

Quelle ROM Technik

Paketposthalle München

Numerische Strömungssimulation der Brandentrauchung Brandszenario – LKW-Brand mit 60 MW

13.11.2023

Inhalt

▪ <u>Aufgabenstellung und Annahmen</u>	Seite 3
▪ <u>Brandherdmodell</u>	Seite 5
▪ <u>CFD-Modell und Randbedingungen</u>	Seite 8
▪ <u>Numerische Berechnungsverfahren</u>	Seite 9
▪ Ergebnisse	
▪ <u>Mittlere Temperatur</u>	Seite 10
▪ <u>Optische Dichte – X-Schnitt</u>	Seite 11
▪ <u>Optische Dichte – Isometrische Ansicht</u>	Seite 17
▪ <u>Optische Dichte – Z-Schnitte</u>	Seite 23
▪ <u>Temperatur – X-Schnitt</u>	Seite 29
▪ <u>Temperatur – Isometrische Ansicht</u>	Seite 35
▪ <u>Fazit</u>	Seite 41

Alle Abbildungen, die nicht als urheberfremde Quellen gekennzeichnet sind, sind solche des Gutachtenerstellers.

Aufgabenstellung und Annahmen

Die Untersuchung hat das Ziel, durch die Simulation eines worst-case Brandszenarios in der Paketposthalle München — in dem ein LKW mit einer maximalen Leistung von 60 MW in der Mitte der Halle im Winterfall brennt — mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation (CFD = Computational Fluid Dynamics), die Sicherheit der Halle, sowohl für die Selbstrettung der Anwesenden als auch für die Löscharbeiten der Feuerwehr zu bewerten, d.h. dass sich der Rauch nicht im begehbaren Bereich der Halle ausbreitet, weder während der Evakuierung noch bevor die Feuerwehr den Brand bekämpfen kann.



Quelle: ROM Technik

Aufgabenstellung und Annahmen

Für alle bisher durchgeführten Untersuchungen wurde der Worst-Case an einem relativ kalten Wintertag mit hohen Windgeschwindigkeiten betrachtet. Aufgrund dieser Betrachtungen wurde gefolgert, dass die Halle geschlossen ausgeführt werden muss. Für die geschlossene Halle wird der Wintertag mit kalten Außentemperaturen und entsprechend kalten Oberflächentemperaturen in der Halle beibehalten: der Rauch kühlt an den kalten Oberflächen schneller ab, da er beim Kontakt mit den Deckenflächen verstärkt Wärme austauscht. Diese beschleunigte Abkühlung kann dazu führen, dass die raucharme Schicht schneller absinkt, was erhöhte Herausforderungen für die Selbstrettung und die Löscharbeiten der Feuerwehr darstellt.

Brandbekämpfung durch die Feuerwehr

Tabelle 3. Zeiten t_a bis zur Brandmeldung

	Brandmeldung	Zeit
a1	Automatische Brandmeldung durch Brandmeldeanlage nach DIN VDE 0833 mit automatischen Brandmeldern der Kenngröße Rauch	$t_{a1} = 120 \text{ s}$
a2	Automatische Brandmeldung durch Auslösung der Sprinkleranlage	$t_{a2} = t_a$ gemäß Abschnitt 3.5.1
a3	Brandmeldung durch Auslösung der Sprinkleranlage ohne direkte Weiterschaltung zur Feuerwehr	$t_{a3} = t_{a2} + 300 \text{ s}$
a4	Automatische Brandmeldung durch Brandmeldeanlage nach DIN VDE 0833 mit Wärmemaximalmeldern	t_{a4} gemäß Abschnitt 3.5.2
a5	Sonstige Brandmeldung (z.B. Telefon)	$t_{a5} = 600 \text{ s}$

Tabelle 4. Interventionszeiten t_b der Feuerwehr

	Art der Verhältnisse	Zeit
b1	Günstige Verhältnisse (Vorhandensein einer Werkfeuerwehr)	$t_{b1} = 480 \text{ s}$
b2	Normale Verhältnisse (z.B. Berufsfeuerwehr vorhanden/Einsatzstelle übersichtlich)	$t_{b2} = 780 \text{ s}$
b3	Ungünstige Verhältnisse (z.B. Freiwillige Feuerwehr/Einsatzstelle übersichtlich; Berufsfeuerwehr vorhanden/Einsatzstelle unübersichtlich)	$t_{b3} = 1080 \text{ s}$
b4	Besonders ungünstige Verhältnisse (z.B. Freiwillige Feuerwehr vorhanden/Einsatzstelle besonders unübersichtlich)	$t_{b4} = 1380 \text{ s}$

Die Halle hat mit einem automatischen Brandmeldesystem ausgestattet, so dass es 120 Sekunden dauert, bis der Brand entdeckt wird. Bei ungünstige Verhältnissen beginnt die Feuerwehr ca. 18 Minuten nach der Alarmierung mit dem Löschangriff. Untersucht wird die Rauchentwicklung und Rauchverbreitung in der Halle über eine Zeit von 30 Minuten, ohne dass ein Löschangriff stattfindet.

Aufgabenstellung und Annahmen

Idealerweise sollte die raucharme Schicht mindestens 5 Minuten lang höher als 2,5 m bleiben, da dies die Phase der Selbstrettung ist (eine Entfluchtungsstudie wurde durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass die Halle, die mit 8000 Personen gefüllt war, in 5 Minuten evakuiert wurde).

Die mechanische Entrauchung beginnt durch Detektion des Rauches nach 120 Sekunden. Die Ventilatoren werden innerhalb von 60 Sekunden auf 300.000 m³/h hochgefahren. Die Zuluft kann an den Seiten in Bodennähe der Halle mit einer mittleren Geschwindigkeit von weniger als 1 m/s einströmen.

Es wird angenommen, dass 70 % der Wärme konvektiv freigesetzt wird.

Brandherddaten nach VDI 6019 Blatt 1

Für die Simulationsstudie wird von gesprinklerten, hochenergetischen Brandereignissen ausgegangen.
Für den Brand wird von einer schnellen Brandentwicklung ausgegangen.

Tabelle 4.1 Zuordnung der Brandentwicklung zu unterschiedlichen Nutzungsarten und Stoffgruppen

Brandentwicklung	Nutzungsart [4.21]	Stoffgruppen [4.35], [4.36]
Langsam	Gemäldegalerie	dicht gepackte Holzwaren
Mittel	Wohnung, Büro, Hotel (Rezeption, Zimmer), jegliche Nutzung ohne leichtbrennbare Stoffe [4.4]	Baumwolle / Polyester Federkernmatratze, massive Holzmöbel (z. B. Schreibtisch), einzelne Möbelstücke mit geringer Menge an Kunststoffen
Schnell	Laden	(hoch) gestapelte Holzpaletten, gefüllte Postsäcke, Kartone auf Paletten, einige Polstermöbel, Kunststoffschaum
sehr schnell	Industrielager, Fertigungshalle	(schnellbrennende) Polstermöbel, hoch gestapelte Kunststoffe, dünne Holzmöbel (z. B. Kleiderschrank), leichte Gardinen, Pool-Feuer

Tabelle 1. Brandintensitätskoeffizient (Parameter α nach VdS 2827)

Geschwindigkeit der Brandentwicklung	Brandintensitätskoeffizient α in kW/s ²
Langsam	0,0029
Mittel	0,012
Schnell	0,047
Sehr schnell	0,188

Quelle: VDI 6019 Blatt 1

Dabei gilt:

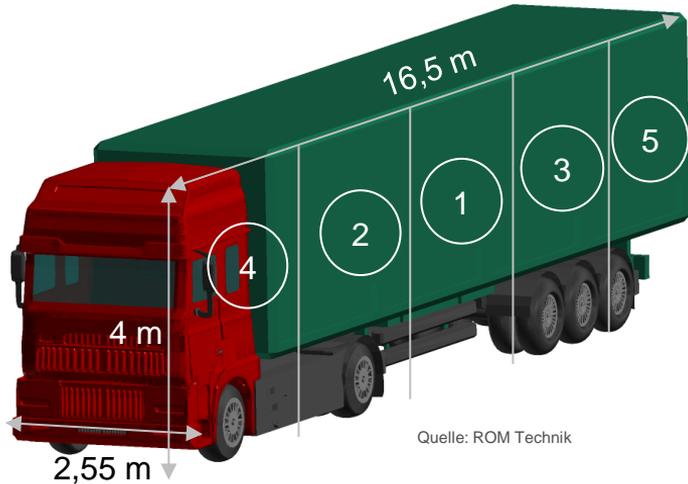
$$\alpha = \dot{q}_F \cdot v^2$$

mit:

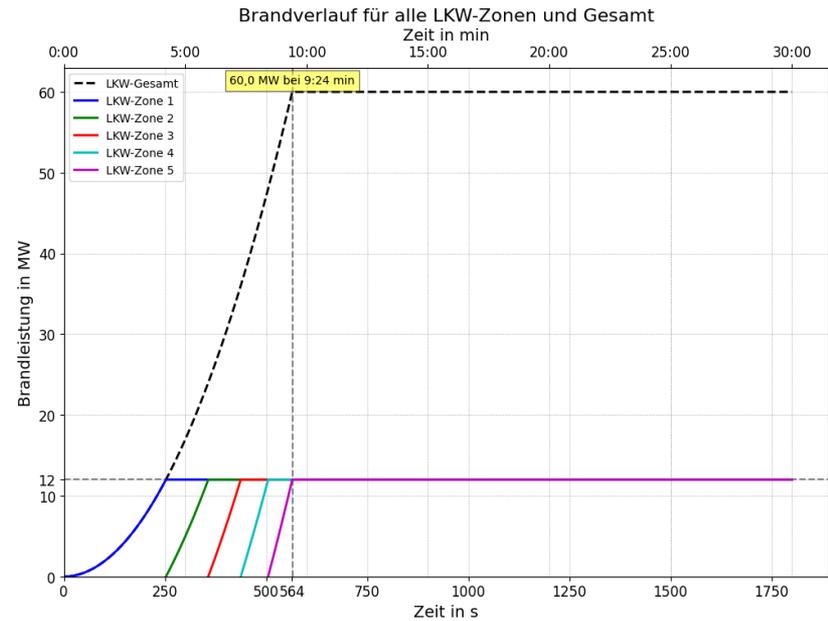
\dot{q}_F max. spez. Wärmefreisetzungsrate in kW/m²

v horizontale mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/s

Brandherdmodell LKW



- Aufteilung eines LKWs in fünf gleiche Brandherdzonen



$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad / \quad \dot{Q}_{\max} = 60 \text{ MW}$$

Parameter	Wert
Brandintensitätskoeffizient (α)	0,188 kW/s ² (sehr schnell)
Max. Wärmefreisetzung	60 MW
Max. Wärmefreisetzung – Konvektiv Anteil (70%)	42 MW
Zeit bis zur Brandmeldung	120 s

Brandherdmodell

Rauchgasfreisetzung

Der durch das Feuer freigesetzte Rauchgasmassenstrom errechnet sich gemäß:

$$\dot{m}_{Rauch} = y_{Ru\beta} \cdot \frac{\dot{Q}_{Brand}}{H_u}$$

$y_{Ru\beta}$ Yield-Faktor des Brennstoffes für Ruß
 H_u unteren Heizwert des Brennstoffes

Tabelle: Rußausbeuten und Heizwert für PVC*

$y_{Ru\beta}$	0,1	g/g
H_u	10	KJ/g

Die im Brandherd freigesetzte Masse vereint sich während der Durchströmung des Brandherdes mit der Verbrennungsluft und bildet den Rauchgasstrom.

Vergleichswert zur Bewertung der Rauchausbreitung

Optische Dichte

- Die optische Dichte pro Weglänge oder Rauchdichte D_L mit kann zum Nachweis einer raucharmen Schicht in den Rettungswegen herangezogen werden.
- Der Grenzwert für eine raucharme Schicht liegt bei $0,1\text{m}^{-1}$ (Aufenthaltsdauern bis 30 min) bzw. $0,15\text{m}^{-1}$ (Aufenthaltsdauern bis 15 min)*
- Bei Rauchdichten $< 0,1\text{m}^{-1}$ könne weiterhin „im Rahmen eines ingenieurgemäßen Nachweises in der Regel davon ausgegangen werden, dass gleichzeitig die Akzeptanzwerte für toxische Verbrennungsprodukte im Rauchgas nicht überschritten werden und auch andere Rauchgasbestandteile (insbesondere Reizgase, welche die Erkennungsweite beeinflussen) sowie die Rauchgastemperatur unbedenklich sind.“*

Vergleichswert zur Bewertung der Rauchausbreitung

Berechnung der optischen Dichte

Die optische Dichte (D_L) wird im Modell folgendermaßen ermittelt:

$$D_L = \frac{K}{\ln(10)} \cong 0,434 \cdot K$$

Der Extinktionskoeffizient (Schwächungskoeffizient) K ist dabei :

$$K = \sigma_S \cdot \frac{m_{Rauch}}{V_{Raum}} = \sigma_S \cdot c_{m,Rauch}$$

σ_S beträgt für
Mischbrandlasten
8,7 m²/g ⁽¹⁾

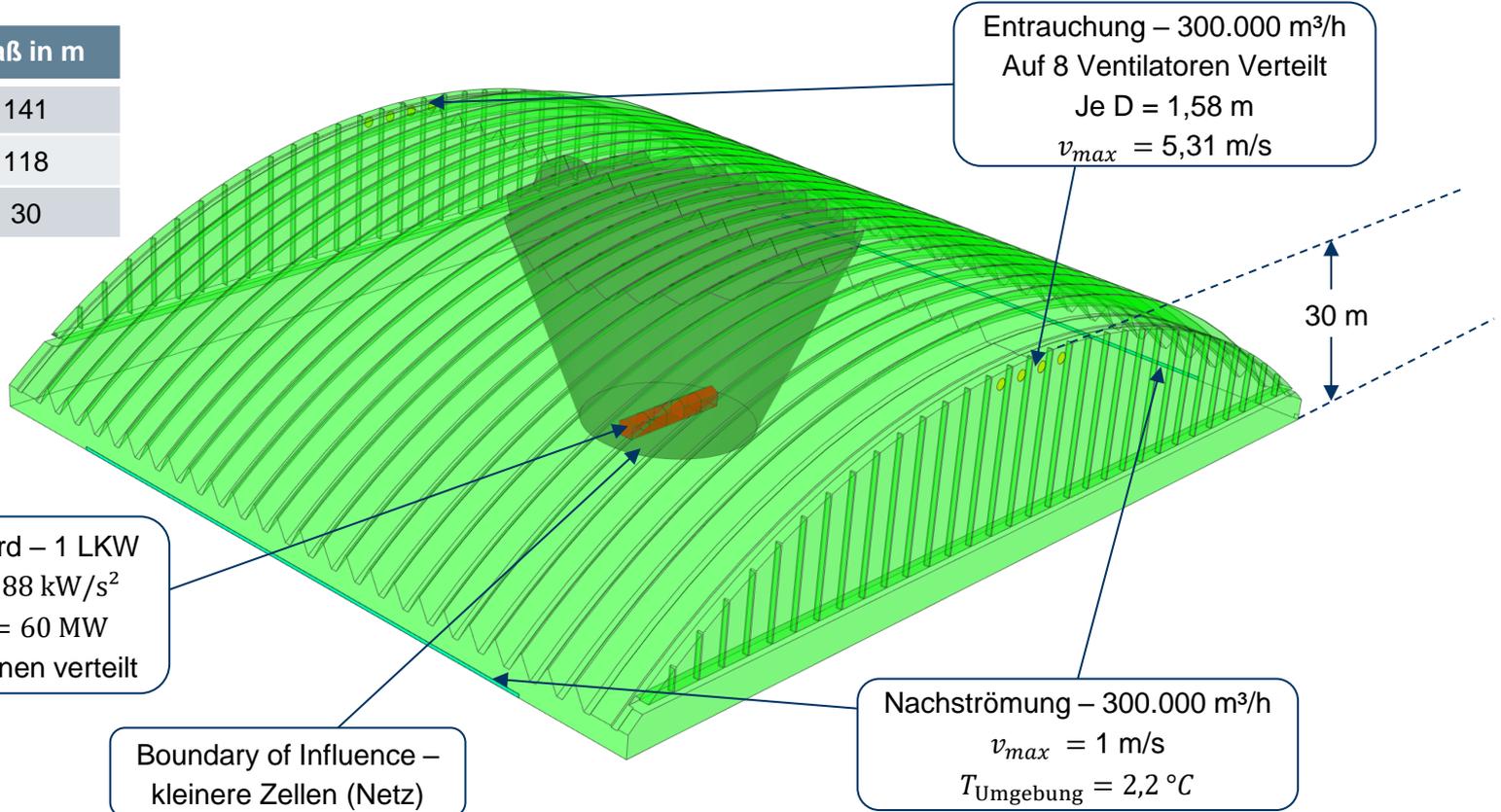
mit:

D_L optische Dichte pro Weglänge in m^{-1}
 σ_S spezifischer Extinktionskoeffizient in m^2/g
 V_{Raum} Raumvolumen in m^3

K Extinktionskoeffizient in m^{-1}
 m_{Rauch} Rauchpartikelmasse im Raum in g
 $c_{m,Rauch}$ Massenkonzentration des Rauches in der Luft in g/m^3

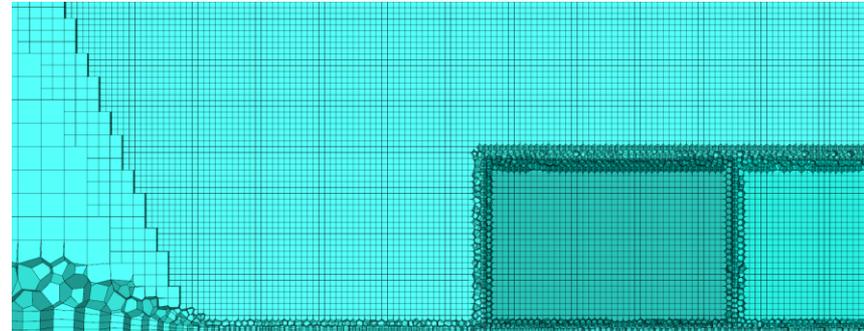
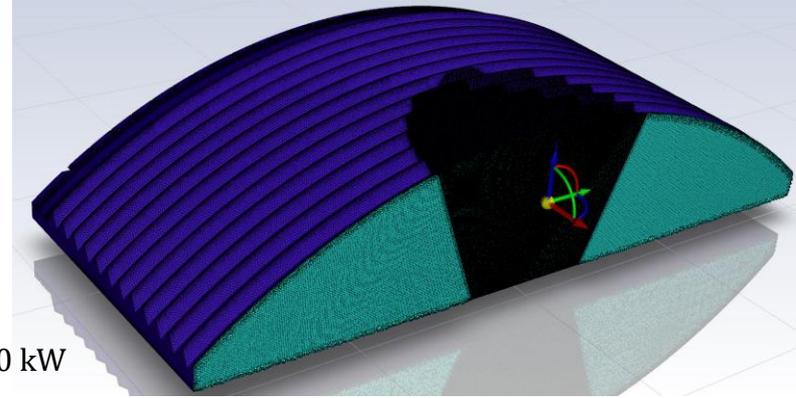
CFD-Modell und Randbedingungen

Höhe	Maß in m
Länge	141
Breite	118
Höhe	30

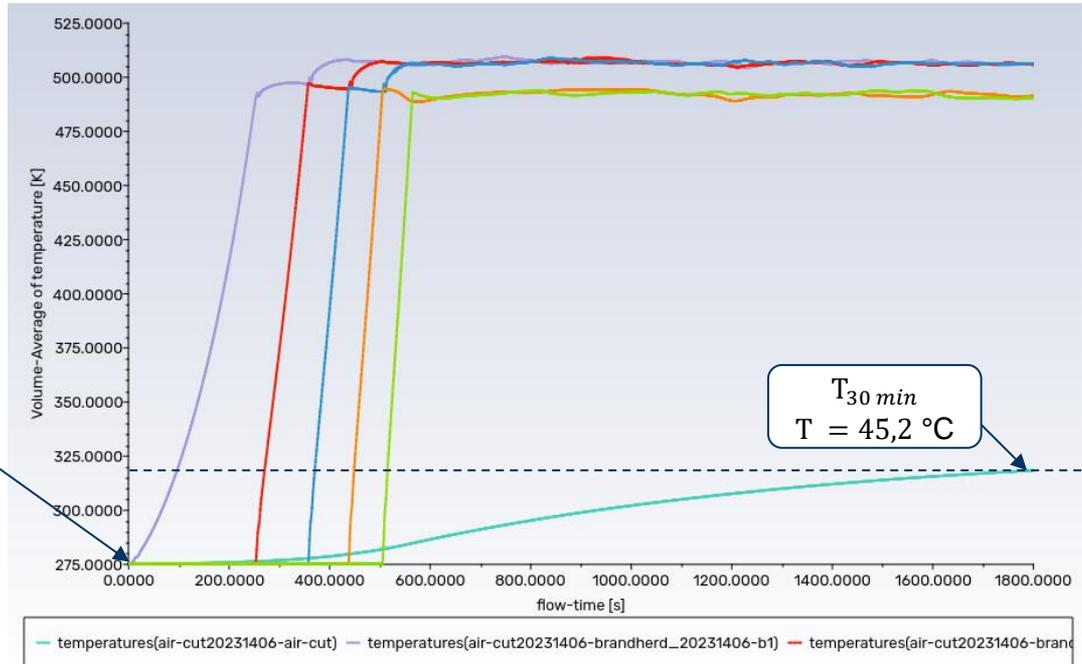


Numerische Berechnungsverfahren

- Verwendete CFD-Software: Ansys Fluent 2023 R1
- Fluideigenschaften: Luft (inkompressibles, ideales Gas)
- Temperatur der Fortluft: 2,2 °C
- Temperatur der Wand-, Boden- und Deckenflächen: isotherm 2,2 °C,
- Raumtemperatur bei Simulationsbeginn: 2,2 °C
- Modellierung der Brand laut VDI 6019, $\alpha = 0,188 \text{ kW/s}^2$, $\dot{Q}_{\text{max}} = 60.000 \text{ kW}$
- Solver: Pressure-Based
- Turbulenzmodell: k- ω -SST (Shared Stress Transport)
- Berechnungsnetz mit ca. 82,1 Mio. polyeder- und hexaederförmigen Volumenzellen (Poly-Hexcore, erfüllt die Qualitätsanforderungen von VDI 6019-2, Abschnitt 10.3.3)
- Kleinste Zellweite 0,01 m, größte Zellweite 0,5 m

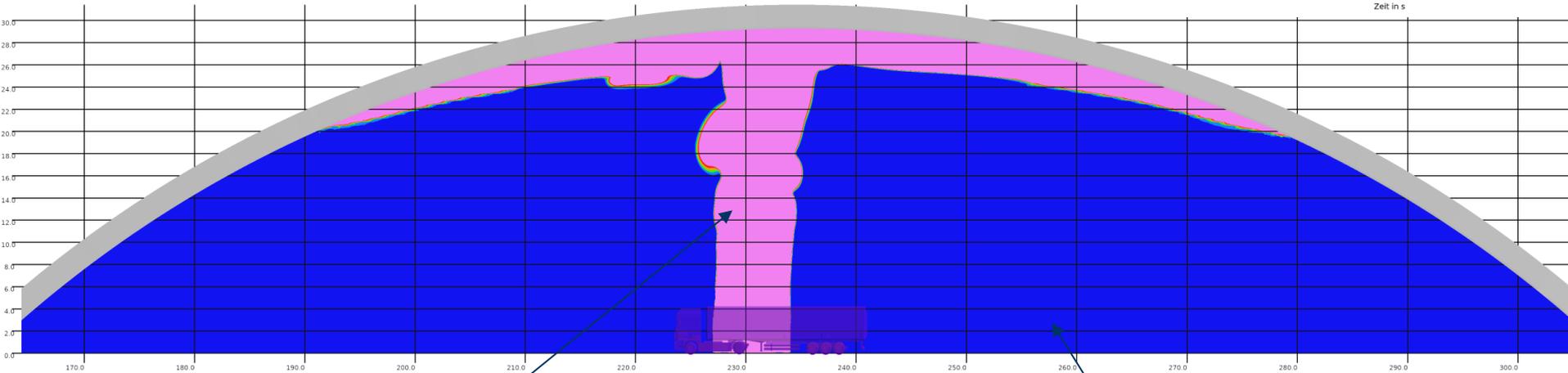
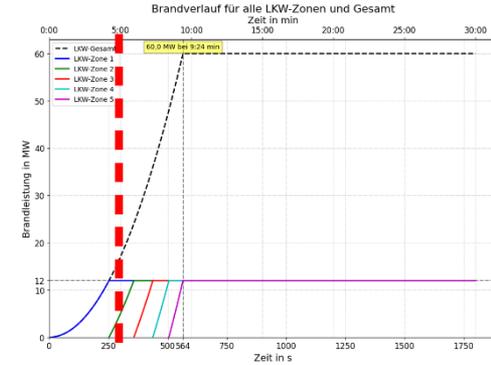


Simulationsergebnisse – Mittlere Temperatur (ganz Volumen) vs Simulationszeit

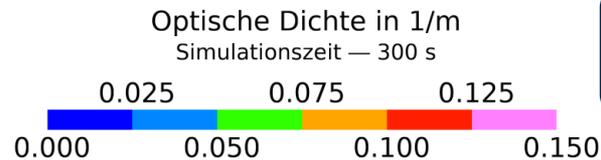


Simulationsergebnisse – Optische Dichte X-Schnitt bei Brandherd

Simulationszeit $t = 5$ min



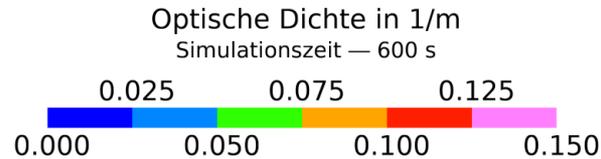
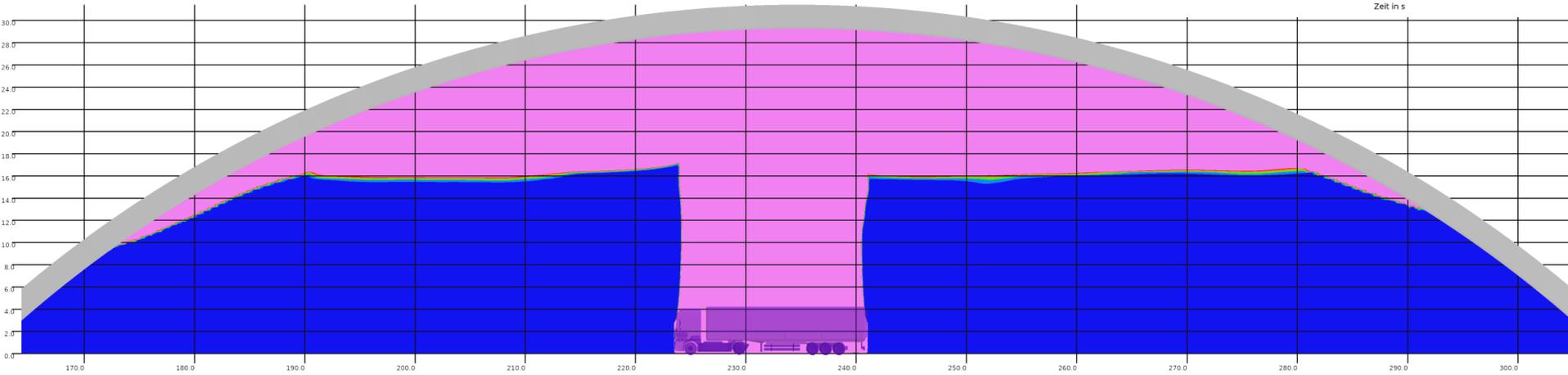
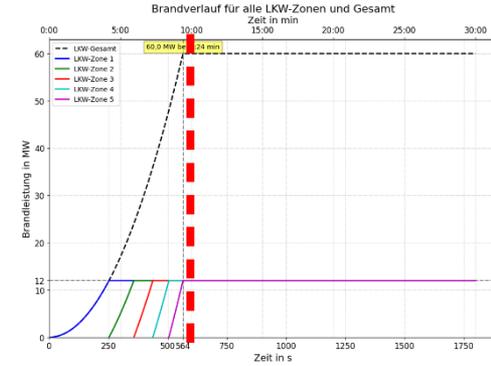
Rote und rosa Zonen zeigen Bereiche an, in denen die optische Dichte größer als $0,1 \text{ m}^{-1}$ ist, was meint dass die akzeptanzwerte für toxische Verbrennungsprodukte im Rauchgas überschritten sind.



Nach 5 Minuten: Fluchtwege am Ende der Selbstrettungsphase (bei 2,5 m Höhe) noch rauchfrei, um eine Flucht zu ermöglichen.

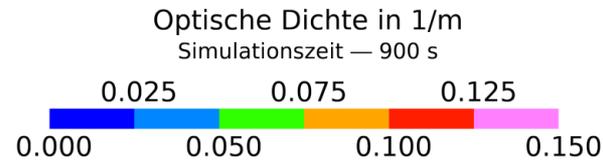
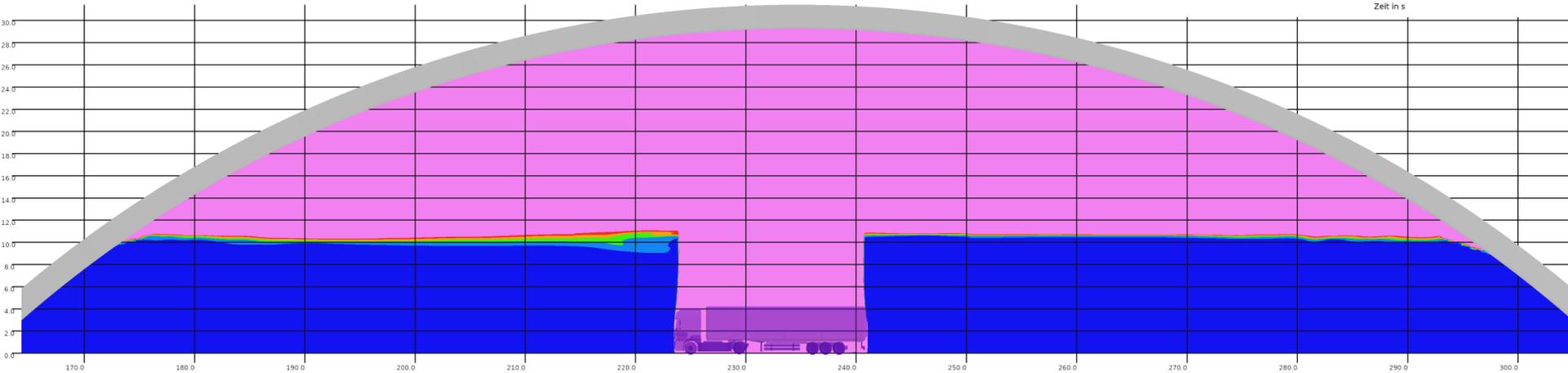
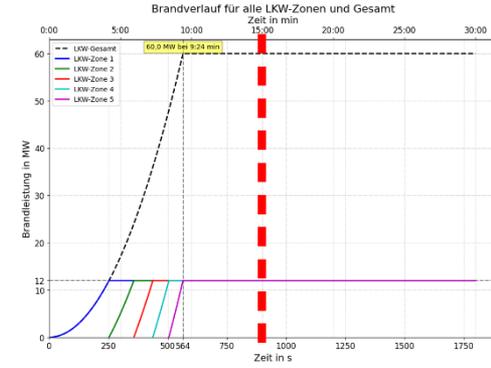
Simulationsergebnisse – Optische Dichte X-Schnitt bei Brandherd

Simulationszeit $t = 10$ min



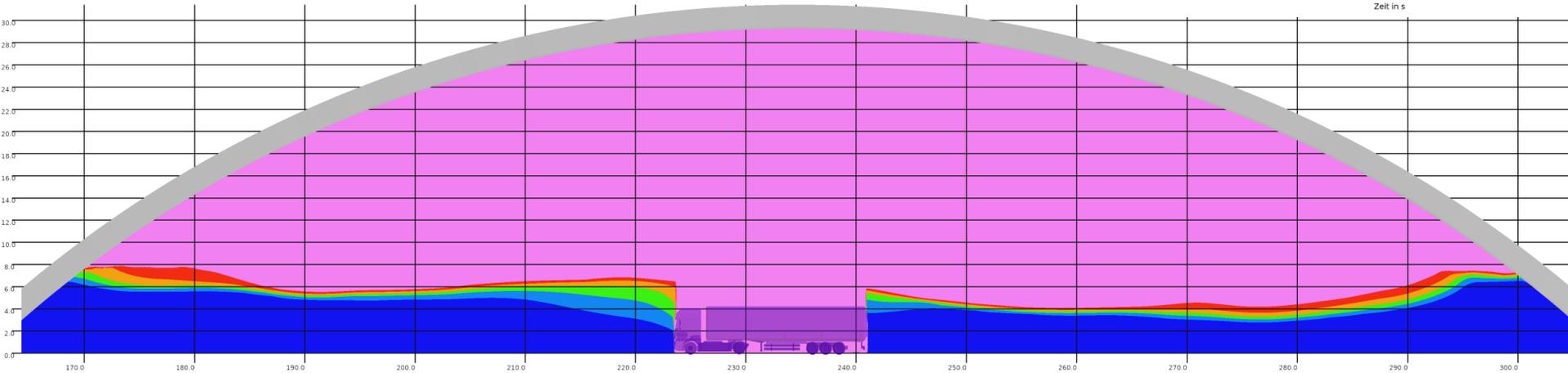
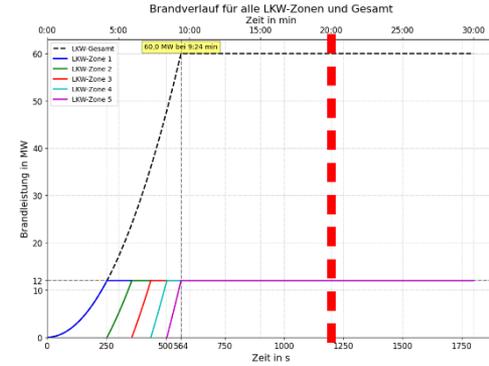
Simulationsergebnisse – Optische Dichte X-Schnitt bei Brandherd

Simulationszeit $t = 15$ min



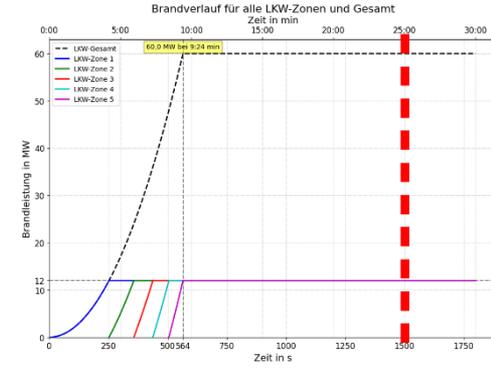
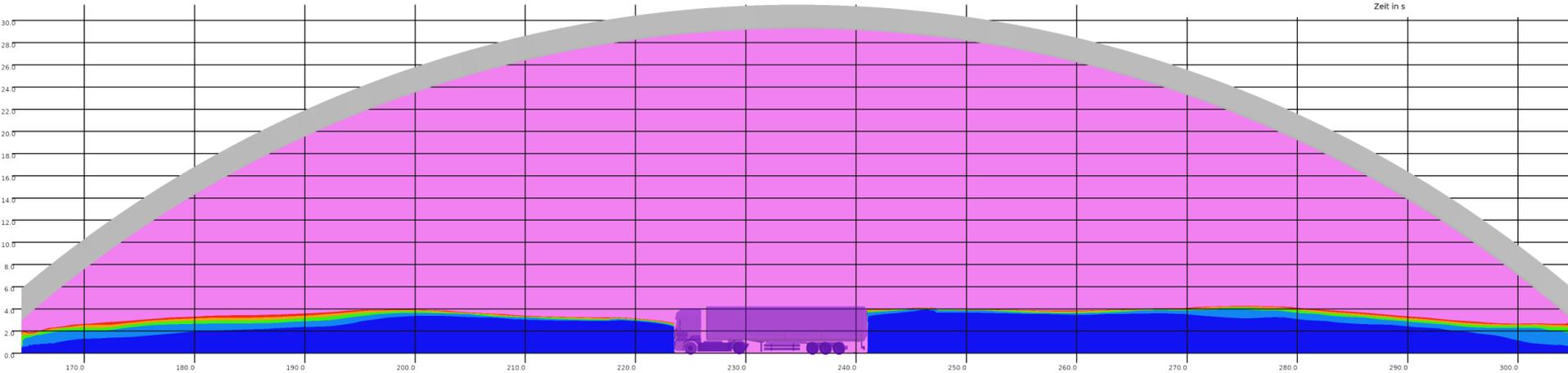
Simulationsergebnisse – Optische Dichte X-Schnitt bei Brandherd

Simulationszeit $t = 20$ min



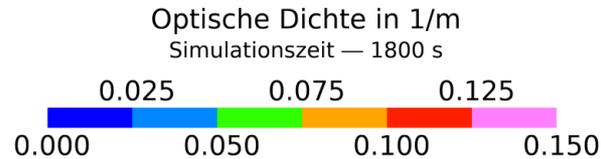
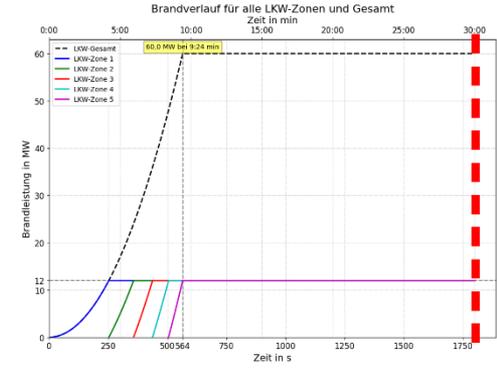
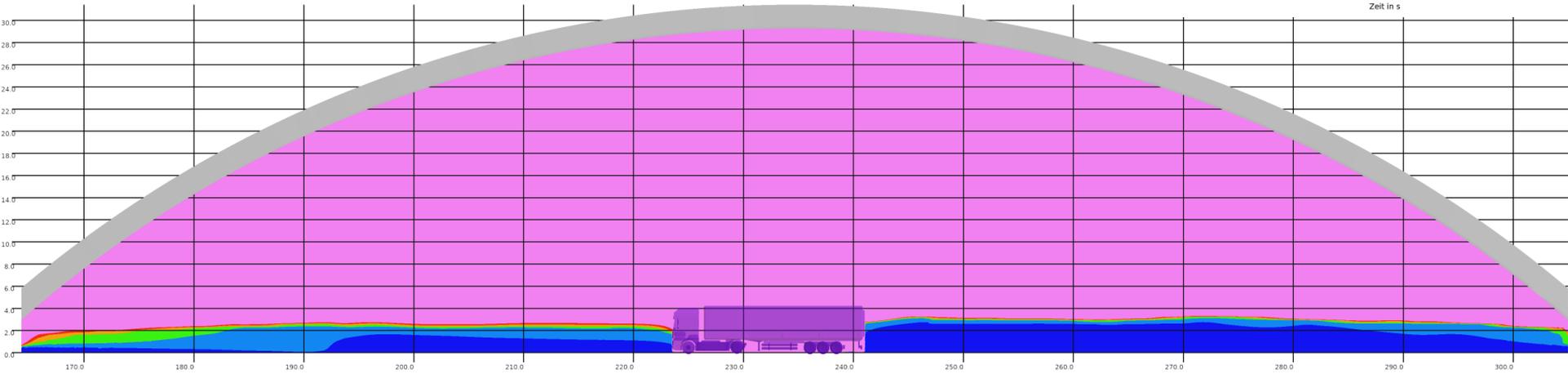
Simulationsergebnisse – Optische Dichte X-Schnitt bei Brandherd

Simulationszeit $t = 25$ min



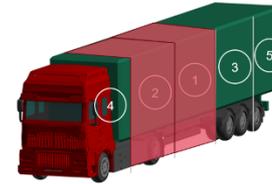
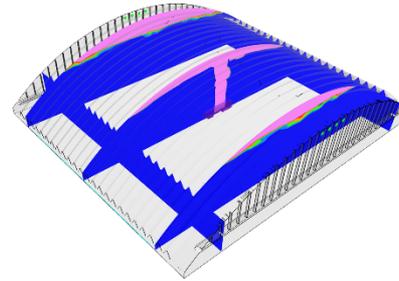
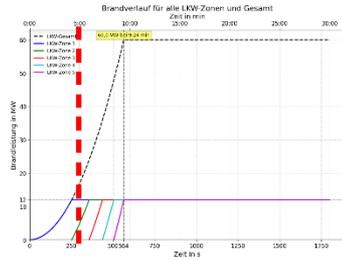
Simulationsergebnisse – Optische Dichte X-Schnitt bei Brandherd

Simulationszeit $t = 30$ min

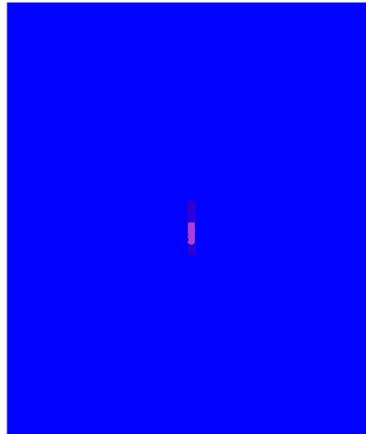


Simulationsergebnisse – Optische Dichte Z-Schnitte

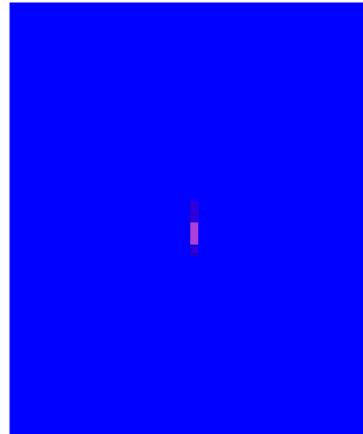
Simulationszeit $t = 5$ min



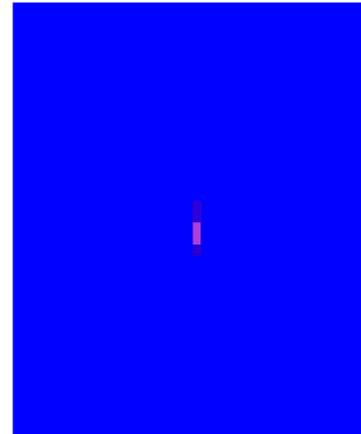
Z-Schnitt — 2,5 m



Z-Schnitt — 2,0 m

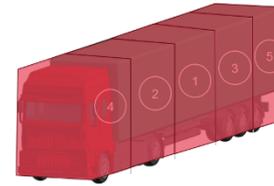
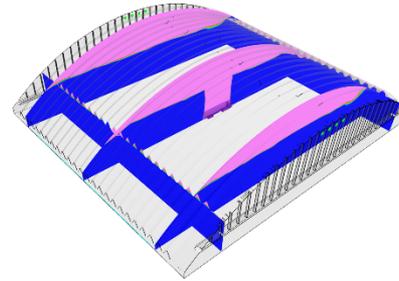
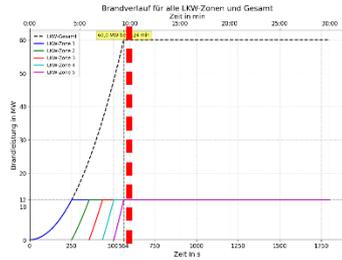


Z-Schnitt — 1,8 m

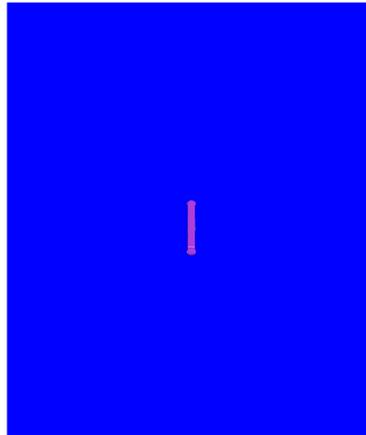


Simulationsergebnisse – Optische Dichte Z-Schnitte

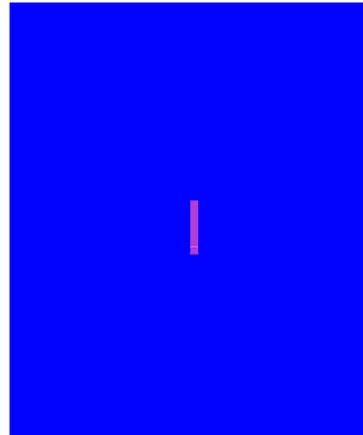
Simulationszeit $t = 10$ min



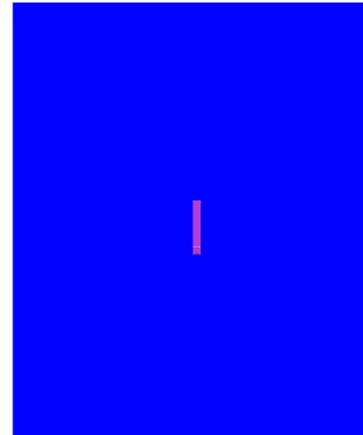
Z-Schnitt — 2,5 m



Z-Schnitt — 2,0 m

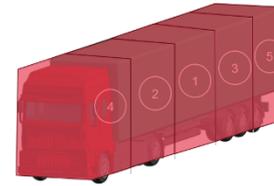
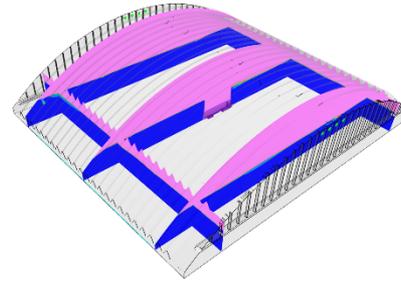
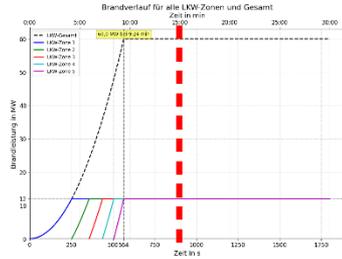


Z-Schnitt — 1,8 m

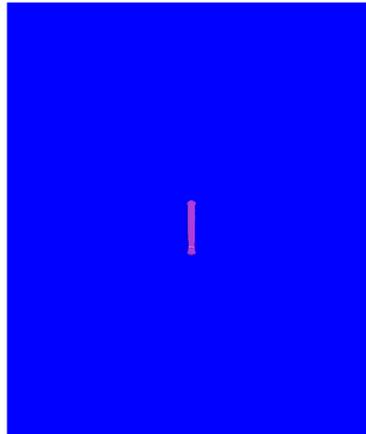


Simulationsergebnisse – Optische Dichte Z-Schnitte

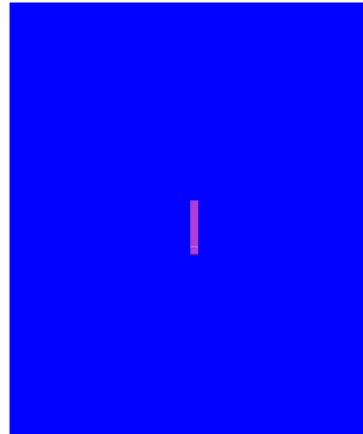
Simulationszeit $t = 15$ min



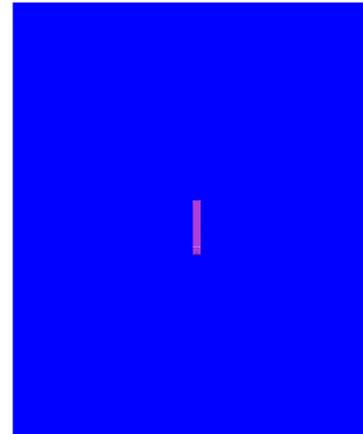
Z-Schnitt — 2,5 m



Z-Schnitt — 2,0 m

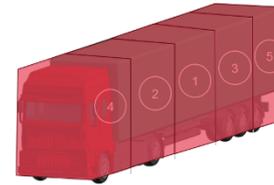
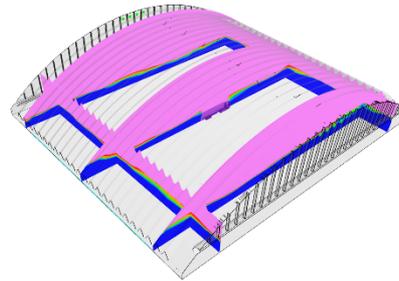
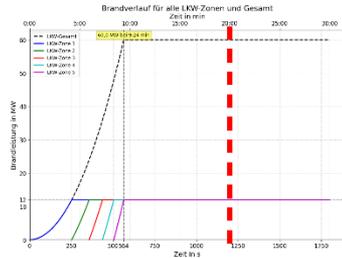


Z-Schnitt — 1,8 m

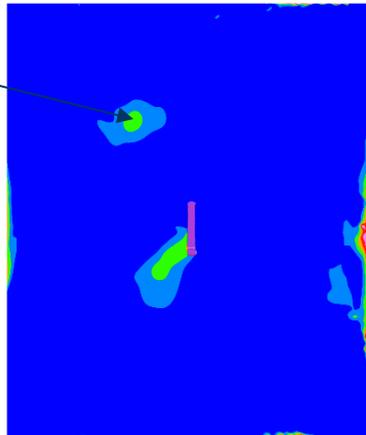


Simulationsergebnisse – Optische Dichte Z-Schnitte

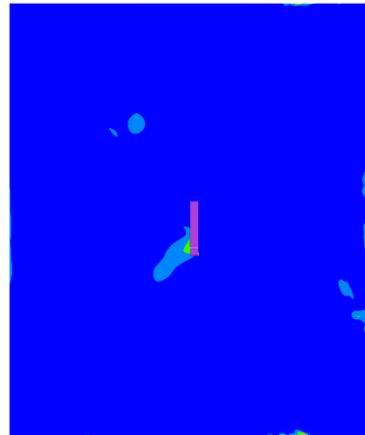
Simulationszeit $t = 20$ min



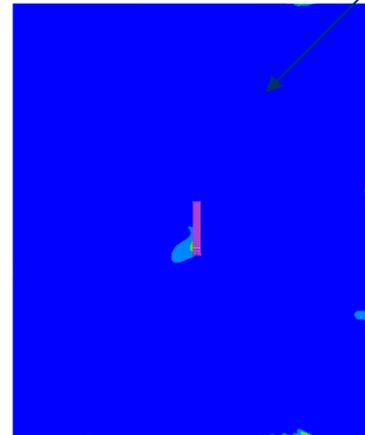
Z-Schnitt — 2,5 m



Z-Schnitt — 2,0 m



Z-Schnitt — 1,8 m

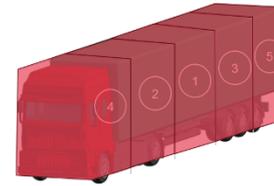
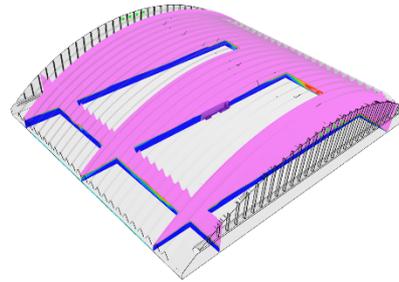
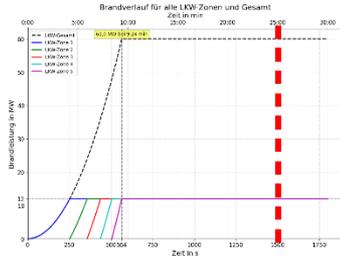


Nach 20 Minuten: Die Schichtgrenze der raucharmen Schicht hat teilweise die Höhe von 2,5 m erreicht.

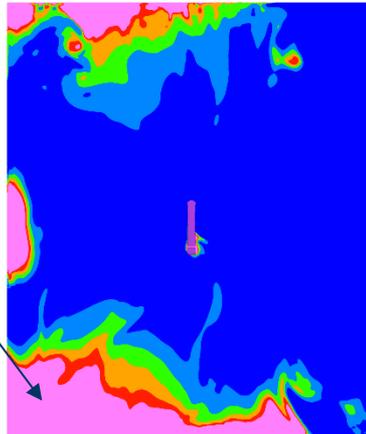
Nach 20 Minuten: Die Fluchtwege sind noch rauchfrei (bei 1,8 m Höhe), sodass die Feuerwehrlöscharbeiten beginnen könnten.

Simulationsergebnisse – Optische Dichte Z-Schnitte

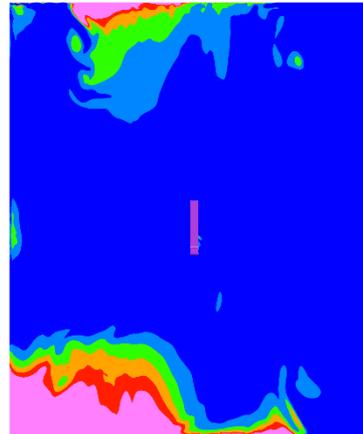
Simulationszeit $t = 25$ min



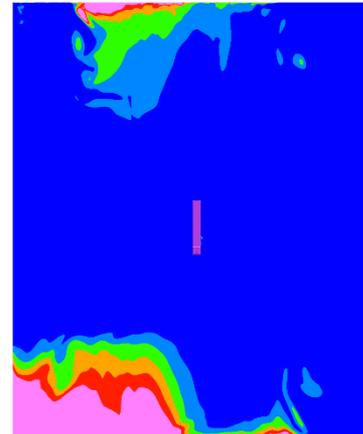
Z-Schnitt — 2,5 m



Z-Schnitt — 2,0 m



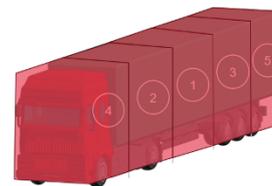
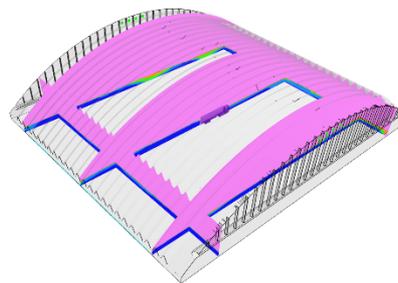
Z-Schnitt — 1,8 m



Nach 25 Minuten:
Noch dichterere Rauch
erreicht den 2,5 m
Schnitt.

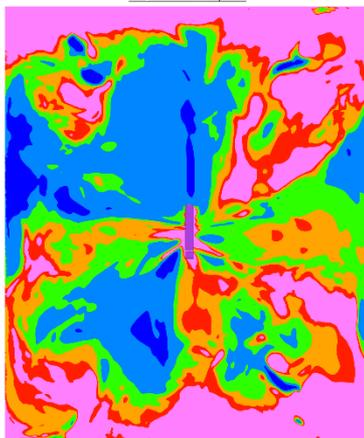
Simulationsergebnisse – Optische Dichte Z-Schnitte

Simulationszeit $t = 30$ min

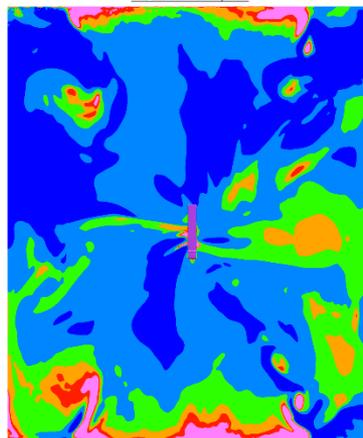


Nach 30 Minuten: Die Optische Dichte beträgt im gesamten begehbaren Bereich weniger als $0,1 \text{ m}^{-1}$, sodass die Feuerwehr noch mit den Löscharbeiten beginnen könnte.

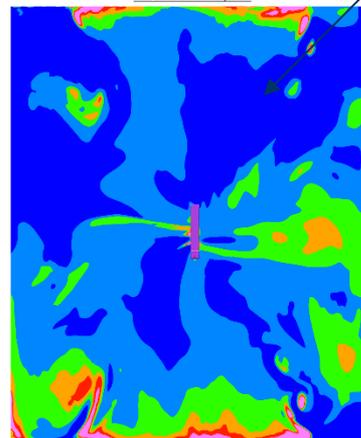
Z-Schnitt — 2,5 m



Z-Schnitt — 2,0 m

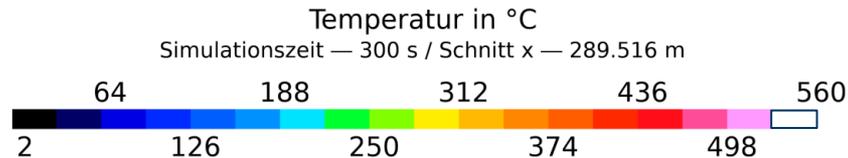
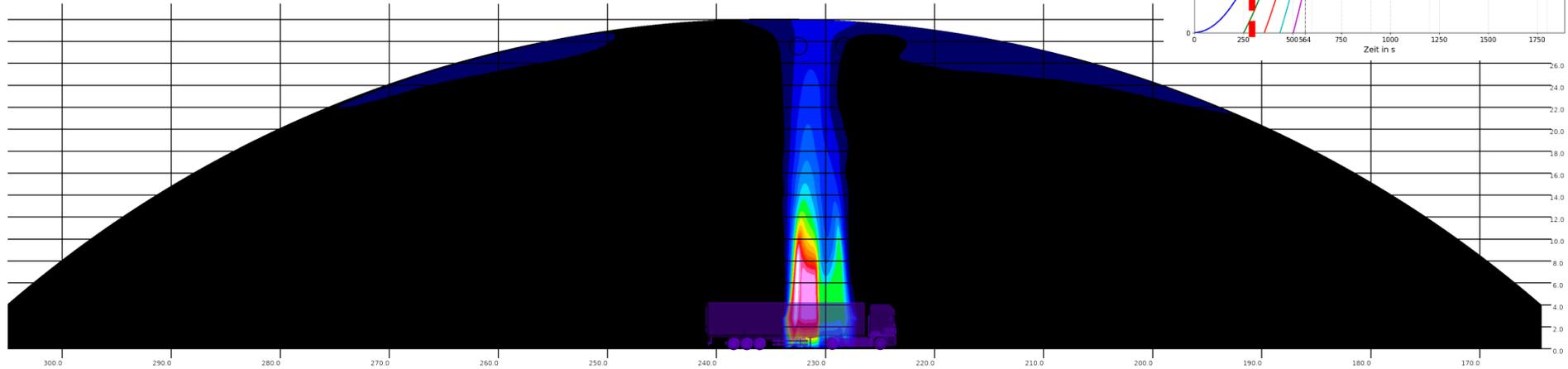


Z-Schnitt — 1,8 m



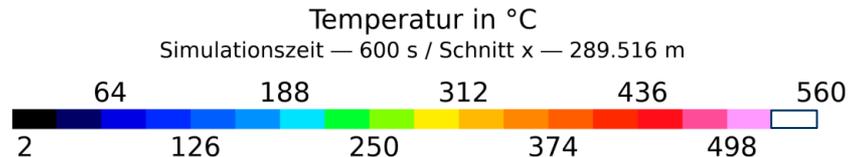
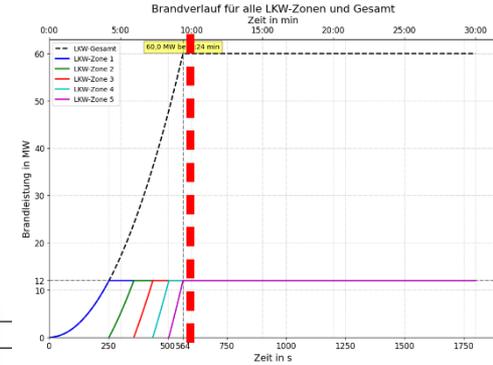
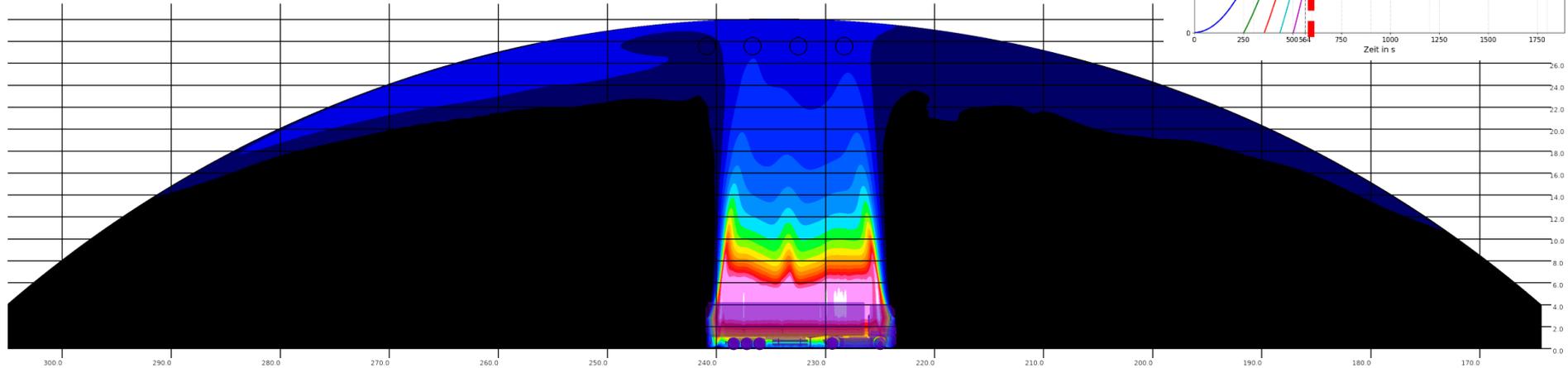
Simulationsergebnisse – Temperatur

Simulationszeit $t = 5$ min



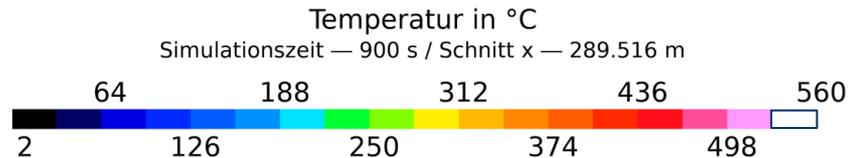
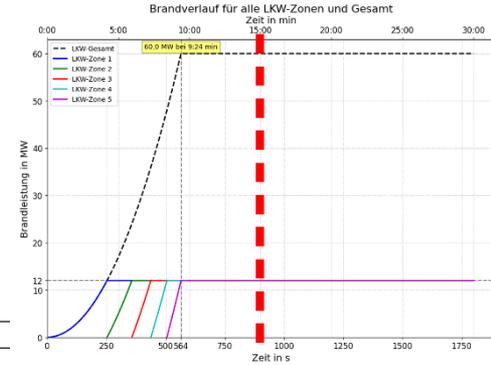
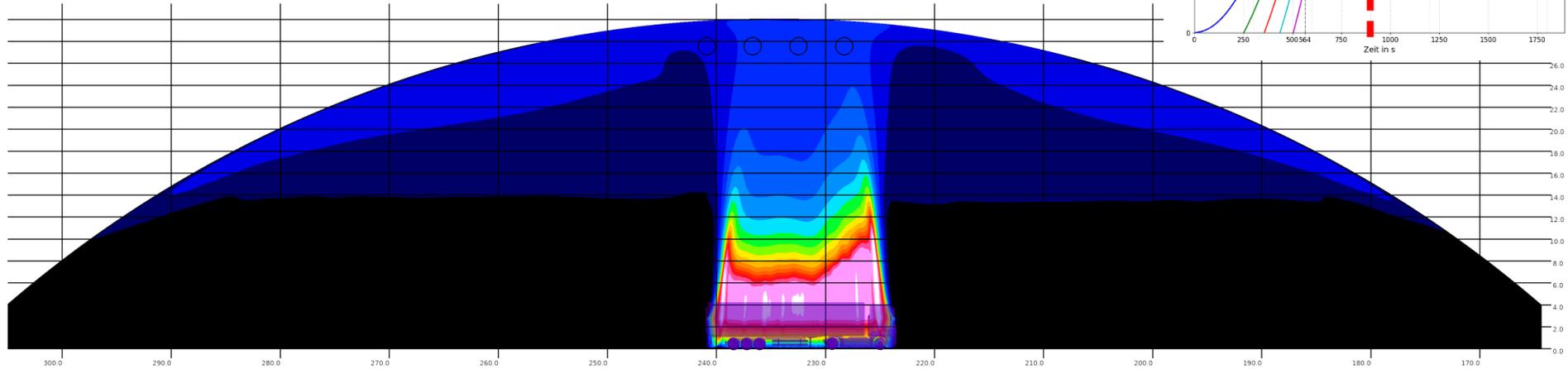
Simulationsergebnisse – Temperatur

Simulationszeit $t = 10$ min



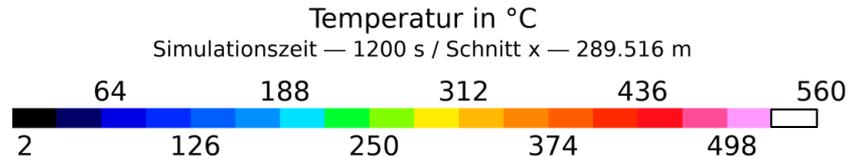
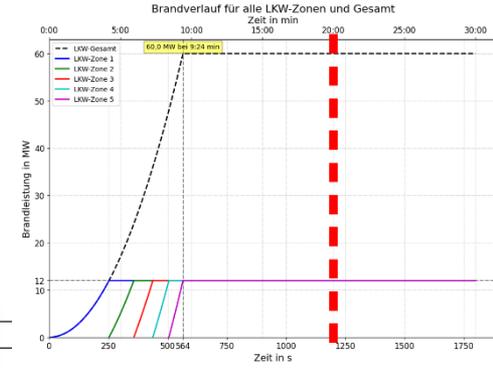
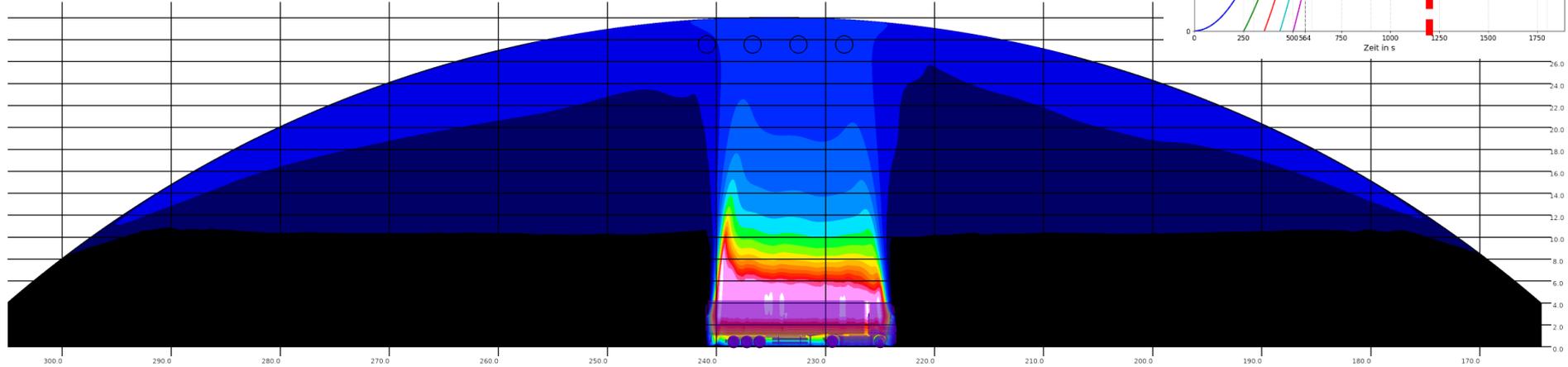
Simulationsergebnisse – Temperatur

Simulationszeit $t = 15$ min



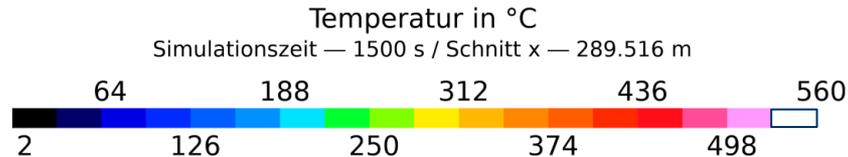
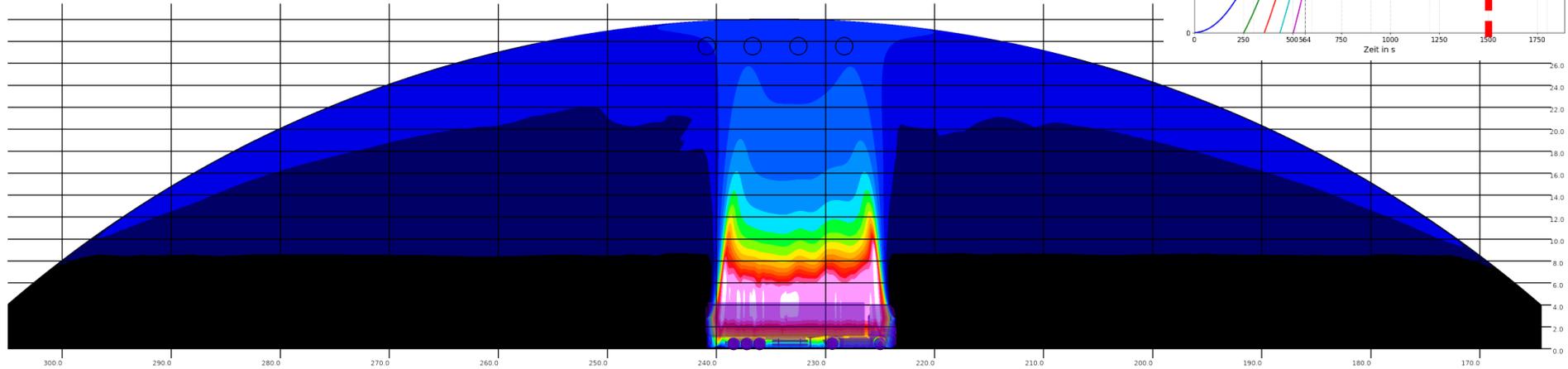
Simulationsergebnisse – Temperatur

Simulationszeit $t = 20$ min



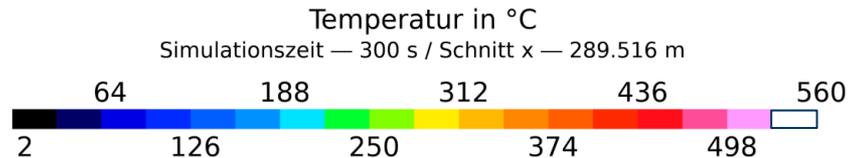
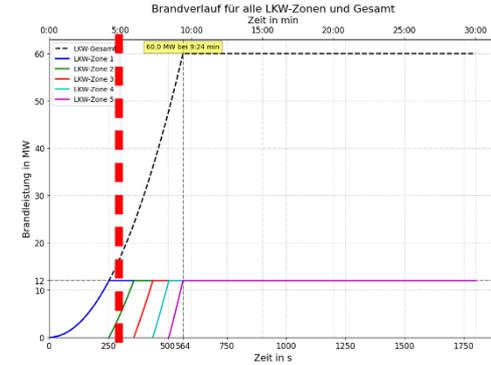
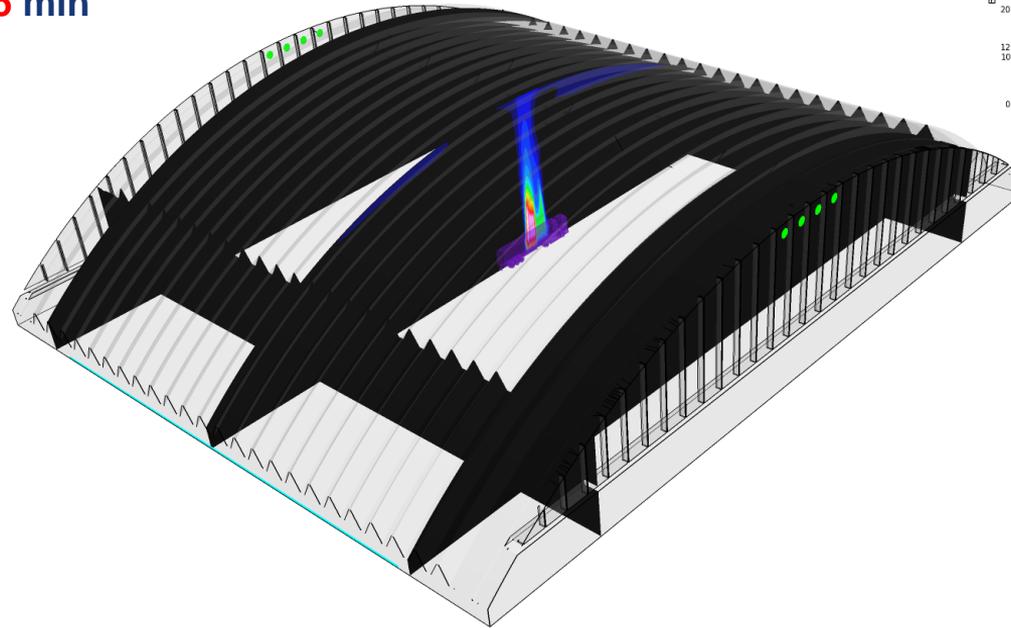
Simulationsergebnisse – Temperatur

Simulationszeit $t = 25$ min



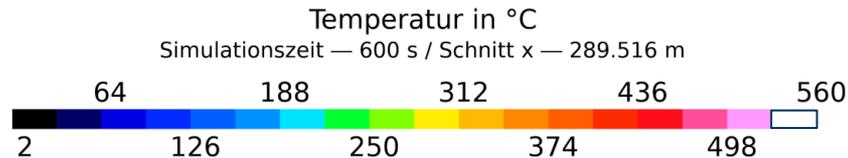
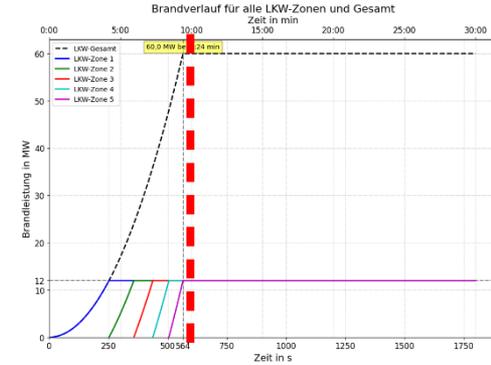
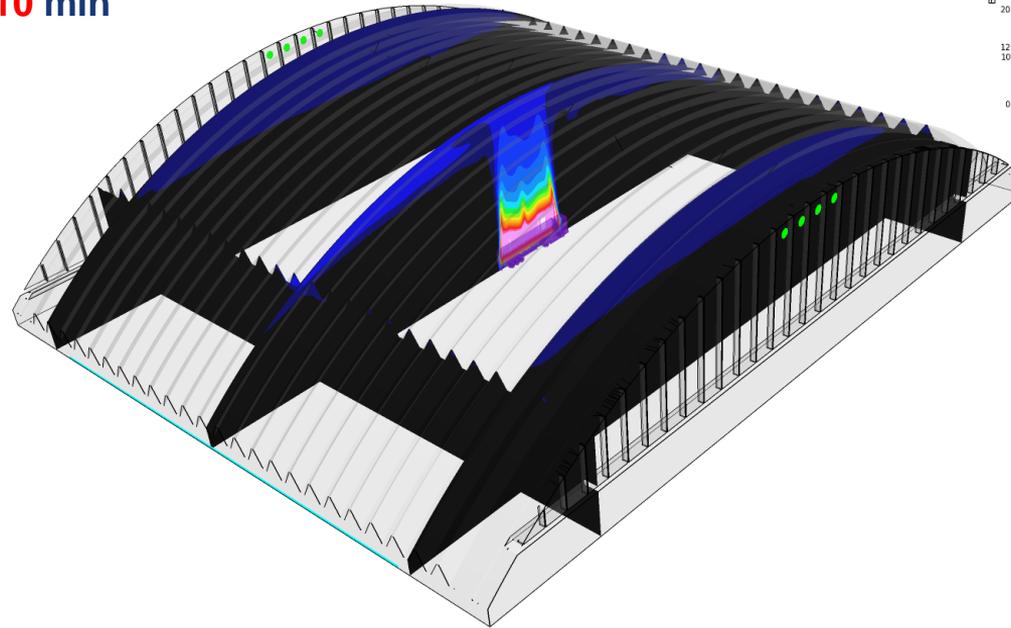
Isometrische Ansicht – Temperatur

Simulationszeit $t = 5$ min



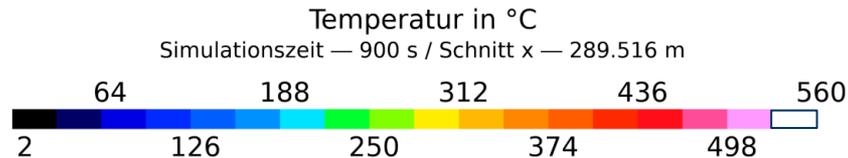
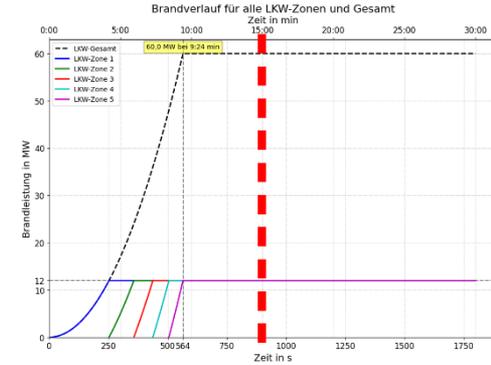
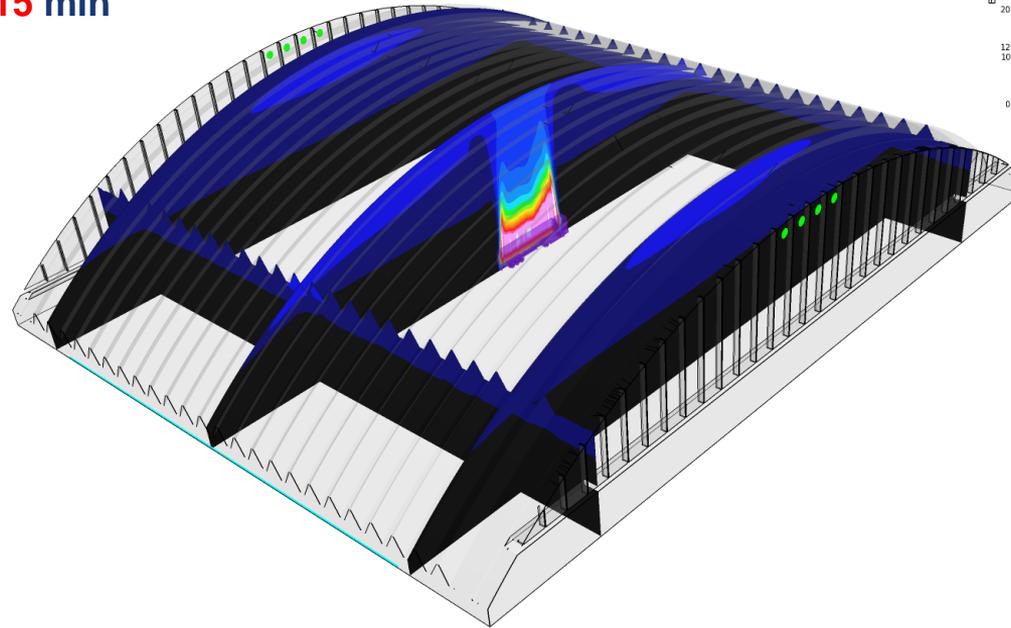
Isometrische Ansicht – Temperatur

Simulationszeit $t = 10$ min



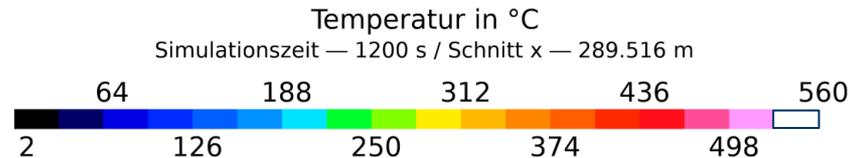
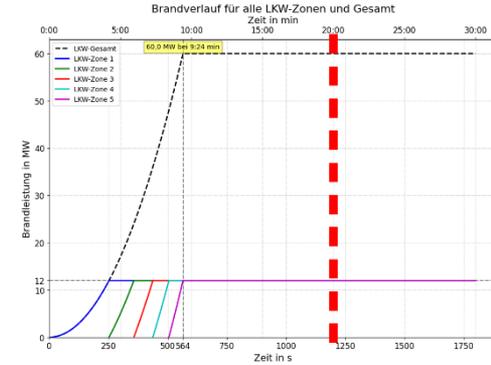
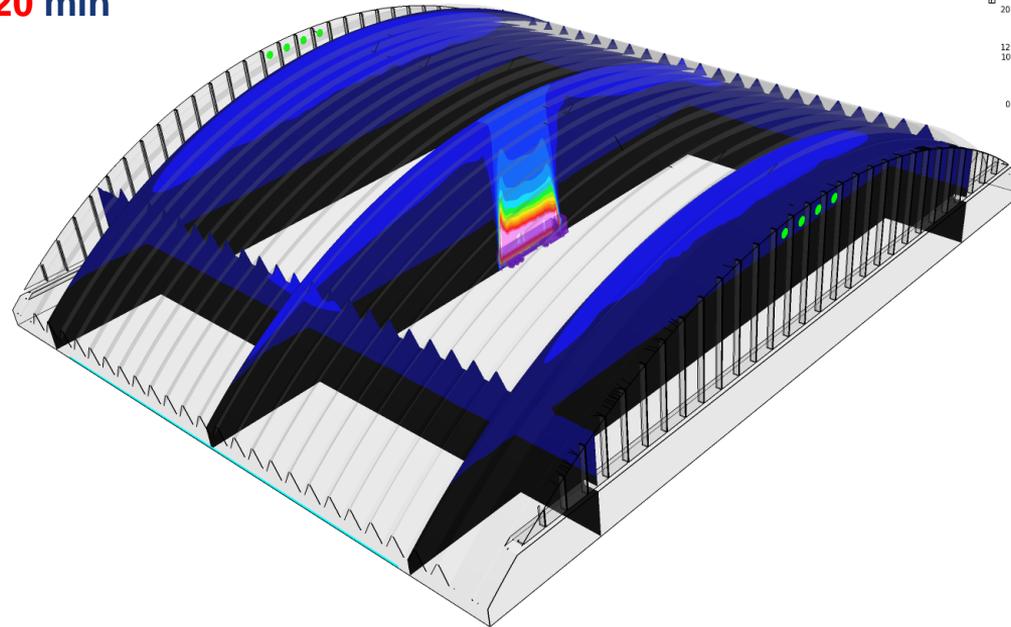
Isometrische Ansicht – Temperatur

Simulationszeit $t = 15$ min



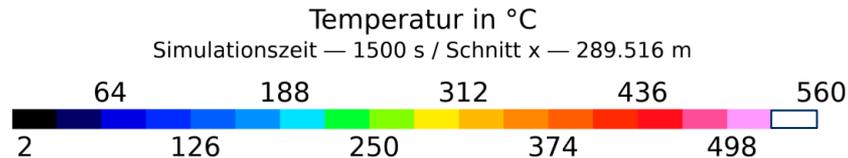
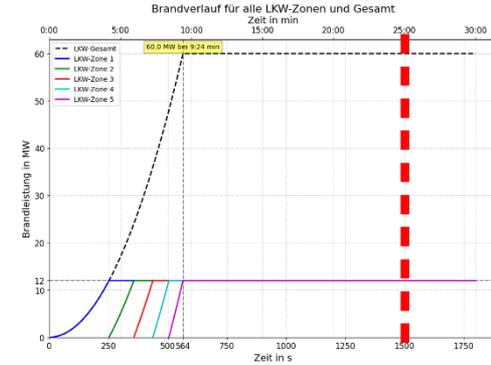
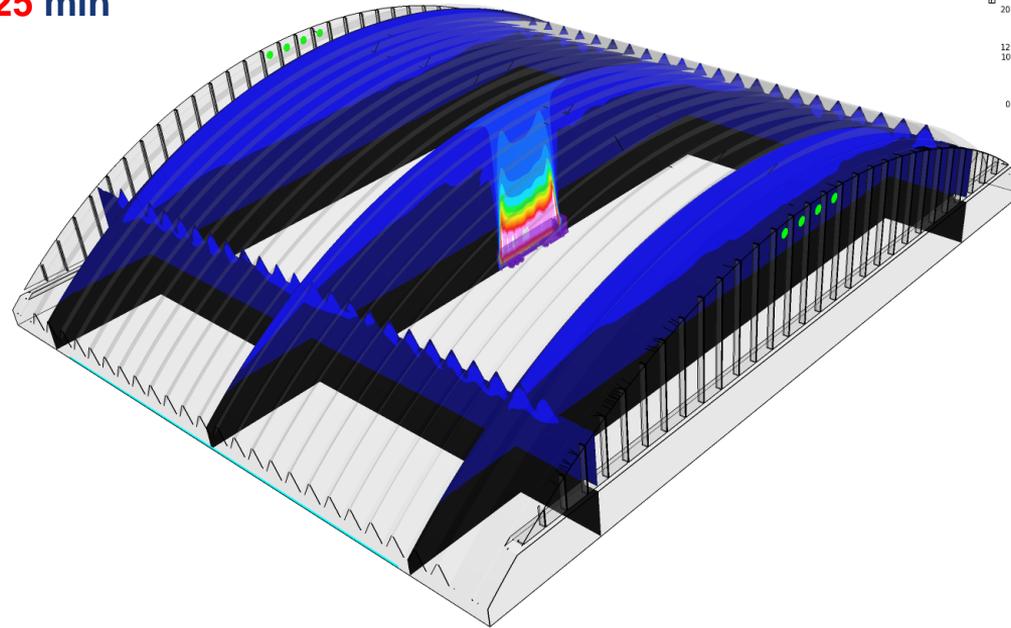
Isometrische Ansicht – Temperatur

Simulationszeit $t = 20$ min



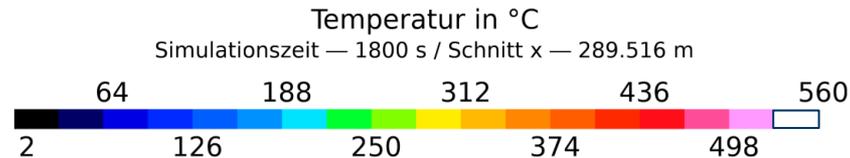
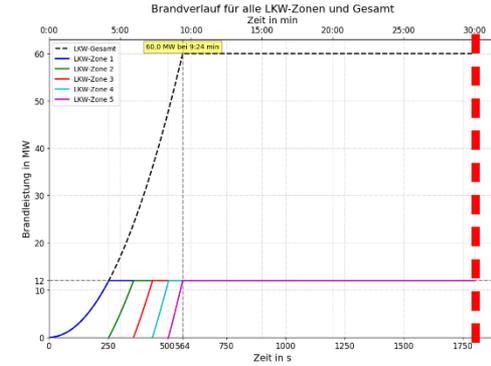
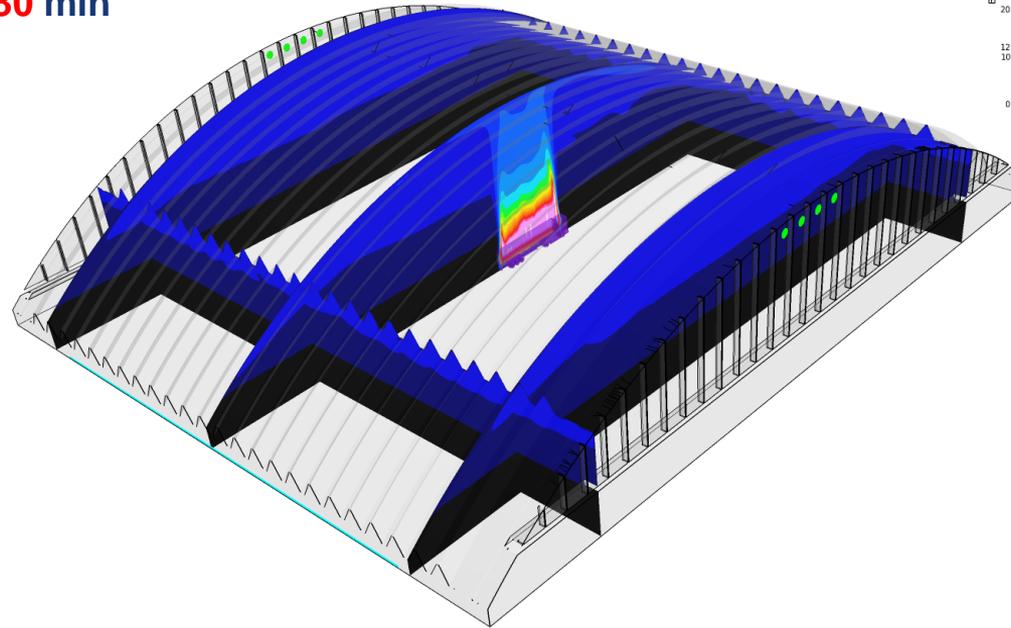
Isometrische Ansicht – Temperatur

Simulationszeit $t = 25$ min



Isometrische Ansicht – Temperatur

Simulationszeit $t = 30$ min



Fazit

- Die Simulation zeigt, dass die Halle beim untersuchten extremen Brandszenario eines schnellen LKW-Brandes mit 60 MW Wärmefreisetzung in einer Höhe bis 2,5 Meter bis 20 Minuten nach Brandbeginn rauchfrei bleibt. Danach beginnt die untere Rauchschiicht, diese Höhe teilweise zu unterschreiten. Die ermittelte 5-minütige Evakuierung einer voll belegten Veranstaltung in der Halle mit 8000 Personen bleibt von Rauch unbeeinträchtigt.
- In der Höhe von 1,8 Metern bleibt die optische Dichte selbst nach 30 Minuten des Brandverlaufs unter $0,1 \text{ m}^{-1}$. Das bedeutet, dass die Feuerwehr ihre Löscharbeiten mit Sicht auf den Brand noch 30 Minuten nach Brandbeginn sicher beginnen kann.

© Copyright: Rud. Otto Meyer Technik GmbH & Co. KG

Inhalt und Struktur der Präsentation sind urheberrechtlich geschützt. Die Vervielfältigung sämtlicher Inhalte und Strukturelemente, insbesondere Texte, Textteile, Bildmaterial, Logos, Grafiken und Designelemente, soweit sie schutzfähig im Sinne des deutschen Urheberrechts sind, zu anderem als zum privaten oder sonstigen eigenen Gebrauch sowie deren Verbreitung und Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung der Rud. Otto Meyer Technik GmbH & Co. KG