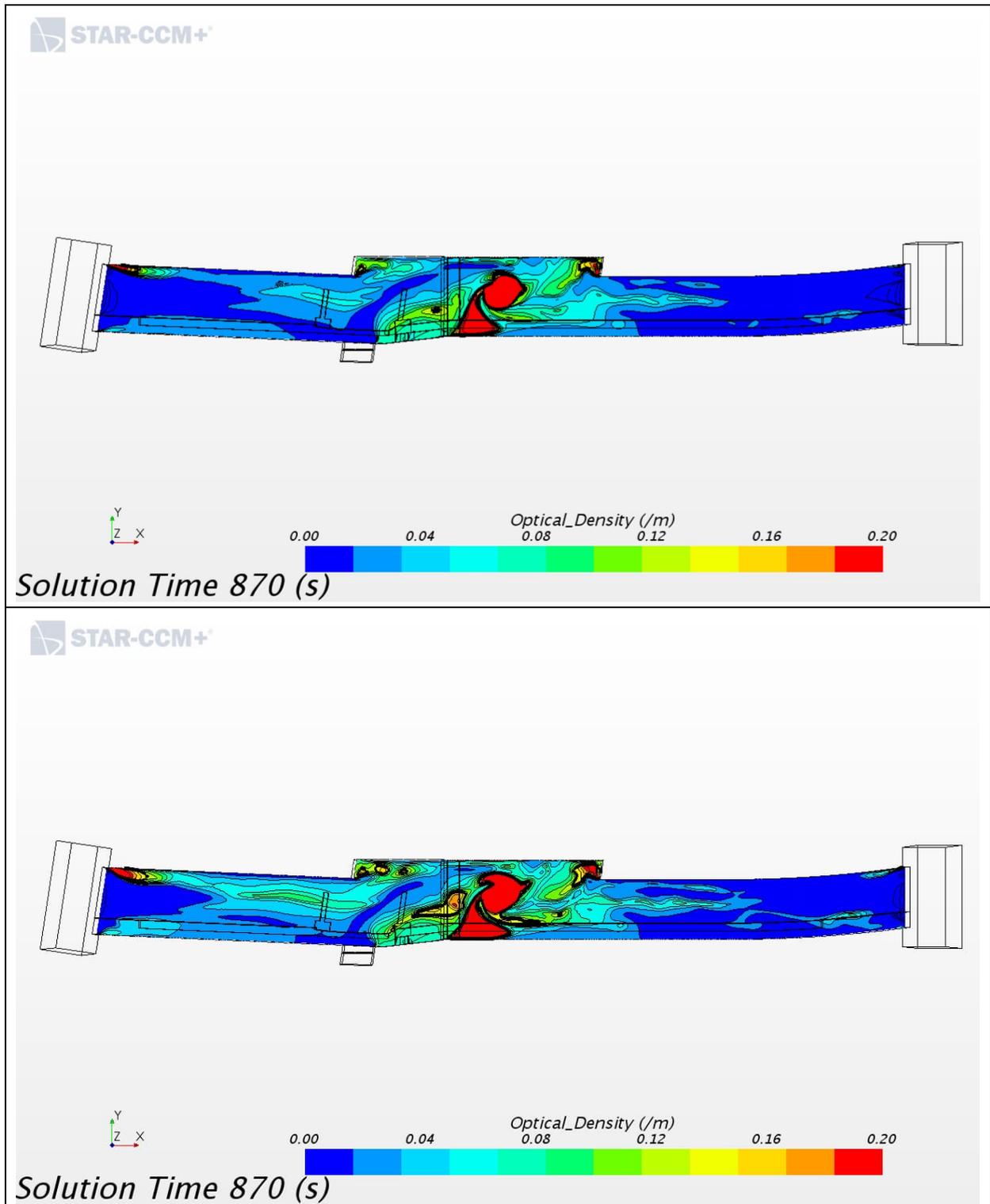


Abbildung A1- 23 Optische (Rauch-)Dichte zur 14,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-26

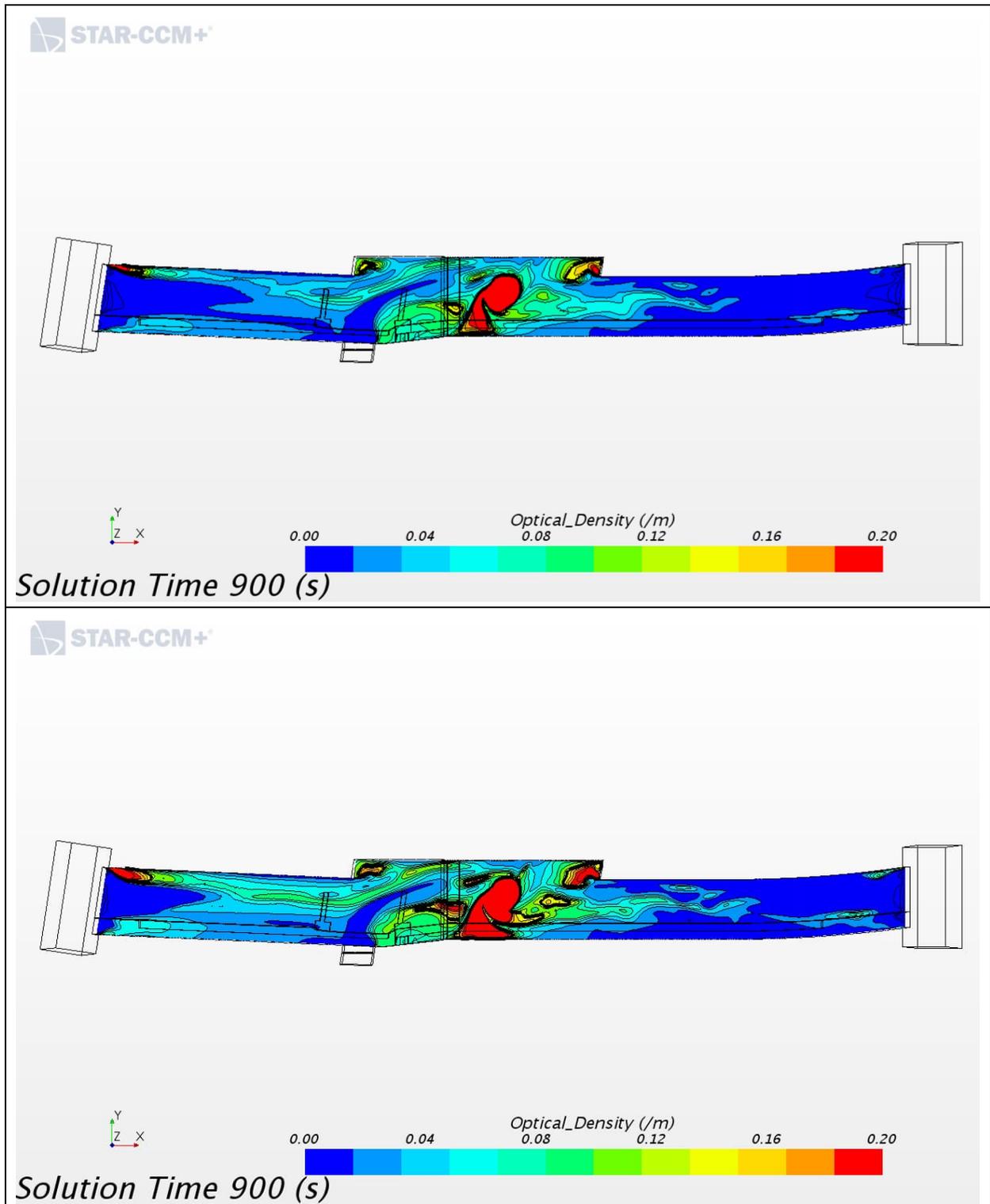


Abbildung A1- 24 Optische (Rauch-)Dichte zur 15. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2;
oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-27

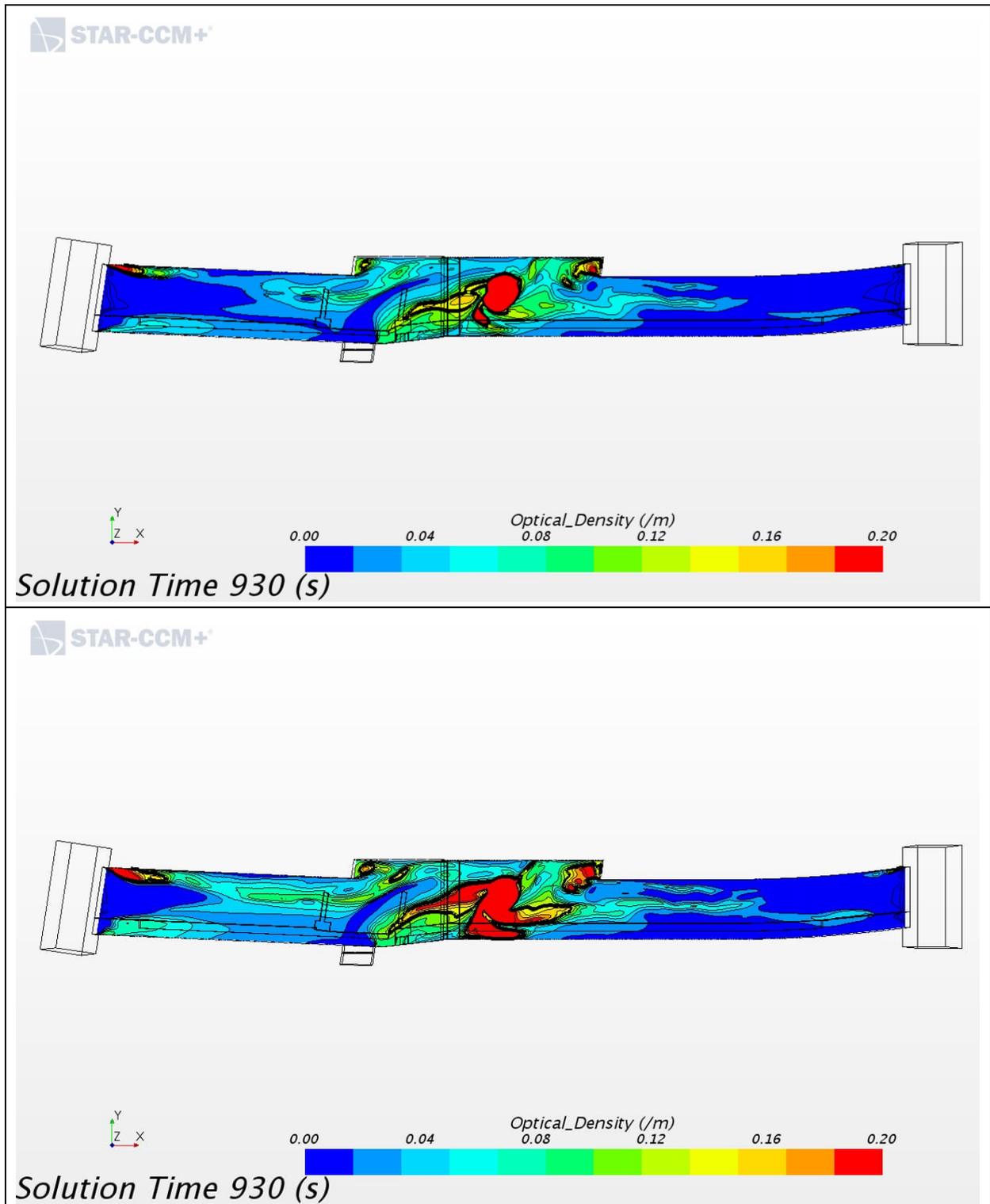


Abbildung A1- 25 Optische (Rauch-)Dichte zur 15,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-28

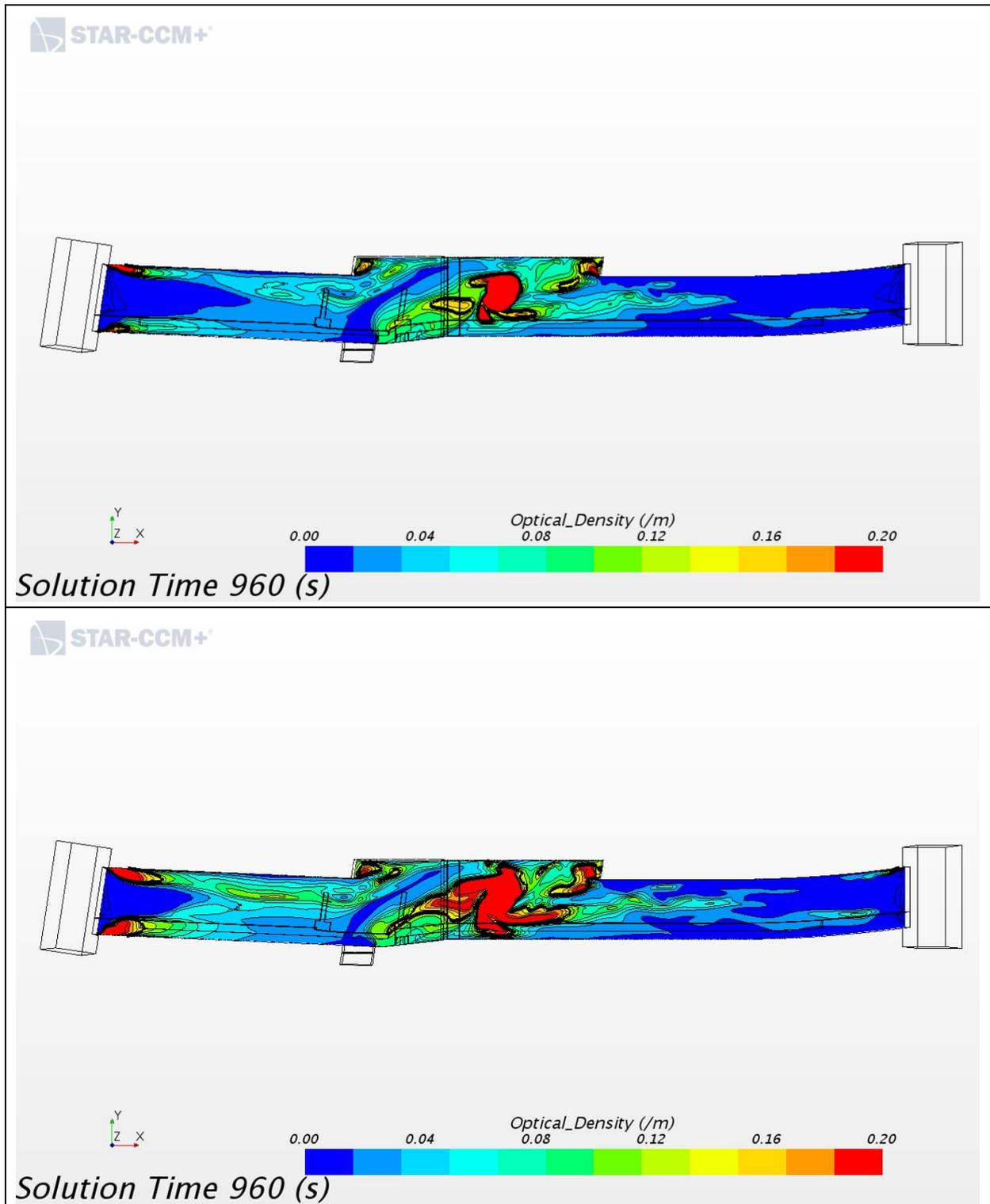


Abbildung A1- 26 Optische (Rauch-)Dichte zur 16. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2;
oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-29

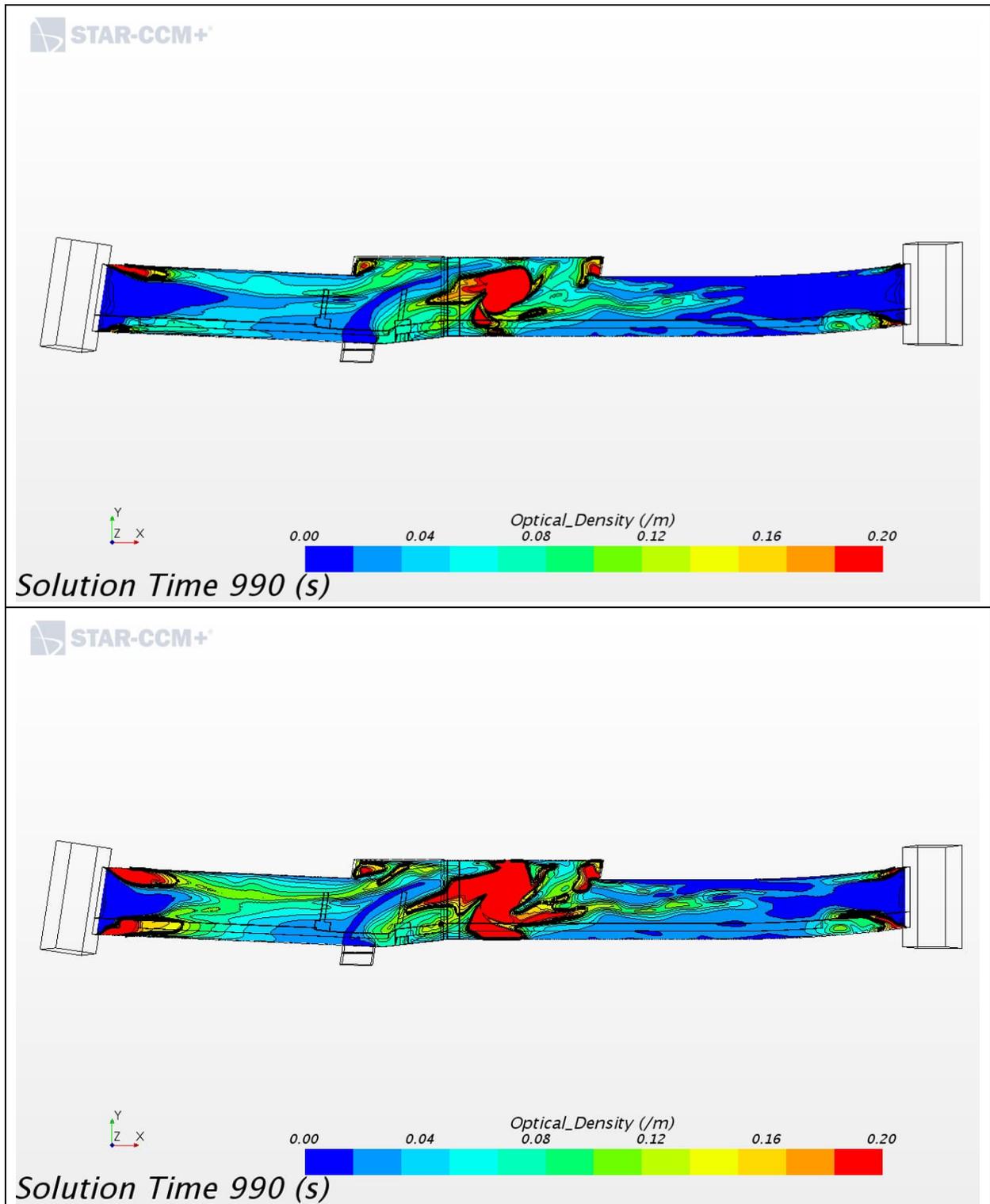


Abbildung A1- 27 Optische (Rauch-)Dichte zur 16,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-30

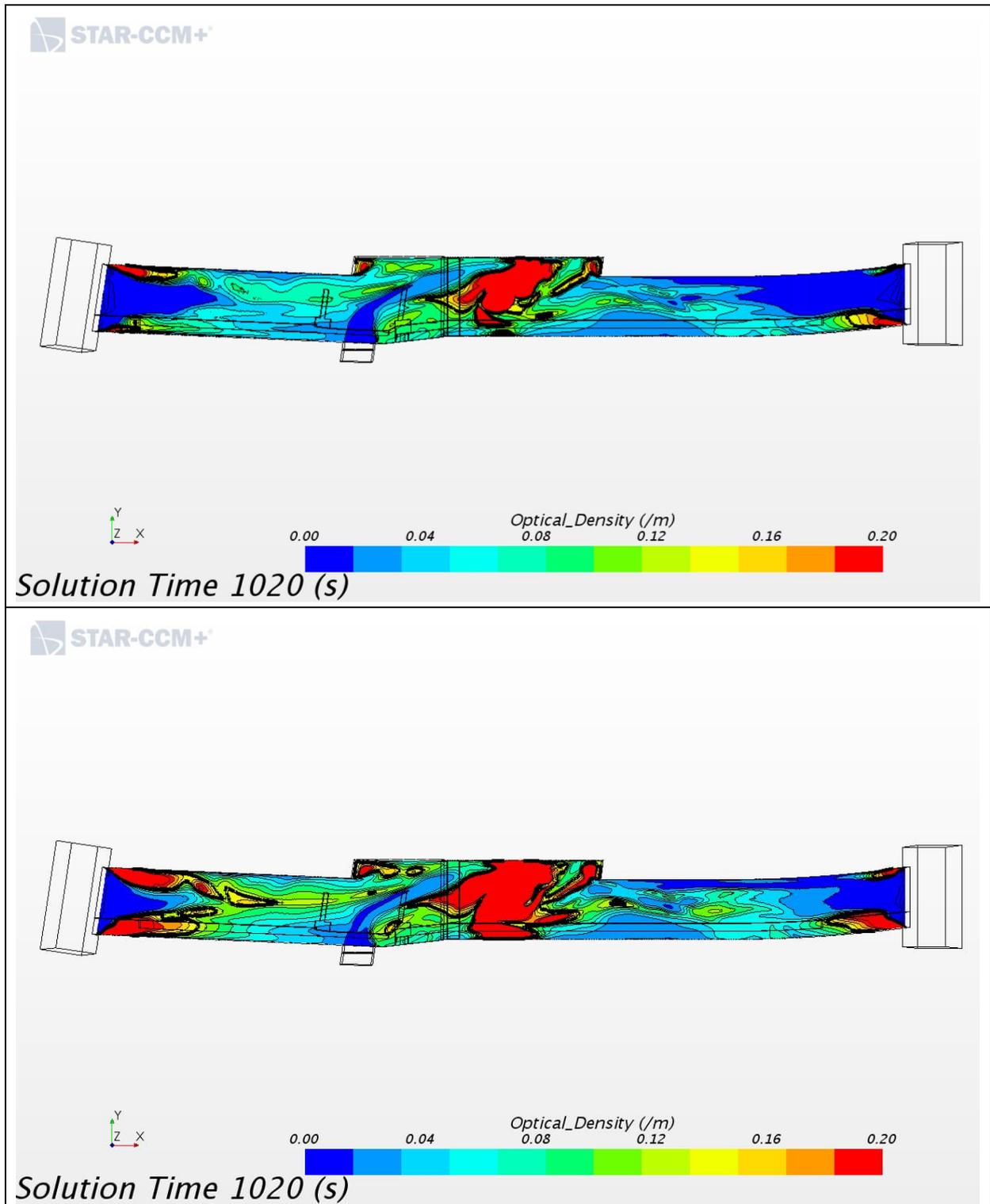


Abbildung A1- 28 Optische (Rauch-)Dichte zur 17. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2;
oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-31

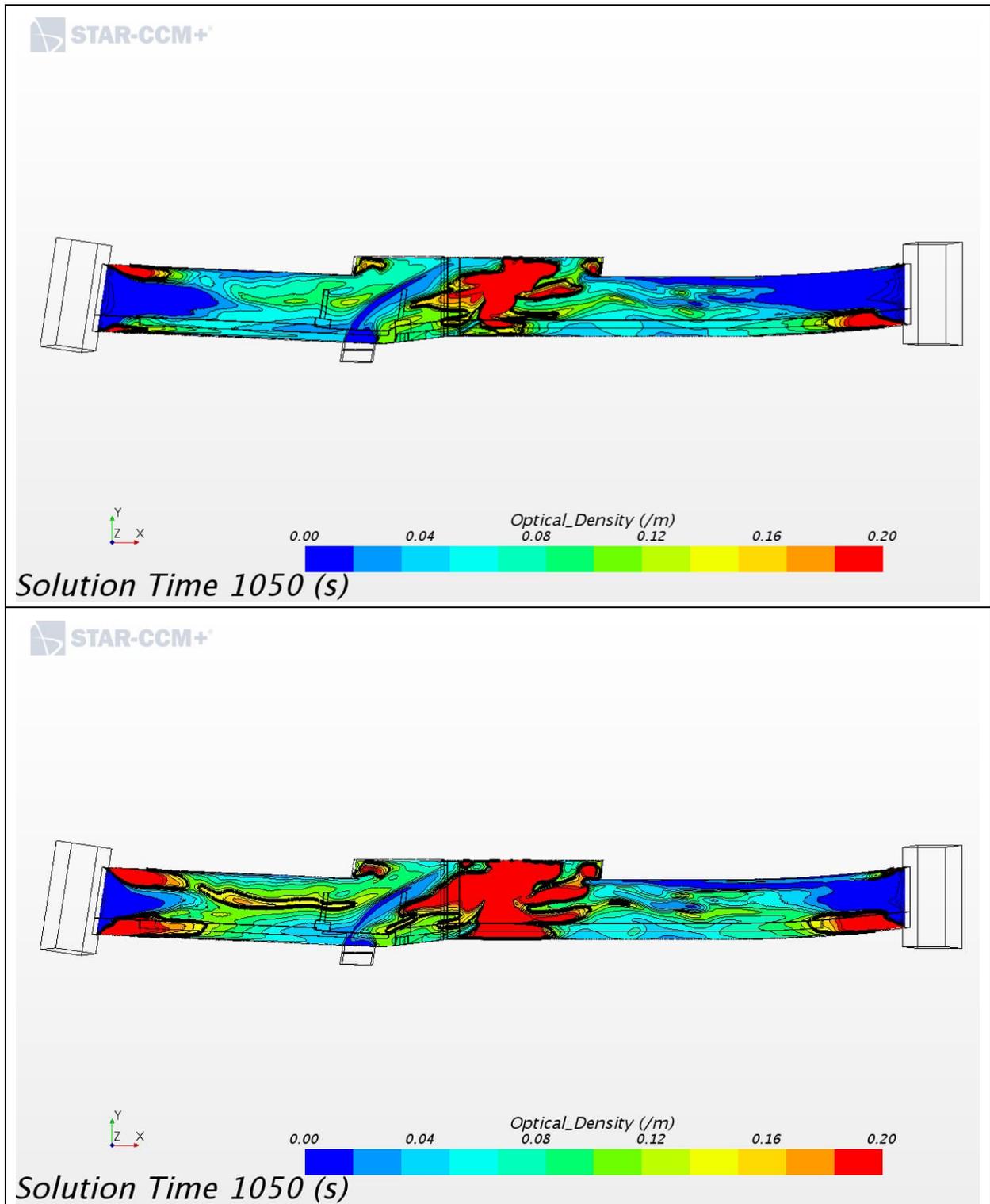


Abbildung A1- 29 Optische (Rauch-)Dichte zur 17,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-32

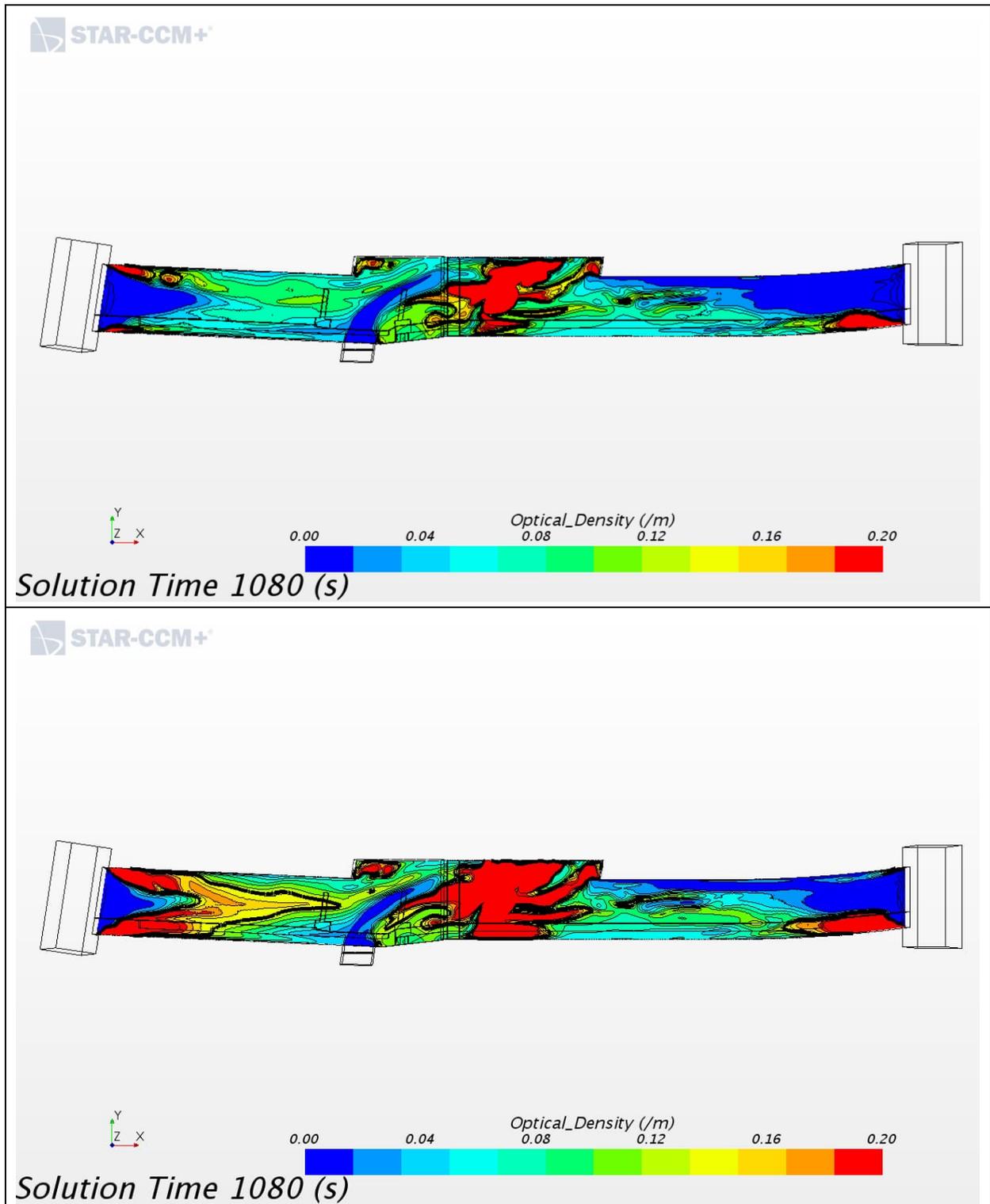


Abbildung A1- 30 Optische (Rauch-)Dichte zur 18. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2;
oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-33

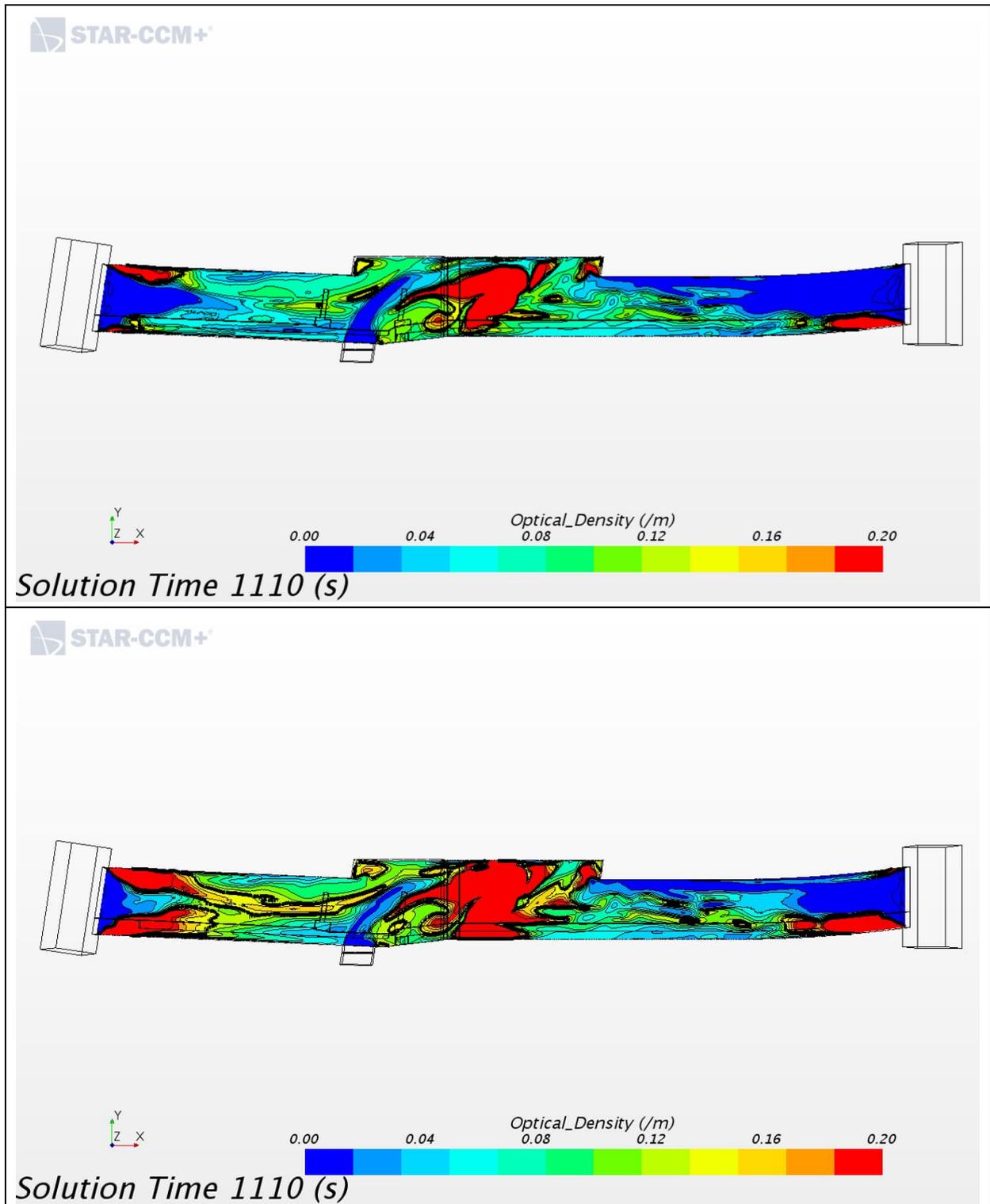


Abbildung A1- 31 Optische (Rauch-)Dichte zur 18,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-34

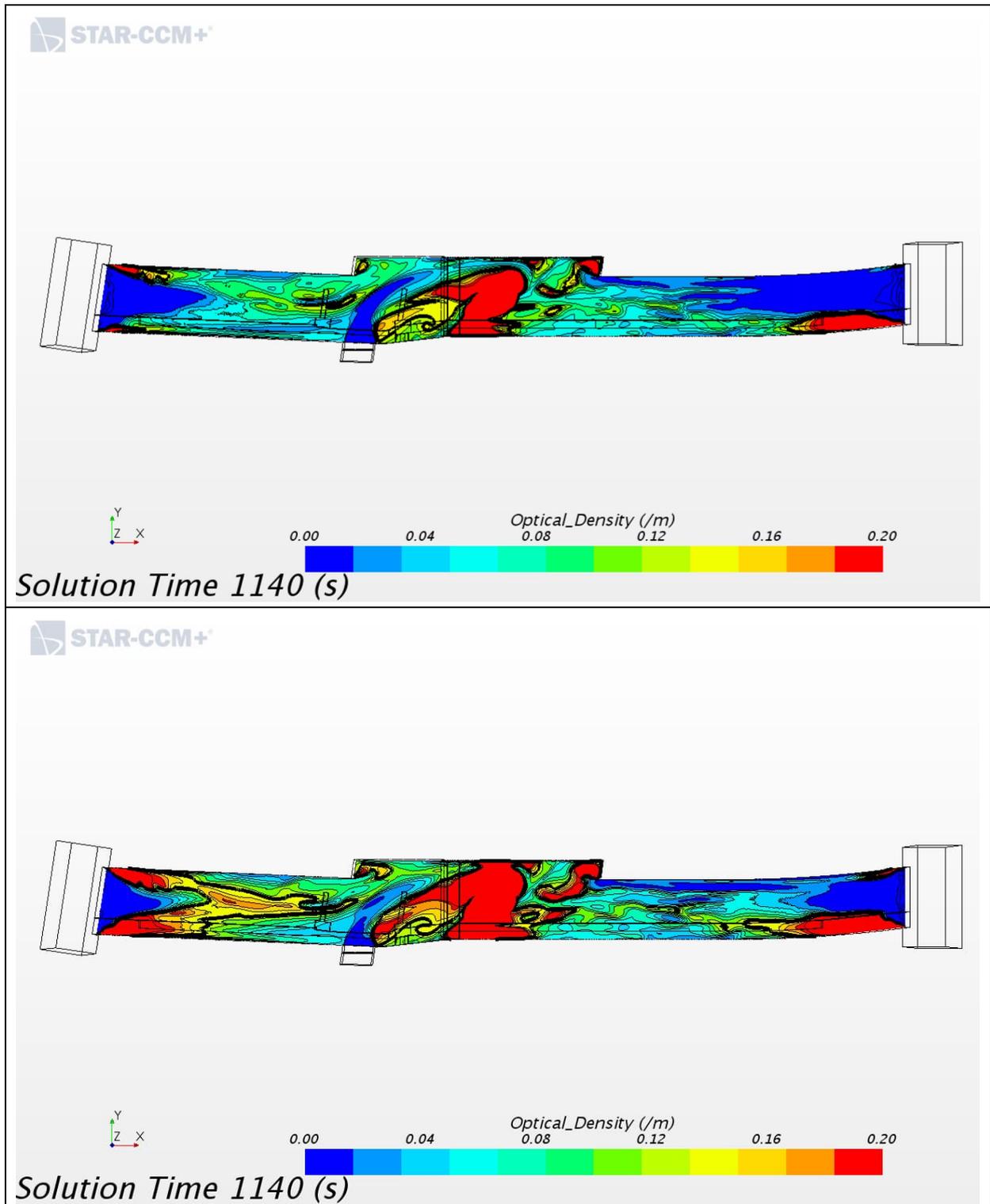


Abbildung A1- 32 Optische (Rauch-)Dichte zur 19. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2;
oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-35

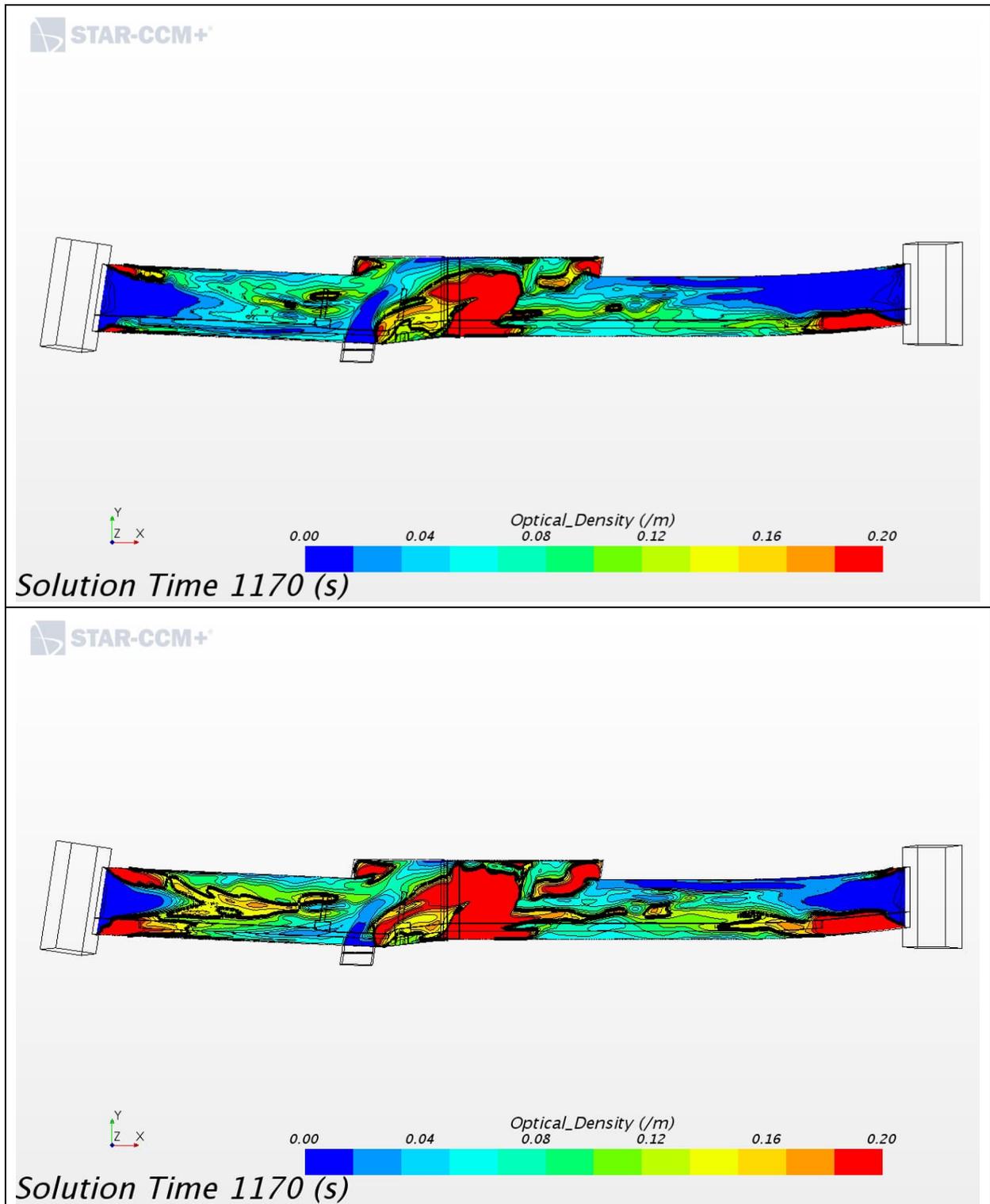


Abbildung A1- 33 Optische (Rauch-)Dichte zur 19,5. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-36

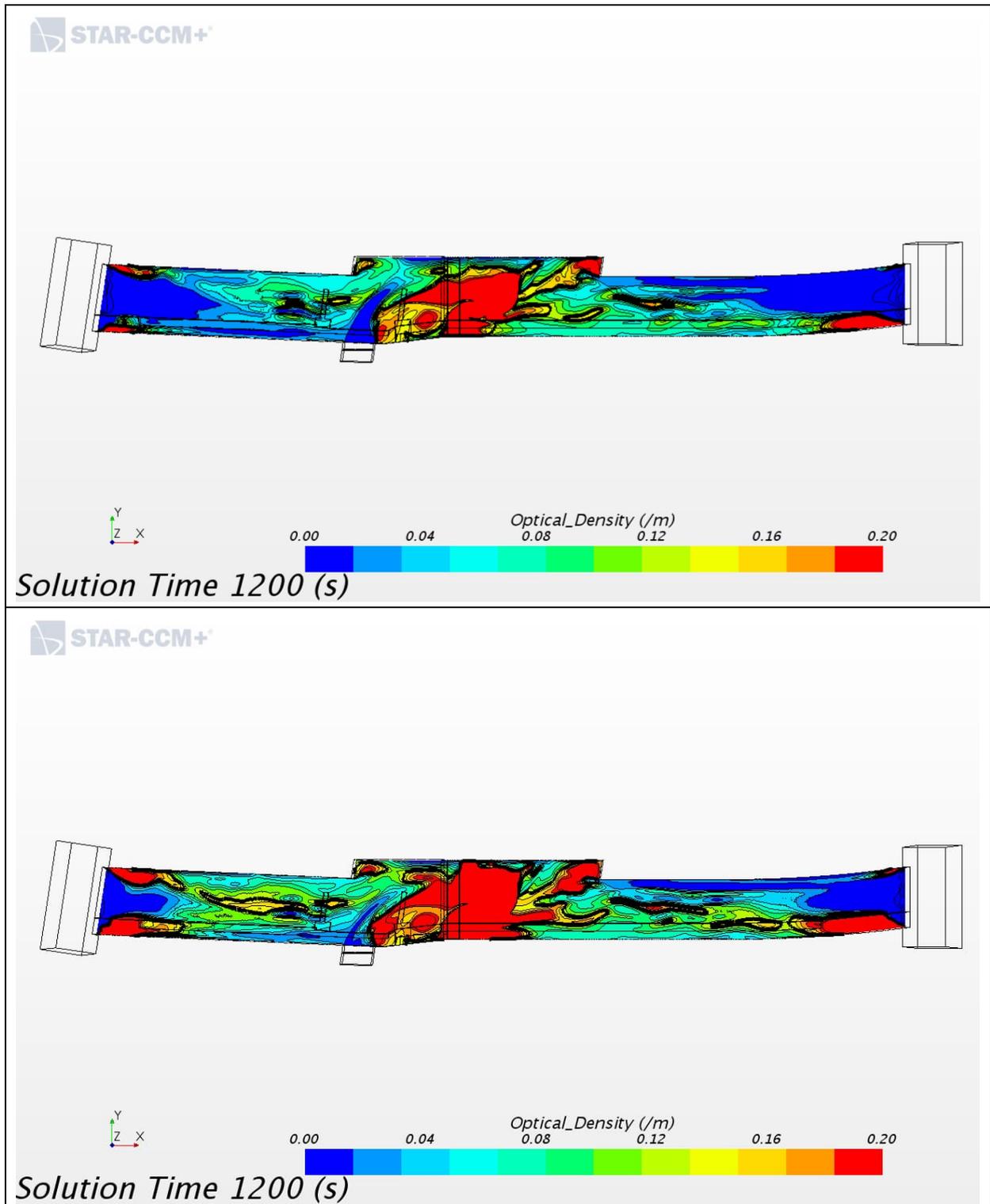


Abbildung A1- 34 Optische (Rauch-)Dichte zur 20. Simulationsminute bei Busbrand: MRA-Variante 2;
oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-37

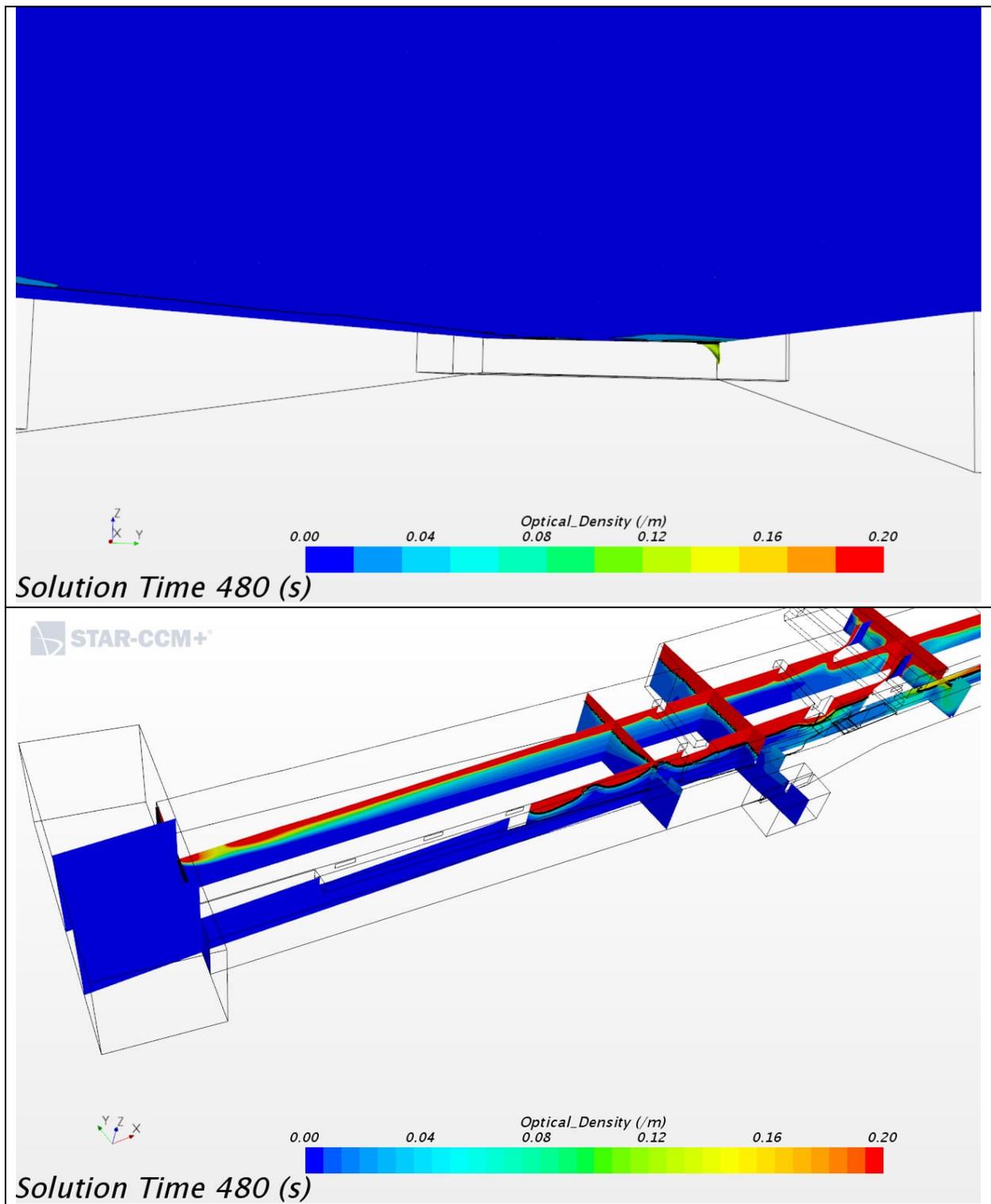


Abbildung A1- 35 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 2 Detailbetrachtung zur 8. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-38

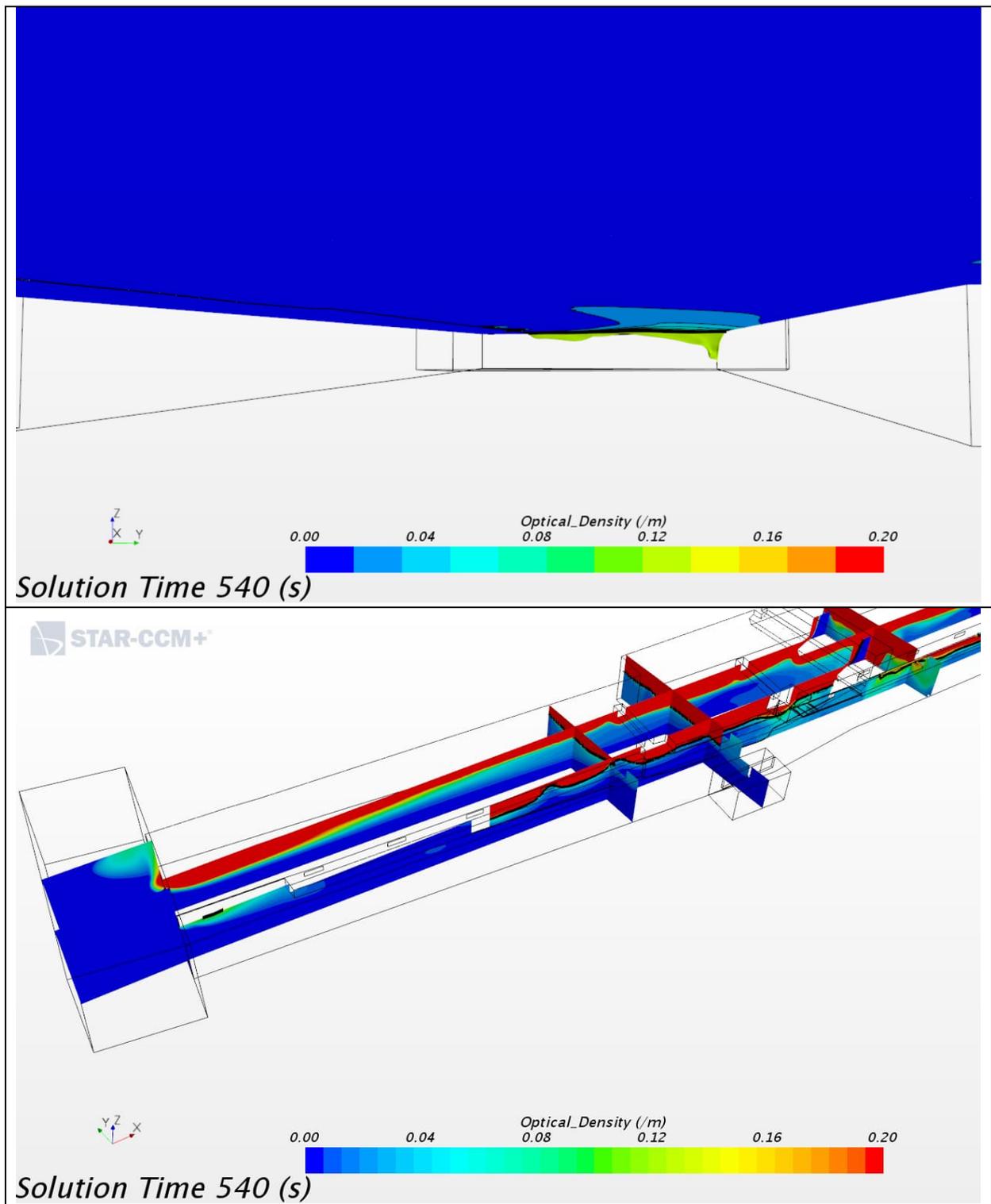


Abbildung A1- 36 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 2 Detailbetrachtung zur 9. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-39

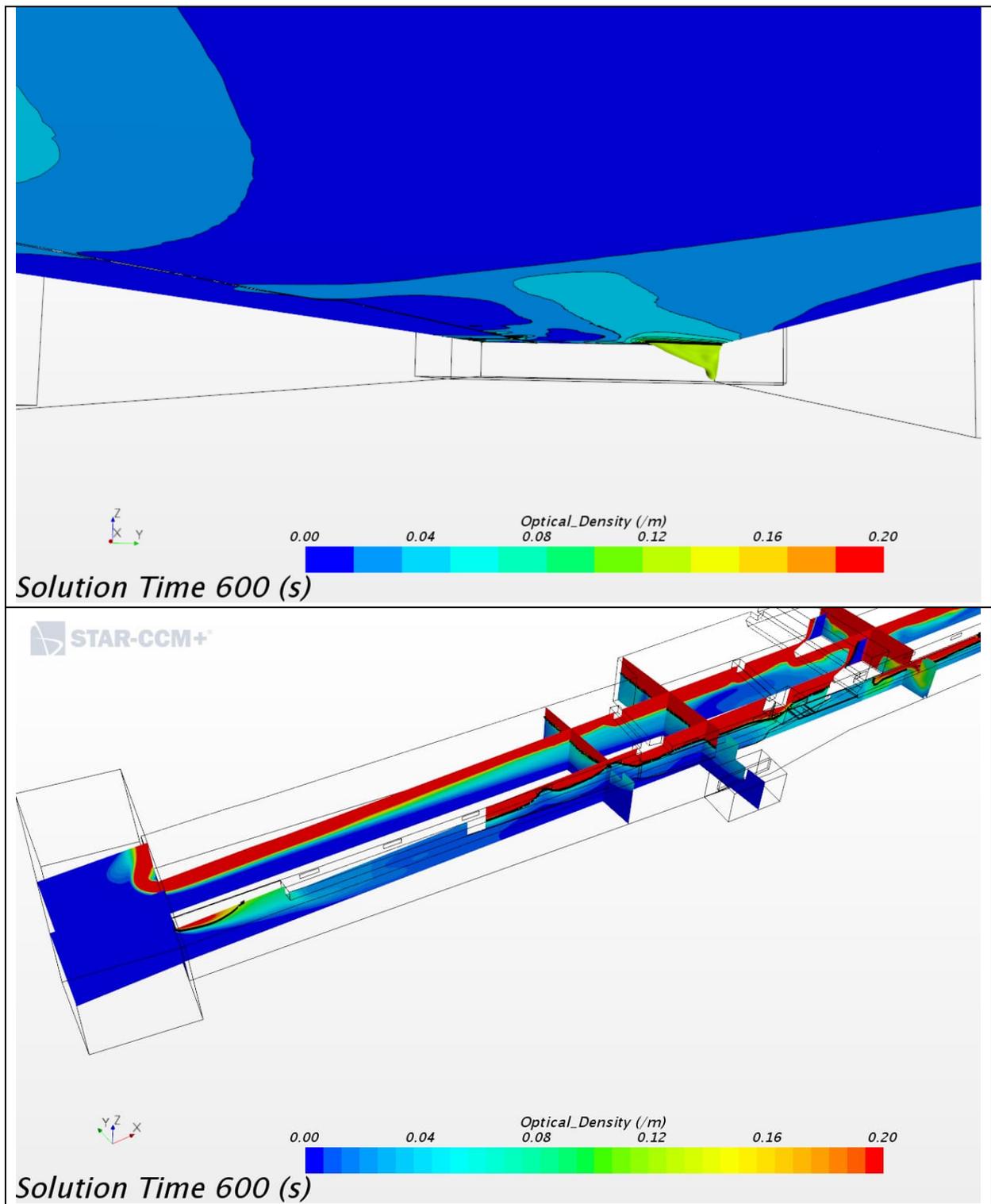


Abbildung A1- 37 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 2 Detailbetrachtung zur 10. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-40

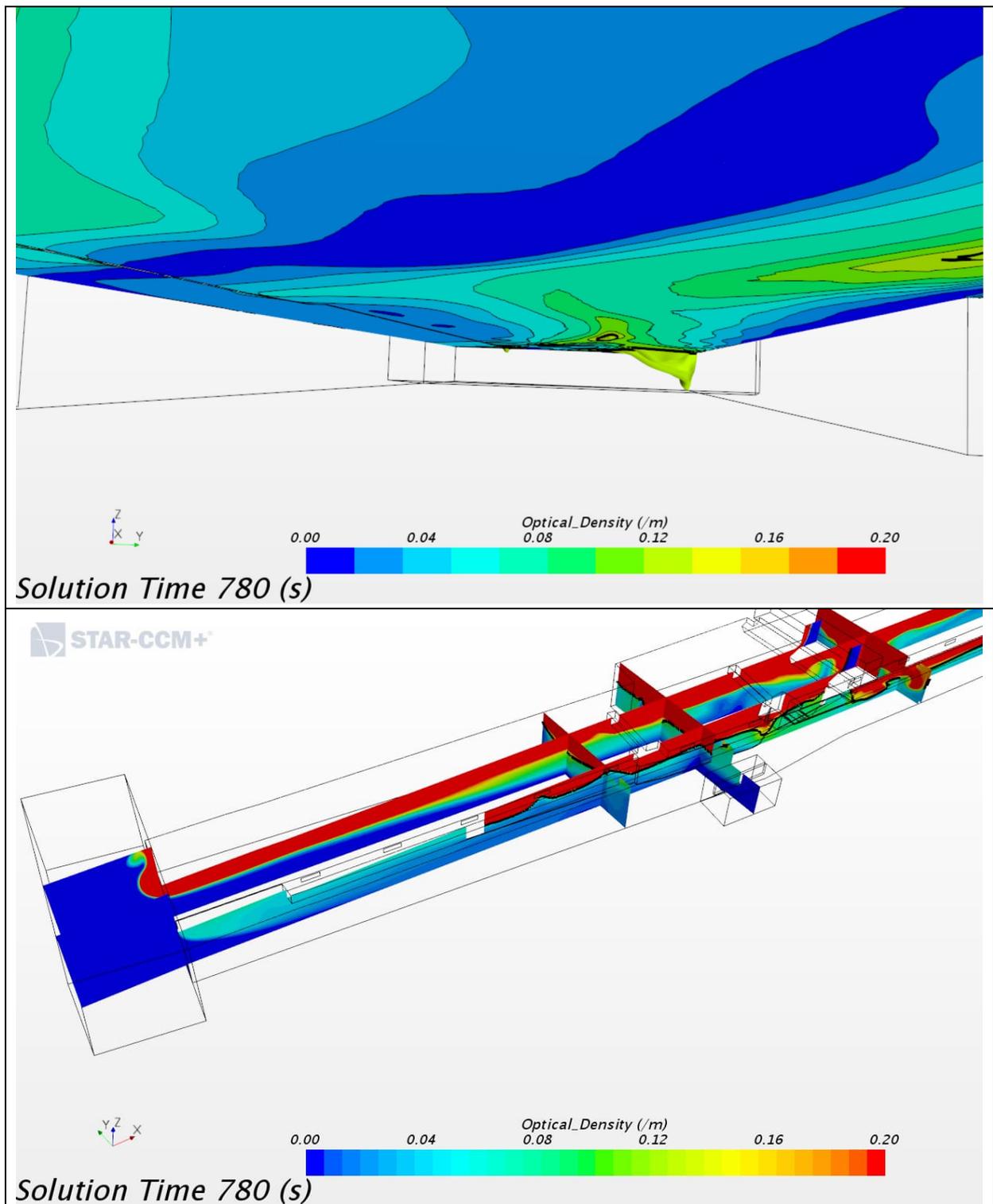


Abbildung A1- 38 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 2 Detailbetrachtung zur 13. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-41

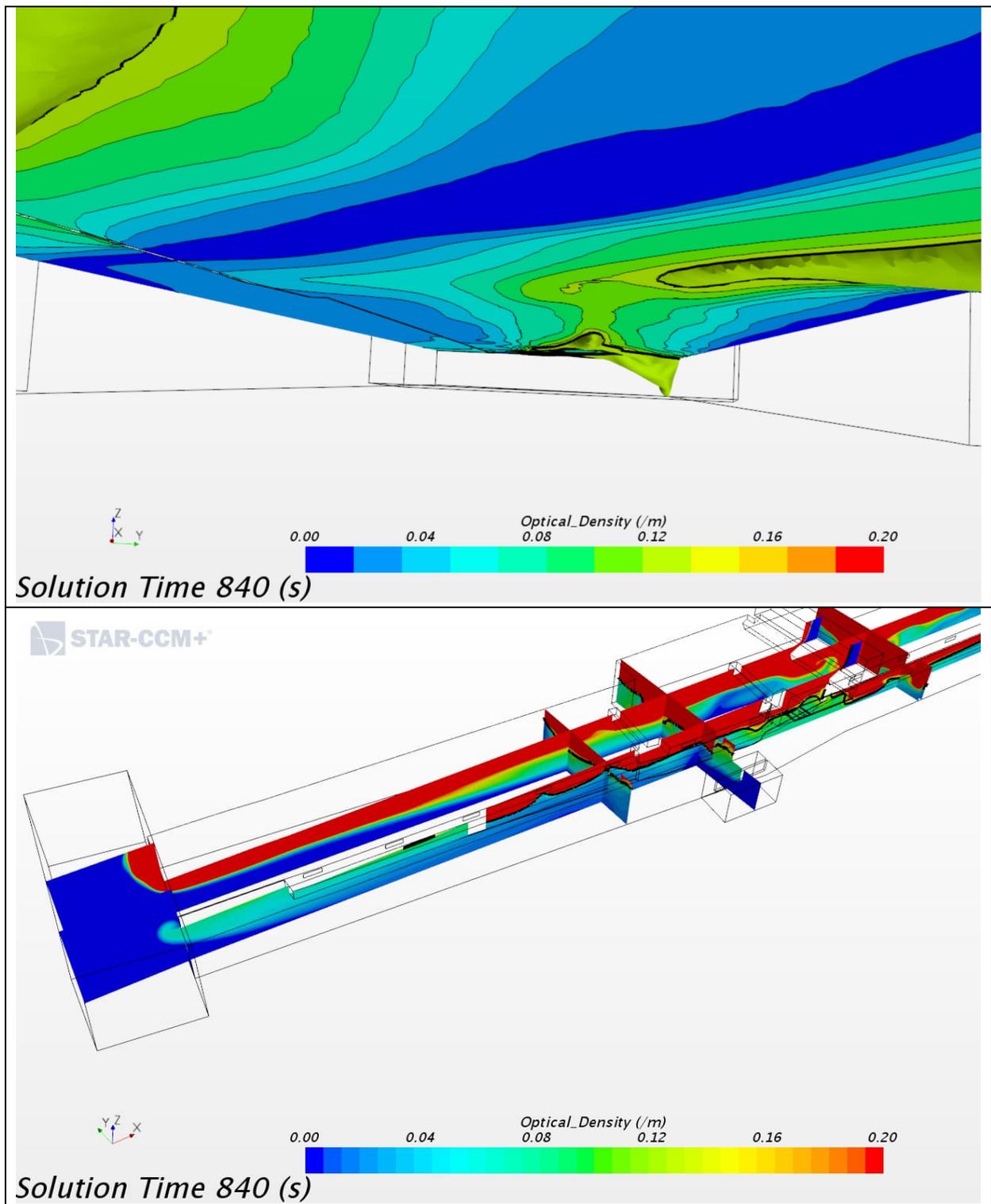


Abbildung A1- 39 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 2 Detailbetrachtung zur 14. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-42

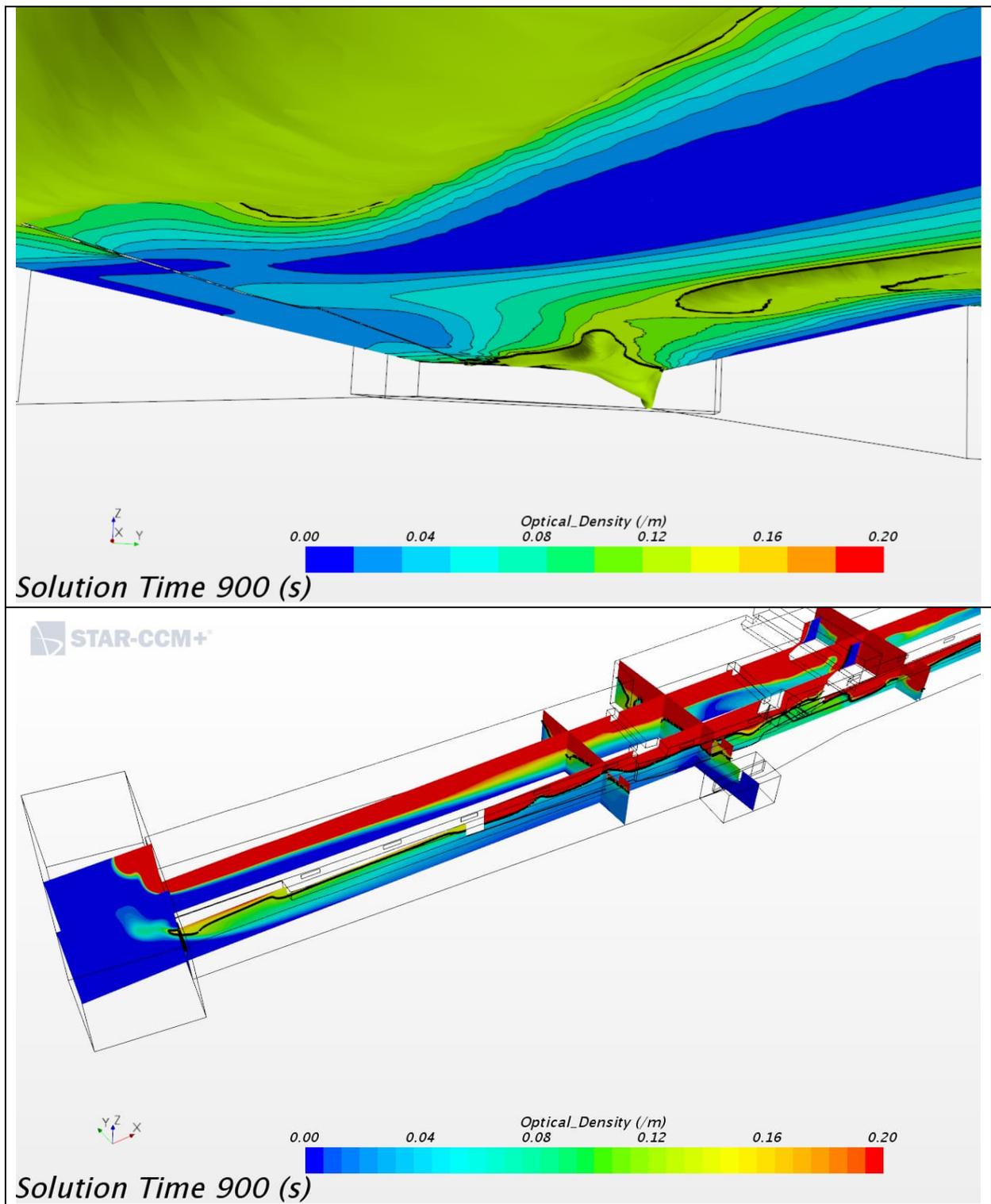


Abbildung A1- 40 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 2 Detailbetrachtung zur 15. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-43

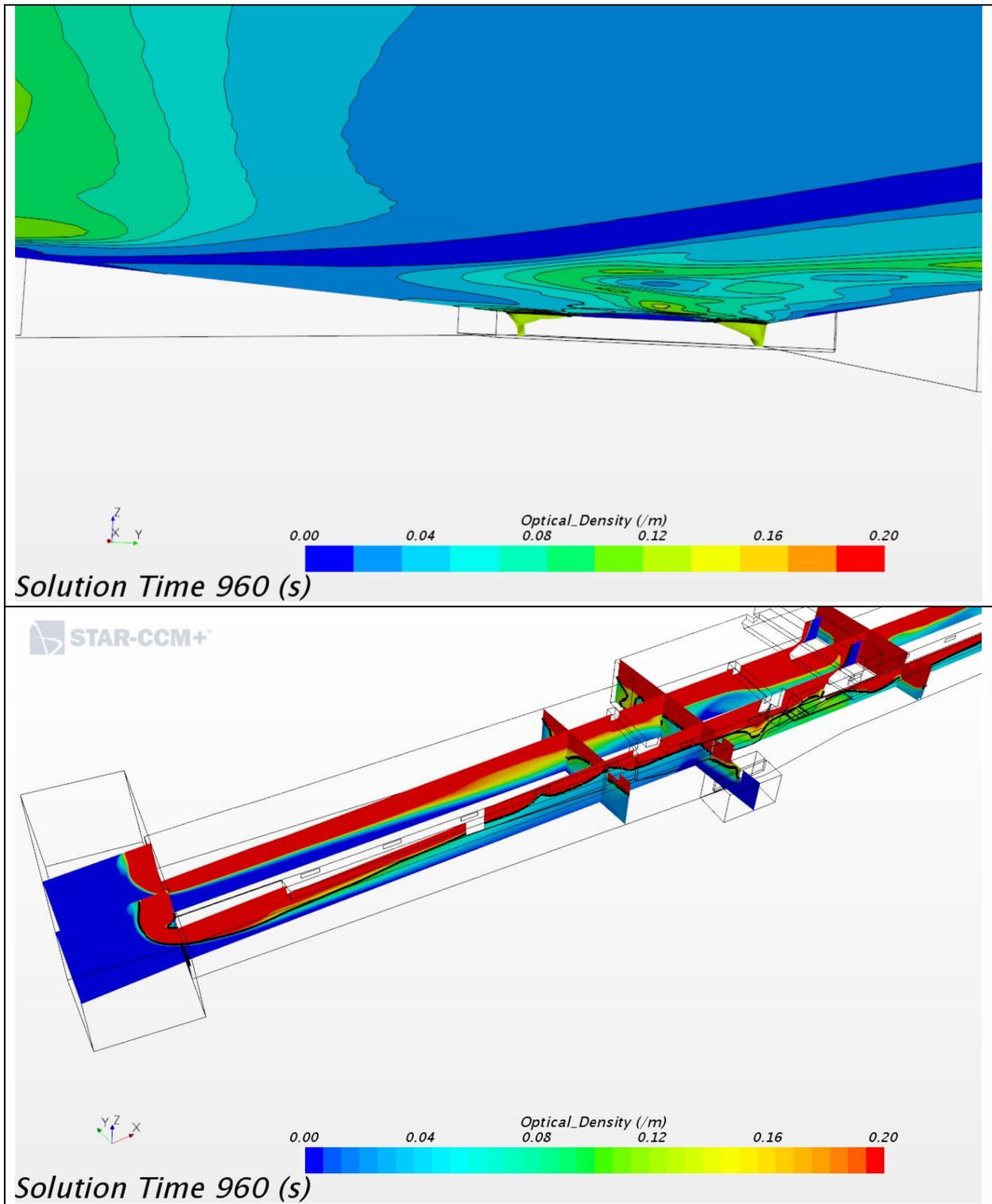


Abbildung A1- 41 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 2 Detailbetrachtung zur 16. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 1,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-44

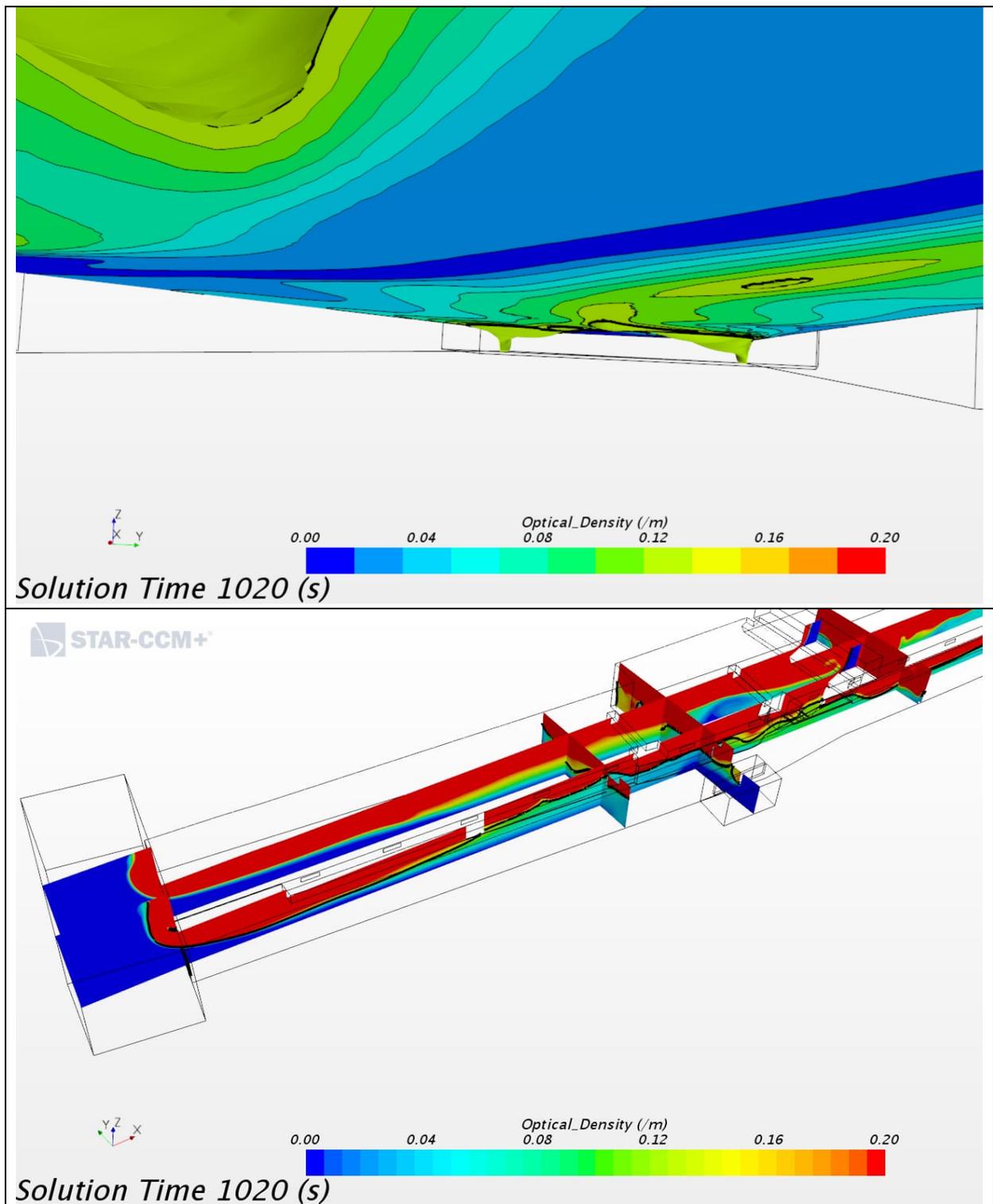


Abbildung A1- 42 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 2 Detailbetrachtung zur 17. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 1,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-45

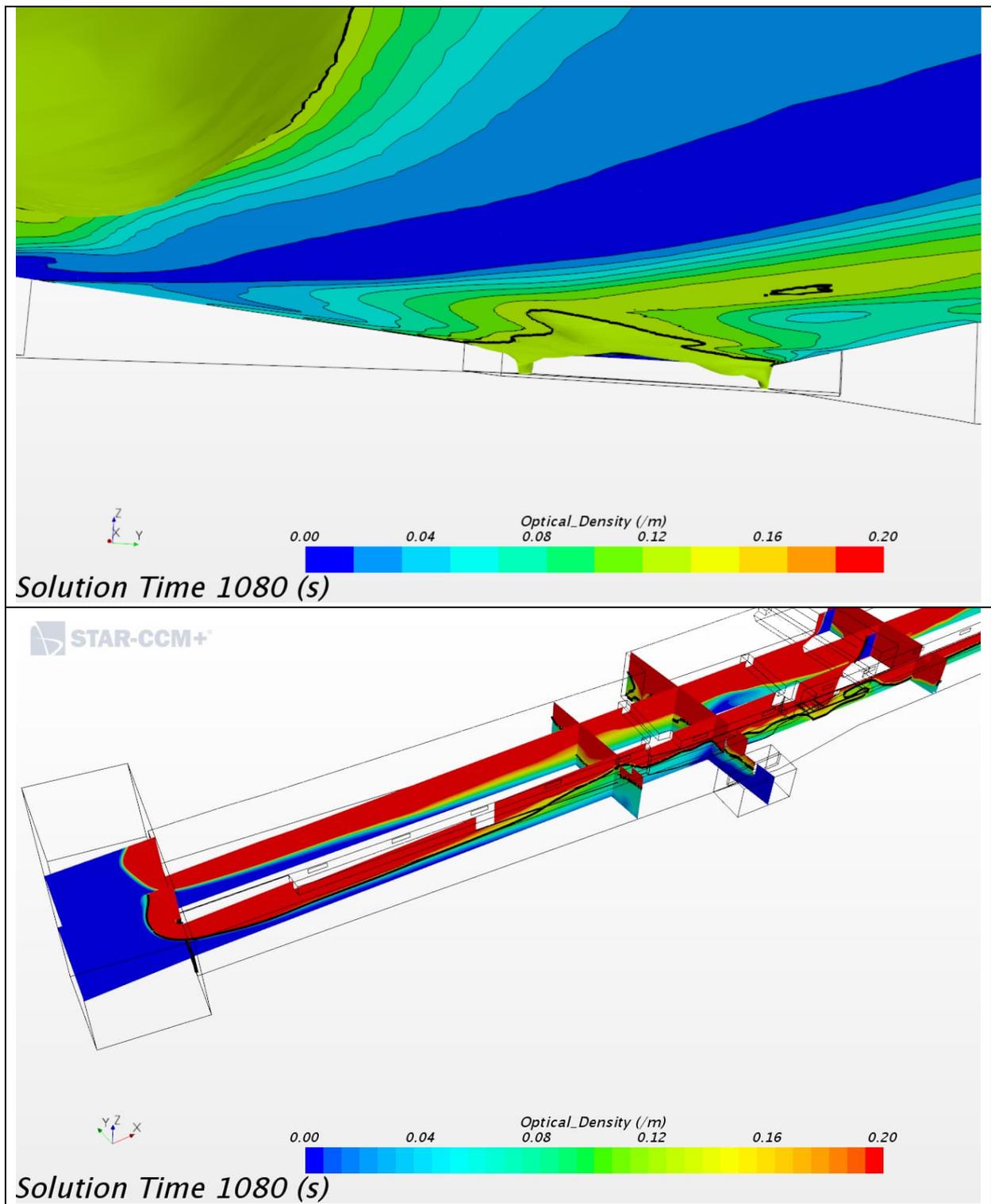


Abbildung A1- 43 Optische (Rauch-)Dichte bei Busbrand: MRA-Variante 2 Detailbetrachtung zur 18. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 1,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-46

Trambrand: MRA-Variante 1 „Ohne Schürze“

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-47

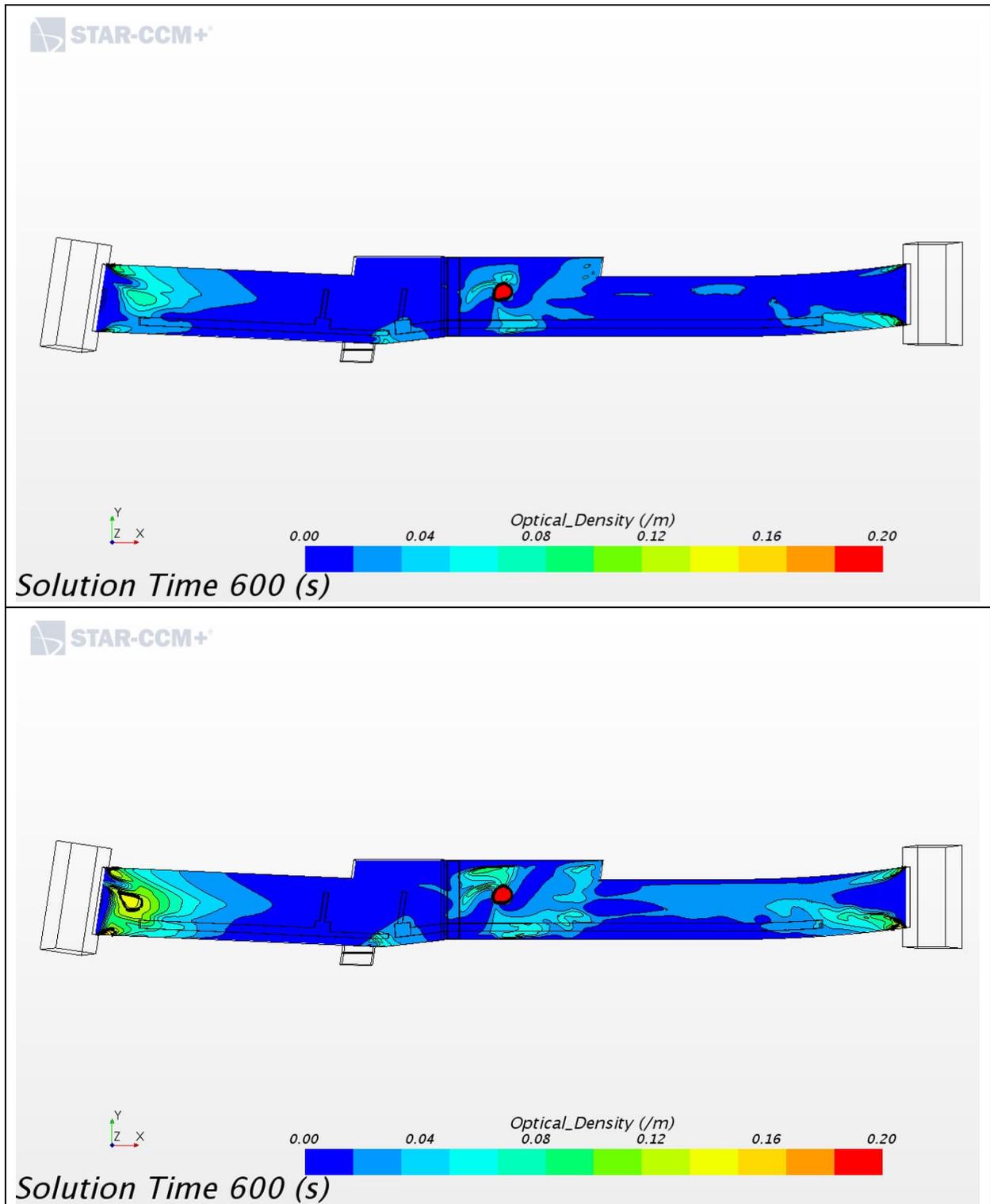


Abbildung A1- 44 Optische (Rauch-)Dichte zur 10. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-48

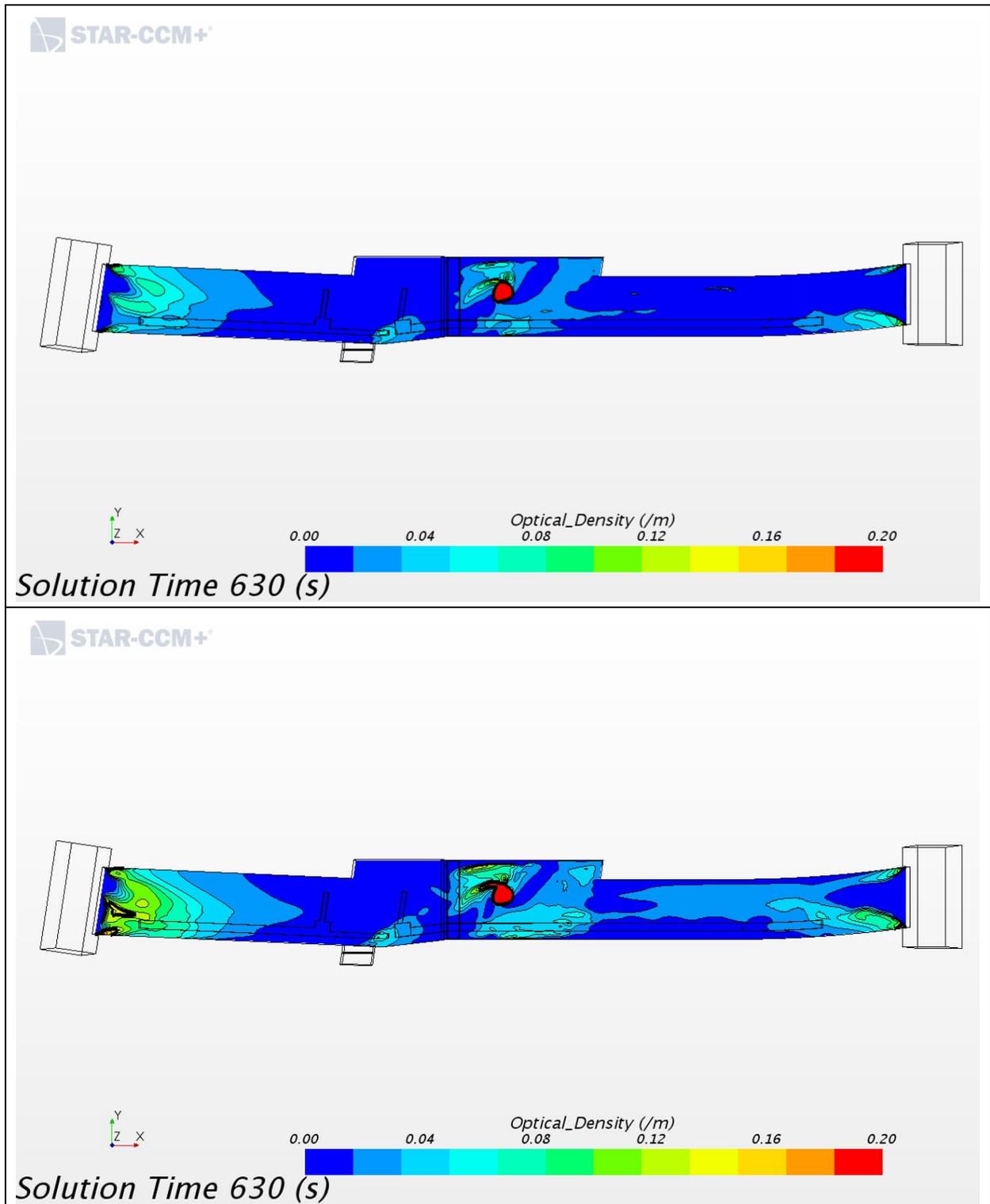


Abbildung A1- 45 Optische (Rauch-)Dichte zur 10,5. Simulationsminute des Trambrandes;
oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-49

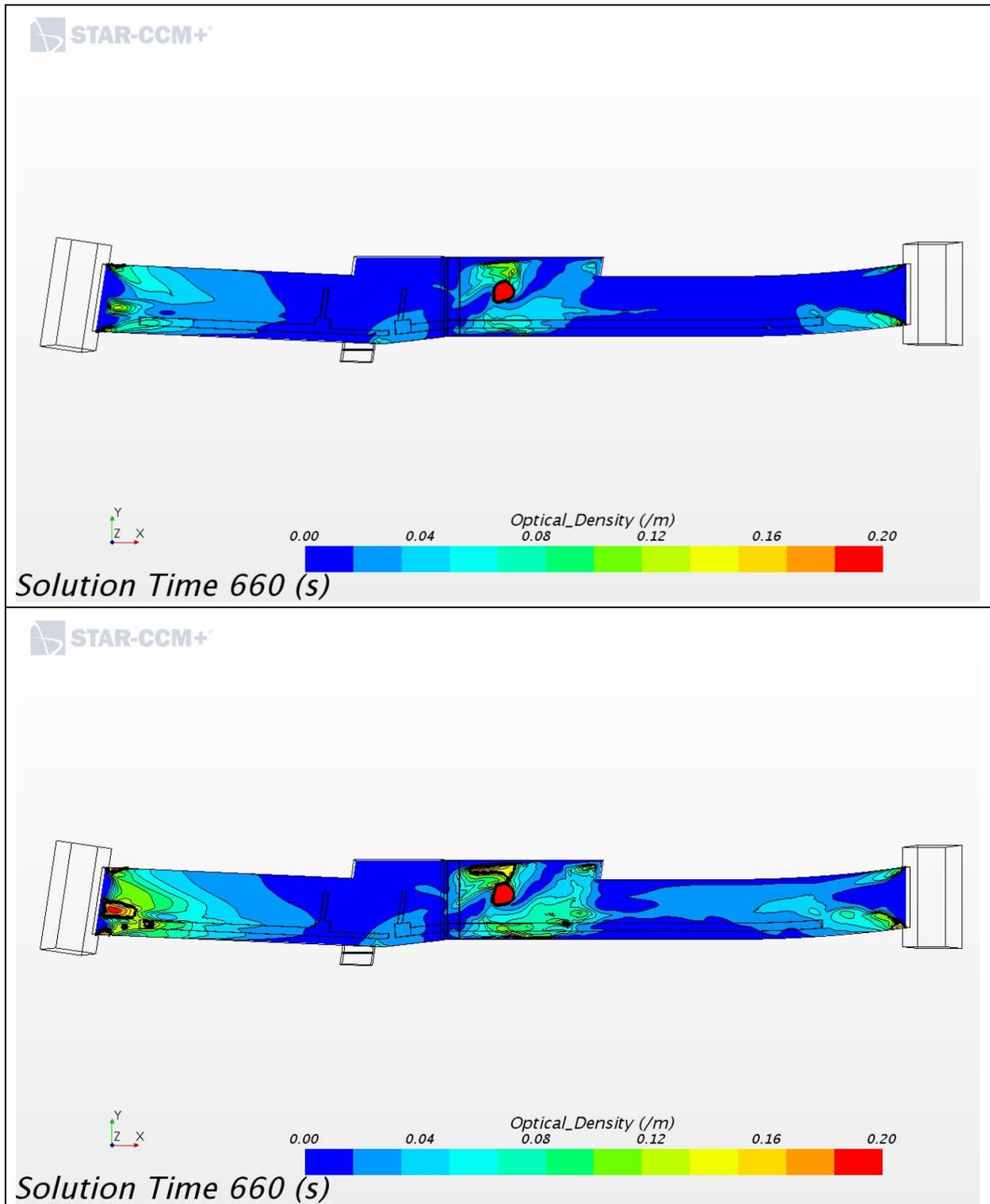


Abbildung A1- 46 Optische (Rauch-)Dichte zur 11. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-50

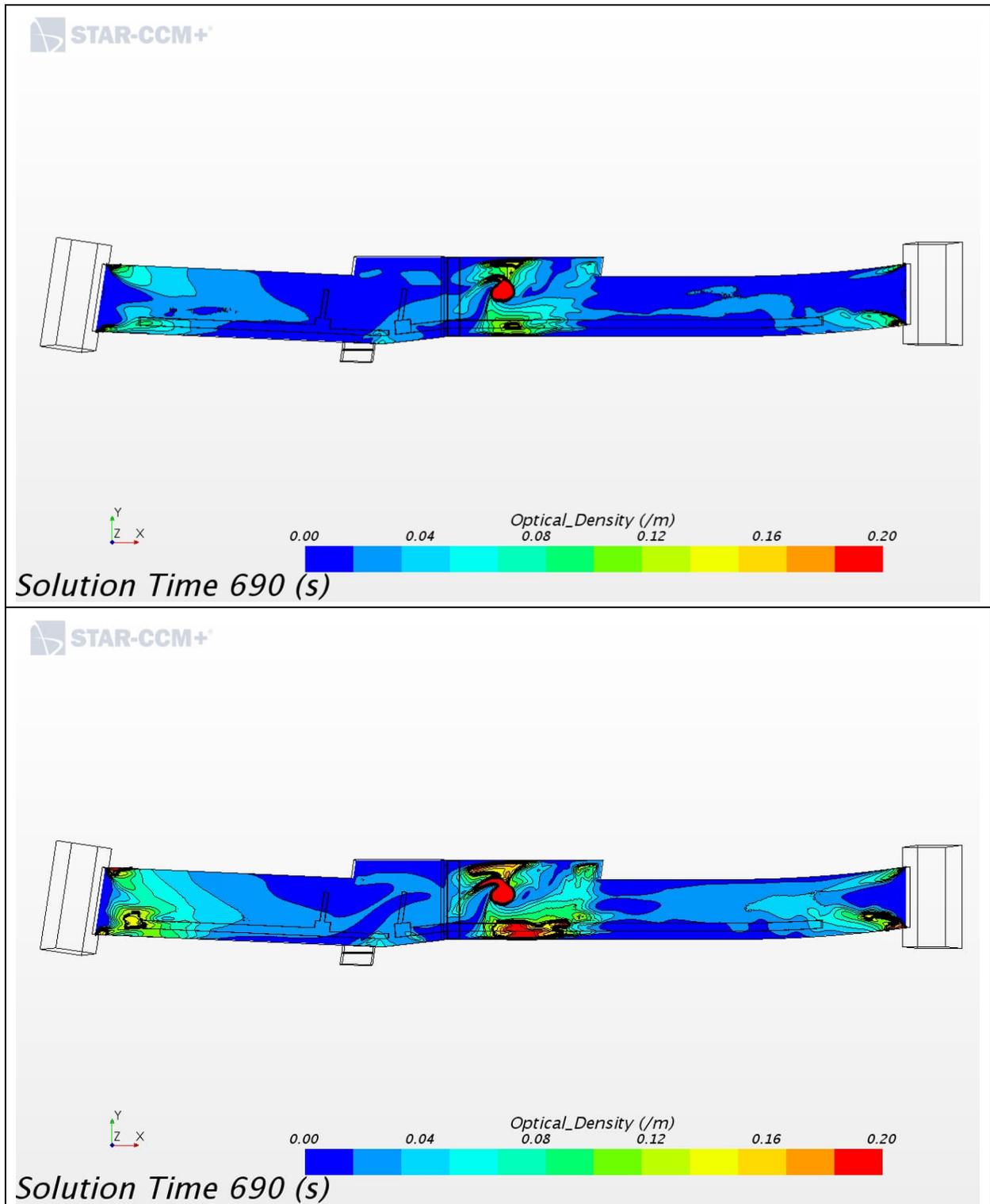


Abbildung A1- 47 Optische (Rauch-)Dichte zur 11,5. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-51

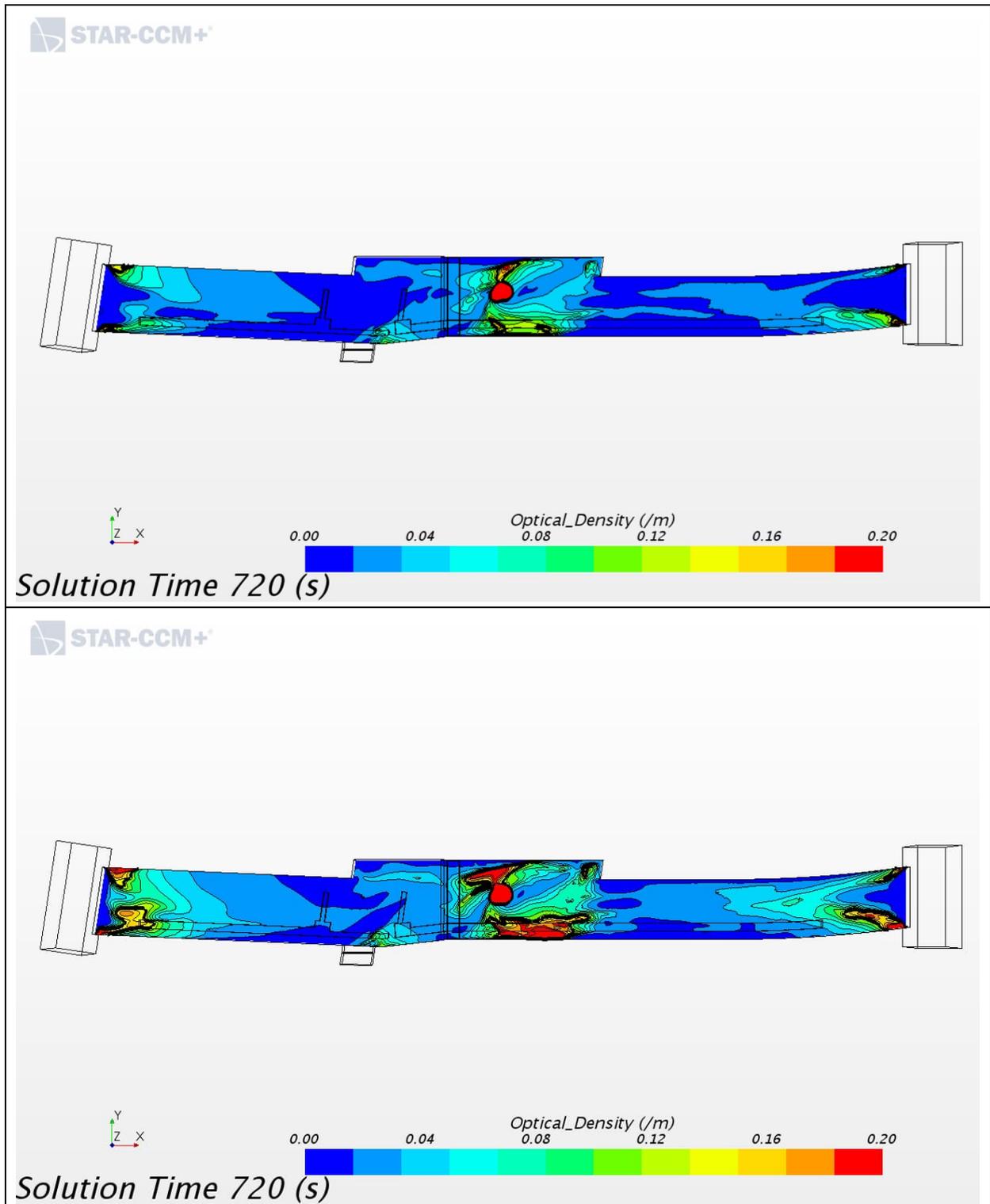


Abbildung A1- 48 Optische (Rauch-)Dichte zur 12. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-52

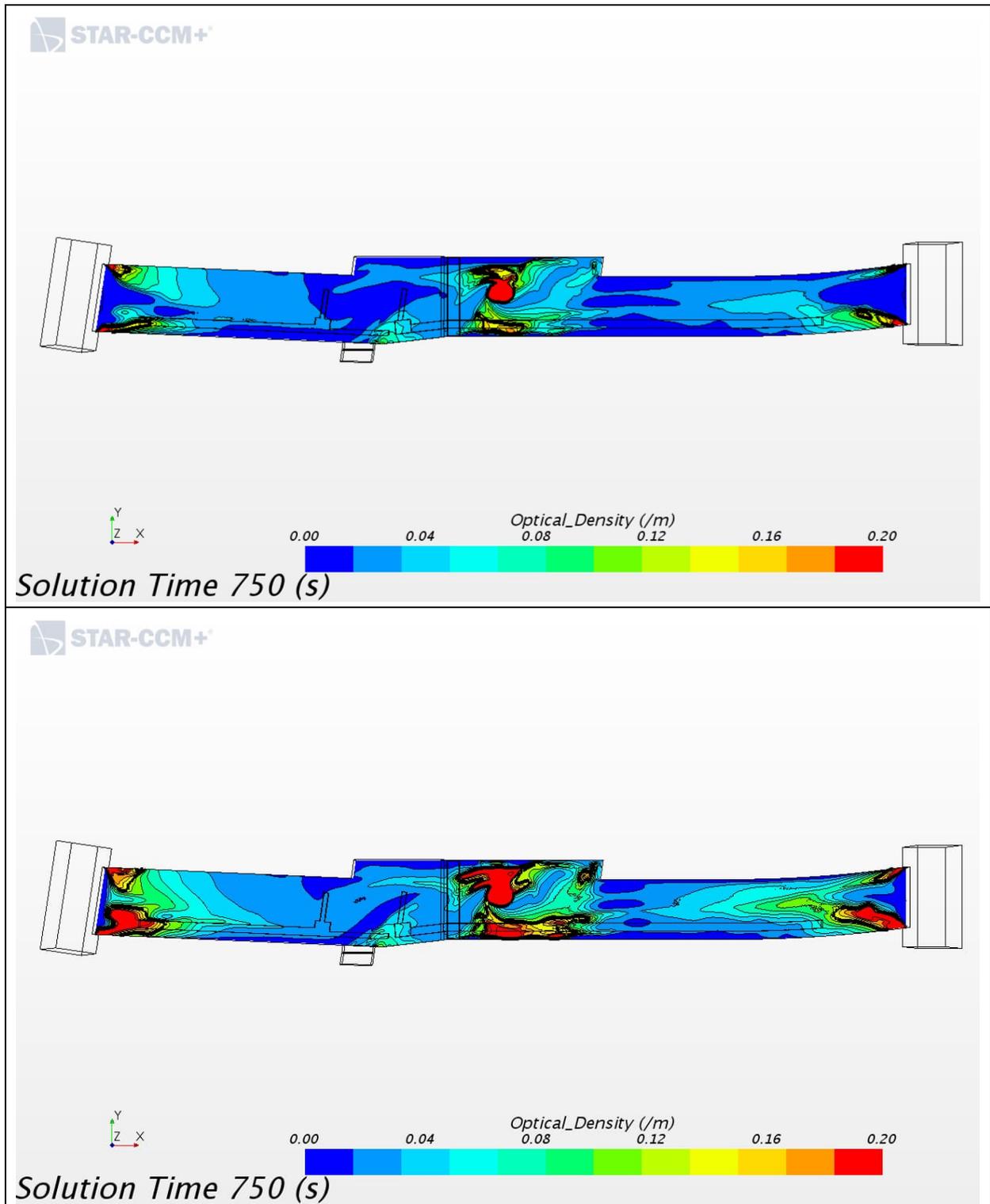


Abbildung A1- 49 Optische (Rauch-)Dichte zur 12,5. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-53

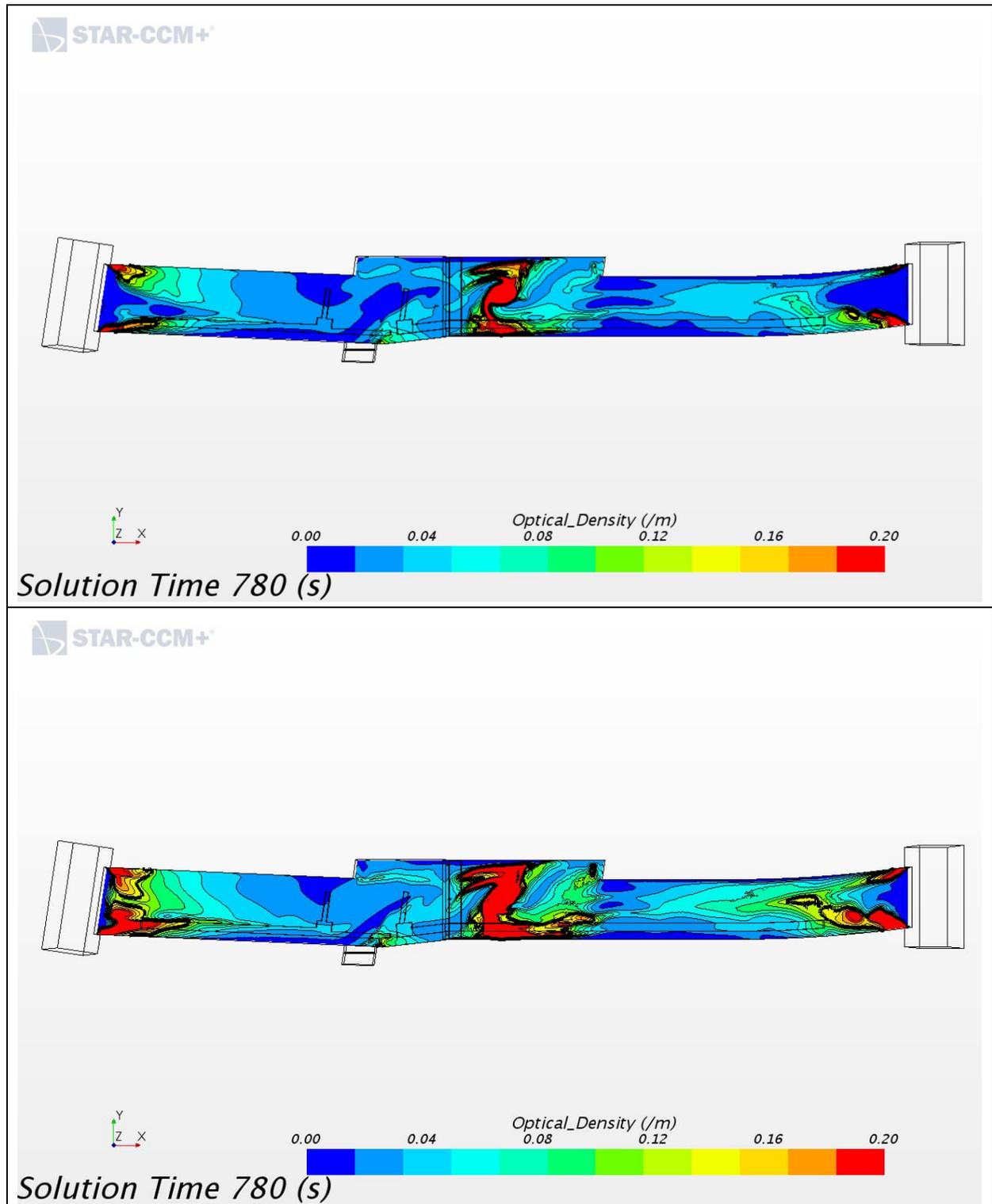


Abbildung A1- 50 Optische (Rauch-)Dichte zur 13. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 2,0 m; unten: Auswertehöhe 2,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-54

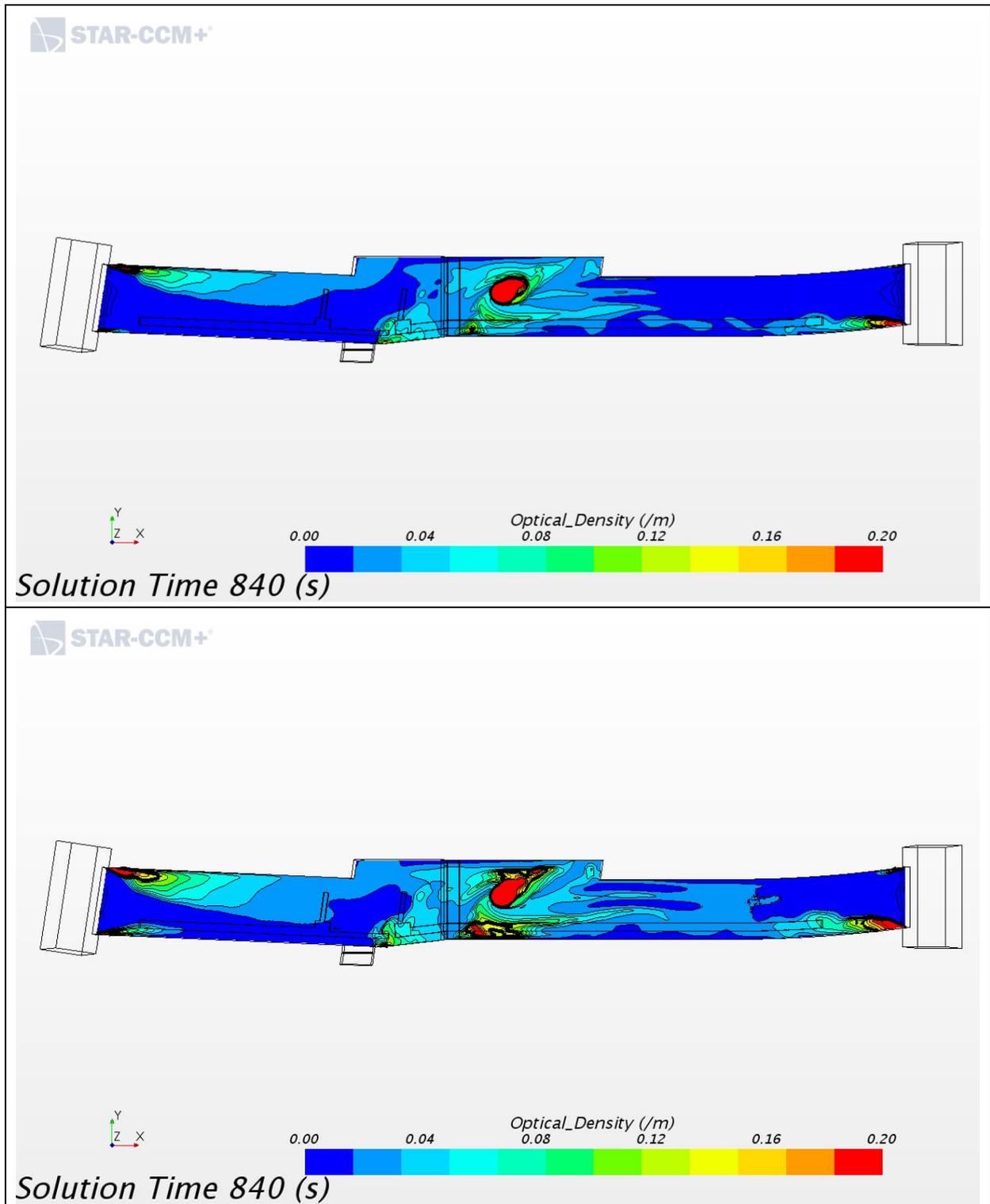


Abbildung A1- 51 Optische (Rauch-)Dichte zur 14. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-55

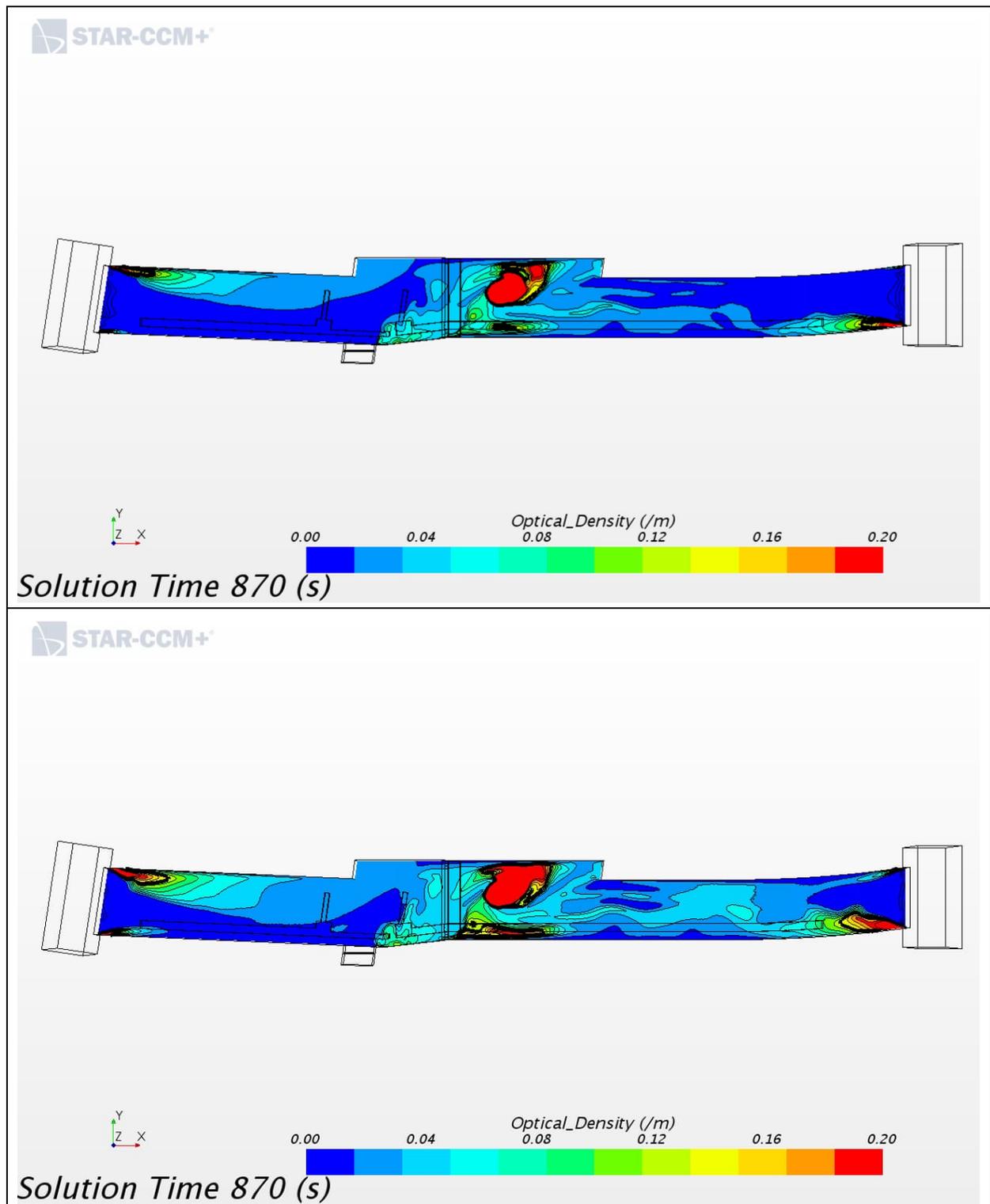


Abbildung A1- 52 Optische (Rauch-)Dichte zur 14,5. Simulationsminute des Trambrandes;
oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-56

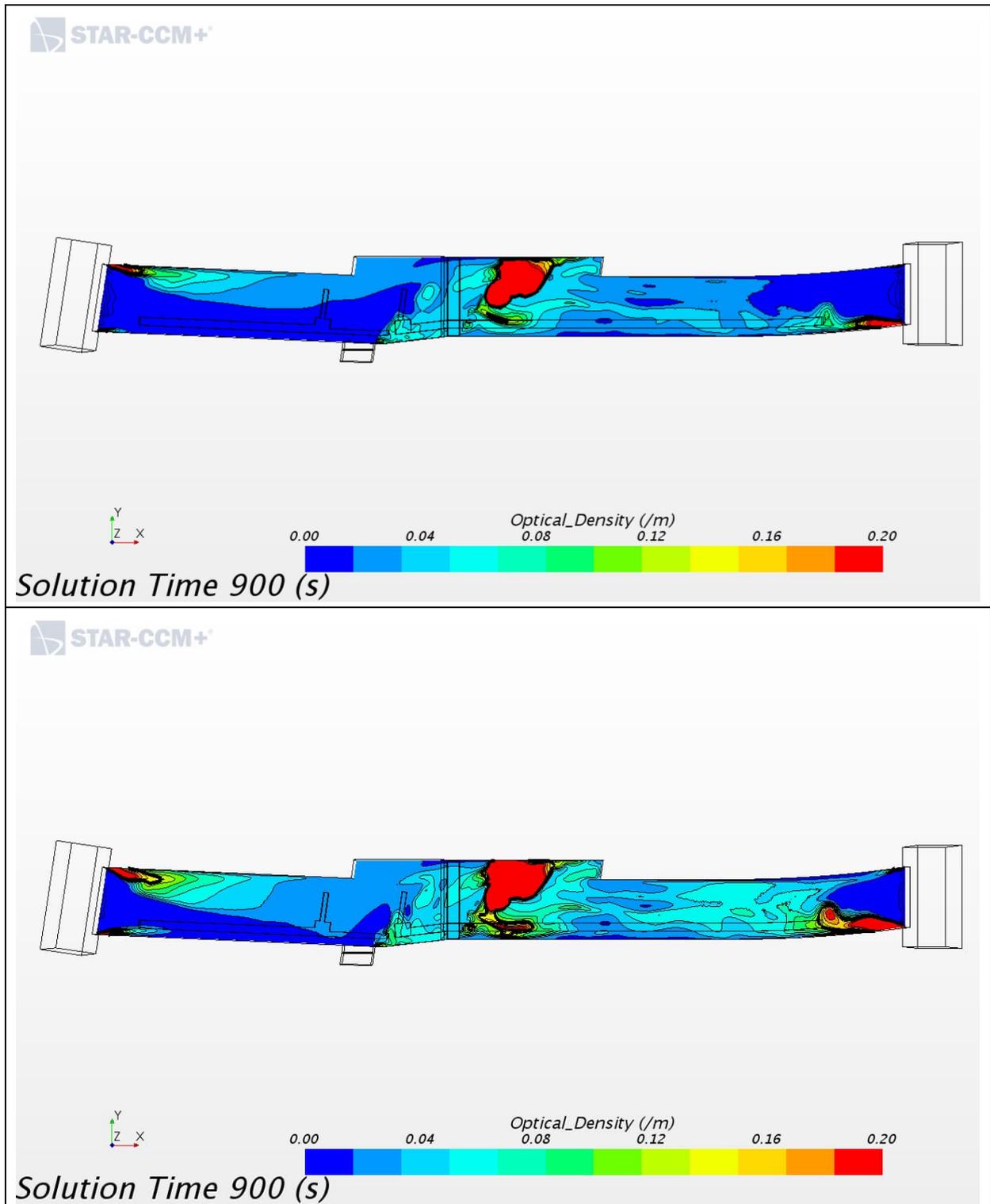


Abbildung A1- 53 Optische (Rauch-)Dichte zur 15. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-57

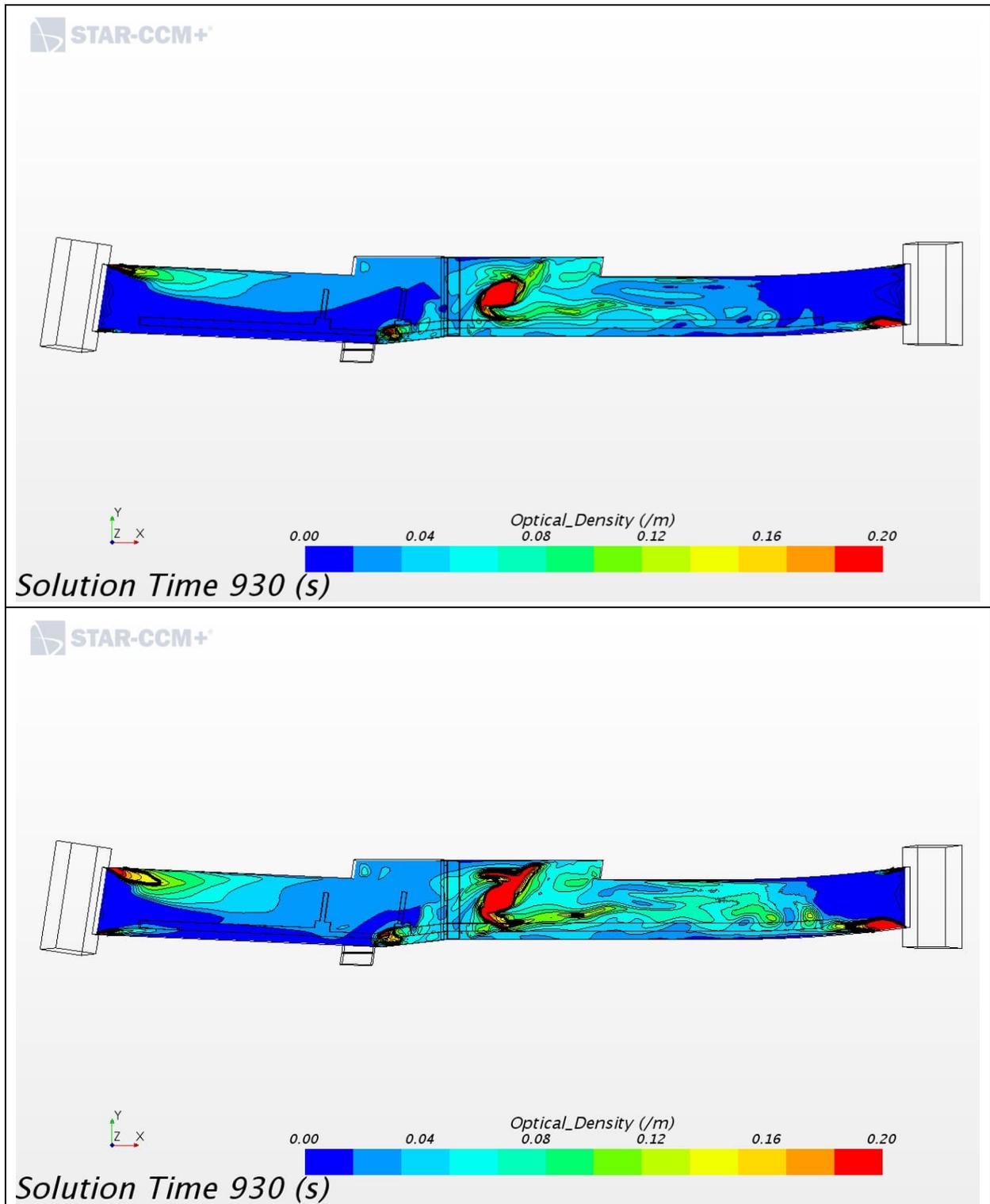


Abbildung A1- 54 Optische (Rauch-)Dichte zur 15,5. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-58

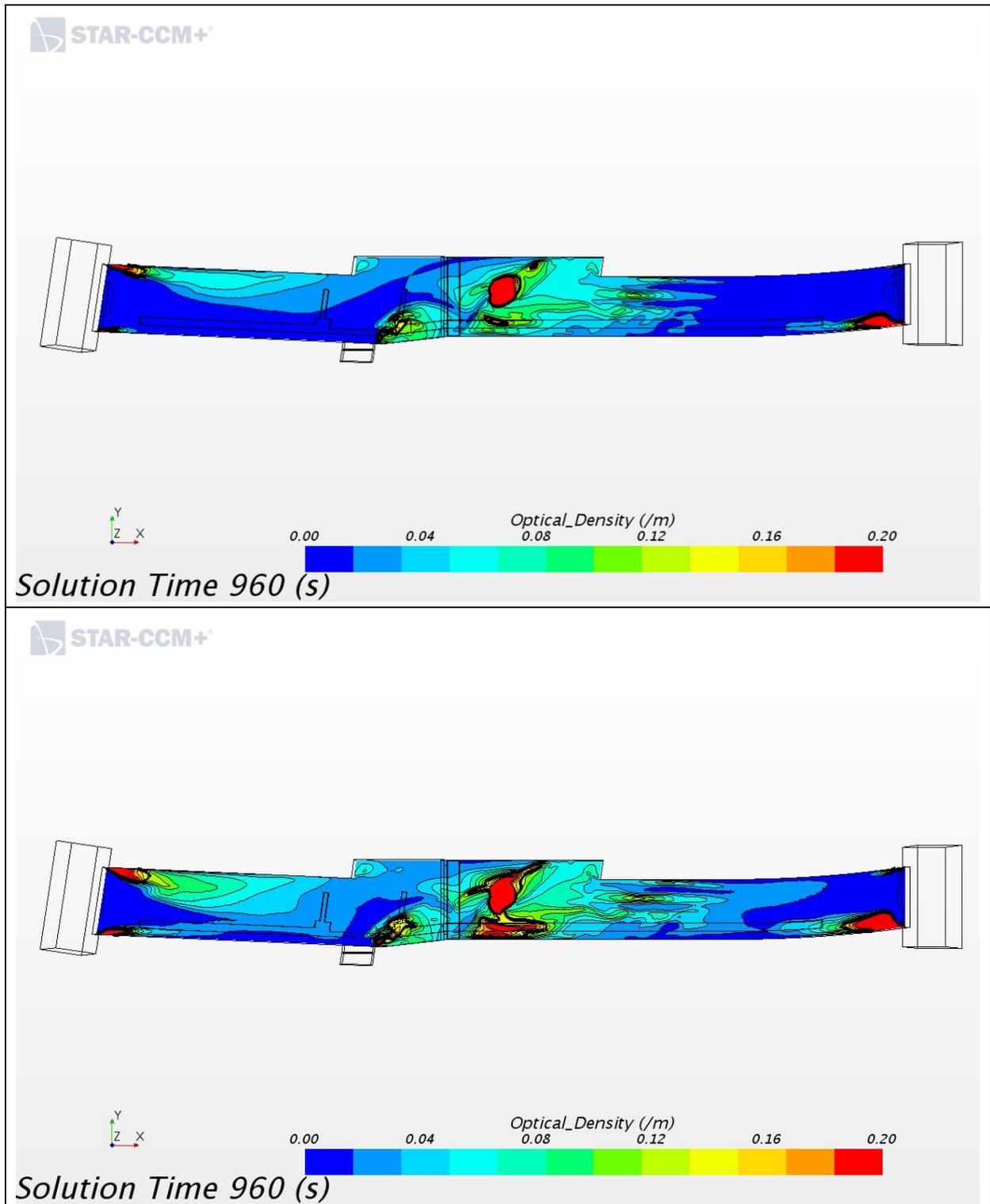


Abbildung A1- 55 Optische (Rauch-)Dichte zur 16. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-59

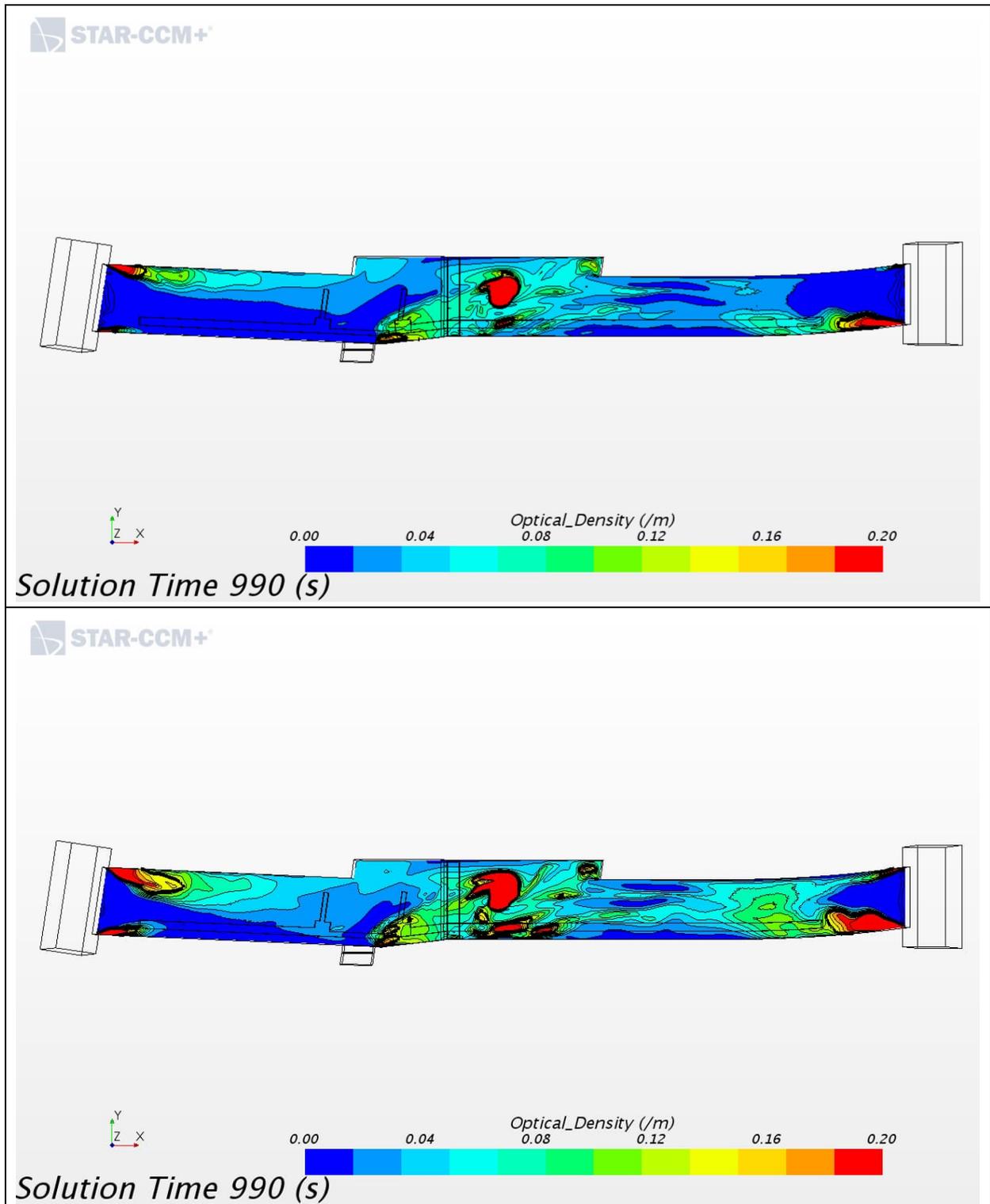


Abbildung A1- 56 Optische (Rauch-)Dichte zur 16,5. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-60

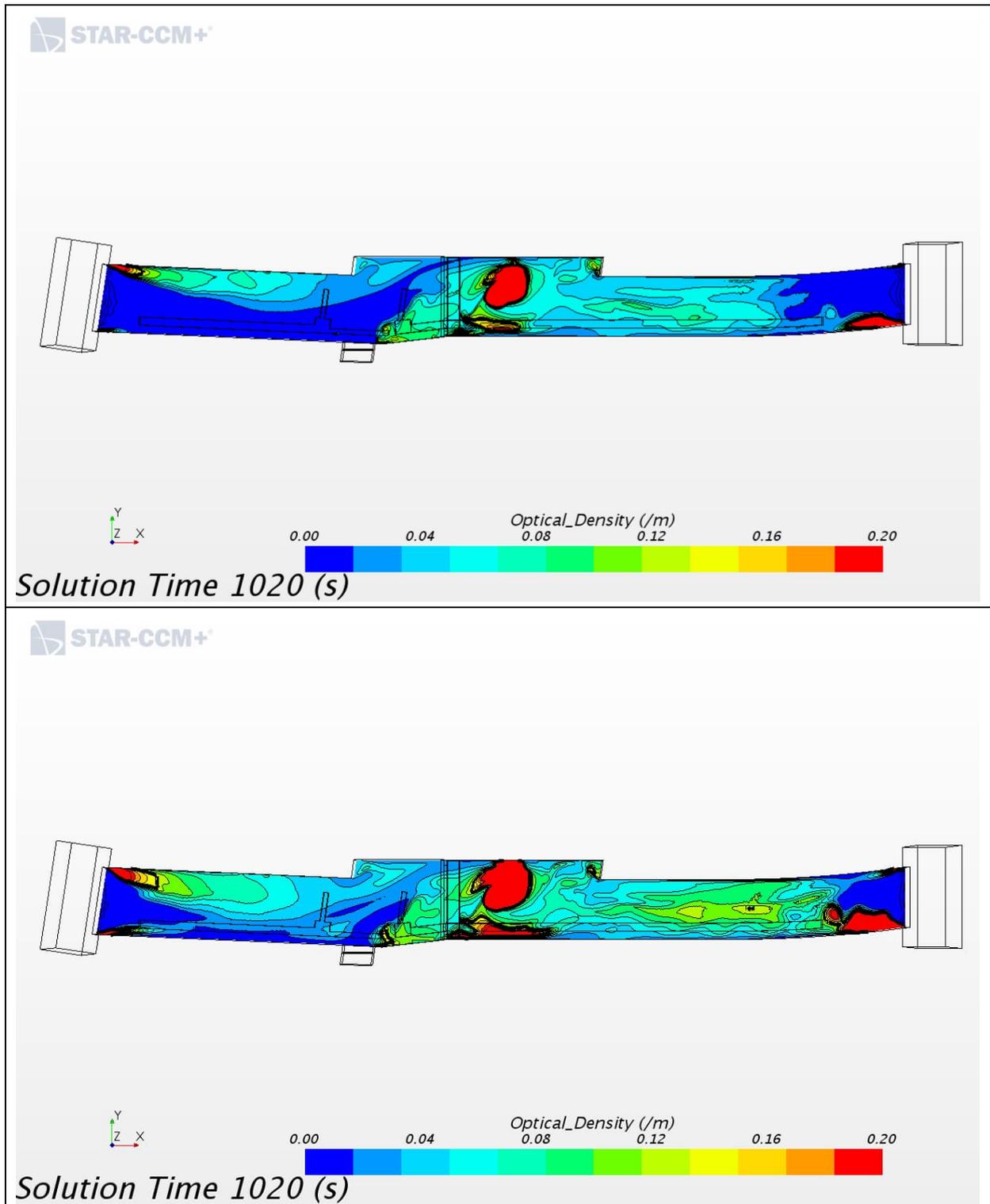


Abbildung A1- 57 Optische (Rauch-)Dichte zur 17. Simulationsminute des Trambrandes; oben: Auswertehöhe 1,0 m; unten: Auswertehöhe 1,5 m

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-61

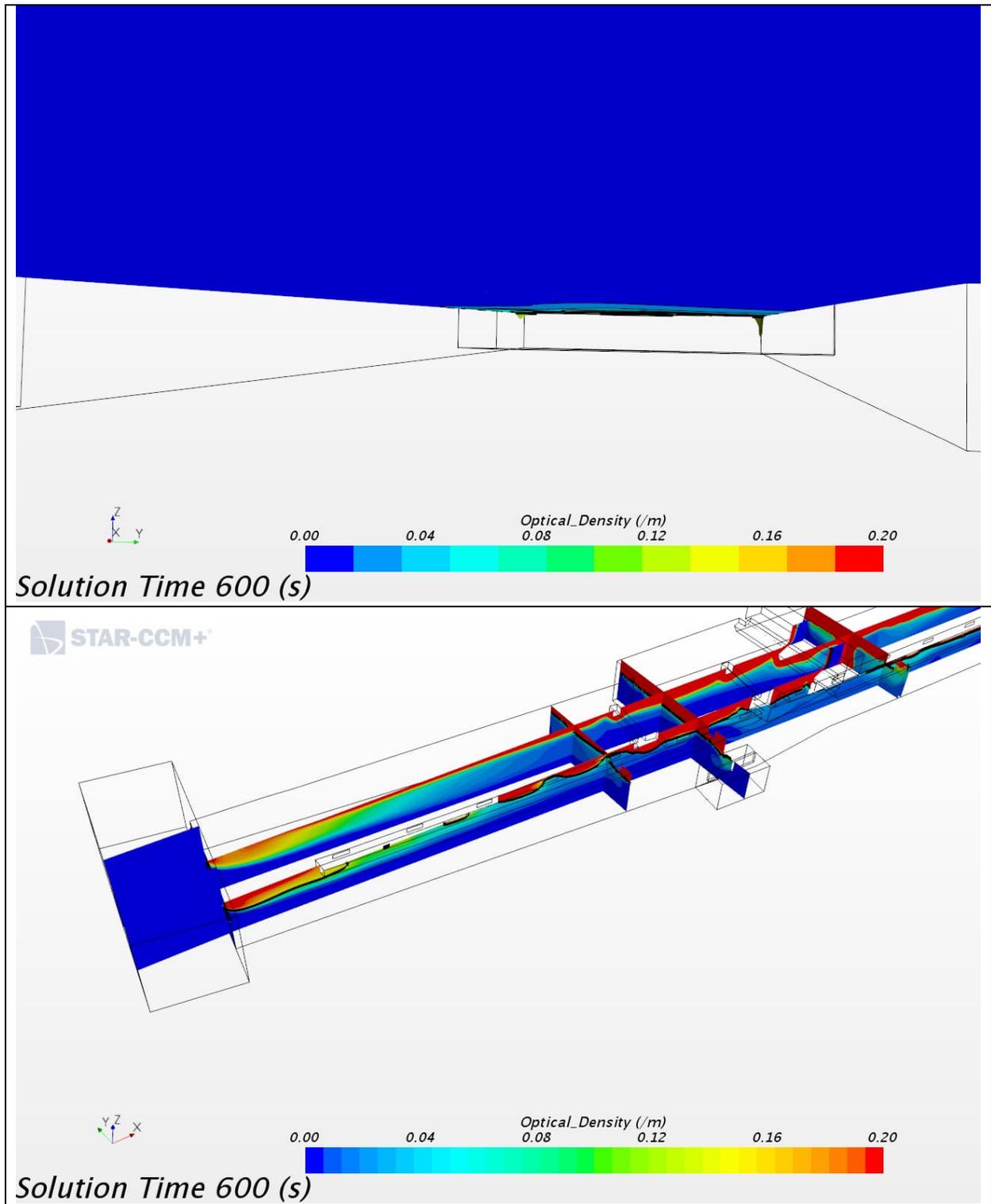


Abbildung A1- 58 Optische (Rauch-)Dichte des Trambrandes Detailbetrachtung zur 10. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-62

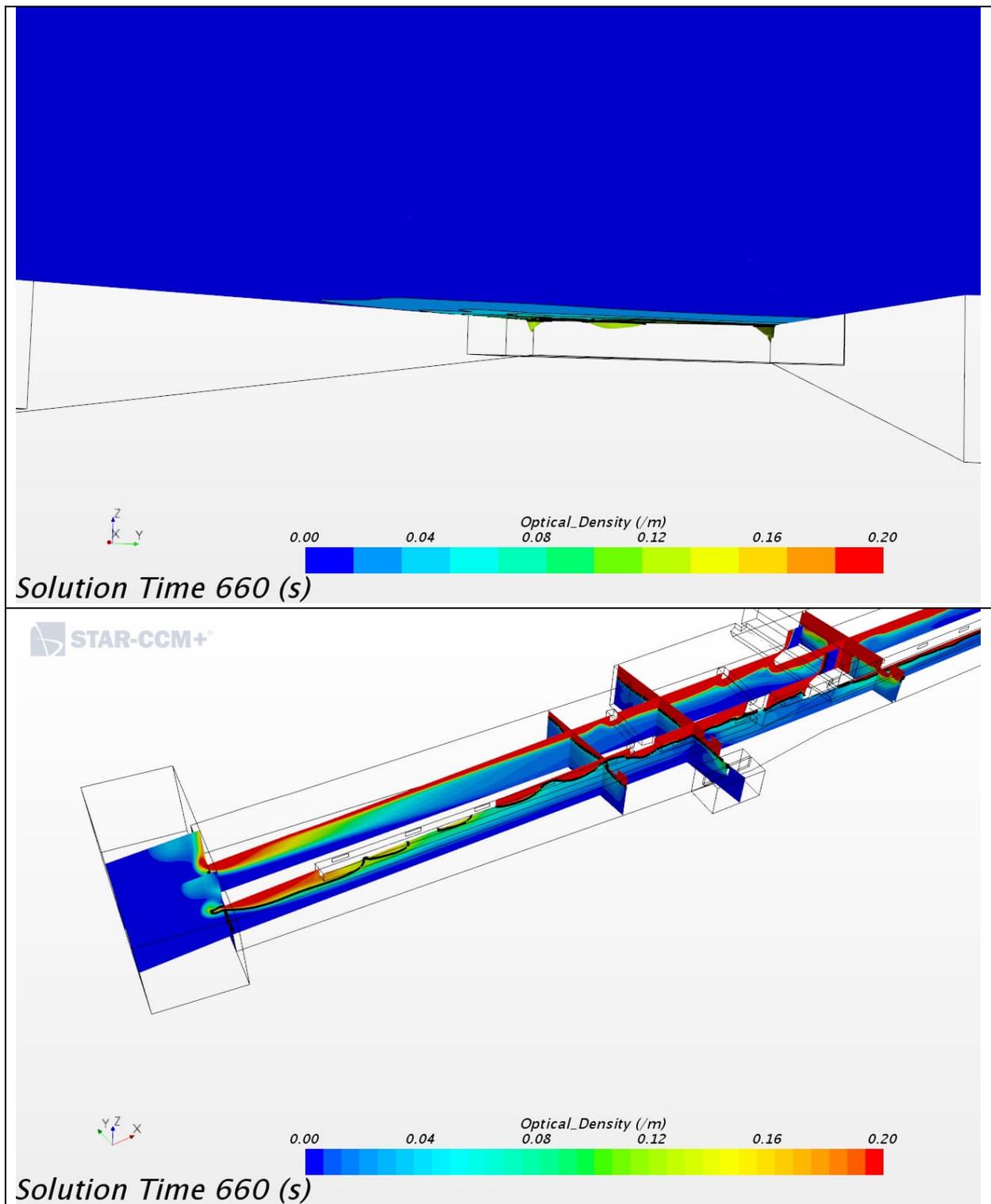


Abbildung A1- 59 Optische (Rauch-)Dichte des Trambrandes Detailbetrachtung zur 11. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitt

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-63

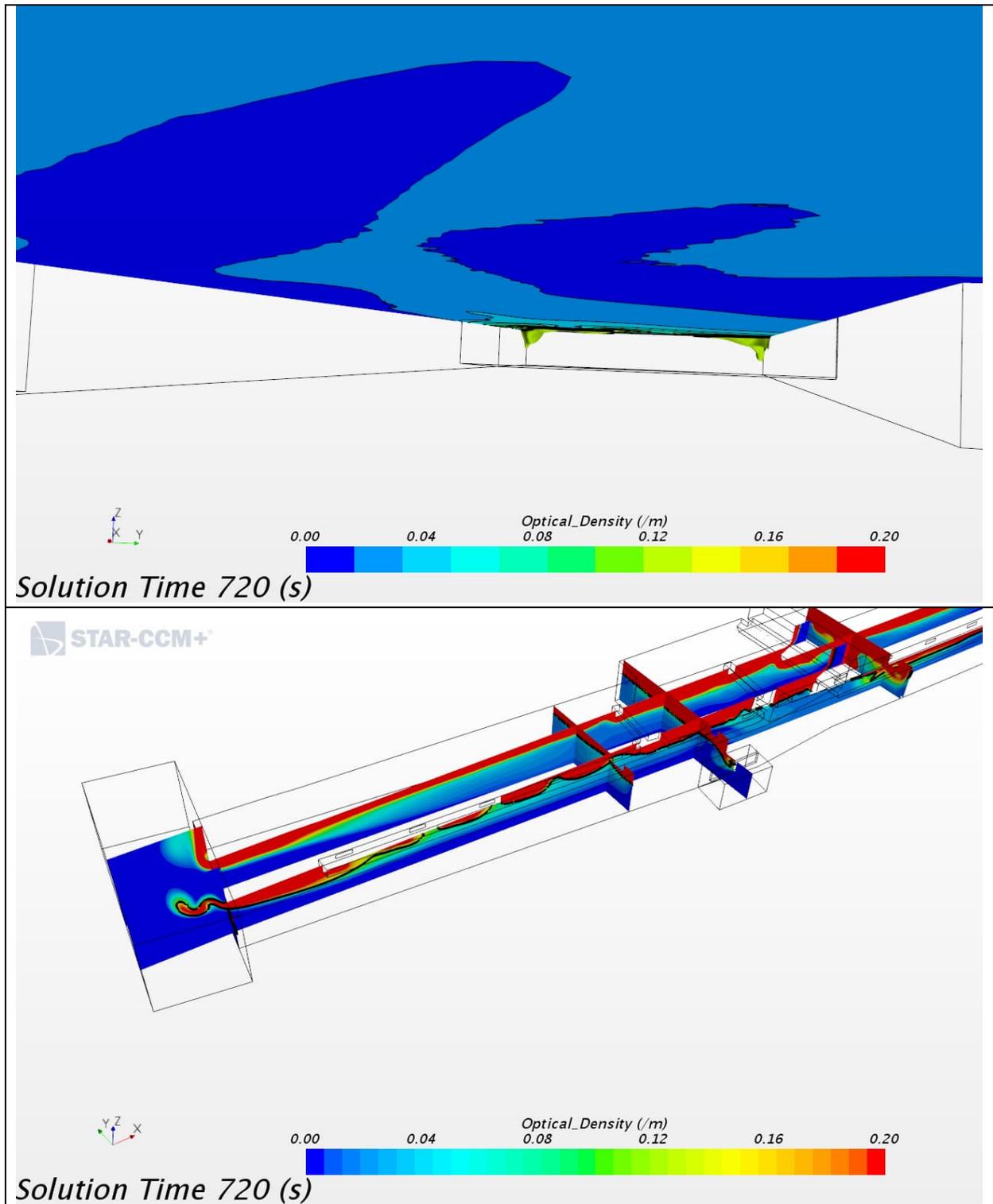


Abbildung A1- 60 Optische (Rauch-)Dichte des Trambrandes Detailbetrachtung zur 12. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 2,5 m, unten: Vertikalschnitte

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-64

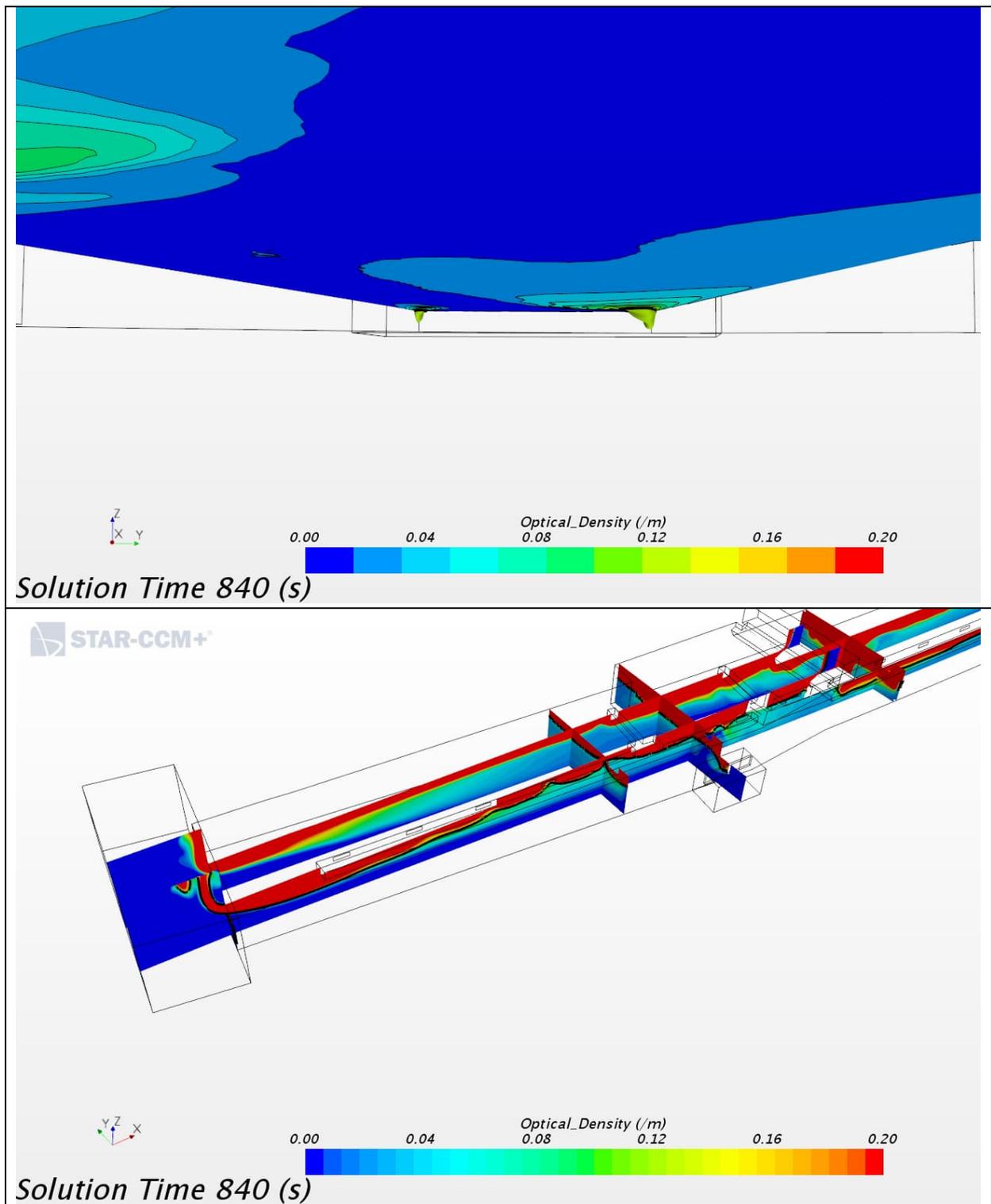


Abbildung A1- 61 Optische (Rauch-)Dichte des Trambrandes Detailbetrachtung zur 14. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 1,5 m, unten: Vertikalschnitte

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-65

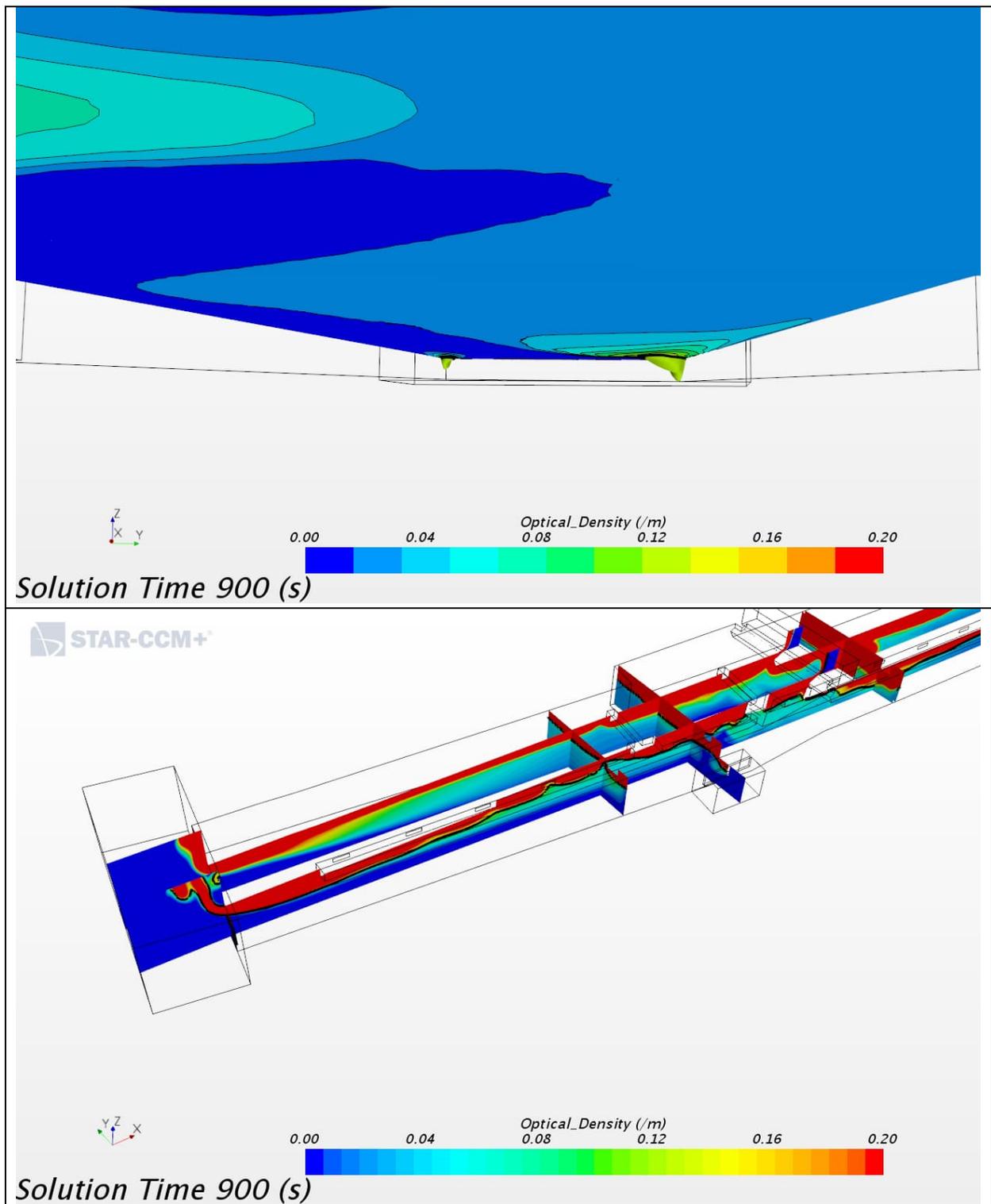


Abbildung A1- 62 Optische (Rauch-)Dichte des Trambrandes Detailbetrachtung zur 15. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 1,5 m, unten: Vertikalschnitte

Umweltverbundröhre, München-Laim

1850-006-G-0091-rog.doc vom 01.02.2022

Rev. A.0

Anlage A1-66

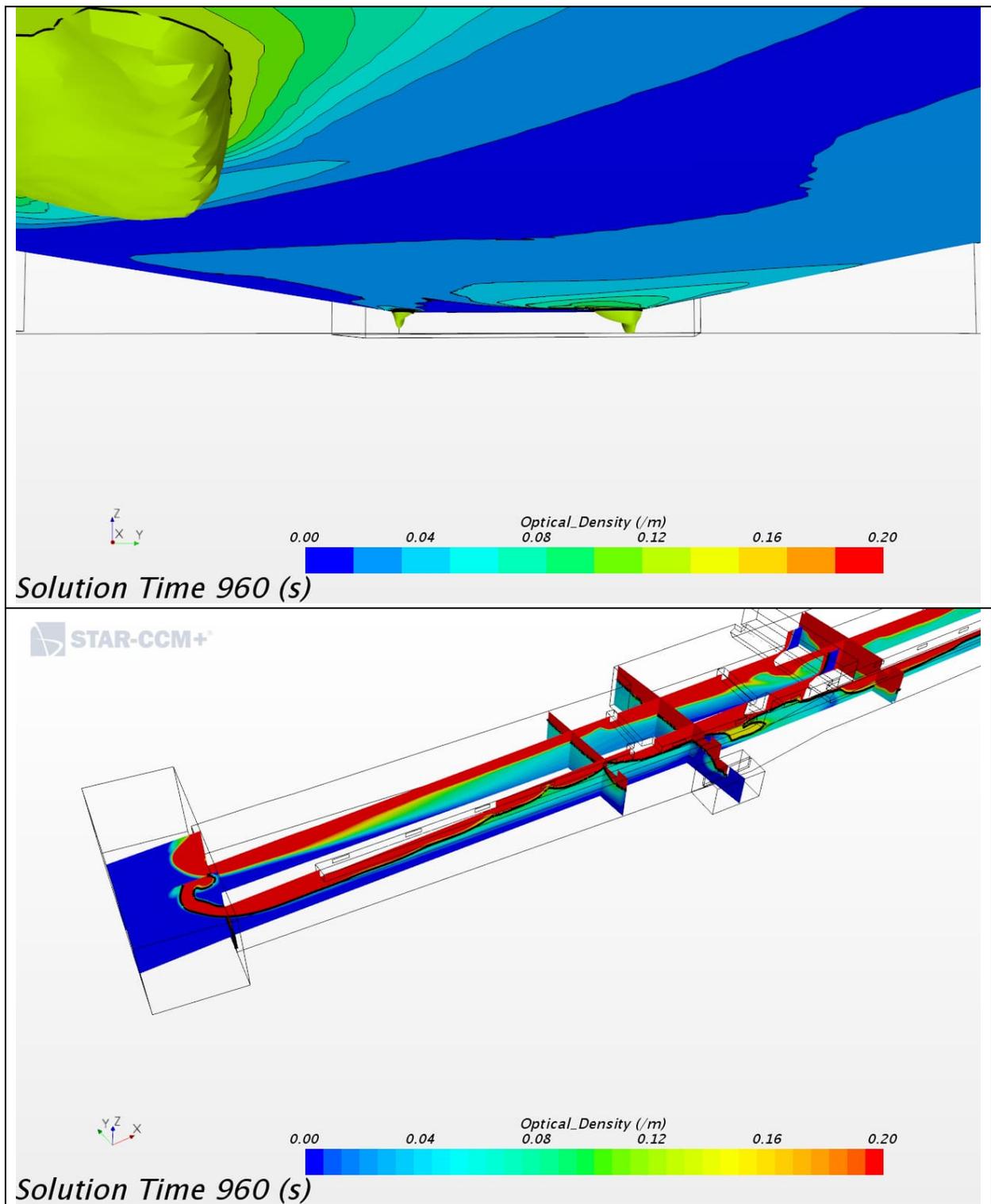


Abbildung A1- 63 Optische (Rauch-)Dichte des Trambrandes Detailbetrachtung zur 16. Simulationsminute, oben: Durch Iso-Surface geschnittene Auswertehöhe 1,5 m, unten: Vertikalschnitte