



Fachhochschule hochschule 21

Fachbereich Bauwesen

Bachelorarbeit

Untersuchung der Wirksamkeit von Rauch- und
Wärmeabzugsanlagen in Sonderbauten

Autor: Michelle Bach
Im Wiesengrund 3
27404 Zeven

Matrikelnr.: 201657

Telefon: +49 155 61 89 01 10

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. (FH) Jan Wendelken

Abgabedatum: 15.04.2026

Eigenständigkeitserklärung

Studienleistungen, Prüfungsleistungen und Bachelorarbeiten an der hochschule 21

Name: Bach
Vorname: Michelle
Matrikelnummer: 201657
Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen Bau und Immobilien DUAL
Titel der Arbeit: Untersuchung der Wirksamkeit von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen in Sonderbauten

1. Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässige Hilfe angefertigt habe. Ich habe keine anderen als die im Quellenverzeichnis angegebenen Hilfsmittel insbesondere keine nicht genannten Anwendungen von Künstlicher Intelligenz (KI) oder Internetquellen genutzt. Die Arbeit wurde zuvor in gleicher oder ähnlicher Form bei keinem anderen Prüfungsverfahren eingereicht. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen übernommen wurden, sind als solche nach den betreffenden Regularien des Fachbereichs oder in Absprache mit den Prüfenden kenntlich gemacht.

2. Erläuterungen zur Nutzung von KI-Anwendungen

Ich versichere, dass ich generative KI-Anwendungen ausschließlich im Rahmen der mit den prüfenden Personen getroffenen Vereinbarungen eingesetzt habe. Sämtliche mithilfe von KI erzeugten Textpassagen sind entsprechend gekennzeichnet. Die verwendeten Anwendungen sind im Hilfsmittelverzeichnis systematisch nach den Vorgaben der hochschule 21 dokumentiert.

Der eigene, schöpferische und inhaltlich-gestaltende Anteil meiner Arbeit überwiegt deutlich. Mir ist bewusst, dass der Einsatz maschinell generierter Inhalte keine Gewähr für deren Richtigkeit oder Qualität bietet. Ich übernehme die volle Verantwortung für sämtliche Inhalte.

Für folgende Bereiche wurden KI-Anwendungen verwendet:

- Keine** Nutzung von KI-Anwendungen
- Für die Ideenfindung: Software benennen
- Bei der Gliederungserstellung: Software benennen
- Zur Entwicklung oder Anpassung von Software-/Programm-Code: Überprüfung Eingabedatei FDS durch Gemini
- Für Korrekturen oder Optimierungen: Gemini, ChatGPT
- Sonstiges, nämlich: Einsatzgebiet und Software benennen

Ich versichere, alle Nutzungen vollständig angegeben zu haben und bin bereit, meine Arbeitsweise auf Nachfrage offen zu legen. Mir ist bewusst, dass fehlerhafte oder fehlende Angaben prüfungsrechtliche Sanktionen bis hin zur Exmatrikulation (z. B. bei wiederholter Täuschung) nach sich ziehen können.

3. Schluss/Unterschrift

Ort, Datum: _____

Unterschrift Studierende/Unterschrift Studierender: _____

Wichtige Hinweise:

- Die Eigenständigkeitserklärung muss handschriftlich unterschrieben werden, digitale Unterschriften sind ausgeschlossen. Bei mehrfachen Abgaben (Bachelorarbeiten) sind alle Exemplare im Original zu unterschreiben.
- Die Eigenständigkeitserklärung ist der betreffenden Studienleistung, Prüfungsleistung oder Bachelorarbeit hinter dem Deckblatt im Original beizufügen. Eine fehlende oder unvollständige Eigenständigkeitserklärung sorgt für eine nicht bewertbare Studienleistung, Prüfungsleistung oder Bachelorarbeit.

Abstrakt

Die maßgebliche Gefährdung im Brandfall resultiert weniger aus der thermischen Einwirkung der Flammen, sondern vielmehr aus der rasanten Ausbreitung toxischer Gase.

Eine funktionssichere Dimensionierung von Rauch- und Wärmeabzügen (RWA) ist daher essenziell, stellt Fachplaner jedoch aufgrund einer Vielzahl etablierter Nachweis- und Bemessungsverfahren vor komplexe Abwägungen zwischen Funktionssicherheit, Wirtschaftlichkeit und normativer Konformität. Die Wahl des optimalen Nachweisverfahrens ist dabei keineswegs trivial.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die gängigen Nachweisverfahren für RWA verglichen. Konkret werden die vereinfachten Regelungen der Landesbauordnung einschließlich Sonderbauvorschriften, die normativen Verfahren nach DIN 18232-2 und 18232-5 für natürliche und maschinelle RWA sowie die Rauchgas- und Strömungssimulation mittels des „Fire Dynamics Simulators“ (FDS) untersucht. Alle Methoden werden auf ein identisches, fiktives Gebäudemodell mit Hallencharakter angewandt, welches als Industriebau und Verkaufsstätte mit variabler Anlagentechnik wie Brandmeldeanlage oder Sprinkleranlage betrachtet wird.

Die Bewertung erfolgt hinsichtlich der Wirksamkeit der Entrauchung, insbesondere der Rauchfreihaltung von Flucht- und Rettungswegen durch Sicherstellung raucharmer Schichten und ausreichender Sichtweiten.

Dabei wird insbesondere der Einfluss zentraler Eingangsparameter wie Anlagentechnik und Wahl des Nachweisverfahrens auf die Entrauchung sowie die Diskrepanz zwischen normativen Annahmen und den realitätsnahen Ergebnissen der performancebasierten Nachweise kritisch hinterfragt. Die Ergebnisse werden in einer Übersichtsmatrix zusammengeführt.

Ziel der Arbeit ist die Ableitung belastbarer Erkenntnisse zu den Grenzen normativer Grundlagen als fundierte Basis für die optimierte Bemessung von RWA in der Praxis.

Abstract

The authoritative menace in case of fire results less from the thermal effect of the flames but rather from the rapid spread of toxic gases.

A safely and efficient dimensioning of smoke and heat extraction systems is therefore essential, but due to many established detection and design methods, technical planners are faced with complex considerations between functional reliability, profitability and normative compliance. The choice of the optimal detection method is still far from trivial.

In context of this work the usual detection methods for smoke and heat extraction are compared. Specifically, the simplified regulations of the respective state building regulations including special building regulations, the normative procedures according to DIN 18232-2 and DIN 18232-5 for natural and mechanical smoke exhaust systems as well as smoke spread and fire simulation using the “Fire Dynamics Simulator” (FDS) are examined. All methods are applied to an identical, fictitious hall-like building model which is considered as an industrial construction and salesroom with mutable system engineering such as fire alarm system or sprinkler system.

The evaluation is based on the effectiveness of smoke extraction, especially the smoke and heat extraction in the range of escape routes by ensuring smoke-free layers and sufficient visibility.

The influence of input parameters such as system engineering and the choice of detection method on smoke extraction as well as the discrepancy between normative assumptions and the realistic results of performance-based evidence are critically scrutinized. The results are combined in an overview matrix.

The primary objective of the work is to obtain sound results on the limits of normative principles as a solid basis for the optimised design of smoke exhaust systems in practice.

Vorwort

Die vorliegende Bachelorarbeit stellt einen bedeutenden Meilenstein in meinem dualen Studium dar und ist das Ergebnis intensiver Auseinandersetzung mit einem Thema, das mich bereits früh in meiner praktischen Tätigkeit bei der WDI Wendelken Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, fasziniert hat.

Obwohl Rauchgassimulationen in meinem Alltag eher punktuell zum Einsatz kamen, weckte die Möglichkeit, das komplexe Brandverhalten realitätsnah zu betrachten, mein tiefes fachliches Interesse. Die Gelegenheit, numerische Ingenieurmethoden mit dem „Fire Dynamics Simulator“ (FDS) im Rahmen eines Fachlehrgangs kennenzulernen und gezielt in dieser Arbeit anzuwenden, war für mich nicht nur eine fachliche Bereicherung, sondern auch eine persönliche Motivation.

Mein besonderer Dank gilt meinem Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer, der sich seit dem 5. Semester als mein Praxisbetreuer engagiert und mich seither mit fachlicher Expertise, Offenheit und konstruktivem Feedback zuverlässig unterstützt hat.

Ebenso danke ich meinem Zweitprüfer und Chef Dipl.-Ing. Jan Wendelken für das Vertrauen und die kontinuierliche Förderung während meiner Praxisphasen.

Ein aufrichtiger Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen bei WDI für den fachlichen Austausch und das kollegiale Miteinander, das meine Entwicklung maßgeblich gefördert hat.

Ganz besonders danke ich meiner Familie. Euer Glaube an mich, eure Unterstützung und Ermutigung waren in jeder Phase dieses Studiums ein verlässliches Fundament.

Ebenso danke ich meinen Freundinnen und Freunden, die mit Geduld, Motivation und dem nötigen Abstand zum Studienalltag stets an meiner Seite standen.

Und abschließend gilt mein Dank all denen, die sich bereit erklärt haben, meine Arbeit vorab kritisch zu lesen und mir wertvolles Feedback zu geben. Eure Aufmerksamkeit und eure Hinweise waren von unschätzbarem Wert für die finale Fassung dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Formel- und Symbolverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	1
1.3 Methodisches Vorgehen	2
2 Brandschutztechnische und physikalische Grundlagen	4
2.1 Brandentstehung und Brandverlauf	4
2.2 Rauchgasausbreitung und Gefährdungspotenzial	7
2.3 Grundlagen der numerischen Strömungssimulation (CFD)	8
2.3.1 Navier-Stokes-Gleichungen und Erhaltungssätze	9
2.3.2 Turbulenzmodellierung mittels Large Eddy Simulation (LES)	11
2.3.3 Numerische Auflösung und Skalierungseffekte	11
3 Gesetzliche und normative Grundlagen der Entrauchung	13
3.1 Bauordnungsrechtlicher Rahmen und Schutzziele	13
3.2 Definition und Systematik der Rauchfreihaltung	16
3.2.1 Funktionsweise natürlicher Rauchabzugsanlagen (NRA)	16
3.2.2 Funktionsweise maschineller Rauchabzugsanlagen (MRA)	17
4 Methodik der Untersuchung	19
4.1 Grenzwerte und Erfolgskriterien	19
4.2 Spezifikation des Referenzmodells	21
5 Pauschale Nachweisführung nach Sonderbauvorschriften	23
5.1 Bemessung der Rauchableitung nach MIndBauRL	23
5.2 Bemessung der Rauchableitung nach MVKVO	29
6 Analytische Nachweisführung nach DIN 18232-2 und 18232-5	32

6.1	Bemessung natürlicher Rauchabzugsanlagen (NRA) nach DIN 18232-2	32
6.1.1	Festlegung der Rahmenbedingungen	32
6.1.2	Nachweisführung für den Industriebau	34
6.1.3	Nachweisführung für die Verkaufsstätte	39
6.2	Bemessung maschineller Rauchabzugsanlagen nach DIN 18232-5	41
6.2.1	Festlegung der Rahmenbedingungen	42
6.2.2	Nachweisführung für den Industriebau	43
6.2.3	Nachweisführung für die Verkaufsstätte	51
7	<i>Einsatz numerischer Ingenieurmethoden: Simulation mittels FDS</i>	54
7.1	Umsetzung der Modellparameter und Randbedingungen	54
7.1.1	Festlegung der Zellgrößen	55
7.1.2	Definition der Oberflächeneigenschaften	55
7.1.3	Implementierung der Leckagen und Druckrandbedingungen	57
7.1.4	Implementierung der Messsensorik	58
7.2	Simulationsreihe Industriebau	59
7.2.1	Simulation ohne zusätzliche Brandschutztechnische Maßnahmen	60
7.2.2	Simulation unter Einsatz einer Brandmeldeanlage	67
7.2.3	Simulation unter Einsatz einer Sprinkleranlage	71
7.3	Simulationsreihe Verkaufsstätte	75
7.3.1	Simulation ohne zusätzliche Brandschutztechnische Maßnahmen	76
7.3.2	Simulation unter Einsatz einer Brandmeldeanlage	80
7.3.3	Simulation unter Einsatz einer Sprinkleranlage	82
8	<i>Vergleichende Analyse und Ergebnissynthese</i>	85
8.1	Darstellung der Übersichtsmatrix	85
8.2	Einfluss von Nutzung und Anlagentechnik auf die Entrauchung	86
8.3	Kritische Würdigung der Methodik	89
8.4	Fazit und Orientierungshinweise für die Fachplanung	90
9	<i>Literatur- und Quellenverzeichnis</i>	92
10	<i>Anhang</i>	94

Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1: Das Branddreieck [5]	4
Bild 2.2: Schematische Darstellung der thermischen Auftriebsströmung [8]	5
Bild 2.3: Typischer Brandverlauf am Beispiel einer normalen Naturbrandes [9]	5
Bild 2.4: Einheitstemperaturzeitkurve im Vergleich zum Naturbrand [10]	6
Bild 2.5: Rauch- und Temperaturentwicklung ohne Entrauchung [5]	7
Bild 2.6: Kontrollvolumen zur Darstellung skalarer und vektorieller Größen im CFD-Modell [14]	9
Bild 3.1: Hierarchie der rechtlichen Grundlagen im Brandschutz [21]	13
Bild 3.2: Gliederung des Brandschutzes (vereinfacht) [23]	15
Bild 3.3: Funktionsprinzip einer NRA unter Ausnutzung des Kamineffektes [25] ..	16
Bild 3.4: Funktionsweise einer MRA [25]	17
Bild 3.5: Funktionsweise einer MRA [25]	17
Bild 4.1: Vereinfachter Grundriss des Referenzmodells (eigene Darstellung)	21
Bild 4.2: Darstellung der Tragkonstruktion des Referenzmodells	22
Bild 5.1: Rechtwinklige Ausströmöffnung mit geknicktem Profil (vereinfacht) [25]	26
Bild 6.1: Vereinfachte Darstellung der Rauch-abschnitte (eigene Darstellung)	33
Bild 6.2: Schematische Darstellung von NRA in einem Rauchabschnitt nach DIN 18232-2 [30]	33
Bild 6.3: Prinzipskizze der geometrischen Rahmenbedingungen (eigene Darstellung)	34
Bild 6.4: Schematische Darstellung der Lage der Absaugstellen nach DIN 18232-5 [32]	43
Bild 6.5: Korrekturwerte für den Rauchgasvolumenstrom bei abweichenden Raumgrößen nach Bild 4 der DIN 18232-5 [32]	47
Bild 6.6: Nomogramm zur Ermittlung des über eine einzelne Absaugstelle abführbaren Rauchgasvolumenstroms nach Bild 6 der DIN 18232-5 [32]	49
Bild 7.1: Auszug aus der FDS-Eingabedatei mit Definition des Rechengitters und der Domänengrenzen (eigene Darstellung)	55
Bild 7.2: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der Materialien (eigene Darstellung)	56
Bild 7.3: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der Oberflächenprofile (eigene Darstellung)	56
Bild 7.4: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Einfügen des Gebäudemodells (eigene Darstellung)	56
Bild 7.5: Darstellung des Simulationsmodells in SMV (eigene Darstellung)	57
Bild 7.6: Auszug der FDS-Eingabedatei: Berücksichtigung der Druckrandbedingungen (eigene Darstellung)	57

Bild 7.7: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der DEVICES (eigene Darstellung)	58
Bild 7.8: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der SLICES (eigene Darstellung)	59
Bild 7.9: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der Reaktionsgleichung (eigene Darstellung)	59
Bild 7.10: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der zeitlichen Brandentwicklung (eigene Darstellung)	60
Bild 7.11: Schematischer Grundriss der Halle mit Einbindung der RWA und Zuluftflächen (eigene Darstellung)	61
Bild 7.12: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Erstellung der Zu- und Abluftöffnungen (eigene Darstellung)	61
Bild 7.13: Auszug der FDS-Eingabedatei: Implementierung der zeitgesteuerten Auslösung der RWA (eigene Darstellung)	62
Bild 7.14: Auszug aus SMV nach 165s Simulationszeit (eigene Darstellung)	62
Bild 7.15: Auszug aus SMV nach 182s Simulationszeit (eigene Darstellung)	62
Bild 7.16: Auszug aus SMV nach 420s Simulationszeit (eigene Darstellung)	63
Bild 7.17: Auszug aus SMV: Sichtweite auf 2,50 m Höhe nach 420 Sekunden	63
Bild 7.18: Auszug aus SMV: Öffnung der RWA (eigene Darstellung)	64
Bild 7.19: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	64
Bild 7.20: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	65
Bild 7.21: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	66
Bild 7.22: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	66
Bild 7.23: Schematischer Grundriss der Halle mit Einbindung der RWA und Zuluftflächen sowie Rauchmelder (eigene Darstellung)	67
Bild 7.24: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Implementierung der Brandmeldeanlage (eigene Darstellung)	68
Bild 7.25: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Kopplung der BMA mit den RWA-Öffnungen (eigene Darstellung)	68
Bild 7.26: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	69
Bild 7.27: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit (eigene Darstellung)	69
Bild 7.28: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit (eigene Darstellung)	70
Bild 7.29: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	70

Bild 7.30: Schematischer Grundriss der Halle mit Einbindung der RWA und Zuluftflächen sowie Sprinklerköpfe (eigene Darstellung).....	71
Bild 7.31: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Implementierung der Sprinkleranlage (eigene Darstellung)	72
Bild 7.32: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Kopplung der Sprinkleranlage mit den RWA-Öffnungen (eigene Darstellung)	72
Bild 7.33: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung).....	73
Bild 7.34: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung).....	73
Bild 7.35: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit t	74
Bild 7.36: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	75
Bild 7.37: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der Reaktionsgleichung (eigene Darstellung)	76
Bild 7.38: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung).....	77
Bild 7.39: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung).....	78
Bild 7.40: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	78
Bild 7.41: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	79
Bild 7.42: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung).....	80
Bild 7.43: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung).....	81
Bild 7.44: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	81
Bild 7.45: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	82
Bild 7.46: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung).....	82
Bild 7.47: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit t	83
Bild 7.48: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	83
Bild 7.49: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)	84
Bild 8.1: Einfluss der Anlagentechnik und Nutzung auf die Sichtweiten	87
Bild 8.2: Einfluss der Anlagentechnik und Nutzung auf die Rußausbeute	87
Bild 8.3: Einfluss der Anlagentechnik und Nutzung auf die mittlere Temperatur ...	88
Bild 8.4: Einfluss der Anlagentechnik und Nutzung auf die Kohlenmonoxid-Konzentration (eigene Darstellung)	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Mindestvolumenströme für eine maximale Raumgrundfläche und flächenmäßige Verteilung von Rauchabzugsgeräten oder Absaugstellen in einem Raum [28]	28
Tabelle 6.1: Ermittlung der Bemessungsgruppen nach Tabelle 2 der DIN 18232-2 [30]	36
Tabelle 6.2: Auszug aus der Tabelle 3 der DIN 18232-2 [30]	37
Tabelle 6.3: Ermittlung der Bemessungsgruppe einer MRA nach Tabelle 1 der DIN 18232-5 [32]	44
Tabelle 6.4: Abzuführender Rauchgasvolumenstrom je Rauchabschnitt nach Tabelle 3 der DIN 18232-5 [32]	46
Tabelle 6.5: Ermittlung der mittleren Rauchschichttemperatur nach Tabelle 4 der DIN 18232-5 [32]	48
Tabelle 8.1: Übersichtsmatrix der vergleichenden Untersuchung (eigene Darstellung)	85

Abkürzungsverzeichnis

BG	Bemessungsgruppe
BMA	Brandmeldeanlage
CFD	Computational Fluid Dynamics = numerische Strömungssimulation
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNS	Direct Numerical Simulation
ETK	Einheitstemperaturzeitkurve
FDS	Fire Dynamics Simulator
FED	Fractional Effective Dose
FIC	Fractional Irritant Concentration
GG	Grundgesetz
HCN	Cyanwasserstoff
HOC	Heat of Combustion
HRR	Heat Release Rate = Wärmefreisetzungsrate
HRRPUA	Heat Release Rate per Unit Area
LBO	Landesbauordnung
LES	Large Eddy Simulation = Grobstruktursimulation
MBO	Musterbauordnung
MIndBauRL	Muster-Industriebau-Richtlinie
MLAR	Muster-Leitungsanlagenrichtlinie
NBauO	Niedersächsische Bauordnung
OKFF	Oberkante Fertig-Fußboden
MRA	Maschinelle Rauchabzugsanlage
MVKVO	Muster-Verkaufsstättenverordnung
NIST	National Institute of Standards and Technology
NRA	Natürliche Rauchabzugsanlage
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RWA	Rauch- und Wärmeabzugsanlage
SGS	Subgrid-Scale-Strukturen
SMV	Smokeview
Vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V

Formel- und Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A_{ex}	$[m^2]$	Austrittsquerschnitt
A_g	$[m^2]$	Geometrische Rauchabzugsfläche
A_R	$[m^2]$	Rauchabschnittsfläche
A_w	$[m^2]$	Aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche
A_{zu}	$[m^2]$	Größe der Zuluftfläche
C	-	Proportionalitätskonstante für die Leuchtdichte
c_p	$\left[\frac{kJ}{(kg \cdot K)} \right]$	Spezifische Wärmekapazität
$c_{Ru\beta}$	$\left[\frac{g}{m^2} \right]$	Massenkonzentration des Rauches
c_v	-	Korrekturfaktor zur Bestimmung der aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche
c_z	-	Korrekturfaktor zur Bestimmung der Zuluftfläche
D^*	-	Charakteristischer Branddurchmesser
D_L	$[m^{-1}]$	Optische Dichte pro Weglänge
D_m	$\left[\frac{m^2}{g} \right]$	Rauchpotenzial
D	$[m]$	Höhe der raucharmen Schicht
$d\dot{V}$	$\left[\frac{m^3}{h} \right]$	Korrekturvolumenstrom
Δd_s	$[m]$	Dicke der Rauchsicht
δ_{ij}	-	Kronecker Symbol
g, g_i	$\left[\frac{m}{s^2} \right]$	Erdbeschleunigung, Äußere Massenkraft
h	$[m]$	Gebäudehöhe
h_{sch}	$[m]$	Höhe der Rauchschräge
$h_{u,eff}$	$\left[\frac{kJ}{g} \right]$	Heat of Combustion, effektiver Heizwert
K	$[m^{-1}]$	Extinktionskoeffizient
K_m	$\left[\frac{m^2}{g} \right]$	Extinktionskoeffizient pro Einheitsmasse Brennstoff
κ	-	Kontraktionszahl
μ	$\left[\frac{kg}{m \cdot s} \right], [Pa \cdot s]$	Dynamische Viskosität
$N_{Rauchabzugsger\ddot{a}te}$	-	Anzahl der erforderlichen Rauchabzugsgeräte
θ_R	$[^\circ C]$	Temperatur der Rauchgase
θ_{RS}	$[^\circ C]$	Mittlere Rauchsichttemperatur
p, p_0	$[Pa], \left[\frac{N}{m^2} \right]$	Statischer Druck
ρ_∞	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Dichte von Luft

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Dichte des Fluids
\dot{Q}	[kW]	Wärmefreisetzungsrate
S	[m]	Erkennungsweite
s_{min}	[m]	Mindestabstand zwischen den Außenkanten zweier Absaugstellen
T_{∞}, T_{MPA}	[K], [°C]	Umgebungstemperatur
t	[s]	Zeit
$t_{Brandentwicklung}$	[min]	Brandentwicklungsdauer
τ_{ij}	$\left[\frac{N}{m^2}\right], [Pa]$	Viskoser Spannungstensor
u_i	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Geschwindigkeitskomponente in I-Richtung (kartesisch)
u_j	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Geschwindigkeitskomponente in J-Richtung (kartesisch)
u_k	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Geschwindigkeitskomponente in K-Richtung (kartesisch)
$v_{Brandausbreitung}$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Brandausbreitungsgeschwindigkeit
$\dot{V}_{i,max}$	$\left[\frac{m^3}{h}\right]$	Maximal abführbarer Rauchgasvolumenstrom je Absaugstelle
\dot{V}_{RS}	$\left[\frac{m^3}{h}\right]$	Rauchgasvolumenstrom
$\dot{V}_{RS,korrigiert}$	$\left[\frac{m^3}{h}\right]$	Korrigierter Rauchgasvolumenstrom
x_i	[m]	Ortskoordinate in I-Richtung (kartesisch)
x_j	[m]	Ortskoordinate in J-Richtung (kartesisch)
y_{CO}	$\left[\frac{g}{g}\right]$	Kohlenmonoxidausbeute
$Y_{RUß}$	[g/g]	Rußausbeute
Z	[m]	Höhe der Rauchsicht
∂	-	Partieller Differentialquotient

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Trotz weitreichender Fortschritte in den Bereichen der Bautechnik, Materialeigenschaften und rechtlichen Rahmenbedingungen werden Brandereignisse weiterhin als eine der kritischsten Gefährdungsquellen für Gebäude und deren Nutzer angesehen [1]. Dabei geht die tatsächliche Bedrohung weniger von den thermischen Auswirkungen der Flammen, sondern vielmehr von den bei der Verbrennung entstehenden Rauchgasen aus.

Rauchgase diffundieren mit hoher Geschwindigkeit in Gebäudestrukturen, beeinträchtigen die Sichtverhältnisse maßgeblich und enthalten eine potenziell tödliche Konzentration an Toxinen. Bereits eine kurze Expositionsdauer kann zur Handlungsunfähigkeit oder gar zum Tod führen [2].

Wie bereits im 19. Jahrhundert treffend formuliert wurde: „Man flieht vor dem Rauch und stürzt in die Flamme“ [3]. Dieses Zitat verdeutlicht die fundamentale Herausforderung, welche vom Rauch ausgeht und zeigt, dass die instinktive menschliche Reaktion ohne wirksame Entrauchung unmittelbar in die lebensgefährliche Rauchsicht führen kann. Die Erkenntnis, dass Rauchgase im Brandfall mindestens genauso gefährlich sind, wie die thermische Einwirkung, macht die Gewährleistung einer wirksamen Entrauchung zu einer unverzichtbaren Grundlage des vorbeugenden Brandschutzes.

In der Planungspraxis stehen Fachplaner jedoch vor der Herausforderung, aus einer Vielzahl etablierter Nachweis- und Bemessungsverfahren wählen zu müssen. Die herkömmlichen analytisch-normativen Verfahren basieren oft auf vereinfachten physikalischen Modellen und idealisierten Annahmen. Hieraus ergeben sich Diskrepanzen zwischen normativen Vorgaben und der tatsächlichen Branddynamik [4]. Für Sonderbauten wie Industriebauten oder Verkaufsstätten entsteht so ein Spannungsfeld zwischen Funktionssicherheit, Wirtschaftlichkeit und normativer Konformität, welches die Planungssicherheit maßgeblich beeinträchtigt.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist der wissenschaftlich fundierte Vergleich der gängigen Nachweisverfahren für Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Dabei sollen

die Grenzen der normativen Grundlagen aufgezeigt und eine belastbare Basis für die optimierte Bemessung in der Praxis geschaffen werden.

Im Fokus steht die Frage, wie stark zentrale Eingangsparameter, insbesondere die vorhandene Anlagentechnik wie Brandmelde- oder Sprinkleranlagen sowie die Wahl des jeweiligen Nachweisverfahrens die Ergebnisse der Entrauchung beeinflussen.

Das angestrebte Ergebnis der Untersuchung ist eine fundierte Entscheidungsmatrix, die als praxisorientierte Basis für die Wahl des optimalen Nachweisverfahrens in der Brandschutzplanung dient.

1.3 Methodisches Vorgehen

Die Untersuchung folgt einem deduktiven, quantitativen Forschungsansatz im Rahmen einer vergleichenden Fallstudie. Da das Ziel der Arbeit darin besteht, die Wirksamkeit verschiedener Entrauchungsstrategien objektiv gegenüberzustellen, wird ein systematischer Analyseprozess gewählt, bei dem etablierte normative Vorgaben an realitätsnahen physikalischen Modellen gemessen werden.

Das methodische Vorgehen erfolgt dabei in drei Schritten. Zunächst wird ein fiktives Gebäudemodell mit Hallencharakter definiert, welches als konstante Referenzinstanz dient. Um die Praxisrelevanz sicherzustellen, wird dieses Modell als Sonderbau, wahlweise als Industriebau oder Verkaufsstätte, charakterisiert und mit variabler Anlagentechnik wie Brandmelde- oder Sprinkleranlage ausgestattet. Diese Konfigurationen bilden die Grundlage für die Sensitivitätsanalyse der Entrauchungskonzepte.

In der darauffolgenden Analysephase werden die verschiedenen Nachweiswege sukzessive auf das Referenzmodell angewandt. Dies umfasst die vereinfachten Anforderungen der Landesbauordnung (LBO), die analytischen Bemessungsverfahren nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5 sowie die numerische Brandsimulation mittels des Fire Dynamics Simulators (FDS). Die numerische Simulation dient hierbei als performancebasierte Referenz, um die dynamische Rauchgasausbreitung unter Berücksichtigung thermischer Prozesse und baulicher Gegebenheiten realitätsnah abzubilden.

Die abschließende Evaluierung führt die gewonnenen Daten in einer vergleichenden Synthese zusammen. Dabei werden die Ergebnisse anhand quantitativer Zielgrößen wie der Höhe der raucharmen Schicht, der

Temperaturentwicklung und der Sichtweiten im Fluchtwegbereich gegenübergestellt. Zur Sicherstellung der wissenschaftlichen Qualität werden hierbei die zentralen Gütekriterien berücksichtigt:

Die Objektivität wird durch den Einsatz standardisierter Rechenwege und validierter Software gewahrt. Die Reliabilität wird durch die lückenlose Dokumentation der Modellparameter und Randbedingungen sichergestellt, um eine vollständige Reproduzierbarkeit der Simulationsläufe zu garantieren. Die Validität der Untersuchung ergibt sich aus der gezielten Auswahl bauordnungsrechtlich verankerter Schutzziele.

2 Brandschutztechnische und physikalische Grundlagen

2.1 Brandentstehung und Brandverlauf

Die Entstehung eines Brandes ist ein komplexer physikalisch-chemischer Prozess, der auf einer selbstständig ablaufenden exothermen Oxidationsreaktion beruht [5]. Die notwendigen Voraussetzungen für die Initiierung dieses Prozesses werden durch das Branddreieck in Bild 2.1 definiert, welches das Zusammentreffen von brennbarem Stoff, Sauerstoff und ausreichender Aktivierungsenergie beschreibt [5].



Bild 2.1: Das Branddreieck [5]

In der modernen, ingenieurwissenschaftlichen Brandschutzlehre wird dieses Modell jedoch um die chemische Kettenreaktion sowie das erforderliche Mengenverhältnis der beteiligten Stoffe erweitert, da eine stabile Verbrennung nur innerhalb stoffspezifischer Zündgrenzen der oberen und unteren Explosionsgrenze stattfinden kann [6].

Ein zentraler Mechanismus ist dabei die Pyrolyse, die insbesondere bei festen und flüssigen Stoffen die energetische Grundlage für die Flammenerscheinung bildet. Durch thermische Einwirkung erfolgt eine chemische Zersetzung, wobei brennbare Gase emittiert werden, die sich mit dem Luftsauerstoff zu einem zündfähigen Gemisch vermengen [5].

Bei der unvollständigen Verbrennung organischer Stoffe entstehen unter Sauerstoffmangel hochgradig toxische Nebenprodukte wie Kohlenmonoxid (CO) und Cyanwasserstoff (HCN), welche bereits in geringsten Konzentrationen letal wirken und die primäre Gefährdung für Personen darstellen [2].

Der zeitliche Verlauf eines Realbrandes in Gebäuden wird üblicherweise in die Phasen Entstehung, Entwicklung, Vollbrand und Abkühlung unterteilt [5]. In der

Brandentstehungsphase ist das Ereignis räumlich begrenzt, wobei die Wärmefreisetzungsrates \dot{Q} noch geringe Werte aufweist. Mit fortschreitender Zeit geht der Prozess in die Brandentwicklungsphase über, in der die Intensität durch thermische Rückkopplung oft exponentiell ansteigt [6]. Wie in Bild 2.2 ersichtlich, bildet sich dieser Phase über dem Brandherd der sogenannte Plume aus, welcher sich durch eine turbulente thermische Auftriebsströmung aus heißen Brandgasen charakterisiert, die aufgrund ihrer geringeren Dichte - im Vergleich zur Umgebungsluft - zur Decke aufsteigt und dort eine horizontale Deckenstrahlströmung induziert [7].

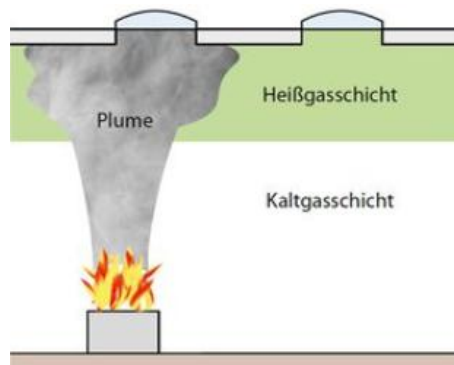


Bild 2.2: Schematische Darstellung der thermischen Auftriebsströmung [8]

Ein sicherheitstechnisch kritischer Wendepunkt ist der Flashover (Feuerübersprung), der den Übergang vom lokal begrenzten Brand zum voll entwickelten Raumbrand markiert [5]. Physikalisch wird dieser Umschlagpunkt durch die thermische Rückstrahlung der sich unter der Decke ansammelnden Rauchgasschicht forciert. Erreicht die Bestrahlungsstärke auf den Bodenbereich einen Schwellenwert von ca. 15 bis 20 kWh / m², führt dies zur schlagartigen Entzündung nahezu aller brennbaren Oberflächen im Raum [6]:

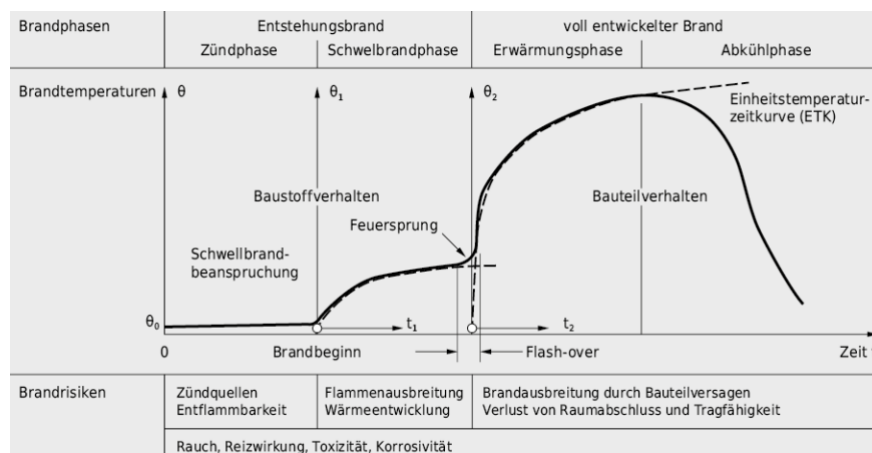


Bild 2.3: Typischer Brandverlauf am Beispiel einer normalen Naturbrandes [9]

Im anschließenden Vollbrand wird die maximale Wärmefreisetzungsrates erreicht, die bei realen Gebäudestrukturen häufig durch die verfügbare Lufterneuerungsrate limitiert wird [7]. Nach dem Aufzehren der verfügbaren Brandlast folgt die Abkühlphase, in der die Temperaturen stetig sinken [5].

Während der oben beschriebene Naturbrandverlauf die realen physikalischen Bedingungen in einem Gebäude widerspiegelt, erfordert die bauaufsichtliche Klassifizierung von Bauteilen eine einheitliche und reproduzierbare Prüfungsgrundlage. Zu diesem Zweck wurde bereits 1934 mit der DIN 4102 die heute als Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) bekannte Normkurve eingeführt [5].

Im Gegensatz zu einem Realbrand kennt die ETK keine Entstehungs- oder Abkühlphase, sondern beschreibt einen kontinuierlichen, logarithmischen Temperaturanstieg nach folgender Formel [5]:

$$\Delta\theta(t) = \theta(t) - \theta(t_0 = 0) = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad (2.1)$$

Hierbei stellt $\Delta\theta(t)$ den zeitlichen Temperaturanstieg dar.

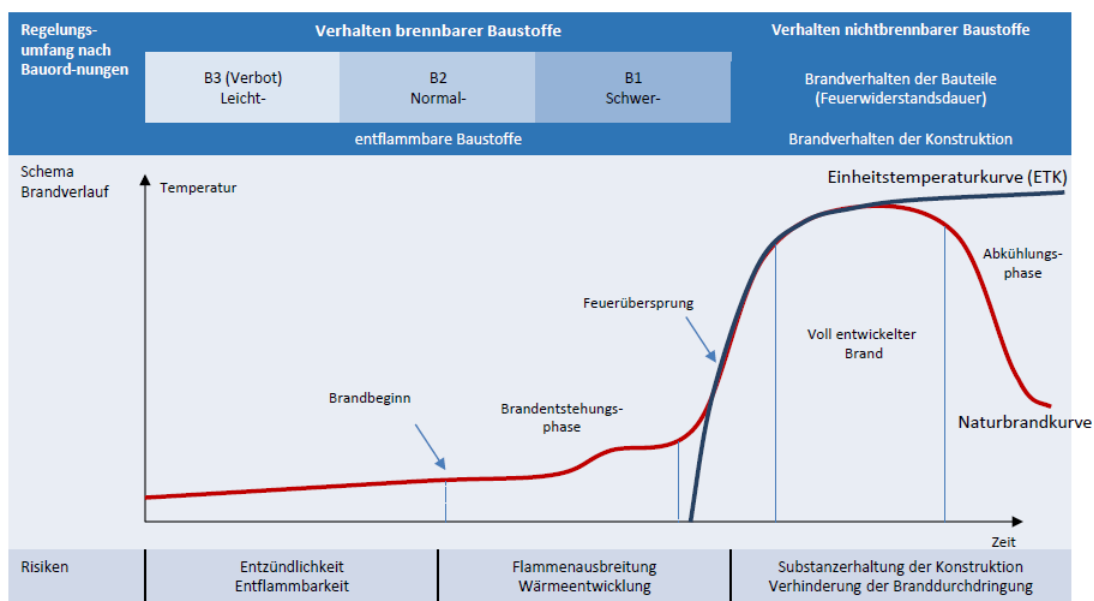


Bild 2.4: Einheitstemperaturzeitkurve im Vergleich zum Naturbrand [10]

Wie in Bild 2.4 ersichtlich, weicht die ETK signifikant vom realen Brandverhalten ab. Während die Naturbrandkurve die für die Personenrettung entscheidende Brandentstehungsphase mit moderaten Temperaturen abbildet, steigt die ETK unmittelbar und steil an. Während der Naturbrand nach dem Ausbrennen in die Abkühlphase übergeht, steigt die ETK theoretisch unbegrenzt weiter an.

Diese Gegenüberstellung verdeutlicht die unterschiedlichen Schutzziele. Die ETK dient primär der Substanzerhaltung der Konstruktion und der Verhinderung des Branddurchtritts unter Extrembedingungen [5].

Die ETK ist daher für die Bemessung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen sowie für Brandsimulationen ungeeignet.

Für die Bemessung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen ist die Phase vor dem Flashover von prioritärer Bedeutung, da die Aufrechterhaltung der Schutzzielparameter für die Selbstrettung nur in diesem Zeitfenster möglich ist. Die Effektivität der Entrauchung bemisst sich hierbei an ihrer Kapazität, thermische Energie und toxische Gase so abzuführen, dass die Ausbildung raucharmer Schichten stabilisiert wird [8].

2.2 Rauchgasausbreitung und Gefährdungspotenzial

Die primäre Gefährdung bei Brandereignissen resultiert aus der schnellen Ausbreitung von Rauchgasen. Diese bestehen aus einem Gemisch von Verbrennungsluft, Schwebstoffen und gasförmigen Verbrennungsprodukten [6]. Für die brandschutztechnische Planung ist die optische Dichte des Rauches von entscheidender Bedeutung, da diese die Sichtweite in Rettungswegen maßgeblich reduziert und somit die Selbstrettung behindert [5].

Das Brandgeschehen wirkt sich unmittelbar auf im Gefahrenbereich befindliche Personen aus, wobei die psychischen Belastungen durch Stress, Angst und Orientierungslosigkeit häufig durch die physischen Einwirkungen wie Sauerstoffmangel verstärkt werden [5]. Die Wirkung von Rauch und Temperatur im Zeitverlauf korreliert dabei signifikant mit dem Fortschreiten der Brandphasen:

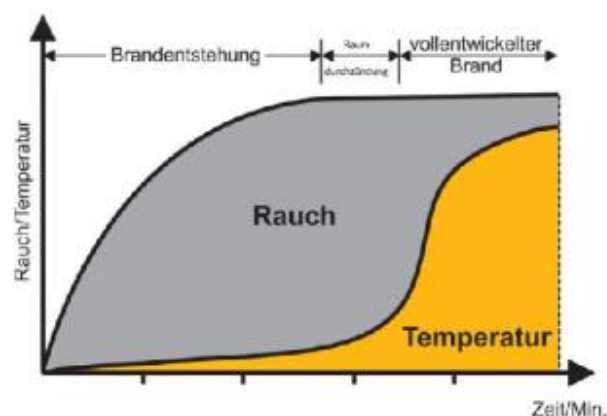


Bild 2.5: Rauch- und Temperaturentwicklung ohne Entrauchung [5]

Diese Darstellung zeigt, dass insbesondere die Raucheinwirkung bereits in der frühen Phase maßgeblich ist, während die thermische Belastung oft erst nach dem Flashover kritische Werte erreicht. Für die Selbstrettung steht dem Menschen im Allgemeinen lediglich ein Zeitfenster von etwa drei Minuten zur Verfügung [5].

Die Toxizität des Brandrauchs ist dabei ein komplexes Phänomen. Durch die unvollständige Verbrennung unter Sauerstoffmangel entstehen toxische Pyrolyseprodukte, die bei Inhalation oder über die Haut bioverfügbar werden. Ein zentraler Faktor ist hierbei der Ruß, der aufgrund seines hohen Adsorptionsvermögens als „Schadstoffsammler“ fungiert und krebserzeugende Substanzen in den Organismus transportieren kann [6]. Die chemische Zusammensetzung der Rauchgase ist zudem durch radikalische Reaktionen, der sogenannten *de-novo-Synthese* geprägt.

Besondere Bedeutung kommt den sogenannten „Toxic Twins“ zu: Kohlenmonoxid (CO) und Cyanwasserstoff (HCN), deren toxische Wirkung sich addiert. Während CO durch seine ca. 300-fach höhere Affinität zum Hämoglobin den Sauerstofftransport im Blut blockiert, hemmt HCN die zelluläre Sauerstoffverarbeitung [6]. Diese Kombination macht Brandrauch zu einer der lebensbedrohlichsten Gefahrenquellen in Gebäuden.

Angesichts dieser Gefahren muss der Ausbreitung des Rauches insofern entgegengewirkt werden, dass die toxische Belastung in den Aufenthaltsbereichen während der gesamten Dauer der Selbstrettung unter den kritischen Schwellenwerten verbleibt.

2.3 Grundlagen der numerischen Strömungssimulation (CFD)

Zur Abbildung der komplexen Branddynamik dieser Arbeit werden numerische Strömungssimulationen (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) eingesetzt. CFD-Modelle gehören zu den anerkannten ingenieurmäßigen Nachweisverfahren, die eine räumlich und zeitlich differenzierte Analyse von Brandverläufen ermöglichen [11]. Während einfachere Zonenmodelle auf stark idealisierten Annahmen basieren, erlauben CFD-Modelle eine detailliertere numerische Lösung der zugrunde liegenden Erhaltungsgleichungen der Strömungsmechanik.

Für die Durchführungen der Simulationen wird das Programm *Fire Dynamics Simulator* (FDS) in der Version 6.10.1 verwendet [12]. FDS ist ein spezialisiertes

CFD-Modell, das seit dem Jahr 2000 gemeinsam von *National Institute of Standards and Technology* (NIST) und dem *VTT Technical Research Centre of Finland* kontinuierlich weiterentwickelt sowie umfangreich validiert wird. Zur grafischen Aufbereitung und Analyse der Simulationsergebnisse kommt die Software *Smokeview* in der Version 6.10.1 zum Einsatz [13].

Die physikalischen Grundlagen, die Modellierung von Turbulenzen sowie die numerische Diskretisierung der Gleichungen werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

2.3.1 Navier-Stokes-Gleichungen und Erhaltungssätze

Die theoretische Analyse der bei Bränden auftretenden Transportprozesse basiert auf der mathematischen Formulierung fundamentaler physikalischer Erhaltungsgesetze, den sogenannten Fundamentalgleichungen [14]. Diese beschreiben das Verhalten eines Fluids innerhalb eines infinitesimalen Kontrollvolumens durch die Bilanzierung von Massen-, Impuls- und Energieströmen [14], [15]. Wie in Bild 2.6 dargestellt, wird das Rechengebiet hierfür in ein Gitter unterteilt, wobei die physikalischen Skalare und Vektoren spezifischen Orten innerhalb der Kontrollvolumina zugeordnet werden.

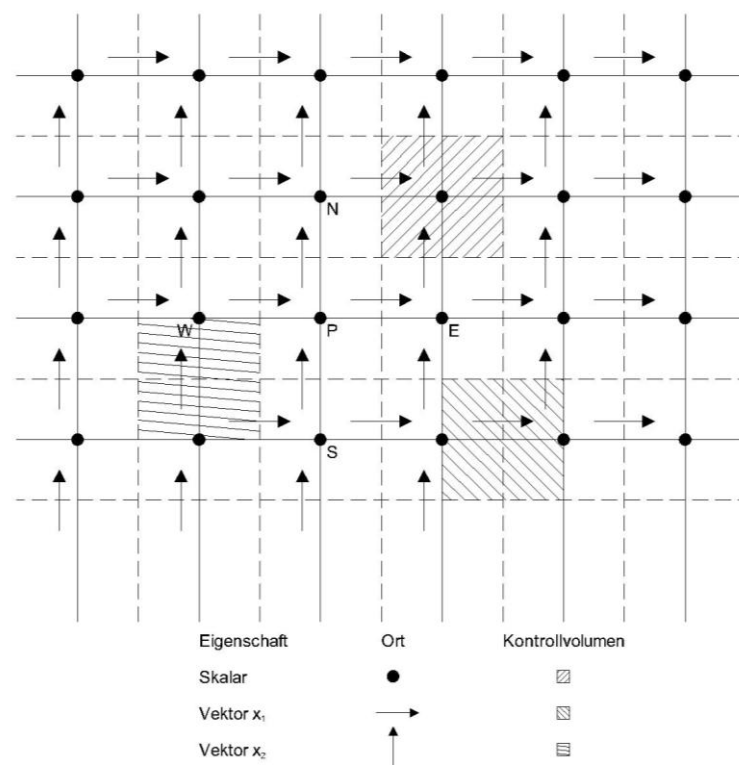


Bild 2.6: Kontrollvolumen zur Darstellung skalarer und vektorieller Größen im CFD-Modell [14]

Unter der Annahme, dass Rauchgase und Luft als Newtonsche Fluide betrachtet werden können, werden diese Erhaltungssätze als Navier-Stokes-Gleichungen zusammengefasst [16]. Den Ausgangspunkt bildet die Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung). Sie besagt, dass die zeitliche Dichteänderung im Kontrollvolumen durch die Konvektion über dessen Grenzen bestimmt wird. Die Navier-Stokes-Gleichungen sind in Gleichung (2.2) dargestellt [14]:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (p u_j) = 0 \quad (2.2)$$

Die Impulserhaltung (Navier-Stokes-Gleichung) beschreibt das dynamische Kräftegleichgewicht, bei dem die Impulsänderung eines Fluidelements der Summe aus Druckgradienten, viskosen Spannungen und Volumenkräften entspricht. Die viskosen Effekte werden hierbei durch den Spannungstensor τ_{ij} gemäß dem Stokes'schen Gesetz abgebildet, was in der fachüblichen Tensorschreibweise wie folgt resultiert [14]:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (2.3)$$

Zur Beschreibung der Energieerhaltung in einem Mehrkomponenten-Reaktionssystem ist eine rein temperaturbasierte Betrachtung aufgrund der komplexen chemischen Vorgänge oft unzureichend. Die präzisere Formulierung erfolgt mittels der statistischen Mischungsenthalpie h nach Cox [17], welche die chemische Energie über die Massenbrüche der beteiligten Spezies integriert:

$$\frac{\partial}{\partial t} (p u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (p u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_j} + g_i \quad (2.4)$$

Dieses gekoppelte System aus nichtlinearen Differentialgleichungen bildet die theoretische Basis für moderne Feldmodelle [16].

Die numerische Lösung stößt jedoch auf ein wesentliches physikalisches Problem, da bei einem Brand turbulente Wirbelgrößen auftreten, die mehrere Größenordnungen aufweisen können. Die Größenordnung erstreckt sich von der geometrischen Ausdehnung des Gebäudes bis zu kleinen dissipativen Wirbeln im Millimeterbereich. Eine direkte numerische Lösung (DNS) aller Skalen ist aufgrund der Rechenkapazität in der Brandschutzpraxis nicht möglich.

Dies macht eine Abstraktion der physikalischen Prozesse notwendig: Anstatt alle turbulenten Bewegungen direkt aufzulösen, werden die Navier-Stokes-Gleichungen durch ein Filterverfahren geglättet. Hierbei werden die großen Wirbelstrukturen direkt berechnet, während die Auswirkungen der unaufgelösten, kleinen Wirbel auf die Gesamtströmung durch zusätzliche Turbulenzmodelle statistisch modelliert werden [18].

2.3.2 Turbulenzmodellierung mittels Large Eddy Simulation (LES)

Die Methode der *Large Eddy Simulation* lässt sich als ein hybrider Ansatz zur Berechnung turbulenter Strömungen definieren, der eine Brücke zwischen der vollständigen Auflösung und der rein statistischen Modellierung schlägt. Während turbulente Brandströmungen durch eine enorme Bandbreite an Wirbelgrößen charakterisiert sind, zielt die LES darauf ab, die großskaligen, energietragenden Strukturen direkt zu berechnen. Diese großen Wirbel sind maßgeblich für den konvektiven Transport von Rauch und Wärme verantwortlich und hängen stark von den individuellen Randbedingungen wie der Gebäudegeometrie ab [18].

Die physikalische Abstraktion erfolgt bei der LES durch ein Filterverfahren, das im Falle von FDS unmittelbar an die räumliche Diskretisierung des Rechengitters gekoppelt ist. Mathematisch bedeutet dies, dass die Navier-Stokes-Gleichungen so modifiziert werden, dass nur Strömungsanteile oberhalb einer definierten Filterweite der Gitterzellenbreite explizit aufgelöst werden. Die unterhalb dieser Grenze liegenden kleinskaligen Wirbel, die sogenannten Subgrid-Scale-Strukturen (SGS) weisen ein eher universelles, isotropes Verhalten auf. Da ihre direkte Berechnung einen prohibitiv hohen Rechenaufwand erfordern würde, wird ihr Einfluss auf die aufgelösten Skalen, insbesondere die Energiedissipation, durch statische Subgrid-Modelle approximiert. Durch diese Konzentration der Rechenressourcen auf die physikalisch dominanten Großstrukturen ermöglicht die LES eine realitätsgetreue Abbildung der instationären Branddynamik, die mit klassischen zeitgemittelten Verfahren wie RANS nicht in dieser Präzision erreichbar wäre [18].

2.3.3 Numerische Auflösung und Skalierungseffekte

Die Zuverlässigkeit einer LES ist untrennbar mit der räumlichen Auflösung des Rechengitters verknüpft. Da die LES darauf basiert, die maßgeblichen großskaligen

Wirbel explizit zu berechnen, muss das Gitter fein genug sein, um diese physikalischen Strukturen auch erfassen zu können. Die Zellgröße in FDS bestimmt dabei, welche Anteile des Energiespektrums direkt aufgelöst werden und welche lediglich modelliert werden.

Ein zentrales Kriterium für die numerische Güte einer Brandsimulation ist dabei das Verhältnis zwischen der Zellgröße und dem charakteristischen Branddurchmesser D^* . Dieser Skalarwert beschreibt die physikalische Ausdehnung der Brandquelle in Relation zu ihrer thermischen Freisetzungsrate und wird nach folgender Formel definiert [11]:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{p_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2.5)$$

In der Brandschutzpraxis wird die Qualität der numerischen Auflösung über das Verhältnis $D^*/\Delta x$ bewertet [11].

Ein hoher Wert bedeutet eine feine Auflösung der Plume-Dynamik und der daraus resultierenden Turbulenzen. Skalierungseffekte treten insbesondere dann auf, wenn die Zellgröße im Verhältnis zur Brandleistung zu grob gewählt wird, da in diesem Fall die für den Rauchgastransport entscheidenden Mischungsprozesse nicht mehr ausreichend aufgelöst werden können und die numerische Diffusion zunimmt [18].

3 Gesetzliche und normative Grundlagen der Entrauchung

Die Planung und Ausführung von Entrauchungsanlagen unterliegen in Deutschland einem komplexen Gefüge aus rechtlichen Vorgaben und technischen Regelwerken. Das folgende Kapitel erläutert die hierfür maßgeblichen Anforderungen sowie die daraus resultierenden Schutzziele.

3.1 Bauordnungsrechtlicher Rahmen und Schutzziele

Der Schutz vor der zerstörerischen Kraft des Feuers ist ein fundamentales Bedürfnis, das die Menschheit seit der Urzeit begleitet. Bereits antike Quellen wie der *Codex Hammurabi* oder die römischen Brandschutzvorschriften unter Kaiser Augustus belegen, dass verbindliche Regeln zur Bauweise und zur Aufstellung von Löschmannschaften zu den ältesten staatlichen Aufgaben gehören [19].

Brandschutz wurde schon früh als gemeinschaftliches Problem begriffen, da der Einzelne einer Feuersbrunst machtlos gegenüberstand. Diese historische Verpflichtung zur Gefahrenabwehr findet ihre moderne Entsprechung in der heutigen Gesetzgebung.

Die Grundlage für alle brandschutztechnischen Anforderungen in Deutschland bildet das Grundgesetz (GG). Gemäß GG Art. 2 Abs. 2 hat jeder das Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit [20]. Diese Forderung muss durch das Baurecht geschützt werden.

Um diesen verfassungsrechtlichen Auftrag umzusetzen, hat sich eine klare Hierarchie der Rechtsnormen etabliert, die oft als Rechts- oder Normenpyramide dargestellt wird (siehe Bild 3.1).

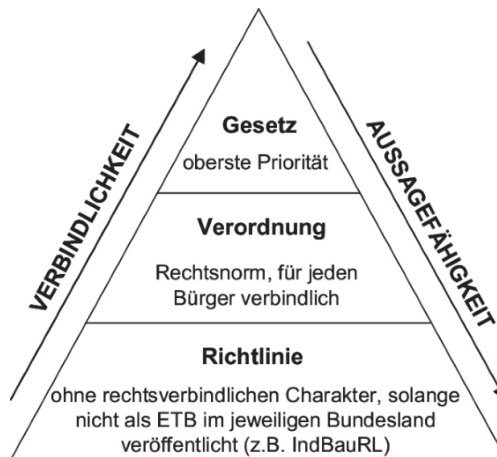


Bild 3.1: Hierarchie der rechtlichen Grundlagen im Brandschutz [21]

Die Umsetzung dieser Hierarchie unterliegt in Deutschland dem Föderalismusprinzip. Gemäß Art. 70 GG liegt die Gesetzeskompetenz für das Bauordnungsrecht bei den einzelnen Bundesländern. Dies führt dazu, dass deutschlandweit 16 verschiedene Landesbauordnungen (LBO) existieren, wie beispielsweise die Niedersächsische Bauordnung (NBauO). Um dennoch eine bundesweite Harmonisierung des Sicherheitsstandards zu gewährleisten, hat die Bauministerkonferenz (ARGEBAU) die Musterbauordnung (MBO) erarbeitet. Diese dient zwar nicht als rechtlich bindendes Gesetz, jedoch als Grundlage für die Landesbauordnungen der einzelnen Länder. Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Musterbauordnung als Referenz herangezogen, um eine allgemeingültige Übertragbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

An der Spitze der Pyramide stehen somit die Gesetze wie die Landesbauordnungen (LBO), die auf der Musterbauordnung (MBO) basieren. Darunter folgen Verordnungen für Sonderbauten und schließlich Richtlinien sowie technische Regeln, die den Stand der Technik definieren [21].

Die MBO stellt dabei die fundamentale Generalklausel in § 3 dar:

„Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden; dabei sind die Grundanforderungen an Bauwerke gemäß Anhang I der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zu berücksichtigen. Dies gilt auch für die Beseitigung von Anlagen und bei der Änderung ihrer Nutzung.“ [22].

Spezifisch für den Brandschutz konkretisiert § 14 MBO die zentralen Schutzziele, die für jede Brandschutzplanung bindend sind:

„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“ [22]

Die Erfüllung dieser Schutzziele erfordert eine ganzheitliche Brandschutzplanung, die sich gemäß Bild 3.2 in bauliche, anlagentechnische und betrieblich-organisatorische Maßnahmen sowie den abwehrenden Brandschutz unterteilt.

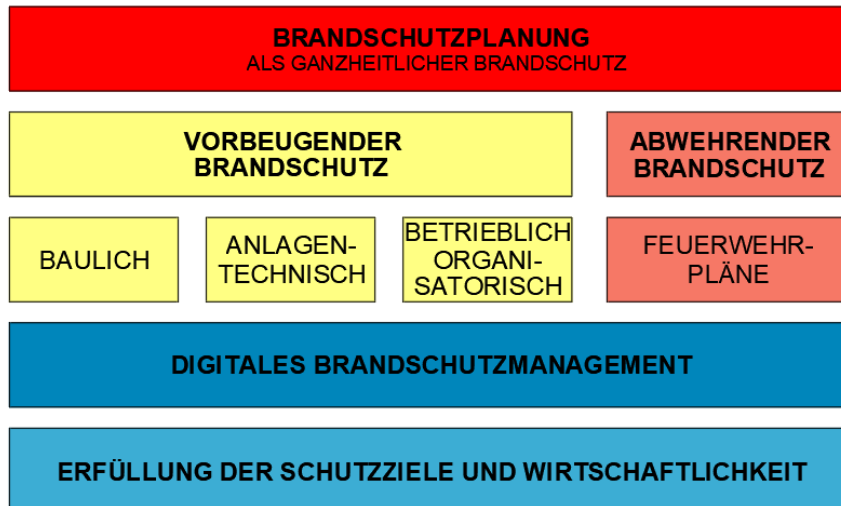


Bild 3.2: Gliederung des Brandschutzes (vereinfacht) [23]

Innerhalb dieses Gefüges nimmt die Rauch- und Wärmefreihaltung eine Schlüsselrolle im anlagentechnischen Brandschutz ein. Um die gesetzlichen Schutzziele mit Systemen zur Rauchableitung technisch umzusetzen, verfolgen diese spezifische operative Ziele. Zu diesen operativen Zielen gehören primär die Vergrößerung der Sichtweite zur Orientierung von Flüchtenden und Einsatzkräften sowie die Verringerung der Schadstoffkonzentration. Darüber hinaus dient die Entrauchung der Senkung der Brandraum- und Rauchgastemperaturen, was einerseits die Ausbreitung von Feuer und Rauch begrenzt und andererseits die tragende Baustruktur vor thermischer Einwirkung schützt. Durch diesen Energieabzug wird zudem die Gefahr eines schlagartigen Vollbrandes (Flashover) maßgeblich vermindert [24].

Die technische Umsetzung dieser Ziele erfolgt in der Praxis meist über natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA) oder maschinelle Systeme (MRA). Die Bemessung erfolgt im Standardfall nach den anerkannten Regeln der Technik, wie der DIN 18232-2 oder DIN 18232-5 oder über vereinfachte Verfahren der entsprechenden Sonderbauvorschriften.

Stellt das Bauvorhaben eine Abweichung von diesen präskriptiven Normen dar, beispielsweise aufgrund einer Bestandssituation, komplexer Gebäudegeometrien oder aufgrund wirtschaftlicher Vorteile, ermöglicht das Baurecht die Zulassung von Abweichungen nach § 67 MBO oder Erleichterungen bei Sonderbauten nach § 51 MBO [22]. In diesem Kontext kann die computergestützte Brandsimulation als ingenieurmäßiger Nachweis dienen. Sie belegt auf wissenschaftlicher Basis, dass

die übergeordneten Baurechtlichen Schutzziele der MBO § 14 durch das gewählte Konzept vollumfänglich erfüllt werden, auch wenn von den pauschalen Bemessungsregeln nach Sonderbauvorschriften oder DIN-Normen abgewichen wird.

3.2 Definition und Systematik der Rauchfreihaltung

Die Rauchfreihaltung umfasst alle baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen, die darauf abzielen, die unkontrollierte Ausbreitung von Brandgasen zu verhindern und definierte Bereiche raucharm zu halten. In der Brandschutzpraxis wird hierbei zwischen der Rauchableitung zur Unterstützung der Feuerwehr und der gezielten Rauchfreihaltung zur Sicherung der Selbstrettung unterschieden. Da eine hundertprozentige Sicherheit zur Brandvermeidung technisch nicht realisierbar ist, liegt der Fokus der RWA auf der effektiven Schadensminimierung für Personen und Sachwerte [25].

3.2.1 Funktionsweise natürlicher Rauchabzugsanlagen (NRA)

Natürlich wirkende RWA machen sich den thermischen Auftrieb der heißen Brandgase zunutze. Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, strömen heiße Gase aufgrund ihrer geringeren Dichte nach oben und sammeln sich in der dachnahen Zone an. Dort entsteht ein lokaler Überdruck, während im bodennahen Bereich durch Ansaugen kühler Umgebungsluft ein Unterdruck vorherrscht. Bei einer NRA wird im Dach oder im oberen Wandbereich eine Öffnung freigegeben, durch die die heißen Gase ohne zusätzliche mechanische Energieabführung entweichen können [25]:

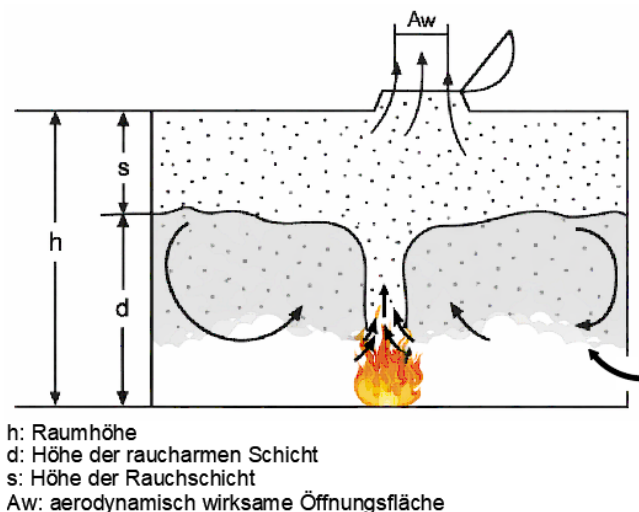


Bild 3.3: Funktionsprinzip einer NRA unter Ausnutzung des Kamineffektes [25]

Dieser in Bild 3.3 dargestellte Prozess basiert auf der Wechselwirkung zwischen dem statischen Druck im Brandraum und dem atmosphärischen Druck außerhalb des Gebäudes. Für die Funktion ist eine ausreichende Nachströmung von Zuluft im unteren Raumbereich zwingend erforderlich, da ohne diesen Massenausgleich die Thermik behindert würde. NRA sind besonders effektiv bei hohen Brandtemperaturen und finden primär in eingeschossigen Gebäuden Anwendung, bei denen die Decke gleichzeitig den oberen Gebäudeabschluss bildet [25].

3.2.2 Funktionsweise maschineller Rauchabzugsanlagen (MRA)

Bei der maschinellen Entrauchung werden die Brandgase mittels Ventilatoren und Kanalsystemen durch erzwungene Konvektion aus dem Raum abgeführt. Im Gegensatz zur NRA steht bei einer MRA die volle Volumenleistung unmittelbar nach der Aktivierung zur Verfügung. Dies ist insbesondere bei der Entwicklung von „kaltem Rauch“ vorteilhaft, da hier die für einen natürlichen Abzug notwendige Thermik fehlt. In Bild 3.4 ist ein Ventilator auf dem Dach zu erkennen, welcher über einen zentralen Abluftschacht mit den einzelnen Geschossen verbunden ist.

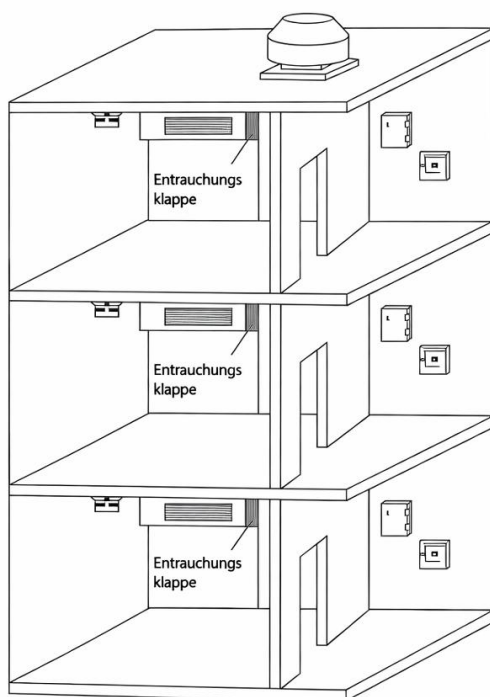


Bild 3.4: Funktionsweise einer MRA [25]

Die Aktivierung der MRA erfolgt meist automatisiert über eine Brandmeldeanlage oder Rauchwarnmelder. Nach Detektion eines Brandes öffnen sich die entsprechenden Entrauchungsklappen im jeweiligen Geschoss, während sie in den nicht betroffenen Geschossen geschlossen bleiben, um eine Rauchverschleppung zu verhindern. Über die Ventilatoren werden Rauch und heiße Brandgase angesaugt und über das Dach nach außen transportiert, was in den vom Brand betroffenen Räumen für eine raucharme Schicht sorgt.

Physikalisch ist bei der Modellierung einer MRA zu berücksichtigen, dass der geförderte Massenstrom bei steigenden Gastemperaturen abnimmt. Zudem erfordert auch die MRA eine definierte Zuluftführung im unteren Bereich, um einen unzulässig hohen

Unterdruck im Raum zu vermeiden, welcher das Öffnen von Türen im Bereich von Rettungswegen erschweren könnte. Die Aktivierung muss unmittelbar nach Brandausbruch erfolgen, um eine frühzeitige Evakuierung und Brandbekämpfung zu gewährleisten. Maschinelle Entrauchungsanlagen können auch in mehrgeschossigen Gebäuden und sogar unter Erdreie eingesezt werden [25].

Die Zuverlässigkeit einer MRA hängt maßgeblich von einer gesicherten Energieversorgung ab. Gemäß der Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR) müssen die elektrischen Leitungen so verlegt werden, dass ihre Funktion im Brandfall erhalten bleibt. Für MRA in Sonderbauten wird in der Regel ein Funktionserhalt von 90 Minuten (E90) gefordert, um die Entrauchung auch während eines ausgedehnten Löschangriffs sicherzustellen [26].

Im direkten Vergleich zu NRA stellt die maschinelle Entrauchung jedoch eine erheblich kostenintensivere Lösung dar. Die wirtschaftliche Belastung resultiert primär aus den strengen Anforderungen des Funktionserhalts gemäß MLAR, da nicht nur die Ventilatoren selbst, sondern die gesamte elektrische Infrastruktur inklusive der Zuleitungen und Verteiler für eine Brandbeanspruchung von 90 Minuten (E90) ausgelegt werden müssen. Diese Notwendigkeit spezieller Brandschutzkabel und aufwendiger Verlegetechniken führt zu signifikant höheren Investitions- und Installationskosten, die bei einer NRA aufgrund des autarken physikalischen Wirkprinzips entfallen.

4 Methodik der Untersuchung

4.1 Grenzwerte und Erfolgskriterien

Die Bewertung der Simulationsergebnisse erfolgt anhand definierter Erfolgskriterien, welche sicherstellen sollen, dass die bauordnungsrechtlichen Schutzziele erreicht werden. Als Maßstab dienen hierbei physiologische Belastungsgrenzen sowie Grenzwerte für die Orientierungsfähigkeit im Rauch.

Höhe der raucharmen Schicht

Das offensichtlichste Kriterium für die Selbstrettung ist die Aufrechterhaltung einer raucharmen Schicht. Gemäß Vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden des Brandschutzes sind zur sicheren Flucht je nach Raumhöhe und Sicherheitszuschlag typischerweise Schichthöhen von mindestens 2,50 m über Oberkante Fußboden (OKFF) nachzuweisen [11].

Dieses Kriterium gilt als konservativ, da es allein auf der physikalischen Stratifizierung basiert und noch keine individuellen Schadenswirkungen berücksichtigt. In der Simulation dient die 2,50 m Ebene daher als maßgebliche Bezugshöhe für die Auswertung aller weiteren qualitativen Parameter (Sichtweite, Temperatur, Toxizität).

Thermische Belastung:

Die thermische Belastung wird über die Gastemperatur (Konvektion) bewertet. Nach aktuellen medizinischen Erkenntnissen gelten Gastemperaturen in einem Bereich von 50°C bis 80°C für gesunde Personen über einen begrenzten Zeitraum als medizinisch unbedenklich [14]. Für die vorliegende Untersuchung wird daher ein konservativer Grenzwert von 60°C in der Aufenthaltszone (bis 2,50 m Höhe) festgelegt, um eine Gefährdung der flüchtenden Personen sicher auszuschließen.

Sichtweite und optische Dichte:

In großräumigen Gebäuden wie der hier betrachteten Halle reicht der Nachweis der Schichthöhe allein oft nicht aus. Insbesondere bei turbulenten Strömungen oder hoher Partikelemission müssen Nachweise für die Qualität der raucharmen Schicht erbracht werden. Hierzu wird die lichttrübende Wirkung des Rauches herangezogen. Die Lichttrübung wird durch die optische Dicht pro Weglänge D_L

oder den Extinktionskoeffizienten K quantifiziert. Beide Größen beschreiben den gleichen physikalischen Sachverhalt, unterscheiden sich jedoch in ihrer mathematischen Basis, wodurch sich folgender Umrechnungsfaktor ergibt [11]:

$$D_L = \frac{K}{\ln(10)} \approx 0,43 \cdot K \quad (4.1)$$

Für die numerische Modellierung ist der Zusammenhang zwischen der optischen Dichte und der Rußkonzentration entscheidend:

$$D_L = D_m \cdot \frac{c_{Ru\beta}}{Y_{Ru\beta}} \quad (4.2)$$

Hierbei bezeichnet D_m das Rauchpotenzial und $Y_{Ru\beta}$ die stoffspezifische Rußausbeute. Während Zellulose eine geringe Rußausbeute von ca. 0,015 kg/kg aufweist, liegt dieser Wert für Polyethylen bei ca. 0,06 kg/kg [11]. Alternativ wird zur Berechnung oft der massenspezifische Extinktionskoeffizient K_m verwendet, der für flammende Brände von Mischbrandlasten mit $8,7 \pm 1,1 \text{ m}^2/\text{g}$ angesetzt werden kann [9].

Die Sichtbarkeit von Rettungszeichen und Hindernissen korreliert reziprok mit der Rauchdichte. Basierend auf den Probandenversuchen von Jin [11] ergibt sich für die Erkennungsweite S :

$$S = \frac{C}{K} = \frac{C}{\ln(10) \cdot D_L} \quad (4.3)$$

Die Konstante C berücksichtigt die Leuchtdichte. In der Fachliteratur gelten Mittelwerte von $C = 8$ für hinterleuchtete Zeichen und $C = 3$ für beleuchtete/reflektierende Objekte. Gemäß Tabelle 8.3 des Vdfb-Leitfadens für Ingenieurmethoden im Brandschutz werden für eine mittlere Aufenthaltsdauer Anhaltswerte für die optische Dichte zwischen $0,1 \text{ m}^{-1}$ und $0,15 \text{ m}^{-1}$ als ausreichend definiert [11].

Für die vorliegende Untersuchung wird ein repräsentativer Mittelwert von $D_L = 0,125 \text{ m}^{-1}$ gewählt. Darüber hinaus wird einheitlich der konservative Faktor $C = 3$ gewählt, da sich Personen im Brandfall primär an baulichen Strukturen orientieren. Gemäß Formel (4.3) ergibt sich eine Sichtweite $S \approx 10 \text{ m}$. Daher wird für alle Szenarien eine Mindestsichtweite von 10 m als Erfolgskriterium definiert.

4.2 Spezifikation des Referenzmodells

Um eine belastbare Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen brandschutztechnischen Nachweisführungen zu gewährleisten, wurde ein einheitliches Referenzmodell erstellt. Dieses Modell dient als gemeinsame physikalische Grundlage für alle in dieser Arbeit betrachteten Bemessungsmethoden.

Das Untersuchungsmodell bildet eine Halle mit einer Gesamtlänge von ca. 68,70 m und einer Breite von ca. 46,20 m ab. Der für die Entrauchungsbetrachtung relevante Brandabschnitt umfasst eine Fläche von ca. 2.760 m² bei einer lichten Hallenhöhe von 8,00 m. Ein angrenzender Büro- und Sozialtrakt ist im Modell enthalten, wird jedoch aufgrund der räumlichen Trennung durch eine Brandwand als funktional autark betrachtet (siehe Bild 4.1). Die notwendigen Treppenträume im angrenzenden Büro- und Sozialbereich müssten bauordnungsrechtlich zwar entrauchet werden, sind allerdings nicht Bestandteil dieser Arbeit, da sich diese ausschließlich auf den Brandabschnitt Halle bezieht.

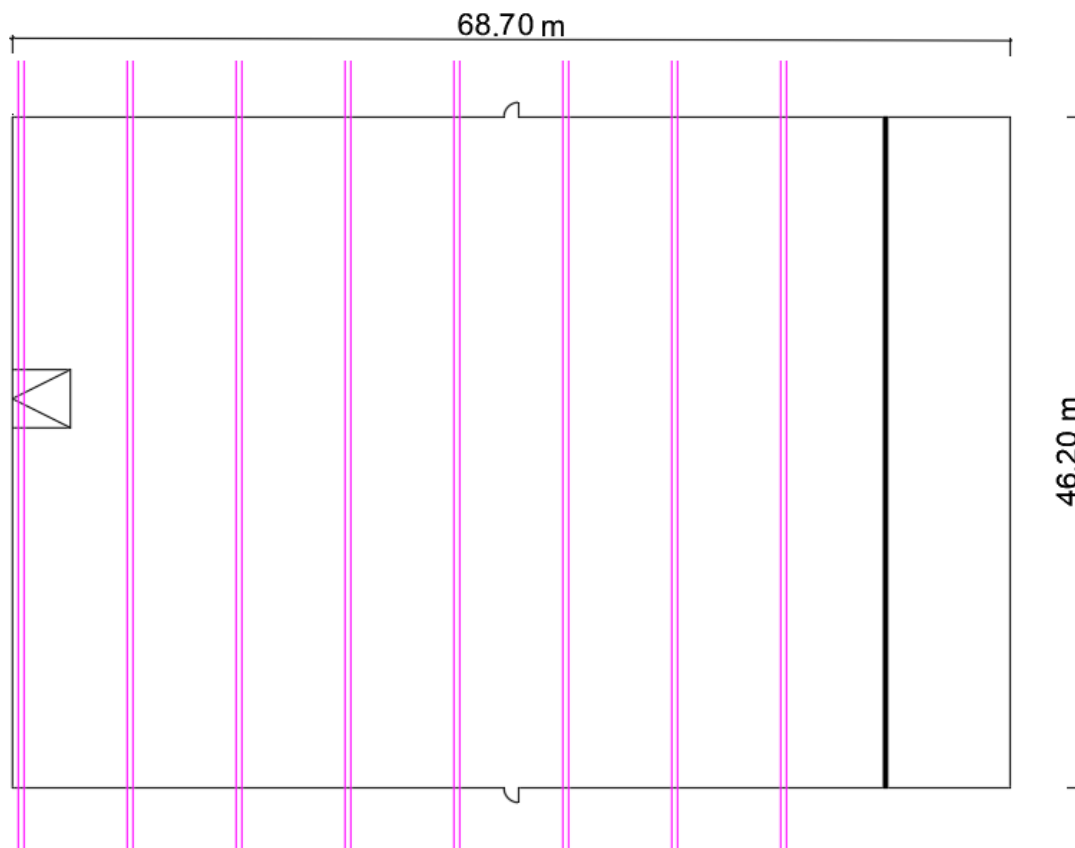


Bild 4.1: Vereinfachter Grundriss des Referenzmodells (eigene Darstellung)

Die Tragstruktur des Gebäudes besteht aus Stahlbetonstützen und -bindern, die gemäß baurechtlicher Anforderung mindestens als feuerhemmend (F30) eingestuft sind. Die Tragstruktur ist in folgender Abbildung dargestellt:

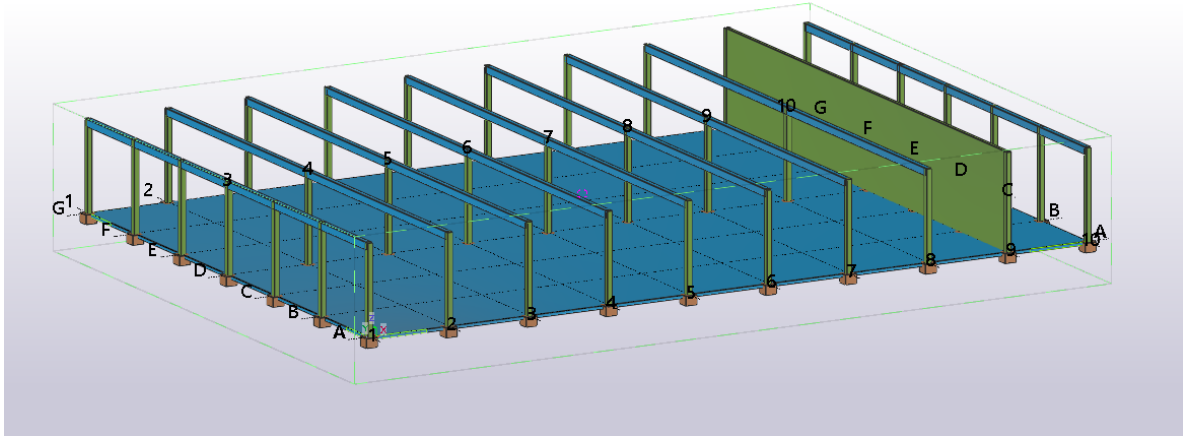


Bild 4.2: Darstellung der Tragkonstruktion des Referenzmodells (eigene Darstellung)

Das in Bild 4.2 dargestellte Referenzmodell wird für alle weiteren Bemessungsverfahren sowohl als Industriebau als auch als Verkaufsstätte bei gleichbleibender Geometrie zugrunde gelegt.

5 Pauschale Nachweisführung nach Sonderbauvorschriften

5.1 Bemessung der Rauchableitung nach MIndBauRL

Die brandschutztechnischen Maßnahmen eines Industriebaus werden maßgeblich durch die Muster-Industriebaurichtlinie (MIndBauRL) definiert. Diese Richtlinie legt ein präskriptives Sicherheitsniveau fest, das als vordefiniertes Schutzziel die Unterstützung der Brandbekämpfung sicherstellt. In diesem Kontext fungiert die Rauchableitung nicht als flexibles Gestaltungselement, sondern als starre baurechtliche Anforderung, die rein aus der Geometrie und der Nutzung des Brandabschnittes resultiert.

Das zu betrachtende Referenzmodell als Lagerhalle verfügt über eine Brandabschnittsfläche von ca. 2.760 m² ohne Ebenen und Einbauten. Das Tragwerk besteht aus Stahlbeton, weshalb eine Feuerwiderstandsdauer von mindestens 30 Minuten (F30) angenommen werden kann. Nach Tabelle 2 der MIndBauRL sind demnach Brandabschnitte von bis zu 3.000 m² zulässig [27].

Die Bemessung erfolgt ausschließlich mit dem vereinfachten Nachweisverfahren nach MIndBauRL Abschnitt 6. Das Rechenverfahren nach Abschnitt 7 wird nicht betrachtet.

Ein wesentliches Merkmal der pauschalen Nachweisführung nach Abschnitt 6 der MIndBauRL ist die konzeptionelle Entkopplung der vorhandenen Sicherheitskategorie von der Dimensionierung der Rauchabzugsflächen. Gemäß MIndBauRL Abschnitt 5.7 erfolgt die Dimensionierung der Rauchabzugsflächen unabhängig von der gewählten Anlagentechnik. Das Bemessungsverfahren ist daher für alle drei festgelegten Varianten identisch. Allgemein gilt nach MIndBauRL Abschnitt 5.7:

„Produktions-, Lagerräume und Ebenen mit jeweils mehr als 200 m² Grundfläche müssen zur Unterstützung der Brandbekämpfung entrauchet werden können.“ [27]

Innerhalb der MIndBauRL gibt es jedoch drei unterschiedliche Verfahren für die Bemessung der Rauchabzugsflächen für Produktions- und Lagerräume ohne Ebenen:

- 1) Natürliche Rauchabzugsanlagen nach Abschnitt 5.7.1.1

Gemäß MIndBauRL Abschnitt 5.7.1.1 ist für Produktions- und Lagerräume ohne Ebenen mit einer Grundfläche von mehr als 200 m² eine obligatorische Entrauchungsmöglichkeit vorgesehen, um den Einsatzkräften der Feuerwehr den Angriffsweg sowie die Lokalisierung des Brandherdes zu erleichtern. Die Konformität mit diesem Schutzziel wird insbesondere durch die Installation thermisch auslösender Rauchabzugsgeräte erreicht, die im Dachbereich oder alternativ im oberen Raumdrittel angeordnet werden.

Die Dimensionierung folgt hierbei einem strengen geometrischen Verteilungsschlüssel: Um eine flächendeckende Wirksamkeit zu garantieren und eine unzulässige Rauchansammlung in Teilbereichen der Halle zu verhindern, muss pro angefangene 400 m² Grundfläche mindestens ein Rauchabzugsgerät vorgesehen werden. Die Leistungsfähigkeit dieser Geräte wird dabei nicht über den rein geometrischen Querschnitt, sondern über die aerodynamisch wirksame Fläche A_w definiert. Diese hat in der Summe mindestens 1,5 m² je 400 m² Brandbekämpfungsabschnittsfläche zu betragen [27].

Über die rein flächenbezogenen Parameter hinaus fordert die Richtlinie eine funktionale Segmentierung des Systems. Zur Gewährleistung einer gezielten und lageabhängigen Aktivierung ist je höchstens 1.600 m² Dachfläche mindestens eine eigenständige Auslösegruppe zu bilden [27]. Dies stellt sicher, dass im Einsatzfall eine taktische Ansteuerung der Anlagen erfolgen kann, ohne die thermische Schichtung in unbeteiligten Hallenbereichen unnötig zu stören. Ergänzt wird dieses System durch die notwendige Bereitstellung von Zuluftflächen im unteren Raumdrittel, die mit einem freien Querschnitt von insgesamt mindestens 12 m² den erforderlichen Massenausgleich für den thermischen Auftrieb ermöglichen [27].

Aus der zuvor hergeleiteten Anforderung je 400 m² Grundfläche mindestens eine Abzugsstelle vorzusehen, ergibt sich für das Referenzobjekt die nachfolgende Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der notwendigen Geräteanzahl.

$$N_{\text{Rauchabzugsgeräte}} = \frac{\text{Grundfläche}}{400 \text{ m}^2} \quad (5.1)$$

Unter Berücksichtigung der projektspezifischen Grundfläche von ca. 2.760 m² des Raumes resultiert aus dieser Gleichung ein rechnerischer Wert von

$N_{Rauchabzugsgeräte} = 6,9$. Da die Industriebaurichtlinie stets die Abdeckung der vollen Fläche fordert und Bruchteile von Geräten technisch nicht realisierbar sind, ist die Anzahl auf den nächsthöheren Wert aufzurunden. Demnach sind für das Referenzmodell insgesamt 7 Rauchabzugsgeräte im Dachbereich vorzusehen, um die normgerechte Flächendeckung sicherzustellen.

Basierend auf der ermittelten Gerätezahl ist im nächsten Schritt die erforderliche aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche A_w zu bestimmen. Da die MIndBauRL eine Mindestleistung von $1,5 \text{ m}^2$ je angefangene 400 m^2 Grundfläche vorschreibt, ergibt sich für das Gesamtsystem folgende Bemessung:

$$\text{erf. } A_w = N_{Rauchabzugsgeräte} \cdot 1,5 \text{ m}^2 \quad (5.2)$$

Für das Referenzmodell mit sieben erforderlichen Rauchabzugsgeräten resultiert daraus eine erforderliche aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche von $A_w = 10,50 \text{ m}^2$. Diese Fläche stellt das rechnerische Minimum dar, um den Anforderungen an eine ausreichende Rauchableitung zur Unterstützung der Brandbekämpfung gerecht zu werden.

Um die erforderliche aerodynamisch wirksame Fläche herzustellen, muss die geometrische Fläche A_g aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten signifikant größer dimensioniert werden. Rauchabzugsgeräte verhalten sich strömungstechnisch wie Ausströmöffnungen, deren Effektivität durch das Zusammenspiel von Kontraktion und Reibung gemindert wird. Werden Rauchabzugsanlagen mit einer einfachen, rechtwinkligen Öffnungsfläche verbaut, so löst die aufwärts strömende Heißgasschicht an den Kanten des Geräts ab. Infolgedessen entsteht eine Strömungseinschnürung, die den freien Strömungsquerschnitt verkleinert und damit die Wirksamkeit der Anlage beeinträchtigen kann [25].

Wie in Bild 5.1 ersichtlich, führt die Ablösung an den Randbereichen dazu, dass die effektiv nutzbare aerodynamisch wirksame Fläche A_w deutlich geringer ausfällt als die geometrische Einbauöffnung A_g oder der Austrittsquerschnitt A_{ex} :

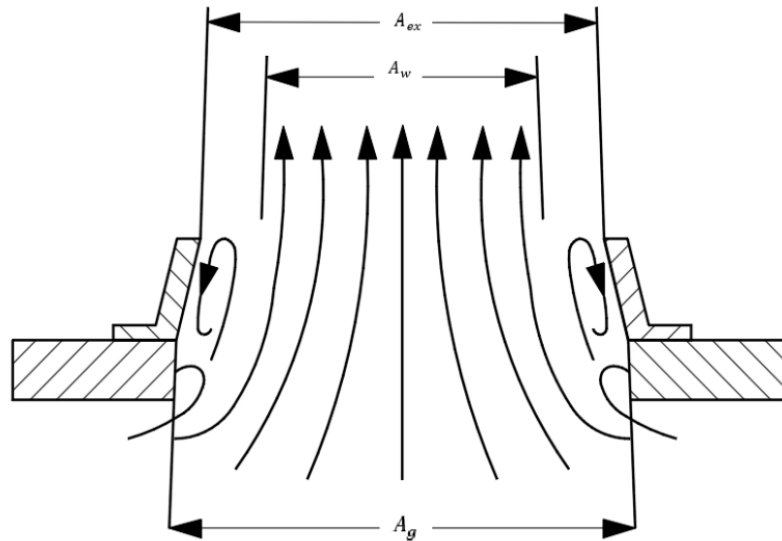


Bild 5.1: Rechtwinklige Ausströmöffnung mit geknicktem Profil (vereinfacht) [25]

Diese Strahlungseinschnürung wird durch die Kontraktionszahl κ definiert, welche bei scharfkantigen Mündungsformen etwa 0,61 beträgt. Zusätzlich treten im Öffnungsbereich geschwindigkeitsabhängige Reibungskräfte auf, die gemeinsam mit der Einschnürung dazu führen, dass der tatsächliche Volumenstrom kleiner ist, als der theoretisch mögliche Wert bezogen auf den geometrischen Querschnitt. In der modernen Anlagentechnik werden zur Kompensation dieser Effekte Knickprofile verwendet und Kranzneigungen optimiert, um eine Wirbelbildung weitgehend zu verhindern [25]. Das Ziel dieser konstruktiven Optimierung ist es, das Produkt aus Austrittsquerschnitt A_{ex} und Austrittszahl μ zu maximieren, wobei letztere experimentell für jedes Gerät im Labor bestimmt werden muss.

In der brandschutztechnischen Bemessung wird dieser Zusammenhang durch den Durchflussbeiwert c_v abgebildet. Mithilfe dieses Beiwertes lässt sich die notwendige geometrische Öffnungsfläche für das zugrunde liegende Referenzmodell gemäß Gleichung (5.3) bestimmen:

$$A_g = \frac{erf. A_w}{c_v} \quad (5.3)$$

Für die weitere Bemessung des Referenzmodells wird pauschal ein Durchflussbeiwert von $c_v = 0,65$ angesetzt. Für die erforderliche aerodynamisch wirksame Fläche von $A_w = 10,50 \text{ m}^2$ resultiert eine tatsächlich vorzuhaltende geometrische Gesamtöffnungsfläche von $A_g = 16,15 \text{ m}^2$.

2) Vereinfachtes Bemessungsverfahren über Öffnungen nach Abschnitt 5.7.1.2

Ergänzend zur Bemessung über NRA oder MRA lässt die MIndBauRL unter bestimmten baulichen Voraussetzungen ein vereinfachtes Verfahren zu. Dieses verzichtet auf den Nachweis der aerodynamischen Wirksamkeit und stützt sich stattdessen auf pauschale geometrische Querschnitte. In Abschnitt 5.7.1.2 MIndBauRL wird hierzu ausgeführt:

„Die Anforderung ist insbesondere erfüllt für Produktions- und Lager Räume mit nicht mehr als 1600 m² Grundfläche, wenn

– diese Räume entweder an der obersten Stelle Öffnungen zur Rauchableitung mit einem freien Querschnitt von insgesamt 1 v. H. der Grundfläche oder

– im oberen Drittel der Außenwände angeordnete Öffnungen, Türen oder Fenster mit einem freien Querschnitt von insgesamt 2 v. H. der Grundfläche haben

sowie Zuluftflächen in insgesamt gleicher Größe jedoch mit nicht mehr als 12 m² freiem Querschnitt vorhanden sind, die im unteren Raumdrittel angeordnet werden sollen.“ [27]

Bei der Anwendung dieses Verfahrens auf das vorliegende Referenzmodell zeigt sich jedoch eine normative Restriktion. Mit einer projektspezifischen Grundfläche von ca. 2.760 m² überschreitet das betrachtete Lager deutlich die maximal zulässige Fläche von 1.600 m² für dieses vereinfachte Nachweisverfahren.

Daraus lässt sich ableiten, dass die pauschale Festlegung von Öffnungsquerschnitten bei großflächigen Industriebauten nicht mehr ausreicht, um die brandschutztechnischen Schutzziele zuverlässig zu gewährleisten. Das vereinfachte Verfahren nach MIndBauRL Abschnitt 5.7.1.2 scheidet als Nachweisweg für das Referenzobjekt aus.

3) Vereinfachtes Bemessungsverfahren über Öffnungen nach Abschnitt 5.7.1.3

Als dritte Variante sieht die Muster-Industriebaurichtlinie den Einsatz maschineller Rauchabzugsanlagen vor. Diese Systeme gewährleisten durch motorische Unterstützung einen definierten Volumenstrom, unabhängig von den thermischen

Auftriebskräften des Brandes. Die normativen Anforderungen hierzu sind in Abschnitt 5.7.1.3 MIndBauRL wie folgt definiert:

„Die Anforderung ist insbesondere auch erfüllt, wenn maschinelle Rauchabzugsanlagen vorhanden sind, bei denen je höchstens 400 m² der Grundfläche der Räume mindestens ein Rauchabzugsgerät oder eine Absaugstelle mit einem Luftvolumenstrom von 10 000 m³/h im oberen Raumdrittel angeordnet werden. Bei Räumen mit mehr als 1600 m² Grundfläche genügt

– zu dem Luftvolumenstrom von 40 000 m³/h für die Grundfläche von 1600 m² ein zusätzlicher Luftvolumenstrom von 5000 m³/h je angefangene weitere 400 m² Grundfläche; der sich ergebende Gesamtvolumenstrom je Raum ist gleichmäßig auf die nach Satz 1 anzuordnenden Absaugstellen oder Rauchabzugsgeräte zu verteilen, oder

– ein Luftvolumenstrom von mindestens 40 000 m³/h je Raum, wenn sichergestellt ist, dass dieser Luftvolumenstrom im Bereich der Brandstelle auf einer Grundfläche von höchstens 1 600 m² von den nach Satz 1 anzuordnenden Absaugstellen oder Rauchabzugsgeräte gleichmäßig gefördert werden kann.“ [27]

Eine Übersicht für bestimmte Raumgrößen und deren resultierender Luftvolumenstrom vermittelt folgende Tabelle:

Tabelle 5.1: Mindestvolumenströme für eine maximale Raumgrundfläche und flächenmäßige Verteilung von Rauchabzugsgeräten oder Absaugstellen in einem Raum [28]

Grundfläche Raum [m ²]	Anzahl der Geräte / Stellen im Raum	Luftvolumenstrom gesamt [m ³ /h]	Luftvolumenstrom (gerundet) je Gerät/Stelle [m ³ /h]
≤ 400	1	10.000	10.000
≤ 800	2	20.000	10.000
≤ 1200	3	30.000	10.000
≤ 1600	4	40.000	10.000
≤ 2000	5	45.000	9.000
≤ 2400	6	50.000	8.300
≤ 2800	7	55.000	7.800
≤ 3200	8	60.000	7.500
≤ 3600			

Für das zugrunde liegende Referenzmodell mit einer Fläche von ca. 2.760 m² für den Lagerbereich ergibt sich gemäß Tabelle 5.1 ein erforderlicher Gesamtvolumenstrom von 55.000 m³/h. Dieser ist auf insgesamt sieben

Absaugstellen zu verteilen, woraus eine spezifische Förderleistung von ca. 7.800 m³/h je Gerät resultiert.

5.2 Bemessung der Rauchableitung nach MVKVO

Um eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Sonderbauten herzustellen, wird das identische Referenzmodell ergänzend als Drogeriemarkt betrachtet. Die Rauchableitung dient hier primär dazu, die Rettungswege raucharm zu halten und der Feuerwehr die Angriffswege zur Brandbekämpfung zu ermöglichen. Die Betrachtung erfolgt nach der Muster-Verkaufsstättenverordnung [29].

Gemäß MVKVO § 16 (1) gilt hierbei [29]:

„In Verkaufsstätten müssen Verkaufsräume und sonstige Aufenthaltsräume mit jeweils mehr als 200 m² Grundfläche, Ladenstraßen sowie notwendige Treppenträume zur Unterstützung der Brandbekämpfung entrauchet werden können.“

Auch hier können die Betrachtungsvarianten (ohne brandschutztechnische Maßnahmen, mit Brandmeldeanlage, mit Sprinkleranlage) zusammengeführt werden, da die Verkaufsstättenverordnung ein pauschales Nachweisverfahren bietet.

Die MVKVO spiegelt analog zur MIndBauRL drei grundlegende Systematiken der Rauchableitung wider, welche von vereinfachten Öffnungen zur Rauchableitung bis zur maschinellen Rauchabführung gehen.

- 1) Vereinfachtes Bemessungsverfahren über Öffnungen zur Rauchableitung nach MVKVO § 16 (2) Nr. 2

Das vereinfachte Verfahren über Öffnungen zur Rauchableitung stützt sich auf reine geometrische Querschnitte ohne den Nachweis der aerodynamischen Wirksamkeit. Gemäß MVKVO § 16 (2) Nr. 2 wird die Rauchableitung wie folgt bemessen:

„[...] Verkaufsräumen, sonstigen Aufenthaltsräumen und Lagerräumen mit nicht mehr als 1.000 m² Grundfläche, wenn diese Räume entweder an der obersten Stelle Öffnungen zur Rauchableitung mit einem freien Querschnitt von insgesamt 1 v. H. der Grundfläche oder im oberen Drittel der Außenwände angeordnete Öffnungen, Türen oder Fenster mit einem freien Querschnitt von insgesamt 2 v. H. der Grundfläche haben und Zuluftflächen in insgesamt gleicher Größe, jedoch mit nicht

mehr als 12 m² freiem Querschnitt, vorhanden sind, die im unteren Raumdrittel angeordnet werden sollen“ [29]

Da die reine Verkaufsfläche des Referenzmodelles jedoch ca. 2.760 m² beträgt und die 1.000 m² Grundfläche dieses Nachweisverfahrens deutlich überschreitet, lässt sich ableiten, dass die pauschale Festlegung von Öffnungsquerschnitten bei großflächigen Verkaufsstätten nicht als hinreichend sicher gilt. Somit scheidet das vereinfachte Verfahren nach MVKVO § 16 (2) Nr. 2 als weiterer Nachweisweg für das Referenzobjekt aus.

2) Natürliche Rauchabzugsanlagen nach MVKVO § 16 (2) Nr. 3

Da das zuvor geprüfte vereinfachte Verfahren aufgrund der Flächenüberschreitung des Referenzmodells nicht anwendbar ist, erfolgt die Bemessung nach den spezifischen Anforderungen für Verkaufsräume mit mehr als 1.000 m² Grundfläche.

Laut MVKVO § 16 (2) Nr. 3 ist die Anforderung an die Rauchableitung hinreichend erfüllt, bei:

„Verkaufsräumen, sonstigen Aufenthaltsräumen und Lagerräumen mit mehr als 1.000 m² Grundfläche, wenn diese Räume Rauchabzugsanlagen haben, bei denen je höchstens 400 m² der Grundfläche mindestens ein Rauchabzugsgerät mit mindestens 1,5 m² aerodynamisch wirksamer Fläche im oberen Raumdrittel angeordnet wird“ [29]

Die Anzahl der erforderlichen Rauchabzugsgeräte wird analog zum pauschalen Bemessungsverfahren nach MIndBauRL nach Gleichung (5.1) bestimmt. Bei einer Fläche von ca. 2.760 m² für die Verkaufsfläche sind 7 Rauchabzugsgeräte mit einer aerodynamisch wirksamen Fläche von jeweils 1,5 m² erforderlich. Dadurch ergibt sich eine gesamte erforderliche aerodynamisch wirksame Fläche $A_w = 10,50 \text{ m}^2$ nach Gleichung (5.2). Unter Berücksichtigung des in Kapitel 5.1 hergeleiteten Durchflussbeiwertes von $C_v = 0,65$ entspricht dies einer geometrischen Gesamtöffnungsfläche von ca. 16,15 m² gemäß Gleichung (5.3).

3) Maschinelle Rauchabzugsanlagen nach MVKVO § 16 (3)

Als technische Alternative zur natürlichen Entrauchung lässt auch die MVKVO den Einsatz maschineller Rauchabzugsanlagen zu. Die Anforderungen an die

Volumenströme sind in § 16 (3) MVKVO definiert und folgen einer degressiven Staffelregelung, die deckungsgleich mit den Vorgaben der MIndBauRL ist:

„Die Anforderung [...] ist insbesondere auch erfüllt, wenn [...] maschinelle Rauchabzugsanlagen vorhanden sind, bei denen je höchstens 400 m² der Grundfläche der Räume mindestens ein Rauchabzugsgerät oder eine Absaugstelle mit einem Luftvolumenstrom von 10.000 m³/h im oberen Raumdrittel angeordnet wird. Bei Räumen mit mehr als 1.600 m² Grundfläche genügt

1. zu dem Luftvolumenstrom von 40.000 m³/h für die Grundfläche von 1.600 m² ein zusätzlicher Luftvolumenstrom von 5.000 m³/h je angefangene weitere 400 m² Grundfläche; [...] oder

2. ein Luftvolumenstrom von mindestens 40.000 m³/h je Raum, wenn sichergestellt ist, dass dieser Luftvolumenstrom im Bereich der Brandstelle auf einer Grundfläche von höchstens 1.600 m² von den [...] anzuordnenden Absaugstellen oder Rauchabzugsgeräten gleichmäßig gefördert werden kann.“ [29]

Für die Verkaufsfläche von ca. 2.760 m² ergibt sich somit analog zur Berechnung in Kapitel 5.1 ein erforderlicher Gesamtluftvolumenstrom von 55.000 m³/h bei 7 erforderlichen Absaugstellen.

6 Analytische Nachweisführung nach DIN 18232-2 und 18232-5

Die Auslegung von Rauchschutzsystemen folgt entweder dem Prinzip des thermischen Auftriebs nach DIN 18232-2 oder der ventilatorgestützten Förderung nach DIN 18232-5. Während natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA) maßgeblich von der Hallengeometrie und den thermischen Auftriebskräften abhängen, basiert die Bemessung maschineller Anlagen (MRA) auf definierten Volumenströmen.

Der Vergleich zwischen Industriebau und Verkaufsstätte verdeutlicht, wie stark das jeweilige Risikoprofil die notwendige Dimensionierung beeinflusst. Um die mathematische Sensitivität der Regelwerke aufzuzeigen, werden die Szenarien stufenweise unter Berücksichtigung verschiedener Sicherheitsniveaus analysiert. Hierbei bildet der Grundzustand ohne zusätzliche anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen die Referenz. Dieser wird der zeitlichen Optimierung durch eine Brandmeldeanlage (BMA) sowie der physikalischen Brandbegrenzung mittels Sprinkleranlage gegenübergestellt.

6.1 Bemessung natürlicher Rauchabzugsanlagen (NRA) nach DIN 18232-2

Die Auslegung natürlicher Rauchabzugsanlagen nutzt den thermischen Auftrieb, um Brandgase gezielt aus dem Gebäude abzuführen. Die Dimensionierung der aerodynamisch wirksamen Flächen wird dabei maßgeblich durch das Zusammenspiel aus Hallengeometrie, angestrebter Schichtdicke und der rechnerischen Brandleistung bestimmt.

Im Fokus steht hierbei die Abhängigkeit der Abzugsflächen von der gewählten Bemessungsgruppe sowie der Rauchabschnittsgröße. Die Untersuchung zeigt auf, wie eine frühzeitige Detektion oder eine automatisierte Brandbekämpfung die Brandentwicklung beeinflussen und somit die erforderliche Kapazität der Entrauchungsöffnungen im Dachraum reduzieren.

6.1.1 Festlegung der Rahmenbedingungen

Um die Auswirkungen der Anlagentechnik auf die Dimensionierung nach DIN 18232-2 aufzuzeigen, wird die Nachweisführung stufenweise in drei Sicherheitsniveaus variiert. Ausgehend von einem rein baulichen Grundzustand

wird analysiert, wie eine automatische Branddetektion den Faktor Zeit optimiert und eine Sprinkleranlage die rechnerische Brandfläche physikalisch begrenzt. Diese methodische Abstufung macht die mathematische Korrelation zwischen technischer Kompensation und den erforderlichen Öffnungsflächen transparent.

Für die Bemessung der natürlichen Rauchabzugsflächen nach DIN 18232-2 wird vorausgesetzt, dass eine Begrenzung der Rauchabschnittsflächen auf maximal 1.600 m² durch Rauchschürzen sowie ein maximaler Abstand von 60 m zwischen den begrenzenden Bauteilen eingehalten wird [30].

Das fiktive Gebäudemodell wird in diesem Zuge als Industriehalle sowie als Verkaufsstätte mit angrenzendem Büro- und Sozialbereich betrachtet. Um die normativen Grenzwerte einzuhalten, wird der Hallen- bzw. Verkaufsbereich durch eine mittig angeordnete Rauchschürze in zwei gleichgroße Rauchabschnitte mit einer Fläche von jeweils ca. 1380 m²

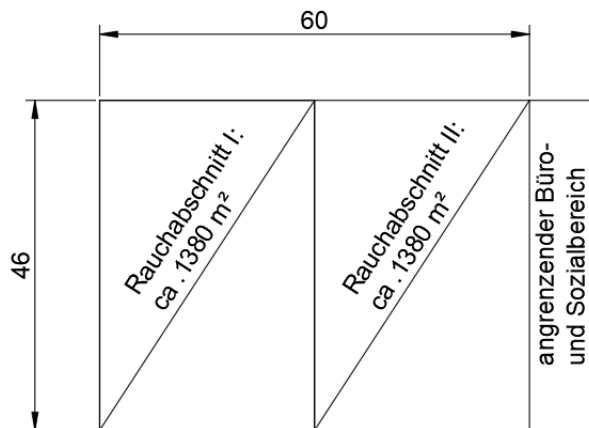
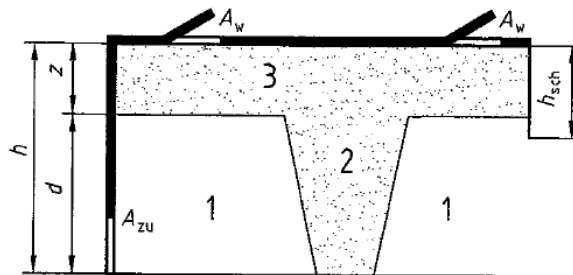


Bild 6.1: Vereinfachte Darstellung der Rauchabschnitte (eigene Darstellung)

unterteilt. Der angrenzende Büro- und Sozialtrakt ist dabei durch eine Brandwand von der Halle bzw. vom Verkaufsraum getrennt und bleibt für die Nachweisführung unberücksichtigt (siehe Bild 6.1).

Für die Bemessung der Rauchabzugsfläche sind einige Einflussgrößen von Bedeutung, wie folgende schematische Darstellung aufzeigt:



Legende

- | | |
|---|--|
| A_w Rauchabzugsfläche in m ² | z Höhe der Rauchschicht ($h - d$) in m |
| A_{zu} Größe der Zuluftfläche in m ² | 1 raucharme Schicht |
| d Höhe der raucharmen Schicht in m | 2 Plume |
| h Höhe des zu schützenden Raumes in m | 3 Rauchschicht |
| h_{sch} Höhe der Rauchschürze in m | |

Bild 6.2: Schematische Darstellung von NRA in einem Rauchabschnitt nach DIN 18232-2 [30]

Die Raumhöhe h ist dabei die lichte Höhe der Halle/des Verkaufsräum, was im Falle unseres Referenzmodells ca. 8,00 m sind. Die Definition der raucharmen Schicht d orientiert sich an der Nutzung sowie der baulichen Randbedingungen. Gemäß DIN 18232-2 sind je nach Raumhöhe raucharme Schichten bis zu 11,0 m möglich [30]. Da das Gebäude über Zulufttore mit einer Höhe von 4,00 m verfügt, muss die raucharme Schicht d so dimensioniert werden, dass eine Beeinträchtigung der einströmenden Frischluft durch die absinkende Rauchgasschicht ausgeschlossen ist. Die angestrebte raucharme Schicht wird daher auf $d = 5,00$ m festgelegt. Damit ragt die raucharme Schicht mindestens 1,00 m über die Oberkante der Zuluftöffnungen hinaus.

Bei einer lichten Hallenhöhe von ca. 8,00 m resultiert dadurch eine rechnerische Rauchschiehtdicke von $z = 3,00$ m. Da die angestrebte raucharme Schicht den Schwellenwert von $d = 4,00$ m überschreitet, genügt es, wenn die Rauchschieht gleich der Höhe der Rauchschieht ist.

Die Anordnung der Rauchschieht sowie die Höhe der raucharmen Schicht werden durch folgende Prinzipskizze (Bild 6.3) verdeutlicht und sind Grundlage für die Nachweisführung des Industriebaus sowie der Verkaufsstätte:

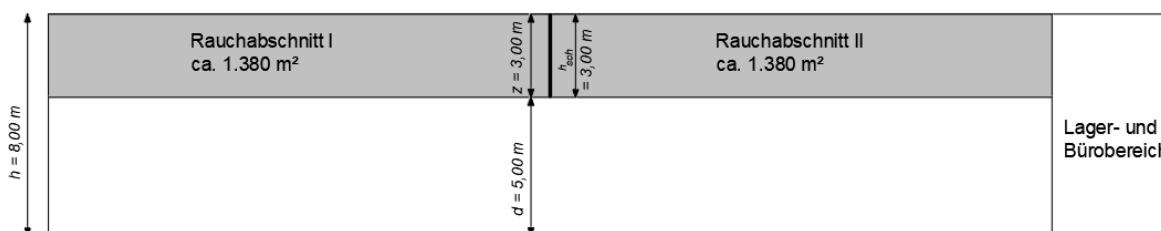


Bild 6.3: Prinzipskizze der geometrischen Rahmenbedingungen (eigene Darstellung)

6.1.2 Nachweisführung für den Industriebau

Variante A: Nachweisführung ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen

Im ersten Szenario wird die Bemessung ohne Berücksichtigung von Anlagentechnik durchgeführt.

1) Erwartete Brandentwicklungsdauer

Die zu erwartende Brandentwicklungsdauer umfasst den gesamten Zeitraum von der Entstehung eines Brandes bis zum Beginn wirksamer Löschmaßnahmen.

Dieser Wert setzt sich gemäß DIN 18232-2 aus zwei definierten Teilphasen zusammen.

Dabei ist Phase 1 der Zeitpunkt der Brandentstehung bis zur Brandmeldung. Für diesen Zeitraum sieht die DIN je nach anlagentechnischer Ausstattung folgende Zeitansätze vor [30]:

- 0 Minuten: Bei Vorhandensein einer Brandmeldeanlage (BMA) mit automatischen Brandmeldern und automatischer Brandmeldung an die Feuerwehr
- 5 Minuten: Bei Vorhandensein von automatischen Brandmeldern nach DIN EN 54-7 [31], die auf die Kenngröße Rauch ansprechen und eine Auslösung der NRA begünstigen.
- 10 Minuten: Wenn keinerlei detektionstechnische Maßnahmen getroffen werden (Regelfall).

Phase 2 beschreibt die Interventionszeit der Feuerwehr, also der Zeitraum zwischen der Brandmeldung bis zum Beginn der Brandbekämpfung. Diese wird wie folgt nach den örtlichen Gegebenheiten bemessen [30]:

- 5 Minuten: Bei günstigen Verhältnissen, z.B. dem Vorhandensein einer Werkfeuerwehr
- 10 Minuten: Bei mittleren Verhältnissen (Regelfall)
- 15 Minuten: Bei ungünstigen Verhältnissen
- 20 Minuten: Bei außergewöhnlich ungünstigen Verhältnissen.

Da für dieses Szenario keine anlagentechnischen Maßnahmen vorgesehen sind, wird für die 1. Phase der Regelfall von 10 Minuten angesetzt. In Kombinationen mit einer normalen Interventionszeit der öffentlichen Feuerwehr bei mittleren Verhältnissen, welche ebenfalls 10 Minuten beträgt, ergibt sich eine Gesamtbrandentwicklungsdauer von 20 Minuten.

2) Festlegung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Die Brandausbreitungsgeschwindigkeit ist das Maß für die horizontale Ausbreitung des Brandes und ist neben der Brandentwicklungsdauer die zweite maßgebliche Größe für die Festlegung der Bemessungsgruppe. Sie ist abhängig von der Art der Nutzung sowie der vorhandenen Brandlast. Die DIN 18232-2 differenziert hierbei zwischen drei unterschiedlichen Kategorien [30]:

- besonders geringe Brandausbreitungsgeschwindigkeit, z.B. bei Lagerung brennbarer Stoffe in nichtbrennbaren Verpackungen
- mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit als Regelfall
- besonders große Brandausbreitungsgeschwindigkeit, z.B. bei Lagerung leicht entflammbarer Stoffe mit brennbarer Verpackung

Es wird die Annahme getroffen, dass innerhalb dieser Halle überwiegend nichtbrennbare Güter gelagert werden. Dazu gehören Maschinenteile und Werkzeuge in Holzkisten oder Elektronikbauteile mit geringem Kunststoffanteil.

Es wird eine mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit angesetzt.

3) Festlegung der Bemessungsgruppe

Aus der Korrelation der Brandentwicklungsdauer von 20 Minuten sowie einer mittleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit lässt sich die Bemessungsgruppe nach Tabelle 2 (siehe Tabelle 6.1) der DIN 18232-2 bestimmen.

Tabelle 6.1: Ermittlung der Bemessungsgruppen nach Tabelle 2 der DIN 18232-2 [30]

Anzusetzende Brandentwicklungsdauer (siehe 5.6)	Bemessungsgruppe bei einer Brandausbreitungsgeschwindigkeit		
	besonders gering	mittel ^a	besonders groß
min			
≤ 5	1	2	3
≤ 10	2	3	4
≤ 15	3	4	5
≤ 20 ^a	4	5 ^a	5 ^b
> 20	5	5 ^b	5 ^b

^a Durchschnittswerte ohne besonderen Nachweis; bei der Verwendung dieser Durchschnittswerte ergibt sich hierbei die Bemessungsgruppe 5 (fett dargestellt).

^b In diesen Fällen sind die Schutzziele dieser Norm allein durch NRA nicht erreichbar. Es sind weitere Maßnahmen zur Erreichung der Schutzziele erforderlich.

Gemäß dieser Tabelle wird die Bemessungsgruppe für dieses Szenario mit 5a angesetzt.

4) Ermittlung der notwendigen Rauchabzugsfläche A_w je Rauchabschnitt

Auf Grundlage der zuvor ermittelten Bemessungsgruppe 5 und festgelegten technischen und geometrischen Randbedingungen lässt sich mit Hilfe der Tabelle 3 (siehe Tabelle 6.2) der DIN 18232-2 die notwendige Rauchabzugsfläche für den entsprechenden Rauchabschnitt bestimmen:

Tabelle 6.2: Auszug aus der Tabelle 3 der DIN 18232-2 [30]

Raumhöhe ^a <i>h</i> in m	Höhe der Rauchschrift <i>z</i> in m	Höhe der raucharmen Schrift <i>d</i> in m	Notwendige Rauchabzugsfläche A_w in m ²				
			Bemessungsgruppe				
			1	2	3	4	5
8,0	5,5	2,5	1,5	1,9	2,5	3,3	4,6
	5,0	3,0	2,1	2,8	3,6	4,8	6,5
	4,5	3,5	2,8	3,9	5,0	6,6	8,8
	4,0	4,0	3,6	5,2	6,9	8,9	11,7
	3,5	4,5	4,4	6,5	9,3	11,8	15,4
	3,0	5,0	5,4	8,1	11,9	15,7	20,2
	2,5	5,5	6,5	9,9	14,8	20,7	26,5
	2,0	6,0	8,4	12,2	18,6	27,2	34,9
	1,5	6,5	11,7	15,2	23,6	35,2	47,1
	1,0	7,0	17,1	19,9	31,4	47,7	66,8

Die notwendige aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche für die Rauchabschnitte I und II beträgt jeweils $A_w = 20,20 \text{ m}^2$.

Um die geometrische Öffnungsfläche A_g der NRA zu bestimmen wird die aerodynamisch wirksame Fläche mittels des Durchflussbeiwertes c_v korrigiert. Für die weitere Bemessung wird der zuvor hergeleiteter, pauschaler, durchschnittlicher Wert von $c_v = 0,65$ angesetzt.

Für die Ermittlung der geometrischen Rauchabzugsfläche wird die Gleichung (5.3) herangezogen. Daraus ergibt sich folgende geometrische Rauchabzugsfläche je Rauchabschnitt: $A_g = 20,20 \text{ m}^2 / 0,65 = 31,07 \text{ m}^2$

5) Anforderungen an Zuluftflächen

Gemäß DIN 18232-2 Abschnitt 5.5 muss die geometrische Fläche der Zuluftöffnungen mindestens das 1,5 fache der aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche aller NRA-Öffnungen des Rauchabschnittes mit der größten Rauchabschnittsfläche sein [30].

Daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$A_{zu} = A_w \cdot 1,5 \quad (6.1)$$

Für die notwendige aerodynamisch wirksame Fläche von $A_w = 20,20 \text{ m}^2$ ergibt sich demnach eine notwendige Zuluftfläche von $A_{zu} = 30,30 \text{ m}^2$.

Die Zuluftöffnungen sollten möglichst gleichmäßig auf mindestens zwei Gebäudeseiten verteilt sein und so angeordnet werden, dass eine gleichmäßige Durchströmung des betroffenen Rauchabschnitts gewährleistet ist [30].

Variante B: Nachweisführung bei Vorhandensein einer flächendeckenden Brandmeldeanlage

Das zweite Szenario beschreibt die Anforderungen an die Bemessung von natürlichen Rauchabzugsanlagen unter Berücksichtigung einer flächendeckenden Brandmeldeanlage. Die grundlegenden normativen Definitionen und Herleitungen der DIN 18232-2 wurden bereits in Variante A ausführlich dargelegt und werden in den folgenden Abschnitten nicht erneut erläutert. Die Darstellung konzentriert sich primär auf die variierenden Eingangsparameter sowie die daraus resultierenden Ergebnisse der Flächenbemessung.

1) Erwartete Brandentwicklungsdauer

Durch das Vorhandensein einer Brandmeldeanlage kann eine frühzeitige Branderkennung gewährleistet werden. Die Zeitspanne von der Brandentstehung bis zur Branderkennung reduziert sich dabei auf 0 Minuten, während die Interventionszeit der Feuerwehr unverändert bei 10 Minuten bleibt. Daraus resultiert eine Brandentwicklungsdauer von insgesamt 10 Minuten.

2) Festlegung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Die festgelegte mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit für diese Lagerhalle bleibt unverändert.

3) Festlegung der Bemessungsgruppe

Aufgrund der Reduktion der erwarteten Brandentwicklungsdauer von 20 Minuten auf 10 Minuten ergibt sich trotz gleichbleibender Brandausbreitungsgeschwindigkeit die Einstufung in die Bemessungsgruppe 3 nach Tabelle 2 der DIN 18232-2 [30].

4) Ermittlung der notwendigen Rauchabzugsfläche A_w je Rauchabschnitt

Für die Bemessungsgruppe 3 ergibt sich bei gleichbleibender Hallengeometrie eine notwendige aerodynamische Rauchabzugsfläche von $A_w = 11,90 \text{ m}^2$ je Rauchabschnitt. Unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors $c_v = 0,65$ ergeben sich folgende geometrischen Flächen für die Rauchabschnitte I und II: $A_g = 11,90 \text{ m}^2 / 0,65 = 18,31 \text{ m}^2$

5) Anforderungen an Zuluftflächen

Nach Gleichung (6.1) ergibt sich für die erforderliche aerodynamisch wirksame Fläche von $A_w = 11,90 \text{ m}^2$ eine notwendige Zuluftfläche von $A_{zu} = 17,85 \text{ m}^2$.

Variante C: Nachweisführung bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage

Für die Nachweisführung der Dimensionierung der Rauchabzugsanlagen unter Berücksichtigung einer flächendeckenden Sprinkleranlage kann die Festlegung der Brandentwicklungsdauer sowie der Brandausbreitungsgeschwindigkeit vernachlässigt werden.

Die Bemessungsgruppe kann gemäß Abschnitt 5.7 der DIN 18232-2 ohne Nachweis als Bemessungsgruppe 3 angesetzt werden [30].

1) Ermittlung der notwendigen Rauchabzugsfläche A_w je Rauchabschnitt

Für die Bemessungsgruppe 3 ergibt sich bei gleichbleibender Hallengeometrie eine notwendige aerodynamische Rauchabzugsfläche von $A_w = 11,90 \text{ m}^2$ je Rauchabschnitt. Unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors $c_v = 0,65$ ergeben sich folgende geometrischen Flächen für die Rauchabschnitte I und II: $A_g = 11,90 \text{ m}^2 / 0,65 = 18,31 \text{ m}^2$

2) Anforderungen an Zuluftflächen

Nach Gleichung (6.1) ergibt sich für die erforderliche aerodynamisch wirksame Fläche von $A_w = 11,90 \text{ m}^2$ eine notwendige Zuluftfläche von $A_{zu} = 17,85 \text{ m}^2$.

6.1.3 Nachweisführung für die Verkaufsstätte

Um den Einfluss der spezifischen Nutzung innerhalb der DIN 18232-2 zu verdeutlichen, wird die Nachweisführung im nachfolgenden Abschnitt analog zum Industriebau anhand einer Verkaufsstätte bemessen. Die festgelegten Rahmenbedingungen aus Pkt. 6.1.1 bleiben unberührt.

Variante A: Nachweisführung ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen

Im Rahmen der Nachweisführung für Variante A würde eine normative Betrachtung mit Verzicht auf jegliche brandschutztechnischen Maßnahmen erfolgen. Gemäß MVKVO müssen Verkaufsstätten jedoch zwingend eine Brandmeldeanlage haben, sofern Sie in den Geltungsbereich der MVKVO fallen. Da das zu betrachtende Gebäude eine Fläche $> 2000 \text{ m}^2$ aufweist, ist diese Voraussetzung erfüllt. Daher hat

Variante A für dieses Projekt keine praktische Relevanz und wird nicht weiterverfolgt.

Variante B: Nachweisführung bei Vorhandensein einer flächendeckenden Brandmeldeanlage

Das vorliegende Szenario beschreibt die Anforderungen an die Bemessung der natürlichen Rauchabzugsanlage unter Berücksichtigung einer flächendeckenden Brandmeldeanlage. Im Gegensatz zur Industriehalle stellt diese Variante aufgrund der bauordnungsrechtlichen Anforderungen der MVKVO das notwendige Mindestmaß der technischen Ausstattung dar.

1) Erwartete Brandentwicklungsdauer

Durch das Vorhandensein einer Brandmeldeanlage kann eine frühzeitige Branderkennung gewährleistet werden. Die Zeitspanne von der Brandentstehung bis zur Branderkennung reduziert sich dabei auf 0 Minuten, während die Interventionszeit der Feuerwehr unverändert bei 10 Minuten bleibt. Daraus resultiert eine Brandentwicklungsdauer von insgesamt 10 Minuten.

2) Festlegung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Die Dynamik eines Brandereignisses wird maßgeblich durch die Materialkomposition der gelagerten Waren sowie deren Verpackungen aus Wellpappe und Kunststoffen bestimmt. Trotz der stofflichen Vielfalt im Sortiment eines Drogeriemarktes ist die Brandlastdichte im Vergleich zu industriellen Gefahrstofflagern moderat. Daher wird für die Verkaufsstätte eine **mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit** festgelegt.

3) Festlegung der Bemessungsgruppe

Durch die Implementierung einer Brandmeldeanlage und der daraus einhergehenden Brandentwicklungsdauer von 10 Minuten ergibt sich in Kombination mit der mittleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit eine Einstufung in die Bemessungsgruppe 3 nach Tabelle 2 der DIN 18232-2 [30].

4) Ermittlung der notwendigen Rauchabzugsfläche A_w je Rauchabschnitt

Für die Bemessungsgruppe 3 und einer angestrebten raucharmen Schicht von $d = 5,00$ m bei einer Hallenhöhe von $8,00$ m ergibt sich eine notwendige aerodynamisch

wirksame Rauchabzugsfläche von $A_w = 11,90 \text{ m}^2$ je Rauchabschnitt. Unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors $c_v = 0,65$ ergeben sich folgende geometrischen Flächen für die Rauchabschnitte I und II: $A_g = 11,90 \text{ m}^2 / 0,65 = 18,31 \text{ m}^2$.

5) Anforderungen an Zuluftflächen

Nach Gleichung (6.1) ergibt sich für die erforderliche aerodynamisch wirksame Fläche von $A_w = 11,90 \text{ m}^2$ eine notwendige Zuluftfläche von $A_{zu} = 17,85 \text{ m}^2$.

Variante C: Nachweisführung bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage

Für die Nachweisführung der Dimensionierung der Rauchabzugsanlagen unter Berücksichtigung einer flächendeckenden Sprinkleranlage kann die Festlegung der Brandentwicklungsdauer sowie der Brandausbreitungsgeschwindigkeit vernachlässigt werden. Die Bemessungsgruppe kann gemäß Abschnitt 5.7 der DIN 18232-2 ohne Nachweis als Bemessungsgruppe 3 angesetzt werden [30].

1) Ermittlung der notwendigen Rauchabzugsfläche A_w je Rauchabschnitt

Für die Bemessungsgruppe 3 ergibt sich bei einer angestrebten raucharmen Schicht von $d = 5,00 \text{ m}$ bei einer Hallenhöhe von $8,00 \text{ m}$ eine notwendige aerodynamische Rauchabzugsfläche von $11,90 \text{ m}^2$ je Rauchabschnitt. Unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors $c_v = 0,65$ ergeben sich folgende geometrischen Flächen für die Rauchabschnitte I und II: $A_g = 11,90 \text{ m}^2 / 0,65 = 18,31 \text{ m}^2$.

2) Anforderungen an Zuluftflächen

Nach Gleichung (6.1) ergibt sich für die erforderliche aerodynamisch wirksame Fläche von $A_w = 11,90 \text{ m}^2$ eine notwendige Zuluftfläche von $A_{zu} = 17,85 \text{ m}^2$.

6.2 Bemessung maschineller Rauchabzugsanlagen nach DIN 18232-5

Ergänzend zur natürlichen Entrauchung erfolgt die Dimensionierung maschineller Rauchabzugsanlagen auf Basis der DIN 18232-5 [32]. Im Gegensatz zu den tabellarischen Festlegungen der DIN 18232 Teil 2 beruht dieses Verfahren auf ingenieurmäßigen Rechenschritten, welche die erforderlichen Volumenströme aus der physikalischen Bilanzierung der Brandgasentstehung ableiten. Hierbei steht nicht mehr der thermische Auftrieb im Vordergrund, sondern die mechanische

Extraktion der Rauchgase durch Ventilatoren, um die angestrebte raucharme Schicht stabil zu halten.

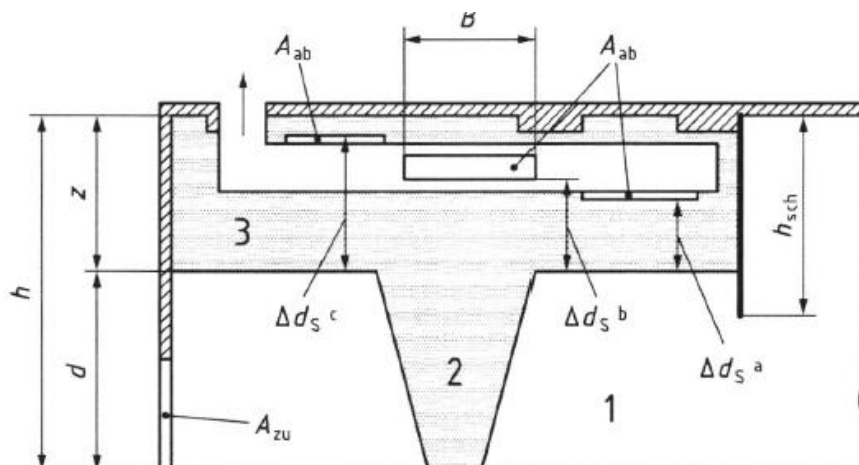
Die Untersuchung konzentriert sich in diesem Abschnitt darauf, wie die spezifische Brandleistung und die Plume-Entwicklung den notwendigen Volumenstrom bestimmen. Dabei wird aufgezeigt, inwieweit die maschinelle Entrauchung eine kontrollierte und wetterunabhängige Abfuhr der Brandgase ermöglicht und wie sich die anlagentechnischen Parameter analog zur natürlichen Entrauchung auf die Leistungsfähigkeit und Dimensionierung der Rauchableitungsöffnungen auswirken.

6.2.1 Festlegung der Rahmenbedingungen

Die Dimensionierung der MRA erfolgt auf Grundlage der DIN 18232-5 und nutzt im Gegensatz zur natürlichen Entrauchung ein ingenieurmäßiges Rechenverfahren zur Bestimmung der erforderlichen Volumenströme. Um eine objektive Vergleichbarkeit zwischen der natürlichen Abströmung und der mechanischen Extraktion zu gewährleisten, werden für die nachfolgende Berechnung identische physikalische Randbedingungen sowie das zuvor definierte Nachweiskriterium herangezogen.

Dementsprechend wird für alle Szenarien der maschinellen Entrauchung ebenfalls eine raucharme Schicht von $d = 5,00$ m festgelegt. Bei einer lichten Raumhöhe von $8,00$ m resultiert daraus eine Rauchsichtdicke von $z = 3,00$ m, die als Basis für die Massenstrombilanzierung dient. Auch die Anordnung der Rauchschräge wird analog zur Nachweisführung nach DIN 18232-2 ausgeführt.

Die in Bild 6.4 dargestellte Grafik verdeutlicht schematisch die konstruktiven Möglichkeiten für die Lage der Absaugöffnungen innerhalb der Rauchsicht.



Legende

A_{ab}	Absaugstelle	=	Höhe der Rauchschiicht ($h - d$) in m
A_{zu}	Größe der Zuluftfläche in m^2	1	raucharme Schicht
d	Höhe der raucharmen Schicht in m	2	Plume
h	Höhe der zu schützenden Raumes in m	3	Rauchschiicht
h_{sch}	Höhe der Rauchschiürze in m	B	lichte Breite der Absaugstelle in m
Δd_S^a	Δd_S für nach unten gerichtete Absaugöffnungen in m		
Δd_S^b	Δd_S für horizontal angeordnete Absaugöffnungen in m		
Δd_S^c	Δd_S für nach oben gerichtete Absaugöffnungen in m		

Bild 6.4: Schematische Darstellung der Lage der Absaugstellen nach DIN 18232-5 [32]

Für die weitere Untersuchung werden nach unten gerichtete Absaugöffnungen (a) gewählt, die bündig in der Deckenebene angeordnet sind. Aus der zuvor definierten Höhe der Rauchschiicht $z = 3,00$ m ergibt sich eine Rauchschiichtdicke Δd_S^a von ebenfalls maximal 3,00 m.

6.2.2 Nachweisführung für den Industriebau**Variante A: Nachweisführung ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen**

Im ersten Szenario wird die Bemessung ohne Berücksichtigung von Anlagentechnik durchgeführt.

1) Erwartete Brandentwicklungsdauer

Die Brandentwicklungsdauer ist der entscheidende Zeitparameter für die Massenstrombilanzierung, da sie die Größe des rechnerischen Brandherdes zum Zeitpunkt der vollen Wirksamkeit der MRA bestimmt. Während die DIN 18232-2 hierfür detaillierte Zeitstufen für die Phase der Brandentdeckung vorgibt, trifft die DIN 18232-5 für Szenarien ohne automatische Brandmeldung keine explizite Regelung. Die Norm setzt für die Anwendung maschineller Anlagen grundsätzlich voraus, dass entweder eine automatische Ansteuerung durch eine Brandmeldeanlage oder eine unverzügliche Aktivierung durch ständig anwesendes, eingewiesenes Personal sichergestellt ist.

Um jedoch eine konsistente Vergleichbarkeit zum Szenario der natürlichen Entrauchung zu wahren und das Schutzziel auch im Grundzustand ohne technische Detektion zu bewerten, wird für die erste Phase der Brandentdeckung analog zur DIN 18232-2 ein Regelfall von 10 Minuten definiert. In Kombination mit der Phase 2, welche die Interventionszeit der Feuerwehr bei mittleren Verhältnissen mit

weiteren 10 Minuten beziffert, ergibt sich für die Variante A eine Gesamtbrandentwicklungsdauer von 20 Minuten.

2) Festlegung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Die horizontale Brandausbreitungsgeschwindigkeit wird analog zu den Festlegungen der natürlichen Entrauchung bestimmt, da die physikalische Ausbreitung des Brandherdes unabhängig vom gewählten Abzugssystem erfolgt. Da innerhalb der Industriehalle überwiegend Güter mit moderater Brandlast gelagert werden, wird für die massenstrombasierte Berechnung nach DIN 18232-5 weiterhin eine **mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit** angesetzt.

3) Festlegung der Bemessungsgruppe

Aus der Korrelation der Brandentwicklungsdauer von 20 Minuten sowie einer mittleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit lässt sich die Bemessungsgruppe nach Tabelle 1 (siehe Tabelle 6.3) der DIN 18232-5 bestimmen [32].

Tabelle 6.3: Ermittlung der Bemessungsgruppe einer MRA nach Tabelle 1 der DIN 18232-5 [32]

Spalte	1	2	3	4
Zeile	anzusetzende Brandentwicklungsdauer (siehe 4.6) min	Brandausbreitungsgeschwindigkeit ^a		
		besonders gering	mittel ^a	besonders groß
1	≤ 5	1	2	3
2	≤ 10 ^a	2	3 ^a	4
3	≤ 15	3	4	5
4	≤ 20	4	5	—

^a Zur Bedeutung der fett gedruckten/hinterlegten Werte siehe 4.7.

Gemäß DIN 18232-5 ist die ermittelte Bemessungsgruppe um eine Stufe zu erhöhen. Sofern die Bemessungsgruppe 5 bereits erreicht ist, ist die Lagerguthöhe auf 1,50 m zu begrenzen [32].

Aufgrund der geplanten Lagerguthöhen würde die Bemessungsgruppe von 5 auf 6 erhöht werden. Da eine Reduktion der Lagerguthöhen auf 1,50 m nicht möglich ist, ist der Nachweis für eine maschinelle Entrauchung ohne geplante Anlagentechnik nicht möglich. Da die Skalierung der DIN 18232-5 jedoch bereits mit der Bemessungsgruppe 5 endet, ist die Nachweisführung für die Variante A an dieser Stelle formell gescheitert. Dieses Ergebnis verdeutlicht die physikalischen Grenzen

maschineller Entrauchungssysteme: Bei einer ungebremsten Brandentwicklung über 20 Minuten erreicht der resultierende Volumenstrom eine Größenordnung, die durch Standardanlagen nicht mehr sicher beherrscht werden kann. Damit belegt die Untersuchung bereits in diesem Stadium die zwingende Notwendigkeit anlagentechnischer Kompensationen (BMA oder Sprinkler), um eine rechnerische Beherrschbarkeit des Brandereignisses innerhalb der normativen Grenzen der DIN 18232-5 überhaupt erst zu ermöglichen.

Variante B: Nachweisführung bei Vorhandensein einer flächendeckenden Brandmeldeanlage

Nachdem die Nachweisführung für Variante A gescheitert ist, da die ungebremste Brandentwicklung über 20 Minuten die normativen Grenzen der DIN 18232-5 überschreitet, wird nun die Nachweisführung unter Berücksichtigung einer flächendeckenden Brandmeldeanlage durchgeführt:

1) Erwartete Brandentwicklungsdauer

Durch das Vorhandensein der BMA kann die Zeitspanne von der Brandentstehung bis zur Branderkennung auf **0 Minuten** reduziert werden, da die DIN 18232-5 vorsieht, dass eine direkte Ansteuerung durch die BMA eine automatische und somit frühzeitige Aktivierung der MRA begünstigt. Die Ausrückzeit der Feuerwehr wird unverändert mit **10 Minuten** für mittlere Verhältnisse angesetzt. Daraus resultiert für Variante B eine Gesamtbrandentwicklungsdauer von **10 Minuten**.

2) Festlegung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Die festgelegte **mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit** für diese Lagerhalle bleibt unverändert.

3) Festlegung der Bemessungsgruppe

Aufgrund der Reduktion der erwarteten Brandentwicklungsdauer von 20 Minuten auf 10 Minuten ergibt sich trotz gleichbleibender Brandausbreitungsgeschwindigkeit die Einstufung in die Bemessungsgruppe 3a nach Tabelle 1 der DIN 18232-5.

Die Lagerguthöhe > 1,50 m sieht eine Erhöhung der Bemessungsgruppe um +1 vor, daraus ergibt sich die Einstufung in die **Bemessungsgruppe 4**.

4) Bemessung des abzuführenden Rauchgasvolumenstroms \dot{v}_{RS}

Nachdem die Bemessungsgruppe erfolgreich bestimmt wurde und der Nachweis an dieser Stelle noch nicht gescheitert ist, erfolgt nun die Ermittlung des abzuführenden Rauchgasvolumenstroms. Als Berechnungsgrundlage dient die Tabelle 3 (siehe Tabelle 6.4) der DIN 18232-5, welche von einer standardisierten Raumgröße von $A = 400 \text{ m}^2$ und der Annahme einer spezifischen Energiefreisetzung von 300 kW/m^2 ausgeht [32].

Tabelle 6.4: Abzuführender Rauchgasvolumenstrom je Rauchabschnitt nach Tabelle 3 der DIN 18232-5 [32]

Zeile	Höhe der raucharmen Schicht m	Bemessungsgruppe				
		1	2	3 ^a	4	5
1	2	23 000	38 000	64 000	112 000	— ^b
2	2,5	29 000	46 000	75 000	128 000	223 000
3	3	34 000	55 000	88 000	145 000	248 000
4	4	43 000	72 000	115 000	184 000	303 000
5	5	50 000	85 000	143 000	229 000	366 000
6	6	59 000	96 000	165 000	276 000	436 000
7	7	73 000	105 000	183 000	311 000	512 000
8	8	88 000	121 000	197 000	342 000	580 000
9	9	105 000	143 000	206 000	368 000	633 000
10	10	123 000	166 000	231 000	387 000	681 000

^a Für die übliche Bemessung anzusetzender Wert des Rauchgasvolumenstroms.

^b Hier ist mit einem Flash-Over und mit keiner raucharmen Schicht zu rechnen, für Räume $A > 400 \text{ m}^2$ kann nach 5.3 verfahren werden.

Für die Bemessungsgruppe 4 und einer festgelegten Höhe der raucharmen Schicht $d = 5,00 \text{ m}$ ergibt sich ein abzuführender Rauchgasvolumenstrom $\dot{v}_{RS} = 229.000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Um die Berechnung präzise auf die realen Gegebenheiten des fiktiven Gebäudemodells zu übertragen, muss der ermittelte Wert einer mathematischen Korrektur unterzogen werden.

Die DIN 18232-5 sieht zwei unterschiedliche Korrekturverfahren vor, wobei im Rahmen dieser Untersuchung eine konservative Bemessungsstrategie verwendet

und dabei auf das Korrekturverfahren zur Berücksichtigung von Wärmeverlusten aus der Rauchschiicht verzichtet wird, da durch die Vernachlässigung der Abkühlungseffekte von einer höheren thermischen Belastung und einem größeren Volumen der Brandgase ausgegangen wird.

Eine Korrektur der Raumgröße ist jedoch zwingend erforderlich, da die betrachteten Rauchabschnitte mit einer Fläche von ca. 1380 m² die normative Referenzfläche von A= 400 m² deutlich überschreitet.

Zur Ermittlung des entsprechenden Korrekturvolumenstroms $d\dot{V}$ wird das Bild 4 der DIN 18232-5 herangezogen (siehe Bild 6.5). Aufgrund der vorhandenen Raumgröße wird die Kurve 3 für A = 1.600 m² betrachtet.

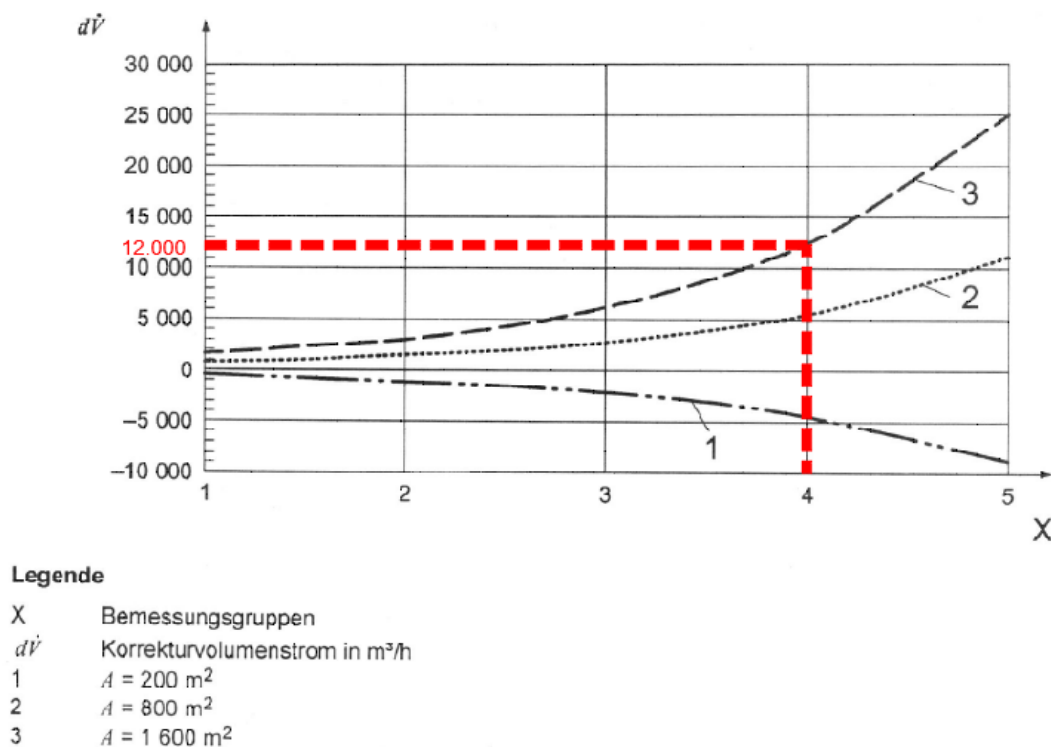


Bild 6.5: Korrekturwerte für den Rauchgasvolumenstrom bei abweichenden Raumgrößen nach Bild 4 der DIN 18232-5 [32]

Der Korrekturvolumenstrom wird mit $d\dot{V} = 12.000 \text{ m}^3/\text{h}$ angesetzt. Für die Korrektur des Rauchgasvolumenstroms in Abhängigkeit der Grundfläche wird folgende Gleichung verwendet:

$$\dot{V}_{RS,korrigiert} = \dot{V}_{RS} - d\dot{V} \quad (6.2)$$

$$\dot{V}_{RS,korrigiert} = 229.000 \text{ m}^3/\text{h} - 12.000 \text{ m}^3/\text{h} = 217.000 \text{ m}^3/\text{h}$$

5) Bemessung der mittleren Rauchschtichttemperatur θ_{RS}

Neben der Ermittlung des Rauchgasvolumenstroms ist auch die mittlere Rauchschtichttemperatur ein entscheidender Parameter für die weitere Bemessung der MRA.

Die Ermittlung erfolgt vereinfacht über die Tabelle 4 (siehe Tabelle 6.5) der DIN 18232-5, wobei die bereits definierte Bemessungsgruppe sowie die angestrebte Höhe der raucharmen Schicht als Grundlage dienen:

Tabelle 6.5: Ermittlung der mittleren Rauchschtichttemperatur nach Tabelle 4 der DIN 18232-5 [32]

Zeile	Höhe der raucharmen Schicht m	Bemessungsgruppe				
		1	2	3 ^a	4	5
1	2	210	290	400	560	— ^b
2	2,5	160	210	290	400	560
3	3	130	170	230	310	430
4	4	100	120	150	210	290
5	5	80	100	120	160	210
6	6	70	90	100	120	170
7	7	60	80	90	110	140
8	8	50	70	90	100	120
9	9	50	60	80	90	110
10	10	40	60	70	90	100

^a Für die übliche Bemessung anzusetzender Wert des Volumenstroms.
^b Hier ist mit einem Flash-Over und mit keiner raucharmen Schicht zu rechnen.

Die mittlere Rauchschtichttemperatur für die Bemessungsgruppe 4 bei einer angestrebten raucharmen Schicht von $d = 5,00$ m beträgt $\theta_{RS} = 160$ °C.

6) Ermittlung der Anzahl N der Absaugstellen

Die Anzahl N der Absaugstellen berechnet sich aus dem abzuführenden Rauchgasvolumenstrom sowie dem maximal zulässigen Rauchgasvolumenstrom je Absaugstelle. Dabei ist der maximal abführbare Rauchgasvolumenstrom $\dot{V}_{i,max}^*$ über eine einzelne Absaugstelle und wird mittels des Nomogramms in Bild 6 der DIN 18232-5 (siehe Bild 6.6) ermittelt:

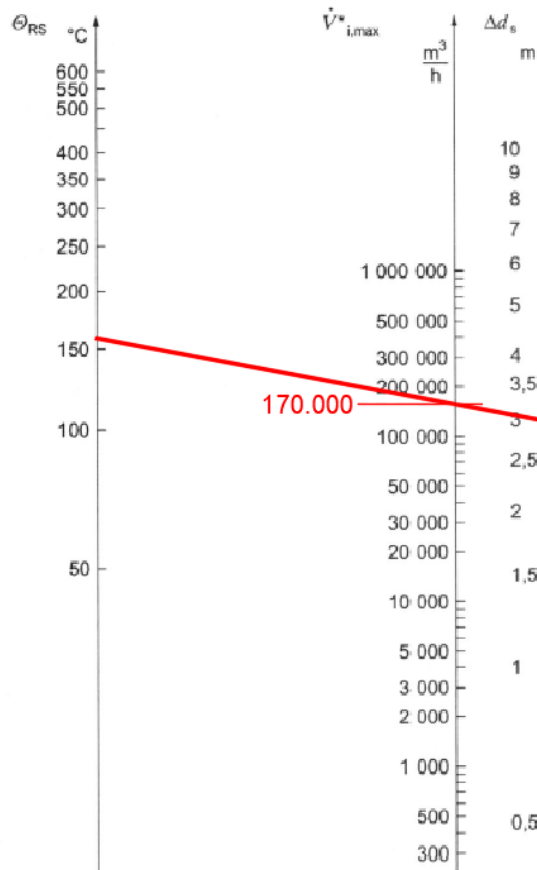


Bild 6.6: Nomogramm zur Ermittlung des über eine einzelne Absaugstelle abführbaren Rauchgasvolumenstroms nach Bild 6 der DIN 18232-5 [32]

Hierzu wird eine Verbindungslinie zwischen der zuvor ermittelten Rauchsichttemperatur von 160 °C und der maßgeblichen Schichtgrenze Δd_s gezogen.

Für nach unten gerichteten Absaugöffnungen in der Deckenebene mit einer Schichtgrenze Δd_s von maximal 3,00 m ergibt sich am Schnittpunkt ein maximal abführbarer Volumenstrom von ca. 170.000 m³/h je Absaugstelle.

Bei Gesamtvolumenströmen von 217.000 m³/h sind mindestens zwei Absaugstellen nach Gleichung (6.3) erforderlich.

$$N \geq \frac{\dot{V}_{RS}}{\dot{V}_{i,max}^*} \quad (6.3)$$

Es werden mindestens zwei Absaugstellen benötigt. Der Mindestabstand zwischen den Außenkanten zweier Absaugstellen s_{min} nach Gleichung (6.4) beträgt 6,18 m.

$$s_{min} \geq 0,015 \sqrt{\dot{v}_i} \quad (6.4)$$

Variante C: Nachweisführung bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage

1) Erwartete Brandentwicklungsdauer

Da das Vorhandensein der Sprinkleranlage keine detektionstechnischen Maßnahmen begünstigt, ist die Zeitspanne von der Brandentstehung bis zur Branderkennung mit **10 Minuten** anzusetzen. Die Ausrückzeit der Feuerwehr wird unverändert mit **10 Minuten** für mittlere Verhältnisse angesetzt. Daraus resultiert für Variante C eine Gesamtbrandentwicklungsdauer von **20 Minuten**.

2) Festlegung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Die festgelegte **mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit** für diese Lagerhalle bleibt unverändert.

3) Festlegung der Bemessungsgruppe

Bei einer erwarteten Brandentwicklungsdauer von 20 min sowie einer mittleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit ergibt sich die Einstufung in die Bemessungsgruppe 5 nach Tabelle 1 der DIN 18232-5 [32].

Die Lagerguthöhe $> 1,50$ m sieht eine Erhöhung der Bemessungsgruppe um +1 vor. Bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage darf die Bemessungsgruppe um -1 reduziert werden. Daraus ergibt sich die Einstufung in die **Bemessungsgruppe 5**.

4) Bemessung des abzuführenden Rauchgasvolumenstroms \dot{v}_{RS}

Nach Tabelle 3 der DIN 18232-5 ergibt sich für die Bemessungsgruppe 5 bei einer angestrebten raucharmen Schicht von 5,00 m ein abzuführender Rauchgasvolumenstrom $\dot{v}_{RS} = 366.000$ m³/h sowie ein Korrekturvolumenstrom $d\dot{V} = 25.000$ m³/h nach Bild 4. Mithilfe der Gleichung (6.2) ergibt sich ein korrigierter Rauchgasvolumenstrom von $\dot{V}_{RS, korrigiert} = 341.000$ m³/h.

5) Bemessung der mittleren Rauchsichttemperatur θ_{RS}

Die mittlere Rauchsichttemperatur für die Bemessungsgruppe 5 bei einer angestrebten raucharmen Schicht von $d = 5,00$ m wird nach Tabelle 4 der DIN 18232-5 mit $\theta_{RS} = 210$ °C angesetzt.

6) Ermittlung der Anzahl N der Absaugstellen

Der maximal abführbare Rauchgasvolumenstrom $\dot{V}_{i, max}^*$ über eine einzelne Absaugstelle beträgt ca. 190.000 m³/h gemäß dem Nomogramm in Bild 6 der DIN

18232-5. Bei Gesamtvolumenströmen von 341.000 m³/h sind nach Gleichung (6.4) mindestens zwei Absaugstellen mit einem Mindestabstand $s_{min} = 6,54$ m erforderlich.

6.2.3 Nachweisführung für die Verkaufsstätte

Variante A: Nachweisführung ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen

Im Rahmen der Nachweisführung für Variante A würde eine normative Betrachtung mit Verzicht auf jegliche brandschutztechnischen Maßnahmen erfolgen. Gemäß MVKVO müssen Verkaufsstätten jedoch zwingend eine Brandmeldeanlage haben, sofern Sie in den Geltungsbereich der MVKVO fallen. Da das zu betrachtende Gebäude eine Fläche > 2000 m² aufweist, ist diese Voraussetzung erfüllt [29]. Daher hat Variante A für dieses Projekt keine praktische Relevanz und wird nicht weiter verfolgt.

Variante B: Nachweisführung bei Vorhandensein einer Brandmeldeanlage

1) Erwartete Brandentwicklungsdauer

Durch das Vorhandensein der BMA kann die Zeitspanne von der Brandentstehung bis zur Branderkennung auf **0 Minuten** reduziert werden, da die DIN 18232-5 vorsieht, dass eine direkte Ansteuerung durch die BMA eine automatische und somit frühzeitige Aktivierung der MRA begünstigt. Die Ausrückzeit der Feuerwehr wird unverändert mit **10 Minuten** für mittlere Verhältnisse angesetzt. Daraus resultiert für Variante B eine Gesamtbrandentwicklungsdauer von **10 Minuten**.

2) Festlegung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Die festgelegte **mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit** für diese Lagerhalle bleibt unverändert.

3) Festlegung der Bemessungsgruppe

Aufgrund der Reduktion der erwarteten Brandentwicklungsdauer von 20 Minuten auf 10 Minuten ergibt sich trotz gleichbleibender Brandausbreitungsgeschwindigkeit die Einstufung in die Bemessungsgruppe 3a nach Tabelle 1 der DIN 18232-5 [32].

Die Lagerguthöhe > 1,50 m sieht eine Erhöhung der Bemessungsgruppe um +1 vor, daraus ergibt sich die Einstufung in die **Bemessungsgruppe 4**.

4) Bemessung des abzuführenden Rauchgasvolumenstroms \dot{v}_{RS}

Nach Tabelle 3 der DIN 18232-5 ergibt sich für die Bemessungsgruppe 4 bei einer angestrebten raucharmen Schicht von 5,00 m ein abzuführender Rauchgasvolumenstrom $\dot{v}_{RS} = 229.000 \text{ m}^3/\text{h}$ sowie ein Korrekturvolumenstrom $d\dot{V} = 12.000 \text{ m}^3/\text{h}$ nach Bild 4. Mithilfe der Gleichung (6.2) ergibt sich ein korrigierter Rauchgasvolumenstrom von $\dot{V}_{RS, \text{korrigiert}} = 217.000 \text{ m}^3/\text{h}$.

5) Bemessung der mittleren Rauchsichttemperatur θ_{RS}

Die mittlere Rauchsichttemperatur für die Bemessungsgruppe 4 bei einer angestrebten raucharmen Schicht von $d = 5,00 \text{ m}$ wird nach Tabelle 4 der DIN 18232-5 mit $\theta_{RS} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ angesetzt.

6) Ermittlung der Anzahl N der Absaugstellen

Der maximal abführbare Rauchgasvolumenstrom $\dot{V}_{i, \text{max}}^*$ über eine einzelne Absaugstelle beträgt ca. $170.000 \text{ m}^3/\text{h}$ gemäß dem Nomogramm in Bild 6 der DIN 18232-5. Bei Gesamtvolumenströmen von $217.000 \text{ m}^3/\text{h}$ sind nach Gleichung (6.4) mindestens zwei Absaugstellen mit einem Mindestabstand $s_{\text{min}} = 6,18 \text{ m}$ erforderlich.

Variante C: Nachweisführung bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage

1) Erwartete Brandentwicklungsdauer

Da das Vorhandensein der Sprinkleranlage keine detektionstechnischen Maßnahmen begünstigt, ist die Zeitspanne von der Brandentstehung bis zur Branderkennung mit **10 Minuten** anzusetzen. Die Ausrückzeit der Feuerwehr wird unverändert mit **10 Minuten** für mittlere Verhältnisse angesetzt. Daraus resultiert für Variante C eine Gesamtbrandentwicklungsdauer von **20 Minuten**.

2) Festlegung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Die festgelegte **mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit** für diese Lagerhalle bleibt unverändert.

3) Festlegung der Bemessungsgruppe

Bei einer erwarteten Brandentwicklungsdauer von 20 min sowie einer mittleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit ergibt sich die Einstufung in die Bemessungsgruppe 5 nach Tabelle 1 der DIN 18232-5.

Die Lagerguthöhe > 1,50 m sieht eine Erhöhung der Bemessungsgruppe um +1 vor. Bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage darf die Bemessungsgruppe um -1 reduziert werden. Daraus ergibt sich die Einstufung in die **Bemessungsgruppe 5**.

4) Bemessung des abzuführenden Rauchgasvolumenstroms \dot{v}_{RS}

Nach Tabelle 3 der DIN 18232-5 ergibt sich für die Bemessungsgruppe 5 bei einer angestrebten raucharmen Schicht von 5,00 m ein abzuführender Rauchgasvolumenstrom $\dot{v}_{RS} = 366.000 \text{ m}^3/\text{h}$ sowie ein Korrekturvolumenstrom $d\dot{V} = 25.000 \text{ m}^3/\text{h}$ nach Bild 4. Mithilfe der Gleichung (6.2) ergibt sich ein korrigierter Rauchgasvolumenstrom von $\dot{V}_{RS,korrigiert} = 341.000 \text{ m}^3/\text{h}$.

5) Bemessung der mittleren Rauchsichttemperatur θ_{RS}

Die mittlere Rauchsichttemperatur für die Bemessungsgruppe 5 bei einer angestrebten raucharmen Schicht von $d = 5,00 \text{ m}$ wird nach Tabelle 4 der DIN 18232-5 mit $\theta_{RS} = 210 \text{ °C}$ angesetzt.

6) Ermittlung der Anzahl N der Absaugstellen

Der maximal abführbare Rauchgasvolumenstrom $\dot{V}_{i,max}^*$ über eine einzelne Absaugstelle beträgt ca. $190.000 \text{ m}^3/\text{h}$ gemäß dem Nomogramm in Bild 6 der DIN 18232-5. Bei Gesamtvolumenströmen von $341.000 \text{ m}^3/\text{h}$ sind nach Gleichung (6.4) mindestens zwei Absaugstellen mit einem Mindestabstand $s_{min} = 6,54 \text{ m}$ erforderlich.

7 Einsatz numerischer Ingenieurmethoden: Simulation mittels FDS

Während in den vorherigen Kapiteln die Bemessung der Rauchableitung auf Basis starrer normativer und bauordnungsrechtlicher Vorgaben behandelt wurde, dient der Einsatz numerischer Ingenieurmethoden der realitätsnahen Überprüfung und Optimierung dieser Ergebnisse.

Das Ziel der numerischen Simulation ist es, die Diskrepanz zwischen den pauschalen Anforderungen der Sonderbauvorschriften und den detaillierten Bemessungsverfahren der DIN-Normen kritisch zu hinterfragen. Dabei dient die Simulation auch als Instrument zur wirtschaftlichen Optimierung. Es soll nachgewiesen werden, ob eine Reduktion der geometrischen Öffnungsflächen gegenüber den zuvor ermittelten normativen Mindestwerten möglich ist, während die definierten Schutzziele insbesondere der Herstellung raucharmer Schichten im Fluchtwegbereich weiterhin sicher eingehalten werden.

Die Modellierung der Entrauchungsöffnungen erfolgt im Simulationsprogramm durch die Definition geometrischer Öffnungen in der Dachfläche. Im Gegensatz zu den tabellarischen Verfahren erlaubt die numerische Strömungssimulation eine dynamische Erfassung der Luftwechselraten, wobei Faktoren wie der thermische Auftrieb, der Gas-Drag durch Sprinkleraktivierung und lokale Druckunterschiede unmittelbar in die Berechnung einfließen. Das Referenzmodell wird somit einem „Stresstest“ unterzogen, um die Sensitivität des Gesamtsystems gegenüber verschiedenen anlagentechnischen Konfigurationen wie BMA oder Sprinkler zu verifizieren.

7.1 Umsetzung der Modellparameter und Randbedingungen

Die rechnerische Brandsimulation erfolgt mit dem Fire Dynamics Simulator, wobei die physikalischen Grundlagen der hierfür genutzten Large Eddy Simulation (LES) bereits ausführlich in Kapitel 2.3.2 dargelegt wurden. Im Rahmen der praktischen Umsetzung bedeutet dies, dass großflächige, turbulente Strömungsstrukturen direkt durch die Navier-Stokes-Gleichungen aufgelöst werden. Kleinteilige Wirbelstrukturen, deren Ausdehnung unterhalb der gewählten Zellgröße (Grid) liegt, werden hingegen über Subgrid-Scale-Modelle mathematisch approximiert [33].

Die Verlässlichkeit dieser numerischen Ergebnisse hängt maßgeblich von der präzisen Definition der Randbedingungen ab. Zur Sicherstellung einer reproduzierbaren Vergleichsbasis zwischen dem Industriebau und der Verkaufsstätte werden die thermodynamischen Umgebungszustände auf Standardwerte festgesetzt. Gemäß den Empfehlungen der NIST wird eine Umgebungstemperatur $TMPA = 20^\circ \text{ C}$ sowie ein statischer Luftdruck von $p_0 = 101325 \text{ Pa}$ als Initialzustand definiert [33]. Alle baulichen Elemente des Referenzmodells werden als starre Begrenzungsflächen (*Obstructions*) innerhalb des orthogonalen Rechengitters abgebildet.

7.1.1 Festlegung der Zellgrößen

Die Diskretisierung des Untersuchungsraumes erfolgt in FDS über ein rechtwinkliges Rechengitter, das sogenannte *Mesh*. Die Genauigkeit der berechneten Strömungsdynamik hängt dabei maßgeblich von der gewählten Auflösung, also der Größe der einzelnen Rechenzellen, ab [33].

```
8 &MESH IJK= 137, 92, 18, XB=0.0, 68.5, 0.0, 46.0, -0.5, 8.50 /
```

Bild 7.1: Auszug aus der FDS-Eingabedatei mit Definition des Rechengitters und der Domänengrenzen (eigene Darstellung)

Über den Parameter *IJK* wird der Raum in 137 (*x*), 92 (*y*) und 18 (*z*) Zellen unterteilt. Der Parameter *XB* beschreibt die räumliche Ausdehnung des Gitters in Metern. Daraus ergibt sich für die vorliegende Simulation eine Zellgröße von 0,50 m.

Die Wahl einer kubischen Zellform folgt der Empfehlung der NIST wonach die Kantenlängen der Zellen für eine stabile numerische Lösung annähernd gleich sein sollen [33].

7.1.2 Definition der Oberflächeneigenschaften

Um das Brandgeschehen realitätsnah abzubilden, müssen den geometrischen Körpern im Modell physikalische Eigenschaften zugewiesen werden. In FDS geschieht dies über Oberflächenprofile (*Surfaces*), welche die thermischen Merkmale der Bauteile festlegen.

Dafür müssen zunächst die entsprechenden Materialien festgelegt werden. Hierbei werden für jeden Baustoff die Wärmeleitfähigkeit (*Conductivity*), die Rohdichte (*Density*) und die spezifische Wärmekapazität (*Specific_Heat*) hinterlegt. Diese

Werte steuern, wie schnell ein Bauteil Energie aufnimmt und wie stark es sich dabei erwärmt.

```

37 ---Materialien---
38
39 &MATL ID           = 'BETON'
40     CONDUCTIVITY   = 1.4
41     SPECIFIC_HEAT  = 1.0
42     DENSITY        = 2000. /
43
44
45 &MATL ID           = 'STAHL'
46     CONDUCTIVITY   = 50.0
47     SPECIFIC_HEAT  = 0.45
48     DENSITY        = 7800. /
49

```

Bild 7.2: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der Materialien (eigene Darstellung)

Nachdem die Materialien definiert wurden, werden sie zu Oberflächenprofilen zusammengefasst. Hierbei wird auch die Schichtdicke festgelegt:

```

65 ---Oberflächen---
66
67 &SURF ID           = 'STUETZE'
68     RGB            = 128,128,128
69     MATL_ID        = 'BETON'
70     THICKNESS      = 0.40 /      Definition der Stahlbetonstützen 40x40cm
71
72 &SURF ID           = 'TRAEGER'
73     RGB            = 128,128,128
74     MATL_ID        = 'BETON'
75     THICKNESS      = 0.40 /      Definition der Stahlbetonbinder 60x40 cm
76

```

Bild 7.3: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der Oberflächenprofile (eigene Darstellung)

Anschließend erfolgt die Platzierung der Hindernisse (Obstructions) im dreidimensionalen Raum. Jedes Bauteil wird über seine Eckkoordinaten (XB) definiert und exakt an dem zuvor erstellten Rechengitter ausgerichtet.

Durch den Befehl *SURF_ID* wird dem geometrischen Körper schließlich mitgeteilt, welche der zuvor definierten Oberflächeneigenschaften er besitzen soll:

```

121 ---Einfügen des Gebäudemodells--
122
123 &OBST XB= 0.00, 68.00, 0.00, 46.00, -0.25, 0.00, SURF_ID='BODENPLATTE' / Bodenplatte
124 &OBST XB= 60.00, 60.25, 0.00, 46.00, 0.00, 8.50, SURF_ID='BRANDWAND' / Brandwand 50cm über Dach geführt
125
126 &OBST XB= 0.40, 0.80, 0.40, 0.80, 0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' / STUETZE A1
127 &OBST XB= 7.90, 8.30, 0.40, 0.80, 0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' / STUETZE A2
128 &OBST XB= 15.40, 15.80, 0.40, 0.80, 0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' / STUETZE A3

```

Bild 7.4: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Einfügen des Gebäudemodells (eigene Darstellung)

Durch die systematische Verknüpfung der Materialdefinitionen, Schichtaufbauten und räumlicher Verordnung der Hindernisse entsteht ein belastbares digitales Abbild der Hallenkonstruktion, welches sich visuell durch *Smokeview* darstellen lässt:

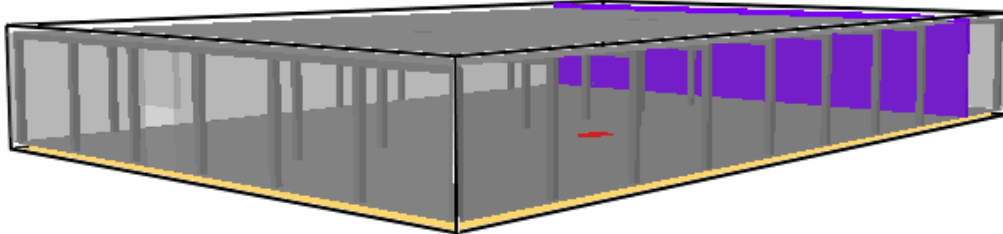


Bild 7.5: Darstellung des Simulationsmodells in SMV (eigene Darstellung)

7.1.3 Implementierung der Leckagen und Druckrandbedingungen

Ein wesentlicher Aspekt bei der numerischen Brandsimulation von umschlossenen Räumen ist die korrekte Abbildung des Druckausgleichs mit der Umgebung. Da sich Brandgase infolge der hohen Temperaturen massiv ausdehnen, muss sichergestellt werden, dass das Modell den resultierenden Volumenstrom realistisch verarbeiten kann. Würde das Gebäude als hermetisch abgeschlossenes System betrachtet werden, käme es zu einem unphysikalischen Druckanstieg innerhalb der Halle, welcher die Strömungsgeschwindigkeiten verfälschen und die numerische Stabilität der Simulation gefährden würde [33].

In der vorliegenden Arbeit wird diesem Umstand durch die Definition offener Ränder Rechnung zugetragen. Anstatt eine komplexe Hintergrund-Leckage über das Druckzonen-Modell von FDS zu definieren, werden sämtliche äußeren Begrenzungen des Rechenraumes über den Befehl `SURF_ID='OPEN'` als druckneutrale Übergänge zur Außenatmosphäre deklariert.

```
227 ---Druckausgleich---
228
229 &VENT MB='XMIN',SURF_ID='OPEN' /
230 &VENT MB='XMAX',SURF_ID='OPEN' /
231
232 &VENT MB='YMIN',SURF_ID='OPEN' /
233 &VENT MB='YMAX',SURF_ID='OPEN' /
234
235 &VENT MB='ZMAX',SURF_ID='OPEN' /
236
```

Bild 7.6: Auszug der FDS-Eingabedatei: Berücksichtigung der Druckrandbedingungen (eigene Darstellung)

Durch diese methodische Herangehensweise steht die Industriehalle technisch gesehen in einer unendlich ausgedehnten Außenumgebung. Dies erlaubt es der Luft, je nach den herrschenden Druckverhältnissen, frei über die Ränder der Domain nachzuströmen oder aus dieser zu entweichen. Insbesondere für die Modellierung der Zuluft- und Abluftflächen ist diese Konfiguration entscheidend, da der Luftaustausch somit ausschließlich durch thermischen Auftrieb und reale Druckdifferenzen bestimmt wird.

7.1.4 Implementierung der Messsensorik

Um die Auswirkungen des Brandereignisses quantitativ bewerten zu können, wird das digitale Modell mit einer Vielzahl von numerischen Messgebern, sogenannten *Devices*, ausgestattet. Diese Sensoren fungieren als virtuelle Messpunkte, die während des Simulationslaufs kontinuierlich Daten aus den jeweiligen Rechenzellen extrahieren und somit eine lückenlose Dokumentation der Branddynamik ermöglichen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Überwachung der raucharmen Schicht. Hierfür werden kombinierte Messpunkte zur Bestimmung der thermischen Schichtung und der Rauchschichthöhe eingerichtet, wobei insbesondere die Parameter für die Schichthöhe *LAYER HEIGHT* sowie die Temperaturen der oberen und unteren Gasschicht (*UPPER* und *LOWER TEMPERATURE*) erfasst werden.

```

194 ---Messgeräte (DEVC)---
195
196 Messpunkt 1: Nah am Brandherd
197 &DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='BRAND_LH' /
198 &DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER TEMPERATURE', ID='BRAND_UT' /
199 &DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 6.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LOWER TEMPERATURE', ID='BRAND_LT' /
200
201 Messpunkt 2: Hallenmitte
202 &DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='MITTE_LH' /
203 &DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER TEMPERATURE', ID='MITTE_UT' /
204 &DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LOWER TEMPERATURE', ID='MITTE_LT' /
205

```

Bild 7.7: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der *DEVICES* (eigene Darstellung)

Ergänzend zur Schichthöhenmessung wird die Personensicherheit durch punktuelle Messungen der Sichtweite und der Schadstoffkonzentration auf einer kritischen Höhe von 2,50 m über der Bodenplatte überwacht. In diesem Zusammenhang wird insbesondere Kohlenmonoxid-Konzentration protokolliert, um eine potenzielle Gefährdung flüchtender Personen durch toxische Brandgase quantitativ auszuschließen. Die Sichtweite dient dabei als primärer Indikator für die Orientierungsfähigkeit innerhalb der Halle während der Selbstrettungsphase. Um

über die Punktmessungen hinaus die räumliche Ausbreitung von Hitze und Rauch über den gesamten Hallenquerschnitt zu visualisieren, werden zusätzlich zweidimensionale Schnittebenen, sogenannte *Slices*, definiert. Diese erfassen die Temperatur- und Sichtweitenverteilung sowohl in der vertikalen Längsachse als auch horizontal auf relevanten Höhenniveaus.

```

---Visualisierung (SLCF)---

Temperaturen(Hitzeausbreitung):
&SLCF PBX= 23.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. / Längsschnitt durch Hallenmitte
&SLCF PBX= 8.0, QUANTITY='TEMPERATURE' / Querschnitt direkt durch das Regal

HRRPUV:
&SLCF PBX= 8.0, QUANTITY='HRRPUV' / Zeigt die Flammenbildung im Regal

Sichtweite und Gase:
&SLCF PBZ= 2.5, QUANTITY='VISIBILITY' / Horizontalschnitt auf Fluchtweghöhe (2,50 m als Mindestmaß)
&SLCF PBZ= 5.0, QUANTITY='VISIBILITY' / Horizontalschnitt auf Höhe der angestrebten raucharmen Schicht
&SLCF PBX= 23.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' / Kohlenmonoxid-Konzentration im Längsschnitt

Ruß-Konzentration (Dichte des Rauches):
&SLCF PBX= 23.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='SOOT' /

```

Bild 7.8: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der SLICES (eigene Darstellung)

7.2 Simulationsreihe Industriebau

Die Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen bildet eine einheitliche Simulationsreihe bei der das zuvor beschriebene Gebäudemodell der Industriehalle als Referenz dient. Um eine objektive Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen brandschutztechnischen Konfigurationen zu gewährleisten, wird für alle Rechenläufe ein identisches Bemessungsbrandereignis zugrunde gelegt. Dieses Szenario orientiert sich an einem realitätsnahen Brandverlauf, wie er für industrielle Lagerflächen typisch ist. Obwohl die primären Lagergüter in der betrachteten Halle nichtbrennbare Maschinenteile sind, ergibt sich die maßgebliche Brandlast durch die für den Transport und die Lagerung verwendeten Holzpaletten. Die Brandsimulation geht daher von dem Entzünden einer Standard-Holzpalette aus, was physikalisch einem Zellulosebrand entspricht. Die Reaktionsgleichung wird gemäß Bild 7.9 in der FDS-Eingabedatei implementiert:

```

24 &REAC ID          = 'LAGERGUT_Reaktion'
25     SOOT_YIELD   = 0.015           ! Rußausbeute in g/g
26     CO_YIELD     = 0.004           ! Kohlenmonoxidausbeute in g/g
27     HEAT_OF_COMBUSTION = 12000     ! Heizwert des Brennstoffs in kJ/kg
28     N             = 0.0            ! Anzahl der Stickstoffatome pro Molekül
29     C             = 6              ! Anzahl der Kohlenstoffatome pro Molekül
30     H             = 10             ! Anzahl der Wasserstoffatome pro Molekül
31     O             = 5              ! Anzahl der Sauerstoffatome pro Molekül
32
33     RADIATIVE_FRACTION = 0.35/      Radiative Fraction wird für LES standardmäßig mit 0,35 angesetzt
34

```

Bild 7.9: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der Reaktionsgleichung (eigene Darstellung)

Die quantitativen Kennwerte für dieses Szenario werden in Anlehnung an die Tabelle 8.4 des Leitfadens für Ingenieurmethoden im Brandschutz [11] für brandlastgesteuerte Szenarien definiert. Hierbei wird eine maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate von 400 kW/m² angesetzt.

Der zeitliche Anstieg der Brandleistung folgt dabei einer t²-orientierten Wachstumsfunktion, wobei die volle Leistung nach einer moderaten Anbrandphase von 600 Sekunden erreicht wird [15]:

```
113 ---Festlegen der Zeitlichen Brandentwicklung (RAMP-FUNKTION)---
114 In diesem Block wird der zeitliche Anstieg der Wärmefreisetzungsrate (HRRPUA) definiert.
115 Da ein Realbrand nicht schlagartig seine volle Leistung erreicht, wird hier eine Anbrandphase (t2-orientiert) simuliert.
116
117 &RAMP ID='brand_kurve', T=0.0, F=0.0 / Zum Zeitpunkt t=0s betraegt die Leistung 0%
118 &RAMP ID='brand_kurve', T=600.0, F=1.0 / Zum Zeitpunkt t=600s wird die volle Leistung (100%) erreicht
119
```

Bild 7.10: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der zeitlichen Brandentwicklung (eigene Darstellung)

7.2.1 Simulation ohne zusätzliche Brandschutztechnische Maßnahmen

Im ersten Untersuchungsschritt wird die Industriehalle in ihrer Grundkonfiguration ohne zusätzliche anlagentechnische Optimierungen betrachtet. Als kritischer Faktor wird hierbei die manuelle Auslösung der Rauch- und Wärmeabzugsgeräte unterstellt, wie sie im Realfall durch das Eintreffen der Feuerwehr oder eine verzögerte Entdeckung durch das Personal eintreten könnte.

Ein besonderer Schwerpunkt dieser Untersuchung liegt in der Effizienzbewertung der Entrauchungsanlagen. Während die in Kapiteln 5.1 und 6.1.2 untersuchten baurechtlichen Vorgaben für die Halle oft deutlich größere Rauchabzugsflächen fordern, wird in dieser Simulation bewusst ein reduzierter Ansatz gewählt.

Daher werden 6 NRA mit einer Abmessung von je 1,50 m x 1,50 m gewählt.

Mit einer daraus resultierenden geometrischen Fläche von lediglich $A_g = 13,5 \text{ m}^2$ unterschreitet die gewählte Konfiguration die pauschalen Tabellenwerte signifikant. Für die notwendige Zuluftversorgung wurde ein großflächiges Sektionaltor sowie zwei sich gegenüberliegende Außentüren definiert. Diese Öffnungen stellen sicher, dass die durch die RWA abgeführten Massenströme durch kühle Außenluft ersetzt werden, was die thermische Schichtbildung stabilisiert und ein „Absaugen“ der Rauchsicht nach unten verhindert.

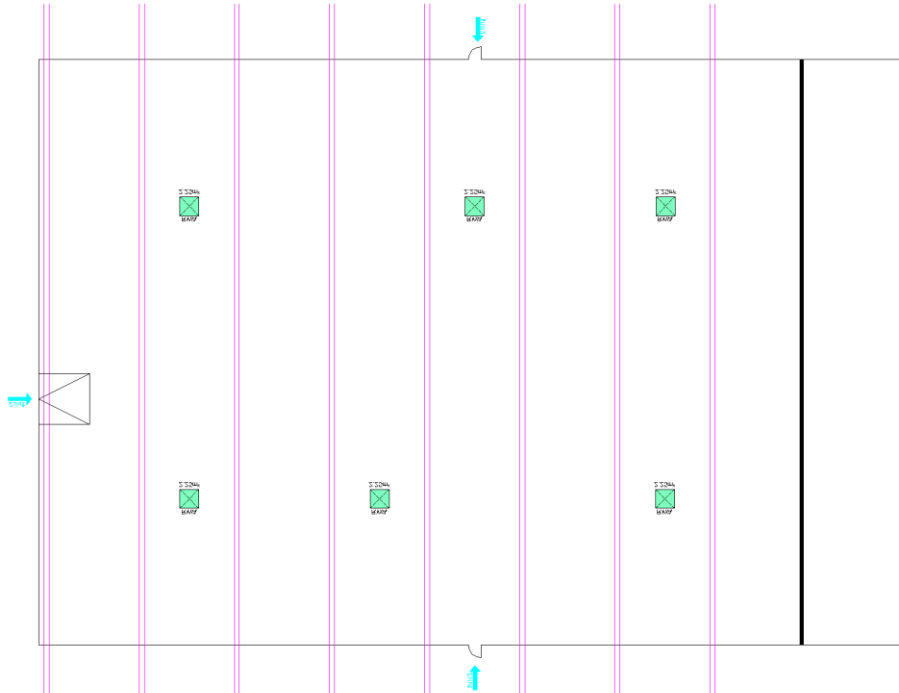


Bild 7.11: Schematischer Grundriss der Halle mit Einbindung der RWA und Zuluftflächen (eigene Darstellung)

Die Positionierung der RWA erfolgt innerhalb der Flächen zwischen den Betonbindern. Diese Anordnung stellt sicher, dass unabhängig vom exakten Brandherd die Wege für die Rauchgase zur nächsten Abzugsöffnung minimiert werden, während die Zuluft von den gegenüberliegenden Fassadenseiten eine effektive Durchspülung der raucharmen Schicht ermöglicht.

Die simulationstechnische Umsetzung der RWA und Zuluftöffnungen erfolgt in der Simulationsumgebung FDS primär über den Befehlstyp „&HOLE“. Dieser ermöglicht es, bestehende Hindernisse wie die Hallendecke oder die Außenwände zu einem definierten Zeitpunkt lokal zu durchbrechen, um einen Massenstrom zwischen dem Innenraum und der Außenumgebung zu ermöglichen:

```

186 Abluft: 6x RWA im Dach a 1,50 x 1,50 m
187 &HOLE XB= 11.10, 12.60, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /
188 &HOLE XB= 11.10, 12.60, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /
189 &HOLE XB= 26.10, 27.60, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /
190 &HOLE XB= 33.60, 35.10, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /
191 &HOLE XB= 48.60, 50.10, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /
192 &HOLE XB= 48.60, 50.10, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /
193
194 Zuluft: Ein Tor in Fassade a 4,00 x 4,00 m, 2 x Tür in Fassade 1,00 m x 2,00 m
195 &HOLE XB= -0.10, 0.50, 24.80, 28.80, 0.00, 4.00 /
196 &HOLE XB= 33.85, 34.85, -0.10, 0.50, 0.00, 2.00 /
197 &HOLE XB= 33.85, 34.85, 45.70, 46.30, 0.00, 2.00 /
198

```

Bild 7.12: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Erstellung der Zu- und Abluftöffnungen (eigene Darstellung)

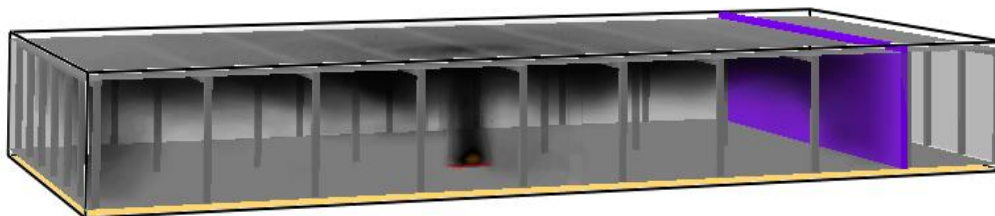
In dem betrachteten Szenario ist keinerlei Anlagentechnik vorhanden, weshalb ein konservativer Ansatz simuliert wird, welcher von einer manuellen Auslösung der RWA ausgeht. Hierfür wurde eine Verzögerungszeit von 420 Sekunden nach Brandausbruch definiert. Technisch wird dies im FDS-Modell über eine *DEVC_ID* realisiert. Hierbei fungiert ein fiktives Zeit-Messgerät als Auslöser, welches bei Erreichen des definierten *SETPOINT* von 420 Sekunden ein Signal an die zuvor beschriebenen *HOLE*-Befehle sendet:

```
184 &DEVC ID='TIMER', QUANTITY='TIME', SETPOINT=420.0, XYZ=0.0, 0.0, 0.0 /
```

Bild 7.13: Auszug der FDS-Eingabedatei: Implementierung der zeitgesteuerten Auslösung der RWA (eigene Darstellung)

Nachdem alle baulichen und anlagentechnischen Parameter definiert wurden, wurde die Brandsimulation gestartet und über einen Zeitraum von 2400 Sekunden durchgeführt.

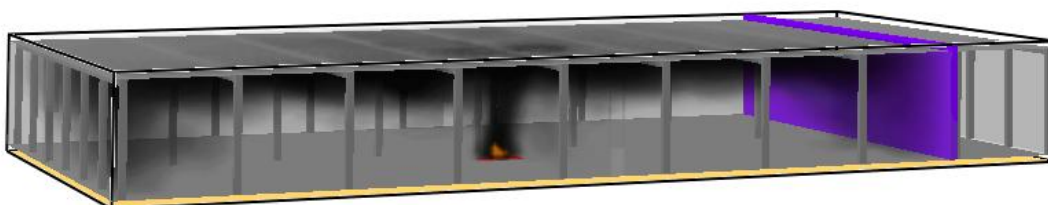
In der Initialphase der Simulation (bis ca. $t=170$ s) ist eine charakteristische Pyrolysephase zu beobachten. Es ist bereits eine signifikante Menge an Rauch wahrzunehmen:



Frame: 69
Time: 165.6

Bild 7.14: Auszug aus SMV nach 165s Simulationszeit (eigene Darstellung)

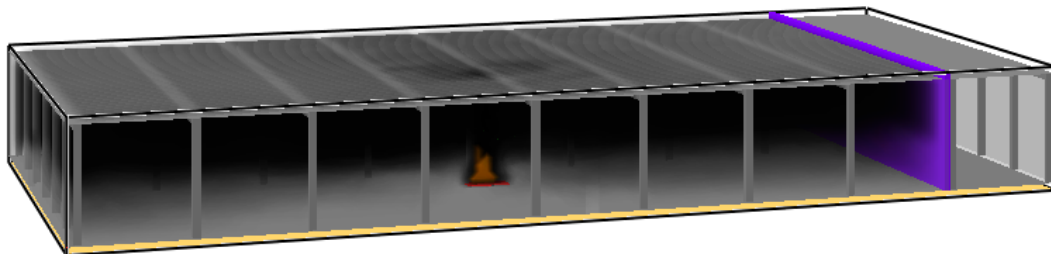
Nach Ablauf dieser 170 Sekunden ist auch eine Flammenbildung wahrzunehmen.



Frame: 76
Time: 182.5

Bild 7.15: Auszug aus SMV nach 182s Simulationszeit (eigene Darstellung)

Trotz der noch geringen thermischen Belastung zeigt sich die ungehinderte Rauchgasansammlung unter der Hallendecke. Da die RWA erst nach 420 Sekunden öffnen, akkumuliert sich die thermische Energie massiv im oberen Hallendrittel:



Frame: 175
Time: 420.0

Bild 7.16: Auszug aus SMV nach 420s Simulationszeit (eigene Darstellung)

Unmittelbar vor der Freigabe der Abströmflächen füllt sich die Halle aufgrund der fehlenden Rauchgasabführung kontinuierlich von der Decke abwärts mit Rauch.

Die Unterkante der Rauchschiicht verbleibt in dieser Phase jedoch oberhalb der für die Selbstrettung relevanten Höhe von 2,50 m.

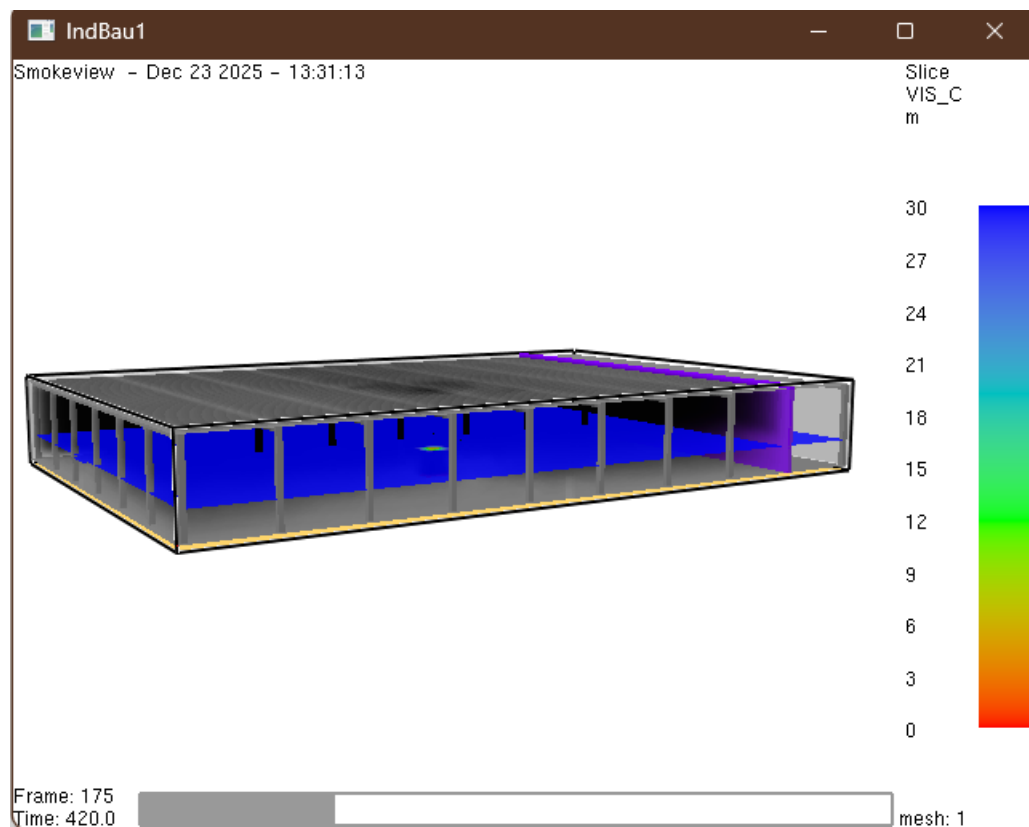


Bild 7.17: Auszug aus SMV: Sichtweite auf 2,50 m Höhe nach 420 Sekunden

Die Sichtweite im Bereich unterhalb der 2,50 m Grenze beträgt immer noch 30 Meter. Mit der Öffnung der RWA stellt sich ein stabiler Abströmzustand ein. Die thermisch belasteten Gase werden über die Dachöffnungen abgeführt, während über die bodennahen Öffnungen Außenluft nachströmt. Die Beurteilung der Personensicherheit sowie der Bedingungen für die Brandbekämpfung erfolgt maßgeblich

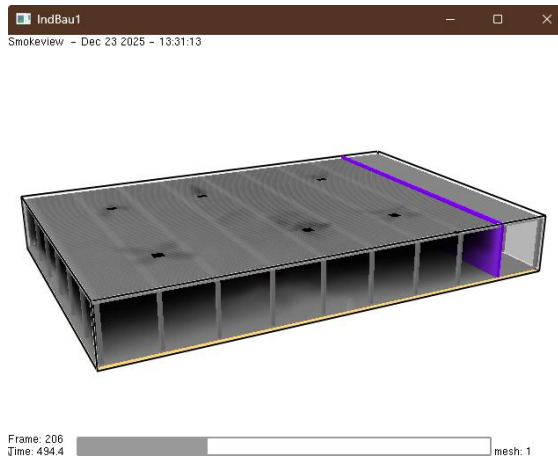


Bild 7.18: Auszug aus SMV: Öffnung der RWA (eigene Darstellung)

auf einer Bezugshöhe von 2,50 über Oberkante Fußboden. Während sich die Rauchgase und die thermische Belastung naturgemäß im oberen Deckenbereich sammeln und dort die Grenzwerte frühzeitig überschreiten, ist für die Selbstrettung ausschließlich die raucharme Schicht in der Aufenthaltszone entscheidend. Die den Graphen zugrundeliegenden Daten basieren auf einer Auswertung der Schnittebenen im 300-Sekunden-Intervall (siehe Anhang A1).

Die Sichtweite ist einer der kritischsten Parameter für die Selbstrettung, da eine Orientierung im Raum für ortsunkundige Personen ab einer Sichtweite von weniger als 10 m erheblich erschwert wird.

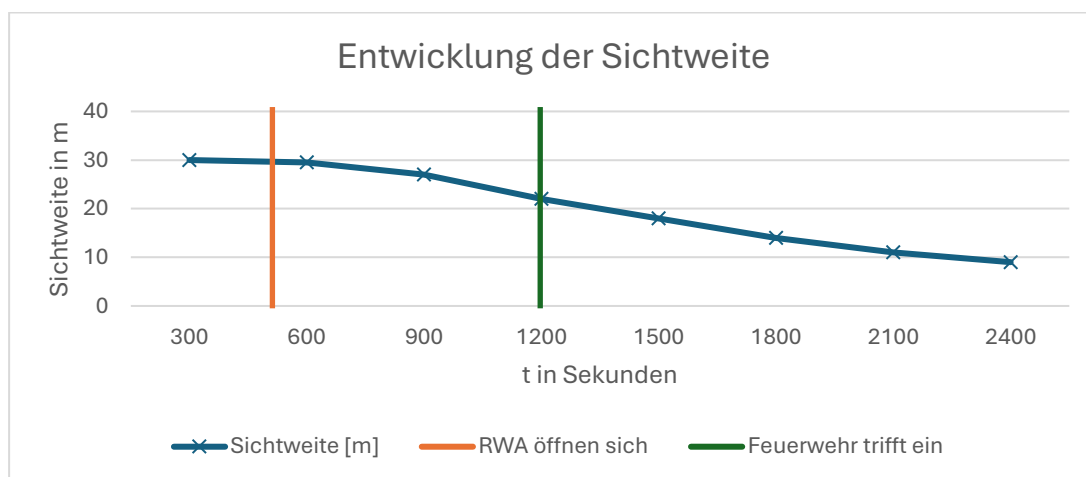


Bild 7.19: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Wie das Diagramm zeigt, bleibt die Sichtweite auf der 2,50 m Ebene während der gesamten Phase der Selbstrettung weit oberhalb der kritischen Grenze. Setzt man nach der Branderkennung (ca. 6 Minuten) weitere 10 Minuten für die Räumung an,

ergibt sich ein relevanter Zeitrahmen bis zur Minute 16 (960s). Zu diesem Zeitpunkt liegt die mittlere Sichtweite noch bei mehr als 25m. Erst im weiteren Verlauf sinkt sie ab, beträgt zum Zeitpunkt des Eintreffens der Feuerwehr (20 Min. / 1200 s) immer noch ca. 22 m, was wirksame Löscharbeiten und einen Innenangriff problemlos möglich macht. Dass die Sichtweite nach 40 Minuten (2400 s) auf etwa 9 m absinkt, ist für die Personensicherheit vernachlässigbar, da die Evakuierung zu diesem Zeitpunkt längst abgeschlossen ist.

Darüber hinaus wurde die thermische Einwirkung für den Personenschutz auf einer Höhe von 2,50 m sowie für den Sachschutz auf einer Höhe von 5,00 m untersucht, um die Wirksamkeit der Rauchableitung zu verifizieren.

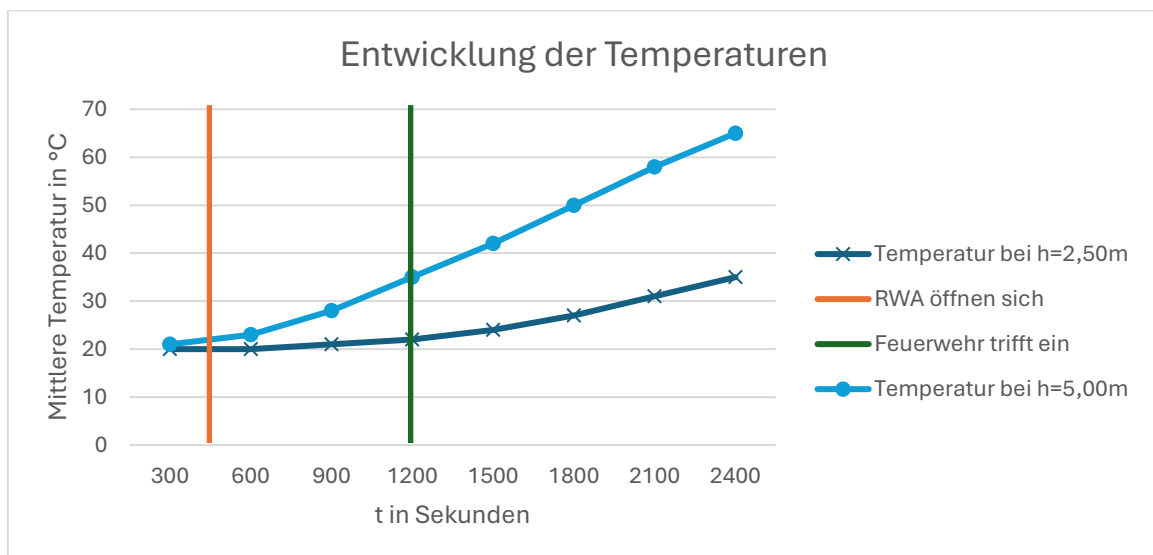


Bild 7.20: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Im Bereich der Selbstrettungshöhe (2,50 m) steigen die Temperaturen im Mittel nur moderat auf ca. 35° C nach etwa 40 Minuten an. Eine thermische Gefährdung der Personen liegt somit zu keinem Zeitpunkt vor. Auf der 5,00 m Ebene zeigt sich erwartungsgemäß eine deutlich höhere Belastung von ca. 65°C im Mittel.

Neben der Hitze und Sichttrübung ist die Konzentration von Brandgasen, insbesondere von Kohlenmonoxid (CO), für die Handlungsfähigkeit der Personen entscheidend. Die Auswertung zeigt, dass die CO-Konzentration auf der 2,50 m Ebene selbst nach 40 Minuten mit einem Mittelwert von ca. 31,5 ppm absolut unkritisch bleibt. Damit ist eine Gefährdung durch toxische Brandgase im relevanten Zeitraum ausgeschlossen:

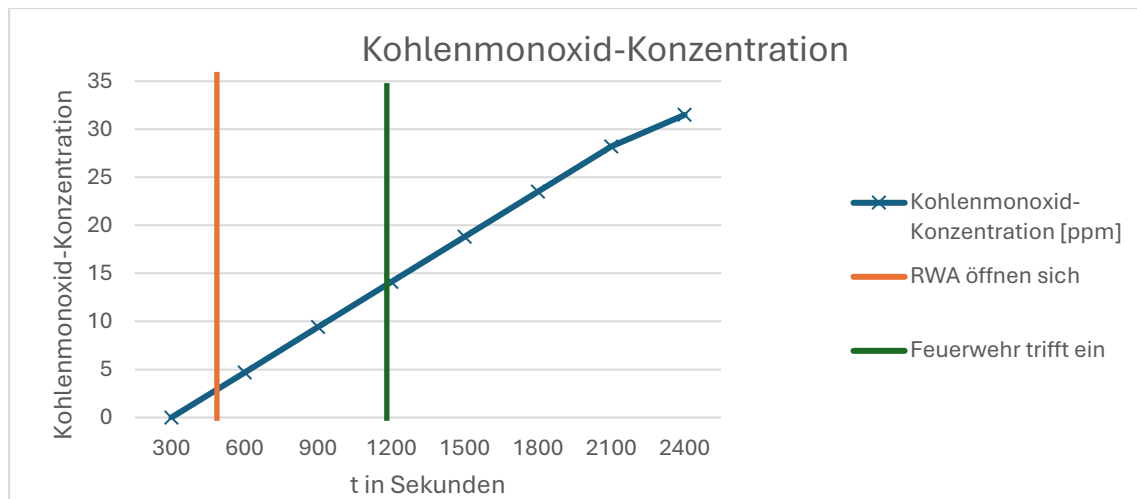


Bild 7.21: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Die Rußausbeute korreliert physikalisch direkt mit der Sichtweite und bestätigt die beobachtete Stabilität der Rauchsichtung.

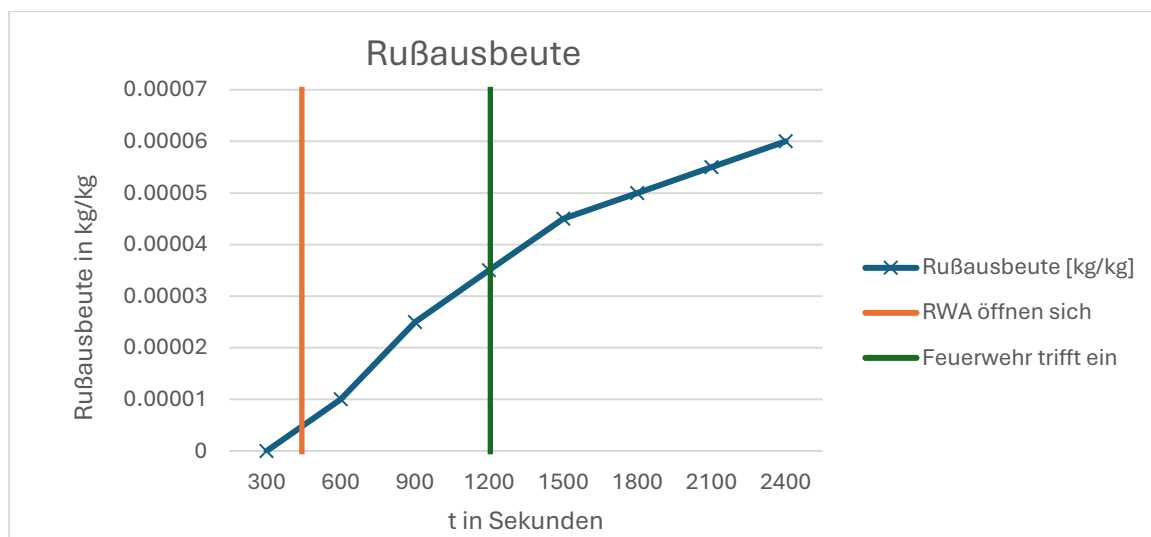


Bild 7.22: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Die Zunahme der Rußpartikel auf der 2,50 m Ebene erfolgt analog zur Sichtweitenminderung erst zeitverzögert.

Zusammenfassend belegen diese Simulationsergebnisse, dass die gewählte Nachweisstrategie für den Industriebau vollumfänglich wirksam ist. Obwohl die realisierten Rauchabzugsflächen geringer dimensioniert sind, als die nach MIndBauRL sowie DIN 18232-2 und DIN 18232-5 ermittelten erforderlichen Rauchabzugsflächen, weist die instationäre Simulation nach, dass die Schutzziele zu jedem Zeitpunkt erreicht werden.

7.2.2 Simulation unter Einsatz einer Brandmeldeanlage

Im zweiten Untersuchungsschritt wird die Lagerhalle unter Berücksichtigung einer flächendeckenden, automatischen Brandmeldeanlage betrachtet. Im Gegensatz zum ersten Szenario erfolgt die Aktivierung hier nicht zeitverzögert durch eine manuelle Auslösung, sondern unmittelbar nach der Detektion des Rauches durch punktförmige Rauchmelder an der Hallendecke. Auch in diesem Szenario wird die reduzierte Dimensionierung der NRA beibehalten und damit die pauschalen baurechtlichen Vorgaben unterschritten.

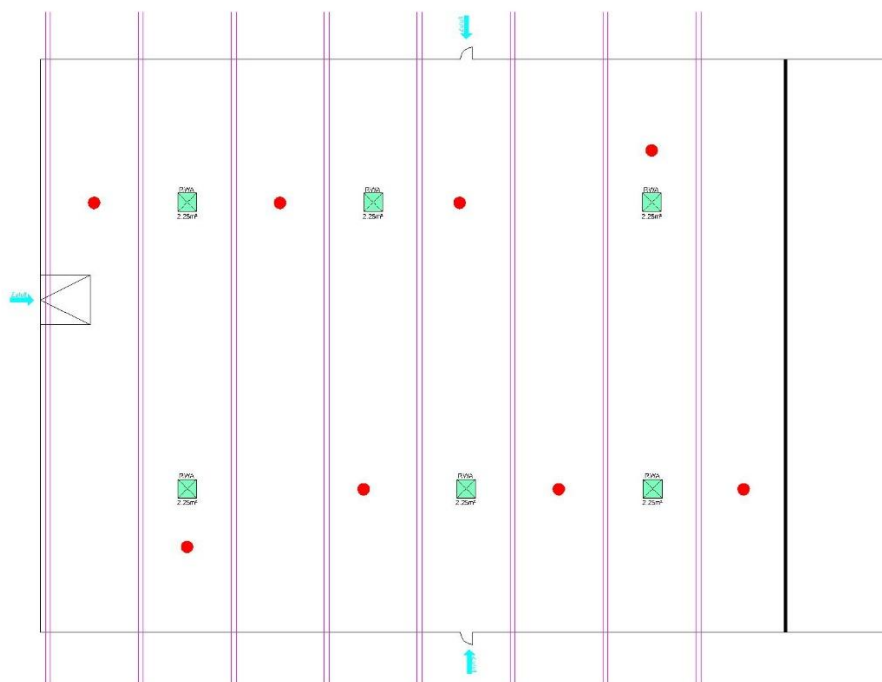


Bild 7.23: Schematischer Grundriss der Halle mit Einbindung der RWA und Zuluftflächen sowie Rauchmelder (eigene Darstellung)

In der dargestellten Abbildung ist neben der Positionierung der RWA und Zuluftflächen zusätzlich die Anordnung der punktförmigen Rauchmelder an der Hallendecke dargestellt.

Die zugrundeliegende FDS-Eingabedatei wird analog zum ersten Szenario aufgebaut. Lediglich die logische Verknüpfung der Detektionsereignisse mit den Öffnungsmechanismen der NRA muss ergänzt werden.

Dafür werden die Rauchmelder zunächst als *DEVIC* an der Hallendecke positioniert. Als Auslösekriterium dient die Lichtextinktion innerhalb der Messkammer (*CHAMBER OBSCURATION*). Die logische Verknüpfung erfolgt über einen

Kontrollbefehl, der sicherstellt, dass das System anspringt, sobald ein beliebiger Melder den Schwellenwert erreicht.

```

167 ---Implementierung der Brandmeldeanlage---
168
169 &PROP ID='Rauchmelder' , QUANTITY='CHAMBER OBSCURATION', LENGTH= 1.8 / Definition eines Standard-Rauchmelders
170
171 &DEVC ID='BMA1_M1' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 4.35, 34.65, 7.9 / Platzierung Melder 1 in Abschnitt 1
172 &DEVC ID='BMA1_M2' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 11.90, 7.00, 7.9 / Platzierung Melder 2 in Abschnitt 1
173 &DEVC ID='BMA1_M3' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 19.35, 34.65, 7.9 / Platzierung Melder 3 in Abschnitt 1
174 &DEVC ID='BMA1_M4' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 26.10, 11.55, 7.9 / Platzierung Melder 4 in Abschnitt 1
175 &DEVC ID='BMA2_M1' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 33.85, 34.65, 7.9 / Platzierung Melder 1 in Abschnitt 2
176 &DEVC ID='BMA2_M2' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 41.85, 11.55, 7.9 / Platzierung Melder 2 in Abschnitt 2
177 &DEVC ID='BMA2_M3' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 49.35, 38.90, 7.9 / Platzierung Melder 3 in Abschnitt 2
178 &DEVC ID='BMA2_M4' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 55.75, 11.55, 7.9 / Platzierung Melder 4 in Abschnitt 2
179
180 &CTRL ID='Ausloesung_Melder' , FUNCTION_TYPE='ANY' , INPUT_ID='BMA1_M1','BMA1_M2','BMA1_M3','BMA1_M4','BMA2_M1','BMA2_M2','BMA2_M3','BMA2_M4' /
181 (Logik hinterlegen: BMA bekommt Signal sobald einer der Melder auslöst)
182
183 &CTRL ID='RWA_Start' , FUNCTION_TYPE='ANY' , INPUT_ID='Ausloesung_Melder' , DELAY= 30.0 / BMA sorgt für Öffnen der RWA's nach 30sekunden

```

Bild 7.24: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Implementierung der Brandmeldeanlage (eigene Darstellung)

Nach erfolgreicher Definition und Platzierung der Rauchmelder wird ein Control-Befehl „Ausloesung_Melder“ definiert. Diese stellt sicher, dass bei Auslösung einer der definierten Melder ein Signal eingeht. Dieses Signal nutzen wir innerhalb eines weiteren Control-Befehls „RWA-Start“. Sobald das Signal des Rauchmelders wahrgenommen wird, startet die Öffnung der RWA mit einer Zeitverzögerung (*DELAY*) von 30s. Nun wird der Start der RWA an die entsprechenden Öffnungen gekoppelt:

```

187 Abluft: 6x RWA im Dach a 1,50 x 1,50 m
188 &HOLE XB= 11.10, 12.60, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
189 &HOLE XB= 11.10, 12.60, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
190 &HOLE XB= 26.10, 27.60, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
191 &HOLE XB= 33.60, 35.10, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
192 &HOLE XB= 48.60, 50.10, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
193 &HOLE XB= 48.60, 50.10, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

```

Bild 7.25: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Kopplung der BMA mit den RWA-Öffnungen (eigene Darstellung)

Im nächsten Schritt erfolgt die Analyse der Erfolgskriterien. Die für die Beurteilung zugrunde liegenden Schnittebenen sind im Anhang A2 im 300-Sekunden-Intervall dokumentiert.

Die Sichtweite bleibt über den gesamten Zeitraum der Selbstrettung stabil über 25 m. Auch zum Zeitpunkt des Löschangriffs (ca. 20 Min.) liegen mit einer Sichtweite von ca. 26 m optimale Bedingungen für die Einsatzkräfte vor. Der Grenzwert von 10 m wird selbst nach 40 Minuten Simulationsdauer mit 11,50 m nicht unterschritten.

Die konkrete Entwicklung der Sichtweiten ist in folgender Grafik dargestellt:

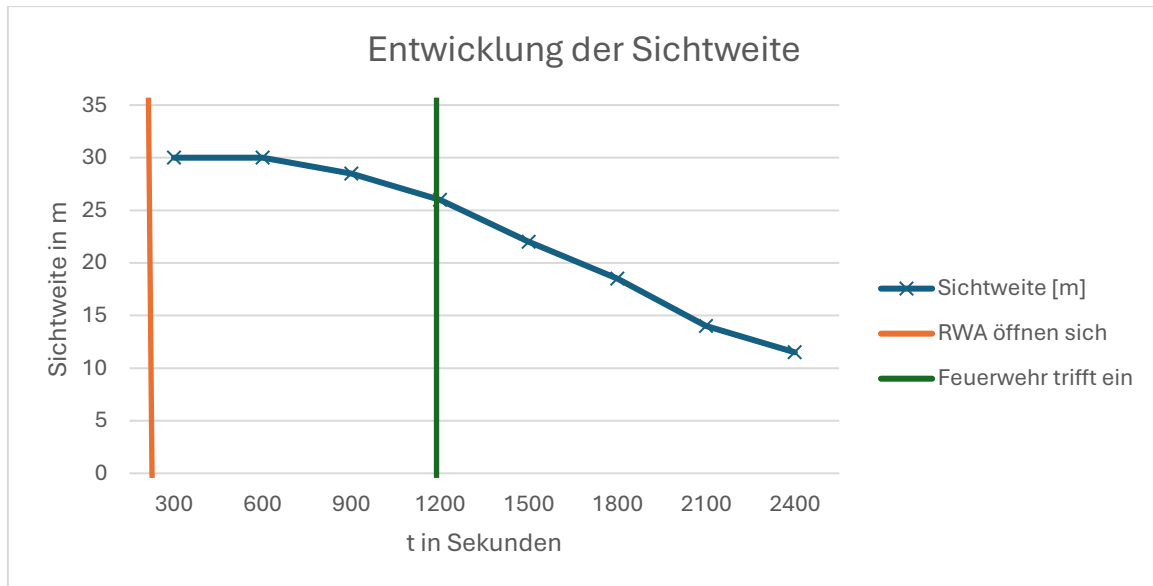


Bild 7.26: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

In der thermischen Betrachtung führt die BMA-gesteuerte RWA zu einer effektiven Begrenzung der Temperaturen. Während auf der 5,00 m Ebene die Wärmeabfuhr zu einer Stabilisierung bei maximal 44°C führt, verharrt die Temperatur in der Aufenthaltszone bis 2,50 m bei moderaten 33°C, sodass eine Gefährdung der Personen ausgeschlossen ist:

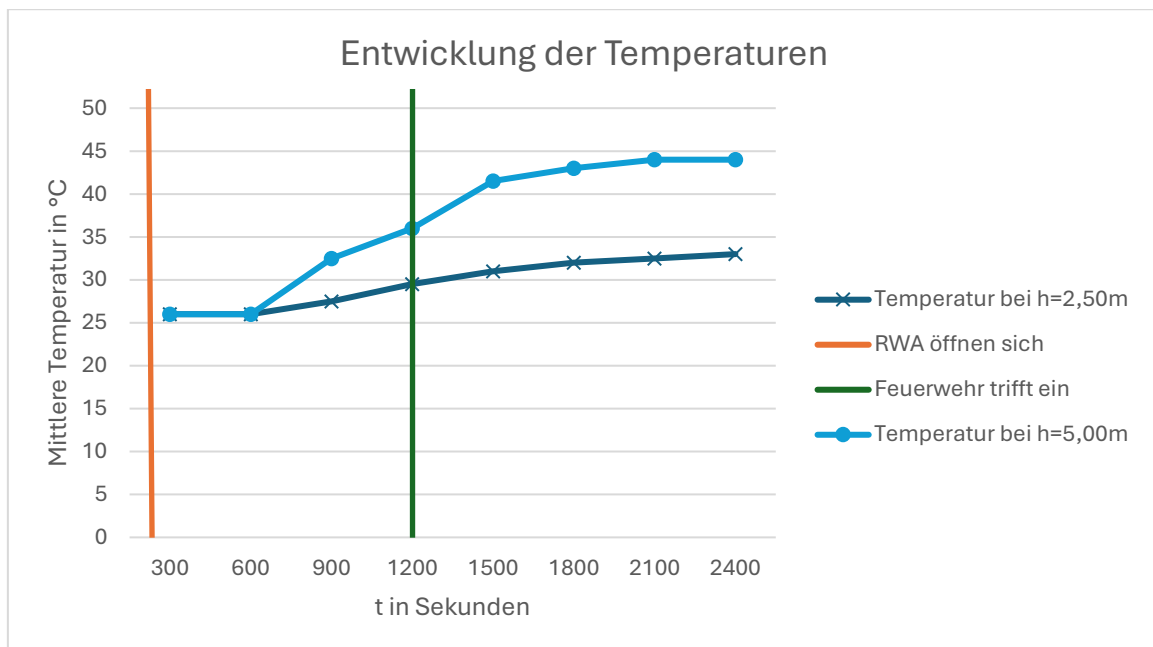


Bild 7.27: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit (eigene Darstellung)

Die Kohlenmonoxid-Konzentration verläuft analog zu den restlichen Erfolgskriterien auf einem äußerst niedrigen Niveau. Die Konzentration bleibt während der gesamten Simulationsdauer weit unterhalb des 30 ppm Schwellenwertes.

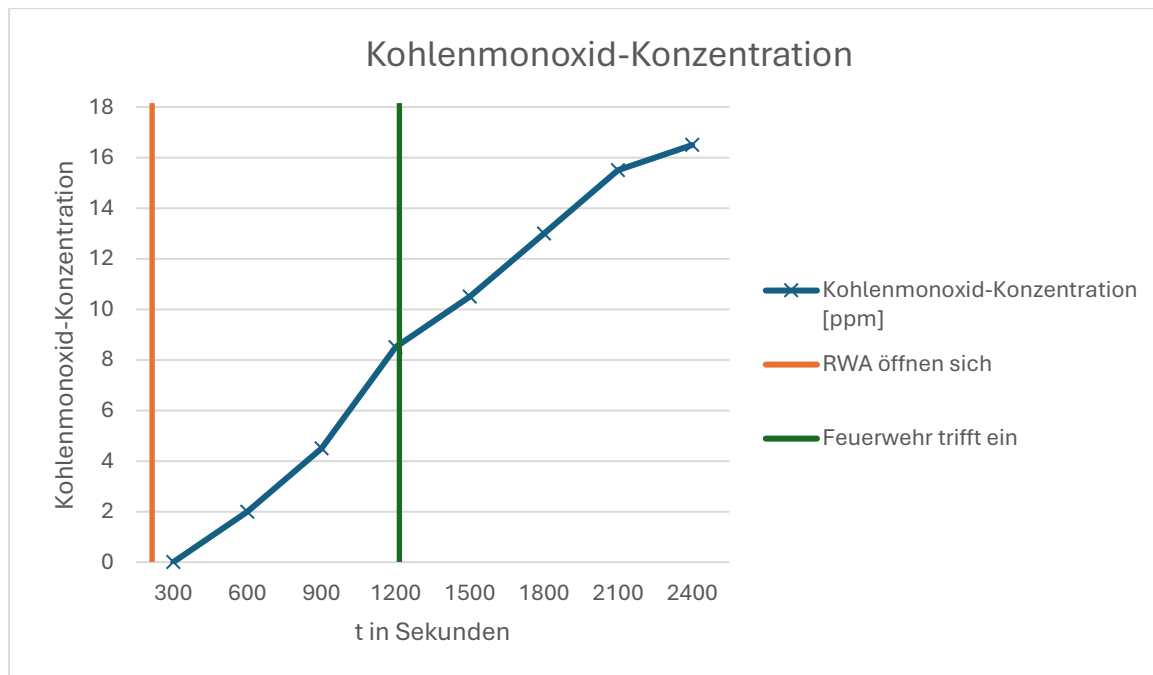


Bild 7.28: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit (eigene Darstellung)

Auch die Werte der Rußausbeute fallen weiterhin gering aus:

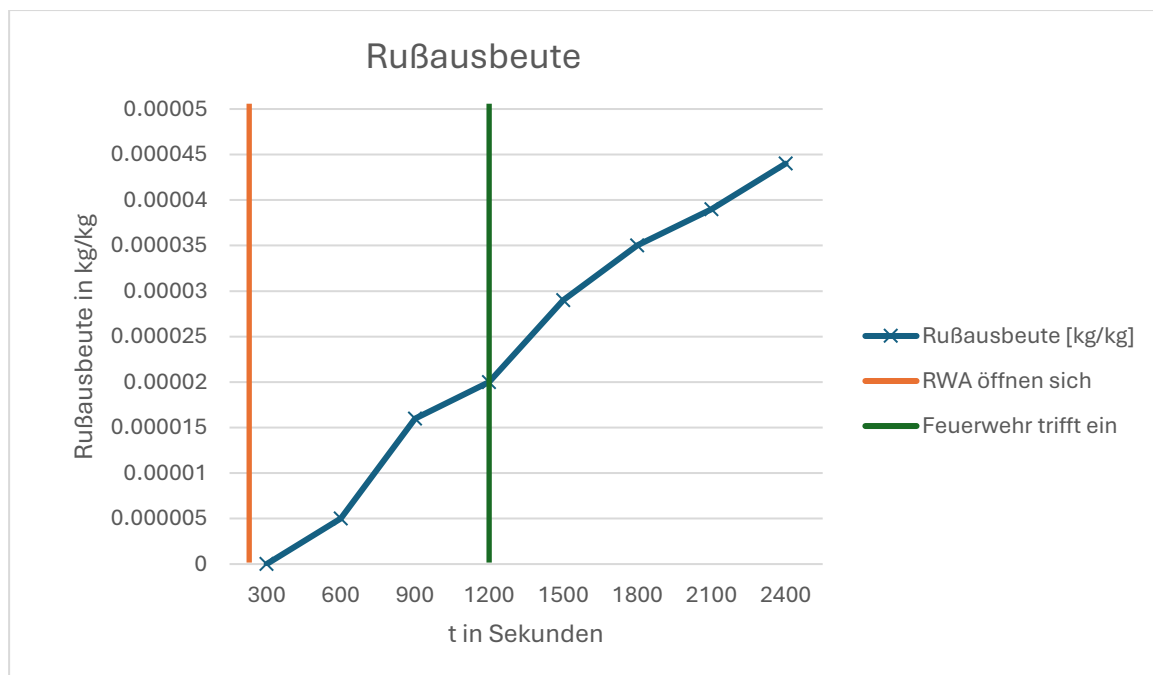


Bild 7.29: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Durch die Kopplung der NRA an die Brandmeldeanlage wird sichergestellt, dass die Rauchableitung unmittelbar mit der Brandentstehung korreliert. Die RWA öffnen sich deutlich früher im Vergleich zur manuellen Auslösung in Variante 1, was sich geringfügig in den Werten widerspiegelt. Es sind jedoch keine relevanten

Unterschiede im Vergleich zur Variante 1. Die Schutzziele der Selbstrettung und der Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten werden auch hier zu jedem Zeitpunkt sicher eingehalten. Der Nachweis durch die Simulation ist damit erfolgreich erbracht.

7.2.3 Simulation unter Einsatz einer Sprinkleranlage

Im dritten Untersuchungsschritt wird die Lagerhalle unter Berücksichtigung einer flächendeckenden Sprinkleranlage betrachtet. Im Gegensatz zum vorherigen Szenario erfolgt die Aktivierung der sicherheitstechnischen Einrichtungen hier jedoch nicht über punktförmige Rauchmelder. Stattdessen werden Sprinklerköpfe mit integrierten Schmelzlot-Auslösemechanismen an exakt denselben Positionen an der Hallendecke vorgesehen, wie in der nachfolgenden Grafik dargestellt:

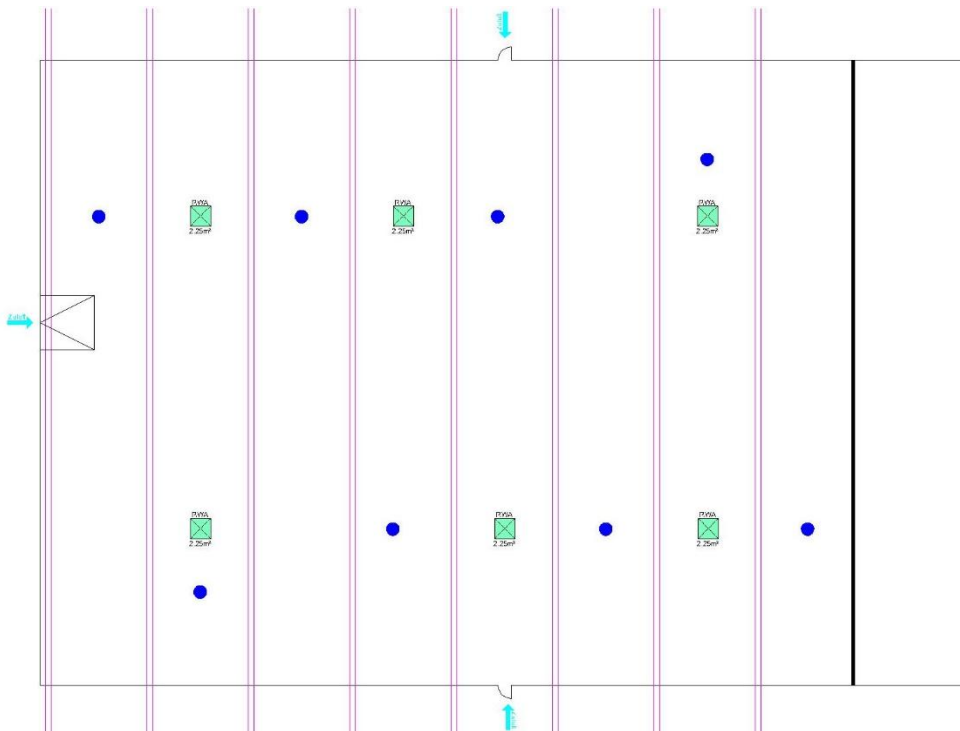


Bild 7.30: Schematischer Grundriss der Halle mit Einbindung der RWA und Zuluftflächen sowie Sprinklerköpfe (eigene Darstellung)

Die zugrundeliegende FDS-Eingabedatei wird analog zu den vorherigen Szenarien aufgebaut. Lediglich die logische Verknüpfung der thermischen Auslöseereignisse mit den Öffnungsmechanismen der NRA sowie die physikalische Auswirkung der Sprinkleranlage auf den Brandherd müssen ergänzt werden.

Dafür werden die Sprinklerköpfe zunächst als *DEVC* an der Hallendecke positioniert. Als Auslösekriterium dient hierbei die *LINK_TEMPERATURE* des

Schmelzlots. Die Aktivierung erfolgt, sobald die thermische Beaufschlagung durch die Brandgase den definierten Schwellenwert von 68°C erreicht.

```

157 ---Implementierung der Sprinkleranlage---
158
159 &SPEC ID='WATER VAPOR' /
160 &PART ID='Wassertropfen', SPEC_ID='WATER VAPOR', DIAMETER=500. /
161
162 &PROP ID='Sprinkler', ! Bezeichnung
163 QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE', ! Anweisung: Temperatur am Schmelzlot soll gemessen werden
164 RTI= 50., ! Response Time Index (50 für schnelle Auslösung)
165 ACTIVATION_TEMPERATURE = 68., ! Glasflaschen platzen bei 68 Grad Celcius
166 PART_ID='Wassertropfen' ! Verweis auf oben definierte Wassertropfen-Eigenschaft
167 FLOW_RATE=80 ! Wassermenge in l/min
168 PARTICLE_VELOCITY=5., ! Geschwindigkeit mit der Wasser aus Düse schießt
169 SPRAY_ANGLE=30.,80. / ! Sprühkegel: Wasser wird zwischen 30° und 80° vertikal verteilt
170
171 &DEVC ID='Spr_1', PROP_ID='Sprinkler', XYZ = 4.35, 34.65, 7.9, ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 1
172 &DEVC ID='Spr_2', PROP_ID='Sprinkler', XYZ = 11.90, 7.00, 7.9, ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 2
173 &DEVC ID='Spr_3', PROP_ID='Sprinkler', XYZ = 19.35, 34.65, 7.9, ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 3
174 &DEVC ID='Spr_4', PROP_ID='Sprinkler', XYZ = 26.10, 11.55, 7.9, ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 4
175 &DEVC ID='Spr_5', PROP_ID='Sprinkler', XYZ = 33.85, 34.65, 7.9, ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 5
176 &DEVC ID='Spr_6', PROP_ID='Sprinkler', XYZ = 41.85, 11.55, 7.9, ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 6
177 &DEVC ID='Spr_7', PROP_ID='Sprinkler', XYZ = 49.35, 38.90, 7.9, ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 7
178 &DEVC ID='Spr_8', PROP_ID='Sprinkler', XYZ = 55.75, 11.55, 7.9, ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 8

```

Bild 7.31: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Implementierung der Sprinkleranlage (eigene Darstellung)

Im nächsten Schritt wird ein Control-Befehl „*Sprinkler_Aktiv*“ definiert, der sicherstellt, dass bei Auslösung eines beliebigen Schmelzlots ein Signal generiert wird. Dieses Signal wird an den Befehl *RWA_TIMER* weitergegeben. Hier ist eine Zeitverzögerung von 30 Sekunden hinterlegt. Nach Ablauf der Verzögerung aktiviert der Befehl *RWA_Start* die entsprechenden Öffnungen.

```

180 ---Zu- und Abluftflächen (Öffnungen)---
181
182 Auslösung durch Sprinkleranlage:
183 &CTRL ID= 'Sprinkler_Aktiv'
184 FUNCTION_TYPE='ANY'
185 INPUT_ID='Spr_1','Spr_2','Spr_3','Spr_4','Spr_5','Spr_6','Spr_7','Spr_8' /
186
187 &CTRL ID= 'RWA_TIMER', FUNCTION_TYPE='TIME_DELAY', INPUT_ID='Sprinkler_Aktiv', DELAY= 30.0 /
188
189 &CTRL ID= 'RWA_Start', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='RWA_TIMER' /
190
191 Abluft: 6x RWA im Dach a 1,50 x 1,50 m
192 &HOLE XB= 11.10, 12.60, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
193 &HOLE XB= 11.10, 12.60, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
194 &HOLE XB= 26.10, 27.60, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
195 &HOLE XB= 33.60, 35.10, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
196 &HOLE XB= 48.60, 50.10, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
197 &HOLE XB= 48.60, 50.10, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

```

Bild 7.32: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Kopplung der Sprinkleranlage mit den RWA-Öffnungen (eigene Darstellung)

Durch diese Programmierung wird sichergestellt, dass die Entrauchung präzise auf die thermische Aktivierung der Sprinklerköpfe reagiert. Im nächsten Schritt erfolgt dann die Analyse der Erfolgskriterien. Die für die Beurteilung zugrunde liegenden Schnittebenen sind im Anhang A3 im 300-Sekunden-Intervall dokumentiert.

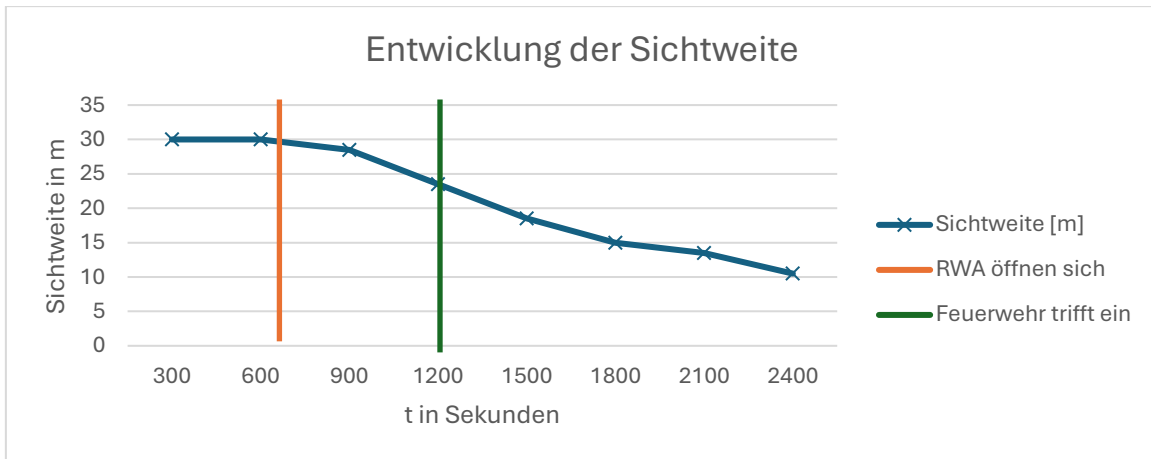


Bild 7.33: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Die Auswertung der Sichtweite zeigt auf der Höhe von 2,50 m bis zur 600. Sekunde einen konstanten Verlauf bei 30,0 m. Mit der thermischen Detektion durch die Schmelzloten erfolgt die vollständige Öffnung der RWA erst ab Sekunde 650, wobei die Sichtweite zu diesem Zeitpunkt noch unverändert bei knapp unter 30 m liegt. Im weiteren Simulationsverlauf ist ein kontinuierliches Absinken der Werte zu verzeichnen, wobei zum Ende der Selbstrettungsphase nach 16 Minuten eine Sichtweite von ca. 27,5 m und zum Zeitpunkt des Löschangriffs ca. 23,5 m gemessen werden. Auch in der Langzeitbetrachtung bis zum Ende des Simulationszeitraumes nach 40 Minuten (2400s) mit ca. 10,50 m wird der kritische Schwellenwert von 10,0 m zu keinem Zeitpunkt unterschritten.

Die thermische Analyse verdeutlicht den Einfluss der Sprinkleranlage auf das Brandereignis enorm. Im Vergleich zu den vorangegangenen Varianten zeigt die Temperaturkurve eine völlig veränderte Charakteristik.

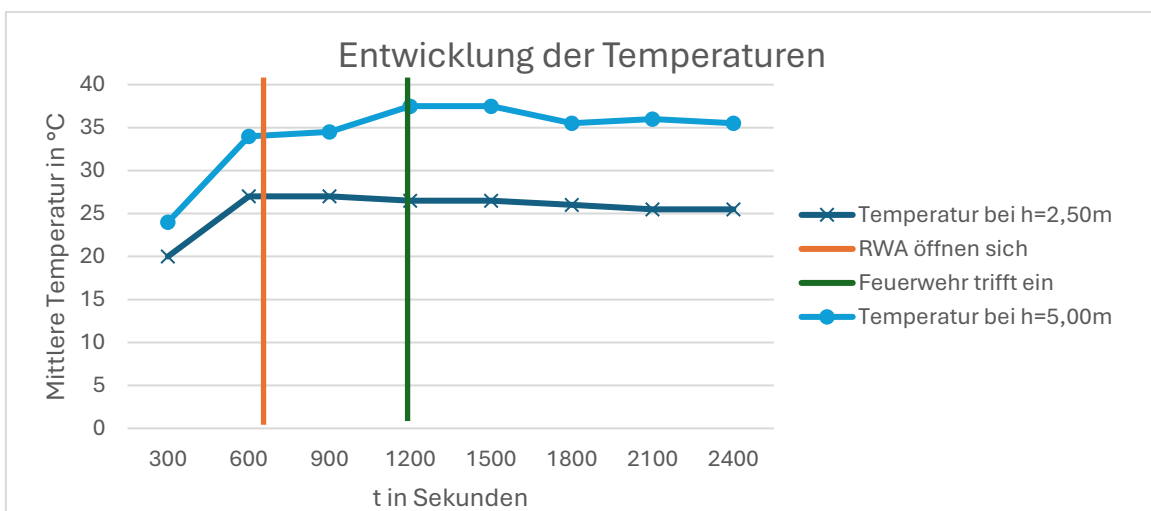


Bild 7.34: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Zu Beginn der Simulation ist ein starker Temperaturanstieg bis zum Zeitpunkt der Detektion zu verzeichnen. Mit der thermischen Auslösung der Sprinklerköpfe und der damit einhergehenden Aktivierung der NRA trifft jedoch eine sofortige Stabilisierung ein. Sowohl die Temperatur auf der 2,50 m Ebene als auch auf 5,00 m Ebene bleiben auf einem moderaten Niveau von ca. 26°C bzw. 37°C. Es treten lediglich geringfügige Schwankungen nach oben und unten auf, was auf das physikalische Gleichgewicht zwischen der kontinuierlichen Abkühlung durch das Löschwasser und der zeitgleichen Erwärmung durch den Brandherd zurückzuführen ist.

Die Kohlenmonoxid-Konzentration auf der 2,50 m Ebene zeigt über den gesamten Simulationsverlauf eine sehr geringe Ausprägung. Es erfolgt zunächst eine nahezu lineare Zunahme der Werte, die zum Zeitpunkt der Selbstrettung (16 Min.) bei lediglich ca. 6,5 ppm liegt. Mit dem Eintreffen der Feuerwehr zur 1200. Sekunde wird ein Wert von ca. 7,5 ppm verzeichnet, bevor die Konzentration am Ende der Simulation nach 40 Minuten bei ihrem Maximalwert von 11,5 pm stagniert.

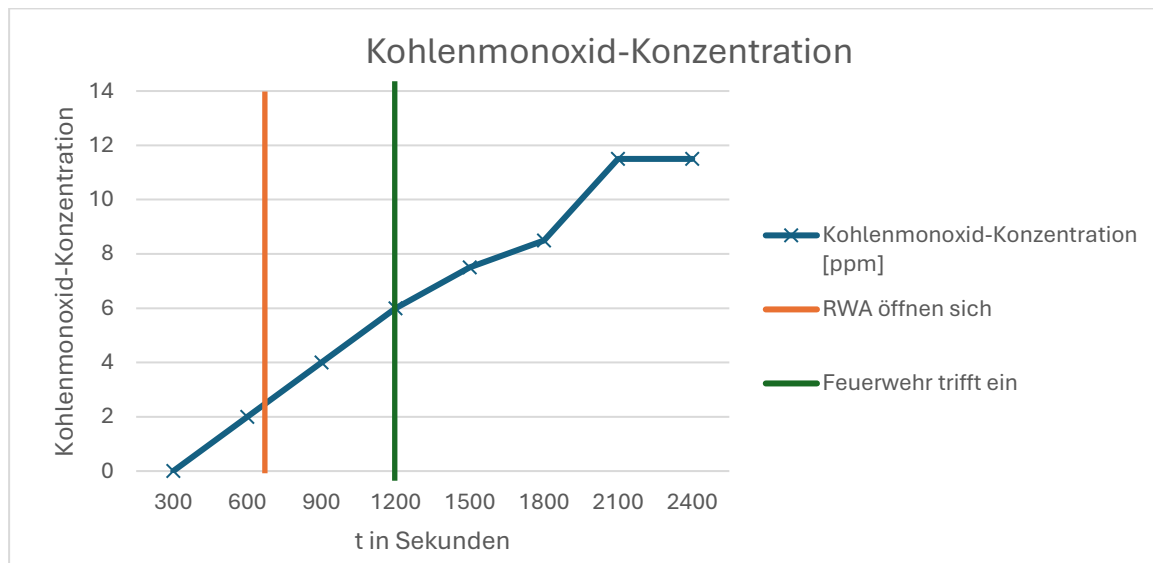


Bild 7.35: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit t

Toxikologische Grenzwerte werden zu keinem Zeitpunkt der Simulation erreicht.

Die Rußausbeute auf der 2,50 m Ebene korreliert unmittelbar mit dem Verlauf der zuvor analysierten Sichtweite. Bis zur verzögerten Öffnung der RWA verläuft die Partikelkonzentration auf einem eher niedrigen Niveau. Im weiteren Verlauf zeigt sich eine moderate Zunahme der Werte. Am Ende der Simulation wird ein Wert von ca. 0,0004 kg/kg erreicht. Diese geringe Rußausbeute stellt sicher, dass die

optische Trübung der Atmosphäre minimal bleibt und die Sichtweite trotz späterer Aktivierung der Rauchabzugsöffnungen weit über den Grenzwerten verharrt (siehe Bild 7.36).

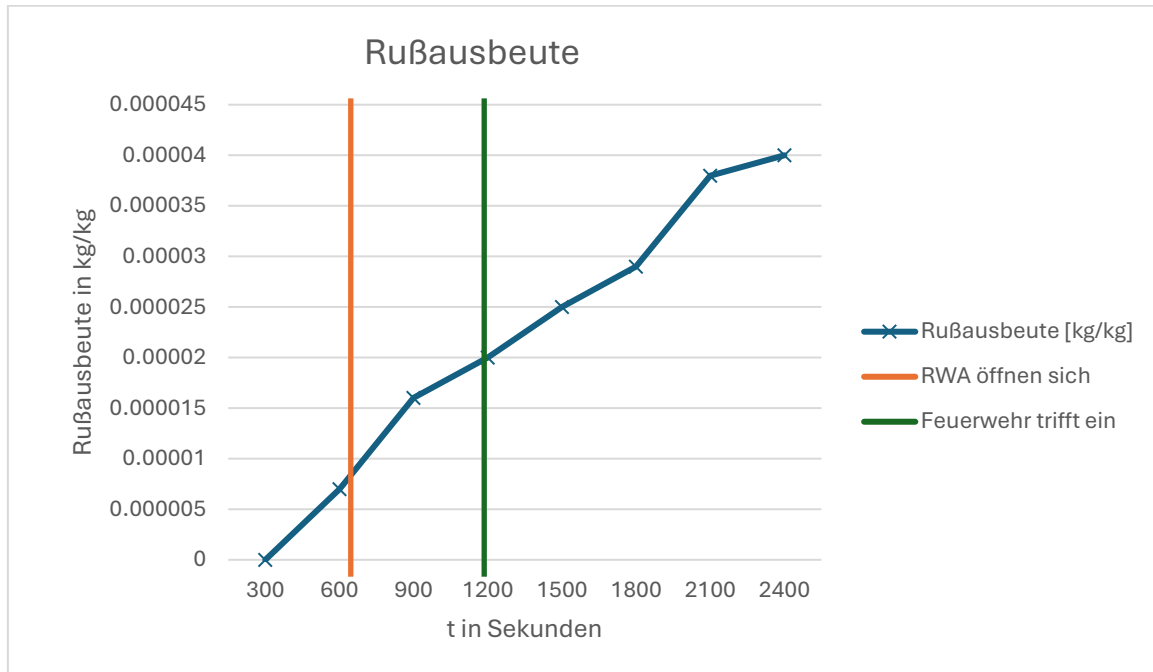


Bild 7.36: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Auch für dieses Szenario wurde der Nachweis durch die Simulation erfolgreich erbracht, da die Einhaltung der Schutzziele zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist.

7.3 Simulationsreihe Verkaufsstätte

Die zweite Untersuchungsreihe basiert auf dem Modell der Verkaufsstätte. Um die spezifischen Risiken dieser Nutzung abzubilden, wird das Bemessungsbrandszenario gegenüber der Industriebau-Simulation modifiziert. Während dort Holzpaletten die Brandlast dominierten, wird für die Verkaufsstätte ein Szenario gewählt, dass die typische Brandlast eines Drogeriemarktes repräsentiert.

Die quantitativen Kennwerte für diesen Quellterm werden auf Basis des vdfb Leitfadens für Ingenieurmethoden des Brandschutzes [11] hergeleitet. Gemäß den Kennwerten für Nutzungen werden die spezifischen Parameter für die Nutzungseinheit Drogerie entnommen. Zur Bestimmung der stofflichen Eigenschaften wie der Rußausbeute wird die Stoffgruppe „Kunststoff A – brandlastgesteuert“ aus der Tabelle „Ausbeuten und effektive Heizwerte für bemessungsrelevante Stoffgruppen“ entnommen [11].

Diese Stoffgruppe liegt chemisch Polyethylen (PE) zugrunde. Die für die Brandsimulation erforderliche Reaktionsgleichung wird daher auf Basis der Summenformel C_2H_4 definiert.

```

16
17 &REAC ID      = 'Mischbrandlast_Drogerie'
18     SOOT_YIELD = 0.060      ! Rußausbeute in g/g (hier: brandlastgesteuert/Kunststoff A)
19     CO_YIELD   = 0.024      ! Kohlenmonoxidausbeute in g/g
20     HEAT_OF_COMBUSTION = 17900 ! Heizwert des Brennstoffs in kJ/kg
21     N          = 0.0        ! Anzahl der Stickstoffatome pro Molekül
22     C          = 2.0        ! Anzahl der Kohlenstoffatome pro Molekül
23     H          = 4.0        ! Anzahl der Wasserstoffatome pro Molekül
24     O          = 0.0        ! Anzahl der Sauerstoffatome pro Molekül
25
26     RADIATIVE_FRACTION = 0.35/ Radiative Fraction wird für LES standardmäßig mit 0,35 angesetzt

```

Bild 7.37: Auszug aus der FDS-Eingabedatei: Festlegung der Reaktionsgleichung (eigene Darstellung)

Der zeitliche Verlauf der Brandentwicklung folgt ebenfalls einer t^2 -orientierten Wachstumsfunktion. Damit bleibt die Dynamik des Brandanstiegs vergleichbar, während die stofflichen Verbrennungsparameter die nutzungsspezifischen Bedingungen der Verkaufsstätte widerspiegeln.

7.3.1 Simulation ohne zusätzliche Brandschutztechnische Maßnahmen

Im ersten Untersuchungsschritt wird die Verkaufsstätte analog zum Industriebau in Ihrer Grundkonfiguration betrachtet. Um eine direkte Vergleichbarkeit der Gebäudetypen zu ermöglichen, wird für die Verkaufsstätte die identische Anordnung der RWA- und Zuluftflächen gewählt, wie sie bereits in Bild 7.11 für den Industriebau hergeleitet wurde. Auch hier wird mit einer geometrischen Rauchabzugsfläche von ca. 13,50 m² gearbeitet, was die pauschalen Anforderungen der MVKVO sowie der DIN deutlich unterschreitet.

Der wesentliche Unterschied zur ersten Versuchsreihe liegt in der physikalisch-chemischen Brandcharakteristik. Während im Industriebau ein Zellulosebrand (Holzpaletten) simuliert wurde, basiert dieser Rechenlauf auf der in 7.3 definierten Reaktionsgleichung von Polyethylen. Dieser Energieträger weist eine signifikant höhere Rußausbeute sowie einen höheren Heizwert auf, was eine schnellere Beeinträchtigung der Sichtweite erwarten lässt.

Die Auslösung der NRA erfolgt bei diesem Verfahren wieder manuell nach einer Verzögerungszeit von 520 Sekunden. Die Dokumentation der Eingabedatei sowie die Auswertung der Erfolgskriterien auf den relevanten Schnittebenen sind im Anhang A4 im 300-Sekunden-Intervall hinterlegt.

Die Analyse der Sichtweite auf der 2,50 m Ebene offenbart die signifikanten Auswirkungen der nutzungsspezifischen Brandlast einer Drogerie. Aufgrund der hohen Rußausbeute des simulierten Kunststoffbrandes ist eine wesentlich schnellere und intensivere Trübung der Sichtweite zu beobachten.

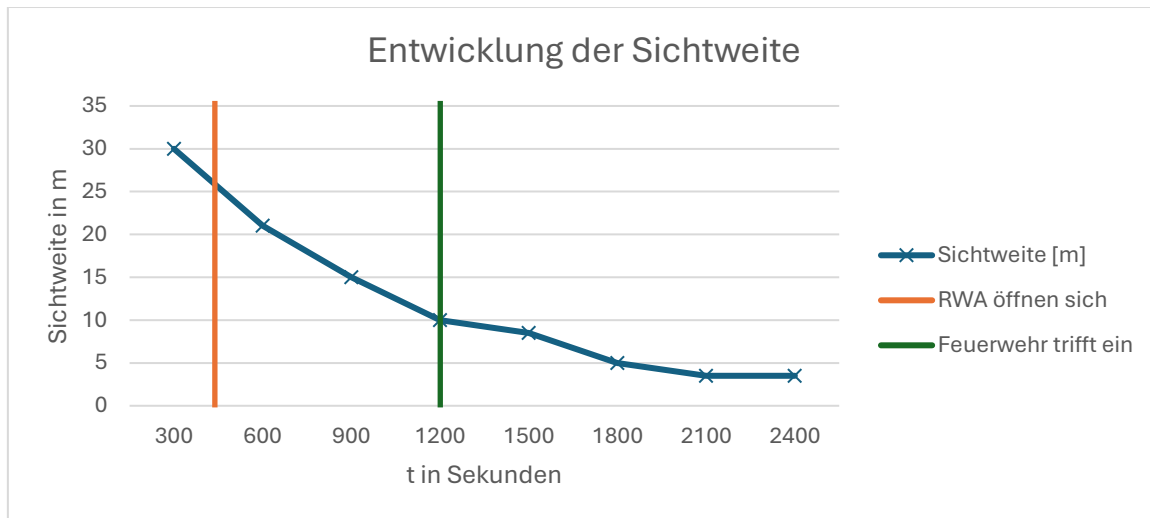


Bild 7.38: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Während der Maximalwert in den ersten 300 Sekunden zunächst stabil bleibt, ist zum Zeitpunkt der manuellen Auslösung der NRA bereits eine Minderung auf ca. 25,5 m festzustellen. Im weiteren Verlauf sinkt die Sichtweite kontinuierlich ab, sodass am Ende der Selbstrettungsphase nach 16 Minuten noch ein Wert von ca. 14,5 m im Mittel gemessen wird. Mit dem Eintreffen der Feuerwehr zur 1200. Sekunde erreicht die Sichtweite exakt die kritische Marke von 10,0 m, was die Bedingungen für einen effektiven Innenangriff erheblich erschwert.

Die thermische Analyse unterstreicht die hohe Brandintensität der gewählten PE-Brandlast: Im Bereich der Selbstrettungshöhe von 2,50 m steigen die Temperaturen bereits in der Anbrandphase stetig an und erreichen zum Zeitpunkt der manuellen RWA-Öffnung einen Wert von ca. 25°C. Im weiteren Verlauf der Simulation ist eine kontinuierliche Erwärmung zu verzeichnen, die zum Ende der Selbstrettungsphase bei ca. 31°C und zum Zeitpunkt des Löschangriffs bei etwa 34°C liegt. Bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes stabilisiert sich die Temperatur in der Aufenthaltszone bei ca. 38°C, womit eine direkte thermische Gefährdung für flüchtende Personen ausgeschlossen werden kann. Wesentlich deutlicher tritt die thermische Einwirkung auf der 5,00 m Ebene hervor. Hier zeigt der Graph in Bild 7.39 einen steilen Anstieg, der bereits zur 1200. Sekunde die Marke von 45°C überschreitet. Im weiteren

Verlauf steigt die mittlere Temperatur in der oberen Hallenhälfte bis auf einen Endwert von ca. 54°C an.

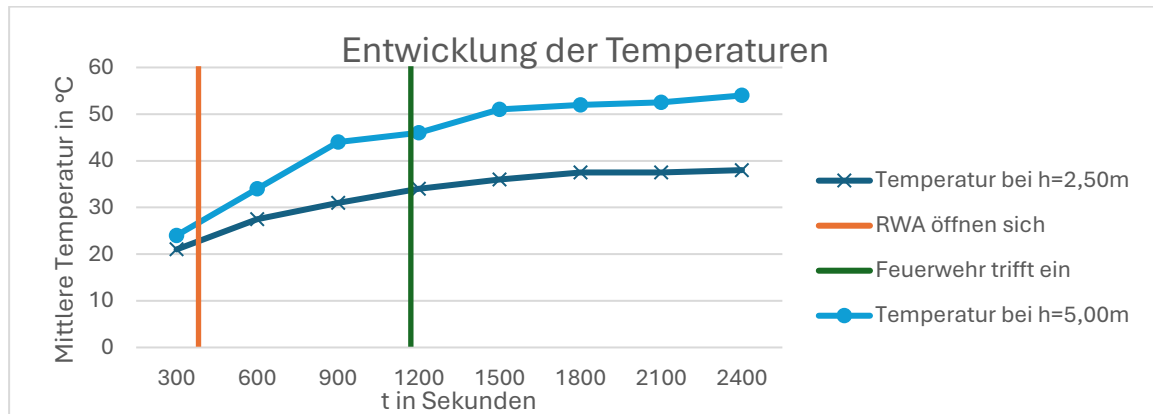


Bild 7.39: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Die toxikologische Untersuchung zeigt ebenfalls einen signifikant steileren Anstieg der Kohlenmonoxid-Belastung im Vergleich zur Industriebausimulation:

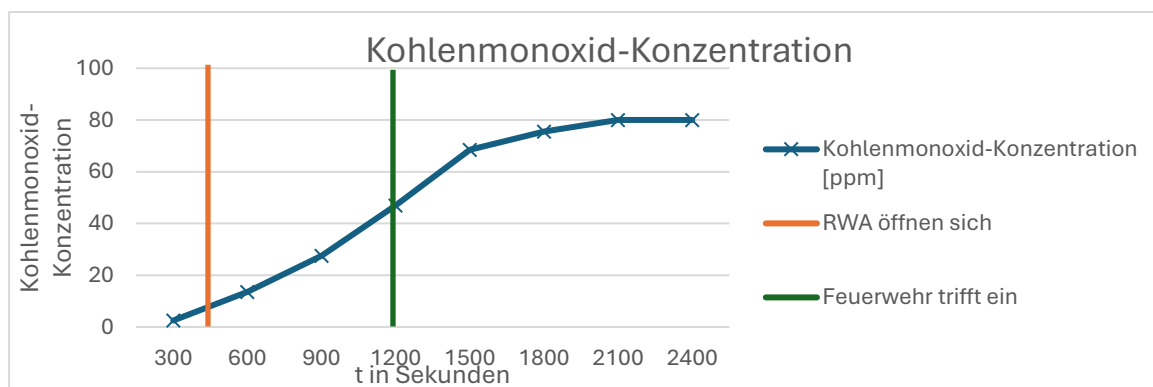


Bild 7.40: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Bereits zum Zeitpunkt der manuellen Auslösung der NRA liegt die CO-Konzentration bei ca. 8 ppm. In der folgenden Phase der Selbstrettung bis zur 960. Sekunde steigt der Wert rapide auf ca. 35 ppm an und erreicht beim Eintreffen der Feuerwehr (1200s) eine Konzentration von ca. 48 ppm. Im weiteren Verlauf der Simulation setzt sich dieser Trend massiv fort, wobei die Kurve nach 30 Minuten die Marke von 75 ppm überschreitet und schließlich bei einem Maximalwert von 80 ppm stagniert.

Obwohl dieser Endwert im Vergleich zu den Kohlenmonoxid-Konzentrationen im Industriebau mehr als doppelt so hoch ausfällt, bleibt die Konzentration auch in diesem Szenario weit unterhalb der lebensbedrohlichen Schwellenwerte. Die Handlungsfähigkeit der Personen im Rahmen der Selbstrettung ist somit nicht durch

toxische Gase eingeschränkt. Dennoch verdeutlicht die Kurvencharakteristik das erhöhte Gefährdungspotenzial der Drogerienutzung, da die Akkumulation der Brandgase aufgrund der hohen Abbrandrate des Kunststoffes wesentlich schneller voranschreitet als bei einem reinen Zellulosebrand. Das Schutzziel hinsichtlich der toxischen Belastung wird somit erreicht, die Sicherheitsreserven sind jedoch deutlich geringer als in der ersten Versuchsreihe.

Die Rußausbeute auf der 2,50 m Ebene spiegelt die für Kunststoffbrände charakteristische hohe Partikelemission wider und liefert die physikalische Begründung für die zuvor analysierte Sichtweitenminderung:

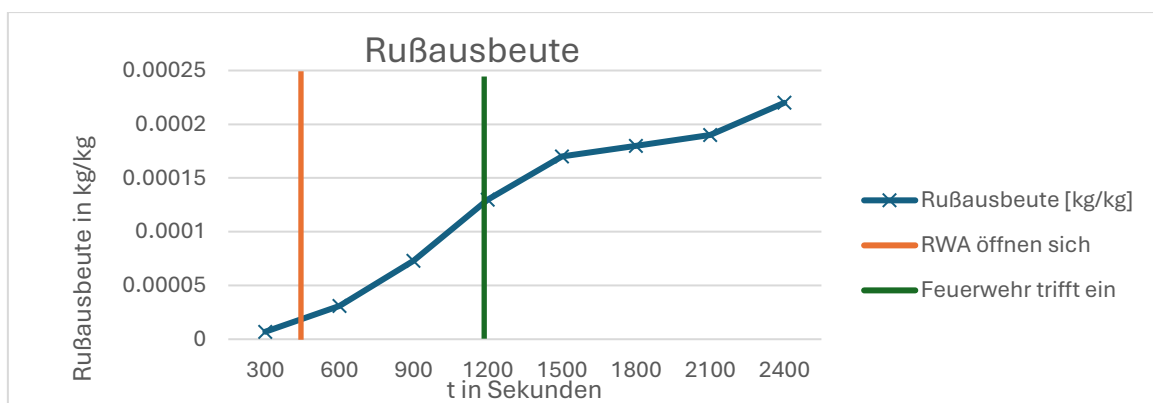


Bild 7.41: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Bereits in der frühen Anbrandphase ist ein steiler Anstieg der Konzentration zu verzeichnen, der zum Zeitpunkt der manuellen Öffnung der RWA bei ca. 0,00015 kg/kg liegt. Während der kritischen Selbstrettungsphase bis zur 960. Sekunde verdreifacht sich dieser Wert nahezu auf 0,0008 kg/kg. Zum Zeitpunkt des Eintreffens der Einsatzkräfte nach 20 Minuten (1200 s) wird eine Rußkonzentration von ca. 0,00013 kg/kg gemessen, was unmittelbar mit dem Erreichen des kritischen Sichtweitengrenzwertes von 10,0 m korreliert.

Im weiteren Simulationsverlauf setzt sich der Trend ungebrochen fort und erreicht nach 30 Minuten einen Wert von ca. 0,00018 kg/kg, bevor die Kurve zum Ende des Betrachtungszeitraumes bei ca. 0,00022 kg/kg stagniert.

Der Nachweis der Personensicherheit ist für den Zeitraum der Selbstrettung zwar formal erbracht, die Sicherheitsmargen sind jedoch aufgrund der hohen Rußlast als kritisch zu bewerten.

7.3.2 Simulation unter Einsatz einer Brandmeldeanlage

Im zweiten Untersuchungsschritt der Verkaufsstätte wird das Gebäude unter Berücksichtigung einer flächendeckenden, automatischen Brandmeldeanlage betrachtet. Im Gegensatz zur manuellen Auslösung erfolgt die Aktivierung der RWA hier unmittelbar nach der Detektion von punktförmigen Rauchmeldern an der Hallendecke. Die Positionierung der Melder sowie die Konfiguration der RWA- und Zuluftflächen erfolgt dabei analog zum Aufbau des Industriebaus in Kapitel 7.2.2. Auch in diesem Szenario wird die reduzierte Dimensionierung der NRA-Flächen beibehalten, um die Kompensationsleistung der Anlagentechnik bei erhöhter Branddynamik zu prüfen. Die Implementierung der Brandmeldeanlage sowie Ansteuerung der RWA in FDS erfolgt wie in Bild 7.25.

Trotz der automatischen Ansteuerung der RWA durch die Brandmeldeanlage zeigt die Sichtweite auf der 2,50 m Ebene einen nahezu identischen Verlauf gegenüber dem ungesteuerten Szenario. Die Detektion erfolgt zwar frühzeitig, jedoch führt die hohe stoffspezifische Rußausbeute zu einer derart massiven Partikelemission, dass die Entrauchungsanlage die optische Trübung in der Aufenthaltszone kaum kompensieren kann.

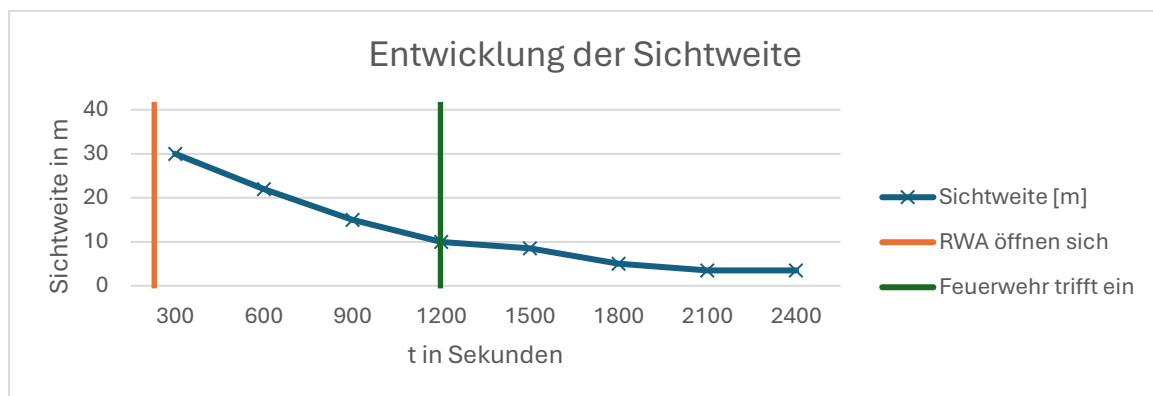


Bild 7.42: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Die Sichtweite sinkt bereits nach ca. 1200 Sekunden auf den kritischen Grenzwert von 10,0 m ab.

Die Temperaturkurve folgt dem progressiven Anstieg der Brandleistung und erreicht auf der 2,50 m Ebene zum Zeitpunkt des Löschangriffs ca. 32°C. Bis zum Ende der Simulation steigt diese auf ca. 36,5°C an. Der Verlauf auf der 5,00 m Ebene zeigt zunächst einen deutlich steileren Anstieg und erreicht bereits nach 900s eine Temperatur von ca. 45°C und endet bei einer Maximaltemperatur von 53°C zum

Simulationsende. Zu keinem Zeitpunkt werden für den Menschen gefährliche Temperaturen erreicht:

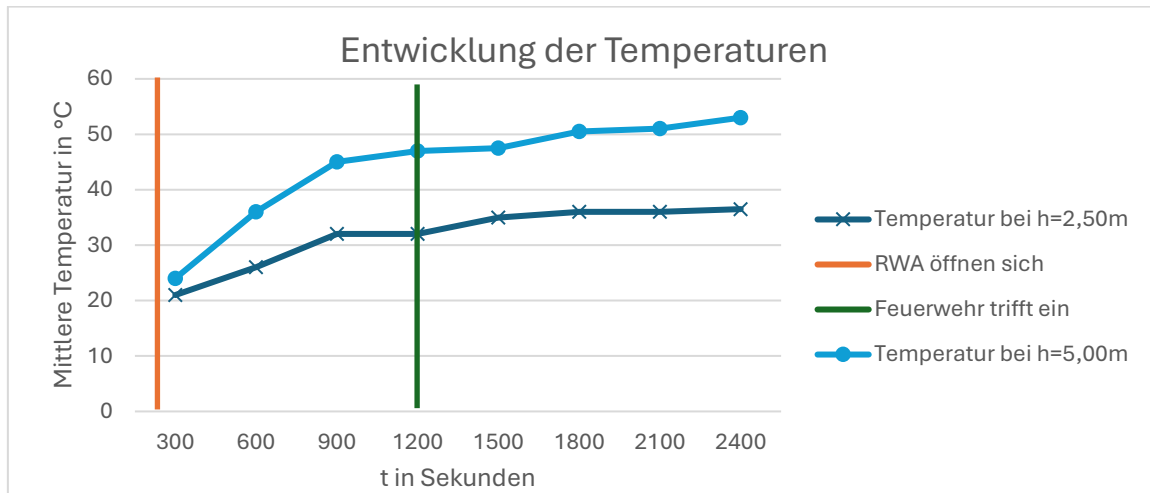


Bild 7.43: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Die CO-Belastung auf der 2,50 m Ebene zeigt einen nahezu linearen Anstieg. Zum Zeitpunkt des Eintreffens der Rettungskräfte liegt die Konzentration bei ca. 31 ppm. Im weiteren Verlauf steigt der Wert weiter an und erreicht nach 2100s seinen Maximalwert von ca. 55 ppm. Trotz der verhältnismäßig hohen Werte im Vergleich zum Industriebau bleibt die Konzentration über den gesamten Simulationszeitraum in einem toxikologisch unbedenklichen Bereich:

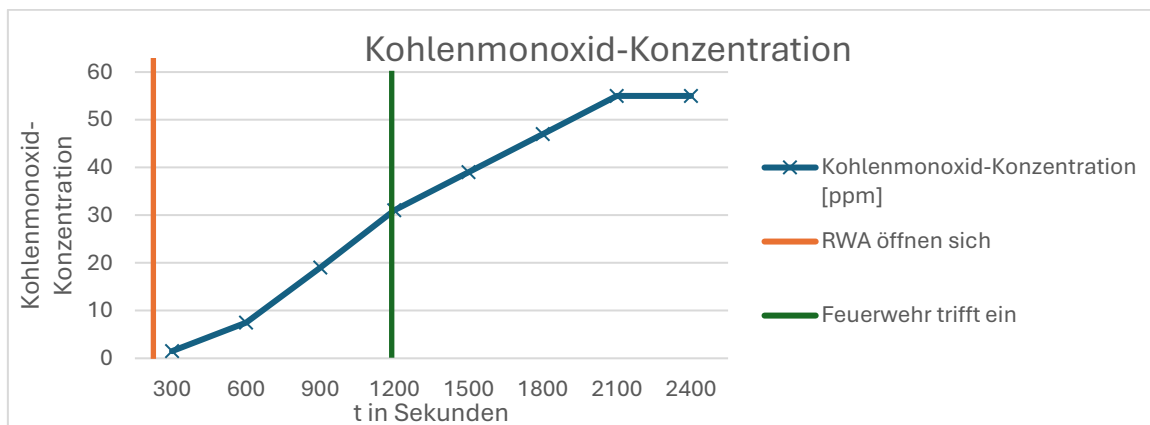


Bild 7.44: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Der Graph in Bild 7.45 zeigt einen kontinuierlichen Anstieg der Rußpartikelkonzentration auf der 2,50 m Ebene. Zum Zeitpunkt des Eintreffens der Rettungskräfte liegt die Rußausbeute bei ca. 0,000085 kg/kg. Im weiteren Verlauf steigt die Kurve weiter an und erreicht nach 2100s einen Wert von ca. 0,000125 kg/kg, bevor sie zum Ende der Simulation bei ca. 0,00015 kg/kg ausläuft.

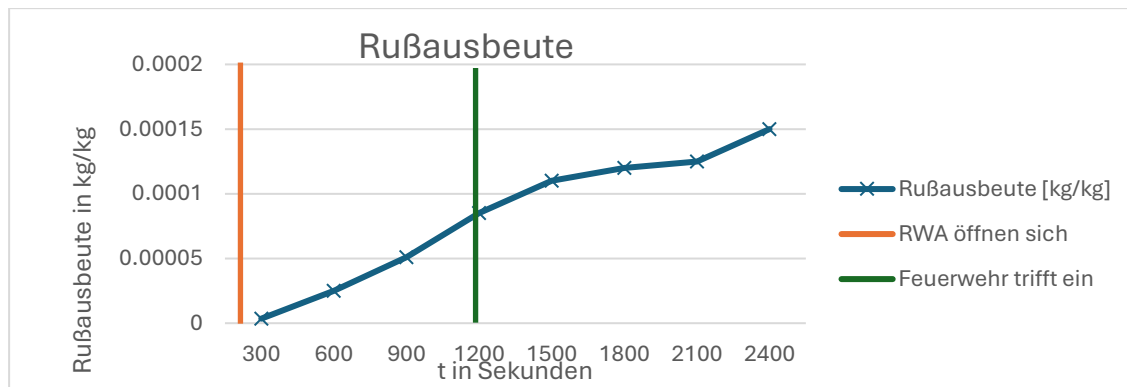


Bild 7.45: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Zusammenfassend belegen die Simulationsergebnisse, dass die Kopplung der RWA an eine automatische Brandmeldeanlage zwar zu einer frühzeitigen Aktivierung des Systems führt, die Rußausbeute sowie die Energiefreisetzung des Kunststoffbrandes jedoch nur bedingt kompensieren kann. Obwohl die Sichtweite und die Schadstoffkonzentrationen im Vergleich zum ungesteuerten Szenario kaum verbessert werden, verbleiben alle sicherheitsrelevanten Parameter innerhalb der kritischen Zeitfenster für die Selbstrettung und den Löschangriff. Damit wird nachgewiesen, dass die Schutzziele auch hier formal erreicht werden, die geringen Sicherheitsmargen jedoch die Notwendigkeit einer aktiven Brandbegrenzung für diese spezifische Nutzung unterstreichen.

7.3.3 Simulation unter Einsatz einer Sprinkleranlage

Im abschließenden Untersuchungsschritt wird die Verkaufsstätte unter der Berücksichtigung einer Sprinkleranlage betrachtet. Die Aktivierung der Rauchableitung erfolgt systemgebunden durch die Auslösung der Sprinkleranlage bei t=540s.

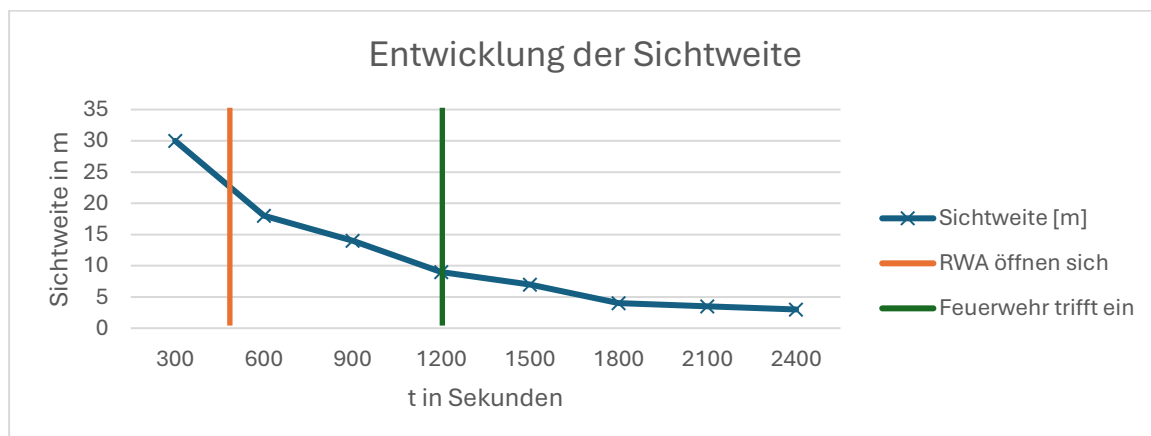


Bild 7.46: Entwicklung der Sichtweite in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Die Auswertung der Sichtweite (Bild 7.46) verdeutlicht den Einfluss der verzögerten Aktivierung der RWA, die erst durch die Sprinkleranlage nach 540 Sekunden erfolgt. Die Sichtweite ist bereits nach 10 Minuten auf ca. 17 m abgeschwächt und kann im weiteren Versuchsverlauf nicht mehr stabilisiert werden. Zum Zeitpunkt des Eintreffens der Rettungskräfte befindet sich die Sichtweite bereits unterhalb der 10 m, was zu erschwerten Bedingungen für den Löschangriff führen kann.

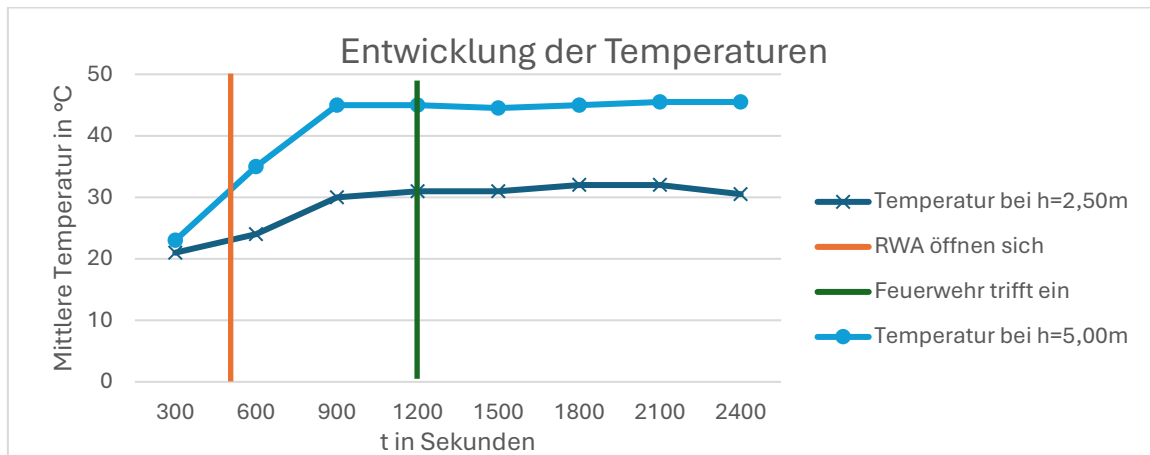


Bild 7.47: Entwicklung der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Die mittlere Temperatur zeigt nach der Aktivierung der Sprinkleranlage ab Sekunde 540 zunächst einen weiteren Anstieg, pendelt sich dann jedoch auf einem konstanten Niveau ein. Auf der 5,00 m Ebene wird ein Maximalwert von ca. 45°C erreicht, während die Temperaturen im Aufenthaltsbereich bis 2,50 m konstant unter 35°C verbleiben. Dieser Kurvenverlauf verdeutlicht die kühlende Wirkung der Sprinkleranlage auf die Gasphase, die trotz fortschreitender Branddauer eine weitere thermische Belastung des Raumes verhindert:

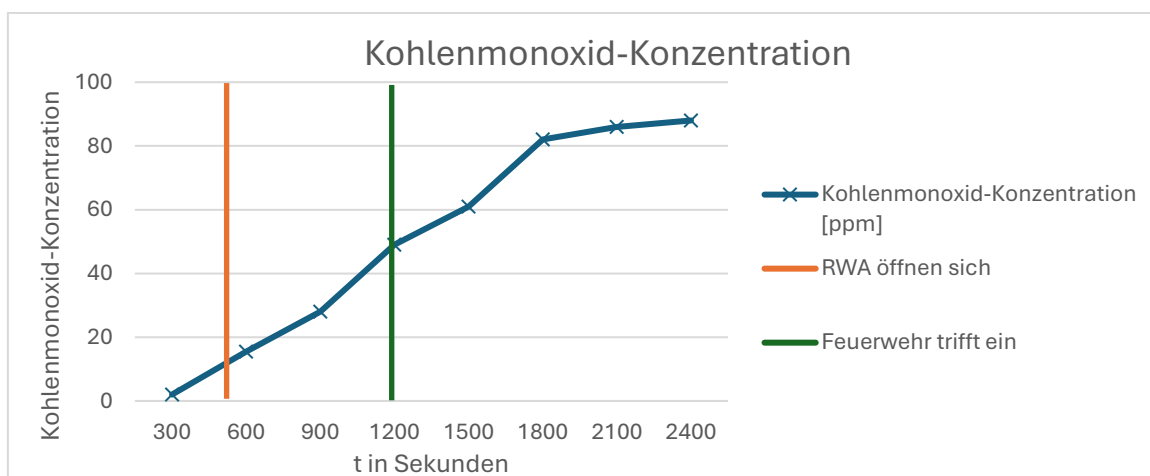


Bild 7.48: Entwicklung der Kohlenmonoxid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Die Kohlenmonoxid-Konzentration steigt ab dem Brandbeginn stetig an und erreicht zum Zeitpunkt der RWA-Aktivierung bei 540 Sekunden einen Wert von etwa 12 ppm. Im weiteren Verlauf ist eine deutliche Zunahme der Konzentration zu verzeichnen, die sich gegen Ende der Simulation bei ca. 88 ppm einpendelt. Trotz des kontinuierlichen Anstiegs bleibt die CO-Belastung über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg weit unterhalb der kritischen Grenze.

Die Rußausbeute zeigt über den gesamten Simulationszeitraum einen kontinuierlichen Anstieg. Zum Zeitpunkt der RWA-Aktivierung bei 540 s liegt der Wert bei ca. 0,00004 kg/kg und steigt bis zum Ende der Betrachtung auf einen Maximalwert von 0,00018 kg/kg an. Dieser Verlauf bestätigt, dass trotz der kühlenden Wirkung der Sprinkleranlage die Partikelemission der Brandquelle mangels Brandbegrenzung stetig zunimmt und maßgeblich zur Verschlechterung der Sichtverhältnisse beiträgt:

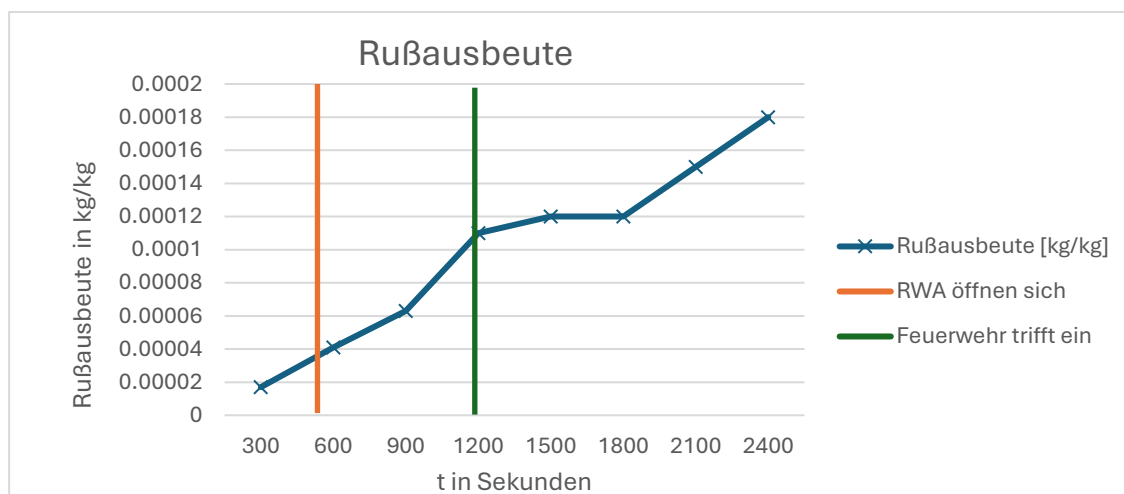


Bild 7.49: Rußausbeute in Abhängigkeit der Zeit t (eigene Darstellung)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der rechnerische Nachweis für Szenario 6 trotz der verzögerten RWA-Aktivierung und der hohen Rußausbeute erfolgreich erbracht wurde. Da die kritischen Grenzwerte für die Temperatur sowie die Schadstoffkonzentration zu jedem Zeitpunkt deutlich unterschritten bleiben, sind die Schutzziele für die Personensicherheit und den Erhalt der Tragkonstruktion im Ergebnis erfüllt.

8 Vergleichende Analyse und Ergebnissynthese

Die vorangegangenen Kapitel haben die unterschiedlichen Bemessungsverfahren der Rauchableitung beispielhaft für zwei konträre Nutzungstypen detailliert beleuchtet. Das Ziel dieser abschließenden Analyse ist es, die Diskrepanzen zwischen den statischen Anforderungen der Normen und der physikalischen Realität aufzuzeigen. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse aller angewandten Nachweisverfahren gegenübergestellt. Diese Synthese ermöglicht eine kritische Bewertung darüber, inwieweit konventionelle Bemessungsregeln bei kritischen Brandlasten an ihre Grenzen stoßen und welchen entscheidenden Einfluss die anlagentechnische Unterstützung auf die tatsächliche Erreichung der Schutzziele hat.

8.1 Darstellung der Übersichtsmatrix

Um die enorme Anzahl an Datensätzen und unterschiedlichen Kenngrößen der unterschiedlichen Nachweisverfahren vergleichbar zu machen, werden die Untersuchungsschritte in nachfolgender Matrix auf einer gemeinsamen Bewertungsebene zusammengeführt.

Tabelle 8.1: Übersichtsmatrix der vergleichenden Untersuchung (eigene Darstellung)

Nachweisverfahren	Anlagentechnik	Industriebau	Verkaufstätigkeit	Bemessungswerte	Maßgebliche Kenngröße	Schutzziel Ergebnis
Pauschal						
MIndBau Abschnitt 5.7.1.1 (NRA)	keine	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	$A_g = 16,15 \text{ m}^2$	Grundfläche	Erfüllt
	BMA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	$A_g = 16,15 \text{ m}^2$	Grundfläche	Erfüllt
	Sprinkler	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	$A_g = 16,15 \text{ m}^2$	Grundfläche	Erfüllt
MIndBau Abschnitt 5.7.1.2 (vereinfacht)	keine	Nachweis nicht möglich				
	BMA					
	Sprinkler					
MIndBauRL Abschnitt 5.7.1.3 (MRA)	Keine	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	55.000 m ³ /h	Grundfläche	Erfüllt
	BMA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	55.000 m ³ /h	Grundfläche	Erfüllt
	Sprinkler	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	55.000 m ³ /h	Grundfläche	Erfüllt
MVKVO § 16 (2) Nr. 2 (vereinfacht)	Keine	Nachweis nicht möglich				
	BMA					
	Sprinkler					
MVKVO § 16 (2) Nr. 3 (NRA)	Keine	Nachweis nicht möglich				
	BMA	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	$A_g = 16,15 \text{ m}^2$	Grundfläche	Erfüllt
	Sprinkler	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	$A_g = 16,15 \text{ m}^2$	Grundfläche	Erfüllt
MVKVO § 16 (3) (MRA)	Keine	Nachweis nicht möglich				
	BMA	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	55.000 m ³ /h	Grundfläche	Erfüllt
	Sprinkler	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	55.000 m ³ /h	Grundfläche	Erfüllt

Nachweisverfahren	Anlagentechnik	Industriebau	Verkaufsstätte	Bemessungswerte	Maßgebliche Kenngröße	Schutzziel Ergebnis
Pauschal						
DIN 18232-2 (NRA)	Keine	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	$A_g = 31,07 \text{ m}^2$	Bemessungsgruppe	Erfüllt
	BMA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	$A_g = 18,31 \text{ m}^2$	Bemessungsgruppe	Erfüllt
	Sprinkler	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	$A_g = 18,31 \text{ m}^2$	Bemessungsgruppe	Erfüllt
DIN 18232-5 (MRA)	Keine	Nachweis nicht möglich				
	BMA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	217.000 m ³ /h	Bemessungsgruppe	Erfüllt
	Sprinkler	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	341.000 m ³ /h	Bemessungsgruppe	Erfüllt
Numerische Ingenieurmethoden CFD-Simulation						
Simulation	Keine	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	$A_g = 13,50 \text{ m}^2$	Sichtweite/ CO-Konzentration/ Rußausbeute/ Temperatur	Erfüllt
		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	$A_g = 13,50 \text{ m}^2$		Kritisch, aber erfüllt
	BMA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	$A_g = 13,50 \text{ m}^2$		Erfüllt
		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	$A_g = 13,50 \text{ m}^2$		Kritisch, aber erfüllt
	Sprinkler	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	$A_g = 13,50 \text{ m}^2$		Erfüllt
		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	$A_g = 13,50 \text{ m}^2$		Kritisch, aber erfüllt

Diese vergleichende Betrachtung der Nachweisverfahren offenbart signifikante Diskrepanzen zwischen der baurechtlich formalen Erfüllung und der rechnerisch nachgewiesenen Personensicherheit.

8.2 Einfluss von Nutzung und Anlagentechnik auf die Entrauchung

Die vergleichende Betrachtung aller sechs Szenarien verdeutlicht, dass die Brandlastcharakteristik der entscheidende Faktor für die Wirksamkeit der Entrauchung ist, während die Variation der Anlagentechnik innerhalb desselben Nutzungstyps nur für geringfügige Verschiebungen sorgt.

Der Vergleich der Sichtweiten zeigt eine klare Clusterbildung.

Während im Industriebau alle Szenarien bis zum Ende der Simulation im sicheren Bereich oberhalb der 10 m verbleiben, unterschreiten alle Szenarien der Verkaufsstätte diese Marke bereits nach spätestens 1200 s. Die installierte Brandmeldeanlage sorgt zwar durch die frühzeitige Aktivierung der RWA-Öffnungen für einen geringfügigen zeitlichen Gewinn und dadurch geringfügig bessere Sichtweiten, kann den grundsätzlichen Absturz der Kurven jedoch nicht verhindern (siehe Bild 8.1).

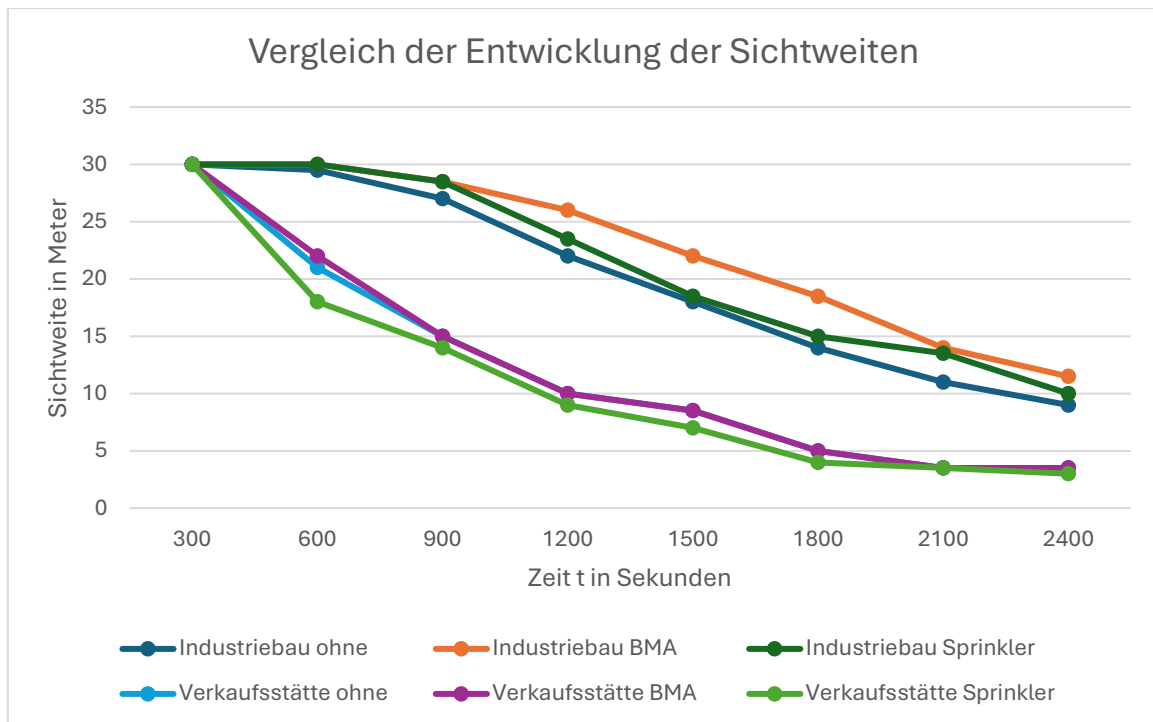


Bild 8.1: Einfluss der Anlagentechnik und Nutzung auf die Sichtweiten (eigene Darstellung)

Dies korreliert direkt mit der Rußausbeute, die bei der Verkaufsstätte um ein Vielfaches höher liegt.

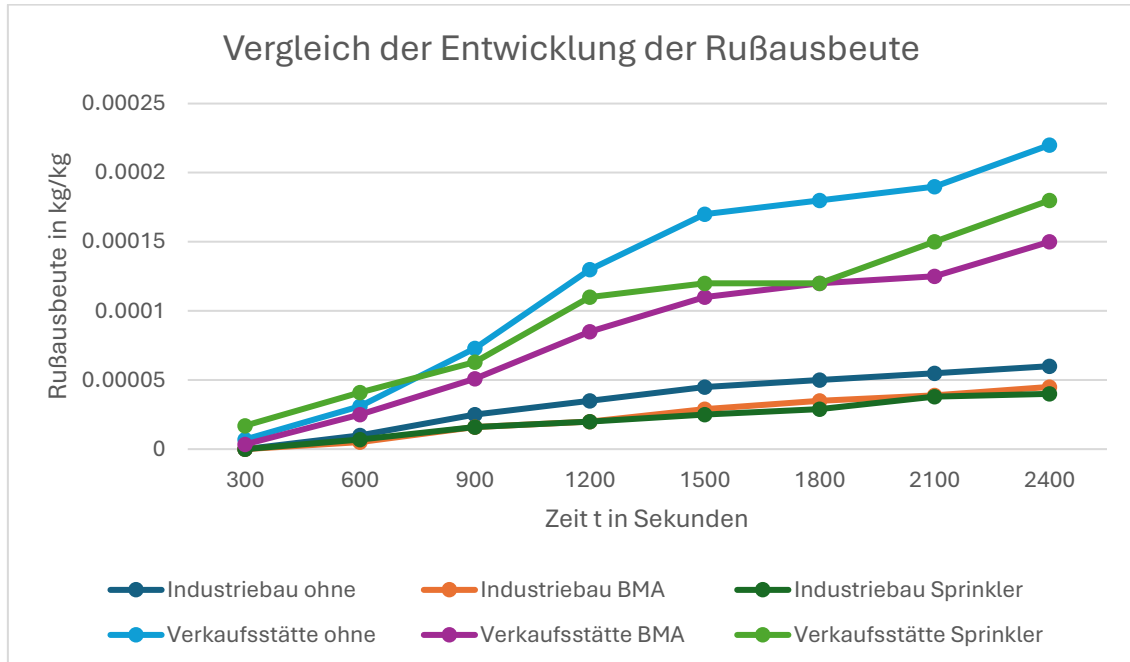


Bild 8.2: Einfluss der Anlagentechnik und Nutzung auf die Rußausbeute (eigene Darstellung)

Bei der Temperaturentwicklung zeigt sich der spezifische Einfluss der Sprinkleranlage am deutlichsten. Im Sammelgraphen zur mittleren Temperatur auf 2,50 m Höhe wird ersichtlich, dass die Sprinkleranlage primär eine kühlende

Wirkung auf die Gasphase ausübt. Ab dem Interventionszeitpunkt pendelt sich die Temperatur auf einem stabilen Niveau ein, während sie in den ungeschützten Szenarien der Verkaufsstätte kontinuierlich ansteigt:

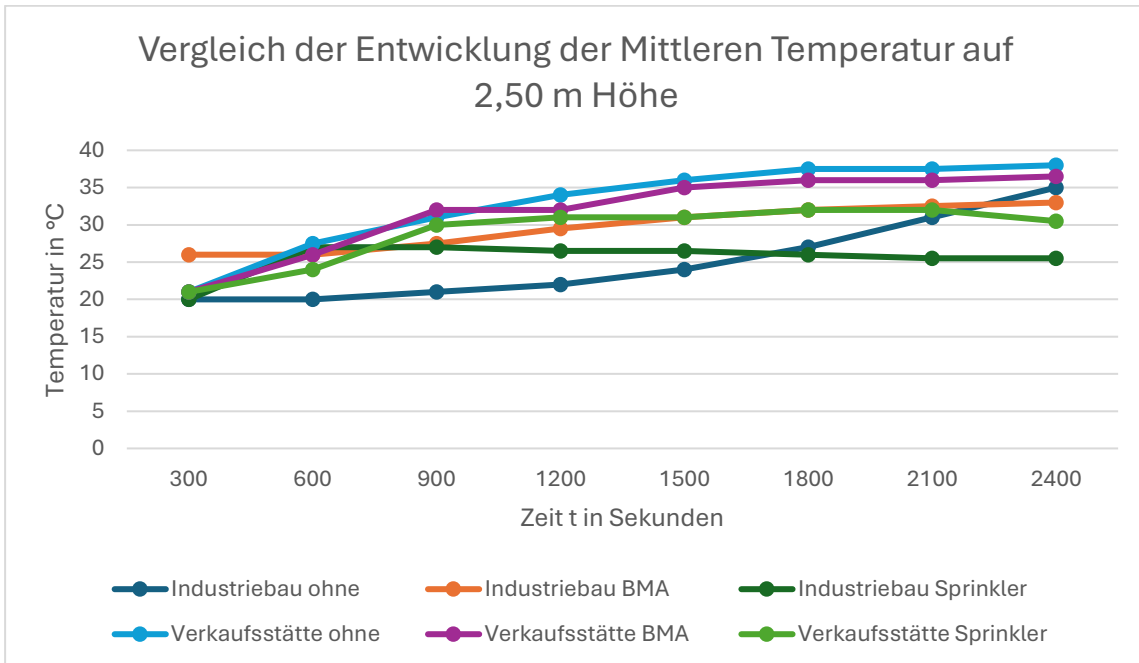


Bild 8.3: Einfluss der Anlagentechnik und Nutzung auf die mittlere Temperatur (eigene Darstellung)

Die Kohlenmonoxid-Konzentration folgt einem ähnlichen Muster wie die Sichtweite. Die Nutzung der Verkaufsstätte führt zu einer massiven Schadstoffemission, die durch Anlagentechnik kaum beeinflusst wird:

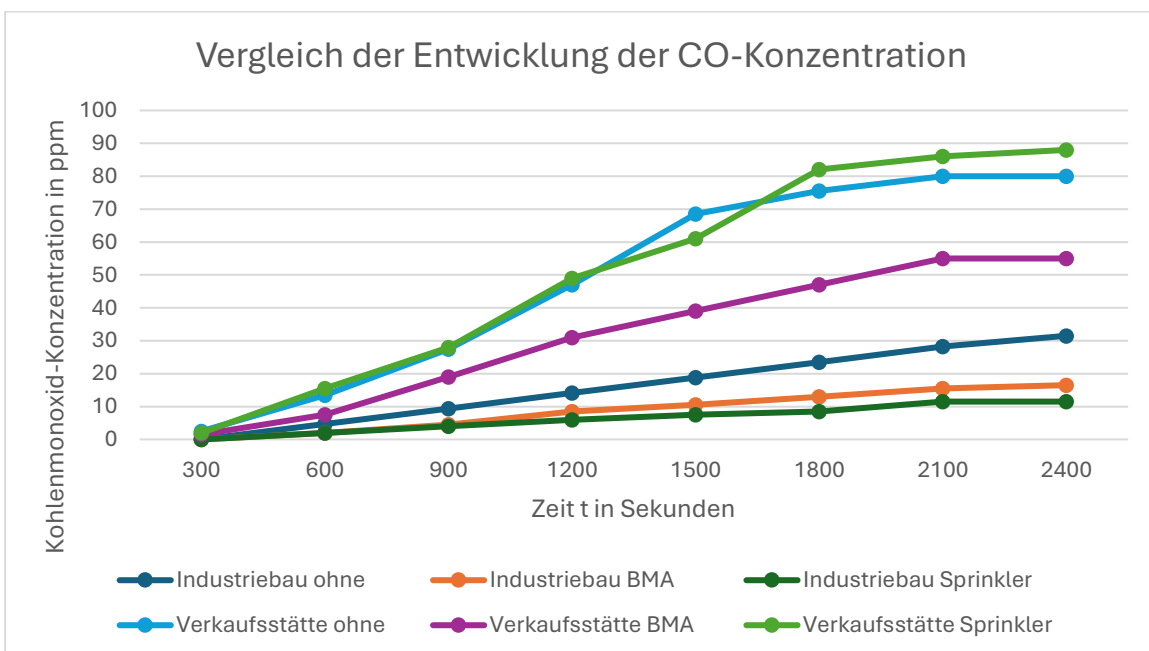


Bild 8.4: Einfluss der Anlagentechnik und Nutzung auf die Kohlenmonoxid-Konzentration (eigene Darstellung)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der größte Einflussfaktor auf die Wirksamkeit der Entrauchung die zugrundeliegende Nutzung und die damit verbundene Stoffphysik ist. Die Anlagentechnik hat innerhalb der betrachteten Szenarien keinen signifikanten Einfluss auf den grundsätzlichen Verlauf der Kurven. Eine BMA verbessert die Situation punktuell durch einen zeitlichen Vorsprung und die Sprinkleranlage dient in der vorliegenden Konfiguration fast ausschließlich der thermischen Entlastung, ohne die für den Personenschutz kritische Sichtweite positiv zu beeinflussen.

8.3 Kritische Würdigung der Methodik

Die Anwendung verschiedener Nachweisverfahren auf identische Szenarien verdeutlicht, dass die Wahl der Methode das Ergebnis maßgeblich beeinflusst, wobei jede Herangehensweise systemimmanente Schwächen aufweist. Ein zentraler Kritikpunkt betrifft die mangelnde Flexibilität der normativen Bemessung nach DIN 18232-2 und 18232-5 im Hinblick auf die Raumgeometrie. Problematisch erscheint hierbei insbesondere, dass die Grundfläche eines Rauchabschnittes innerhalb der Norm kaum Berücksichtigung findet. Da sich die RWA-Anforderungen auf einen Rauchabschnitt beziehen, der bis zu 1.600 m² groß sein kann, ergibt sich das Paradoxon, dass ein kleiner Raum von 200 m² rechnerisch oft ähnliche Anforderungen stellt wie ein Raum von 1.500 m². Diese Flächenunabhängigkeit führt in der Praxis entweder zu einer massiven Überdimensionierung kleiner Einheiten oder zu einer potenziellen Unterdimensionierung an der oberen Grenzfläche.

Zudem wird die Bemessung nach DIN oft durch bauliche Randbedingungen wie die Zuluftführung dominiert und gerät dadurch in einen direkten Konflikt mit dem eigentlichen Schutzziel des Personenschutzes. Da die vorhandenen Zulufttore eine Höhe von 4,00 m aufweisen, war eine rechnerische Anhebung der raucharmen Schicht auf 5,00 m zwingend erforderlich, um ein turbulentes Einmischen des Rauches in den Zuluftstrom normativ auszuschließen. Hätte man sich rein auf das für den Personenschutz ausreichende Maß von 2,50 m konzentriert, wären die normativen Anforderungen deutlich geringer ausgefallen. Allerdings ließe sich dies aufgrund der hohen Tore nicht mit den Vorgaben der DIN vereinbaren.

Die Simulation zeigt hier deutlich, dass eine stabile Schichthöhe von 5,00 m physikalisch kaum dauerhaft zu halten ist, während die tatsächliche Rauchfreiheit auf der relevanten 2,50 m Ebene dennoch weitgehend gewahrt bleibt.

Demgegenüber steht die pauschale Bemessung nach Sonderbauvorschriften, deren wissenschaftliche Grundlage oft willkürlich erscheint. Diese pauschalen Ansätze vernachlässigen kritische Parameter wie die tatsächliche Gebäudehöhe oder das spezifische Brandwachstum völlig. Besonders kritisch ist zu bewerten, dass sowohl die Sonderbauvorschriften als auch die DIN-Normen für völlig unterschiedliche Nutzungen identische Bemessungswerte liefern. Für dieses Verfahren spielt es keine Rolle, ob eine moderate Zellulosebrandlast oder ein hochdynamischer Kunststoffbrand vorliegt.

Erst die Brandsimulation bricht diesen normativen Gleichschritt auf und zeigt als einziges Modell den gravierenden Unterschied in der Schutzzielerreichung auf. Allerdings muss der immense Ressourcenaufwand kritisch hinterfragt werden. Rechenzeiten von mehreren Stunden pro Szenario sind im Planungsalltag kaum zielführend. Hinzu kommt eine enorme Fehleranfälligkeit, da kleinste Instabilitäten oder Eingabefehler oft dazu führen, dass Iterationsschleifen verloren gehen und erneut über einen Tag auf Ergebnisse gewartet werden muss. Während die Simulation also die notwendige stoffspezifische Realität abbildet, die den Normen fehlt, steht sie sich oft durch ihre mangelnde Wirtschaftlichkeit und Zeitintensität bei Standardprojekten selbst im Weg.

8.4 Fazit und Orientierungshinweise für die Fachplanung

Zusammenfassend zeigt die Untersuchung, dass kein Nachweisverfahren als universell „sicher“ oder „wirtschaftlich überlegen“ eingestuft werden kann. Die Wahl der Methode muss stets einer gezielten Kosten-Nutzen-Abwägung folgen, die sowohl die Brandlastrisiken als auch den Planungsaufwand berücksichtigt.

Die pauschalen Sonderbauvorschriften behalten ihre Daseinsberechtigung als pragmatische und schnelle Lösung für Standardobjekte mit moderaten Brandlasten und einfachen Geometrien. Sie bieten eine baurechtliche Mindestsicherheit, die ohne ingenieurtechnischen Aufwand umsetzbar ist.

Die DIN 18232-2 und 18232-5 hingegen erweist sich als sinnvolles Werkzeug für spezifische Optimierungen, insbesondere wenn durch Anlagentechnik günstigere

Bemessungsgruppen erreicht werden können oder wenn das Brandwachstum deutlich vom Standard abweicht. Fachplaner müssen hier jedoch die geometrischen Zwänge kritisch prüfen. Wie die Untersuchung zeigt, können bauliche Restriktionen zu einer normativ erzwungenen Überdimensionierung führen, die über das eigentliche Schutzziel hinausgeht.

Die Brandsimulation ist aufgrund des immensen Zeit- und Ressourcenaufwands kein Werkzeug für den Planungsalltag, sondern sollte gezielt in drei Szenarien als „Ultima Ratio“ eingesetzt werden:

1. Erhebliches Einsparpotenzial:

Wenn durch präzisen Nachweis teure anlagentechnische Maßnahmen oder überdimensionierte Rauchabzugsflächen vermieden werden können, die durch pauschale Verfahren gefordert werden.

2. Sonderbrandlasten und Geometrien:

Wenn Gebäude außerhalb der normativen Anwendungsgrenzen liegen oder wenn die Stoffphysik die pauschalen Annahmen der Regelwerke entlarvt.

3. Kompensationsmaßnahme:

Wenn die RWA als gezielte Kompensation für Abweichungen vom Baurecht dient und ein belastbarer Funktionsnachweis unter realen Bedingungen gefordert ist.

Letztlich ist für die Fachplanung nicht die isolierte Größe der Rauchabzugsfläche entscheidend, sondern deren Wirksamkeit im Gesamtsystem. Erst die Interaktion mit frühzeitiger Detektion (BMA) und aktiver Brandbegrenzung (Sprinkler) schafft die notwendigen Sicherheitsmargen, um Schutzziele auch bei kritischen Brandlasten dauerhaft und wirtschaftlich darstellbar zu erfüllen.

9 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Gesamtverband der Versicherer (Hrsg.): *Schadenverhütung in der Sachversicherung*.gdv.de/schadenverhuetung-in-der-sachversicherung-2023-2024-download-data.pdf, (letzter Zugriff: 05.04.2026), GDV: Berlin 2024.
- [2] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (Hrsg.): *Schadstoffe bei Bränden*. Referat 10 – Umweltschutz: München 2003.
- [3] Müller, J.: *Albanien, Rumelien und die österreich-montenigrische Gränze*.o.V: Prag 1844.
- [4] Schneider, U. et al.: *Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz. Kontakt und Studium, Band 531*. Expert Verlag: Renningen 2004.
- [5] Geburtig, G.: *Basiswissen Brandschutz. Band 1: Grundlagen*. Fraunhofer IRB Verlag: Stuttgart 2019.
- [6] Häupl, P. et al. (Hrsg.): *Lehrbuch der Bauphysik*. Springer Fachmedien: Wiesbaden 2013.
- [7] Fischer, H.: *Fachthemen Chemie Schadstoffe bei Bränden*. ffallmersbach.de/download/brandhilfe-2020-11.pdf, (letzter Zugriff: 05.04.2026), o.V.: o.O. 2020.
- [8] Battran, L.: *Rauchentstehung und Entrauchung. Begriffserklärungen sowie Ziele und Maßnahmen der Entrauchung im Brandfall*. feuertrutz.de/rauchentstehung-und-entrauchung-19102023, (letzter Zugriff: 10.03.2026), Feuertrutz, o.O. 2023.
- [9] Zürcher, C. / Frank, T.: *Bauphysik: Bau und Energie*. vdf Hochschulverlag AG: Zürich 2018.
- [11] Götzl, T.: *Einführung in den Brandschutz Ziele und Maßnahmen*. Europäisches Institut für postgraduale Bildung GmbH: Hamburg, 2025.
- [12] Zehfuß, J.: *Leitfaden der Ingenieurmethoden des Brandschutzes*. Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes: Münster 2020.
- [13] Fire Dynamics Simulator 6.10.1 – *Programm zur Large Eddy Simulation von Rauch und Wärmetransport bei Bränden*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology (NIST) 2025.
- [14] Smokeview 6.10.6 – *Programm zur Visualisierung von Brandsimulationsergebnissen aus FDS und CFAST*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology (NIST) 2025.
- [15] Schneider, U.: *Grundlagen der Ingenieurmethoden im Brandschutz*. Werner Verlag: Köln 2002.
- [16] Grewolls K./Grewolls, G.: *Praxiswissen Brandschutz Simulationen. Schneller Einstieg und kompaktes Wissen*. Feuertrutz Verlag: Köln 2012.
- [17] Lecheler, S.: *Numerische Strömungsberechnung: Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele*. Springer Vieweg: Wiesbaden 2014.
- [18] Hanslmeier, A./ Messerotti, M. / Veronig, A.: *The Dynamic Sun*. Astrophysics and Space Science Library. Springer Verlag: Kärnten, 1999.

- [19] Fröhlich, J.: *Large Eddy Simulationen Turbulenter Strömungen*. Teubner Verlag: Wiesbaden 2006.
- [20] Gressmann, H.: *Abwehrender und Anlagentechnischer Brandschutz für Architekten, Bauingenieure und Feuerwehringenieure, 5.Auflage*. Expert Verlag: Braunschweig 2019
- [21] Parlamentarischer Rat (Hrsg.): *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland*. Parlamentarischer Rat: Bonn 1949.
- [22] Heilmann, S./Weller, B.: *Wendehorst bautechnische Zahlentafeln*. Springer Vieweg: Wiesbaden 2021.
- [23] Bauministerkonferenz (Hrsg.): *Musterbauordnung*. Deutsches Institut für Bautechnik: Berlin 2002, zuletzt geändert am 27.09.2026.
- [24] MainBrandschutz GmbH (Hrsg.): *Integrale Brandschutzplanung*. mainbrandschutz.de/leistungen/, (letzter Zugriff: 09.04.2026), MainBrandschutz GmbH: Schweinfurt o.J.
- [25] Schulze, K.: *Rauchableitung Grundlagen und Recht*. [lfs.sachsen.de/download/rauchableitung.pdf](https://www.lfs.sachsen.de/download/rauchableitung.pdf), (letzter Zugriff: 23.03.2026), Berufsfeuerwehr Zwickau: Zwickau o.J.
- [26] Bauministerkonferenz (Hrsg.): *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen (Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie MLAR)*. Deutsches Institut für Bautechnik: Berlin 2015, zuletzt geändert am 03.09.2020.
- [27] Schlosser, I./Hartwig, A. / Berger, H.: *Brandschutzanlagen Teil 2: Gaslöschanlagen, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, Brandmeldeanlagen*. VdS Schadenverhütung Verlag: Köln 2008.
- [28] Bauministerkonferenz (Hrsg.): *Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebau-Richtlinie – MIndBauRL)*. Deutsches Institut für Bautechnik: Berlin 2019.
- [29] Mayr, J. / Wiese, J.: *Kommentar zur Musterindustriebaurichtlinie*. Rudolf Müller Medien: Köln 2024.
- [30] Fachkommission Bauaufsicht (Hrsg.): *Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten (Muster-Verkaufsstättenverordnung – MVKVO)*. Deutsches Institut für Bautechnik: Berlin 1995, zuletzt geändert Juli 2014.
- [31] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): *DIN 18232-2 Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau*. DIN Media: o.O. 2007.
- [32] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): *DIN EN 54-7 Brandmeldeanlagen - Teil 7: Rauchmelder - Punktförmige Rauchmelder nach dem Streulicht-, Durchlicht- oder Ionisationsprinzip*. DIN Media: o.O. 2018.
- [33] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): *DIN 18232-5 Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA); Anforderungen, Bemessung*. DIN Media: o.O. 2012.
- [34] McGrattan, K. et al.: *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. NIST: Gaithersburg 2025.

10 Anhang

A1. Anhang zum FDS Beispiel Industriebau ohne besondere Maßnahmen

Quelltext FDS:

```

---FDS-Eingaben Realbrandversuch für Industriebau ohne besondere
brandschutztechnischen Maßnahmen---

---Definition der Grundeinstellungen (Simulationsprofil)---

&HEAD CHID='IndBau1', TITLE='Simulation Industriebau ohne Maßnahmen' /
Erstellung der Kopfzeile bzw. des Titels

&TIME T_END= 2400. /    Zeit bis zum Simulationsende

&MESH IJK=  137,   92,   18, XB=0.0, 68.5,   0.0, 46.0,   -0.5, 8.50 /
Anzahl der Knoten in X,Y und Z-Richtung sowie Erstreckung der Domain

&MISC  OVERWRITE = .FALSE. ,VISIBILITY_FACTOR = 8 / RESTART = .TRUE./
overwrite Befehl verhindert, dass Ergebnisdateien versehentlich
überschrieben werden; visibility-factor c=8 für selbstleuchtendes Modell

restart Befehl stellt sicher, dass eine Wiederaufnahme des Rechenlaufs
z.B. im Falle eines Stromausfalles möglich ist

&DUMP NFRAMES = 1000, DT_RESTART = 100.0, MASS_FILE = .TRUE.,

DT_PL3D=30.,PLOT3D_QUANTITY(1)= 'carbon monoxide',PLOT3D_QUANTITY(5)=
'TEMPERATURE' /    NFRAMES = Anzahl der erzeugten Ergebnisdateien (hier:
1000 als Standard);DT_Restart = Alle 100 s wird eine Restart-File
geschrieben; Mass_File = Erstellt eine Datei aller Speziesmassen; PLOT3D
speichert standardmäßig die Temperatur, Gasgeschwindigkeitskomponenten
und HRRPUV

---Brand-Definition (REACTION)---

In diesem Block wird festgelegt, wie der Brennstoff chemisch
zusammengesetzt ist und welche Produkte bei der Verbrennung entstehen.

&REAC ID          = 'LAGERGUT_Reaktion'

    SOOT_YIELD = 0.015          ! Rußausbeute in g/g
    CO_YIELD   = 0.004          ! Kohlenmonoxidausbeute in g/g
    HEAT_OF_COMBUSTION = 12000  ! Heizwert des Brennstoffs in kJ/kg
    N          = 0.0           ! Anzahl der Stickstoffatome pro Molekül
    C          = 6             ! Anzahl der Kohlenstoffatome pro Molekül
    H          = 10            ! Anzahl der Wasserstoffatome pro Molekül
    O          = 5             ! Anzahl der Sauerstoffatome pro Molekül

RADIATIVE_FRACTION = 0.35/Radiative Fraction wird für LES standardmäßig
mit 0,35 angesetzt

---Definition der Materialien und Oberflächen---

```

ANHANG

In diesem Block werden die physikalischen Stoffdaten für die Gebäudehülle und das Tragwerk festgelegt.

---Materialien---

```
&MATL ID          = 'BETON'  
    CONDUCTIVITY   = 1.4  
    SPECIFIC_HEAT  = 1.0  
    DENSITY        = 2000. /
```

CONDUCTIVITY= Wärmeleitfähigkeit in W/mK, SPECIFIC_HEAT= spezifische Wärmekapazität in kJ/kgK, DENSITY= Rohdichte in kg/m³

```
&MATL ID          = 'MAUERSTEIN'  
    CONDUCTIVITY   = 0.69  
    SPECIFIC_HEAT  = 0.84  
    DENSITY        = 1600. /
```

```
&MATL ID          = 'GIPSKARTON'  
    CONDUCTIVITY   = 0.48  
    SPECIFIC_HEAT  = 0.84  
    DENSITY        = 1440. /
```

---Oberflächen---

```
&SURF ID          = 'STUETZE'  
    RGB            = 128,128,128  
    MATL_ID        = 'BETON'  
    THICKNESS      = 0.40 /Definition der Stahlbetonstützen 40x40cm
```

```
&SURF ID          = 'TRAEGER'  
    RGB            = 128,128,128  
    MATL_ID        = 'BETON'  
    THICKNESS      = 0.40 /Definition der Stahlbetonbinder 60x40 cm
```

```
&SURF ID          = 'BRANDWAND'  
    RGB            = 127,0,255  
    MATL_ID        = 'BETON'  
    THICKNESS      = 0.25 /Definition der Brandwand, d= 25 cm
```

```
&SURF ID          = 'AUSSENWAND'  
    RGB            = 128,128,128
```

ANHANG

```
MATL_ID          = 'MAUERSTEIN'
THICKNESS        = 0.50
TRANSPARENCY     = 0.30      /Definition der Aussenwand

&SURF ID         = 'DACH'
RGB              = 128,128,128
MATL_ID         = 'GIPSKARTON',
THICKNESS       = 0.10      /Definition des Daches

&SURF ID         = 'BODENPLATTE'
RGB              = 128,128,128
MATL_ID         = 'BETON'
THICKNESS       = 0.25 /   Definition der Bodenplatte

&SURF ID='FEUER', RGB=255,0,0, HRRPUA=400, RAMP_Q = 'brand_kurve' /
HRRPUA = Heat Release Rate Per Unit Area -> Wärmefreisetzung pro
Einheitsfläche von 400 kW/m2;RAMP beschreibt, dass Feuer sich erst
entwickeln muss

---Festlegen der Zeitlichen Brandentwicklung (RAMP-FUNKTION)---
In diesem Block wird der zeitliche Anstieg der Wärmefreisetzungsrates
(HRRPUA) definiert.
Da ein Realbrand nicht schlagartig seine volle Leistung erreicht, wird
hier eine Anbrandphase (t2-orientiert) simuliert.

&RAMP ID='brand_kurve', T=0.0, F=0.0 /Zum Zeitpunkt t=0s beträgt die
Leistung 0%
&RAMP ID='brand_kurve', T=600.0, F=1.0 /Zum Zeitpunkt t=600s wird die
volle Leistung (100%) erreicht

---Einfügen des Gebäudemodells--
&OBST XB=0.00,68.00,0.00,46.00,-0.25,0.00,SURF_ID='BODENPLATTE' /
&OBST XB=60.00,60.25,0.00,46.00,0.00,8.50, SURF_ID='BRANDWAND' /
Brandwand 50cm über Dach geführt

&OBST XB=0.40,0.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / STUETZE A1
&OBST XB=7.90,8.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / STUETZE A2
&OBST XB=15.40,15.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / STUETZE A3
&OBST XB=22.90,23.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / STUETZE A4
```

ANHANG

&OBST XB=30.40,30.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE A5*
&OBST XB=37.90,38.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE A6*
&OBST XB=45.40,45.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE A7*
&OBST XB=52.90,53.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE A8*
&OBST XB=60.40,60.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE A9*
&OBST XB=67.90,68.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE A10*
&OBST XB=0.40,0.80,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE B1*
&OBST XB=67.90,68.30,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE B10*
&OBST XB=0.40,0.80,15.40,15.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE C1*
&OBST XB=67.90,68.30,15.40,15.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE C10*
&OBST XB=0.40,0.80,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE D1*
&OBST XB=7.90,8.30,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE D2*
&OBST XB=15.40,15.80,22.90,23.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE D3*
&OBST XB=22.90,23.30,22.90,23.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE D4*
&OBST XB=30.40,30.80,22.90,23.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE D5*
&OBST XB=37.90,38.30,22.90,23.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE D6*
&OBST XB=45.40,45.80,22.90,23.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE D7*
&OBST XB=52.90,53.30,22.90,23.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE D8*
&OBST XB=60.40,60.80,22.90,23.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE D9*
&OBST XB=67.90,68.30,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE D10*
&OBST XB=0.40,0.80,30.40,30.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE E1*
&OBST XB=67.90,68.30,30.40,30.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE E10*
&OBST XB=0.40,0.80,37.90,38.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE F1*
&OBST XB=67.90,68.30,37.90,38.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE F10*
&OBST XB=0.40,0.80,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE G1*
&OBST XB=7.90,8.30,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE G2*
&OBST XB=15.40,15.80,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE G3*
&OBST XB=22.90,23.30,45.40,45.80,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE G4*
&OBST XB=30.40,30.80,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE G5*
&OBST XB=37.90,38.30,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE G6*
&OBST XB=45.40,45.80,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE G7*
&OBST XB=52.90,53.30,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE G8*
&OBST XB=60.40,60.80,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE G9*
&OBST XB=67.90,68.30,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' / *STUETZE G10*

&OBST XB=0.40,0.80,0.40,45.80,7.40,8.00, SURF_ID='TRAEGER' / *TRAEGER 1*
&OBST XB=7.90,8.30,0.40,45.80,7.40,8.00, SURF_ID='TRAEGER' / *TRAEGER 2*

&OBST XB=15.40,15.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' / TRAEGER 3
&OBST XB=22.90,23.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' / TRAEGER 4
&OBST XB=30.40,30.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' / TRAEGER 5
&OBST XB=37.90,38.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' / TRAEGER 6
&OBST XB=45.40,45.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' / TRAEGER 7
&OBST XB=52.90,53.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' / TRAEGER 8
&OBST XB=67.90,68.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' / TRAEGER 9

&OBST XB= 0.00,68.70, 0.00,0.50, 0.00,8.00,SURF_ID='AUSSENWAND' /
AUSSENWAND SUEDSEITE

&OBST XB= 0.00, 0.50, 0.00, 46.20, 0.00, 8.00,
SURF_ID='AUSSENWAND' / AUSSENWAND WESTSEITE

&OBST XB= 0.00, 68.70, 45.70, 46.20, 0.00, 8.00,
SURF_ID='AUSSENWAND' / AUSSENWAND NORDSEITE

&OBST XB= 68.30,68.70, 0.00, 46.20, 0.00, 8.00,
SURF_ID='AUSSENWAND' / AUSSENWAND OSTSEITE

&OBST XB= 0.00, 68.70, 0.00, 46.20, 8.00, 8.10, SURF_ID='DACH'
/ BLECHDACH ALS FLACHDACH

---Zu- und Abluftflächen (Öffnungen)---

&DEVC ID='TIMER', QUANTITY='TIME', SETPOINT=420.0, XYZ=0.0, 0.0, 0.0 /
gibt einen Verzögerungsfaktor für die manuelle Auslösung an (hier: nach 7
MIN)

Abluft: 6x RWA im Dach a 1,50 x 1,50 m

&HOLE XB= 11.10, 12.60, 10.80, 12.30,8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /

&HOLE XB= 11.10, 12.60, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /

&HOLE XB= 26.10, 27.60, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /

&HOLE XB= 33.60, 35.10, 10.80, 12.30,8.00, 8.10,DEVC_ID='TIMER' /

&HOLE XB= 48.60, 50.10, 10.80, 12.30,8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /

&HOLE XB= 48.60, 50.10, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /

Zuluft: Ein Tor in Fassade a 4,00 x 4,00 m, 2 x Tür in Fassade 1,00 m x
2,00 m

&HOLE XB= -0.10, 0.50, 24.80, 28.80, 0.00, 4.00 /

&HOLE XB= 33.85, 34.85, -0.10, 0.50, 0.00, 2.00 /

&HOLE XB= 33.85, 34.85, 45.70, 46.30, 0.00, 2.00 /

Das Feuer

&VENT XB= 29.0,32.0, 15.0, 17.0, 0.01,0.01, SURF_ID='FEUER', IOR=3 /

---Messgeräte (DEVC)---

Messpunkt 1: Nah am Brandherd

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT',
ID='BRAND_LH' /

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER
TEMPERATURE', ID='BRAND_UT' /

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 6.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LOWER
TEMPERATURE', ID='BRAND_LT' /

Messpunkt 2: Hallenmitte

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT',
ID='MITTE_LH' /

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER
TEMPERATURE', ID='MITTE_UT' /

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LOWER
TEMPERATURE', ID='MITTE_LT' /

Personenschutzwerte auf 2,50 m Höhe:

&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='MITTE_TEMP_2M' /

&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON
MONOXIDE', ID='MITTE_CO_2M' /

---Visualisierung (SLCF)---

Temperaturen (Hitzeausbreitung):

&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. / *Längsschnitt
durch Hallenmitte*

&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='TEMPERATURE' / *Querschnitt direkt durch das
Regal*

HRRPUV:

&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='HRRPUV' / *Zeigt die Flammenbildung*

Sichtweite und Gase:

&SLCF PBZ= 2.5, QUANTITY='VISIBILITY' / *Horizontalschnitt auf
Fluchtweghöhe (2,50 m als Mindestmaß)*

&SLCF PBZ= 5.0, QUANTITY='VISIBILITY' / *Horizontalschnitt auf Höhe der
angestrebten raucharmen Schicht*

&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' /
Kohlenmonoxid-Konzentration im Längsschnitt

Ruß-Konzentration (Dichte des Rauches):

&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='SOOT' /

---Druckausgleich---

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

&TAIL /

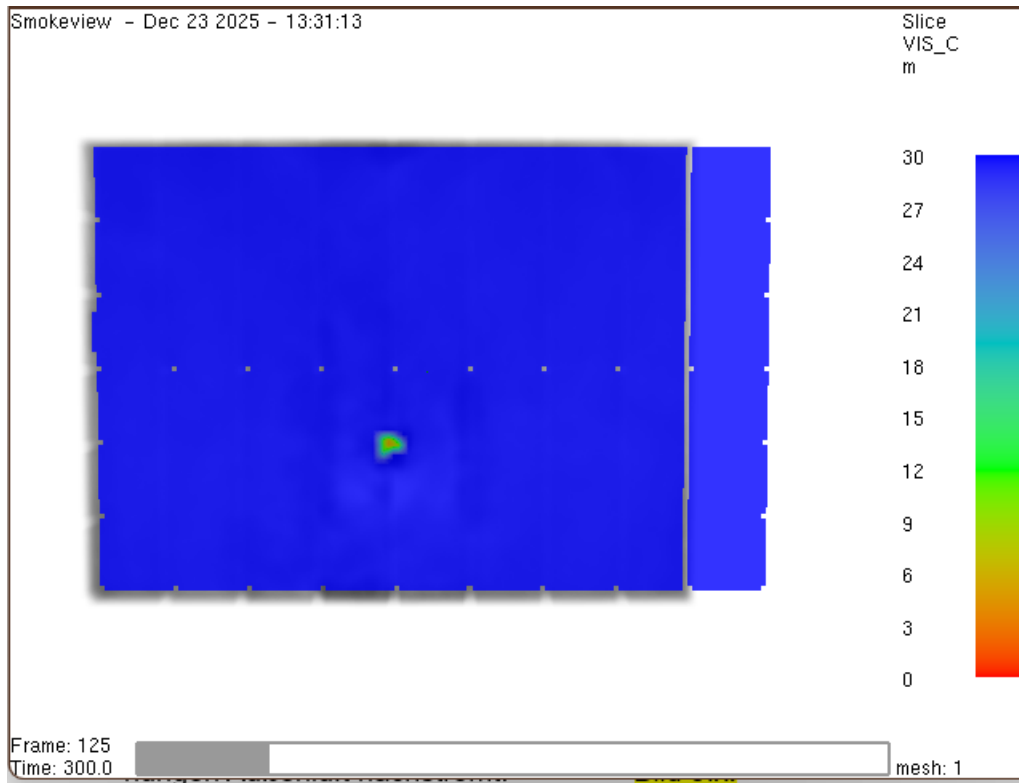


Bild A1.1: Sichtweite nach t=300 s

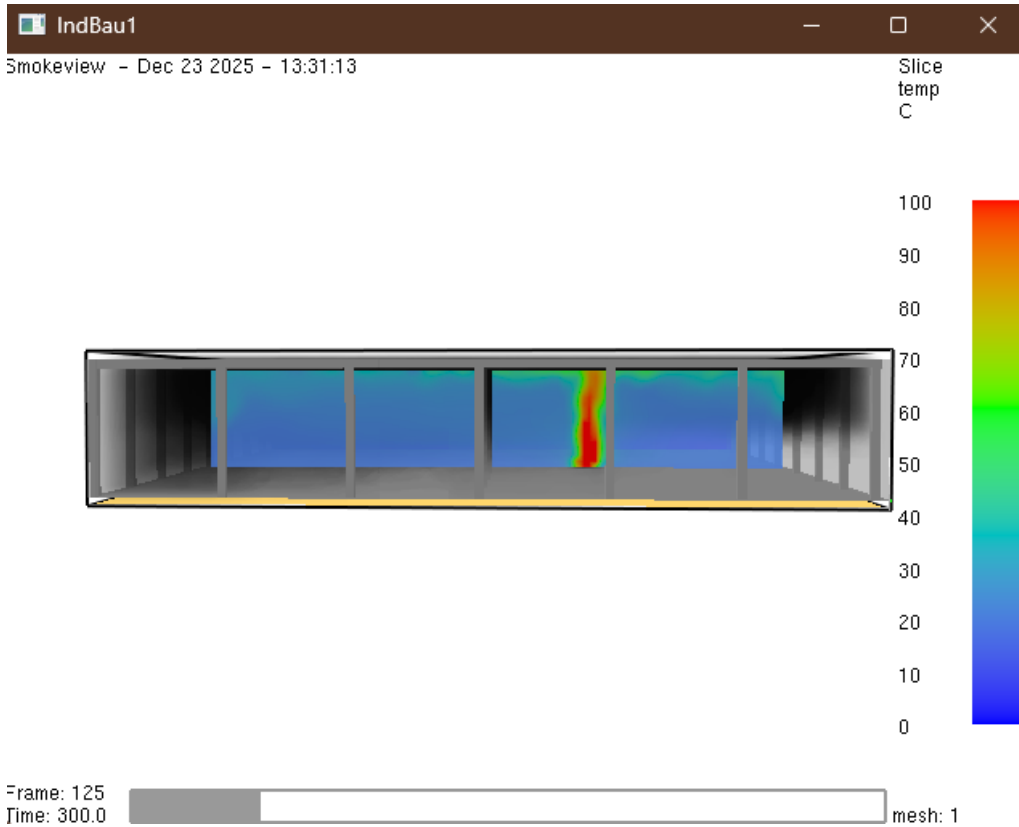


Bild A1.2: Temperatur nach t=300 s

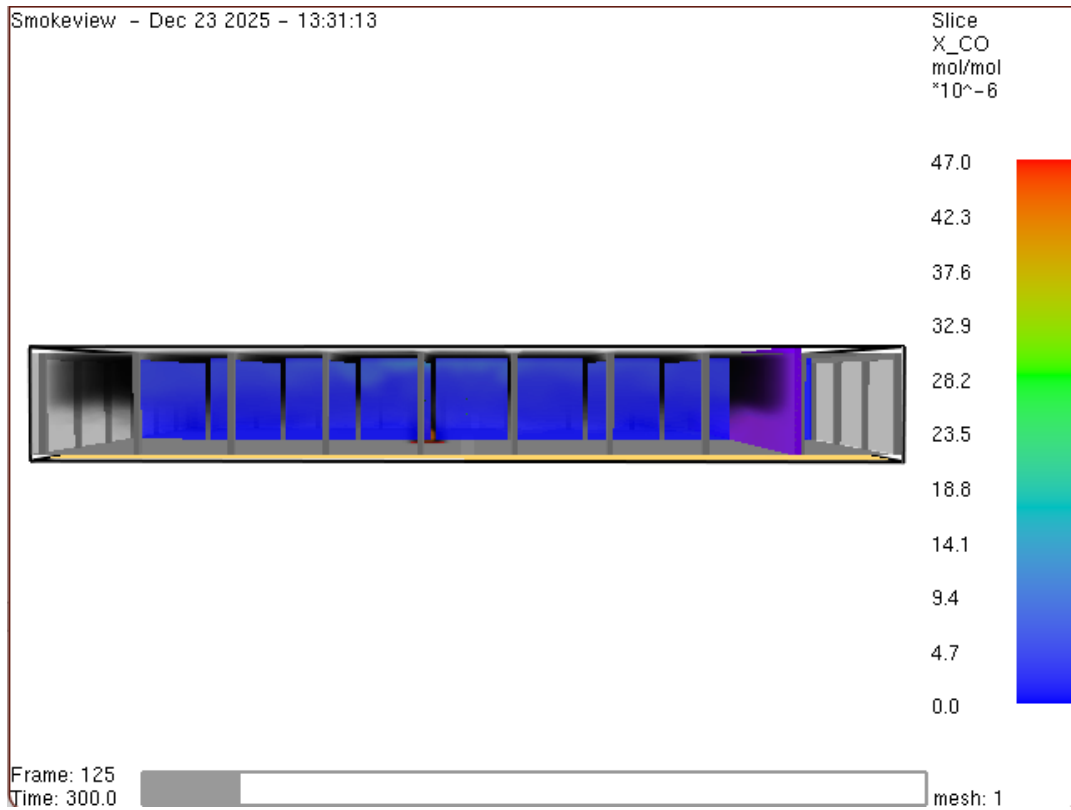


Bild A1.3: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=300 s

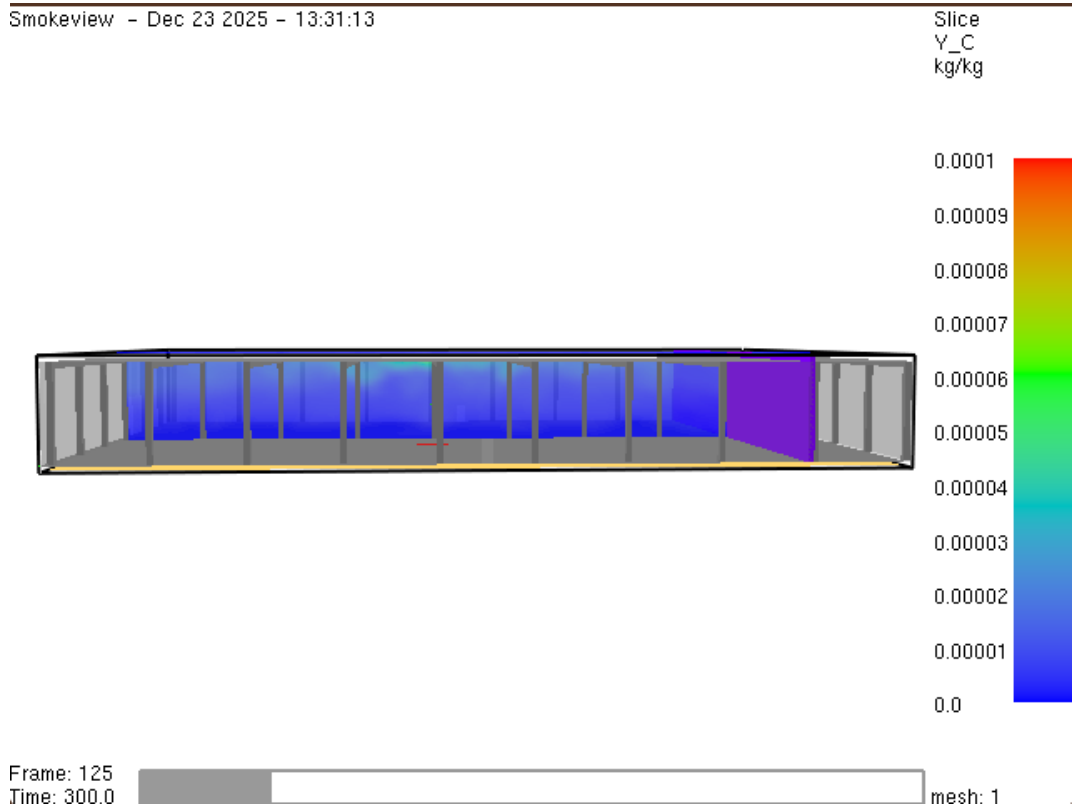


Bild A1.4: Ruß-Konzentration nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

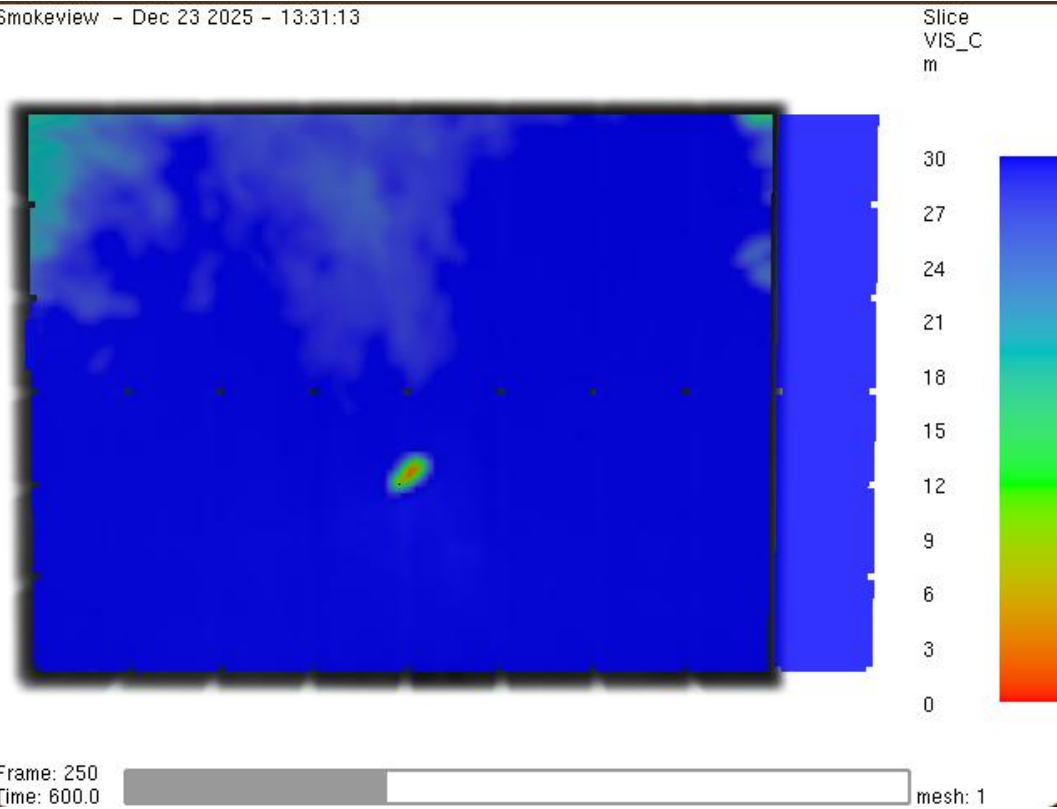


Bild A1.5: Sichtweite nach t=600 s

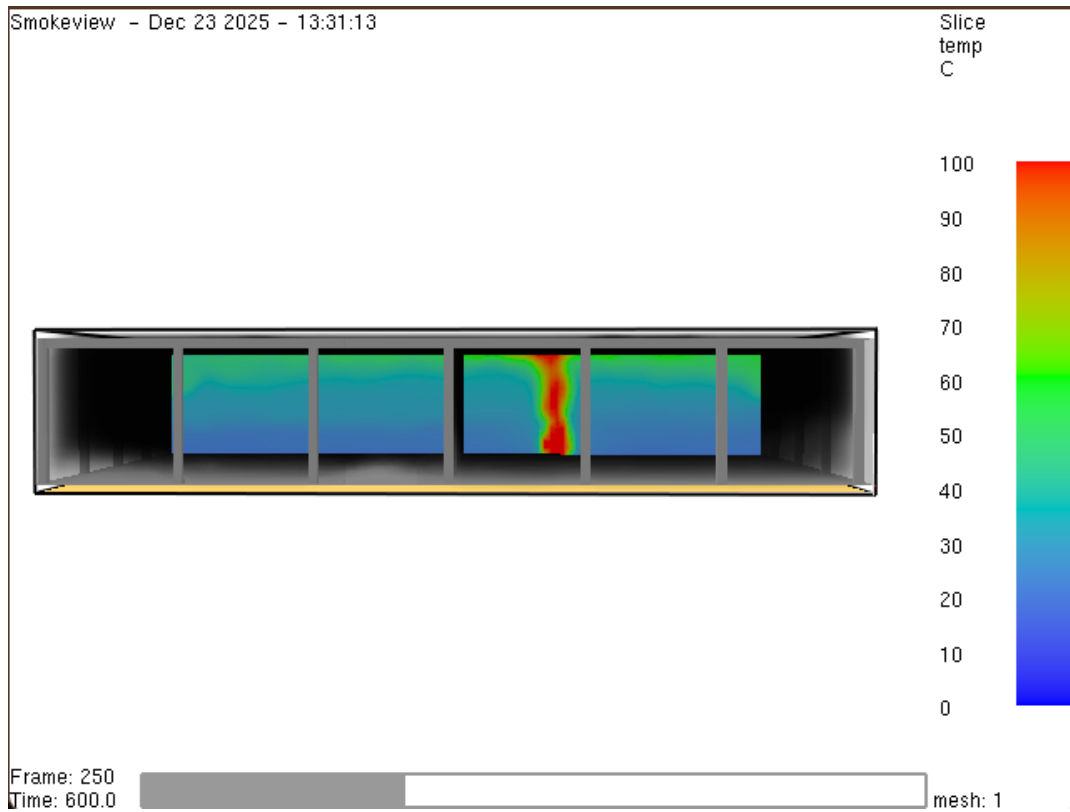


Bild A1.6: Temperatur nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

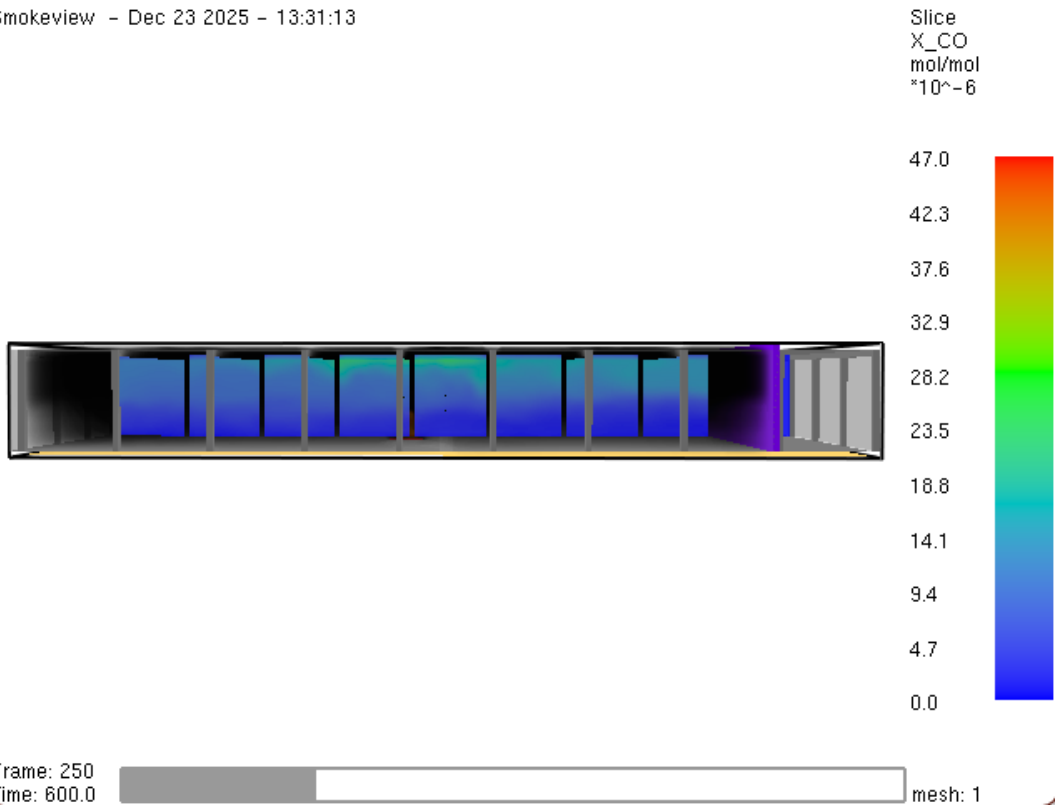


Bild A1.7: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

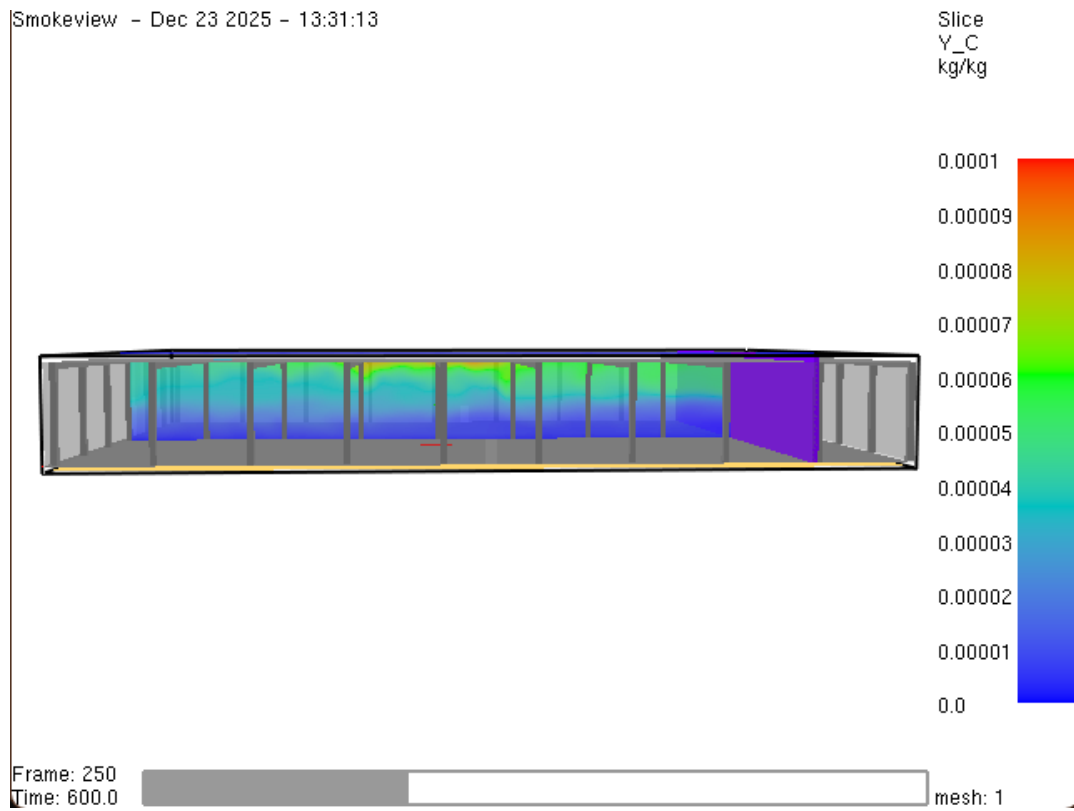


Bild A1.8: Rußausbeute nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

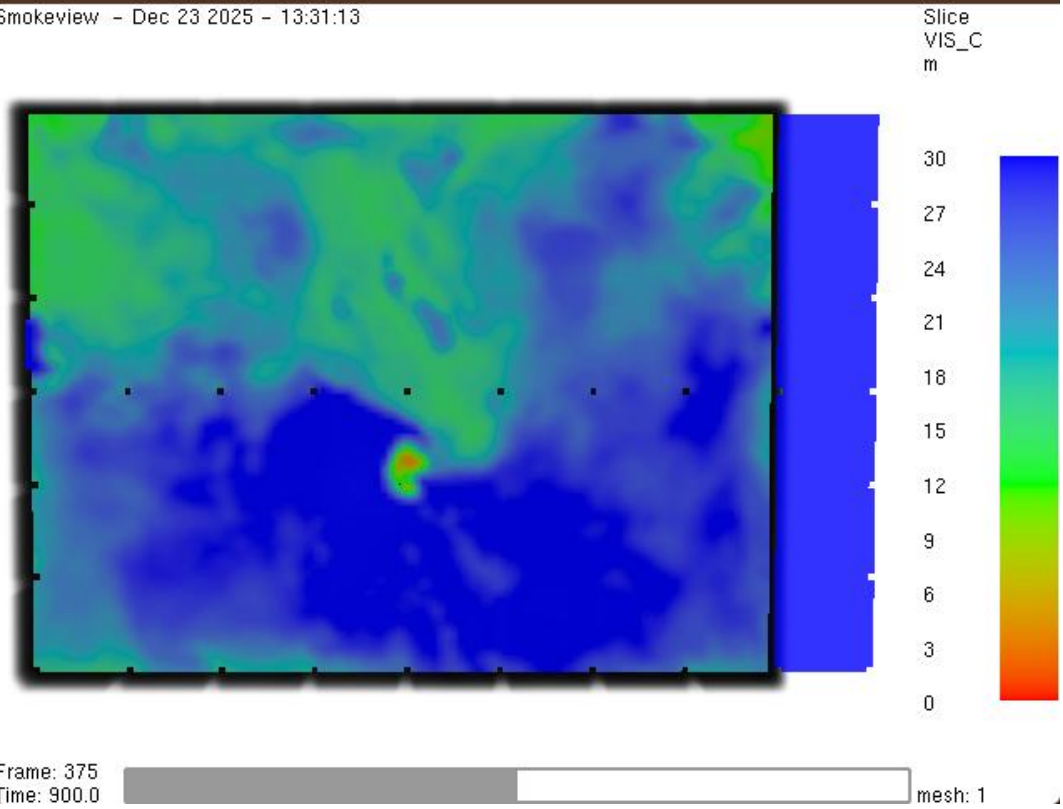


Bild A1.9: Sichtweite nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

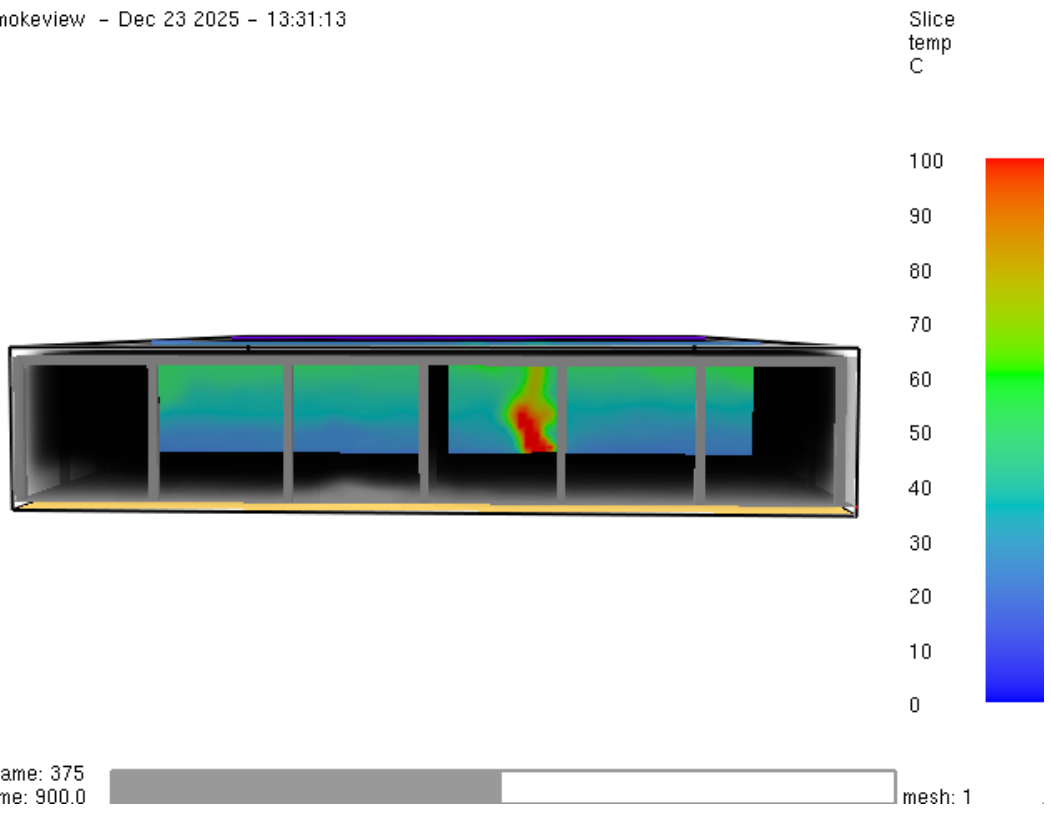


Bild A1.10: Temperatur nach t=900 s

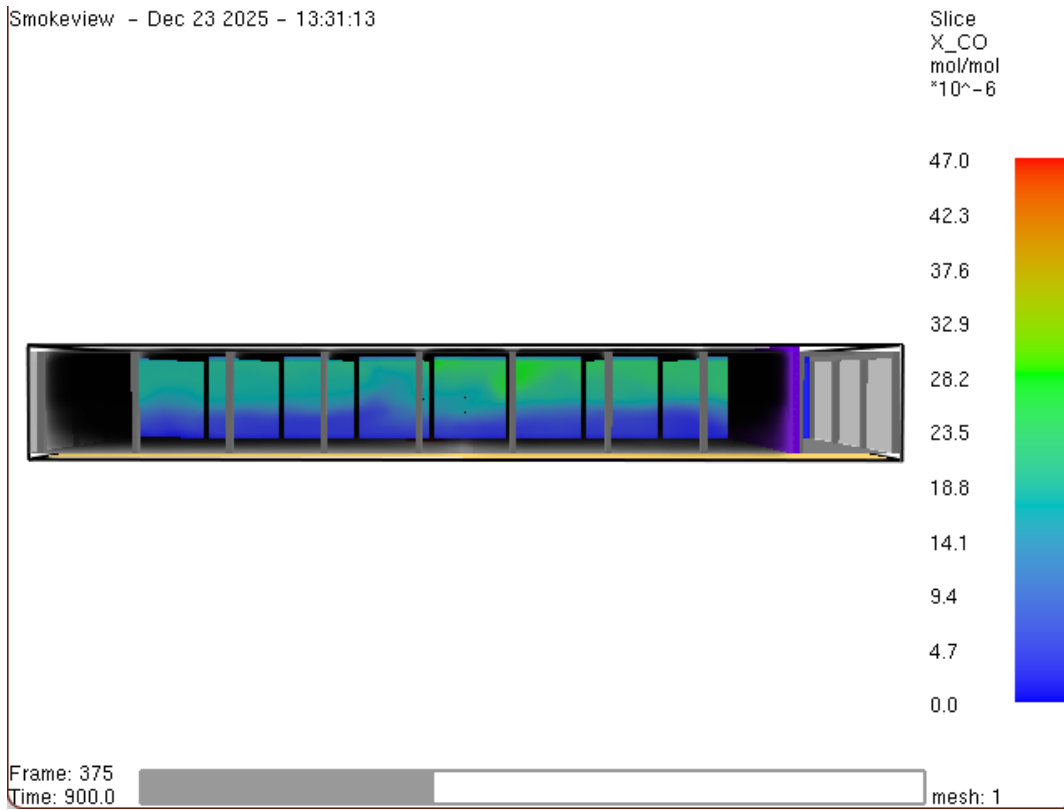


Bild A1.11: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=900 s

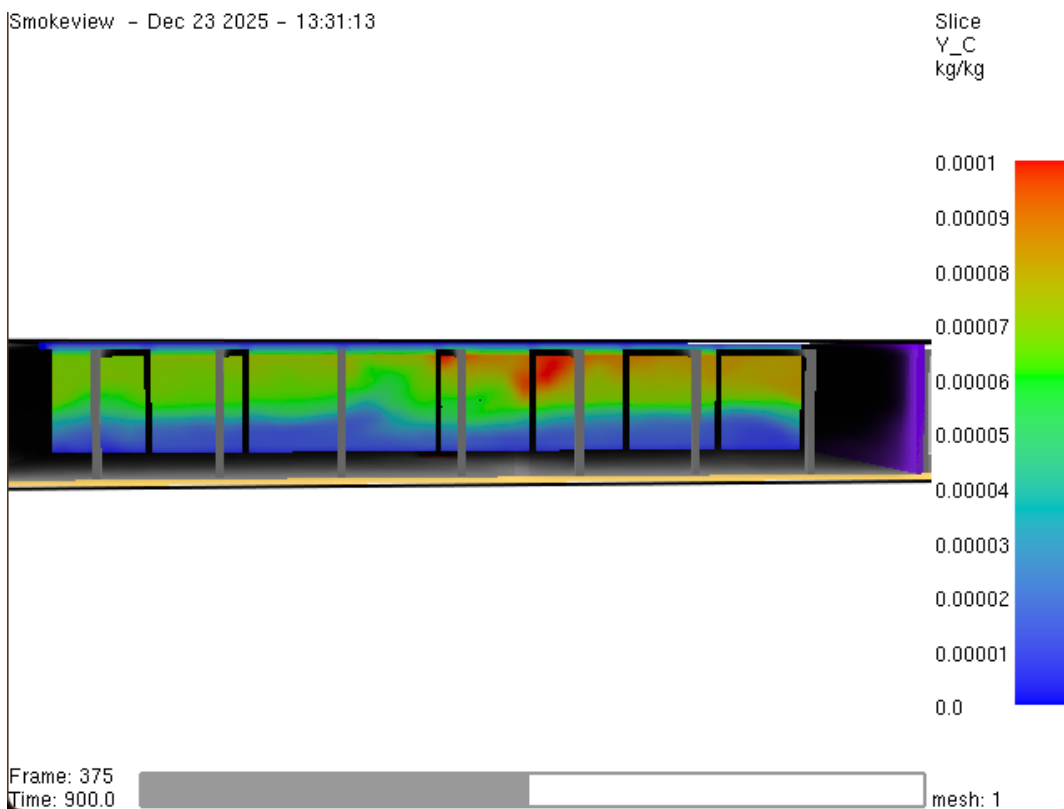
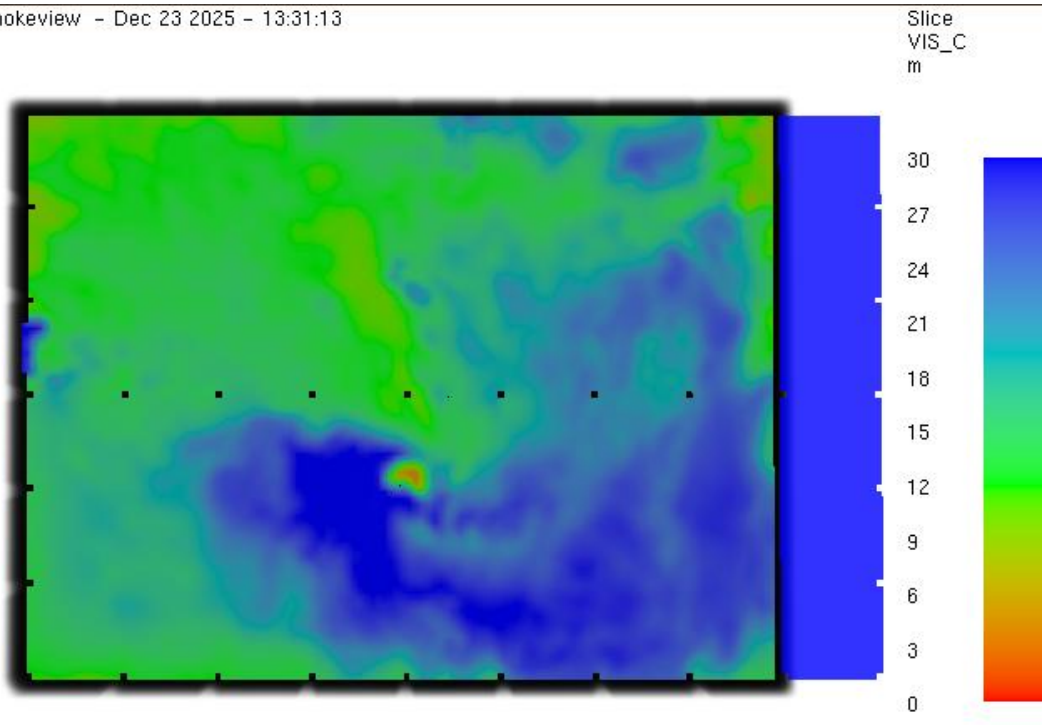


Bild A1.12: Rußkonzentration nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 500
Time: 1200.  mesh: 1

Bild A1.13: Sichtweite nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 500
Time: 1200.  mesh: 1

Bild A1.14: Temperatur nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

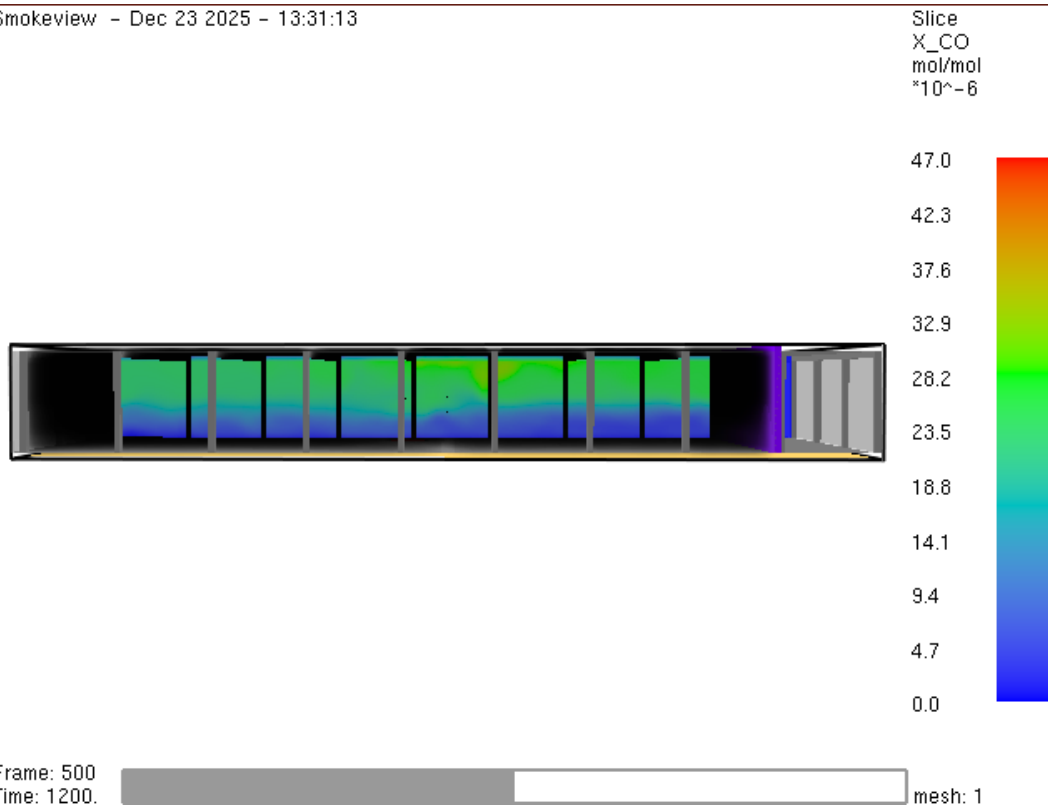


Bild A1.15: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

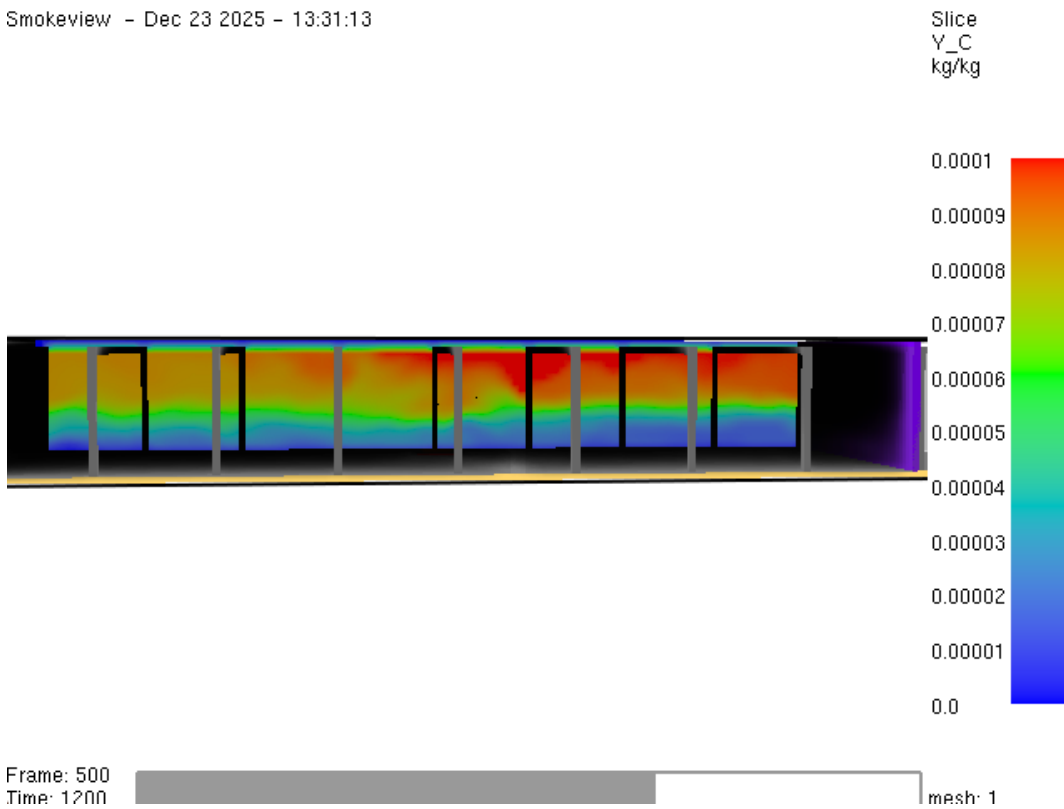


Bild A1.16: Rußausbeute nach t=1200 s

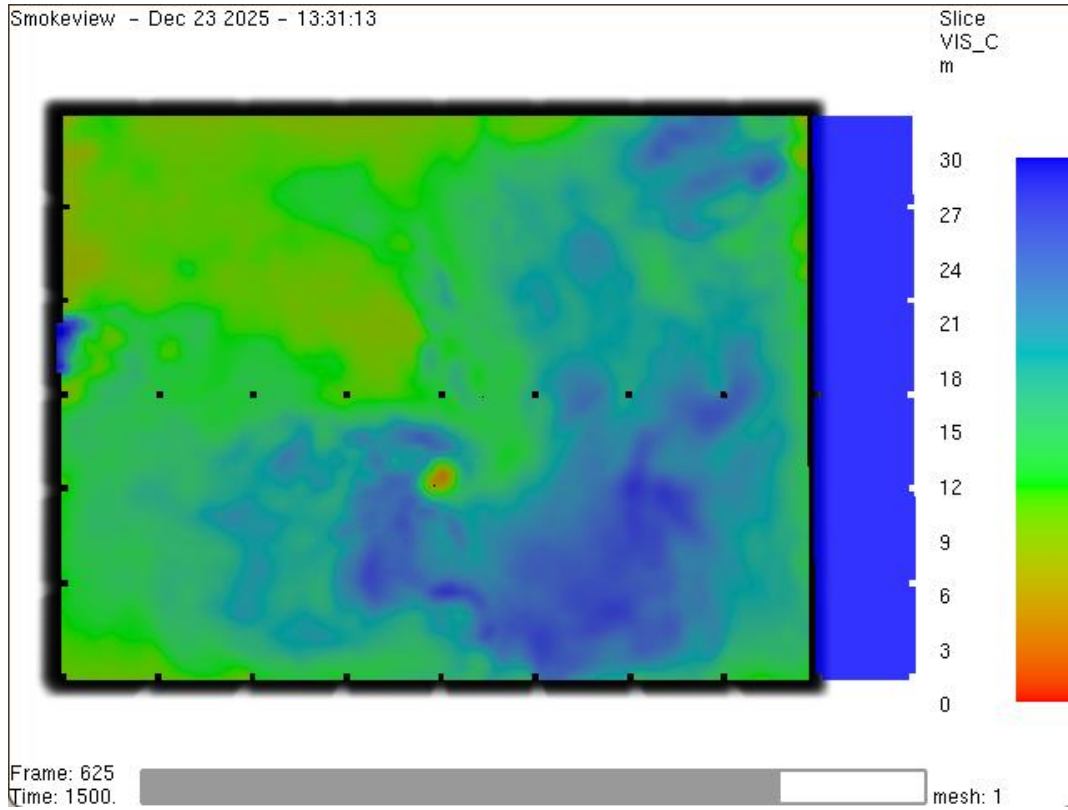


Bild A1.17: Sichtweite nach t=1500 s

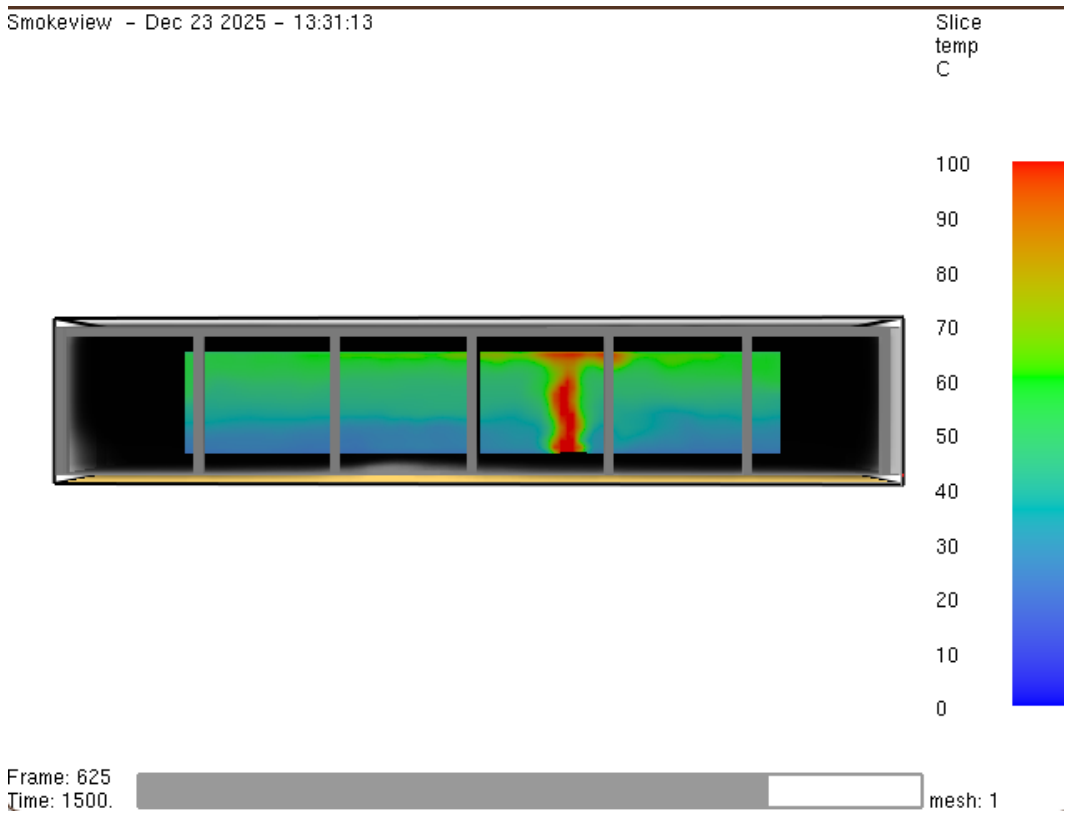


Bild A1.18: Temperatur nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

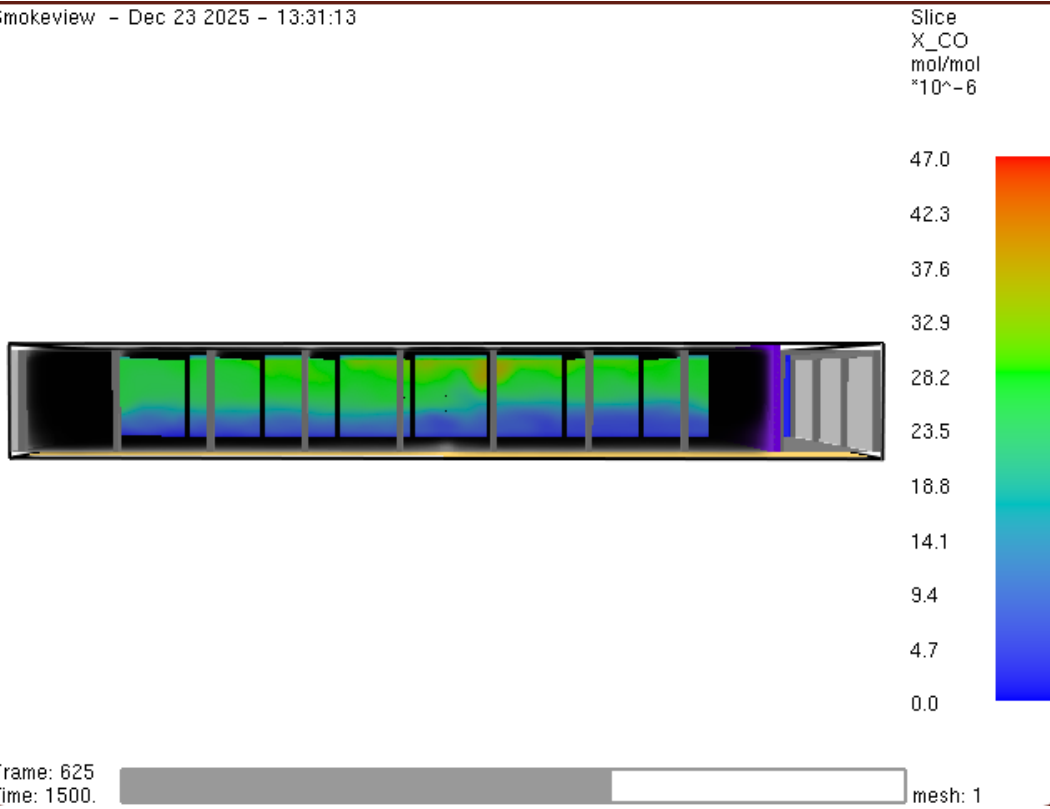


Bild A1.19: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

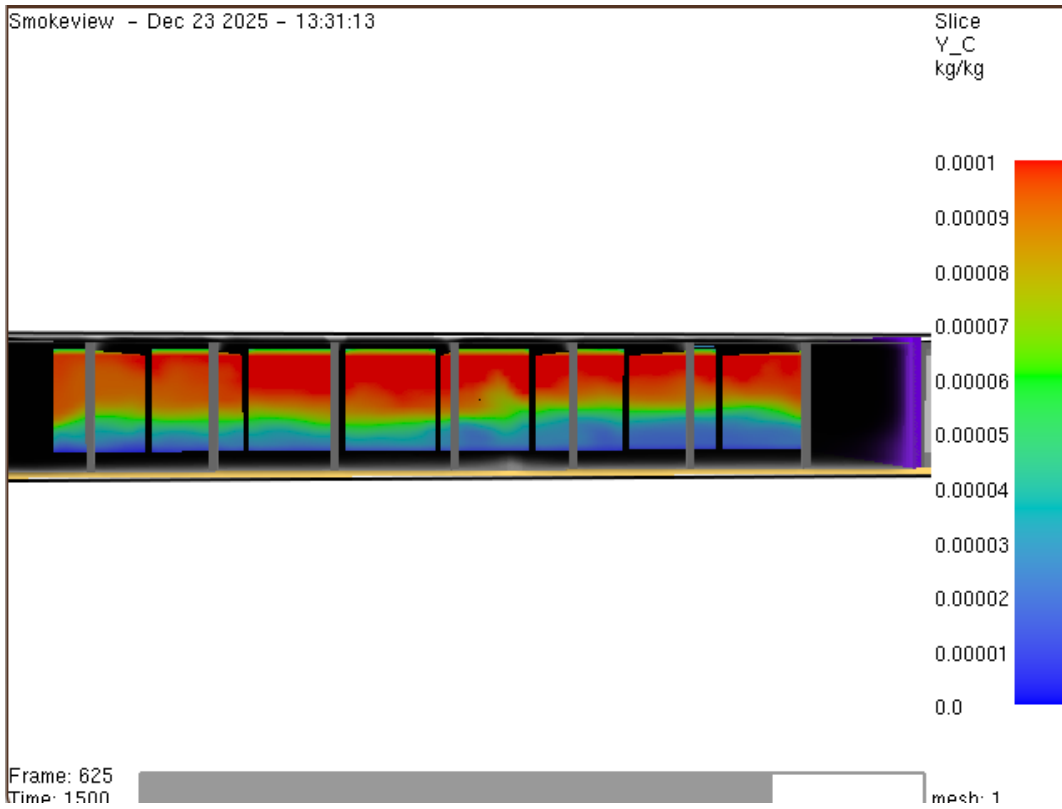


Bild A1.20: Rußausbeute nach t=1500 s

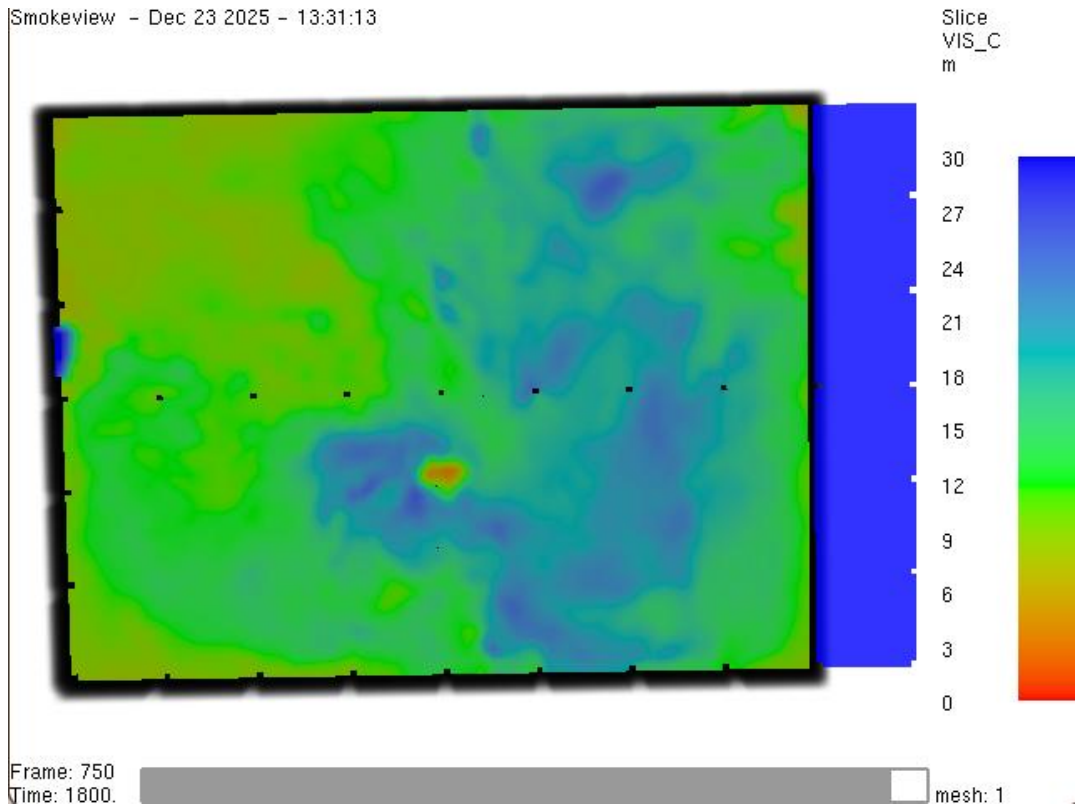


Bild A1.21: Sichtweite nach t=1800 s

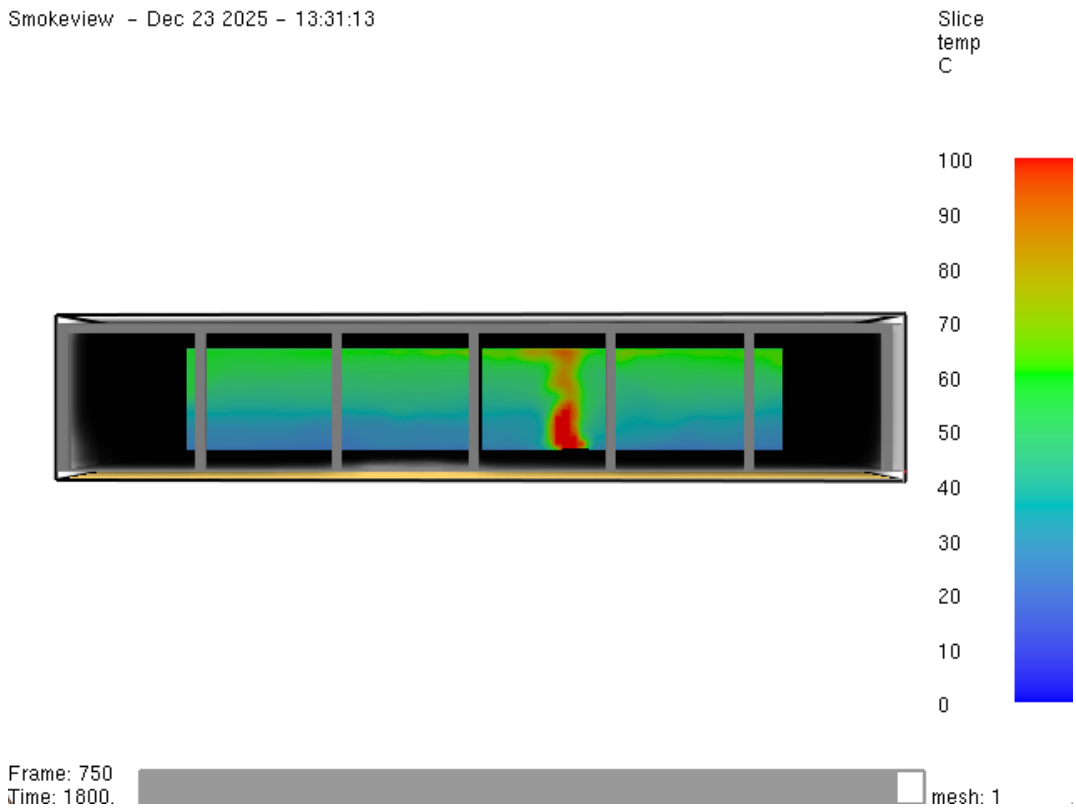


Bild A1.22: Temperatur nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

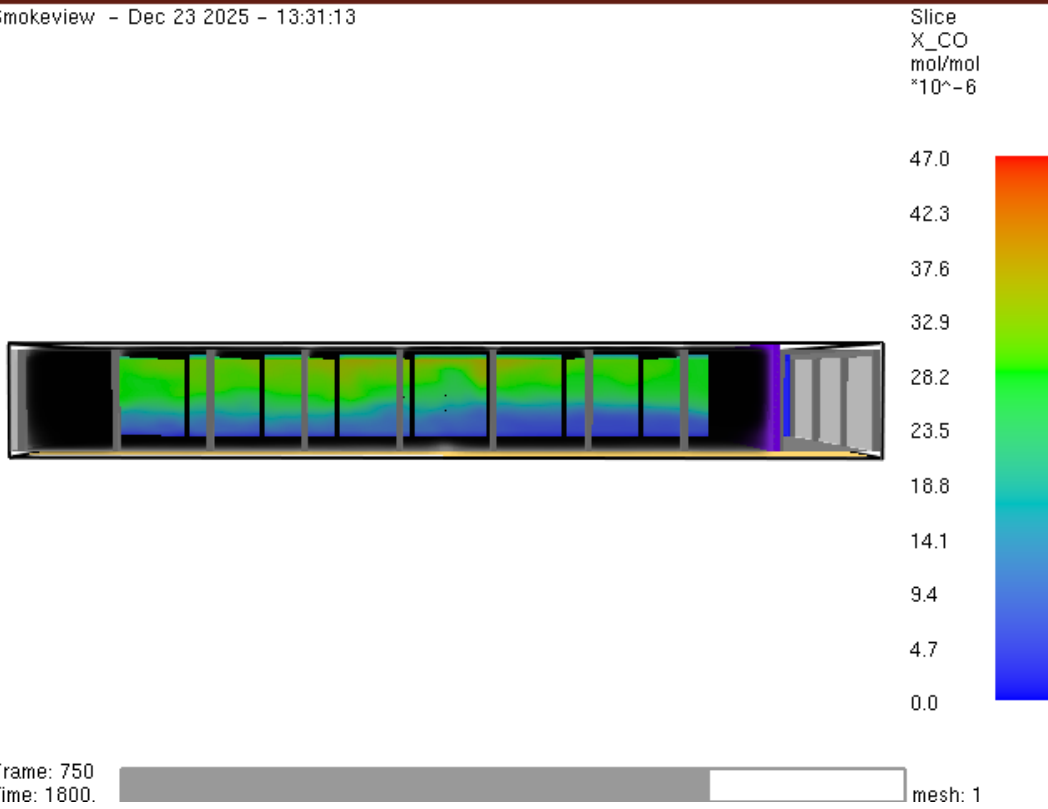


Bild A1.23: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

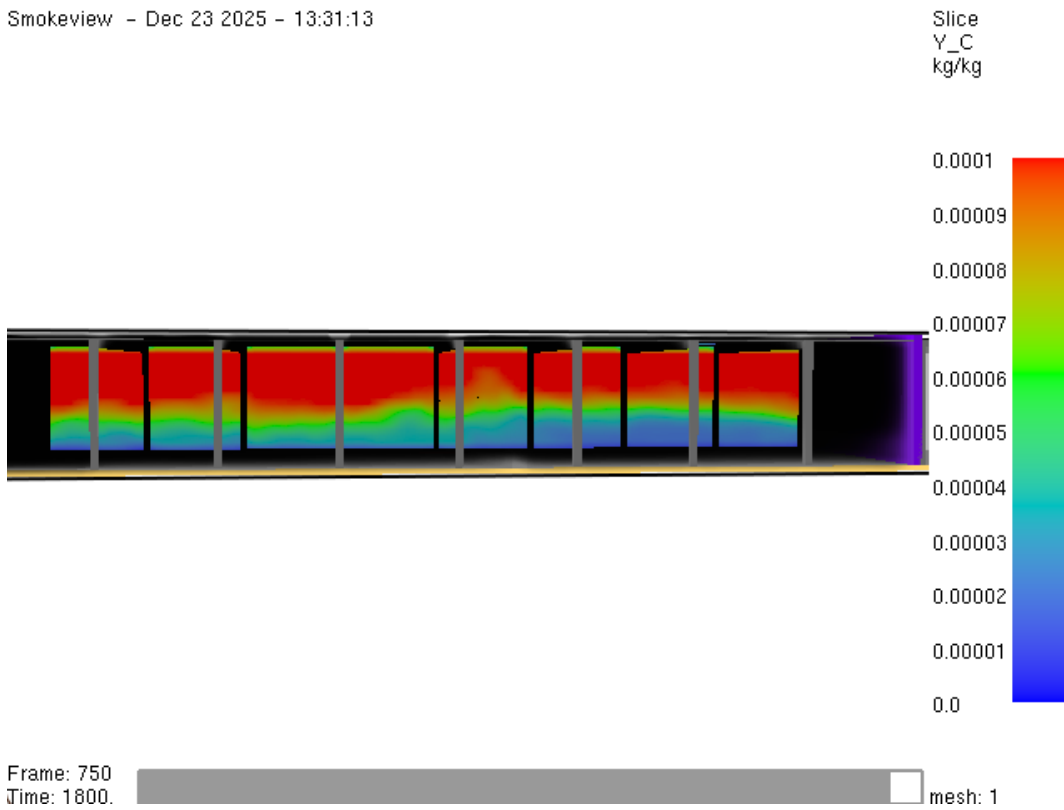


Bild A1.24: Rußausbeute nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

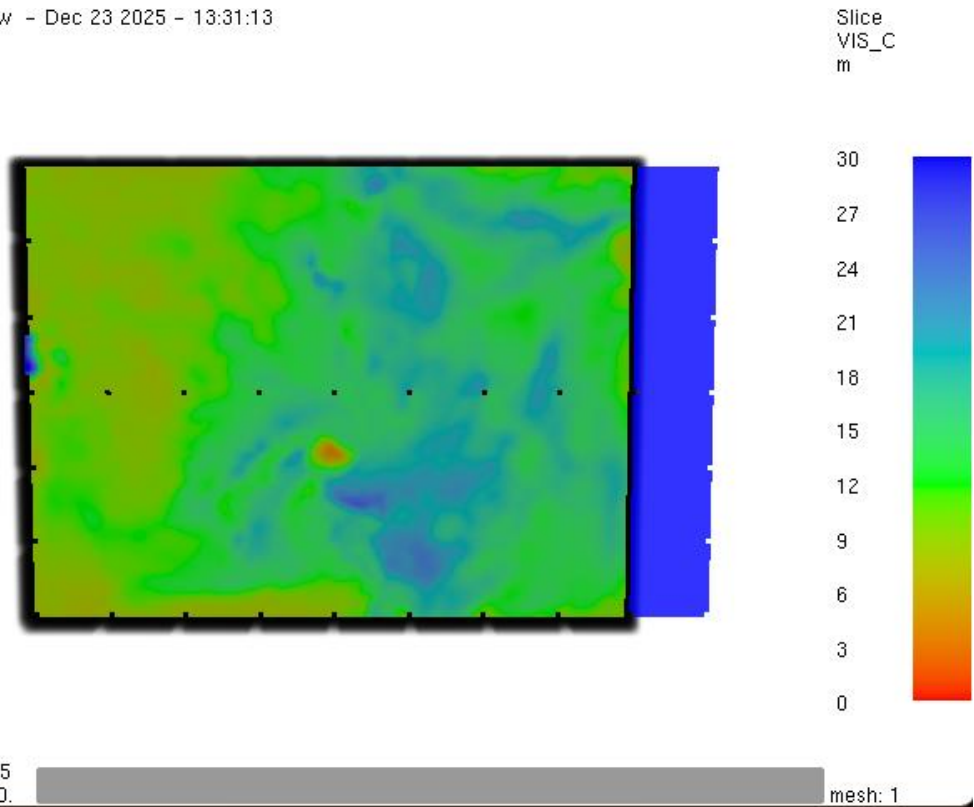


Bild A1.25: Sichtweite nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

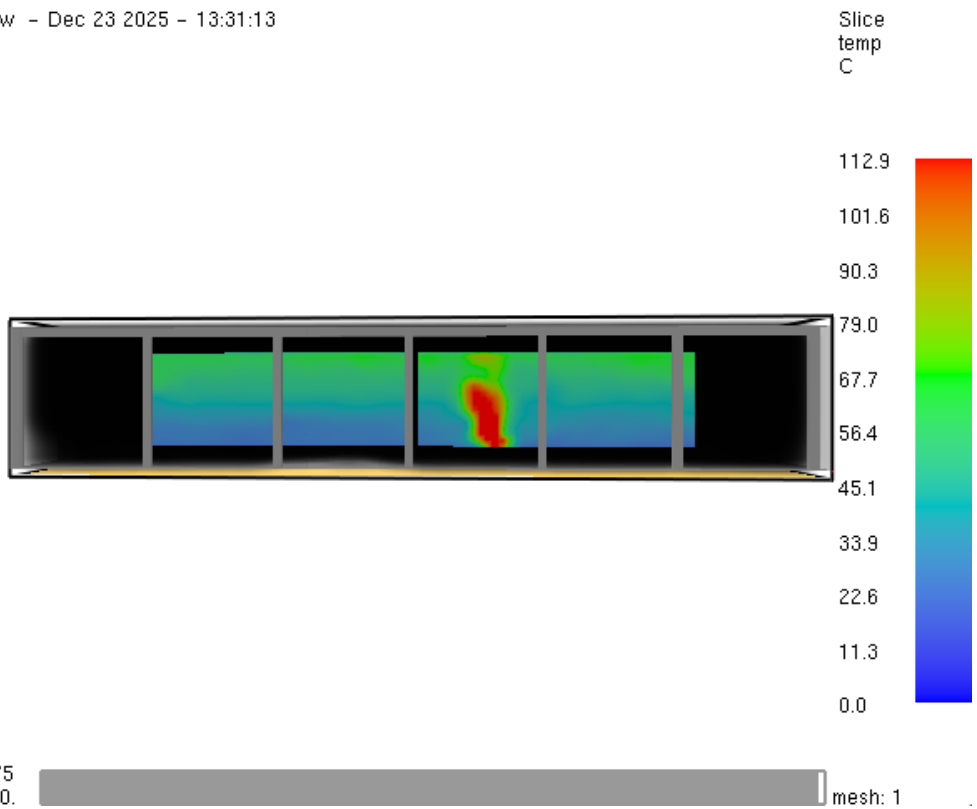


Bild A1.26: Temperatur nach t=2100 s

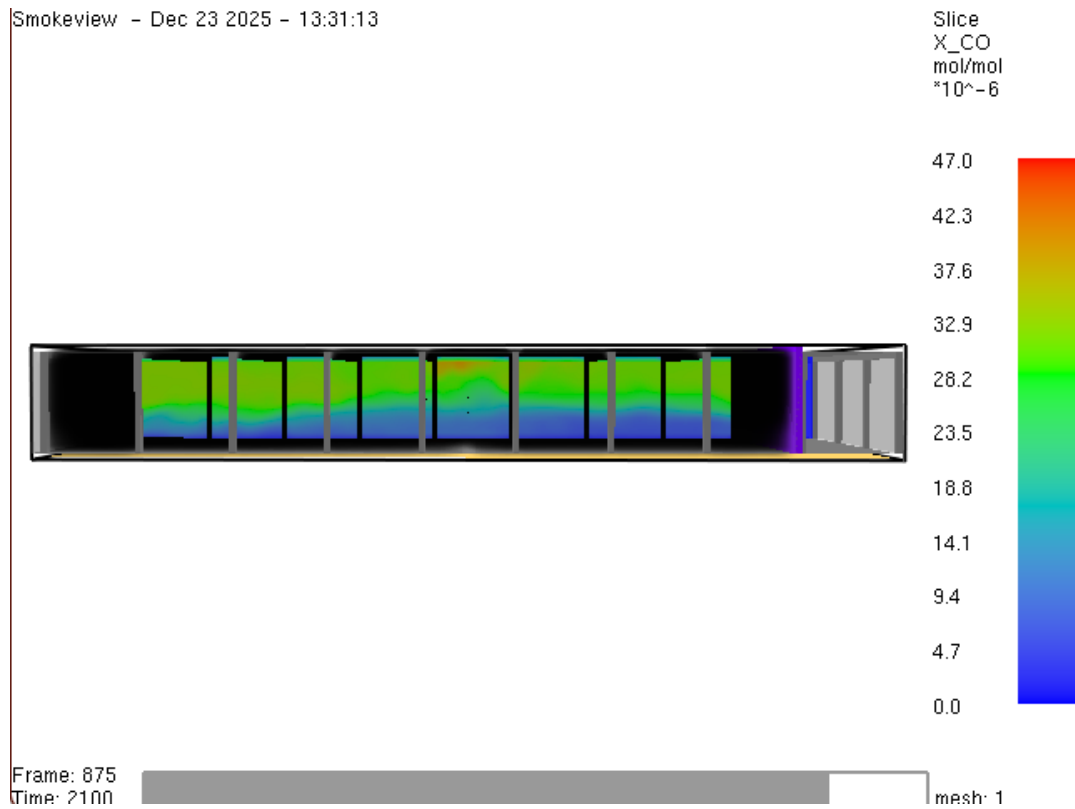


Bild A.27: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2100 s

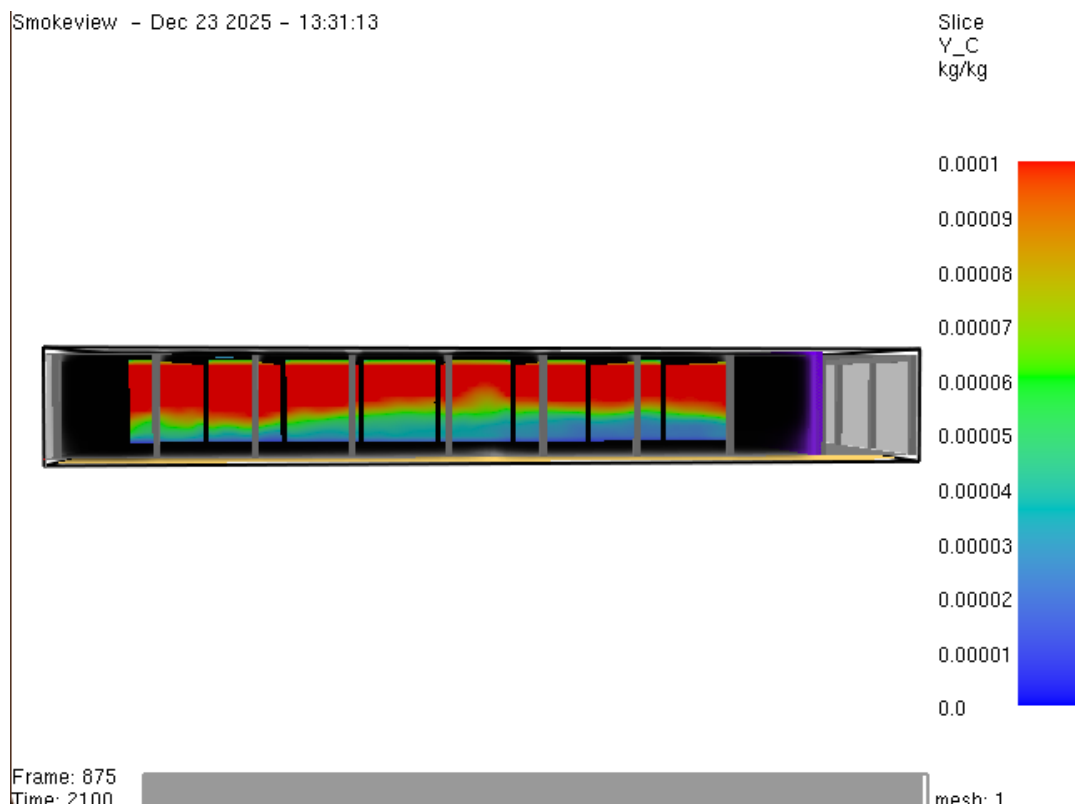


Bild A.28: Rußkonzentration nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

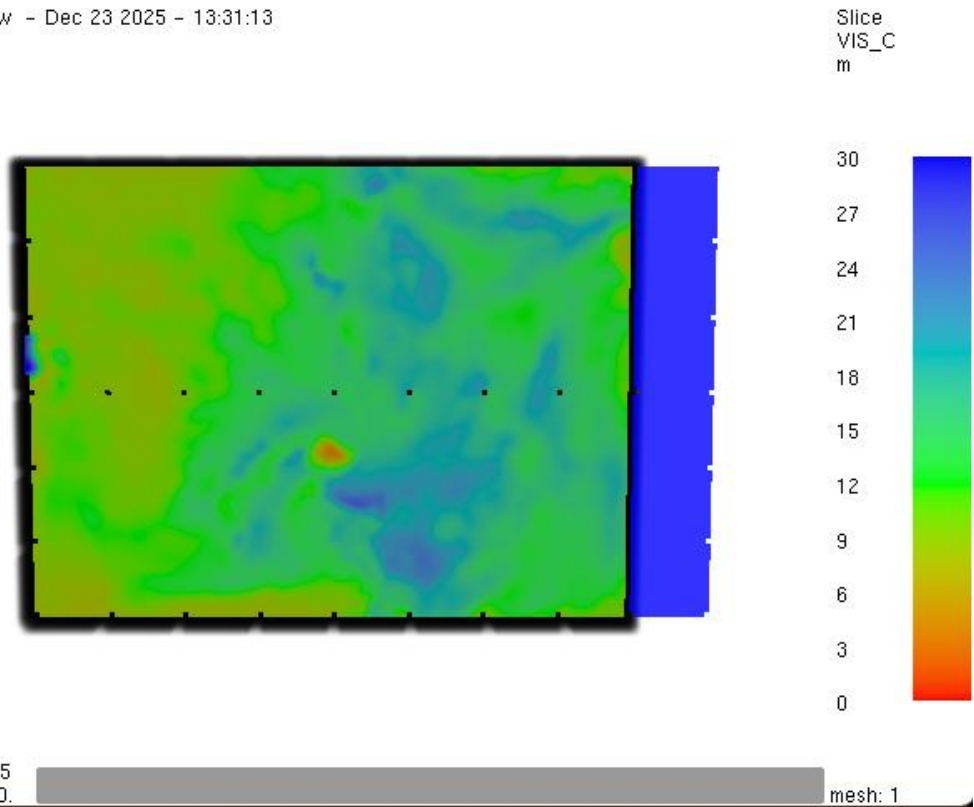


Bild A1.29: Sichtweite nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

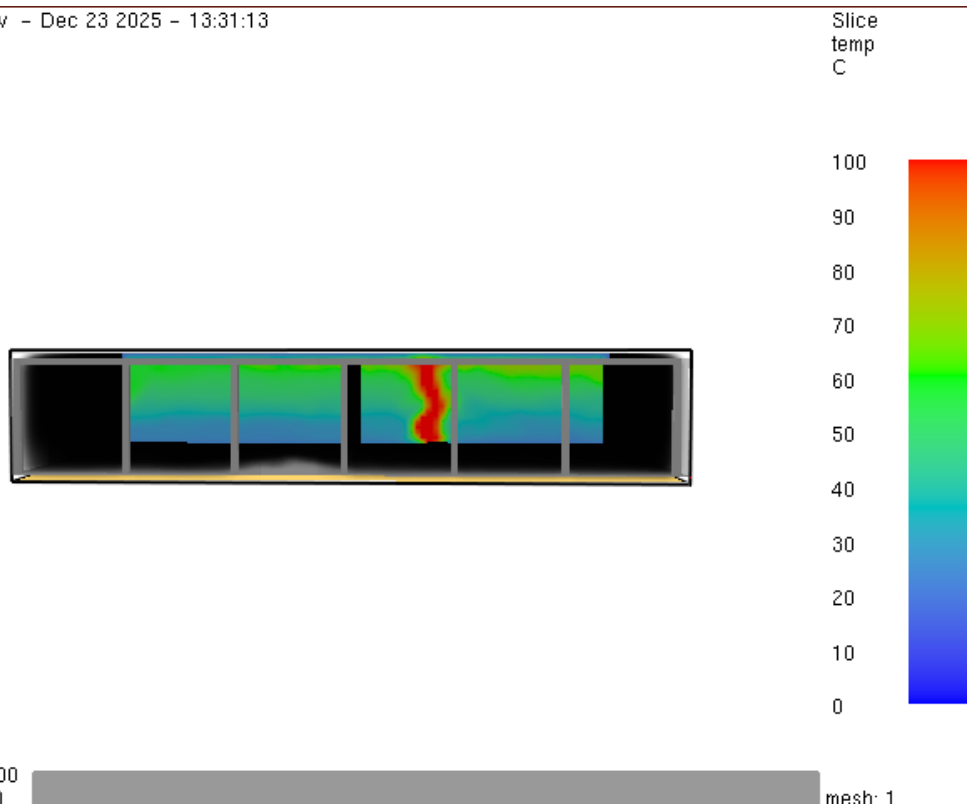


Bild A1.30: Temperatur nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

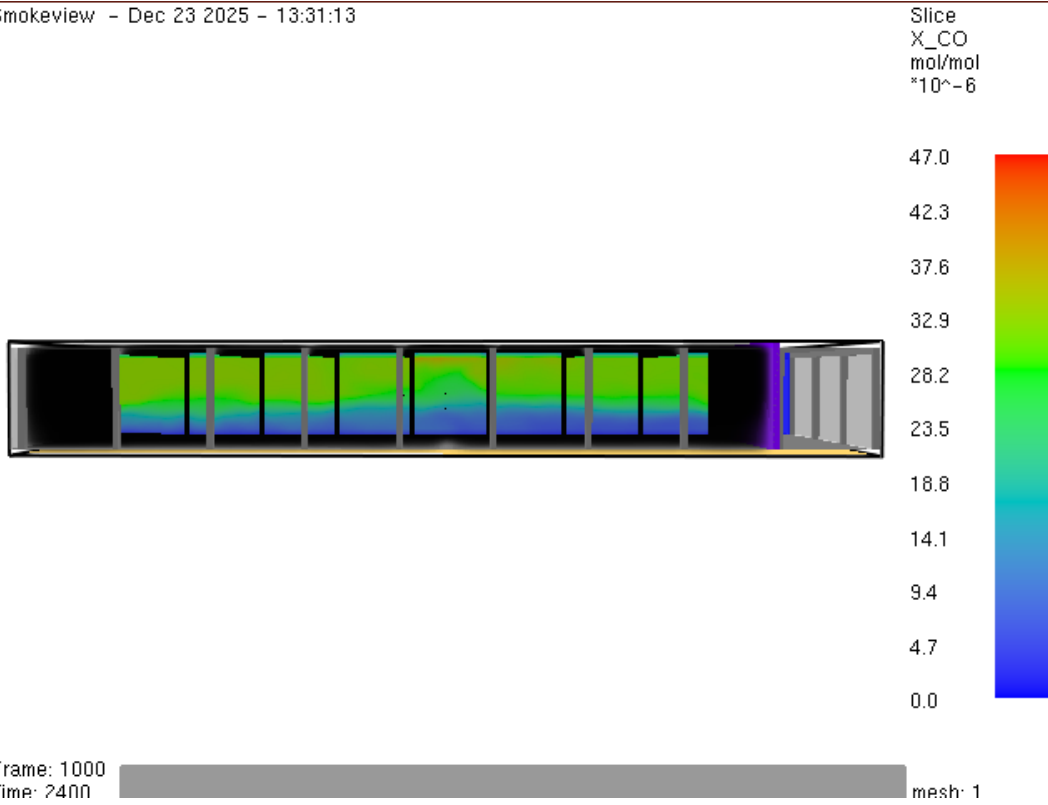


Bild A1.31: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

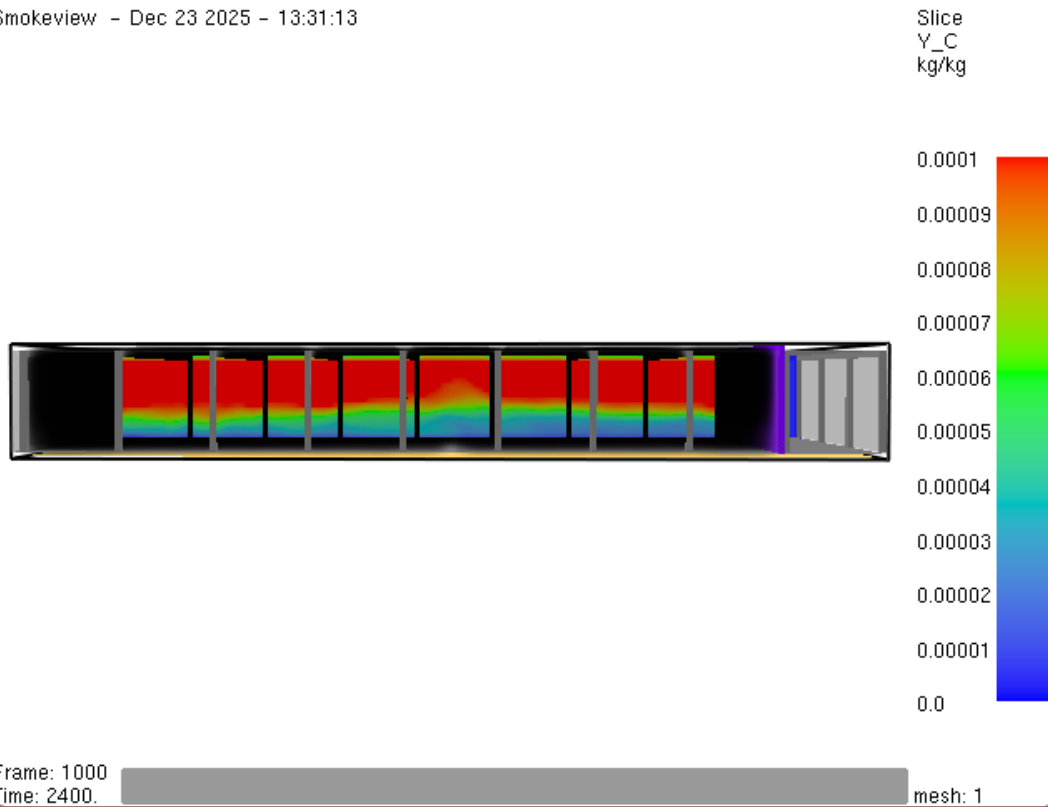


Bild A1.32: Rußausbeute nach t=2400 s

A2. Anhang zum FDS Beispiel Industriebau mit Brandmeldeanlage

Quelltext FDS:

```

---FDS-Eingaben Realbrandversuch für Industriebau mit BMA---
---Definition der Grundeinstellungen (Simulationsprofil)---
&HEAD CHID='IndBau2', TITLE='Simulation Industriebau mit BMA'
&TIME T_END= 2400. /
&MESH IJK= 137, 92, 18, XB=0.0, 68.5, 0.0, 46.0, -0.5, 8.50 /
&MISC OVERWRITE = .FALSE. ,VISIBILITY_FACTOR = 8 / RESTART = .TRUE./
&DUMP NFRAMES = 1000, DT_RESTART = 100.0, MASS_FILE = .TRUE.,
DT_PL3D=30., PLOT3D_QUANTITY(1)= 'carbon monoxide', PLOT3D_QUANTITY(5)=
'TEMPERATURE' /
---Brand-Definition (REACTION)---
&REAC ID = 'LAGERGUT_Reaktion'
      SOOT_YIELD = 0.015
      CO_YIELD = 0.004
      HEAT_OF_COMBUSTION = 12000
      N = 0.0
      C = 6
      H = 10
      O = 5
      RADIATIVE_FRACTION = 0.35/

---Definition der Materialien und Oberflächen---
---Materialien---
&MATL ID = 'BETON'
      CONDUCTIVITY = 1.4
      SPECIFIC_HEAT = 1.0
      DENSITY = 2000. /

&MATL ID = 'MAUERSTEIN'
      CONDUCTIVITY = 0.69
      SPECIFIC_HEAT = 0.84
      DENSITY = 1600. /

&MATL ID = 'GIPSKARTON'
      CONDUCTIVITY = 0.48

```

ANHANG

```
        SPECIFIC_HEAT      = 0.84
        DENSITY             = 1440. /
---Oberflächen---
&SURF ID                   = 'STUETZE'
        RGB                 = 128,128,128
        MATL_ID             = 'BETON'
        THICKNESS           = 0.40 /

&SURF ID                   = 'TRAEGER'
        RGB                 = 128,128,128
        MATL_ID             = 'BETON'
        THICKNESS           = 0.40 /

&SURF ID                   = 'BRANDWAND'
        RGB                 = 127,0,255
        MATL_ID             = 'BETON'
        THICKNESS           = 0.25 /

&SURF ID                   = 'AUSSENWAND'
        RGB                 = 128,128,128
        MATL_ID             = 'MAUERSTEIN'
        THICKNESS           = 0.50
        TRANSPARENCY        = 0.30 /

&SURF ID                   = 'DACH'
        RGB                 = 128,128,128
        MATL_ID             = 'GIPSKARTON',
        THICKNESS           = 0.10 /

&SURF ID                   = 'BODENPLATTE'
        RGB                 = 128,128,128
        MATL_ID             = 'BETON'
        THICKNESS           = 0.25 /

&SURF ID='FEUER', RGB=255,0,0, HRRPUA=400, RAMP_Q = 'brand_kurve' /

---Festlegen der Zeitlichen Brandentwicklung (RAMP-FUNKTION)---
```

```
&RAMP ID='brand_kurve', T=0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='brand_kurve', T=600.0, F=1.0 /
---Einfügen des Gebäudemodells---
&OBST XB=0.00,68.00,0.00,46.00,-0.25,0.00,SURF_ID='BODENPLATTE' /
&OBST XB=60.00,60.25,0.00,46.00,0.00,8.50, SURF_ID='BRANDWAND' /

&OBST XB=0.40,0.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=7.90,8.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=15.40,15.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=22.90,23.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=30.40,30.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=37.90,38.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=45.40,45.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=52.90,53.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=60.40,60.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=0.40,0.80,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=0.40,0.80,15.40,15.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,15.40,15.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=0.40,0.80,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=7.90,8.30,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=15.40,15.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=22.90,23.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=30.40,30.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=37.90,38.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=45.40,45.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=52.90,53.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=60.40,60.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,22.90,23.30,0.00, 8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=0.40,0.80,30.40,30.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,30.40,30.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=0.40,0.80,37.90,38.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,37.90,38.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=0.40,0.80,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=7.90,8.30,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=15.40,15.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=22.90,23.30,45.40,45.80,0.00, 8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=30.40,30.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=37.90,38.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=45.40,45.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=52.90,53.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=60.40,60.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=7.90,8.30,0.40,45.80,7.40,8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=15.40,15.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=22.90,23.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=30.40,30.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=37.90,38.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=45.40,45.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=52.90,53.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=67.90,68.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /

&OBST XB= 0.00,68.70, 0.00,0.50, 0.00,8.00,SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 0.00, 0.50, 0.00,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 0.00, 68.70, 45.70,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 68.30,68.70, 0.00,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /

&OBST XB= 0.00, 68.70, 0.00, 46.20, 8.00, 8.10, SURF_ID='DACH' /

---Implementierung der Brandmeldeanlage---
&PROP ID='Rauchmelder' , QUANTITY='CHAMBER OBSCURATION', LENGTH= 1.8 /
Definition eines Standard-Rauchmelders

&DEVC ID='BMA1_M1' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 4.35, 34.65, 7.9 /
Platzierung Melder 1 in Abschnitt 1

&DEVC ID='BMA1_M2' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 11.90, 7.00, 7.9 /
Platzierung Melder 2 in Abschnitt 1

&DEVC ID='BMA1_M3' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 19.35, 34.65, 7.9 /
Platzierung Melder 3 in Abschnitt 1

&DEVC ID='BMA1_M4' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 26.10, 11.55, 7.9 /
Platzierung Melder 4 in Abschnitt 1

&DEVC ID='BMA2_M1' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 33.85, 34.65, 7.9 /
Platzierung Melder 1 in Abschnitt 2
```

ANHANG

&DEVC ID='BMA2_M2' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 41.85, 11.55, 7.9 /
Platzierung Melder 2 in Abschnitt 2

&DEVC ID='BMA2_M3' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 49.35, 38.90, 7.9 /
Platzierung Melder 3 in Abschnitt 2

&DEVC ID='BMA2_M4' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 55.75, 11.55, 7.9 /
Platzierung Melder 4 in Abschnitt 2

&CTRL ID='Ausloesung_Melder', FUNCTION_TYPE='ANY', INPUT_ID='BMA1_M1',
'BMA1_M2', 'BMA1_M3', 'BMA1_M4', 'BMA2_M1', 'BMA2_M2', 'BMA2_M3', 'BMA2_M4' /
(Logik hinterlegen: BMA bekommt Signal sobald einer der Melder auslöst)

&CTRL ID='RWA_Start', FUNCTION_TYPE='ANY', INPUT_ID='Ausloesung_Melder',
DELAY= 30.0 / BMA sorgt für Öffnen der RWA's nach 30sekunden

---Zu- und Abluftflächen (Öffnungen)---

Abluft: 6x RWA im Dach a 1,50 x 1,50 m

&HOLE XB= 11.10, 12.60,10.80, 12.30,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 11.10, 12.60,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 26.10, 27.60,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 33.60, 35.10,10.80, 12.30,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 48.60, 50.10,10.80, 12.30,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 48.60, 50.10,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

Zuluft: Ein Tor in Fassade a 4,00 x 4,00 m, 2 x Tür in Fassade 1,00 m x
2,00 m

&HOLE XB= -0.10, 0.50, 24.80, 28.80, 0.00, 4.00 /

&HOLE XB= 33.85, 34.85, -0.10, 0.50, 0.00, 2.00 /

&HOLE XB= 33.85, 34.85, 45.70, 46.30, 0.00, 2.00 /

Das Feuer

&VENT XB= 29.0,32.0, 15.0, 17.0, 0.01,0.01, SURF_ID='FEUER', IOR=3 /

---Messgeräte (DEVC)---

Messpunkt 1: Nah am Brandherd

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT',
ID='BRAND_LH' /

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER
TEMPERATURE', ID='BRAND_UT' /

&DEVC XB=30.0,30.5,16.0,6.0,0.0,8.0,QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
ID='BRAND_LT' /

Messpunkt 2: Hallenmitte

&DEVC XB=34.0,34.0,23.0, 23.0,0.0,8.0,QUANTITY='LAYER HEIGHT',
ID='MITTE_LH' /

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER
TEMPERATURE', ID='MITTE_UT' /

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LOWER
TEMPERATURE', ID='MITTE_LT' /

Personenschutzwerte auf 2,50 m Höhe:

&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5,QUANTITY='TEMPERATURE', ID='MITTE_TEMP_2M' /

&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION',SPEC_ID='CARBON
MONOXIDE', ID='MITTE_CO_2M' /

---Visualisierung (SLCF)---

Temperaturen (Hitzeausbreitung):

&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /

HRRPUV:

&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='HRRPUV' /

Sichtweite und Gase:

&SLCF PBZ= 2.5, QUANTITY='VISIBILITY' /

&SLCF PBZ= 5.0, QUANTITY='VISIBILITY' /

&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' /

Ruß-Konzentration (Dichte des Rauches):

&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='SOOT' /

---Druckausgleich---

&VENT MB='XMIN',SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='XMAX',SURF_ID='OPEN' /

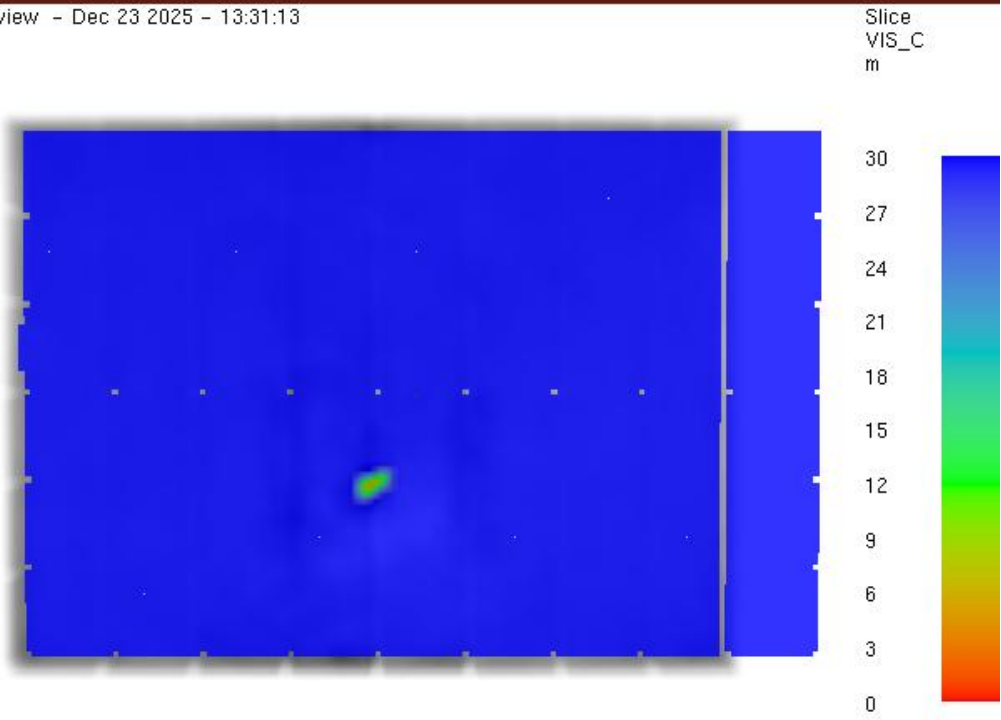
&VENT MB='YMIN',SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMAX',SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='ZMAX',SURF_ID='OPEN' /

&TAIL /

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 125
Time: 300.0 mesh: 1

Bild A2.1: Sichtweite nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 125
Time: 300.0 mesh: 1

Bild A2.2: Temperatur nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

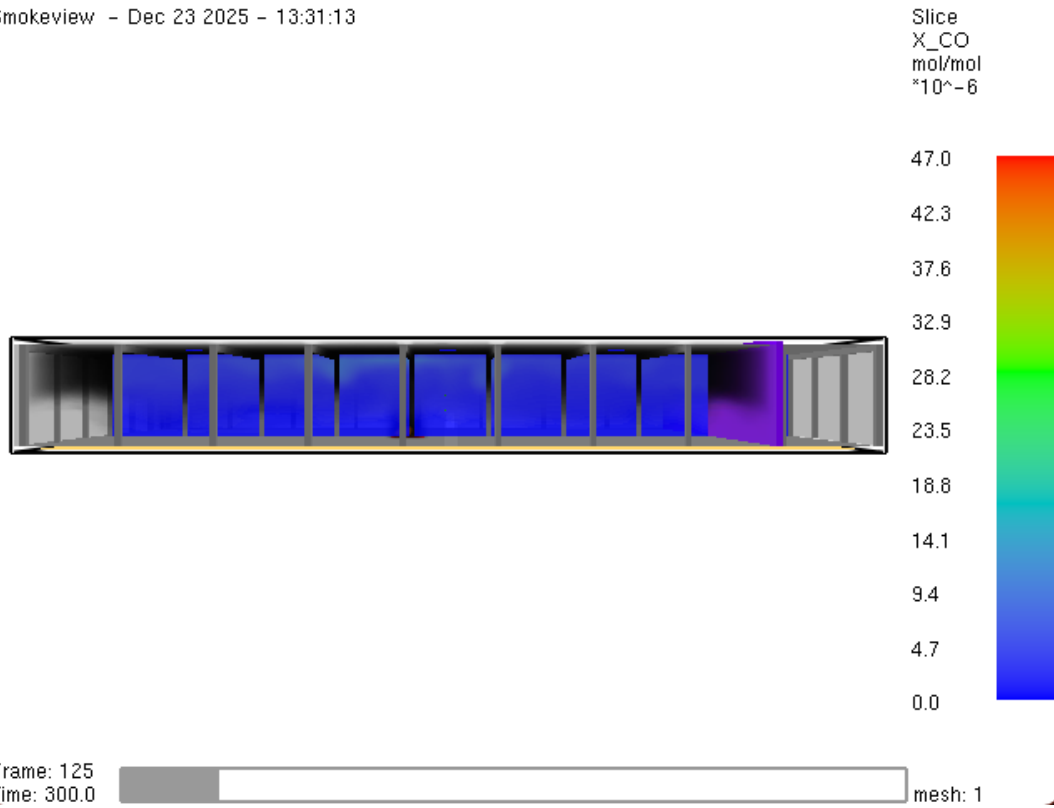


Bild A2.3: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

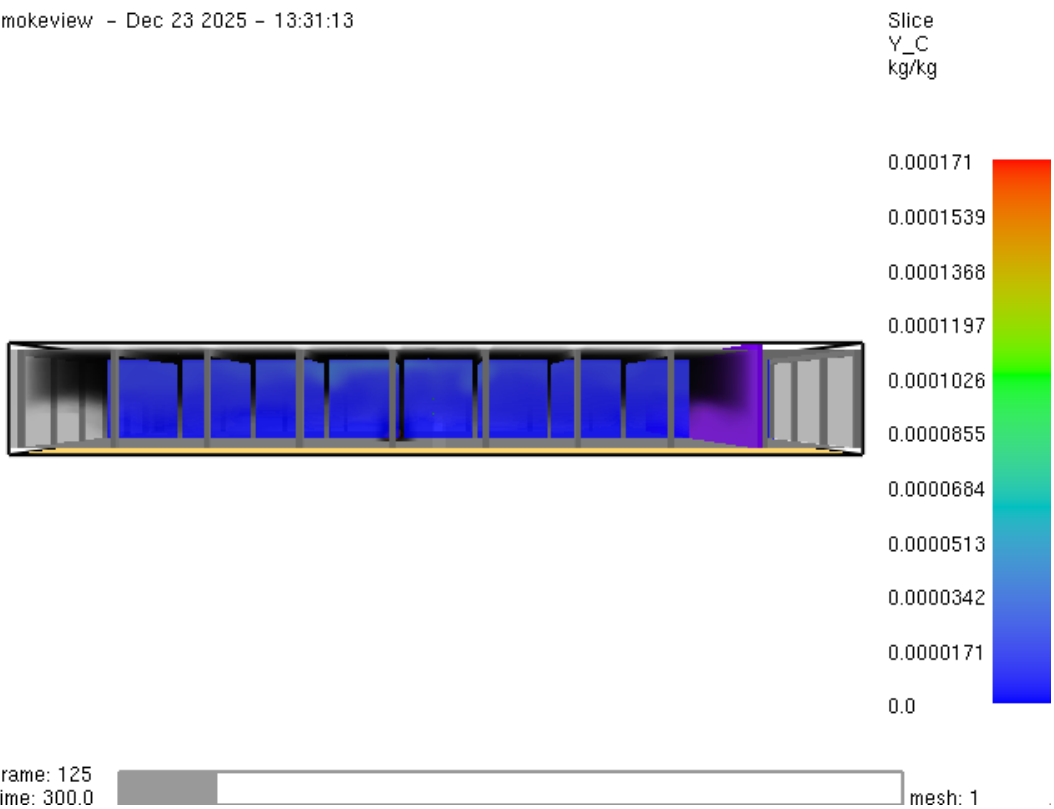


Bild A2.4: Rußausbeute nach t=300 s

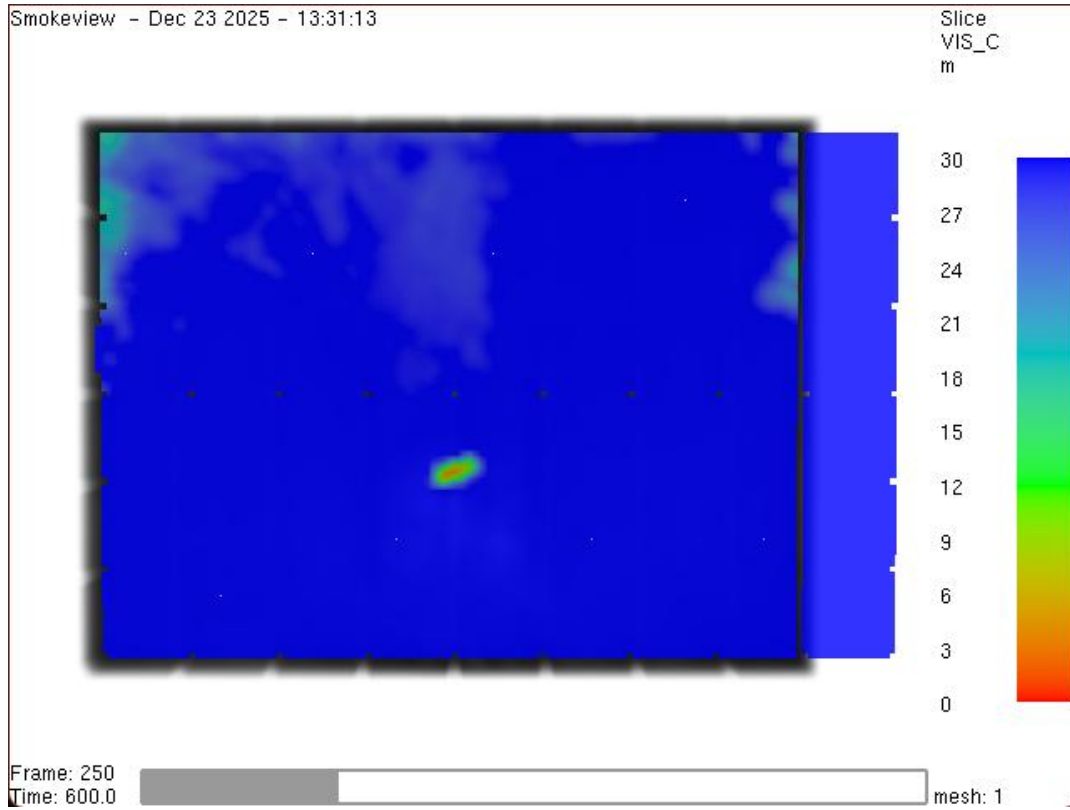


Bild A2.5: Sichtweite nach t=600 s

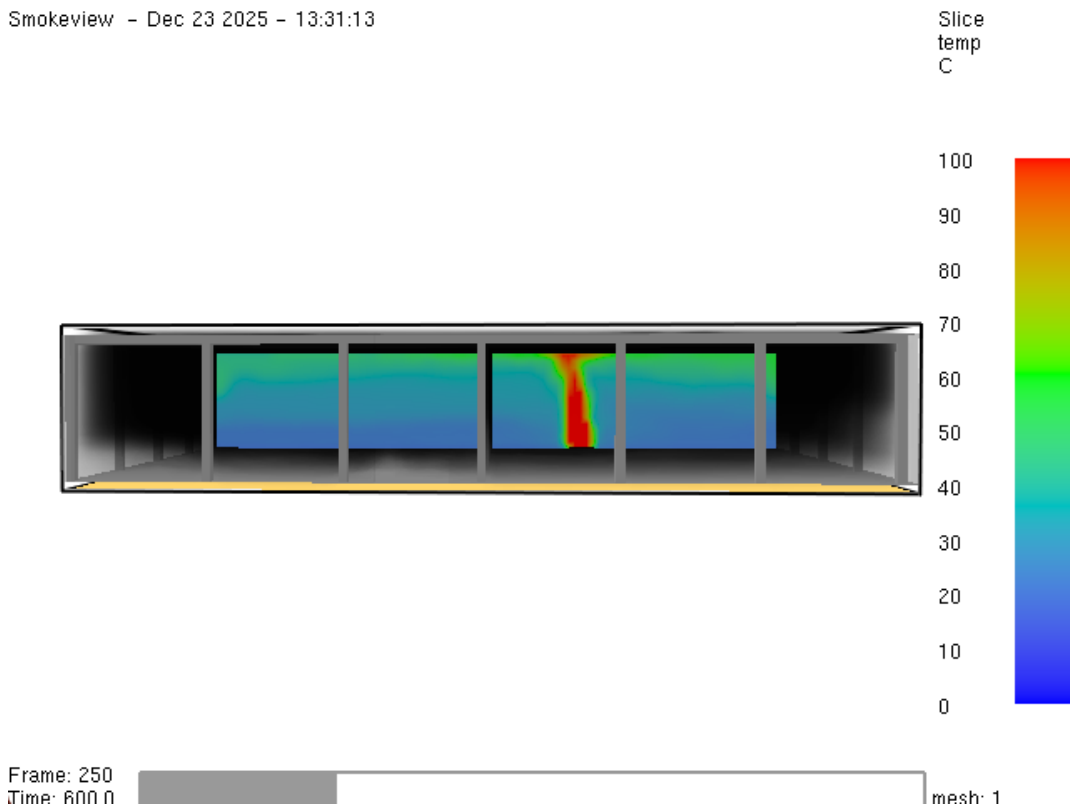


Bild A2.6: Temperatur nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

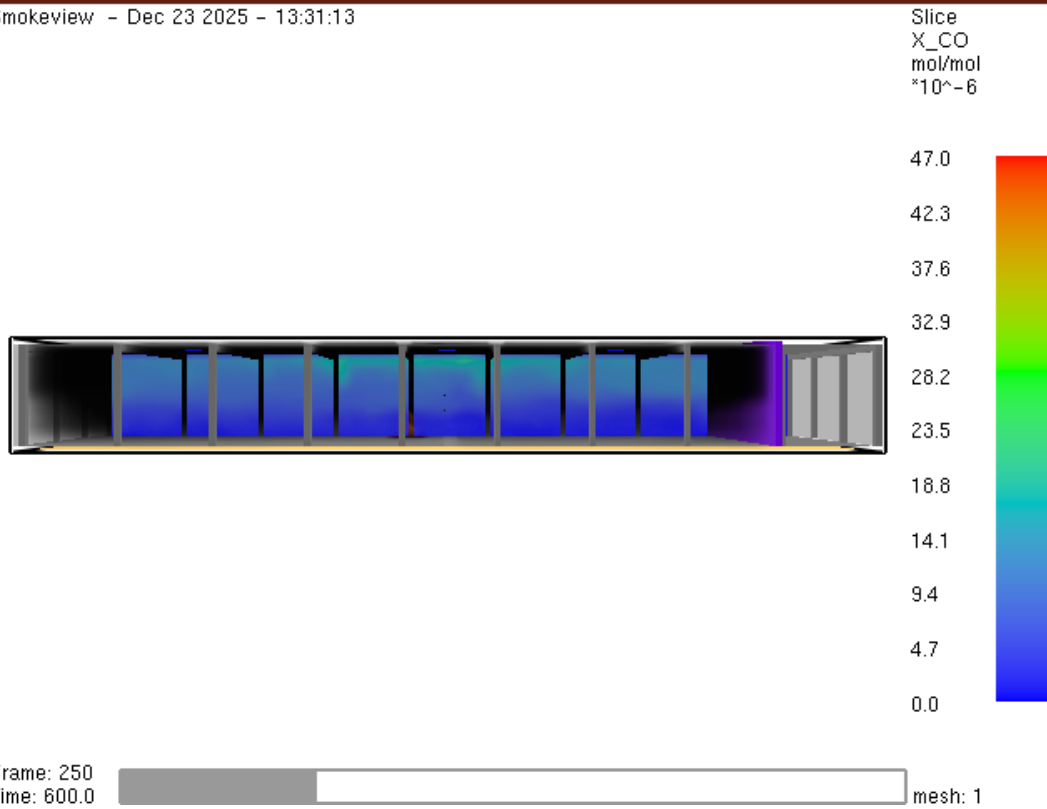


Bild A2.7: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

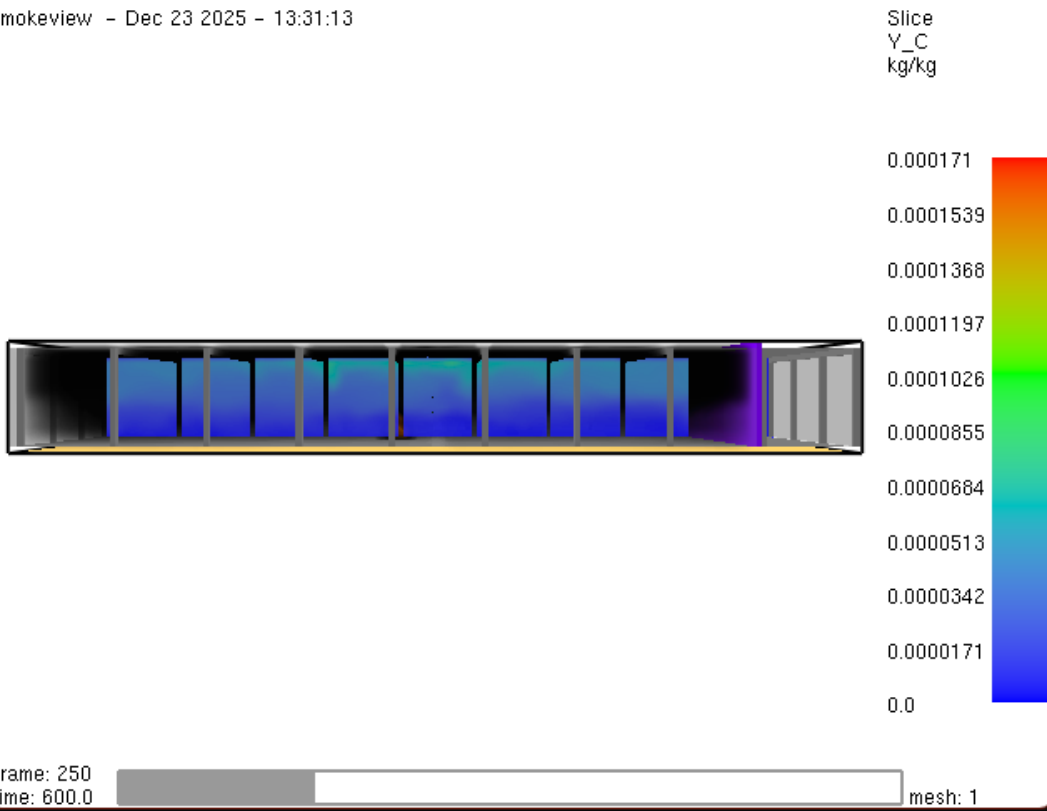
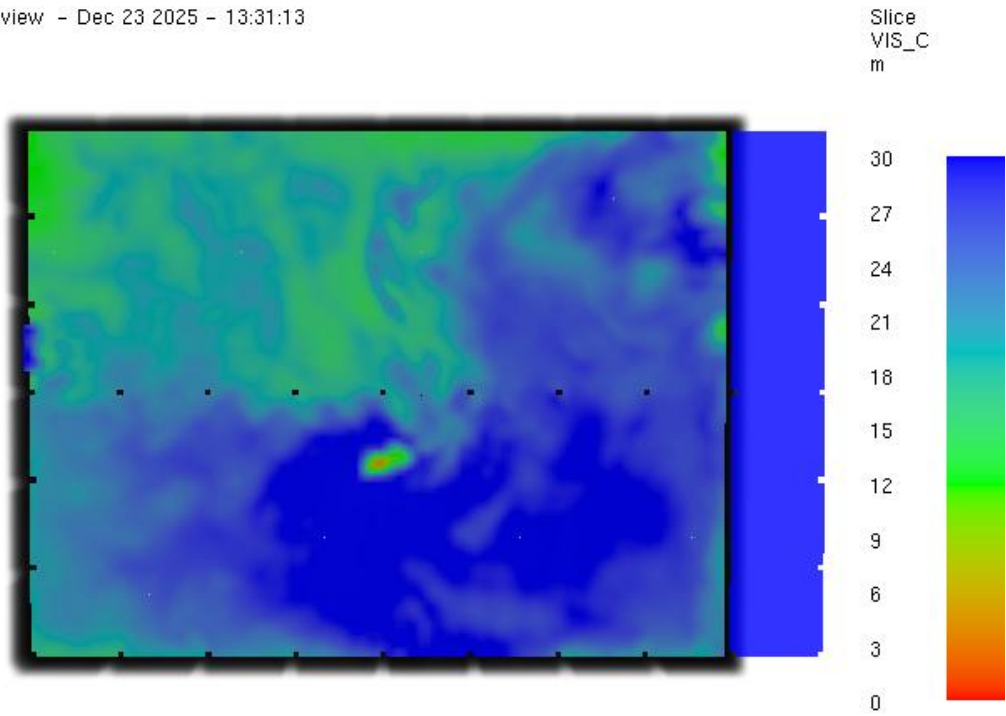


Bild A2.8: Rußausbeute nach t=600 s

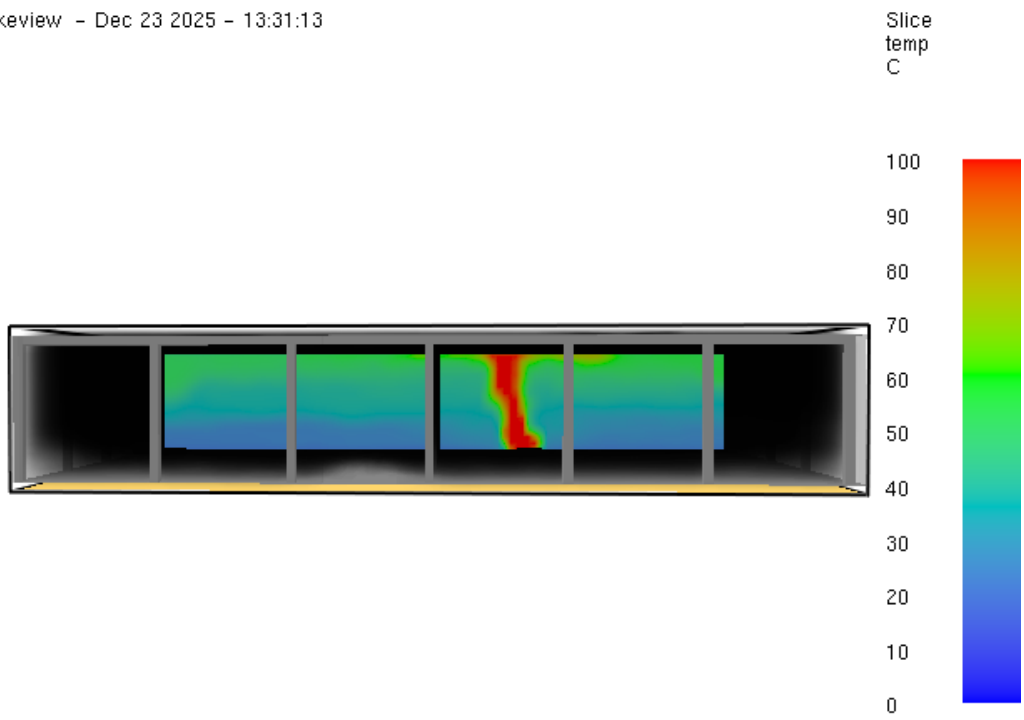
Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 375
Time: 900.0 mesh: 1

Bild A2.9: Sichtweite nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 375
Time: 900.0 mesh: 1

Bild A2.10: Temperatur nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

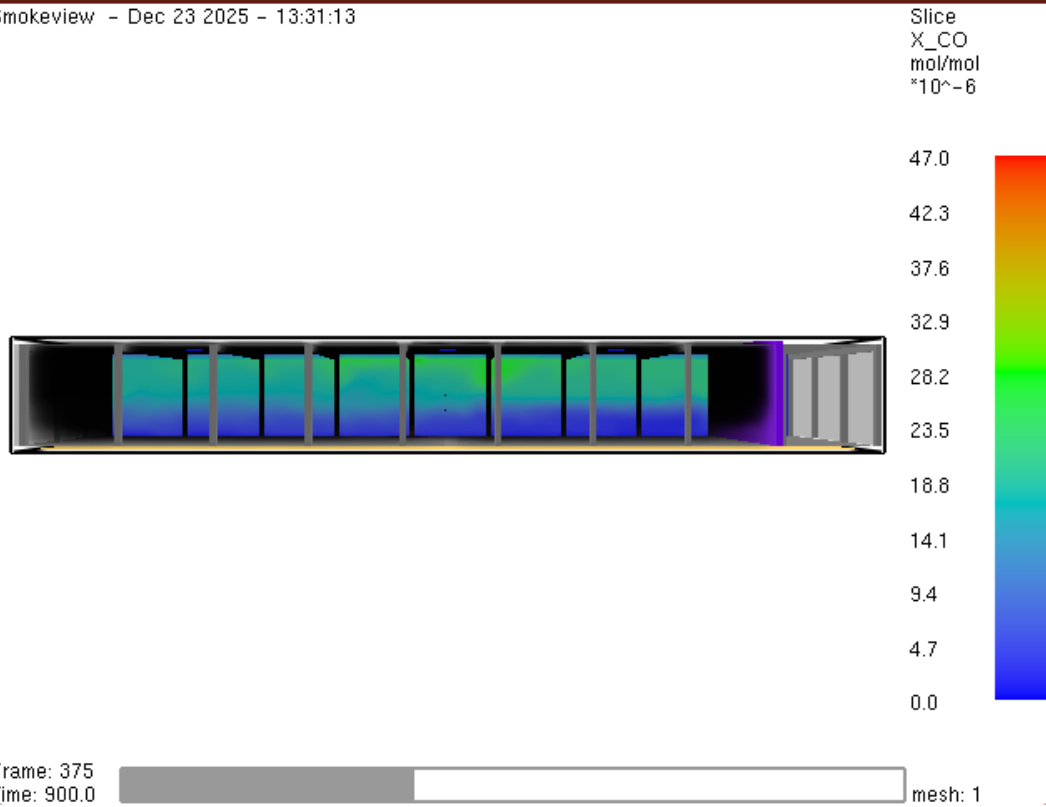


Bild A2.11: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

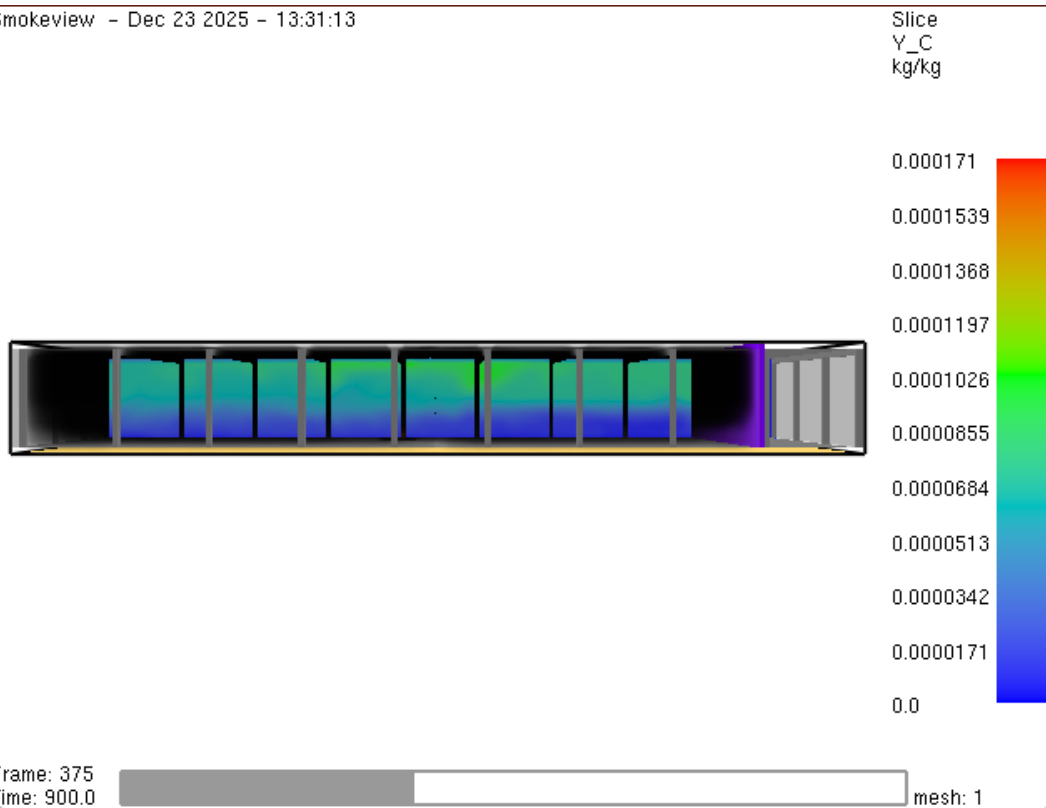
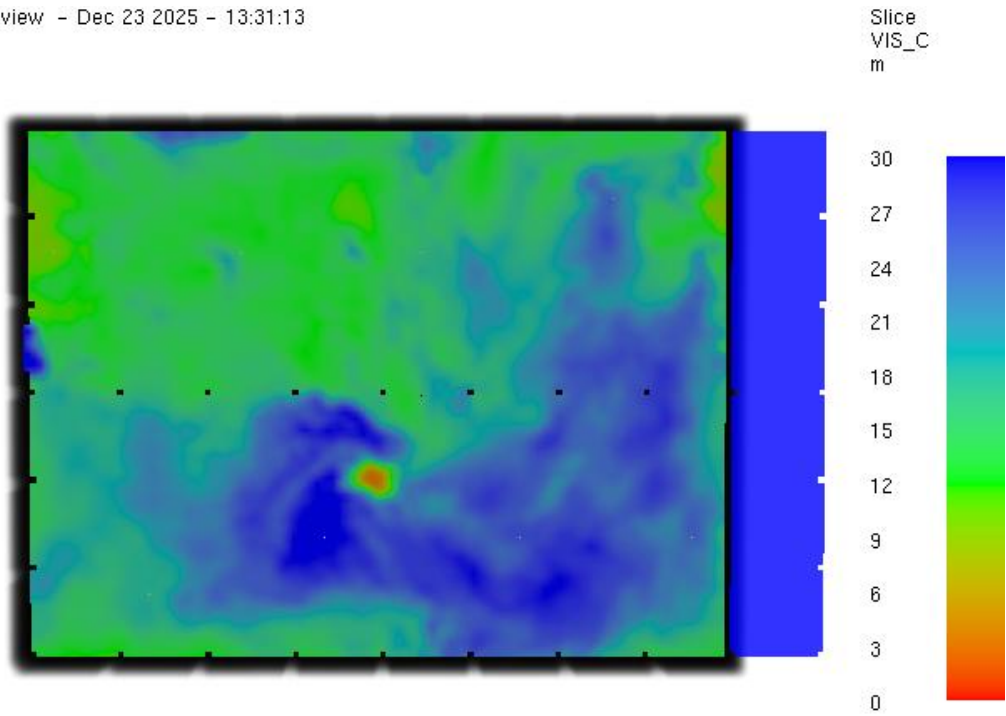


Bild A2.12: Rußausbeute nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 500
Time: 1200.  mesh: 1

Bild A2.13: Sichtweite nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 500
Time: 1200.  mesh: 1

Bild A2.14: Temperatur nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

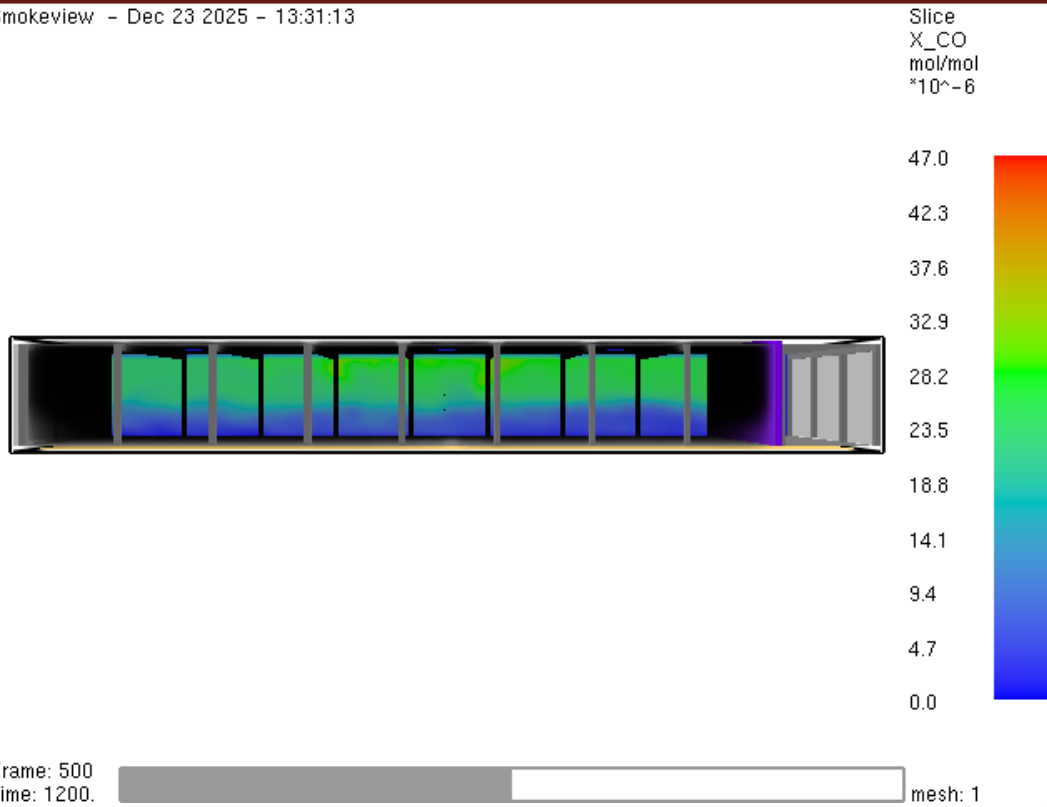


Bild A2.15: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

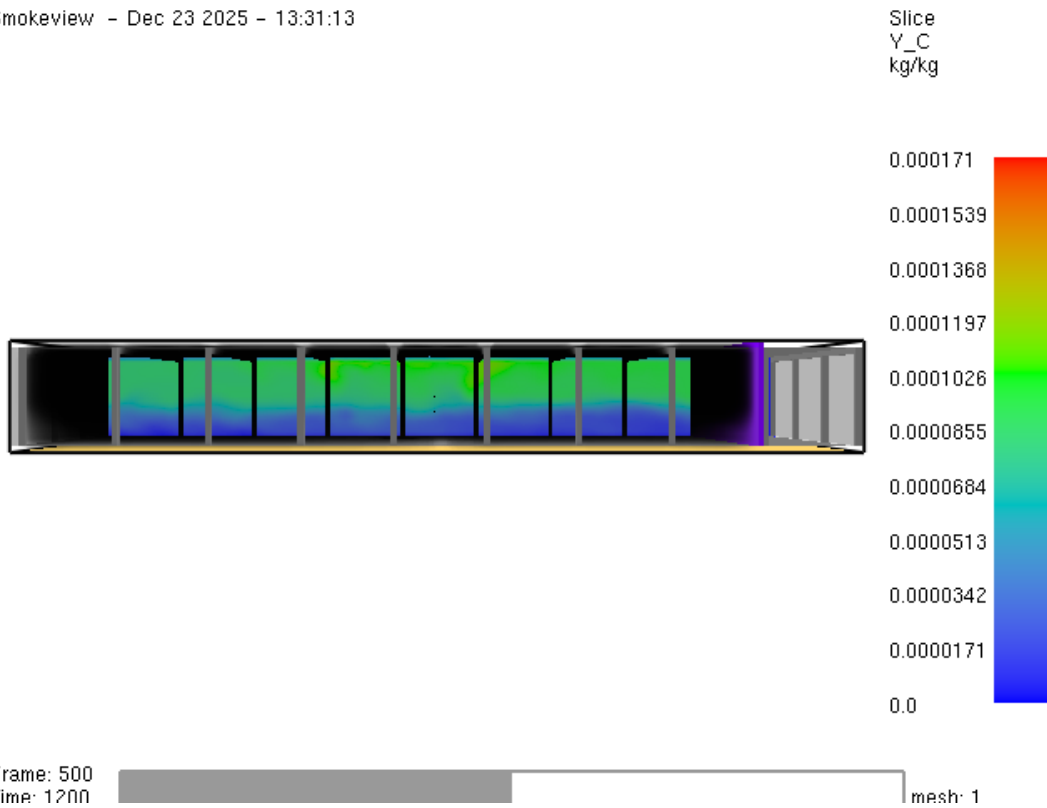


Bild A2.16: Rußausbeute nach t=1200 s

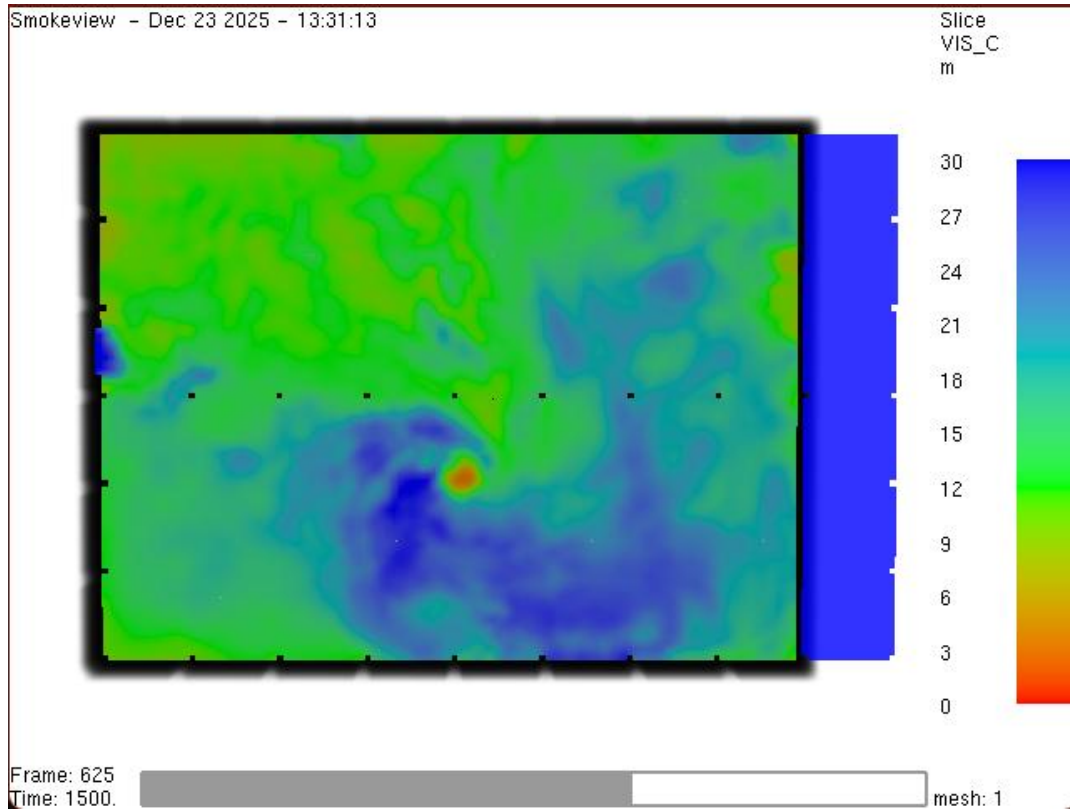


Bild A2.17: Sichtweite nach t=1500 s

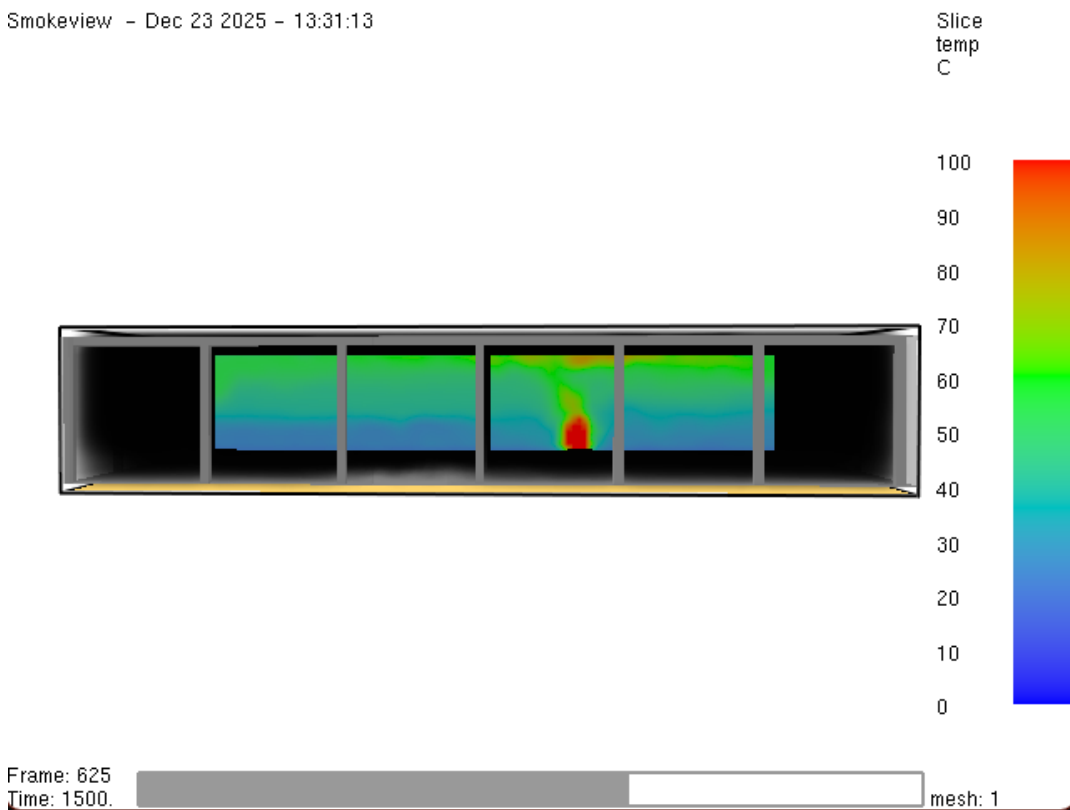


Bild A2.18: Temperatur nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

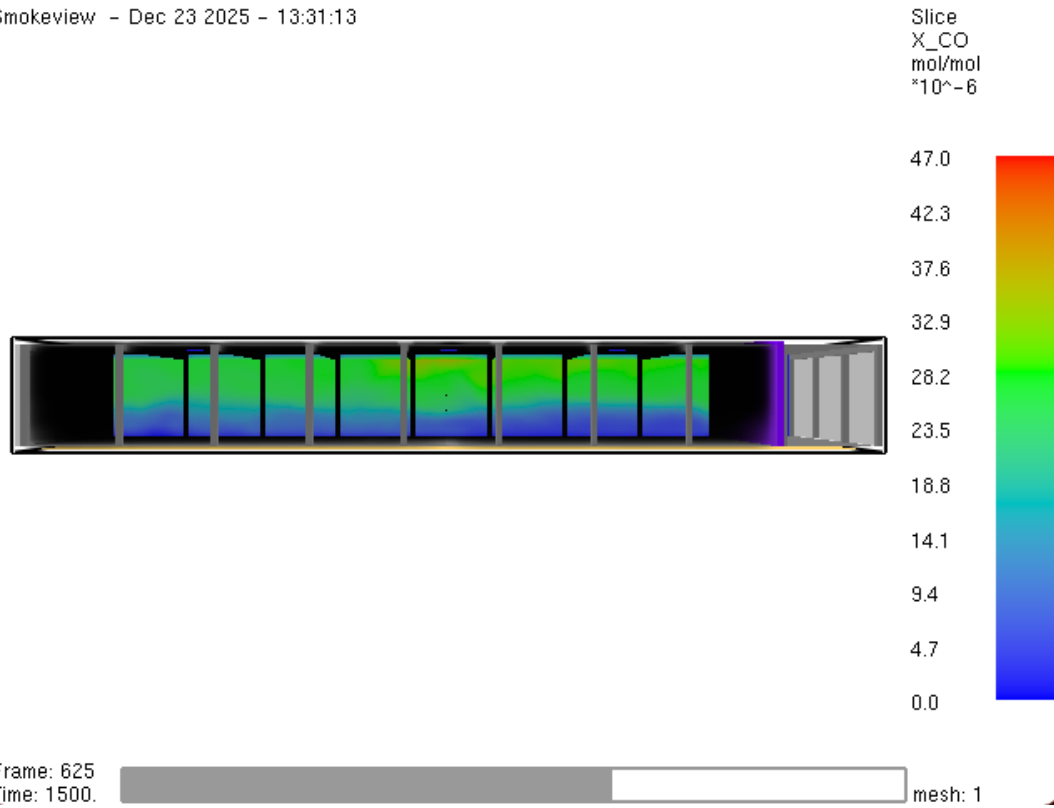


Bild A2.19: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

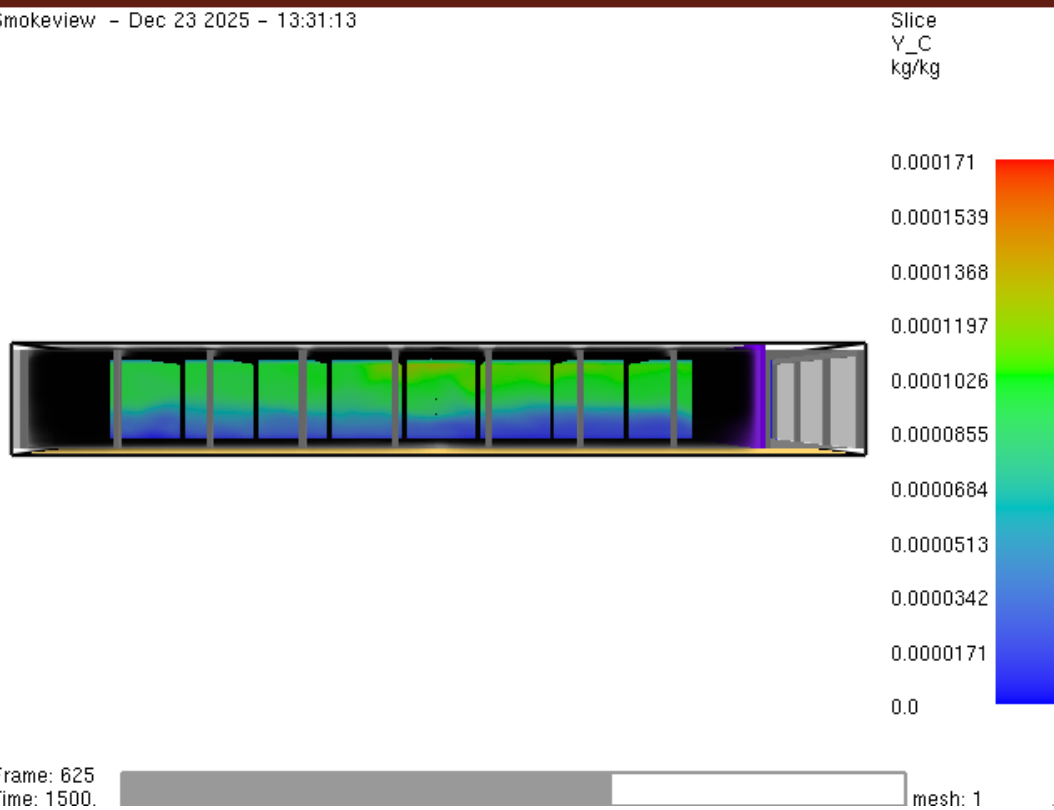
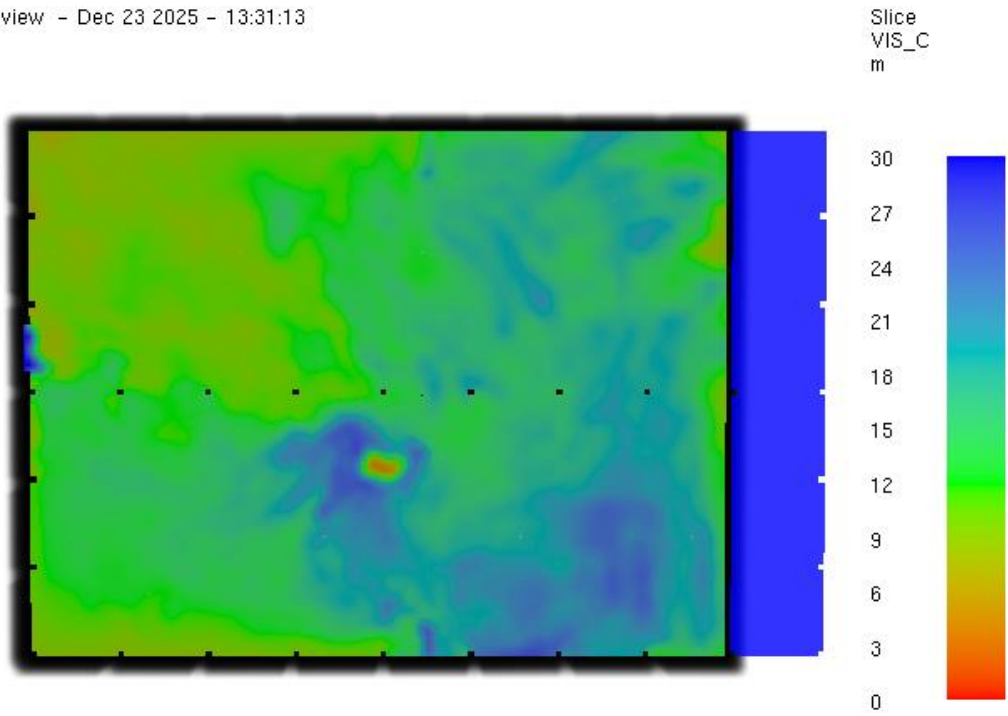


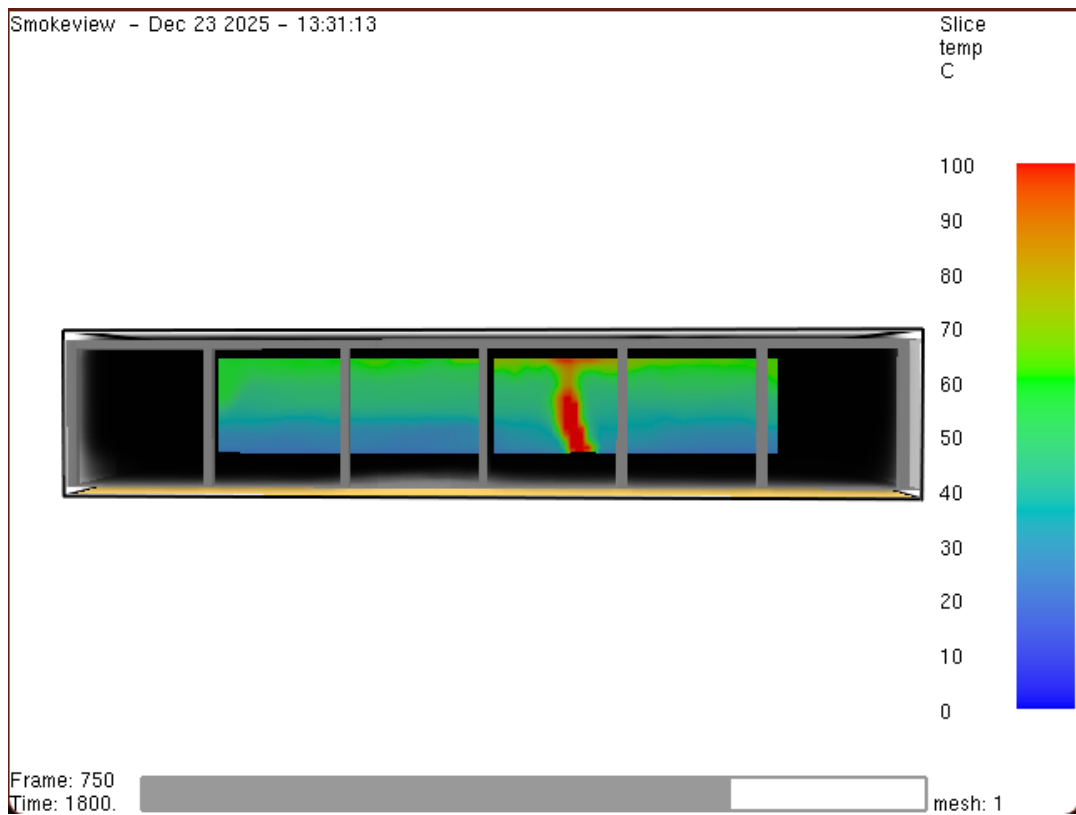
Bild A2.20: Rußausbeute nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 750
Time: 1800. mesh: 1

Bild A2.21: Sichtweite nach t=1800 s



Frame: 750
Time: 1800. mesh: 1

Bild A2.22: Temperatur nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

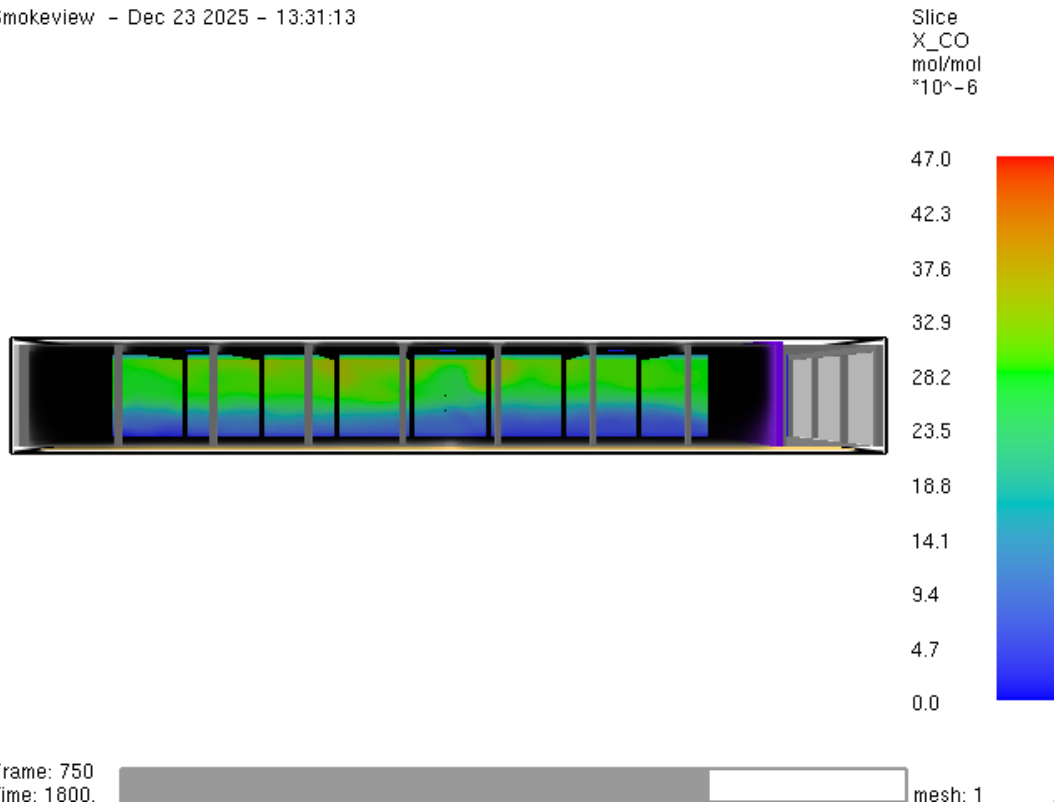


Bild A2.23: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

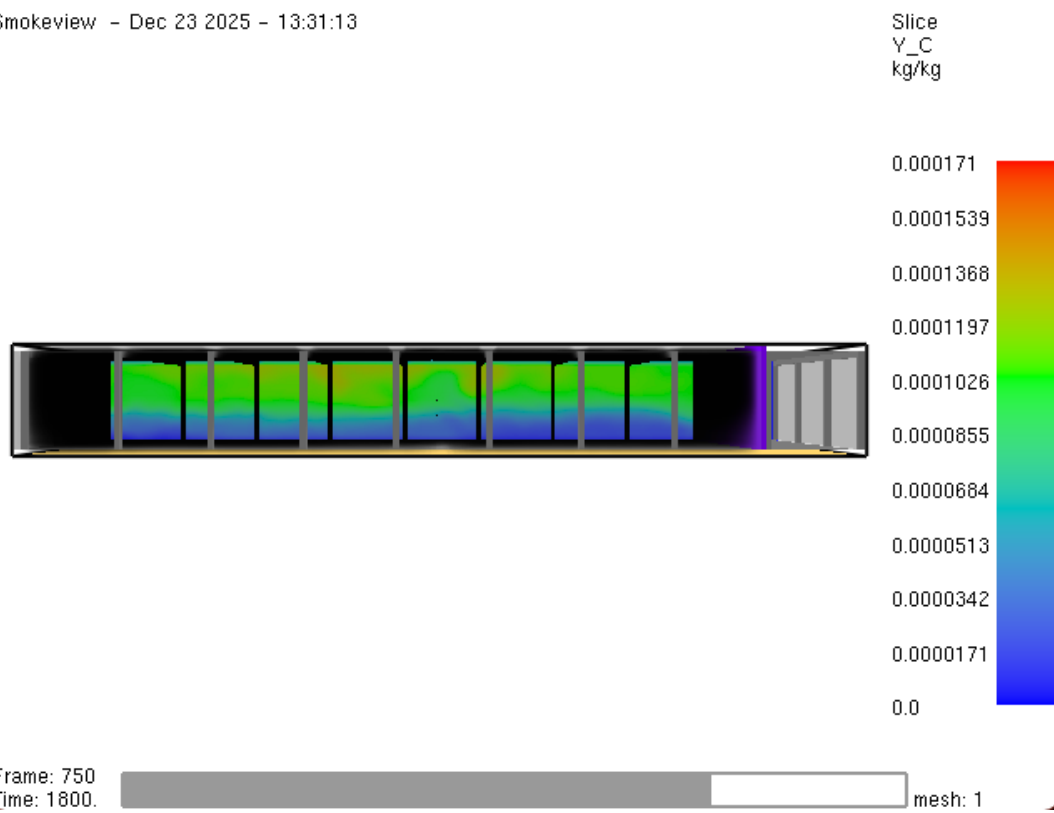


Bild A2.24: Rußausbeute nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

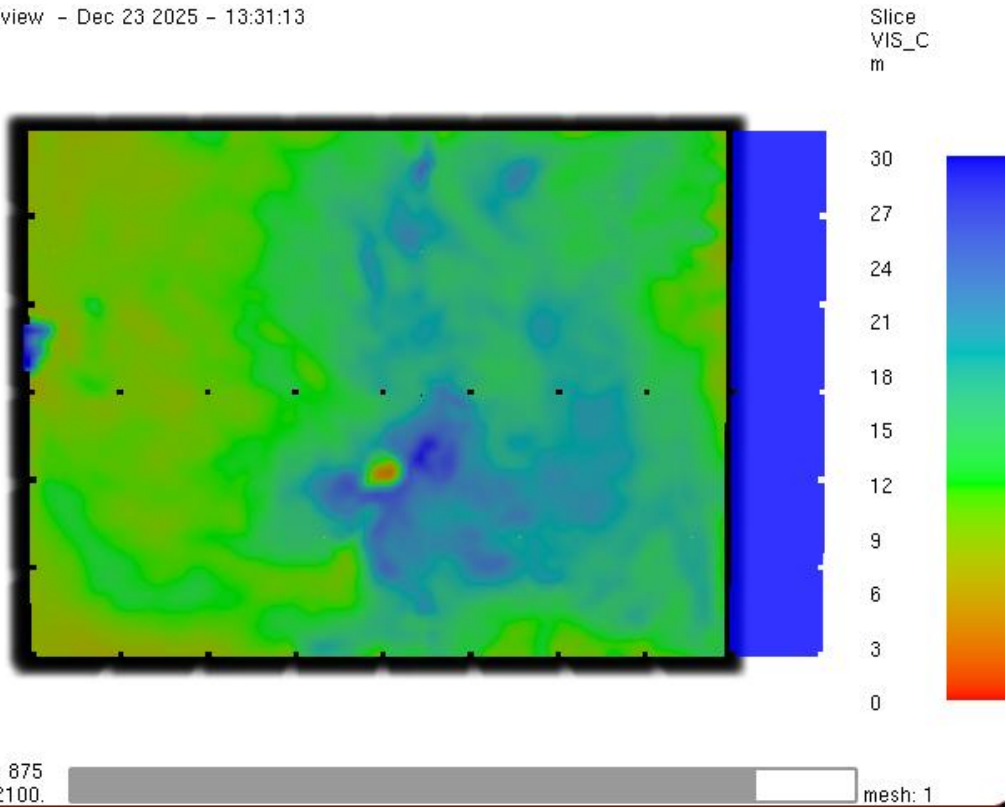


Bild A2.25: Sichtweite nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

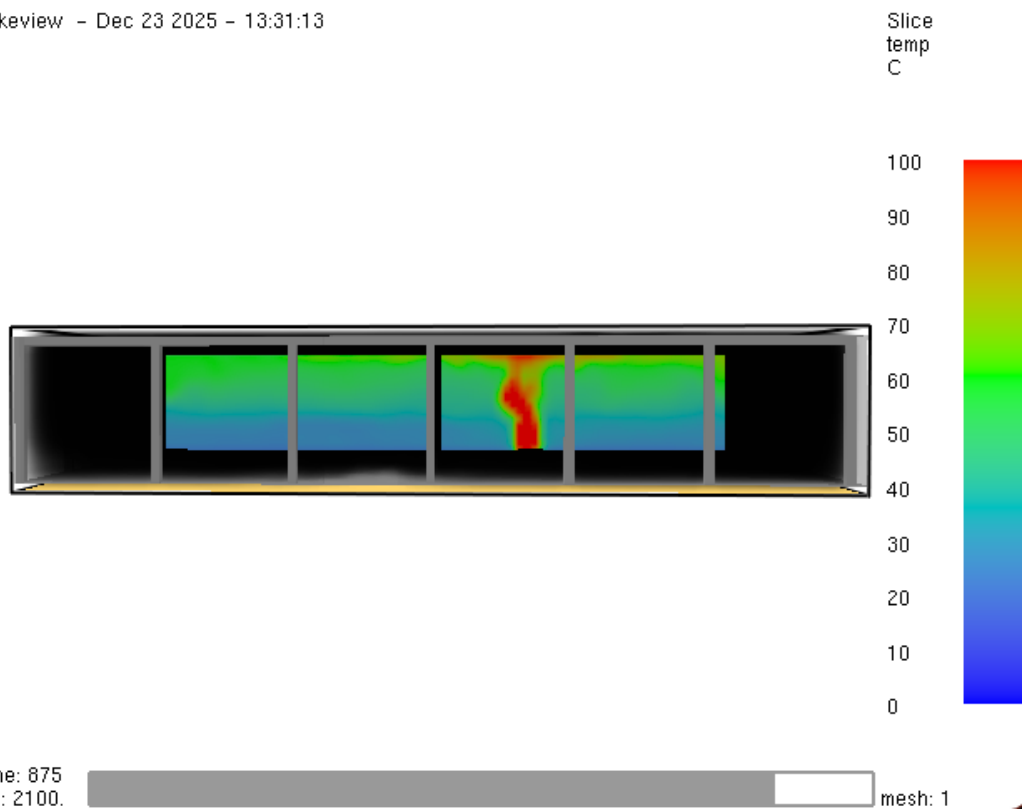


Bild A2.26: Temperatur nach t=2100 s

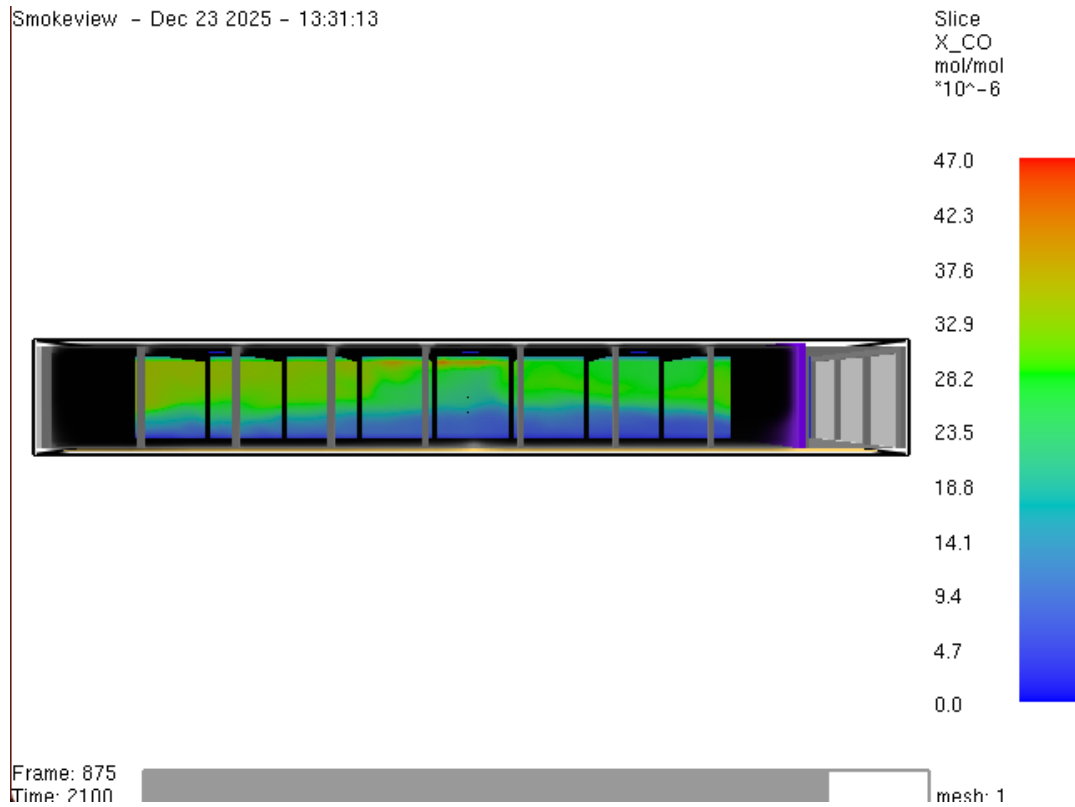


Bild A2.27: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2100 s

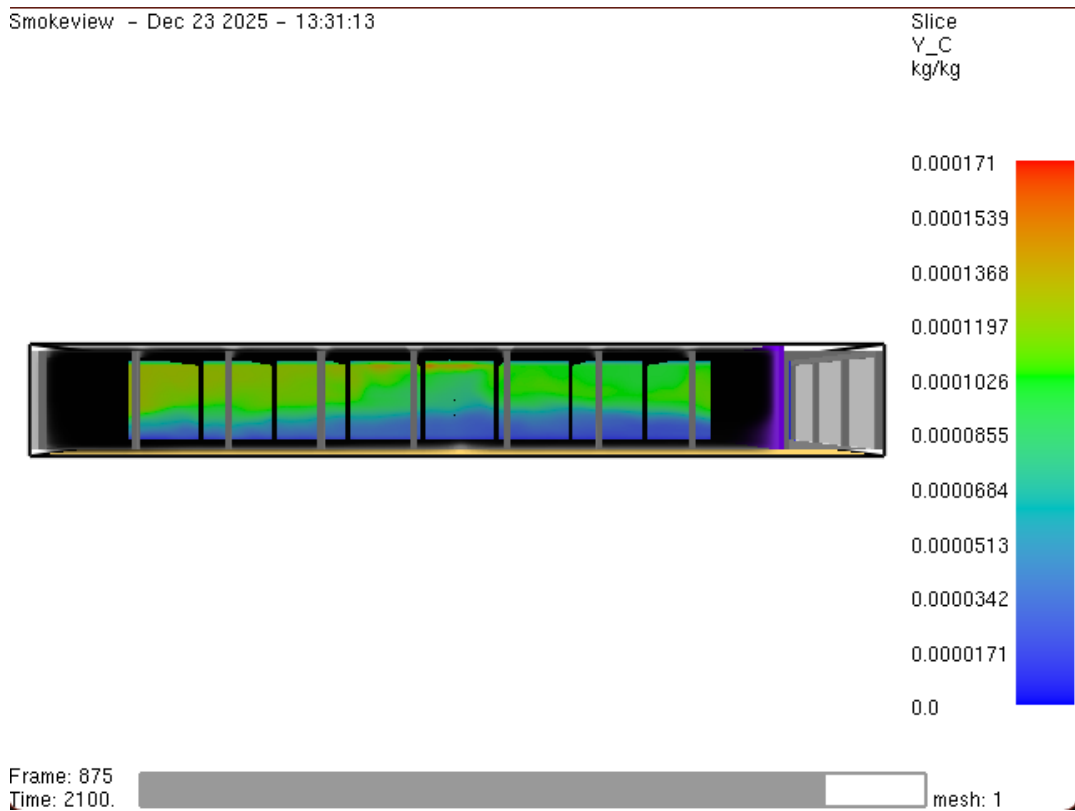
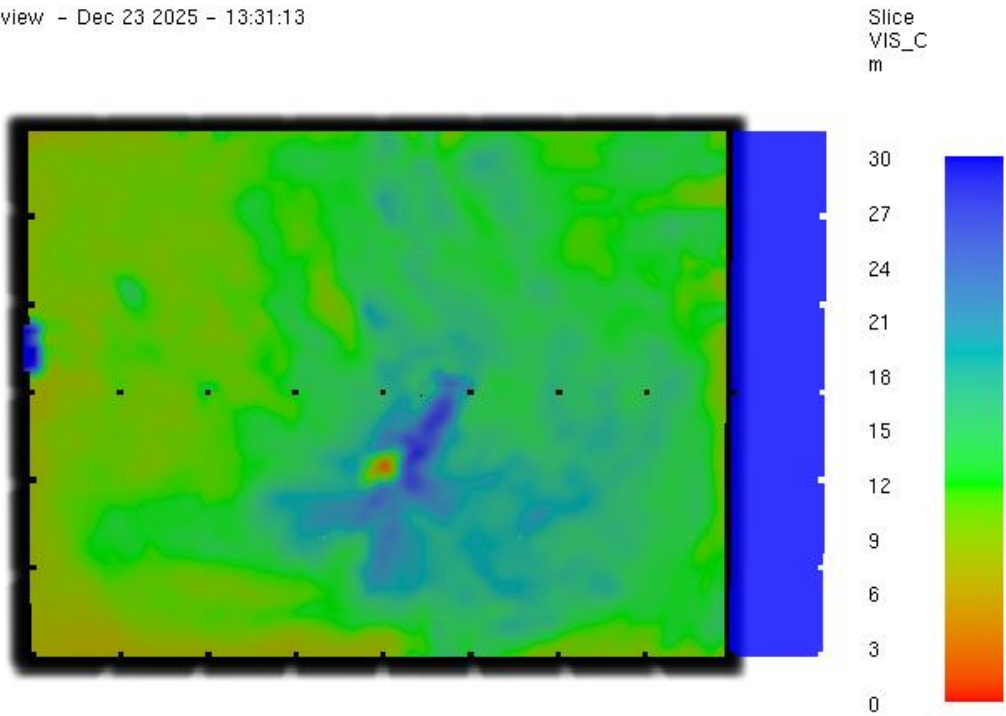


Bild A2.28: Rußausbeute nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 1000
Time: 2400

mesh: 1

Bild A2.29: Sichtweite nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 1000
Time: 2400

mesh: 1

Bild A2.30: Temperatur nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

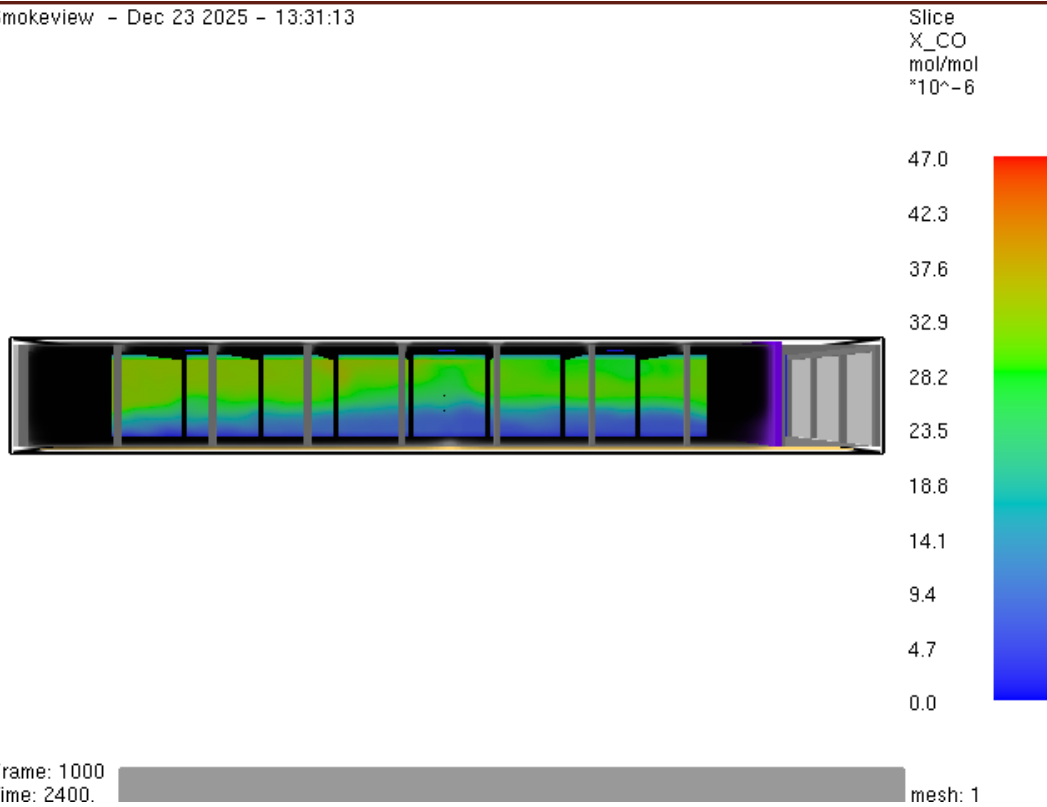


Bild A2.31: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

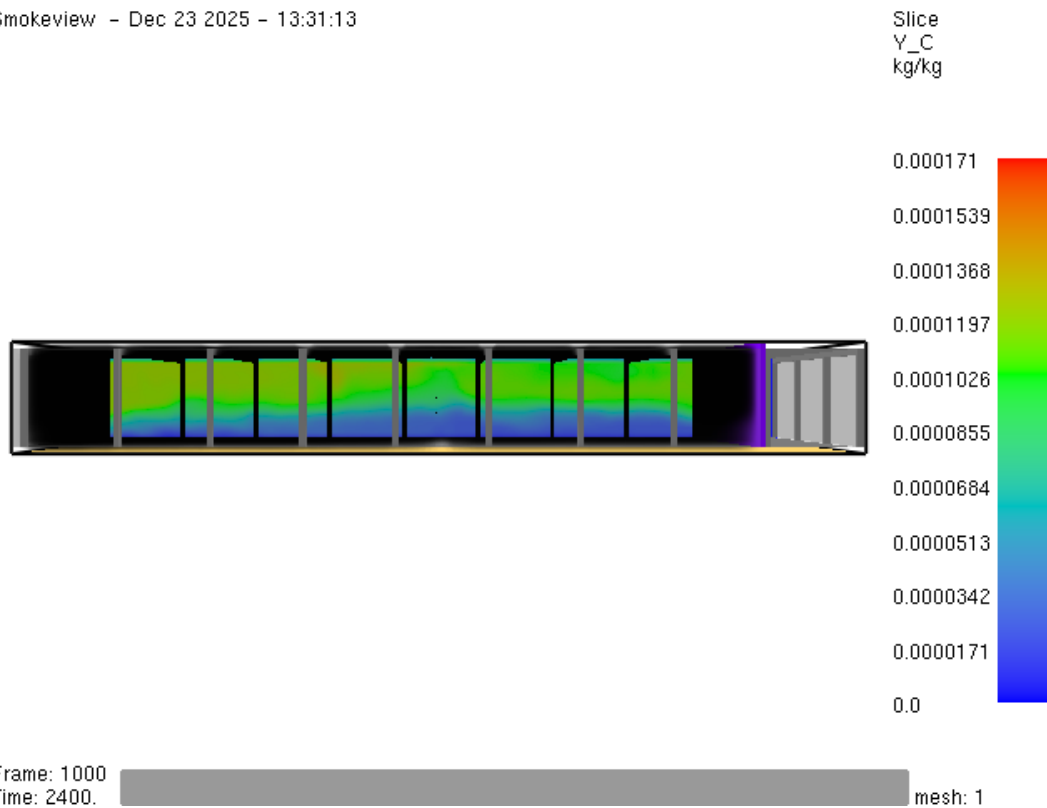


Bild A2.32: Rußausbeute nach t=2400 s

A3. Anhang zum FDS Beispiel Industriebau mit Sprinkleranlage

Quelltext FDS:

```

---FDS-Eingaben Realbrandversuch für Industriebau mit Sprinkleranlage---
---Definition der Grundeinstellungen (Simulationsprofil)---
&HEAD CHID='IndBau3', TITLE='Simulation Industriebau mit Sprinkler'
&TIME T_END= 2400. /
&MESH IJK= 137, 92, 18, XB=0.0, 68.5, 0.0, 46.0, -0.5, 8.50 /
&MISC OVERWRITE = .FALSE. ,VISIBILITY_FACTOR = 8 / RESTART = .TRUE./
&DUMP NFRAMES = 1000, DT_RESTART = 100.0, MASS_FILE = .TRUE.,
DT_PL3D=30., PLOT3D_QUANTITY(1)= 'carbon monoxide', PLOT3D_QUANTITY(5)=
'TEMPERATURE' /

---Brand-Definition (REACTION)---
&REAC ID          = 'LAGERGUT_Reaktion'
    SOOT_YIELD    = 0.015
    CO_YIELD      = 0.004
    HEAT_OF_COMBUSTION = 12000
    N              = 0.0
    C              = 6
    H              = 10
    O              = 5
    RADIATIVE_FRACTION = 0.35/

---Definition der Materialien und Oberflächen---
---Materialien---
&MATL ID          = 'BETON'
    CONDUCTIVITY   = 1.4
    SPECIFIC_HEAT  = 1.0
    DENSITY        = 2000. /
&MATL ID          = 'MAUERSTEIN'
    CONDUCTIVITY   = 0.69
    SPECIFIC_HEAT  = 0.84
    DENSITY        = 1600. /
&MATL ID          = 'GIPSKARTON'
    CONDUCTIVITY   = 0.48
    SPECIFIC_HEAT  = 0.84

```

ANHANG

```
DENSITY = 1440. /

---Oberflächen---

&SURF ID = 'STUETZE'
  RGB = 128,128,128
  MATL_ID = 'BETON'
  THICKNESS = 0.40 /
&SURF ID = 'TRAEGER'
  RGB = 128,128,128
  MATL_ID = 'BETON'
  THICKNESS = 0.40 /
&SURF ID = 'BRANDWAND'
  RGB = 127,0,255
  MATL_ID = 'BETON'
  THICKNESS = 0.25 /
&SURF ID = 'AUSSENWAND'
  RGB = 128,128,128
  MATL_ID = 'MAUERSTEIN'
  THICKNESS = 0.50
  TRANSPARENCY = 0.30 /
&SURF ID = 'DACH'
  RGB = 128,128,128
  MATL_ID = 'GIPSKARTON',
  THICKNESS = 0.10 /
&SURF ID = 'BODENPLATTE'
  RGB = 128,128,128
  MATL_ID = 'BETON'
  THICKNESS = 0.25 /

&SURF ID='FEUER', RGB=255,0,0, HRRPUA=400, RAMP_Q = 'brand_kurve' /

---Festlegen der Zeitlichen Brandentwicklung (RAMP-FUNKTION)---
&RAMP ID='brand_kurve', T=0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='brand_kurve', T=600.0, F=1.0 /

---Einfügen des Gebäudemodells--
&OBST XB=0.00,68.00,0.00,46.00,-0.25,0.00,SURF_ID='BODENPLATTE' /
```

&OBST XB=60.00,60.25,0.00,46.00,0.00,8.50, SURF_ID='BRANDWAND' /

&OBST XB=0.40,0.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=7.90,8.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=15.40,15.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=22.90,23.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=30.40,30.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=37.90,38.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=45.40,45.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=52.90,53.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=60.40,60.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,15.40,15.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,15.40,15.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=7.90,8.30,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=15.40,15.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=22.90,23.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=30.40,30.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=37.90,38.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=45.40,45.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=52.90,53.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=60.40,60.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,22.90,23.30,0.00, 8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,30.40,30.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,30.40,30.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,37.90,38.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,37.90,38.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=7.90,8.30,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=15.40,15.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=22.90,23.30,45.40,45.80,0.00, 8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=30.40,30.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=37.90,38.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=45.40,45.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

```

&OBST XB=52.90,53.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=60.40,60.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=7.90,8.30,0.40,45.80,7.40,8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=15.40,15.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=22.90,23.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=30.40,30.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=37.90,38.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=45.40,45.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=52.90,53.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=67.90,68.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /

&OBST XB= 0.00,68.70, 0.00,0.50, 0.00,8.00,SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 0.00, 0.50, 0.00,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 0.00, 68.70, 45.70,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 68.30,68.70, 0.00,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /

&OBST XB= 0.00, 68.70, 0.00, 46.20, 8.00, 8.10, SURF_ID='DACH' /

---Implementierung der Sprinkleranlage---
&SPEC ID='WATER VAPOR' /
&PART ID='Wassertropfen', SPEC_ID='WATER VAPOR', DIAMETER=500. /

&PROP ID='Sprinkler', ! Bezeichnung
QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE', ! Anweisung:
Temperatur am Schmelzlot soll gemessen werden
RTI= 50., ! Response Time
Index (50 für schnelle Auslösung)
ACTIVATION_TEMPERATURE = 68., ! Glasflaschen
platzen bei 68 Grad Celcius
PART_ID='Wassertropfen' ! Verweis auf oben definierte
Wassertropfen-Eigenschaft
FLOW_RATE=80 ! Wassermenge in l/min
PARTICLE_VELOCITY=5., ! Geschwindigkeit mit der
Wasser aus Düse schießt
SPRAY_ANGLE=30.,80. / ! Sprühkegel: Wasser wird
zwischen 30° und 80° vertikal verteilt

```

&DEVC ID='Spr_1' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 4.35, 34.65, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 1

&DEVC ID='Spr_2' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 11.90, 7.00, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 2

&DEVC ID='Spr_3' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 19.35, 34.65, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 3

&DEVC ID='Spr_4' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 26.10, 11.55, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 4

&DEVC ID='Spr_5' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 33.85, 34.65, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 5

&DEVC ID='Spr_6' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 41.85, 11.55, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 6

&DEVC ID='Spr_7' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 49.35, 38.90, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 7

&DEVC ID='Spr_8' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 55.75, 11.55, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 / Platzierung Sprinklerkopf 8

---Zu- und Abluftflächen (Öffnungen)---

Auslösung durch Sprinkleranlage:

&CTRL ID= 'Sprinkler_Aktiv',
FUNCTION_TYPE='ANY' INPUT_ID='Spr_1','Spr_2','Spr_3','Spr_4','Spr_5','Spr_6',
'Spr_7','Spr_8' /

&CTRL ID= 'RWA_TIMER', FUNCTION_TYPE='TIME_DELAY',
INPUT_ID='Sprinkler_Aktiv', DELAY= 30.0 /

&CTRL ID= 'RWA_Start', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='RWA_TIMER' /

Abluft: 6x RWA im Dach a 1,50 x 1,50 m

&HOLE XB= 11.10, 12.60, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10,
CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 11.10, 12.60,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 26.10, 27.60,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 33.60, 35.10,10.80, 12.30,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 48.60, 50.10,10.80, 12.30,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 48.60, 50.10,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

Zuluft: Ein Tor in Fassade a 4,00 x 4,00 m, 2 x Tür in Fassade 1,00 m x
2,00 m

&HOLE XB= -0.10, 0.50, 24.80, 28.80, 0.00, 4.00 /

&HOLE XB= 33.85, 34.85, -0.10, 0.50, 0.00, 2.00 /

ANHANG

&HOLE XB= 33.85, 34.85, 45.70, 46.30, 0.00, 2.00 /

Das Feuer

&VENT XB= 29.0,32.0, 15.0, 17.0, 0.01,0.01, SURF_ID='FEUER',
IOR=3 /

---Messgeräte (DEVC)---

Messpunkt 1: Nah am Brandherd

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT',
ID='BRAND_LH' /

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER
TEMPERATURE', ID='BRAND_UT' /

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 6.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LOWER
TEMPERATURE', ID='BRAND_LT' /

Messpunkt 2: Hallenmitte

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT',
ID='MITTE_LH' /

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER
TEMPERATURE', ID='MITTE_UT' /

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LOWER
TEMPERATURE', ID='MITTE_LT' /

Personenschutzwerte auf 2,50 m Höhe:

&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5,QUANTITY='TEMPERATURE', ID='MITTE_TEMP_2M' /

&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION',SPEC_ID='CARBON
MONOXIDE', ID='MITTE_CO_2M' /

---Visualisierung (SLCF)---

Temperaturen(Hitzeausbreitung):

&SLCF PBX= 23.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /

HRRPUV:

&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='HRRPUV' /

Sichtweite und Gase:

&SLCF PBZ= 2.5, QUANTITY='VISIBILITY' /

&SLCF PBZ= 5.0, QUANTITY='VISIBILITY' /

ANHANG

&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' /

Ruß-Konzentration (Dichte des Rauches):

&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='SOOT' /

---Druckausgleich---

&VENT MB='XMIN',SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='XMAX',SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMIN',SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMAX',SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='ZMAX',SURF_ID='OPEN' /

&TAIL /

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

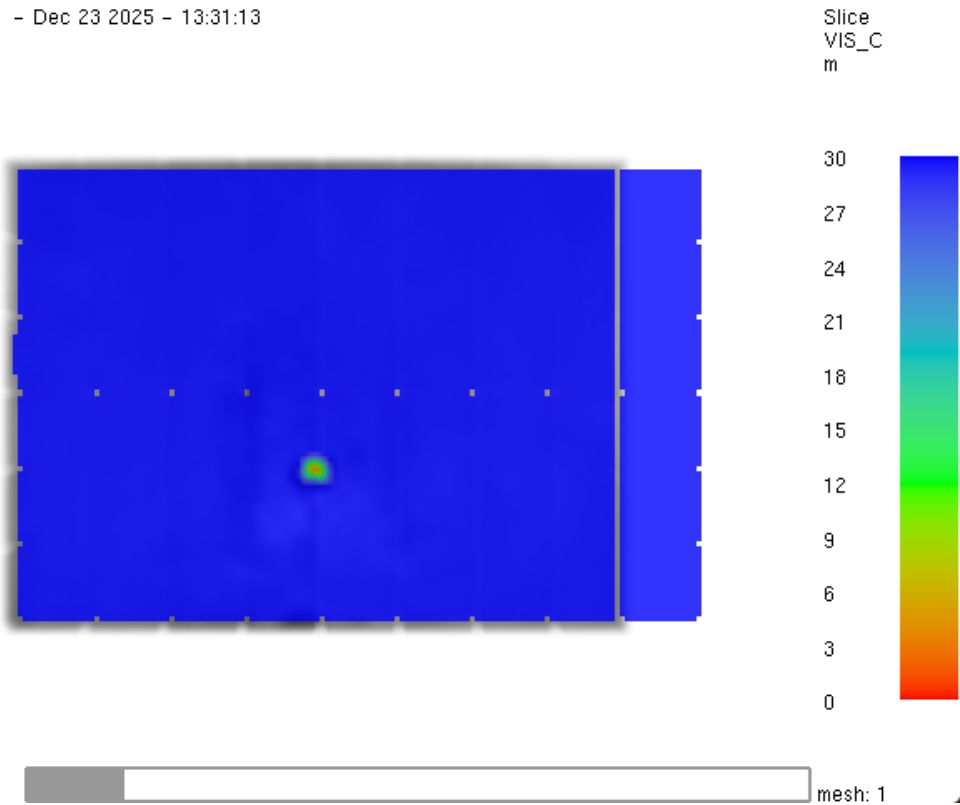


Bild A3.1: Sichtweite nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

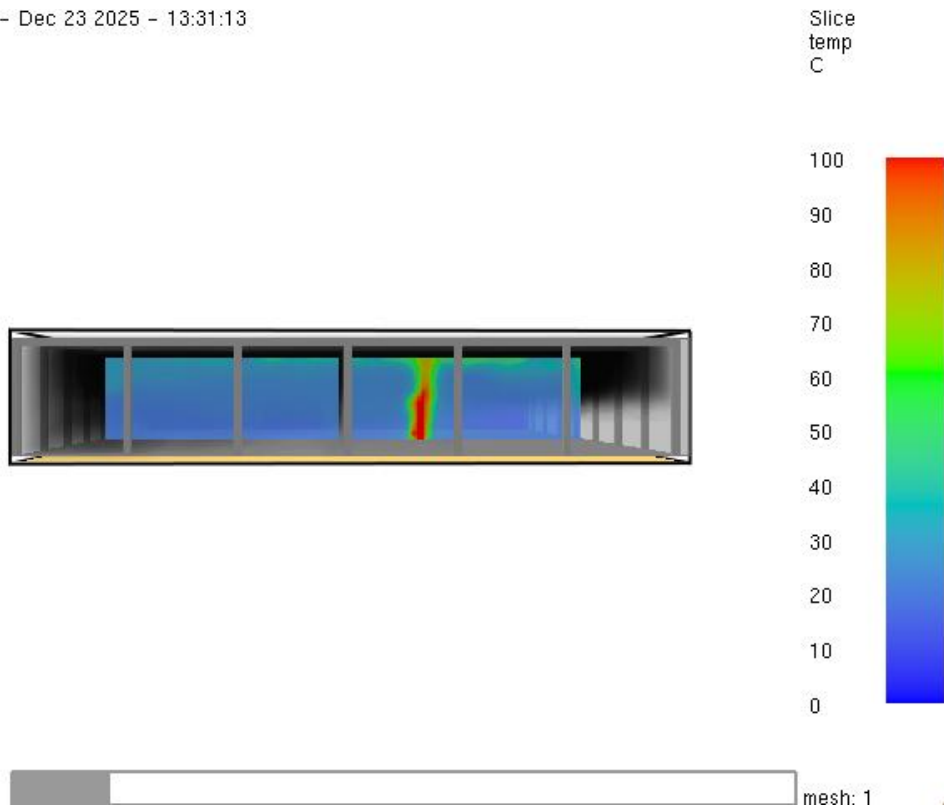


Bild A3.2: Temperatur nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

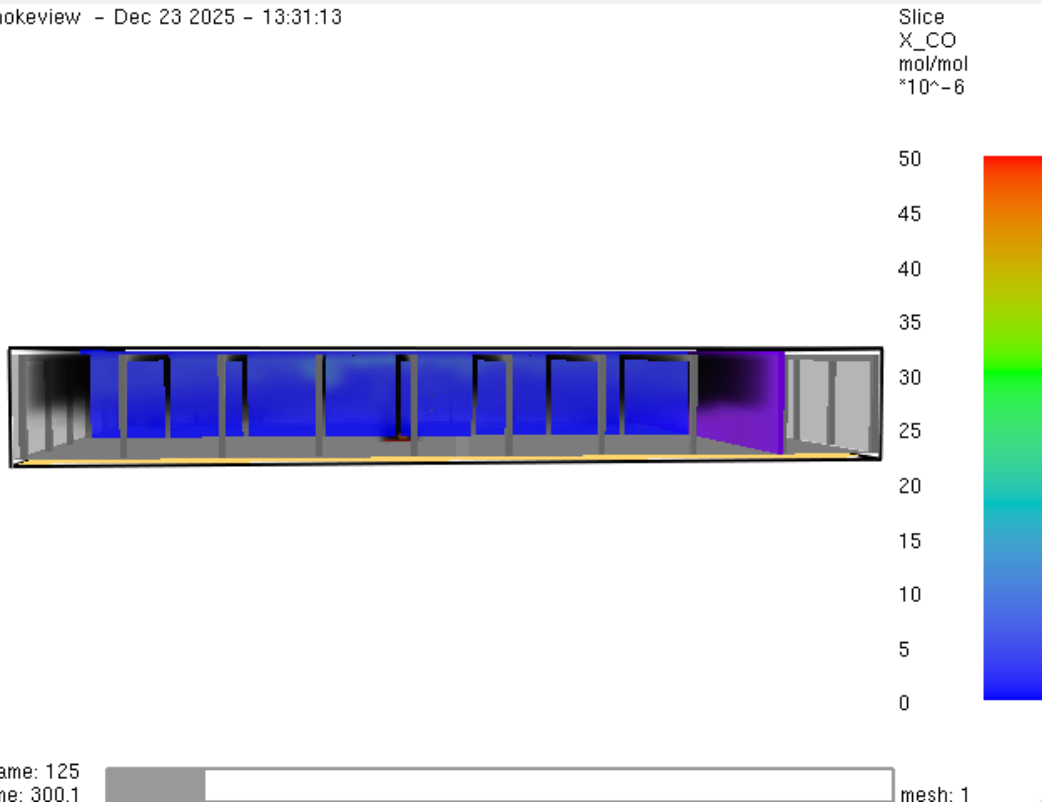


Bild A3.3: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

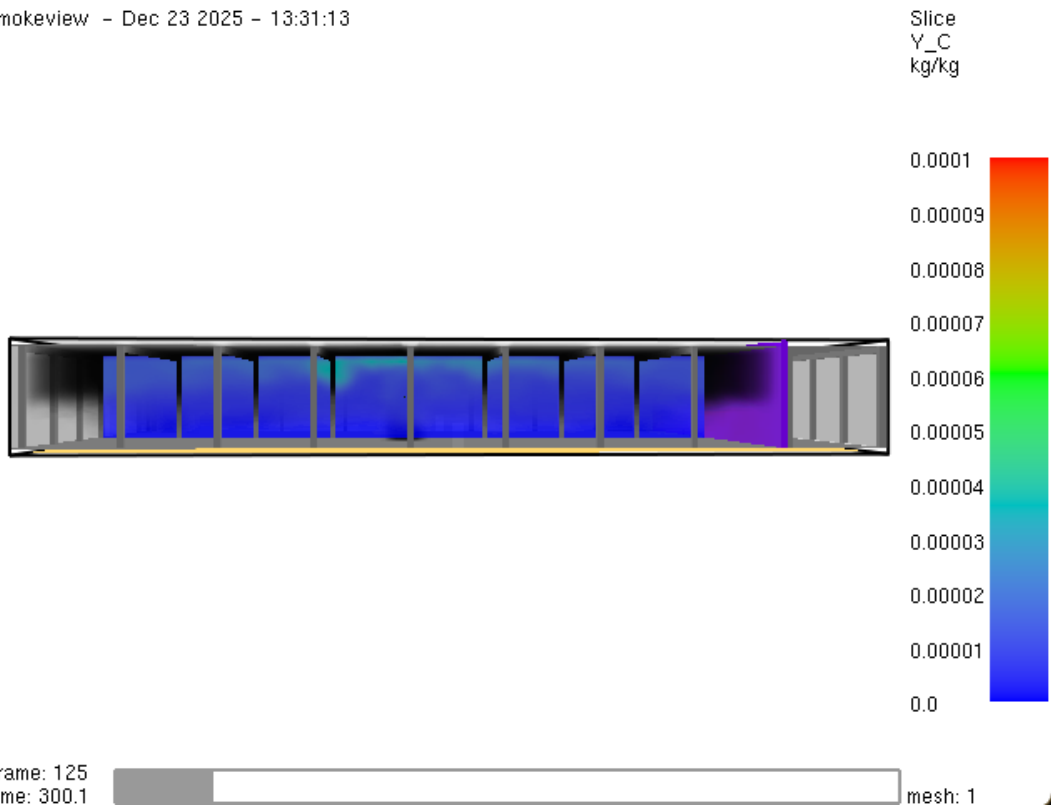


Bild A3.4: Rußausbeute nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

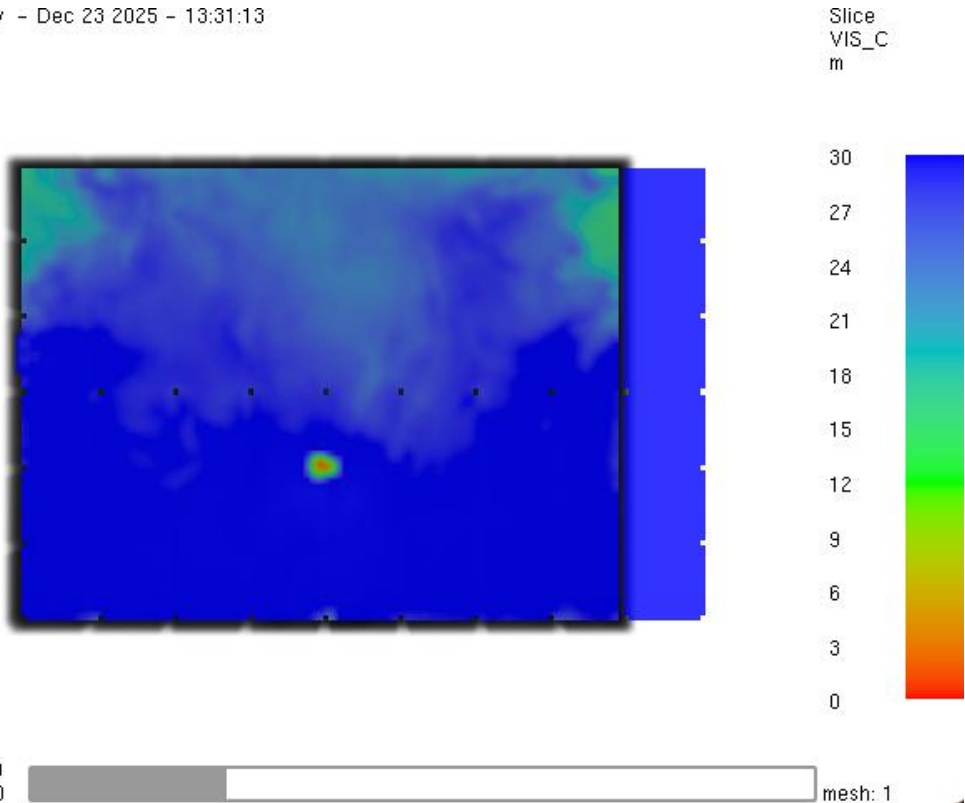


Bild A3.5: Sichtweite nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

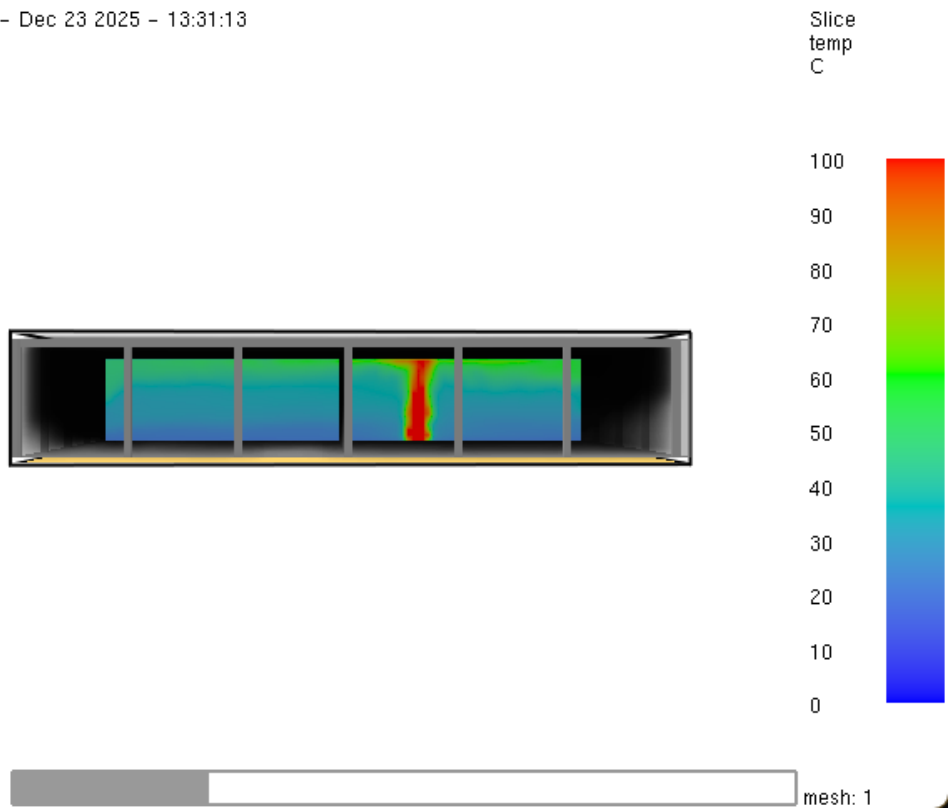


Bild A3.6: Temperatur nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

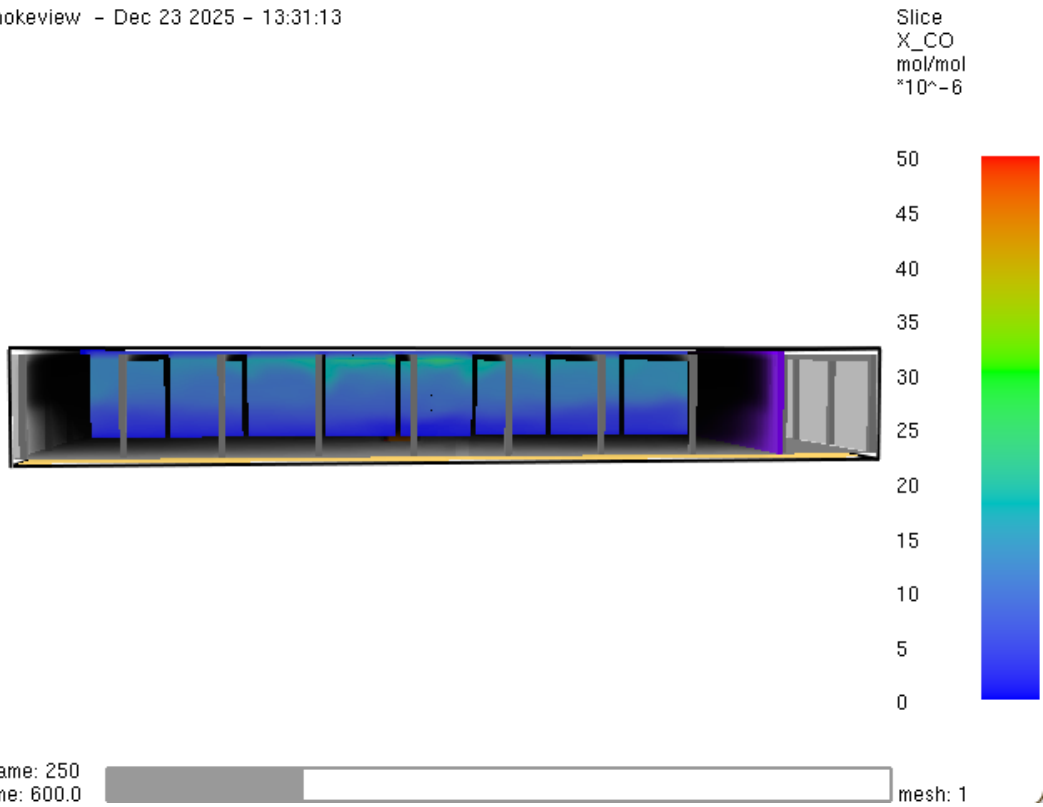


Bild A3.7: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

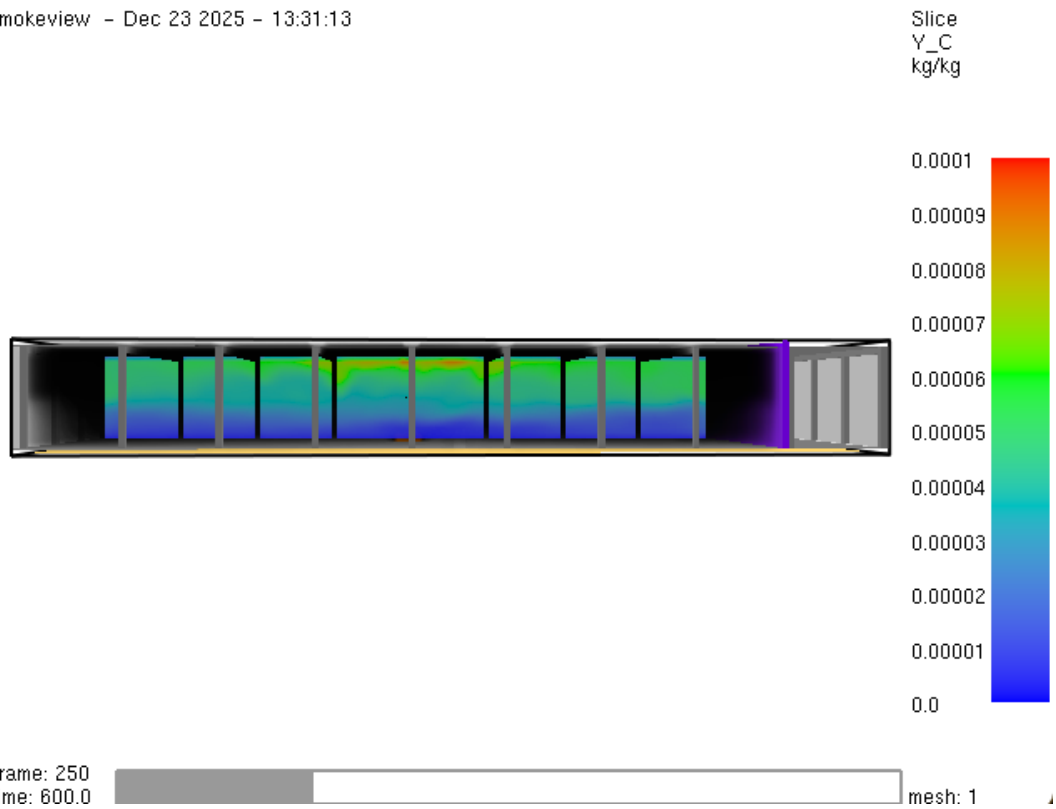
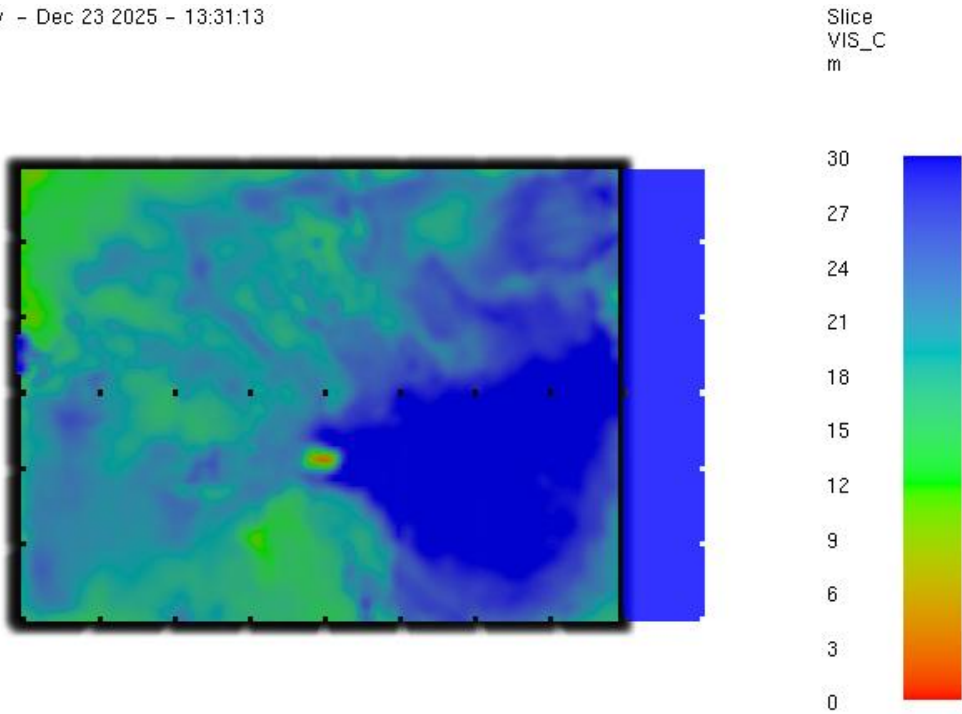


Bild A3.8: Rußausbeute nach t=600 s

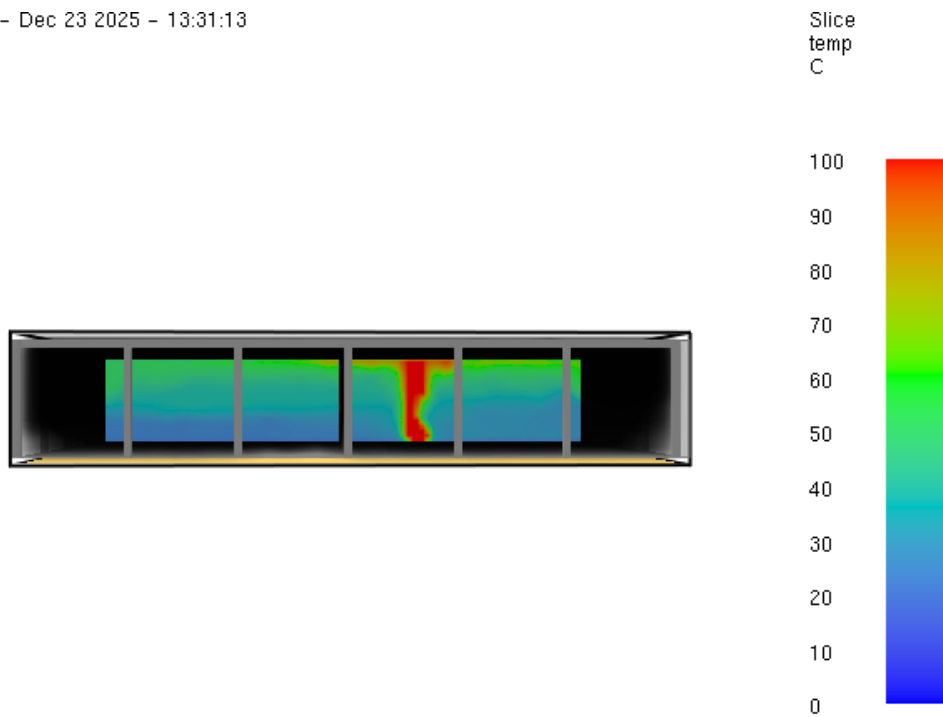
Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 375
Time: 900.1

Bild A3.9: Sichtweite nach t=900 s

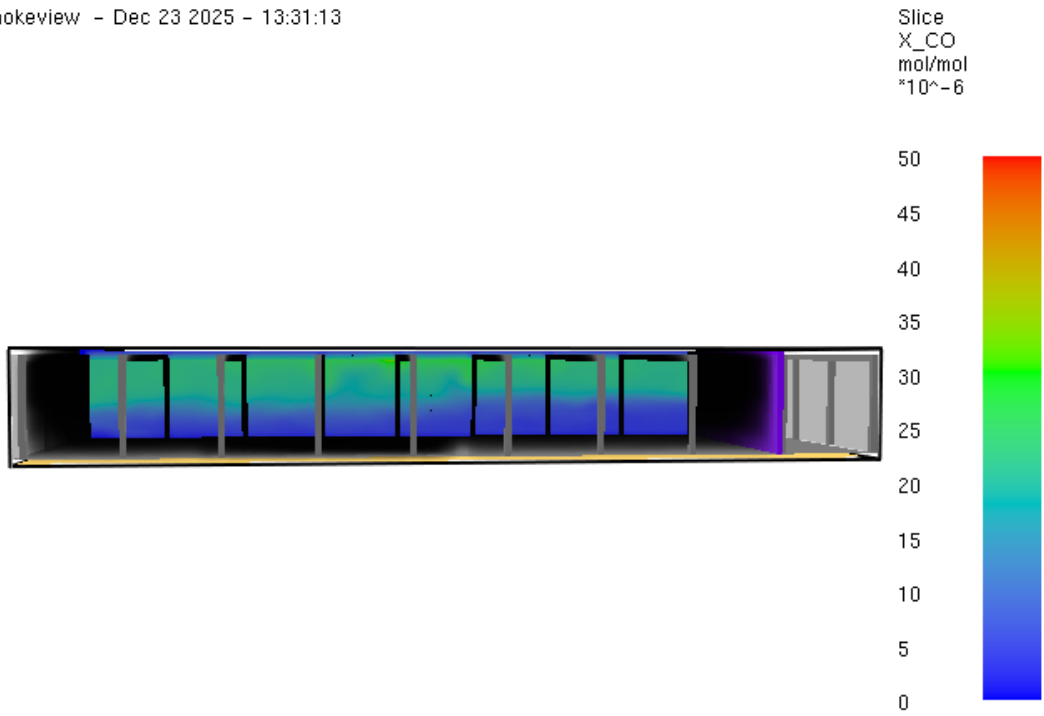
Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 375
Time: 900.1

Bild A3.10: Temperatur nach t=900 s

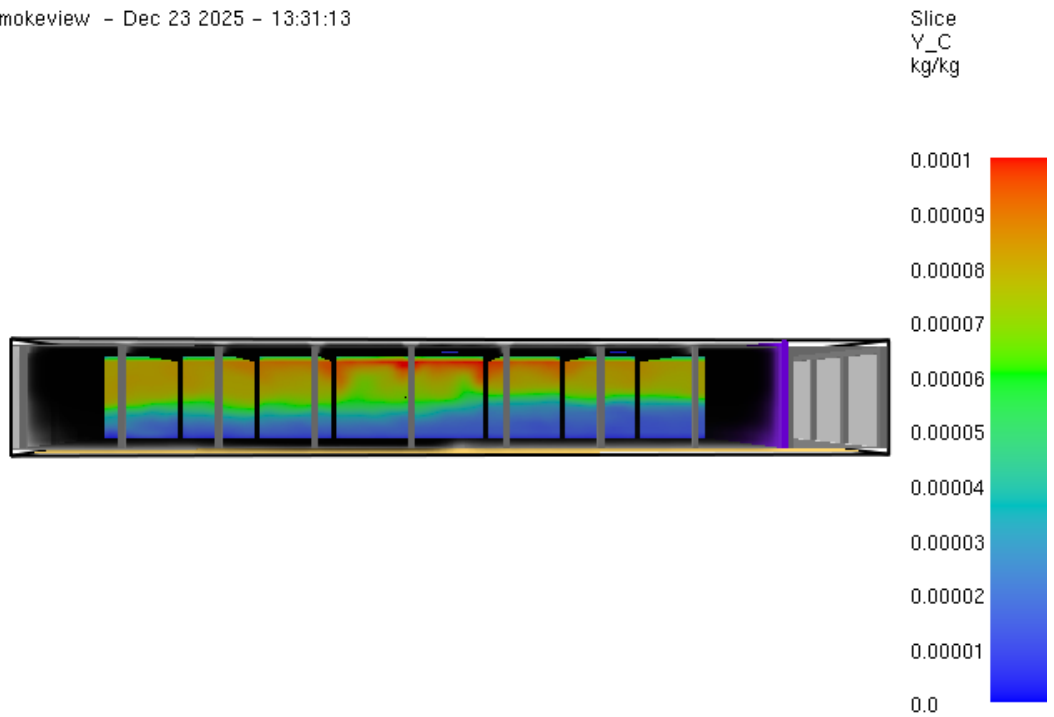
Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 375
Time: 900.1 mesh: 1

Bild A3.11: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 375
Time: 900.1 mesh: 1

Bild A3.12: Rußausbeute nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

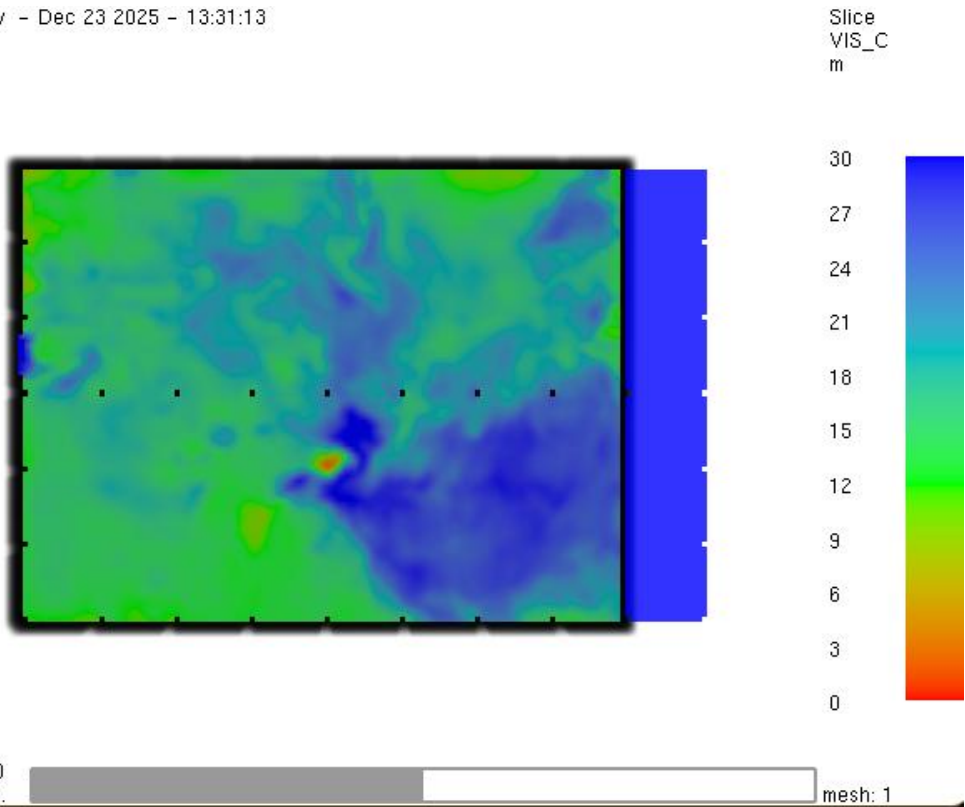


Bild A3.13: Sichtweite nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

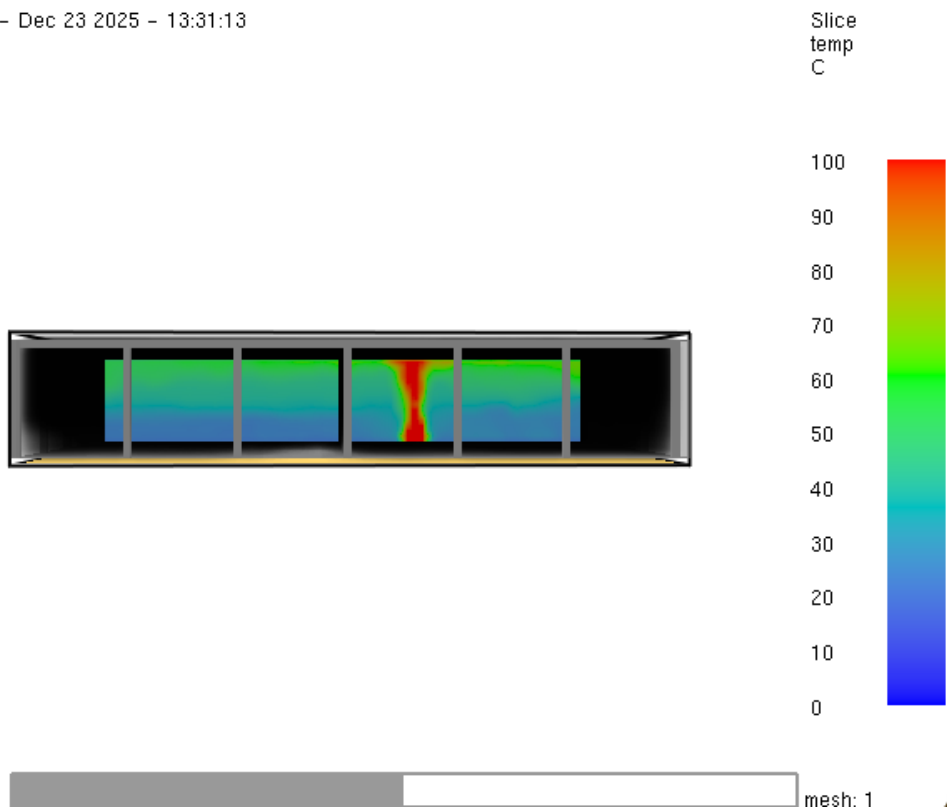


Bild A3.14: Temperatur nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

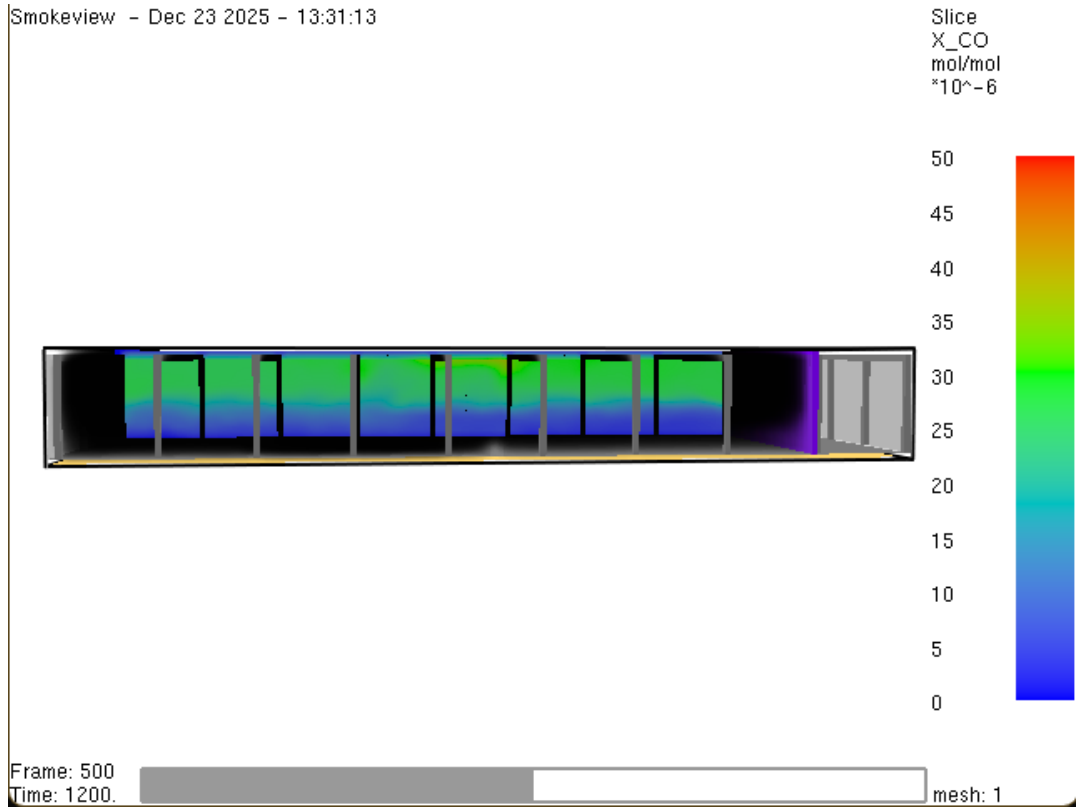


Bild A3.15: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

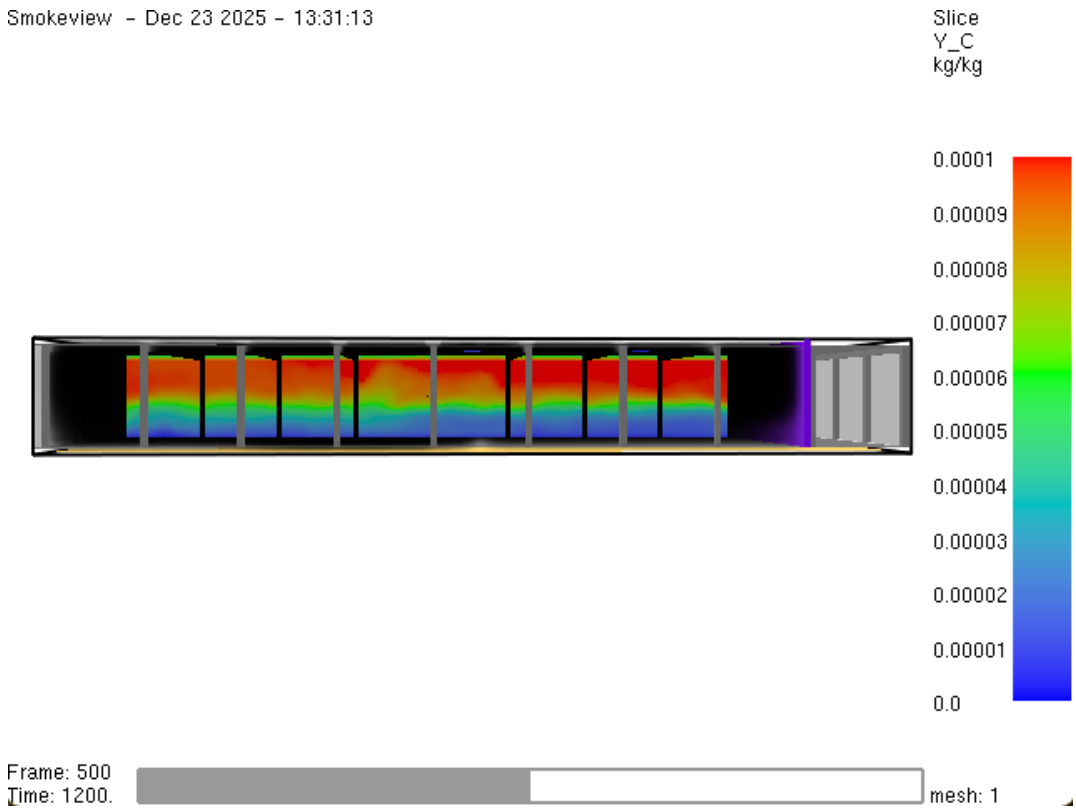


Bild A3.16: Rußausbeute nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

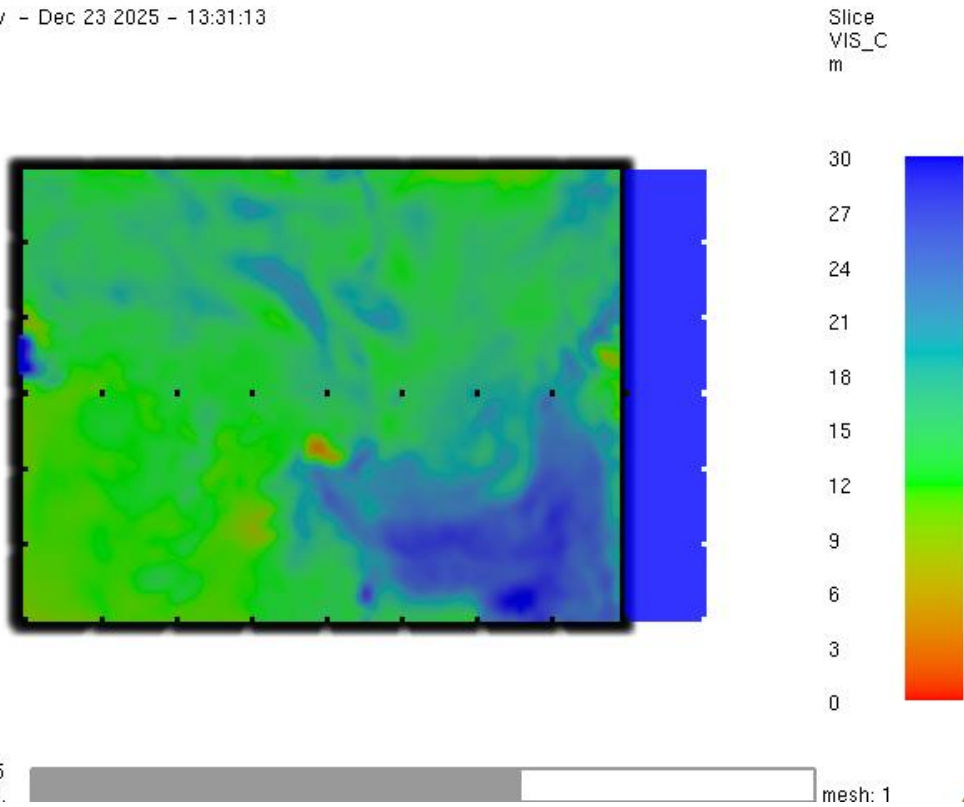


Bild A3.17: Sichtweite nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

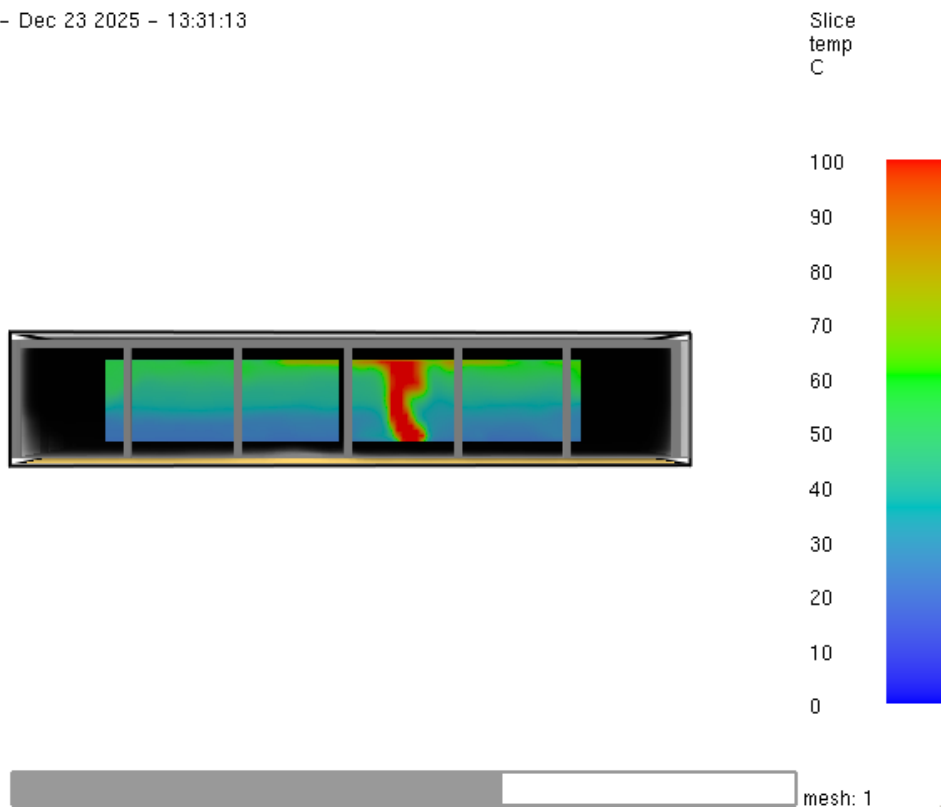


Bild A3.18: Temperatur nach t=1500 s

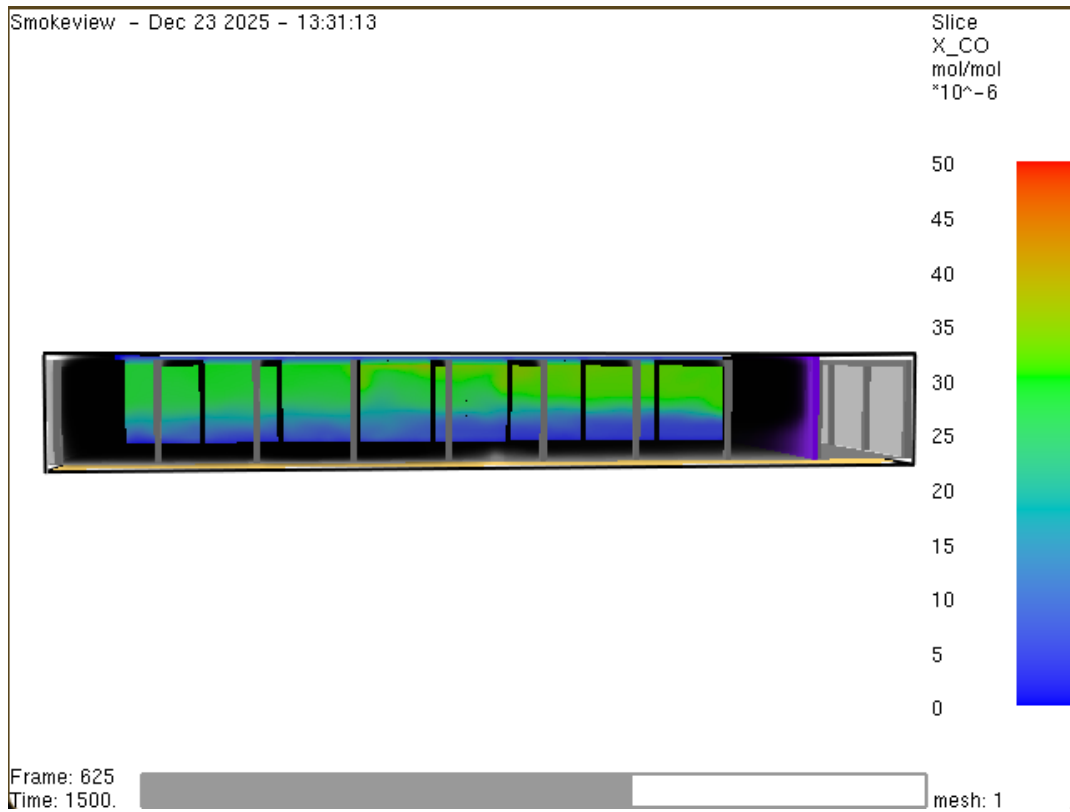


Bild A3.19: Kohlenmonoxid-Konzentration nach $t=1500$ s

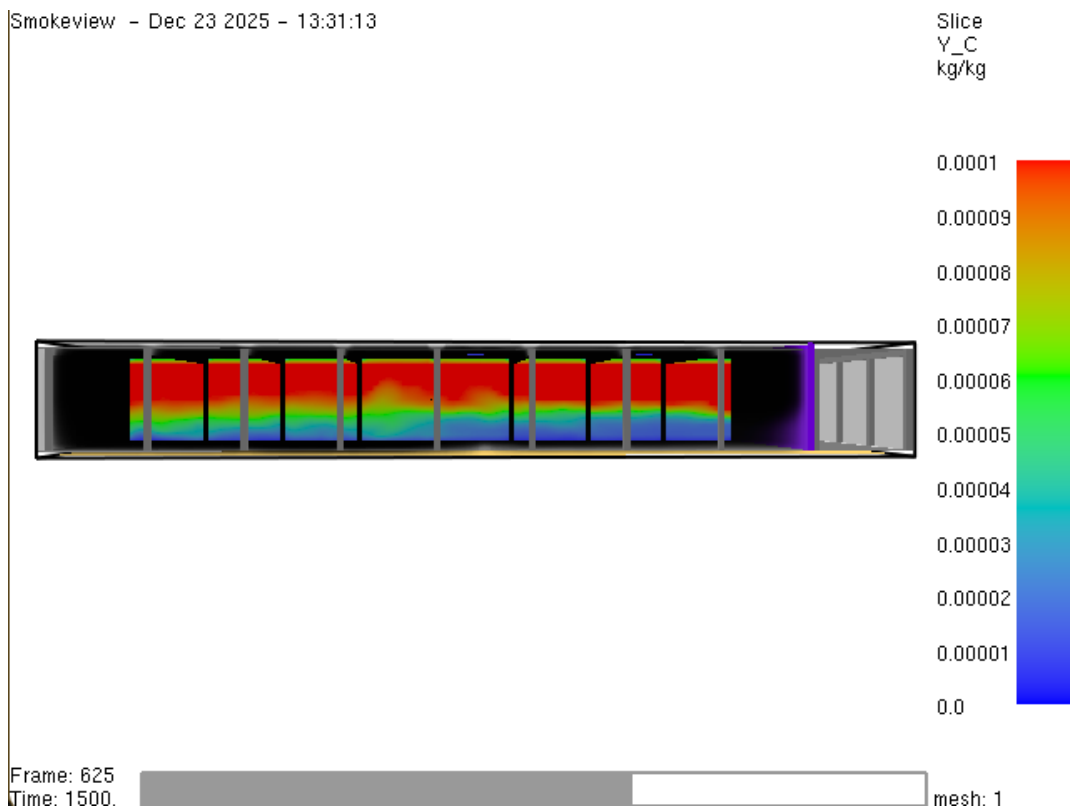
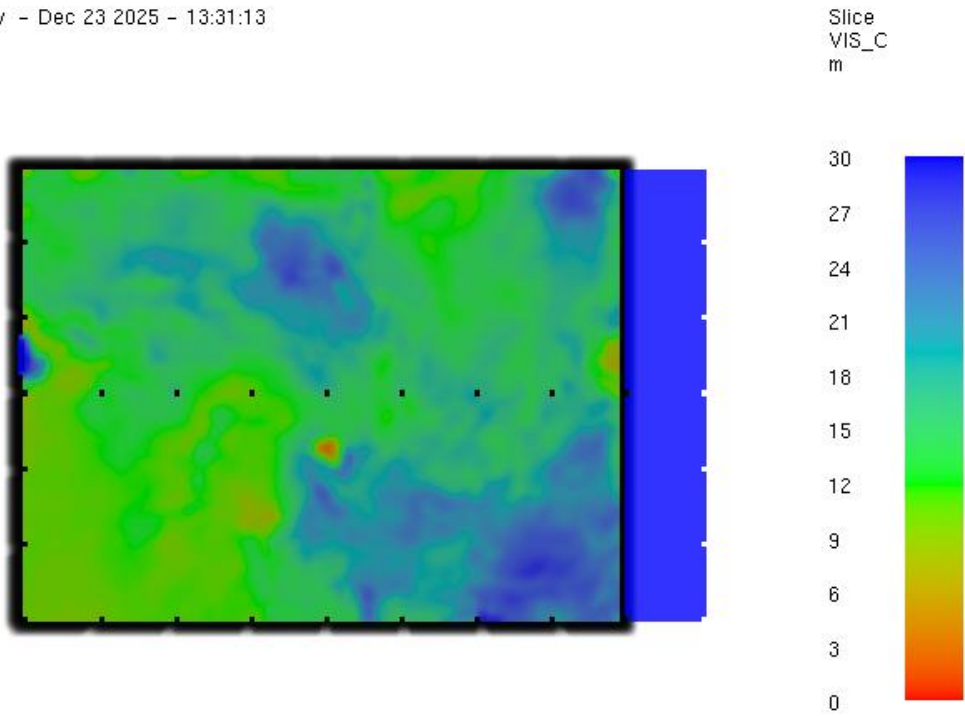


Bild A3.20: Rußausbeute nach $t=1500$ s

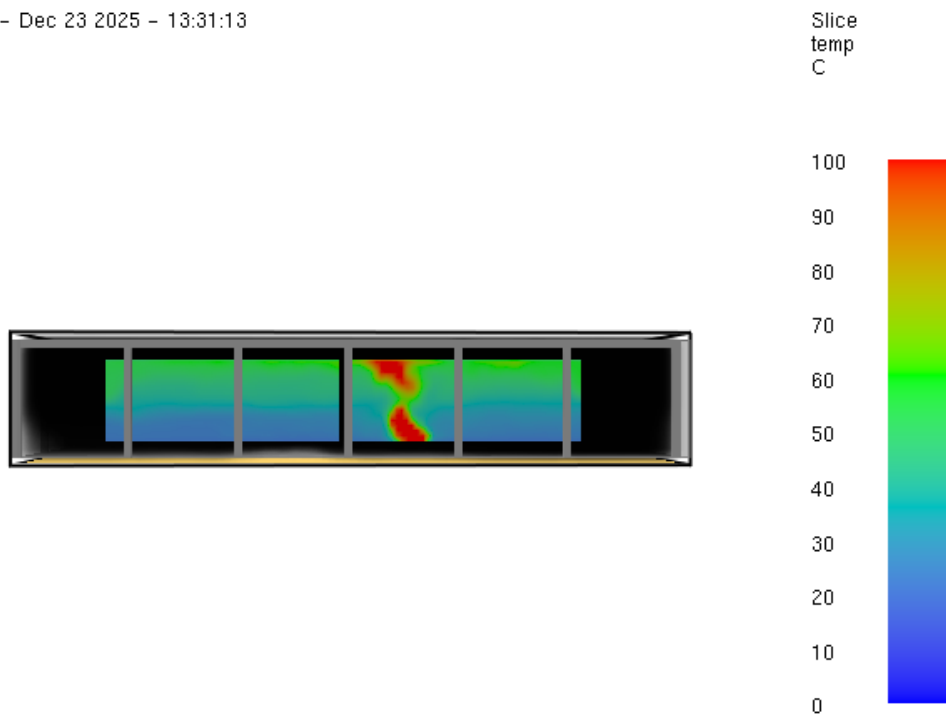
Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 750
Time: 1800. mesh: 1

Bild A3.21: Sichtweite nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 750
Time: 1800. mesh: 1

Bild A3.22: Temperatur nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

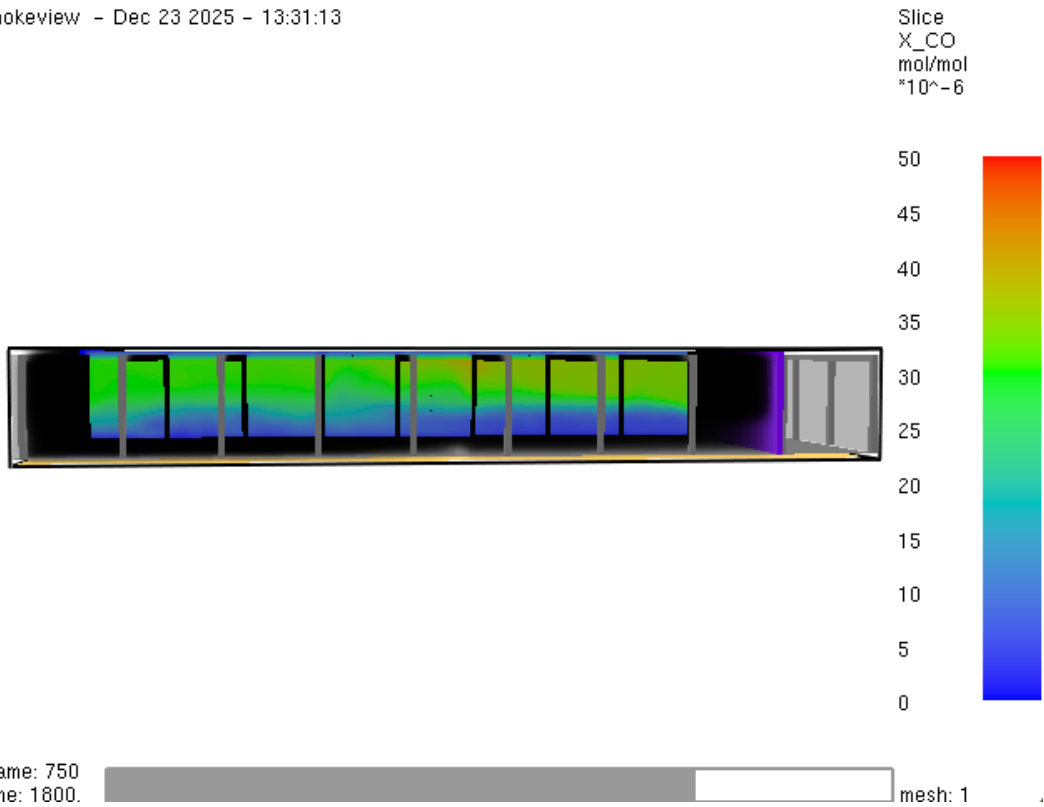


Bild A3.23: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

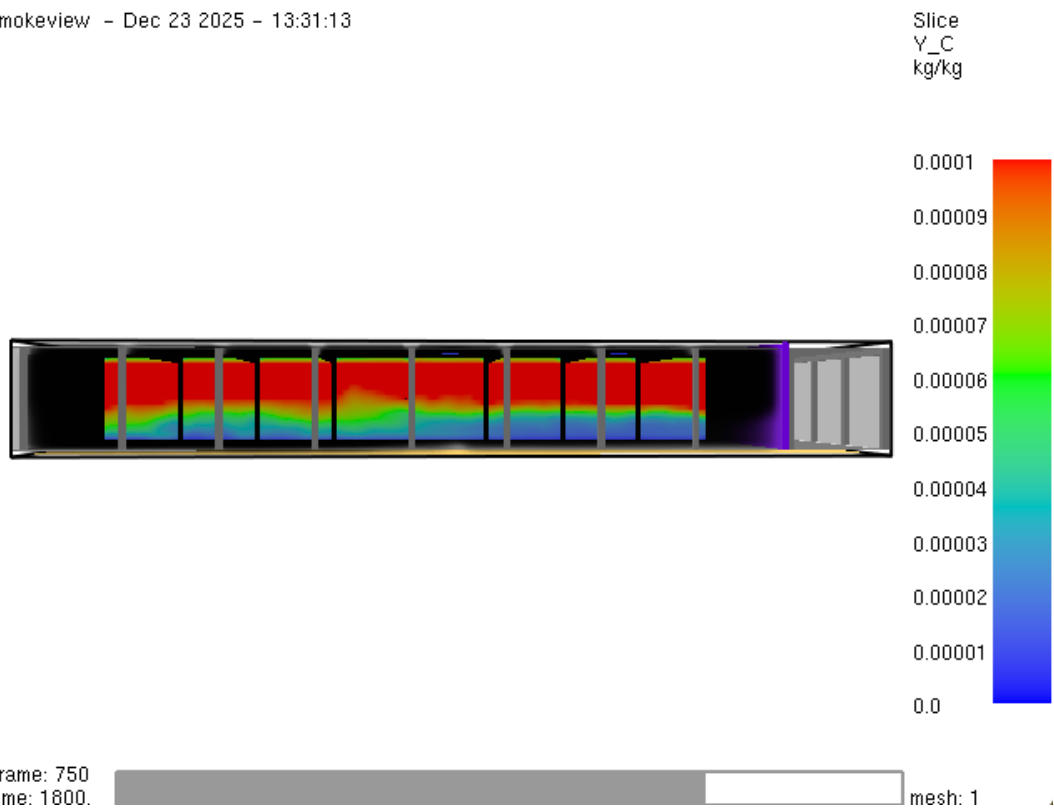


Bild A3.24: Rußausbeute nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

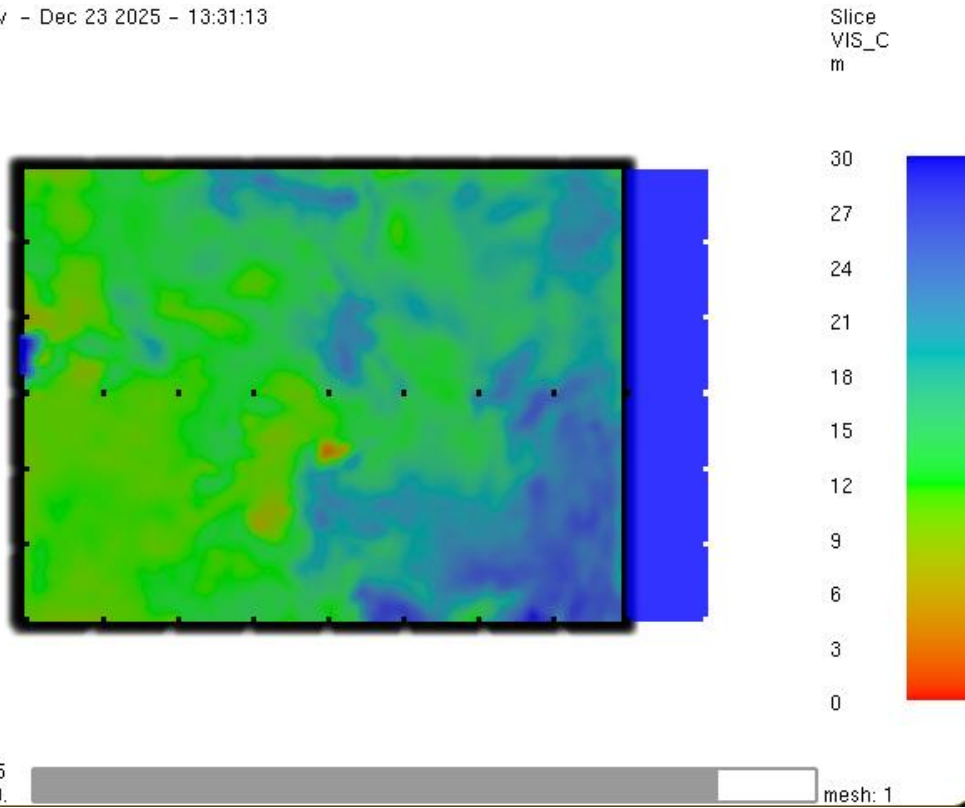


Bild A3.25: Sichtweite nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

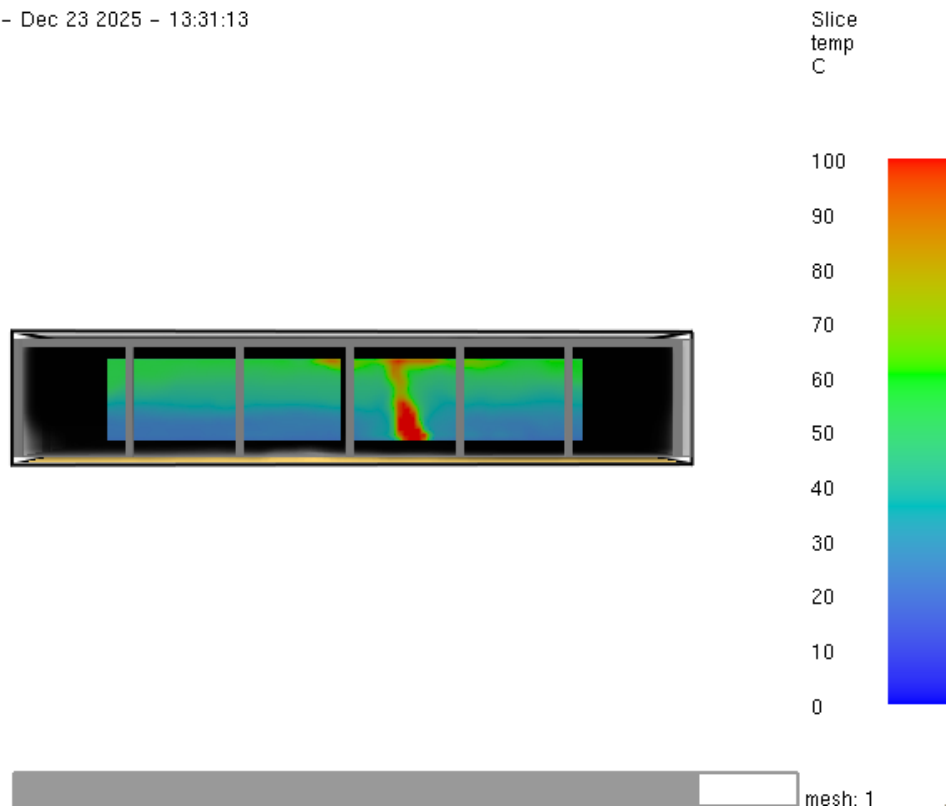


Bild A3.26: Temperatur nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

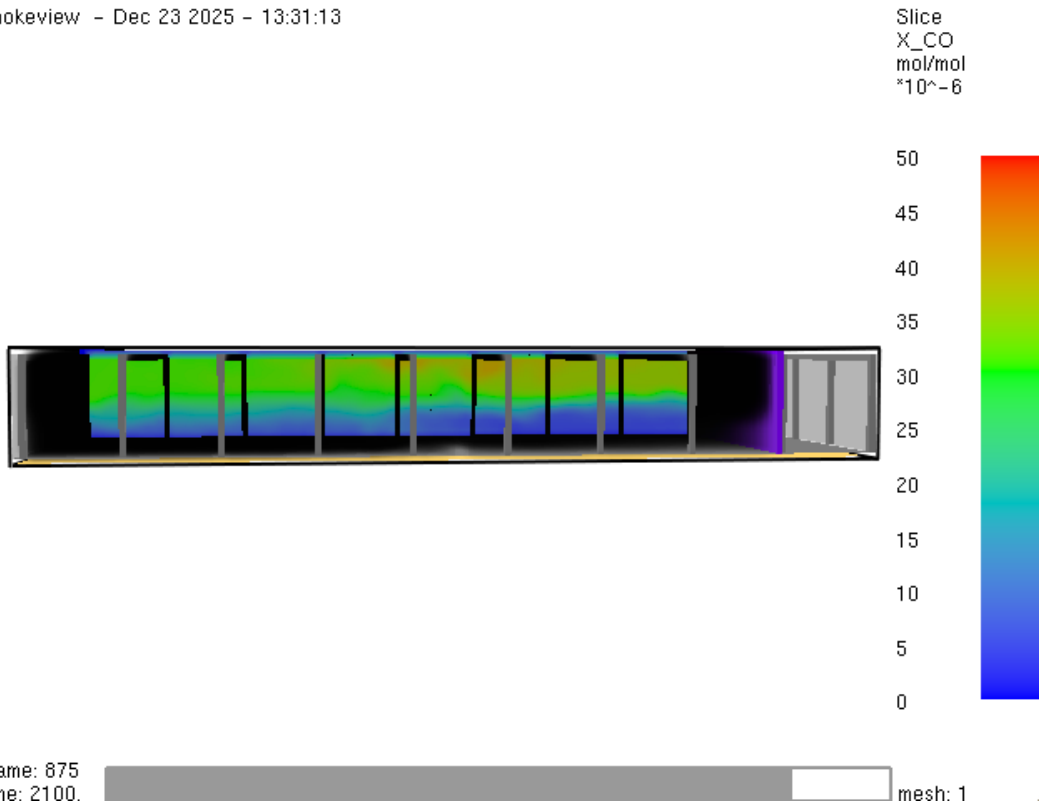


Bild A3.27 Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

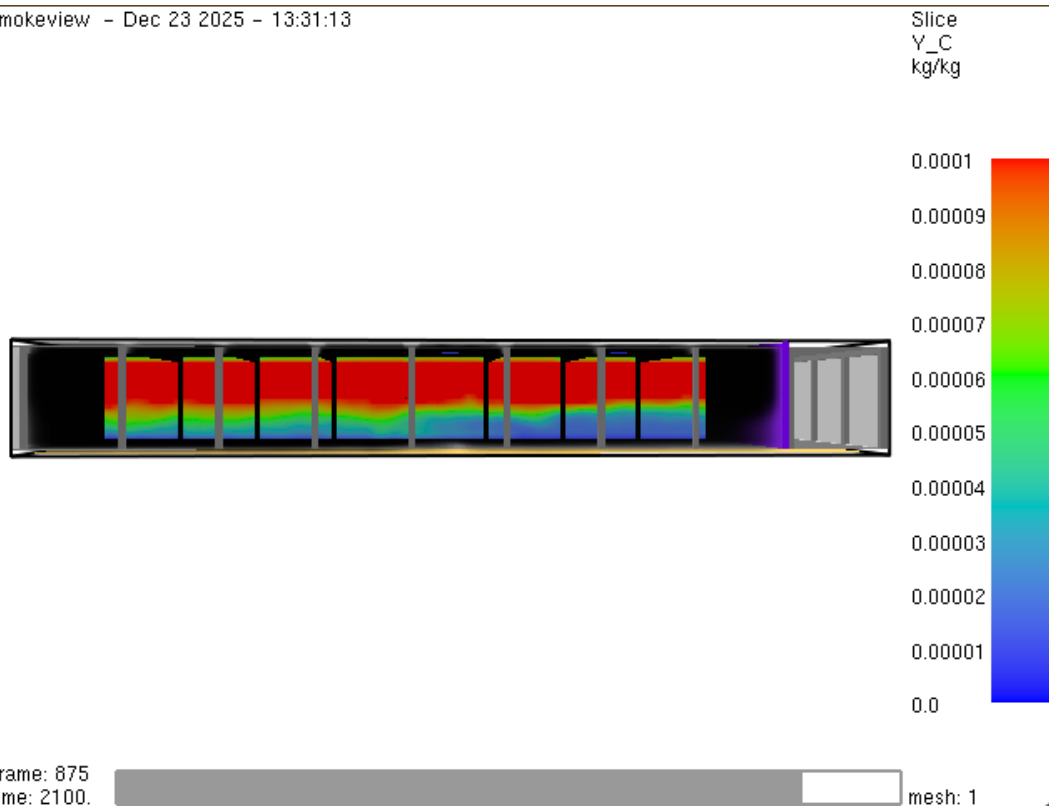
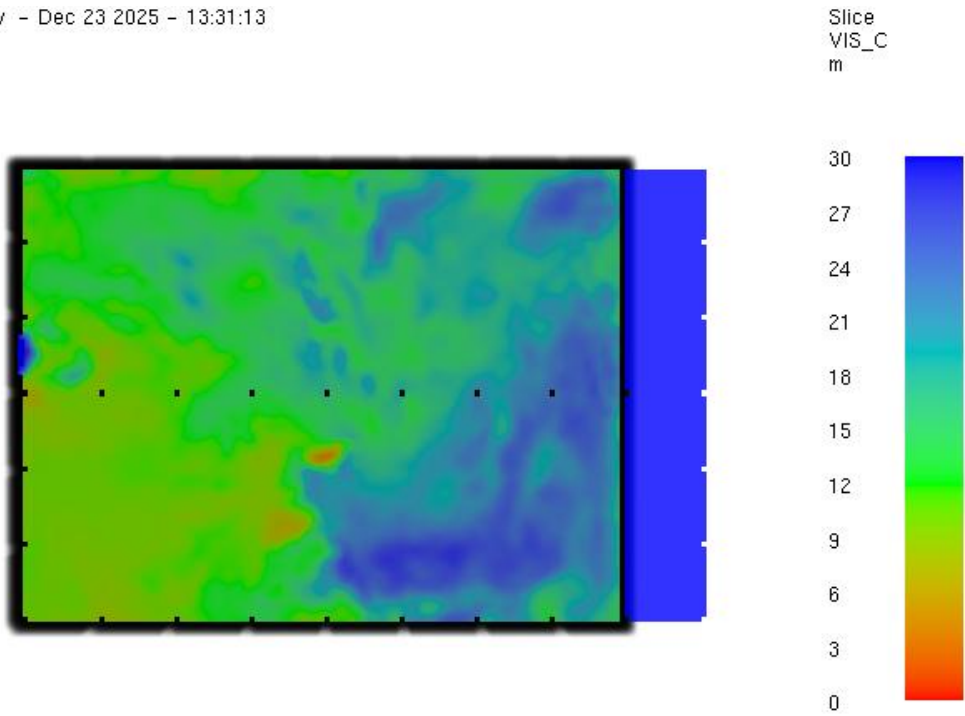


Bild A3.28: Rußausbeute nach t=2100 s

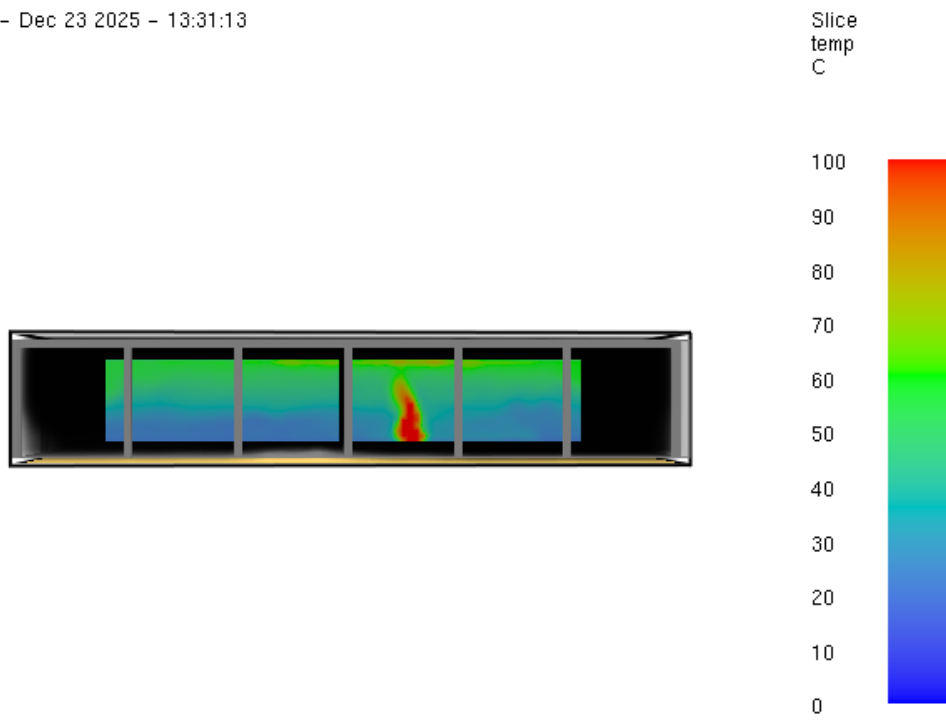
Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 1000
Time: 2400.  mesh: 1

Bild A3.29: Sichtweite nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 1000
Time: 2400.  mesh: 1

Bild A3.30: Temperatur nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

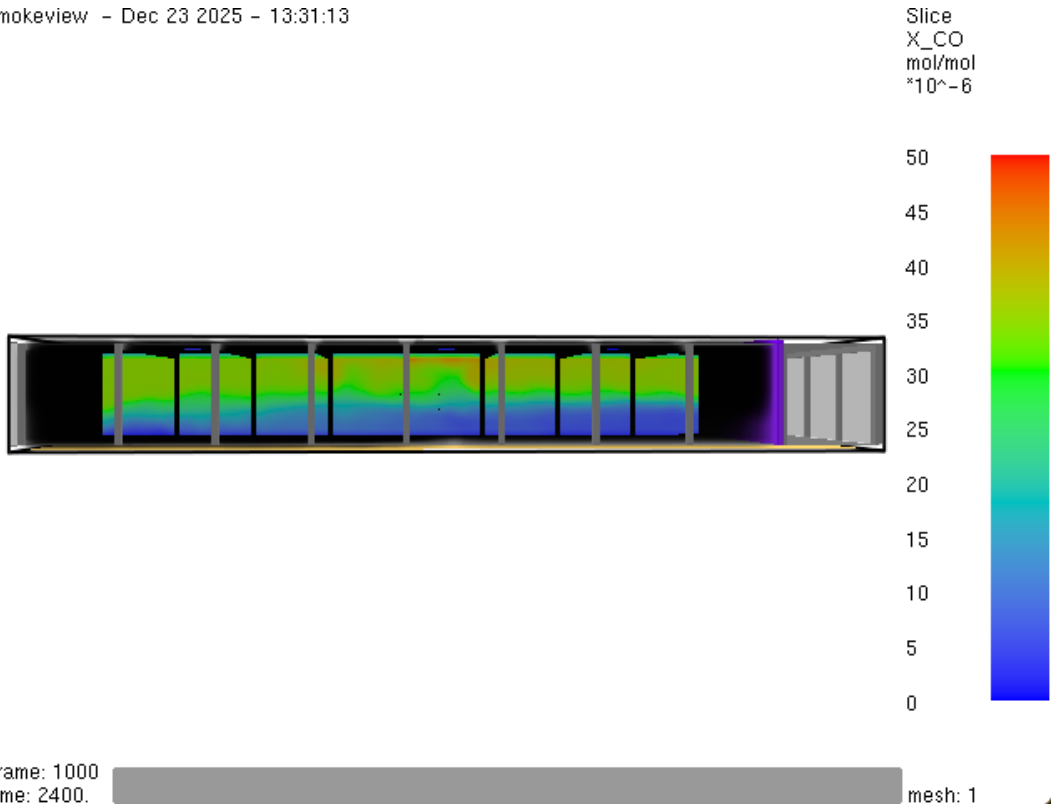


Bild A3.31: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

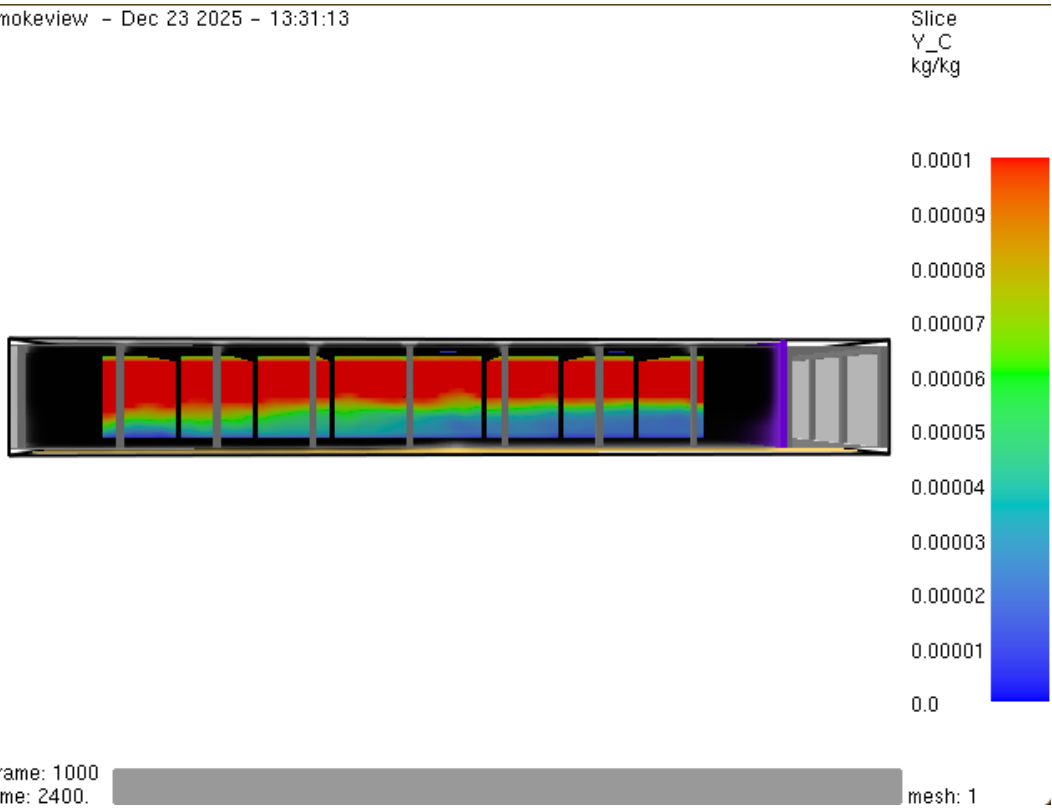


Bild A3.32: Rußausbeute nach t=2400 s

A4. Anhang zum FDS Beispiel Verkaufsstätte ohne besondere Maßnahmen

Quelltext FDS:

```

---FDS-Eingaben Realbrandversuch für Verkaufsstätte ohne besondere
brandschutztechnischen Maßnahmen---

---Definition der Grundeinstellungen (Simulationsprofil)---
&HEAD CHID='VK1', TITLE='Simulation Verkaufsstaeette ohne Maßnahmen' /
&TIME T_END= 2400. /
&MESH IJK= 137, 92, 18, XB=0.0, 68.5, 0.0, 46.0, -0.5, 8.50 /
&MISC OVERWRITE = .FALSE. ,VISIBILITY_FACTOR = 8 / RESTART = .TRUE./
&DUMP NFRAMES = 1000, DT_RESTART = 100.0, MASS_FILE = .TRUE.,
DT_PL3D=30., PLOT3D_QUANTITY(1)= 'carbon monoxide', PLOT3D_QUANTITY(5)=
'TEMPERATURE' /

```

---Brand-Definition (REACTION)---

In diesem Block wird festgelegt, wie der Brennstoff chemisch zusammengesetzt ist und welche Produkte bei der Verbrennung entstehen.

```

&REAC ID          = 'Mischbrandlast_Drogerie'
      SOOT_YIELD = 0.060      ! (hier: brandlastgesteuert/Kunststoff A)
      CO_YIELD   = 0.024      ! Kohlenmonoxidausbeute in g/g
      HEAT_OF_COMBUSTION = 17900
      N          = 0.0
      C          = 2.0
      H          = 4.0
      O          = 0.0
      RADIATIVE_FRACTION = 0.35/

```

---Definition der Materialien und Oberflächen---

In diesem Block werden die physikalischen Stoffdaten für die Gebäudehülle und das Tragwerk festgelegt.

---Materialien---

```

&MATL ID          = 'BETON'
      CONDUCTIVITY = 1.4
      SPECIFIC_HEAT = 1.0
      DENSITY      = 2000. /

```

ANHANG

&MATL ID = 'MAUERSTEIN'
CONDUCTIVITY = 0.69
SPECIFIC_HEAT = 0.84
DENSITY = 1600. /

&MATL ID = 'GIPSKARTON'
CONDUCTIVITY = 0.48
SPECIFIC_HEAT = 0.84
DENSITY = 1440. /

---Oberflächen---

&SURF ID = 'STUETZE'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'BETON'
THICKNESS = 0.40 /

&SURF ID = 'TRAEGER'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'BETON'
THICKNESS = 0.40 /

&SURF ID = 'BRANDWAND'
RGB = 127,0,255
MATL_ID = 'BETON'
THICKNESS = 0.25 /

&SURF ID = 'AUSSENWAND'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'MAUERSTEIN'
THICKNESS = 0.50
TRANSPARENCY = 0.30 /

&SURF ID = 'DACH'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'GIPSKARTON',
THICKNESS = 0.10 /

ANHANG

```
&SURF ID                = 'BODENPLATTE'  
    RGB                  = 128,128,128  
    MATL_ID              = 'BETON'  
    THICKNESS            = 0.25 /
```

```
&SURF ID='FEUER', RGB=255,0,0, HRRPUA=500, RAMP_Q = 'brand_kurve' /
```

---Festlegen der Zeitlichen Brandentwicklung (RAMP-FUNKTION)---

```
&RAMP ID='brand_kurve', T=0.0, F=0.0 /    Zum Zeitpunkt t=0s betraegt die  
Leistung 0%
```

```
&RAMP ID='brand_kurve', T=600.0, F=1.0 /  Zum Zeitpunkt t=600s wird die  
volle Leistung (100%) erreicht
```

---Einfügen des Gebäudemodells--

```
&OBST XB=0.00,68.00,0.00,46.00,-0.25,0.00,SURF_ID='BODENPLATTE' /
```

```
&OBST XB=60.00,60.25,0.00,46.00,0.00,8.50, SURF_ID='BRANDWAND' /
```

```
&OBST XB=0.40,0.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=7.90,8.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=15.40,15.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=22.90,23.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=30.40,30.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=37.90,38.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=45.40,45.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=52.90,53.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=60.40,60.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=67.90,68.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=0.40,0.80,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=67.90,68.30,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=0.40,0.80,15.40,15.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=67.90,68.30,15.40,15.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=0.40,0.80,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=7.90,8.30,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=15.40,15.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=22.90,23.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
```

```
&OBST XB=30.40,30.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
```

&OBST XB=37.90,38.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=45.40,45.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=52.90,53.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=60.40,60.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=0.40,0.80,30.40,30.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,30.40,30.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=0.40,0.80,37.90,38.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,37.90,38.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=0.40,0.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=7.90,8.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=15.40,15.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=22.90,23.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=30.40,30.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=37.90,38.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=45.40,45.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=52.90,53.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=60.40,60.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=7.90,8.30,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=15.40,15.80,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=22.90,23.30,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=30.40,30.80,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=37.90,38.30,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=45.40,45.80,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=52.90,53.30,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=67.90,68.30,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /

&OBST XB=0.00,68.70,0.00,0.50,0.00,8.00,SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB=0.00,0.50,0.00,46.20,0.00,8.00,SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB=0.00,68.70,45.70,46.20,0.00,8.00,SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB=68.30,68.70,0.00,46.20,0.00,8.00,SURF_ID='AUSSENWAND' /

&OBST XB=0.00,68.70,0.00,46.20,8.00,8.10,SURF_ID='DACH' /

---Zu- und Abluftflächen (Öffnungen)---

&DEVC ID='TIMER', QUANTITY='TIME', SETPOINT=420.0, XYZ=0.0, 0.0, 0.0 /

Abluft: 6x RWA im Dach a 1,50 x 1,50 m

&HOLE XB= 11.10, 12.60, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /

&HOLE XB= 11.10, 12.60, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /

&HOLE XB= 26.10, 27.60, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /

&HOLE XB= 33.60, 35.10, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /

&HOLE XB= 48.60, 50.10, 10.80, 12.30, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /

&HOLE XB= 48.60, 50.10, 34.0, 35.0, 8.00, 8.10, DEVC_ID='TIMER' /

Zuluft: Ein Tor in Fassade a 4,00 x 4,00 m, 2 x Tür in Fassade 1,00 m x 2,00 m

&HOLE XB= -0.10, 0.50, 24.80, 28.80, 0.00, 4.00 /

&HOLE XB= 33.85, 34.85, -0.10, 0.50, 0.00, 2.00 /

&HOLE XB= 33.85, 34.85, 45.70, 46.30, 0.00, 2.00 /

Das Feuer

&VENT XB= 29.0, 32.0, 15.0, 17.0, 0.01, 0.01, SURF_ID='FEUER', IOR=3 /

---Messgeräte (DEVC)---

Messpunkt 1: Nah am Brandherd

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0, 8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT',
ID='BRAND_LH' /

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0, 8.0, QUANTITY='UPPER
TEMPERATURE', ID='BRAND_UT' /

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 6.0, 0.0, 8.0, QUANTITY='LOWER
TEMPERATURE', ID='BRAND_LT' /

Messpunkt 2: Hallenmitte

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0, 8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT',
ID='MITTE_LH' /

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0, 8.0, QUANTITY='UPPER
TEMPERATURE', ID='MITTE_UT' /

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0, 8.0, QUANTITY='LOWER
TEMPERATURE', ID='MITTE_LT' /

ANHANG

Personenschutzwerte auf 2,50 m Höhe:

```
&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='MITTE_TEMP_2M' /
```

```
&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', ID='MITTE_CO_2M' /
```

---Visualisierung (SLCF)---

Temperaturen (Hitzeausbreitung):

```
&SLCF PBX= 23.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
```

```
&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
```

HRRPUV:

```
&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='HRRPUV' /
```

Sichtweite und Gase:

```
&SLCF PBZ= 2.5, QUANTITY='VISIBILITY' /
```

```
&SLCF PBZ= 5.0, QUANTITY='VISIBILITY' /
```

```
&SLCF PBX= 23.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' /
```

Ruß-Konzentration (Dichte des Rauchs):

```
&SLCF PBX= 23.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='SOOT' /
```

---Druckausgleich---

```
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&TAIL /
```

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

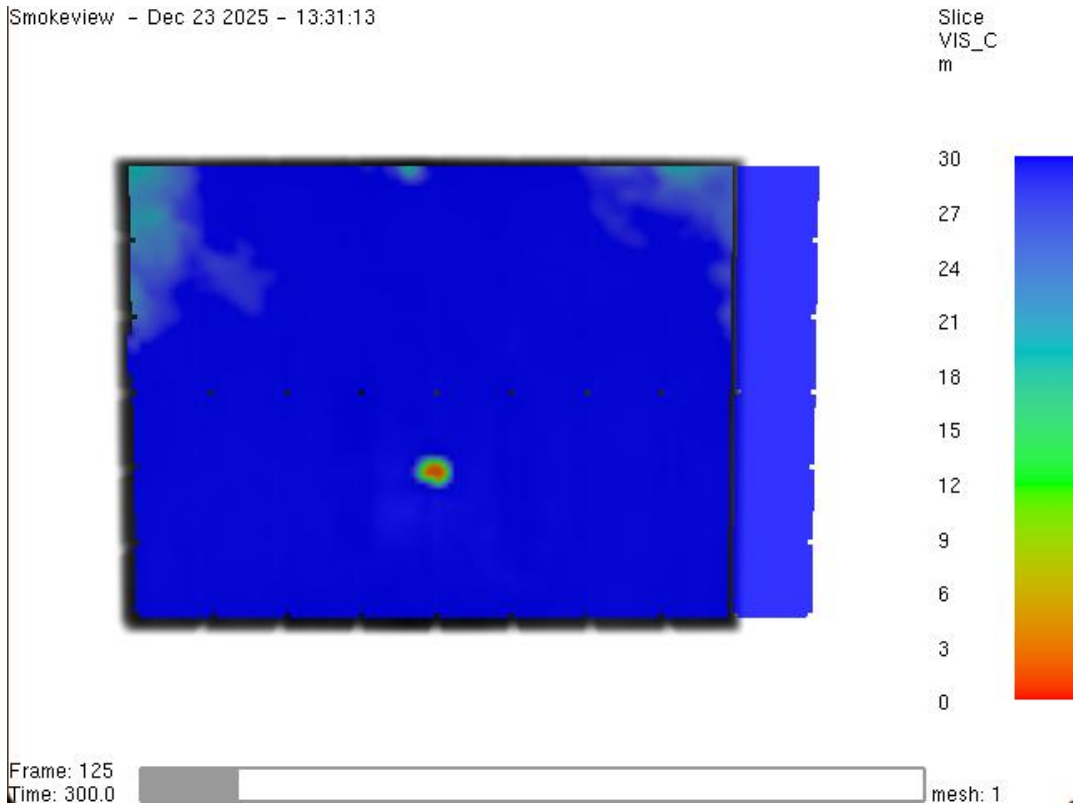


Bild A4.1: Sichtweite nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Bild A4.2: Temperatur nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

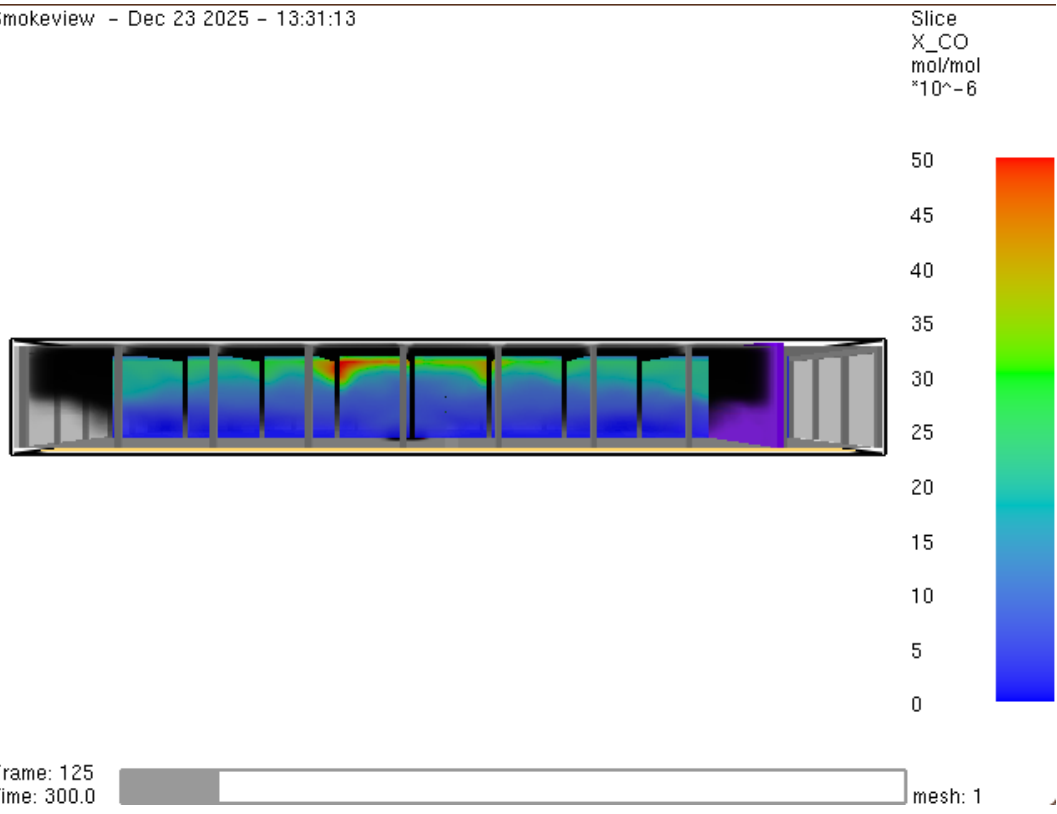


Bild A4.3: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

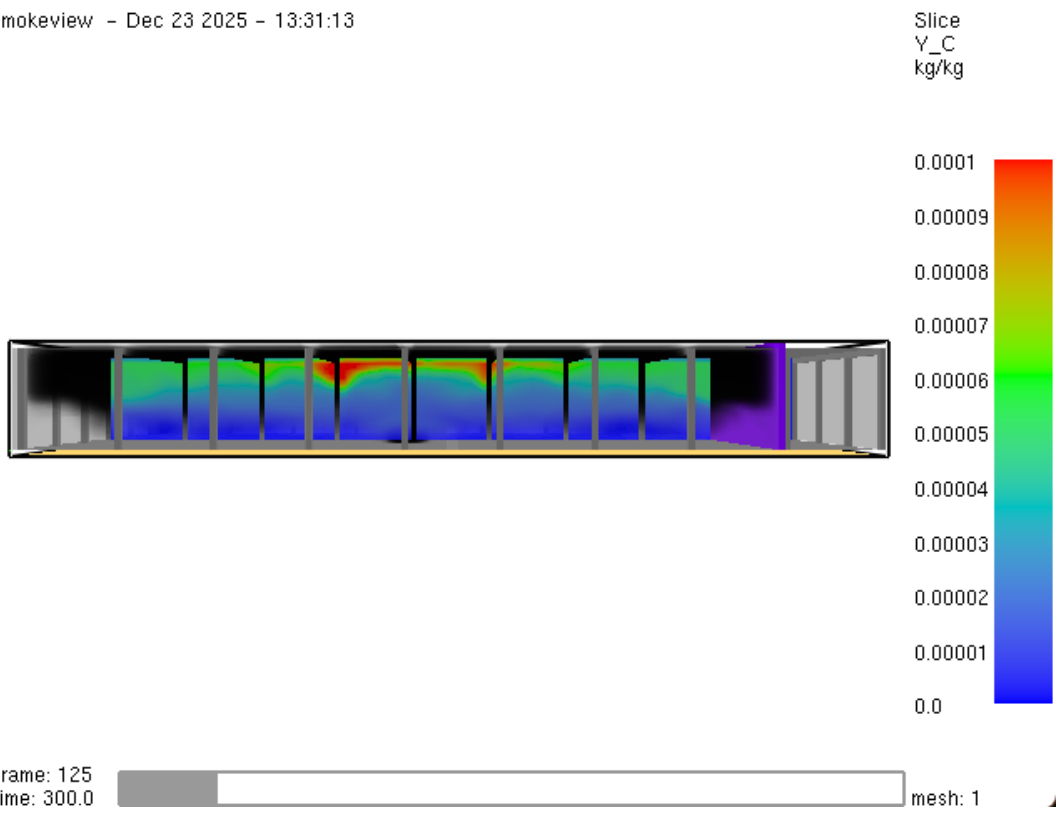
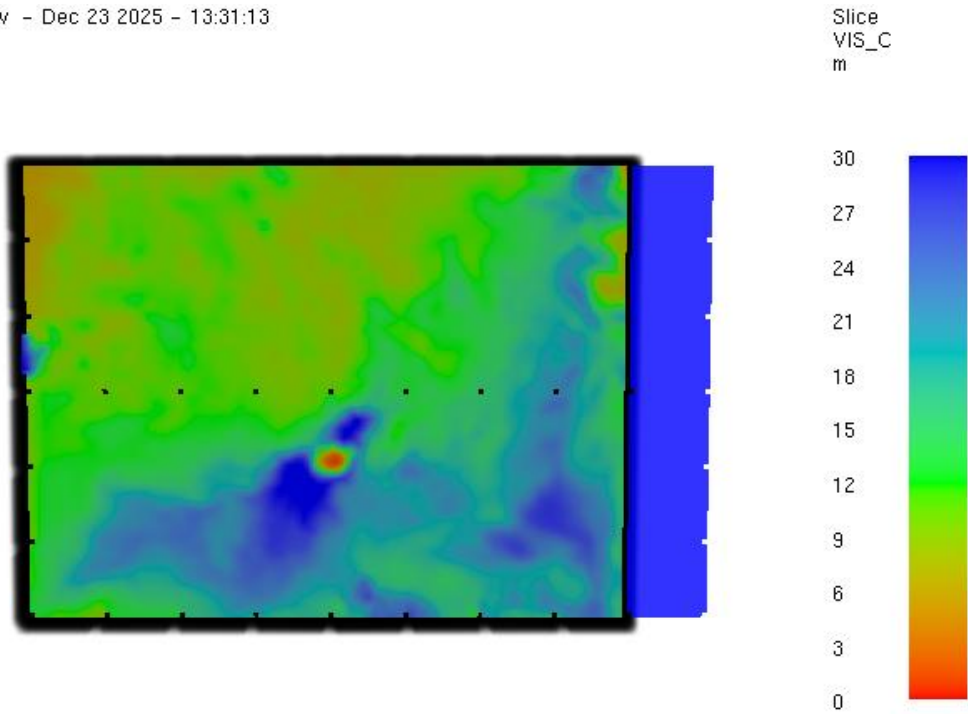


Bild A4.4: Rußausbeute nach t=300 s

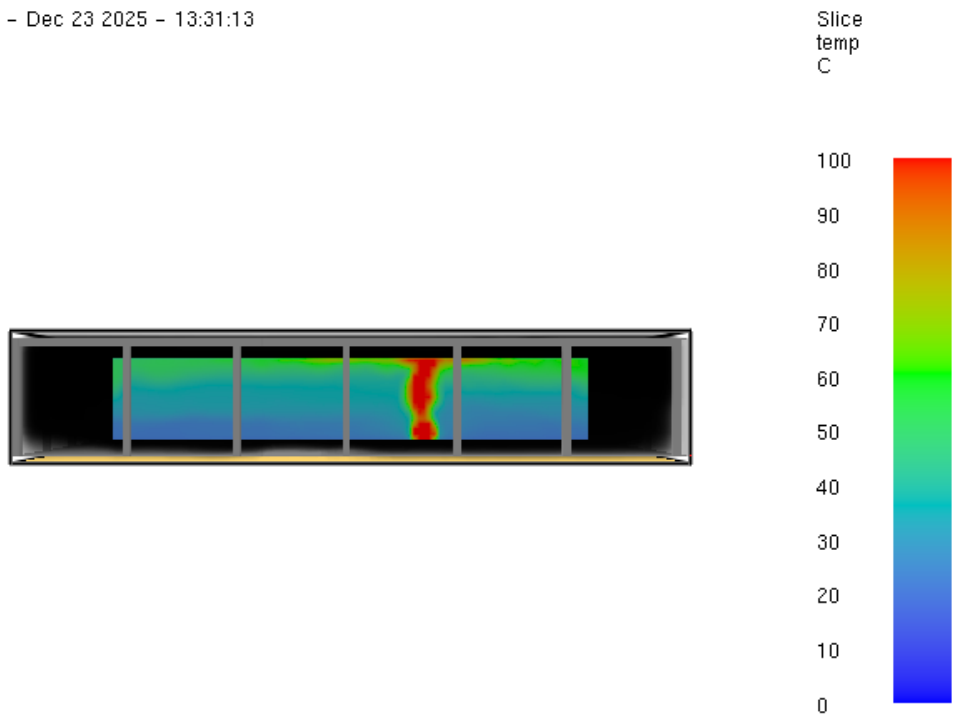
Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 250
Time: 600.0 mesh: 1

Bild A4.5: Sichtweite nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 250
Time: 600.0 mesh: 1

Bild A4.6: Temperatur nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

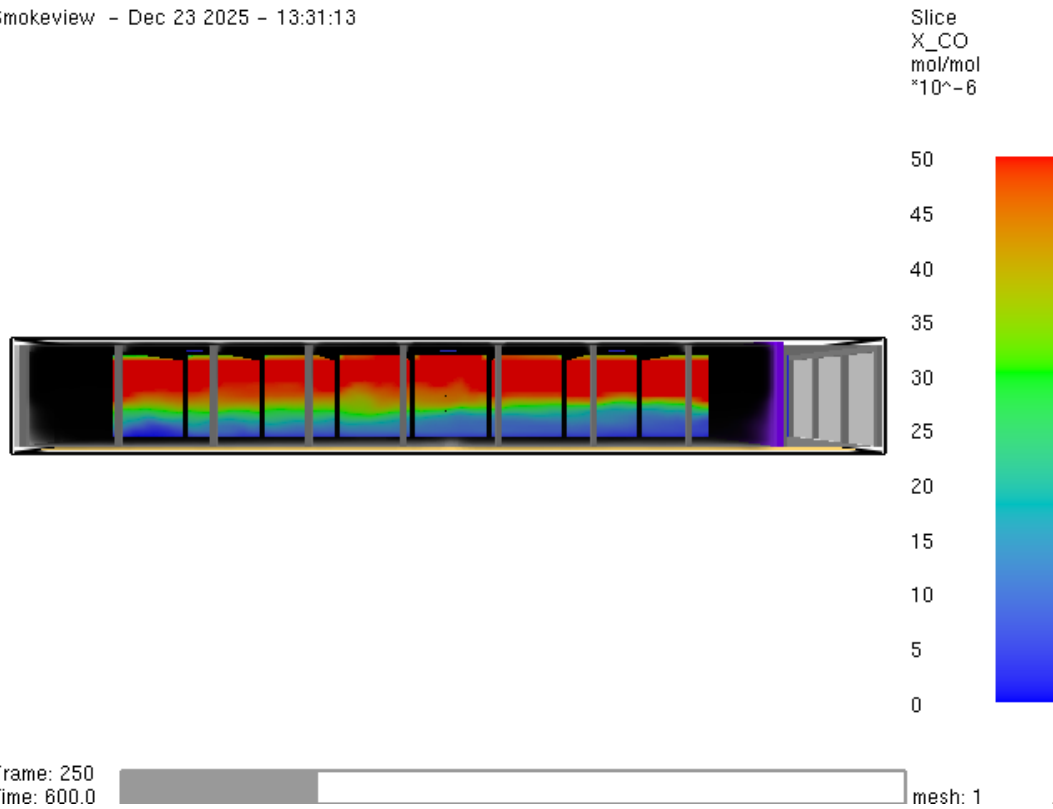


Bild A4.7: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

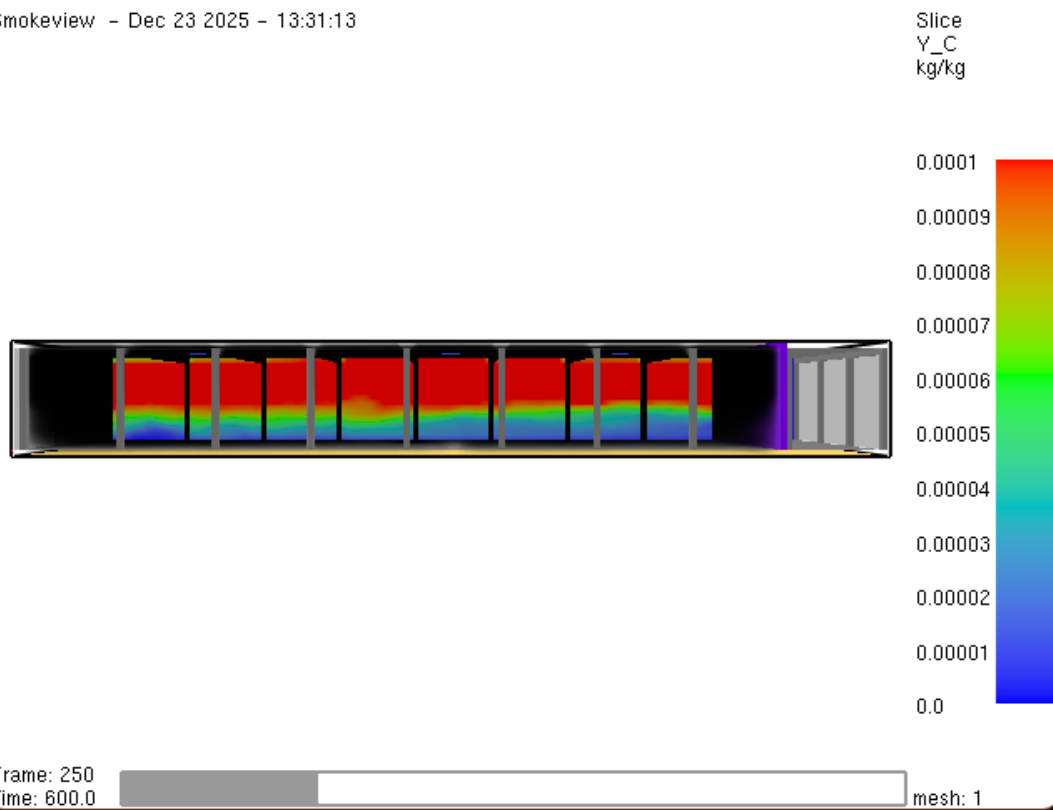


Bild A4.8: Rußausbeute nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

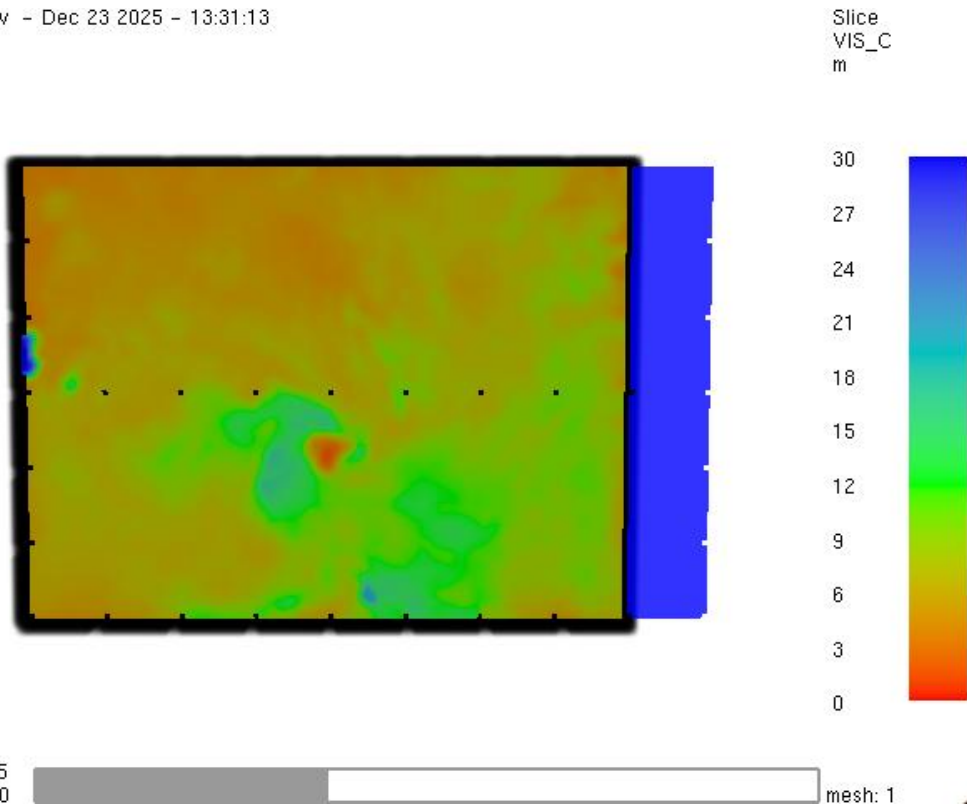


Bild A4.9: Sichtweite nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

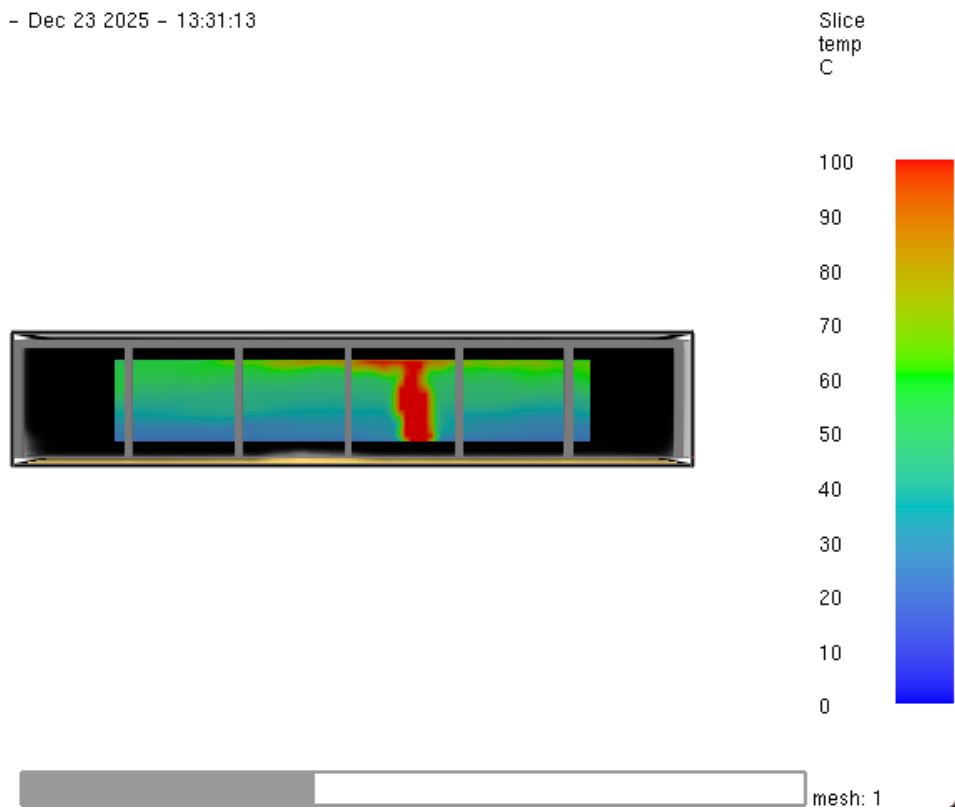
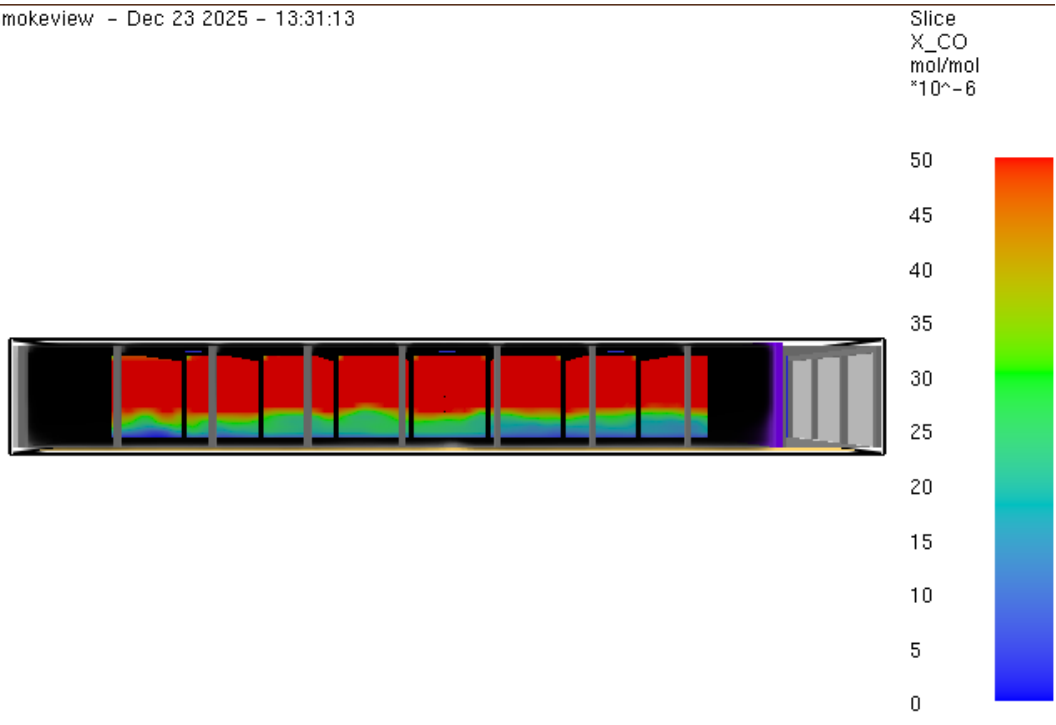


Bild A4.10: Temperatur nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

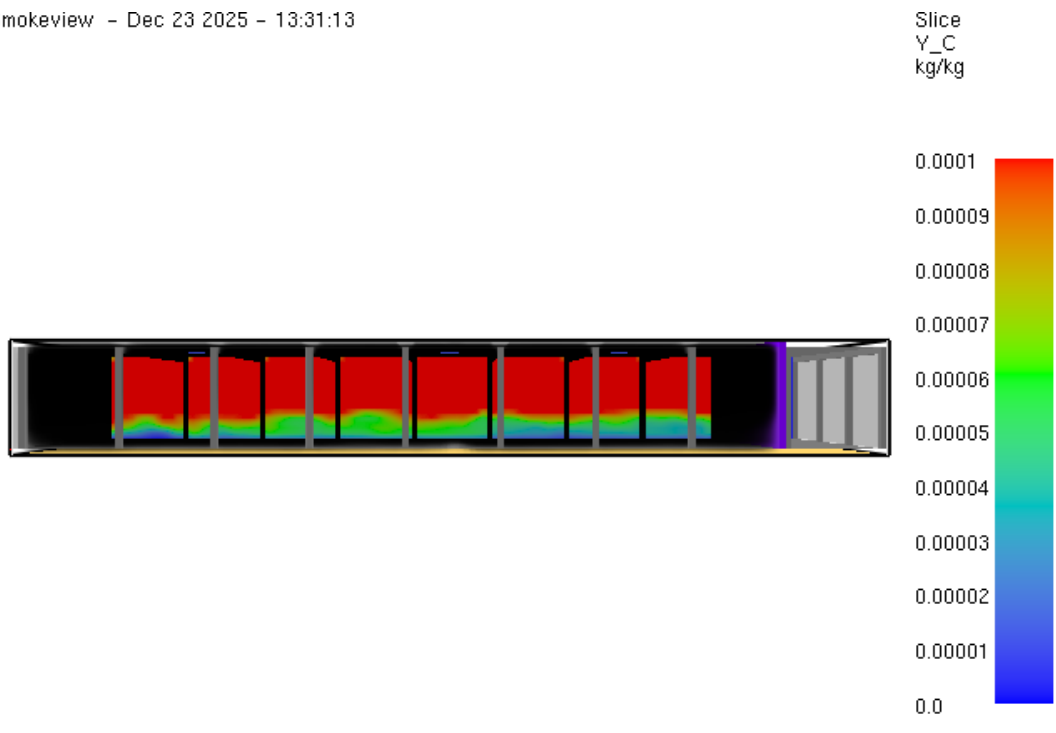


Frame: 375
Time: 900.0

mesh: 1

Bild A4.11: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

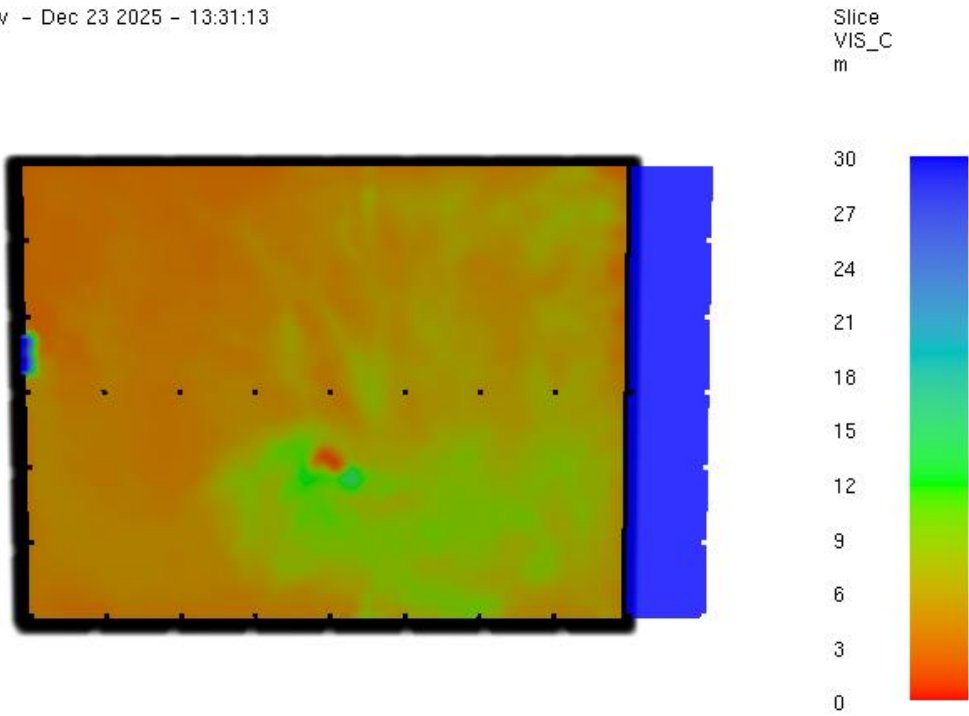


Frame: 375
Time: 900.0

mesh: 1

Bild A4.12: Rußausbeute nach t=900 s

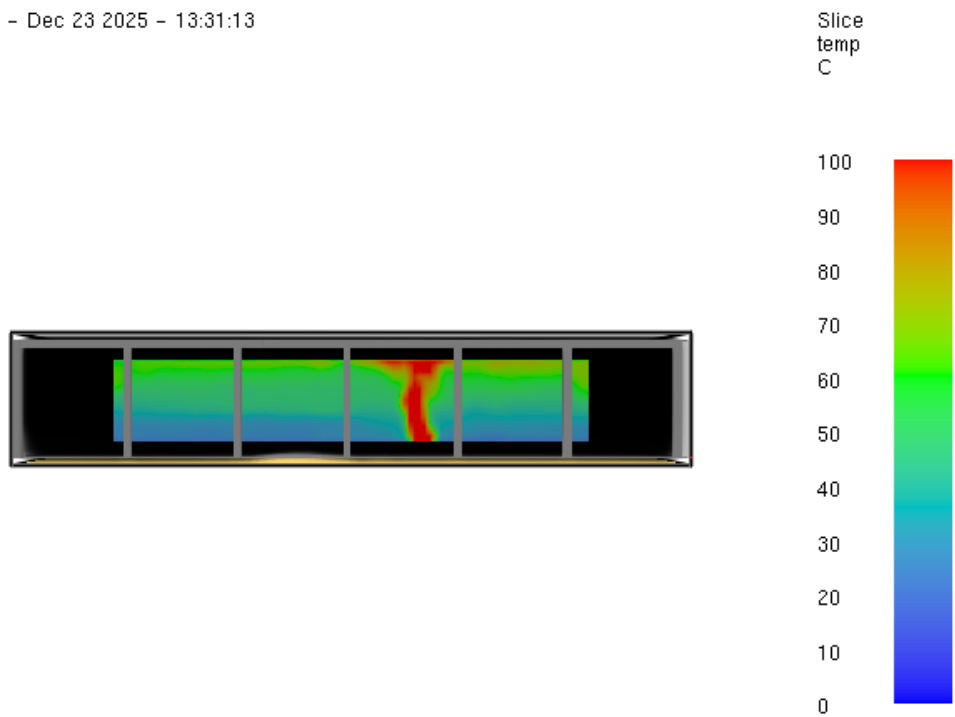
Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 500
Time: 1200.  mesh: 1

Bild A4.13: Sichtweite nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 500
Time: 1200.  mesh: 1

Bild A4.14: Temperatur nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

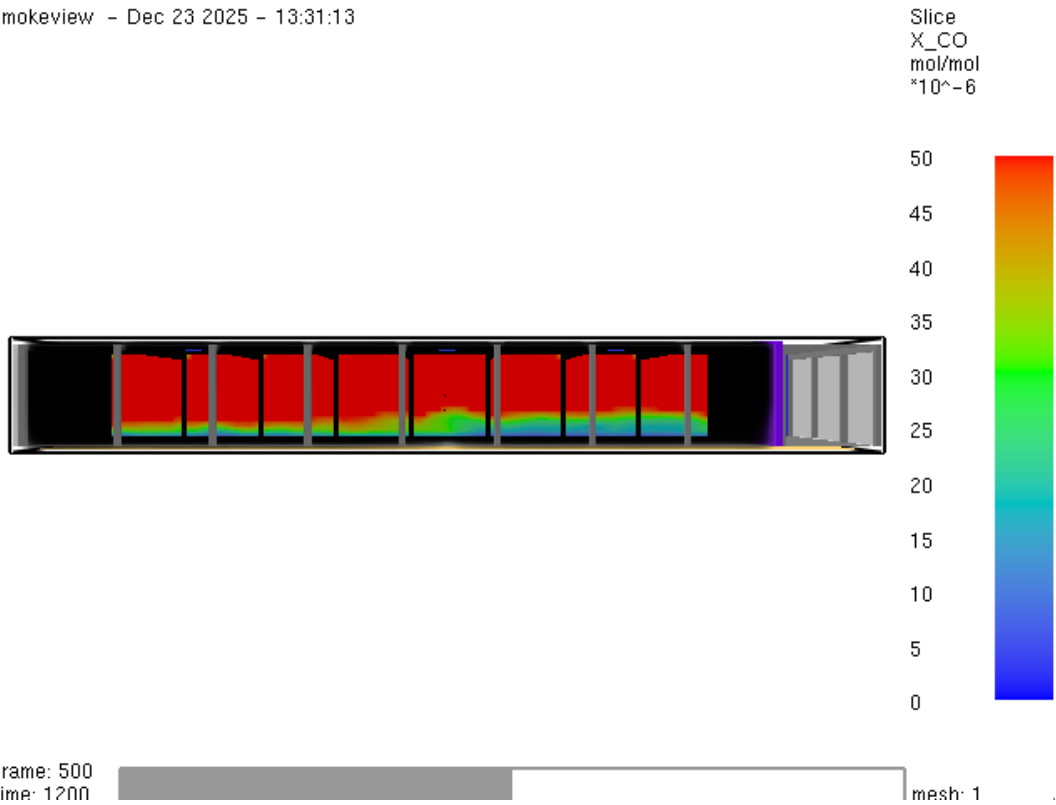


Bild A4.15: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

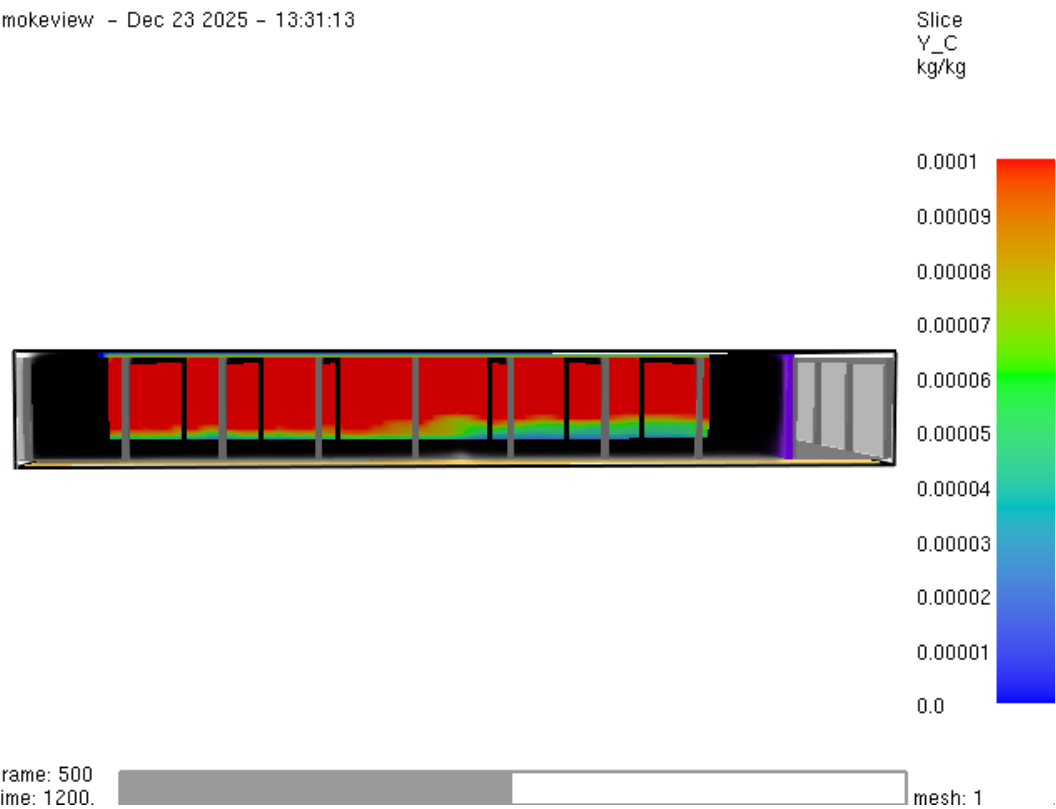


Bild A4.16: Rußausbeute nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

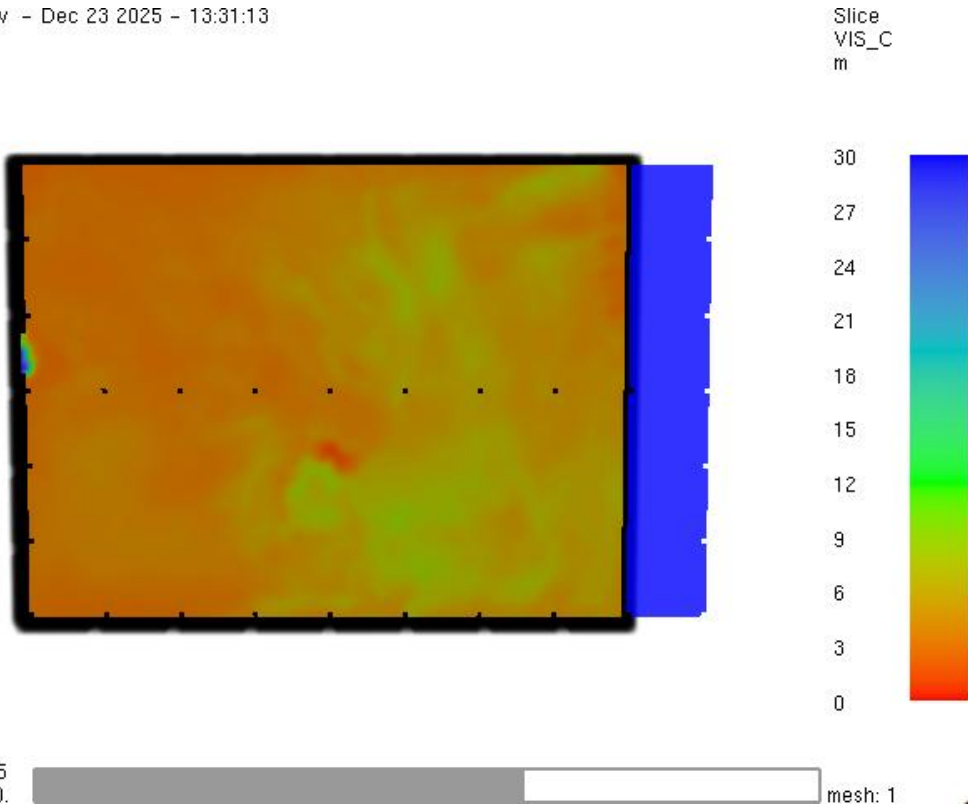


Bild A4.17: Sichtweite nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

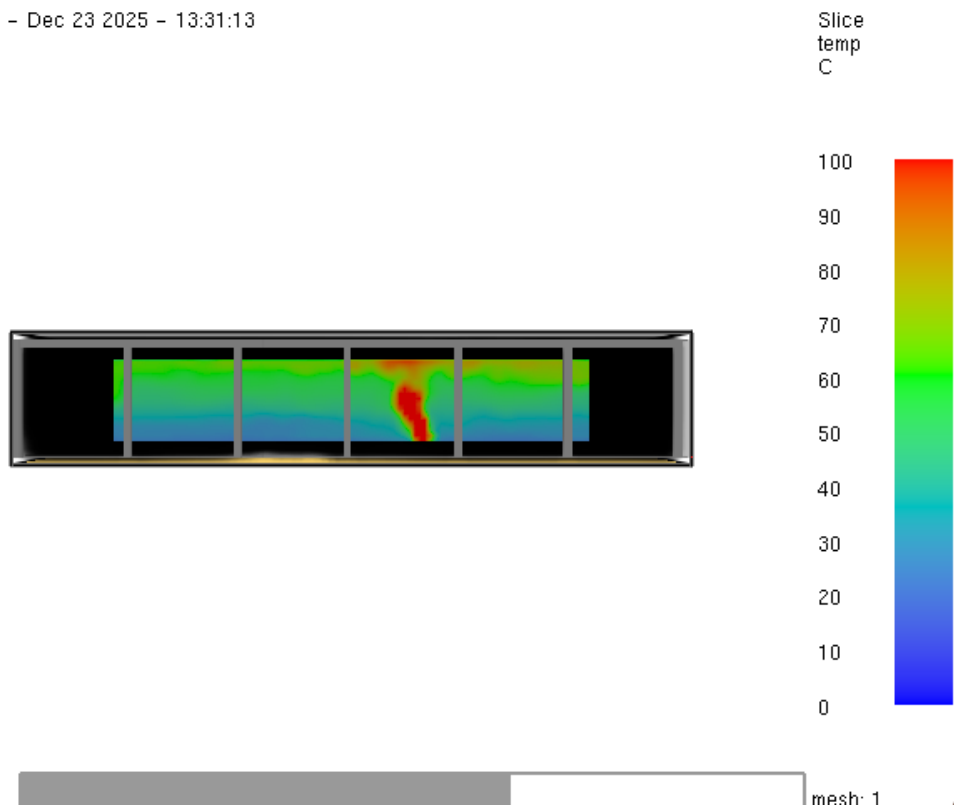


Bild A4.18: Temperatur nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

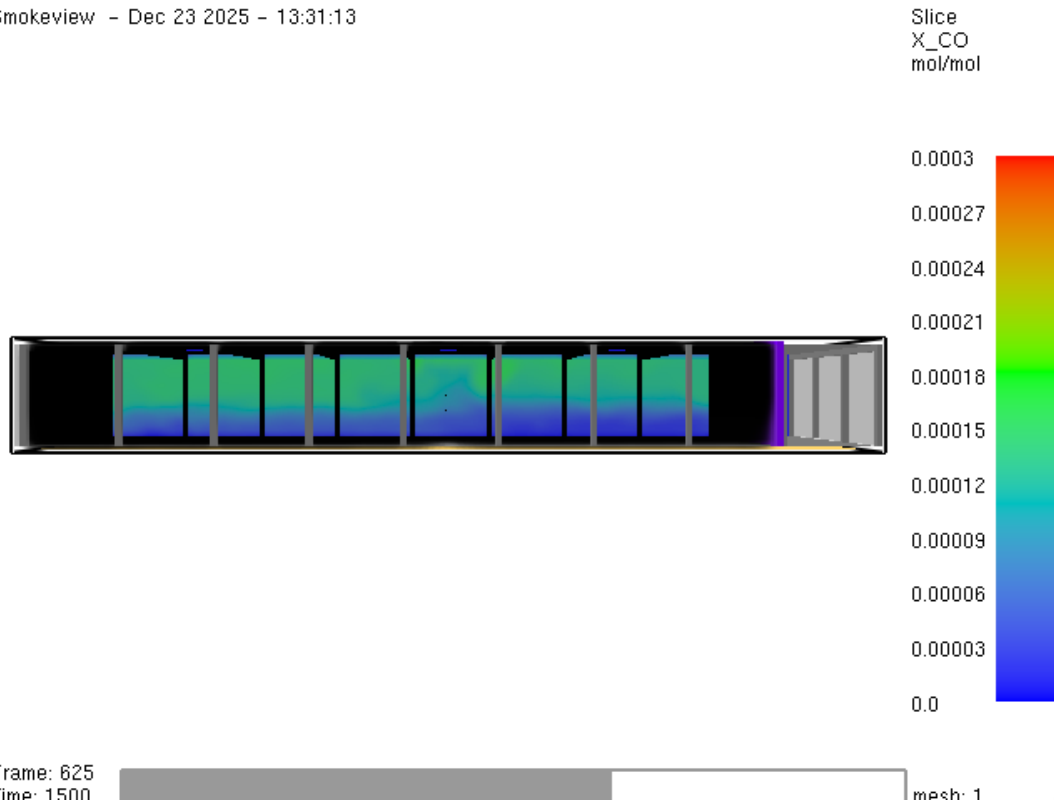


Bild A4.19: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

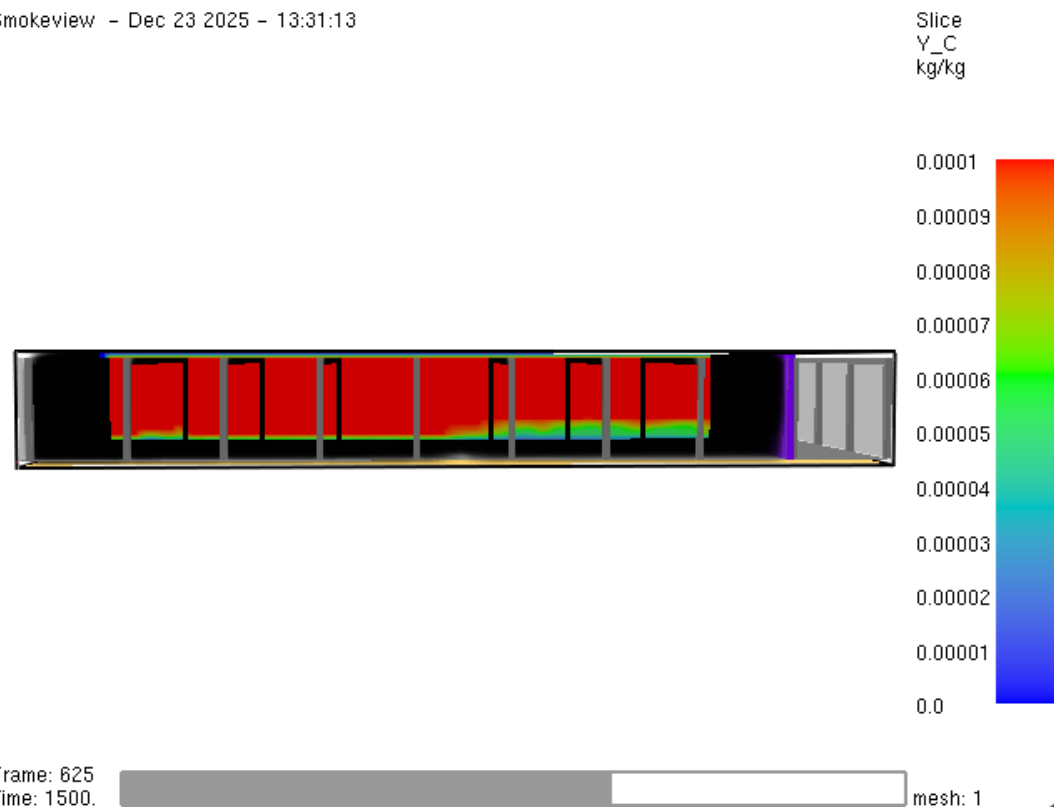
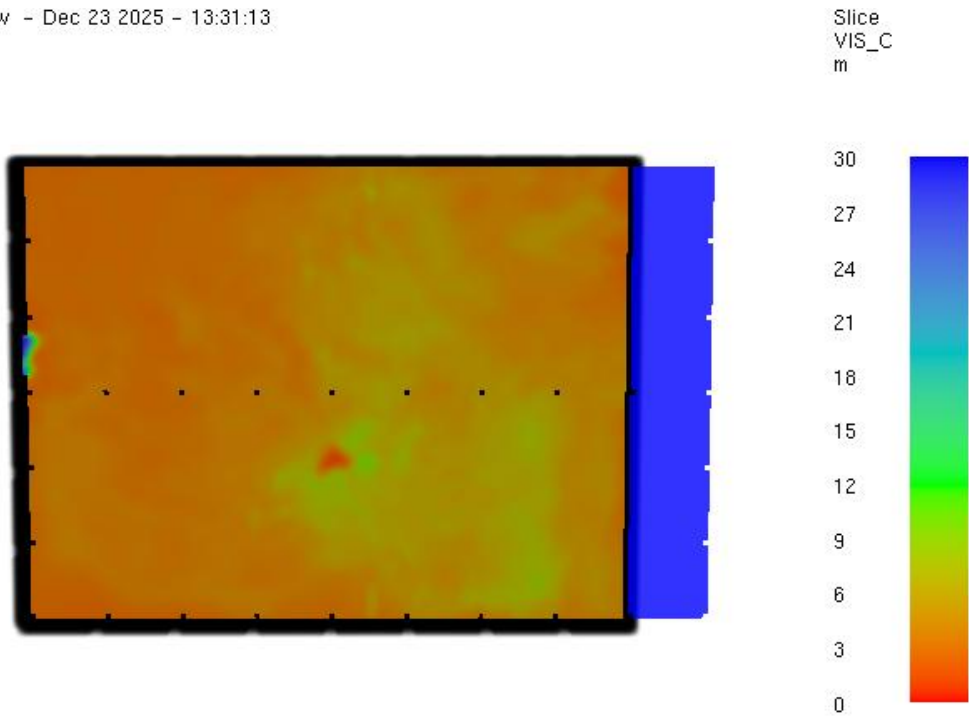


Bild A4.20: Rußausbeute nach t=1500 s

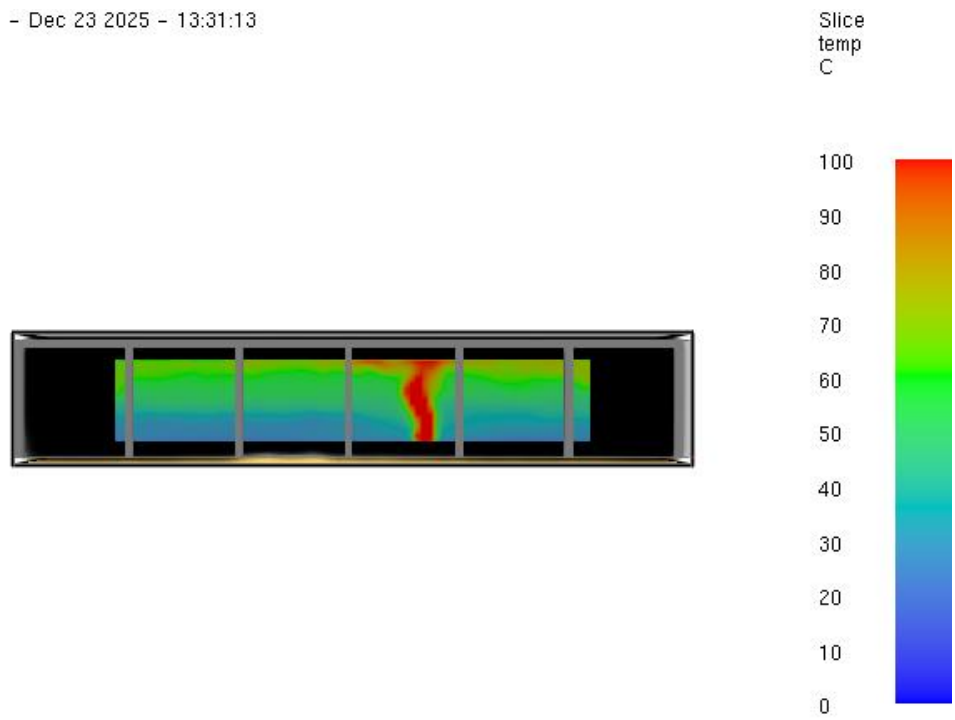
Smokeyview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 750
Time: 1800.  mesh: 1

Bild A4.21: Sichtweite nach t=1800 s

Smokeyview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 750
Time: 1800.  mesh: 1

Bild A4.22: Temperatur nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

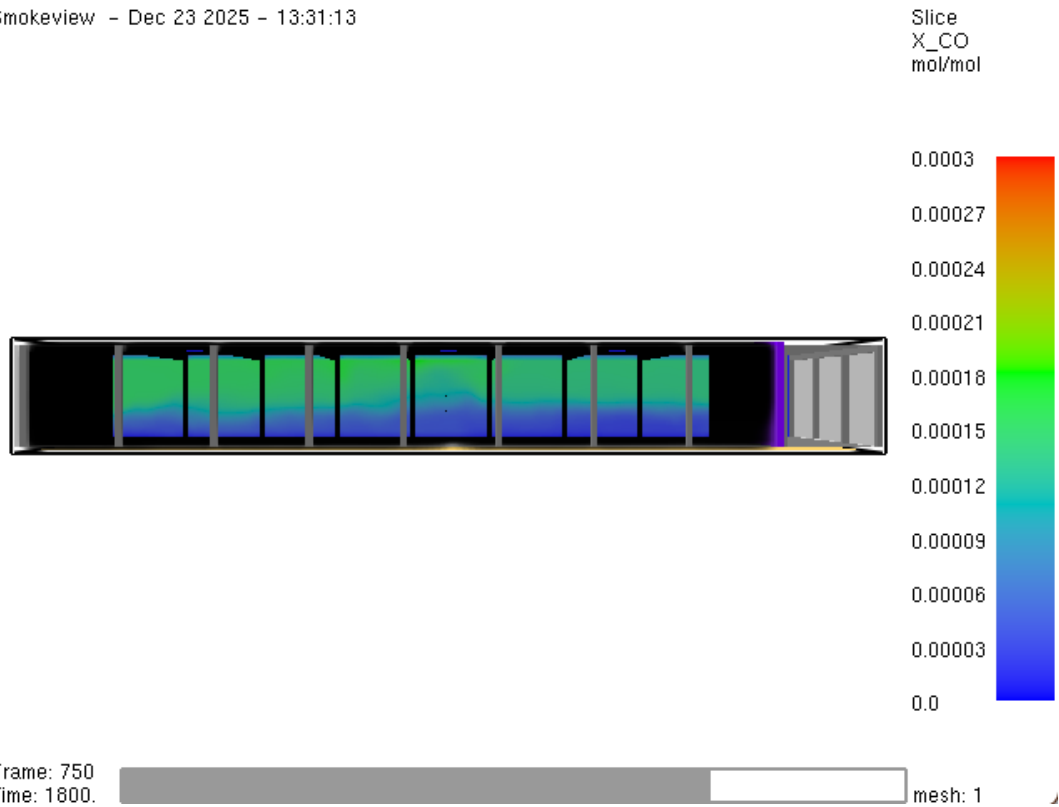


Bild A4.23: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

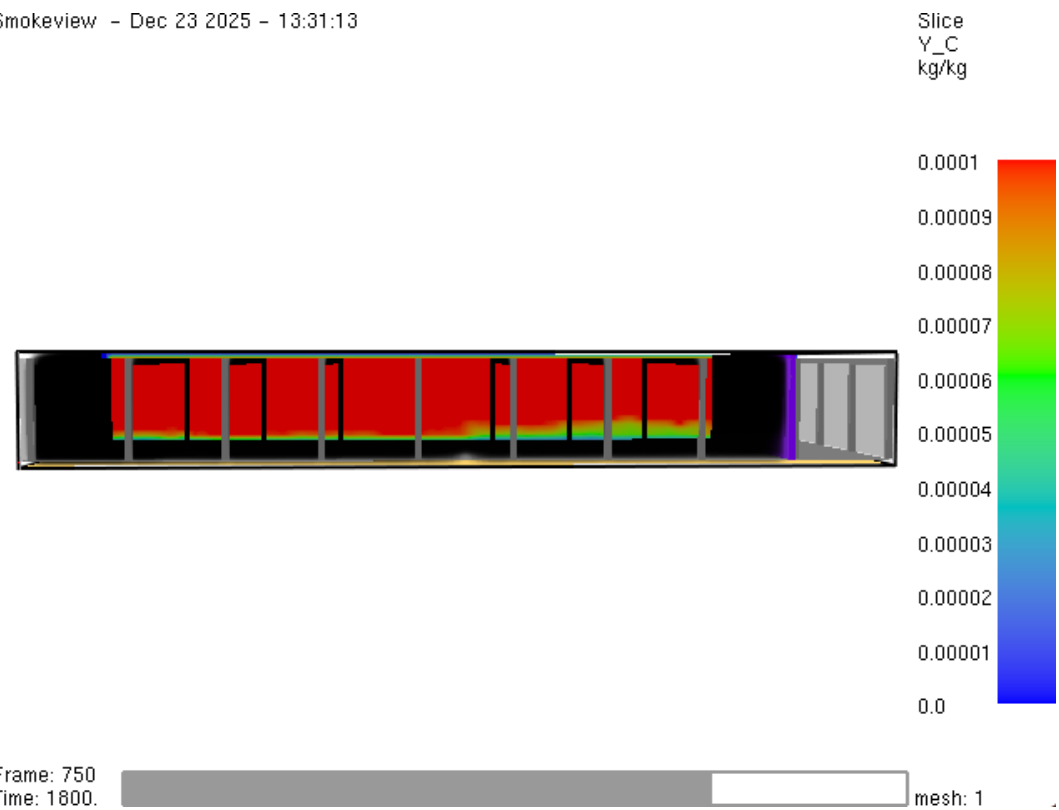


Bild A4.24: Rußausbeute nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

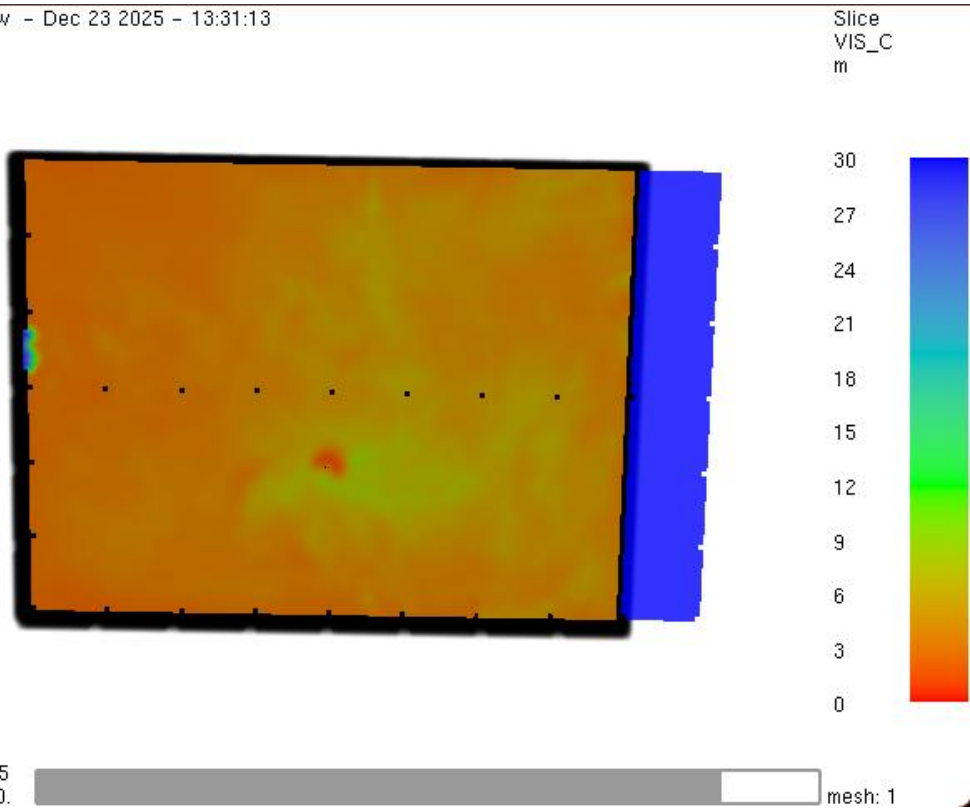


Bild A4.25: Sichtweite nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

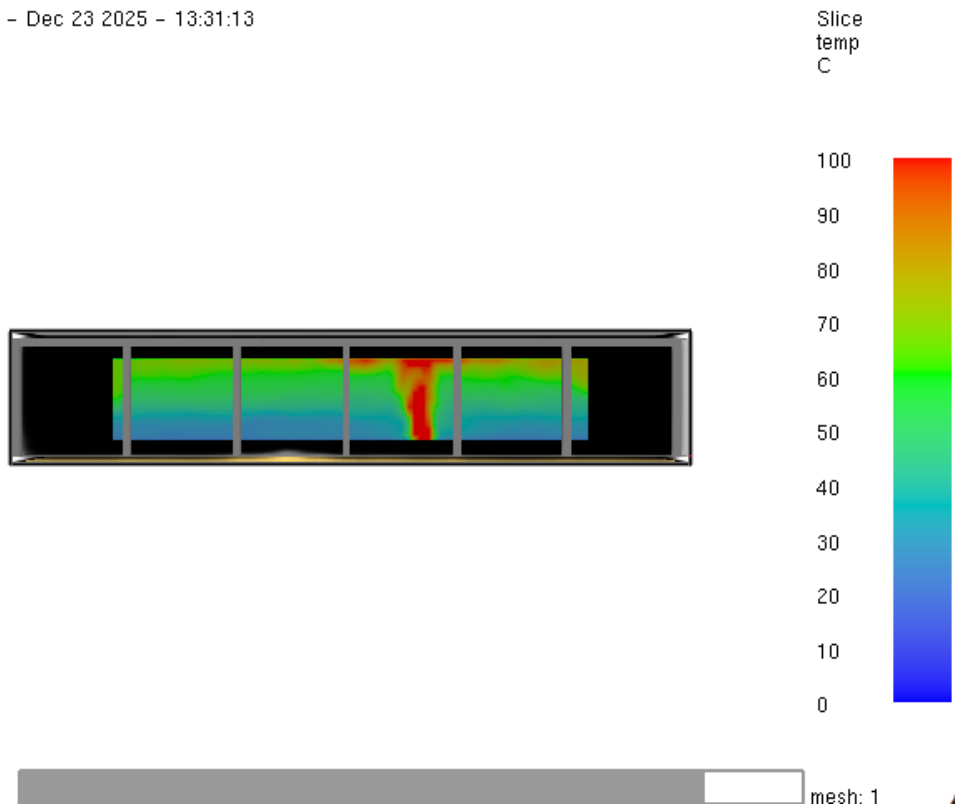


Bild A4.26: Temperatur nach t=2100 s

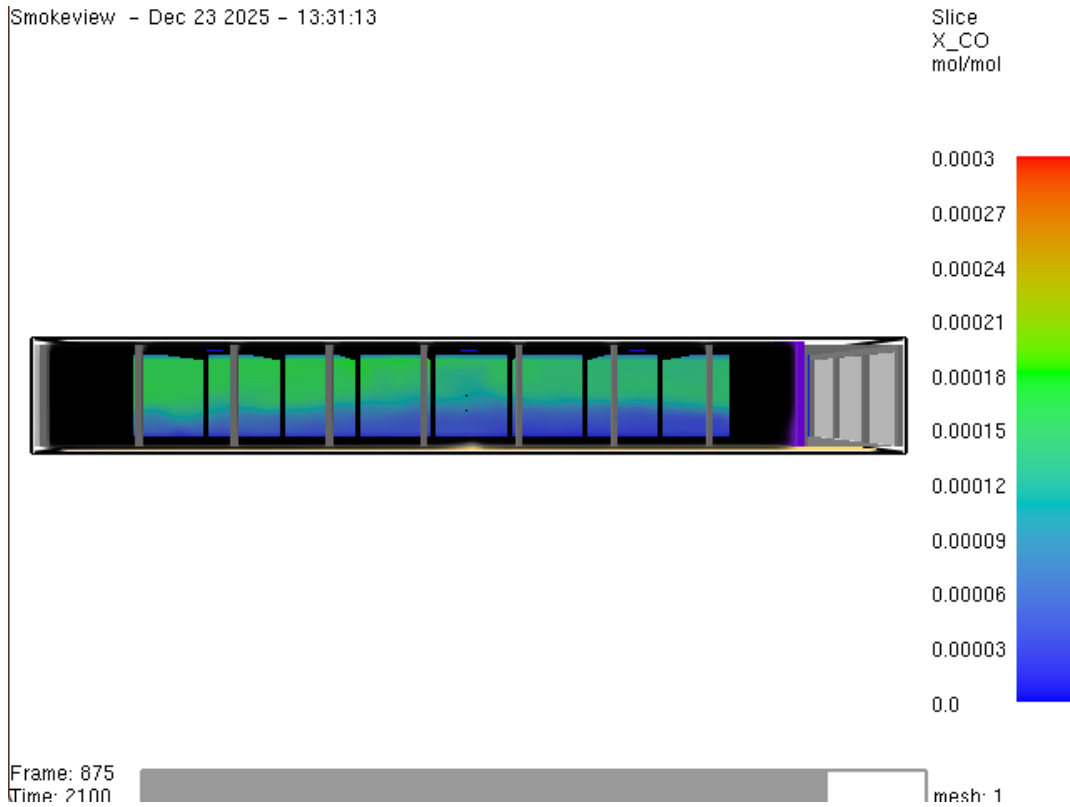


Bild A4.27: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2100 s



Bild A4.28: Rußausbeute nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

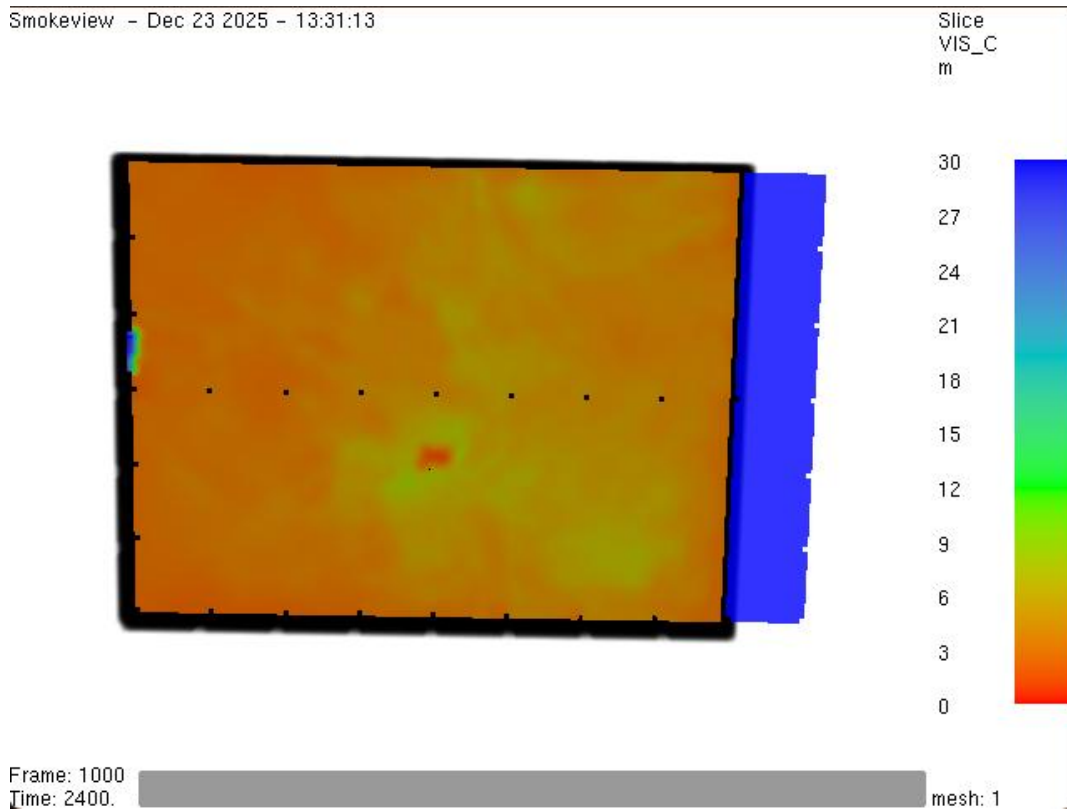


Bild A4.29: Sichtweite nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

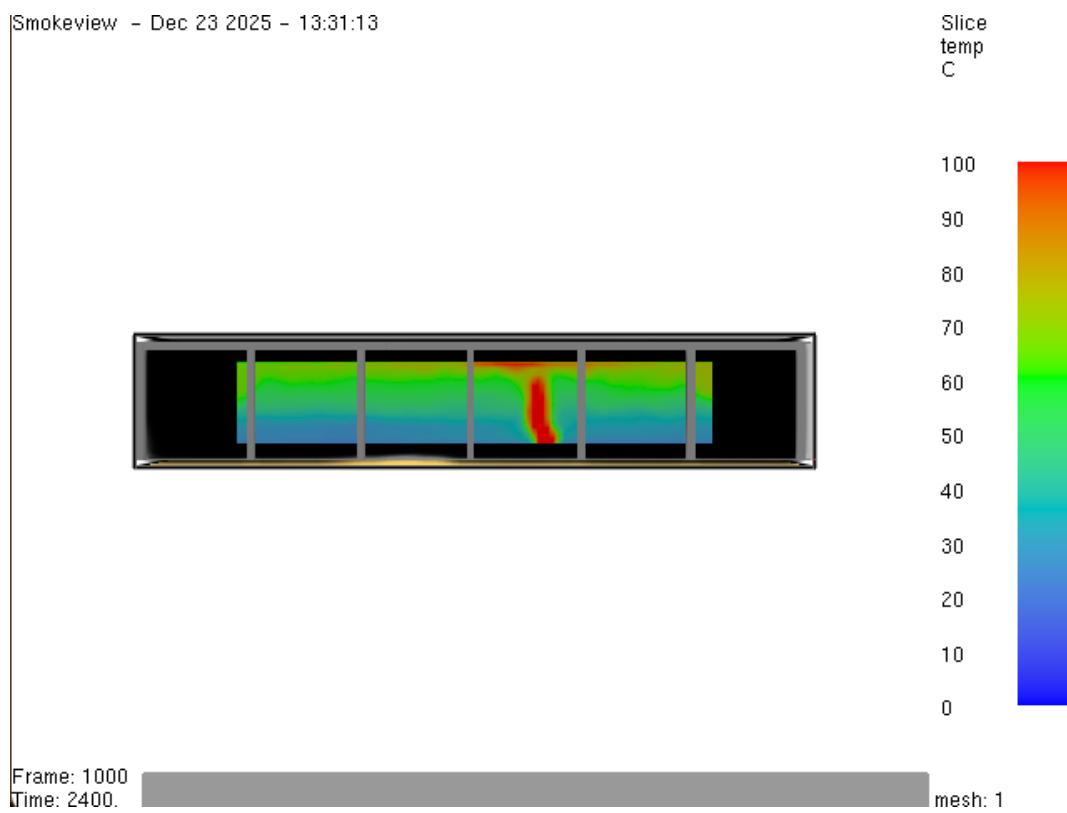


Bild A4.30: Temperatur nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

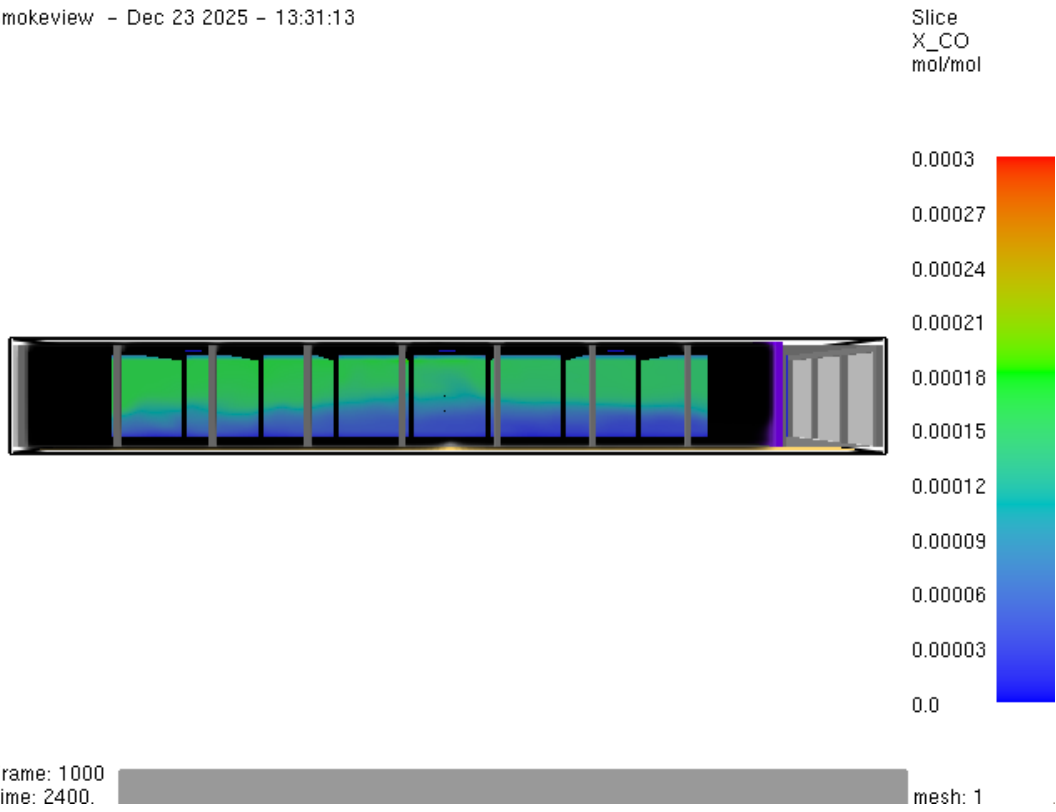


Bild A4.31: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

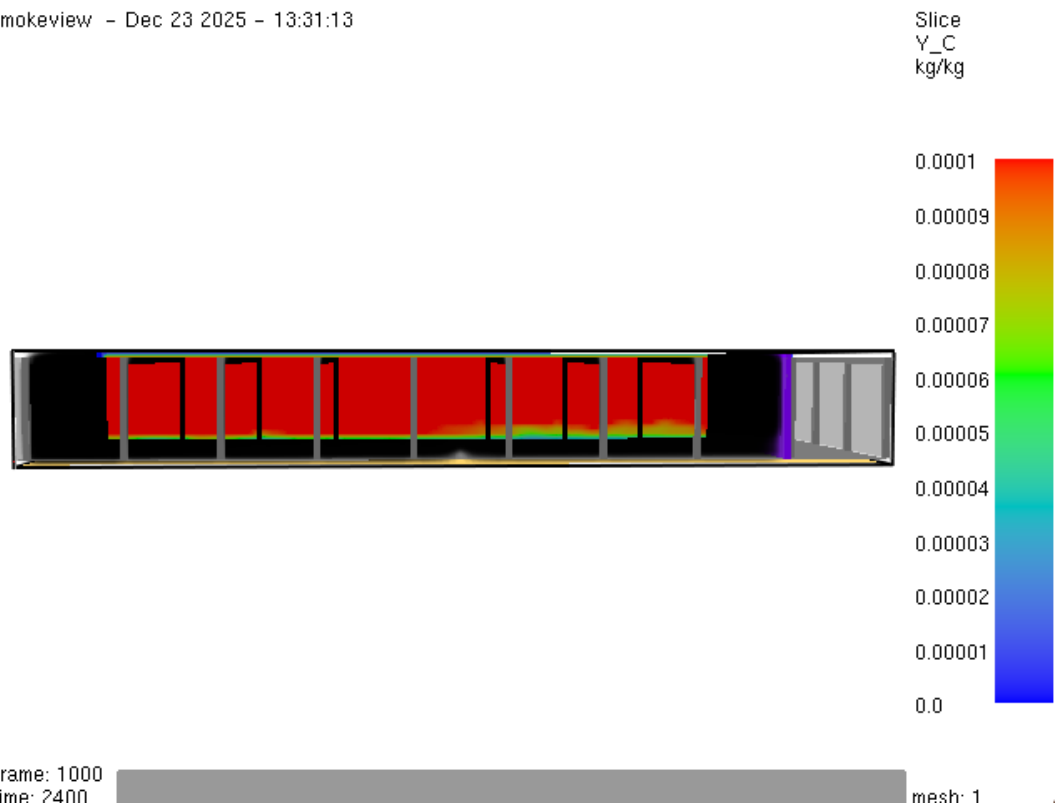


Bild A4.32: Rußausbeute nach t=2400 s

A5. Anhang zum FDS Beispiel Verkaufsstätte mit BMA

Quelltext FDS:

```

---FDS-Eingaben Realbrandversuch für Verkaufsstätte mit BMA---
---Definition der Grundeinstellungen (Simulationsprofil)---
&HEAD CHID='VK2', TITLE='Simulation Verkaufsstaeette mit BMA'
&TIME T_END= 2400. /
&MESH IJK= 137, 92, 18, XB=0.0, 68.5, 0.0, 46.0, -0.5, 8.50 /
&MISC OVERWRITE = .FALSE. ,VISIBILITY_FACTOR = 8 / RESTART = .TRUE./
&DUMP NFRAMES = 1000, DT_RESTART = 100.0, MASS_FILE = .TRUE.,
DT_PL3D=30., PLOT3D_QUANTITY(1)= 'carbon monoxide', PLOT3D_QUANTITY(5)=
'TEMPERATURE' /

---Brand-Definition (REACTION)---
&REAC ID = 'Mischbrandlast_Drogerie'
      SOOT_YIELD = 0.060
      CO_YIELD = 0.024
      HEAT_OF_COMBUSTION = 17900
      N = 0.0
      C = 2.0
      H = 4.0
      O = 0.0
      RADIATIVE_FRACTION = 0.35/

---Definition der Materialien und Oberflächen---
---Materialien---
&MATL ID = 'BETON'
      CONDUCTIVITY = 1.4
      SPECIFIC_HEAT = 1.0
      ENSITY = 2000. /

&MATL ID = 'MAUERSTEIN'
      CONDUCTIVITY = 0.69
      SPECIFIC_HEAT = 0.84
      DENSITY = 1600. /

&MATL ID = 'GIPSKARTON'

```

ANHANG

CONDUCTIVITY = 0.48
SPECIFIC_HEAT = 0.84
DENSITY = 1440. /

---Oberflächen---

&SURF ID = 'STUETZE'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'BETON'
THICKNESS = 0.40 /

&SURF ID = 'TRAEGER'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'BETON'
THICKNESS = 0.40 /

&SURF ID = 'BRANDWAND'
RGB = 127,0,255
MATL_ID = 'BETON'
THICKNESS = 0.25 /

&SURF ID = 'AUSSENWAND'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'MAUERSTEIN'
THICKNESS = 0.50
TRANSPARENCY = 0.30 /

&SURF ID = 'DACH'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'GIPSKARTON',
THICKNESS = 0.10 /

&SURF ID = 'BODENPLATTE'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'BETON'
THICKNESS = 0.25 /

&SURF ID='FEUER', RGB=255,0,0, HRRPUA=500, RAMP_Q = 'brand_kurve' /

---Festlegen der Zeitlichen Brandentwicklung (RAMP-FUNKTION)---

&RAMP ID='brand_kurve', T=0.0, F=0.0 /

&RAMP ID='brand_kurve', T=600.0, F=1.0 /

---Einfügen des Gebäudemodells--

&OBST XB=0.00,68.00,0.00,46.00,-0.25,0.00,SURF_ID='BODENPLATTE' /

&OBST XB=60.00,60.25,0.00,46.00,0.00,8.50, SURF_ID='BRANDWAND' /

&OBST XB=0.40,0.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=7.90,8.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=15.40,15.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=22.90,23.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=30.40,30.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=37.90,38.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=45.40,45.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=52.90,53.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=60.40,60.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,15.40,15.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,15.40,15.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=7.90,8.30,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=15.40,15.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=22.90,23.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=30.40,30.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=37.90,38.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=45.40,45.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=52.90,53.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=60.40,60.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,22.90,23.30,0.00, 8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,30.40,30.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,30.40,30.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,37.90,38.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,37.90,38.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=7.90,8.30,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=15.40,15.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=22.90,23.30,45.40,45.80,0.00, 8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=30.40,30.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=37.90,38.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=45.40,45.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=52.90,53.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=60.40,60.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=7.90,8.30,0.40,45.80,7.40,8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=15.40,15.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=22.90,23.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=30.40,30.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=37.90,38.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=45.40,45.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=52.90,53.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=67.90,68.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /

&OBST XB= 0.00,68.70, 0.00,0.50, 0.00,8.00,SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 0.00, 0.50, 0.00,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 0.00, 68.70, 45.70,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 68.30,68.70, 0.00,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /

&OBST XB= 0.00, 68.70, 0.00, 46.20, 8.00, 8.10, SURF_ID='DACH' /

---Implementierung der Brandmeldeanlage---
&PROP ID='Rauchmelder' , QUANTITY='CHAMBER OBSCURATION', LENGTH= 1.8 /
Definition eines Stanard-Rauchmelders

&DEVC ID='BMA1_M1' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 4.35, 34.65, 7.9 /
&DEVC ID='BMA1_M2' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 11.90, 7.00, 7.9 /
&DEVC ID='BMA1_M3' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 19.35, 34.65, 7.9 /
&DEVC ID='BMA1_M4' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 26.10, 11.55, 7.9 /
&DEVC ID='BMA2_M1' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 33.85, 34.65, 7.9 /
&DEVC ID='BMA2_M2' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 41.85, 11.55, 7.9 /

ANHANG

&DEVC ID='BMA2_M3' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 49.35, 38.90, 7.9 /

&DEVC ID='BMA2_M4' , PROP_ID='Rauchmelder' , XYZ = 55.75, 11.55, 7.9 /

&CTRL ID='Ausloesung_Melder', FUNCTION_TYPE='ANY',
INPUT_ID='BMA1_M1','BMA1_M2','BMA1_M3','BMA1_M4','BMA2_M1','BMA2_M2','BMA
2_M3','BMA2_M4' /

&CTRL ID='RWA_Start', FUNCTION_TYPE='ANY', INPUT_ID='Ausloesung_Melder',
DELAY= 30.0 /

---Zu- und Abluftflächen (Öffnungen)---

Abluft: 6x RWA im Dach a 1,50 x 1,50 m

&HOLE XB= 11.10, 12.60,10.80, 12.30,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 11.10, 12.60,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 26.10, 27.60,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 33.60, 35.10,10.80, 12.30,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 48.60, 50.10,10.80, 12.30,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

&HOLE XB= 48.60, 50.10,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

Zuluft: Ein Tor in Fassade a 4,00 x 4,00 m, 2 x Tür in Fassade 1,00 m x
2,00 m

&HOLE XB= -0.10, 0.50, 24.80, 28.80, 0.00, 4.00 /

&HOLE XB= 33.85, 34.85, -0.10, 0.50, 0.00, 2.00 /

&HOLE XB= 33.85, 34.85, 45.70, 46.30, 0.00, 2.00 /

Das Feuer

&VENT XB= 29.0,32.0, 15.0, 17.0, 0.01,0.01, SURF_ID='FEUER', IOR=3 /

---Messgeräte (DEVC)---

Messpunkt 1: Nah am Brandherd

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT',
ID='BRAND_LH' /

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER
TEMPERATURE', ID='BRAND_UT' /

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 6.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LOWER
TEMPERATURE', ID='BRAND_LT' /

Messpunkt 2: Hallenmitte

ANHANG

```
&DEVC XB=34.0,34.0,23.0,23.0,0.0,8.0,QUANTITY='LAYER HEIGHT',  
ID='MITTE_LH' /
```

```
&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER  
TEMPERATURE', ID='MITTE_UT' /
```

```
&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LOWER  
TEMPERATURE', ID='MITTE_LT' /
```

Personenschutzwerte auf 2,50 m Höhe:

```
&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5,QUANTITY='TEMPERATURE', ID='MITTE_TEMP_2M' /
```

```
&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION',SPEC_ID='CARBON  
MONOXIDE', ID='MITTE_CO_2M' /
```

---Visualisierung (SLCF)---

Temperaturen (Hitzeausbreitung):

```
&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
```

```
&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
```

HRRPUV:

```
&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='HRRPUV' /
```

Sichtweite und Gase:

```
&SLCF PBZ= 2.5, QUANTITY='VISIBILITY' /
```

```
&SLCF PBZ= 5.0, QUANTITY='VISIBILITY' /
```

```
&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' /
```

Ruß-Konzentration (Dichte des Rauches):

```
&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='SOOT' /
```

---Druckausgleich---

```
&VENT MB='XMIN',SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='XMAX',SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='YMIN',SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='YMAX',SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='ZMAX',SURF_ID='OPEN' /
```

```
&TAIL /
```

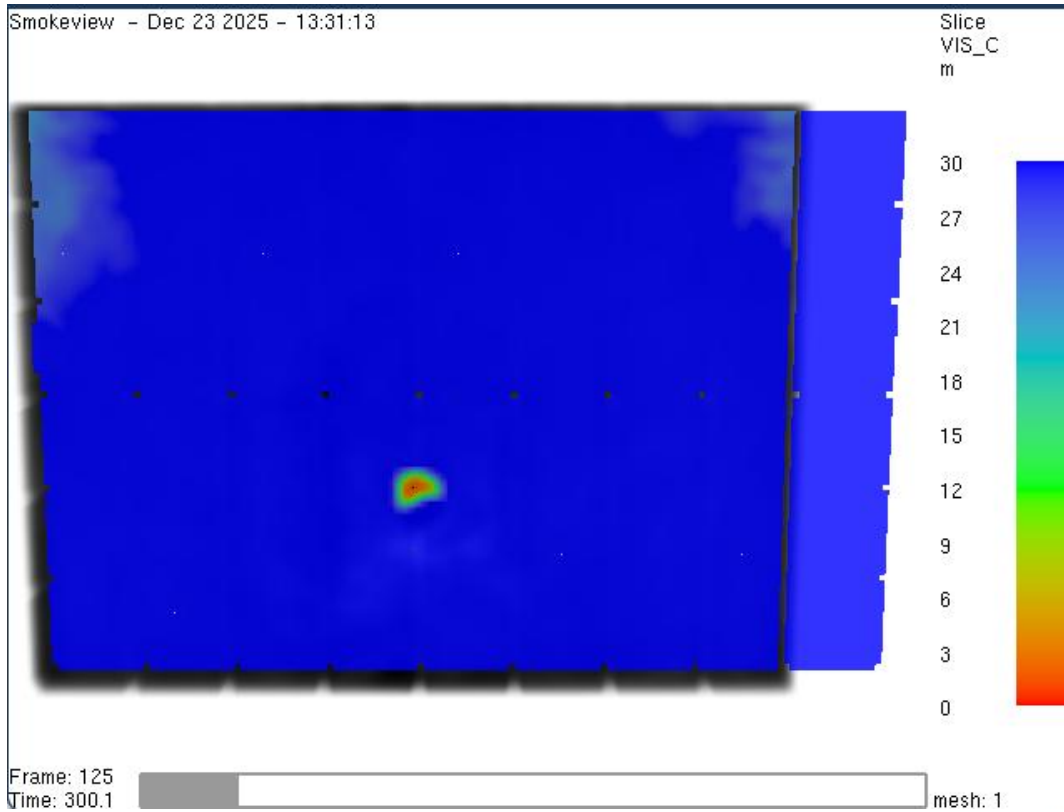


Bild A5.1: Sichtweite nach t=300 s

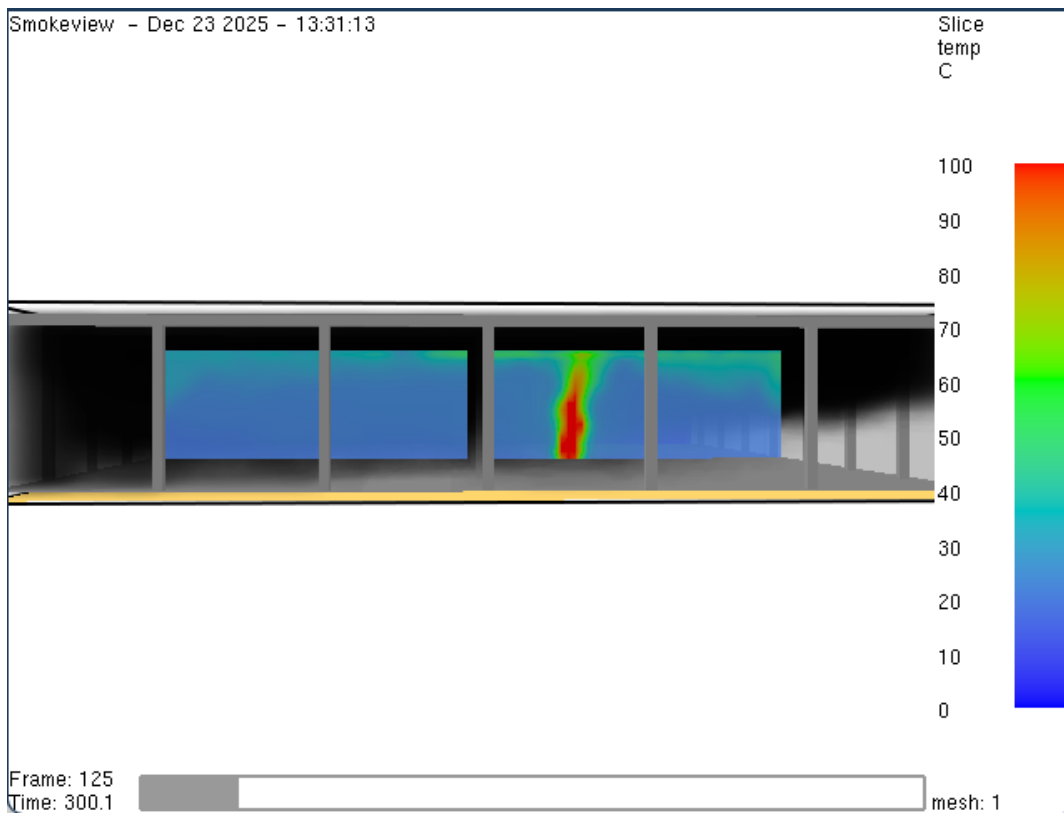


Bild A5.2: Temperatur nach t=300 s

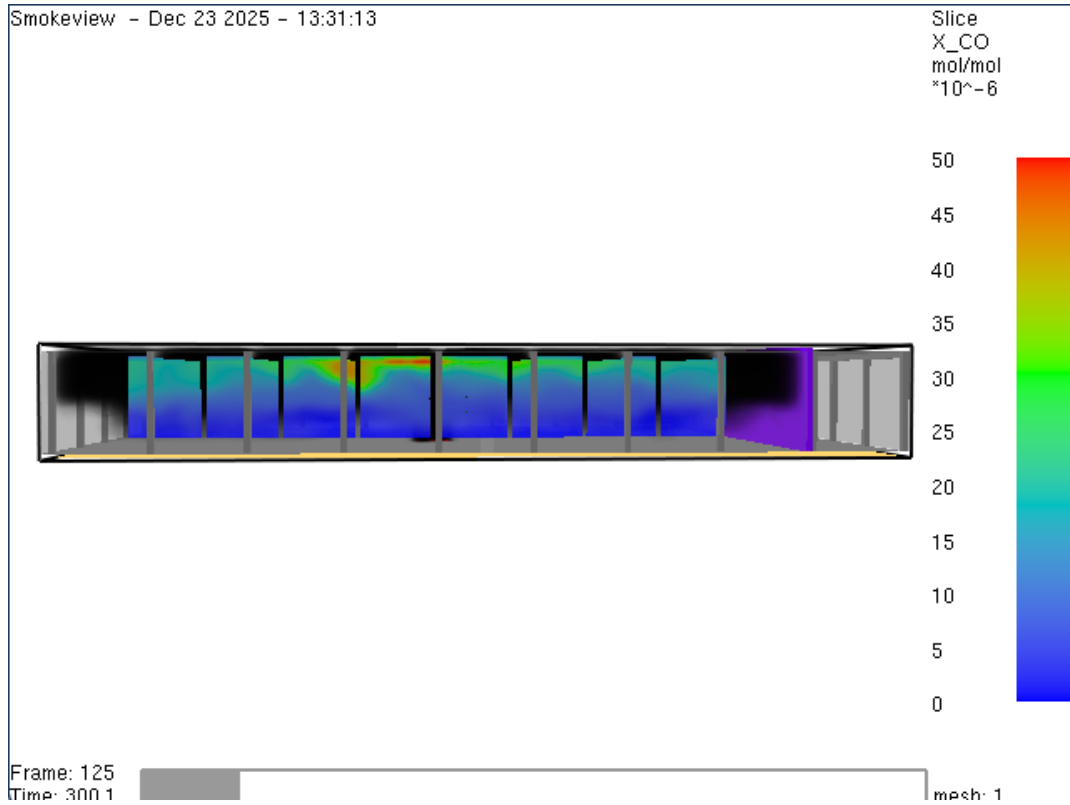


Bild A5.3: Kohlenmonoxid-Konzentration nach $t=300$ s

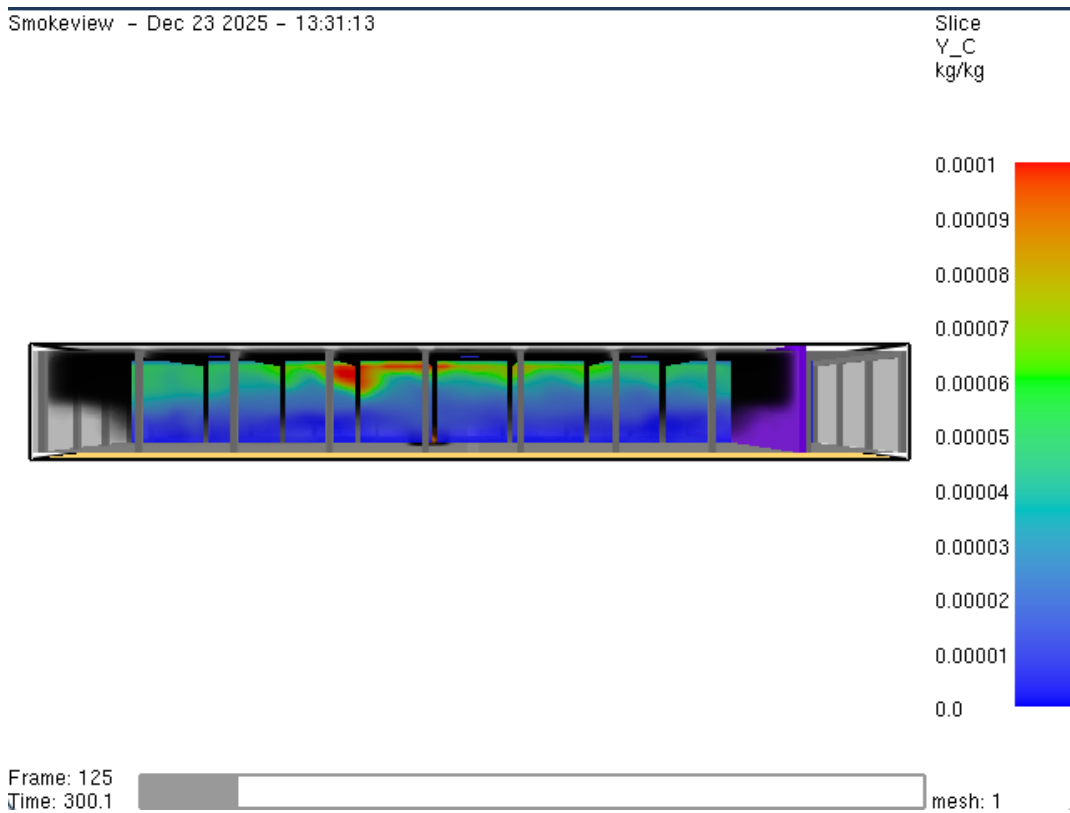


Bild A5.4: Rußausbeute nach $t=300$ s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

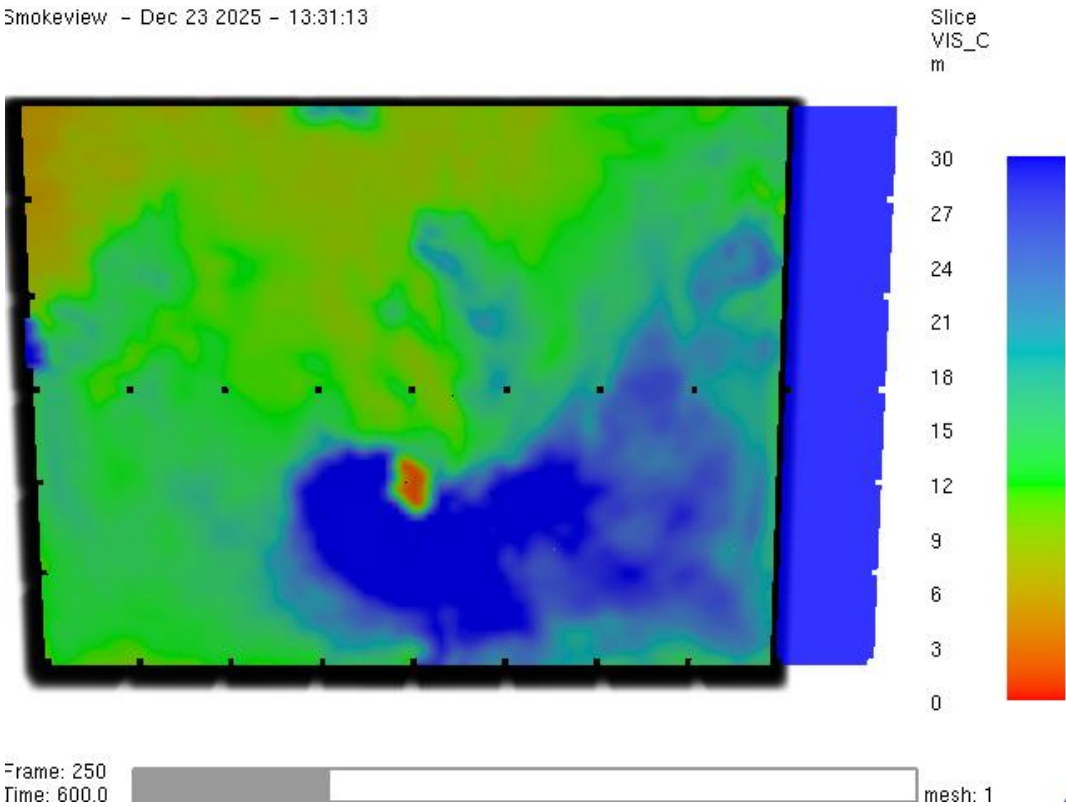


Bild A5.5: Sichtweite nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

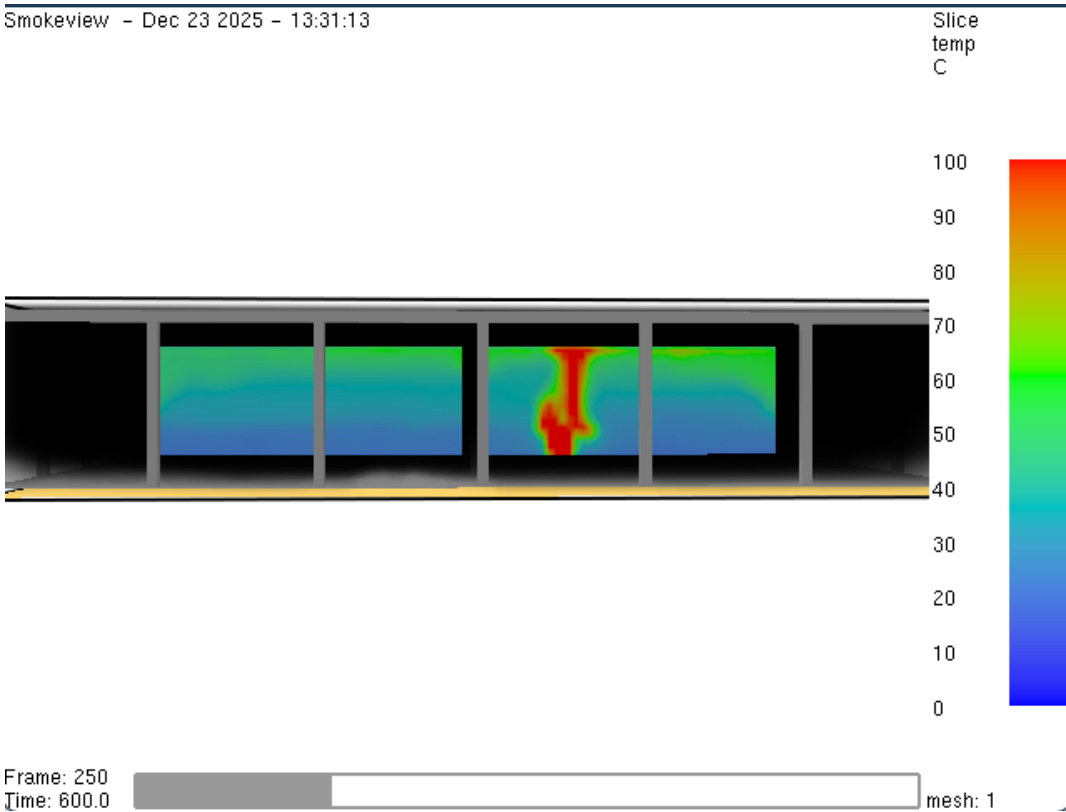


Bild A5.6: Temperatur nach t=600 s

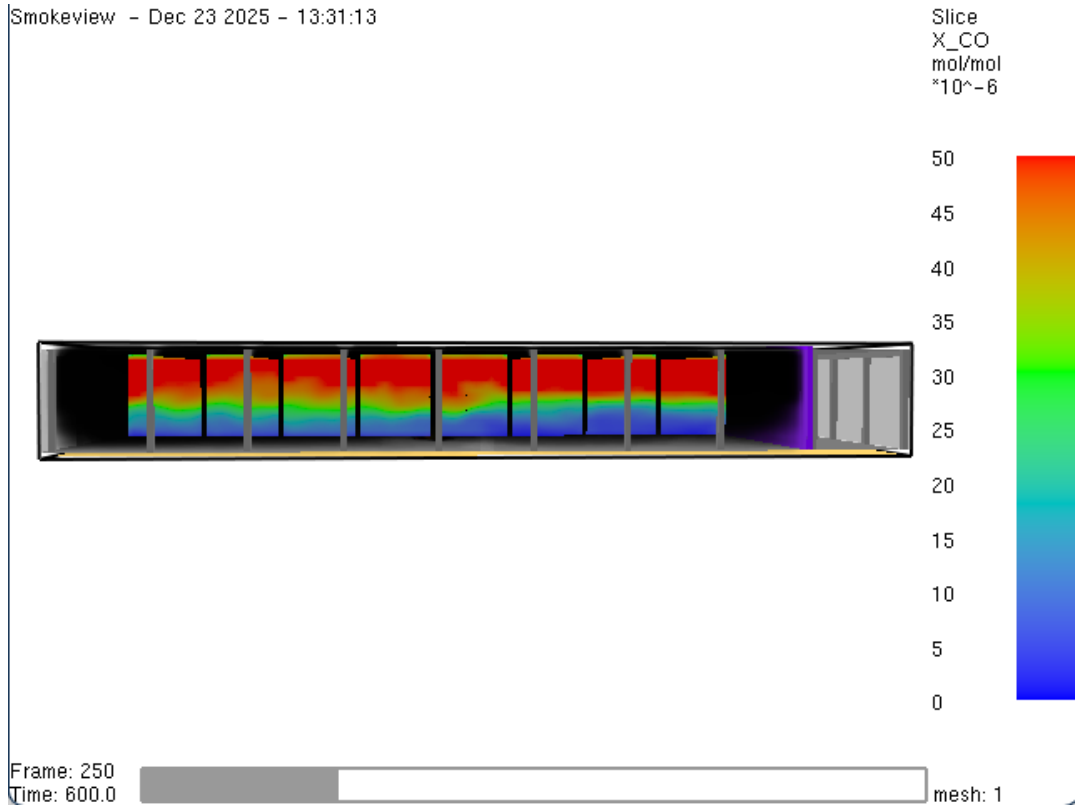


Bild A5.7: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=600 s

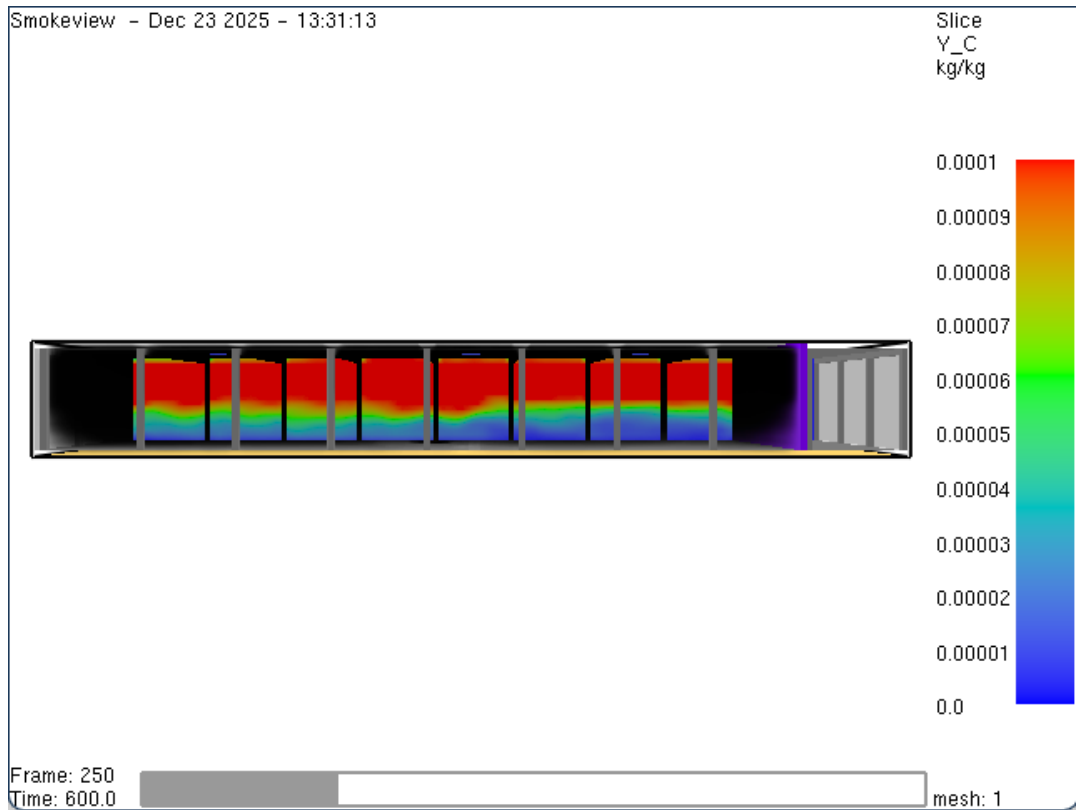


Bild A5.8: Rußausbeute nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

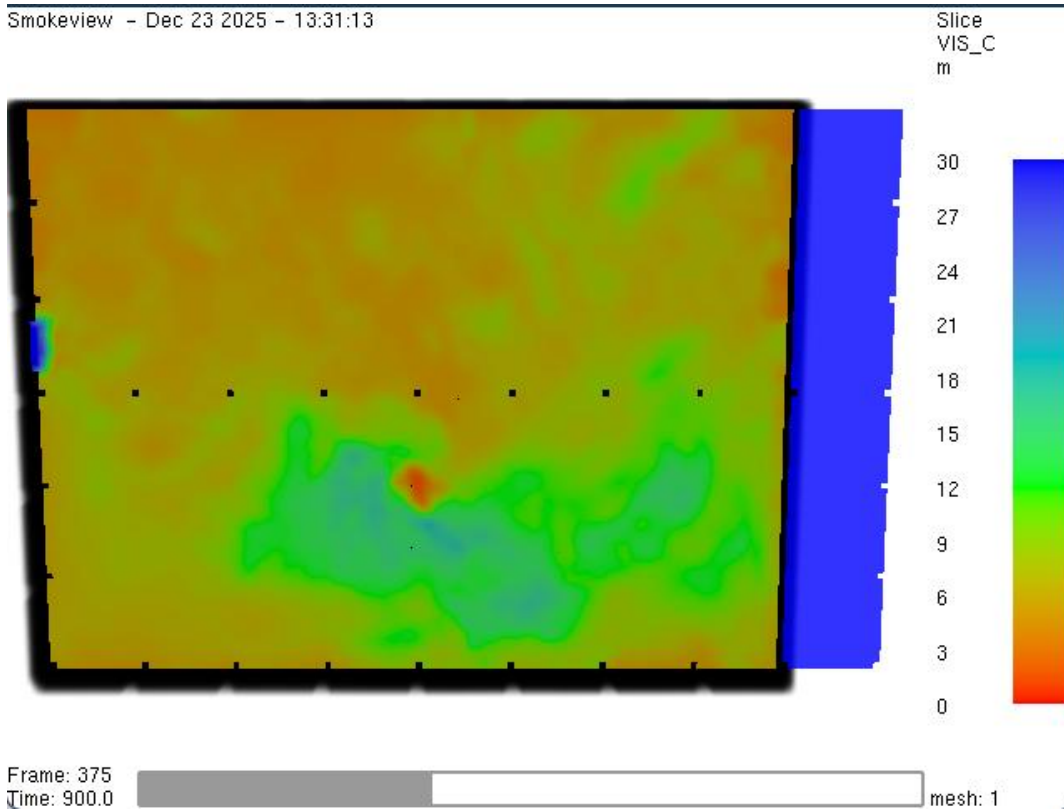


Bild A5.9: Sichtweite nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

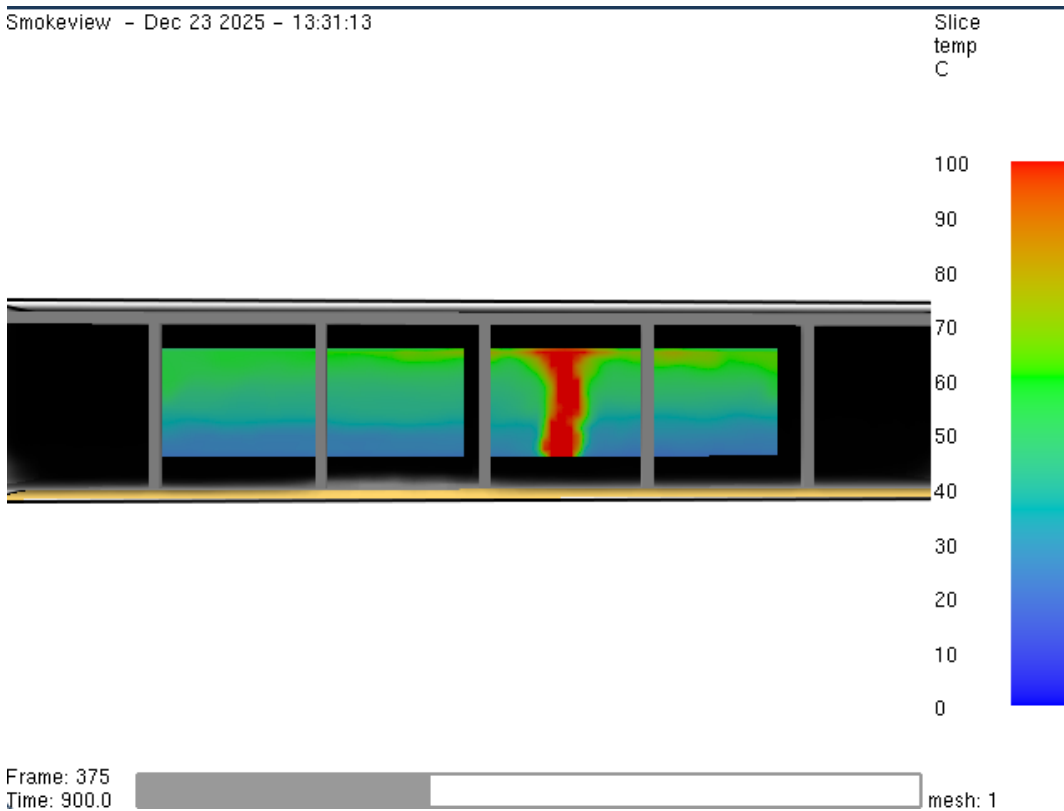


Bild A5.10: Temperatur nach t=900 s

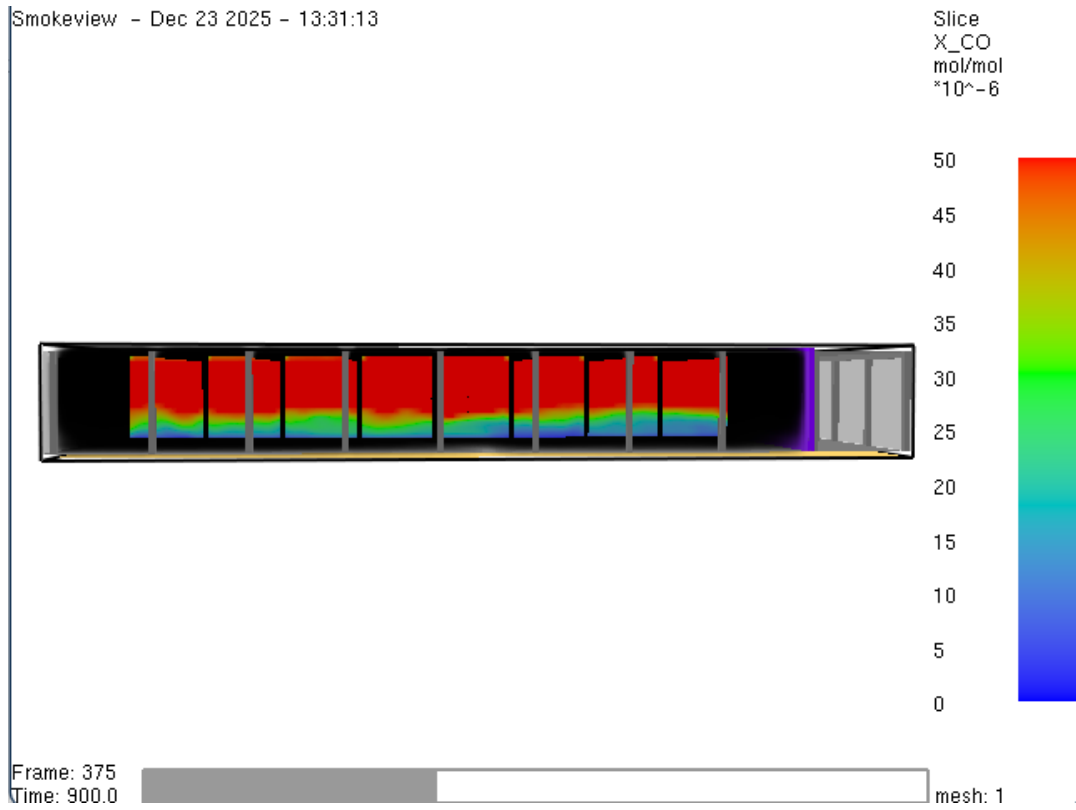


Bild A5.11: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=900 s

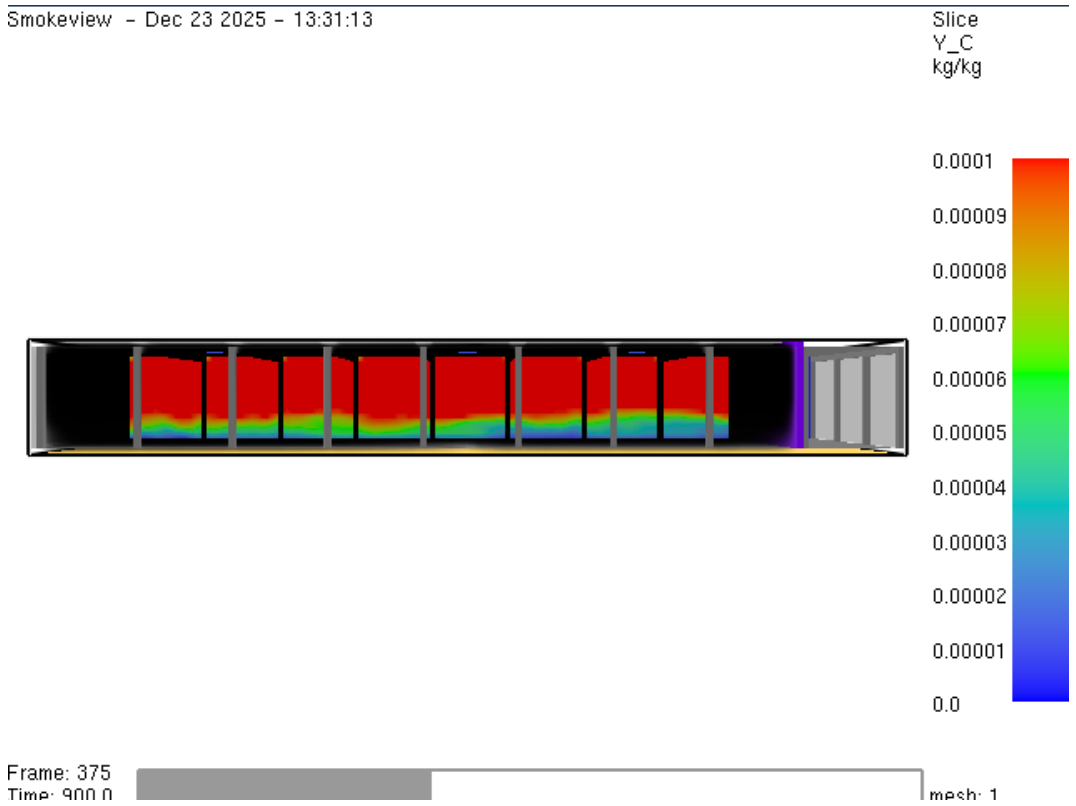


Bild A5.12: Rußausbeute nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

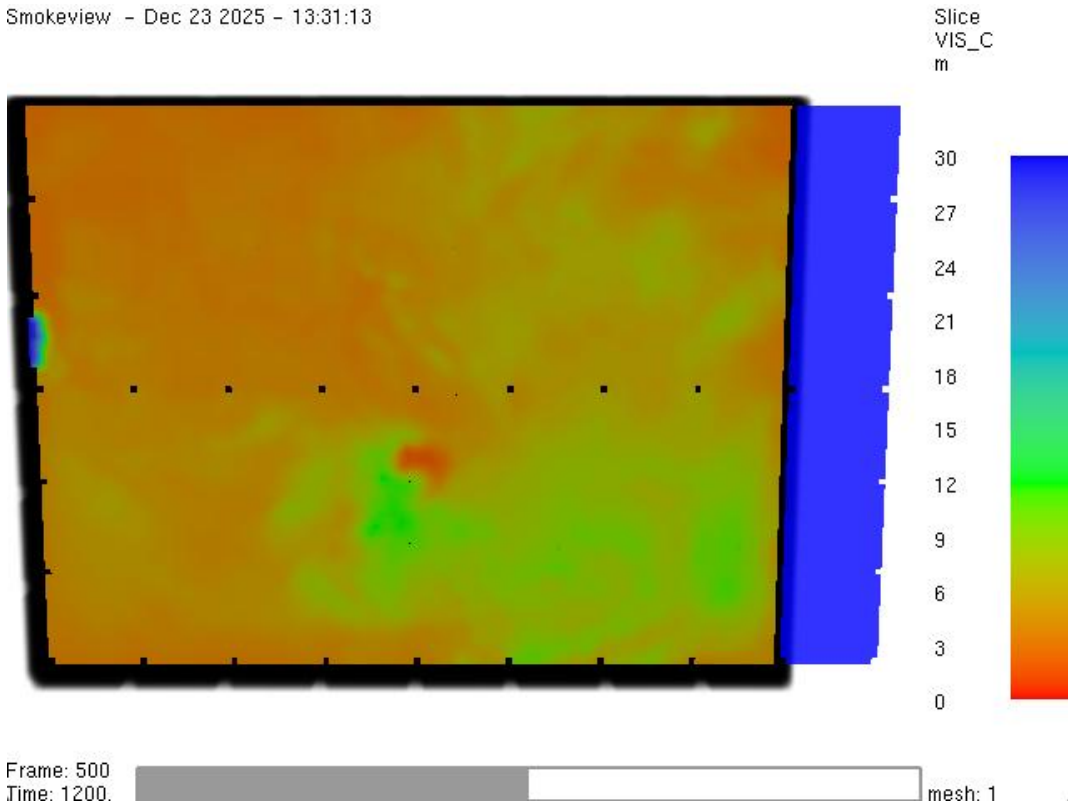


Bild A5.13: Sichtweite nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

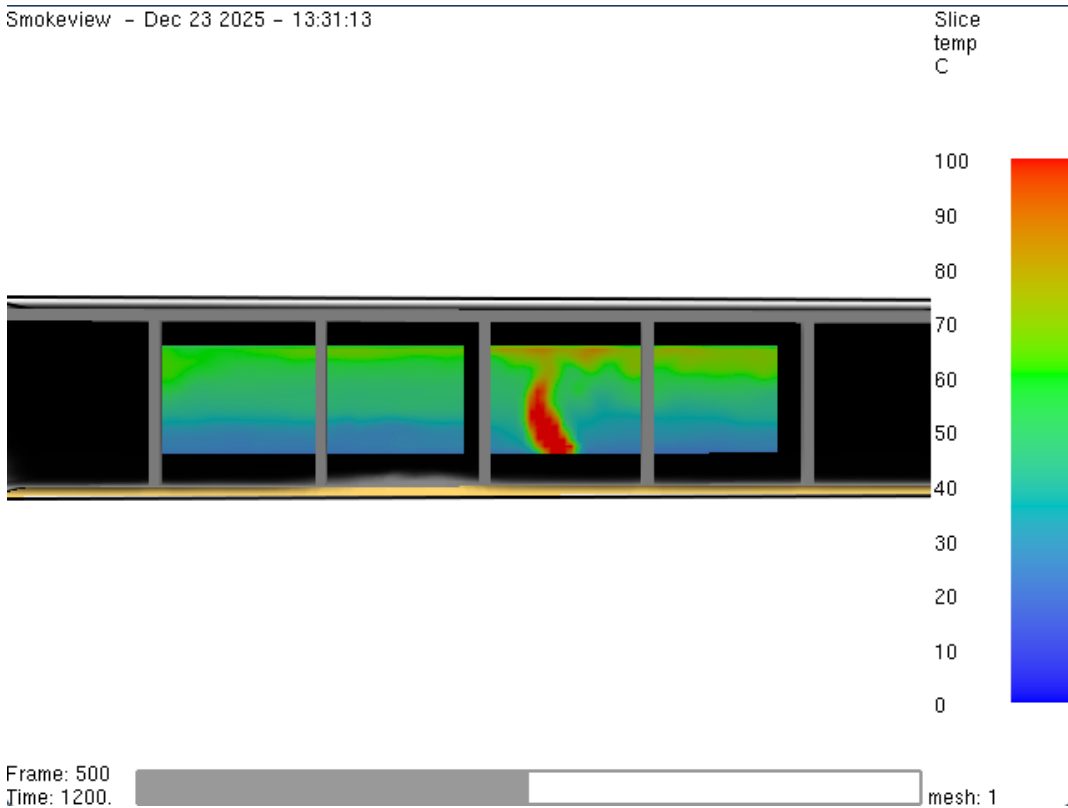


Bild A5.14: Temperatur nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

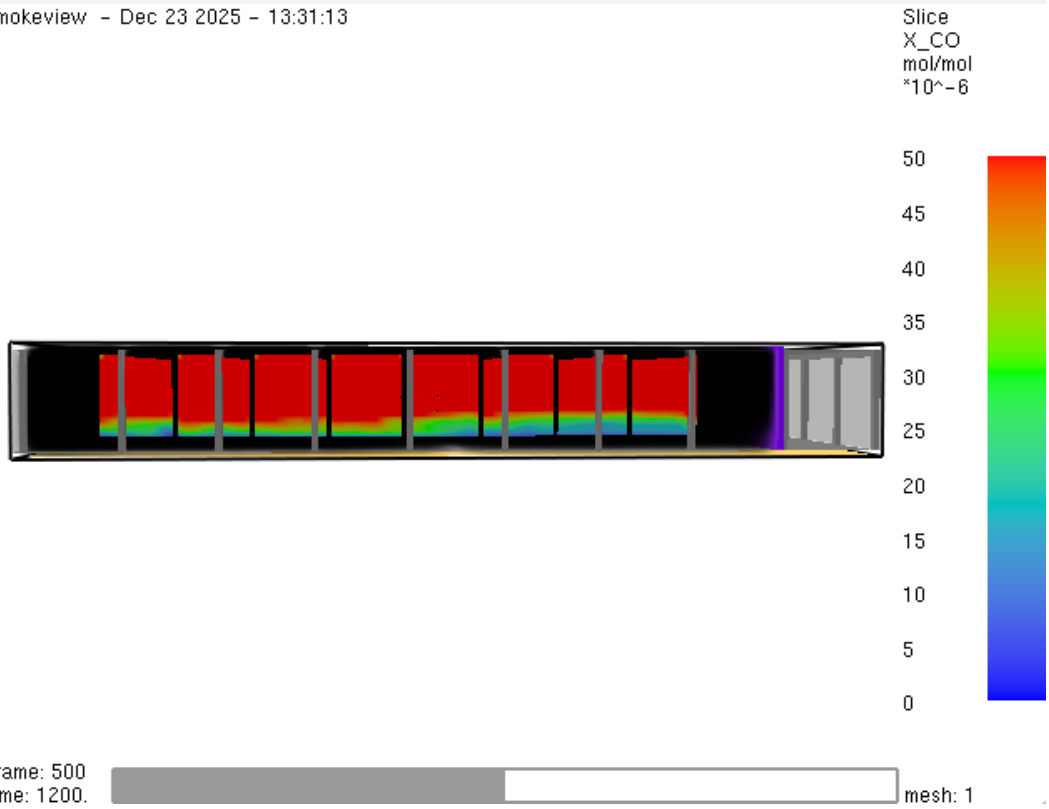


Bild A5.15: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

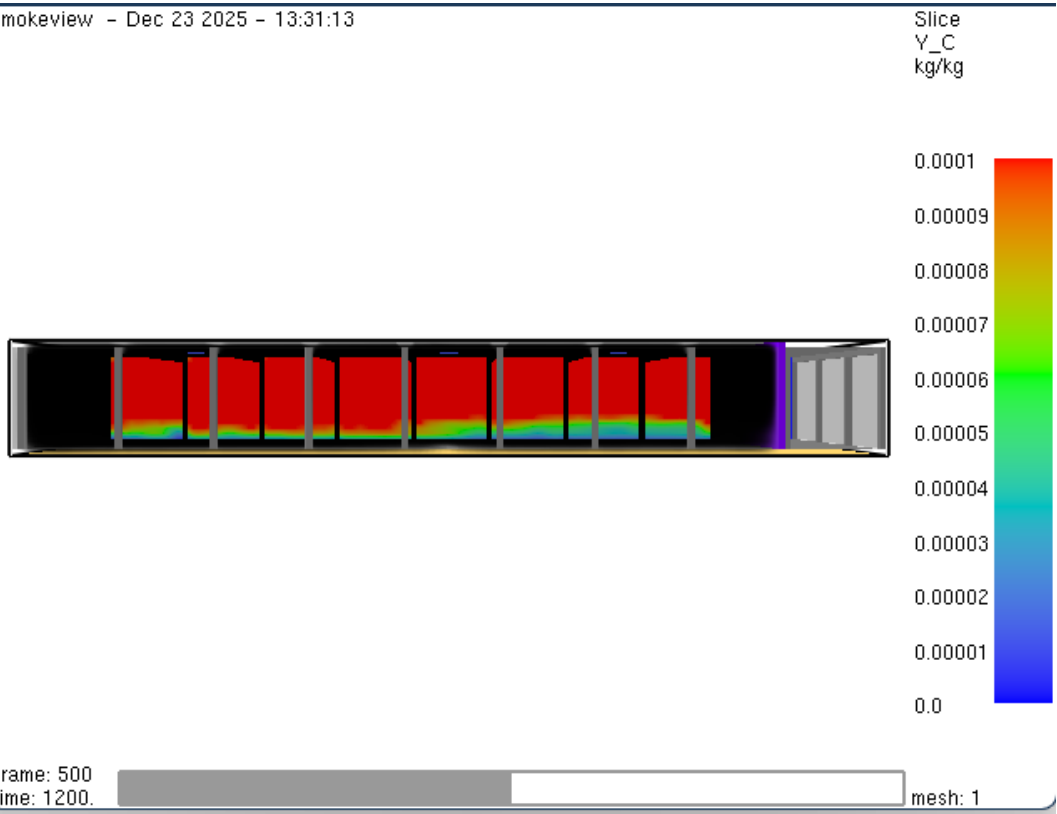


Bild A5.16: Rußausbeute nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

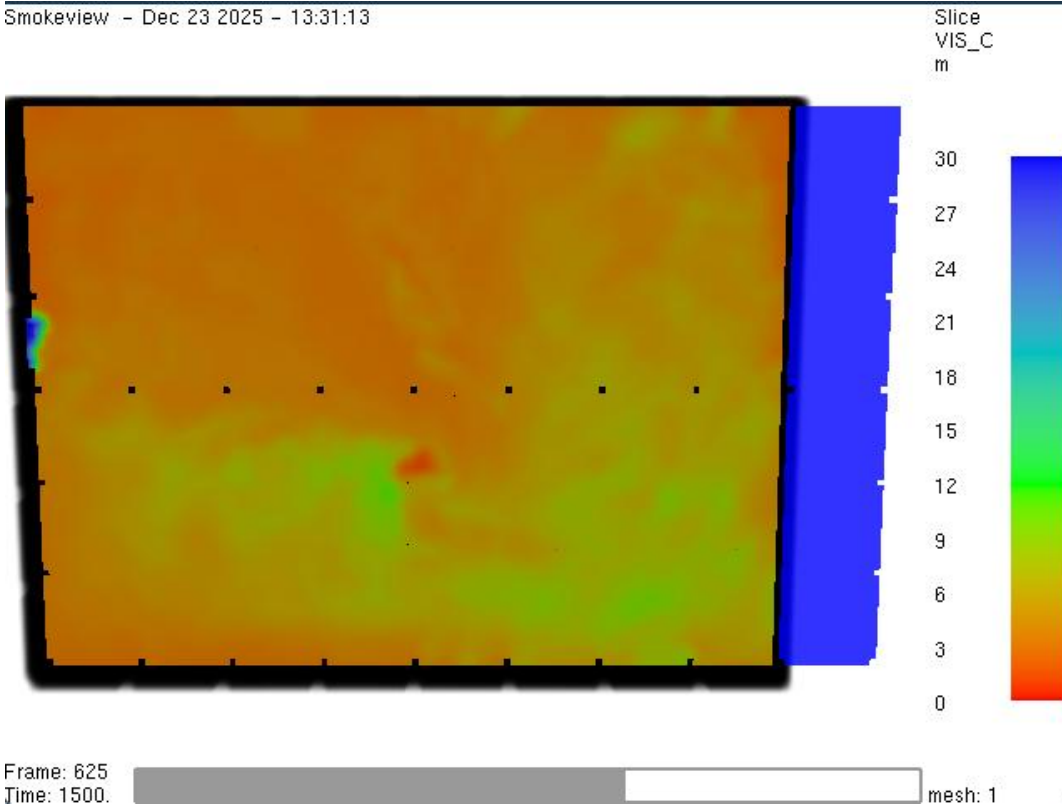


Bild A5.17: Sichtweite nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

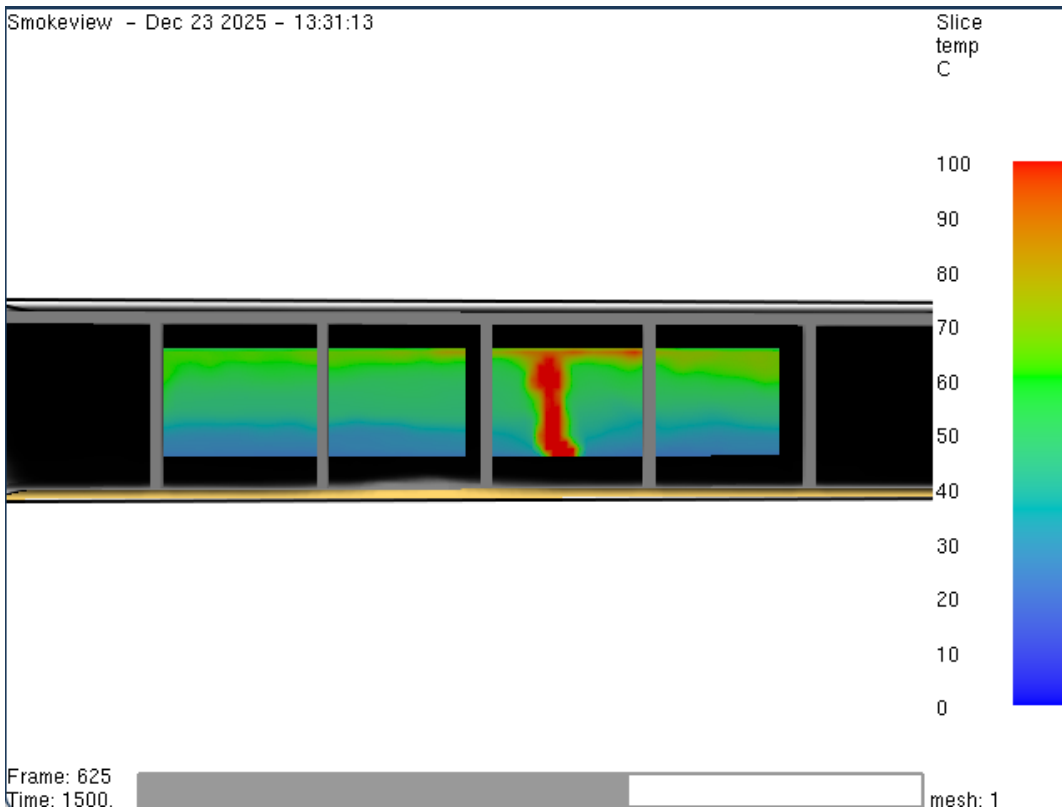


Bild A5.18: Temperatur nach t=1500 s

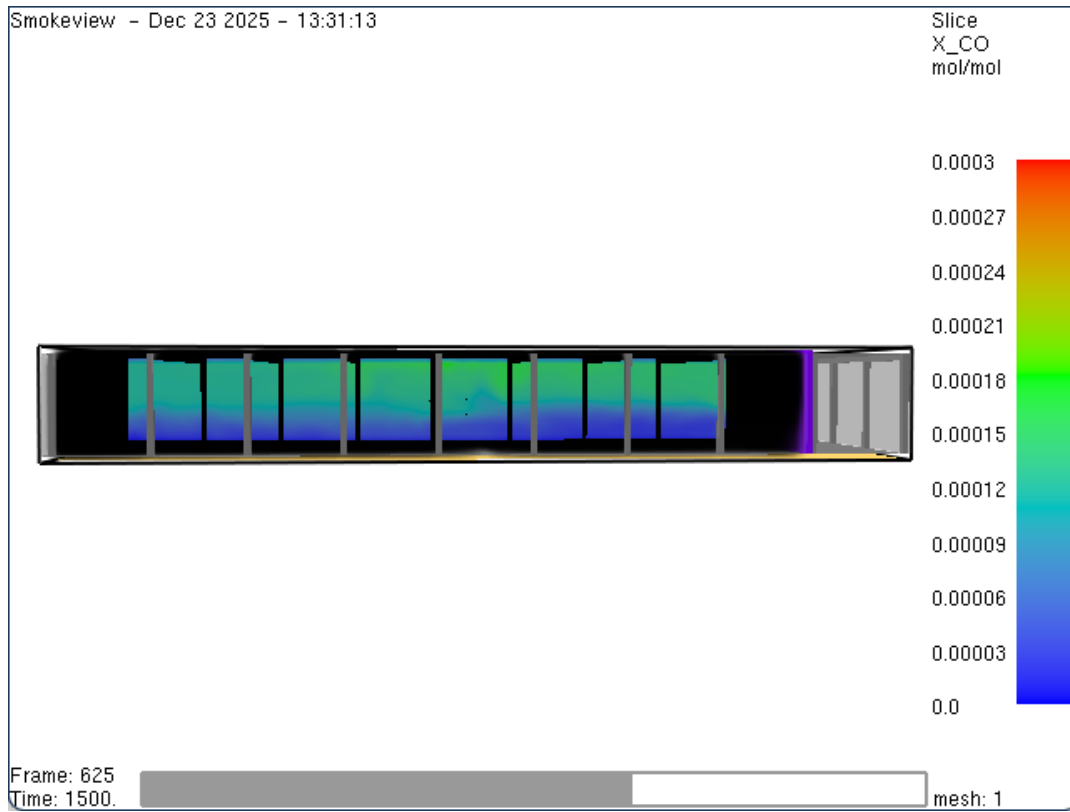


Bild A5.19: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1500 s

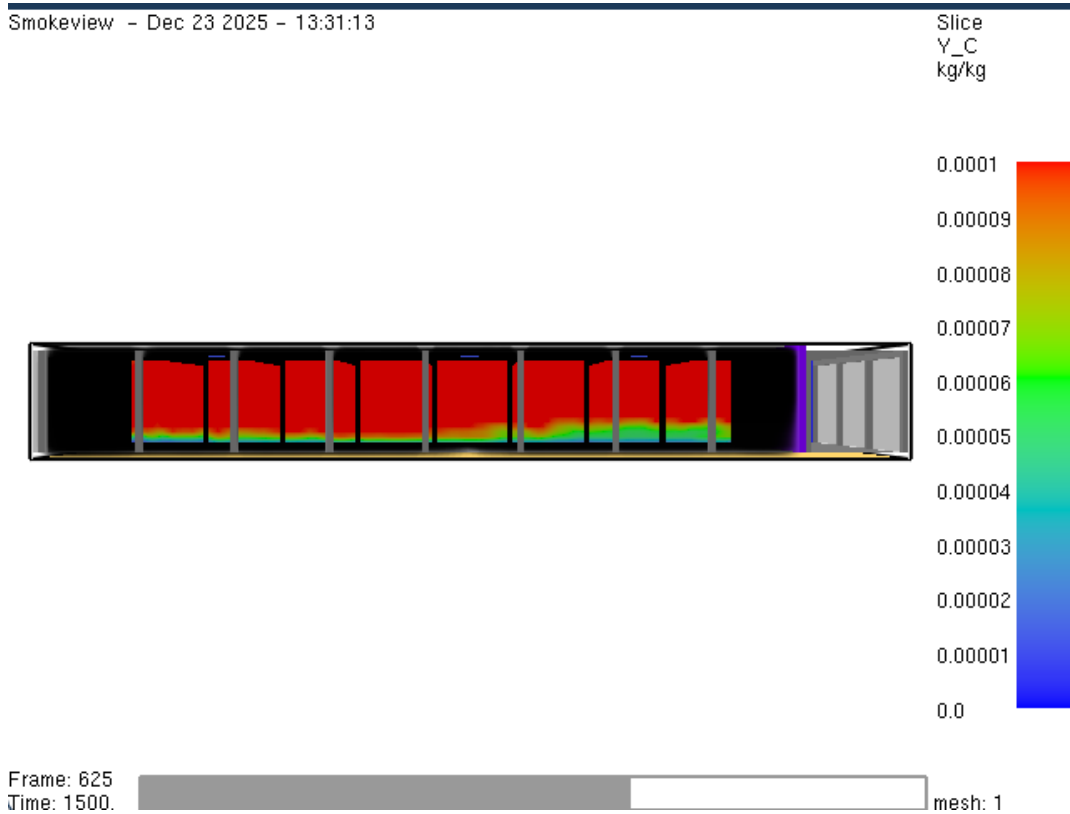


Bild A5.20: Rußausbeute nach t=1500 s

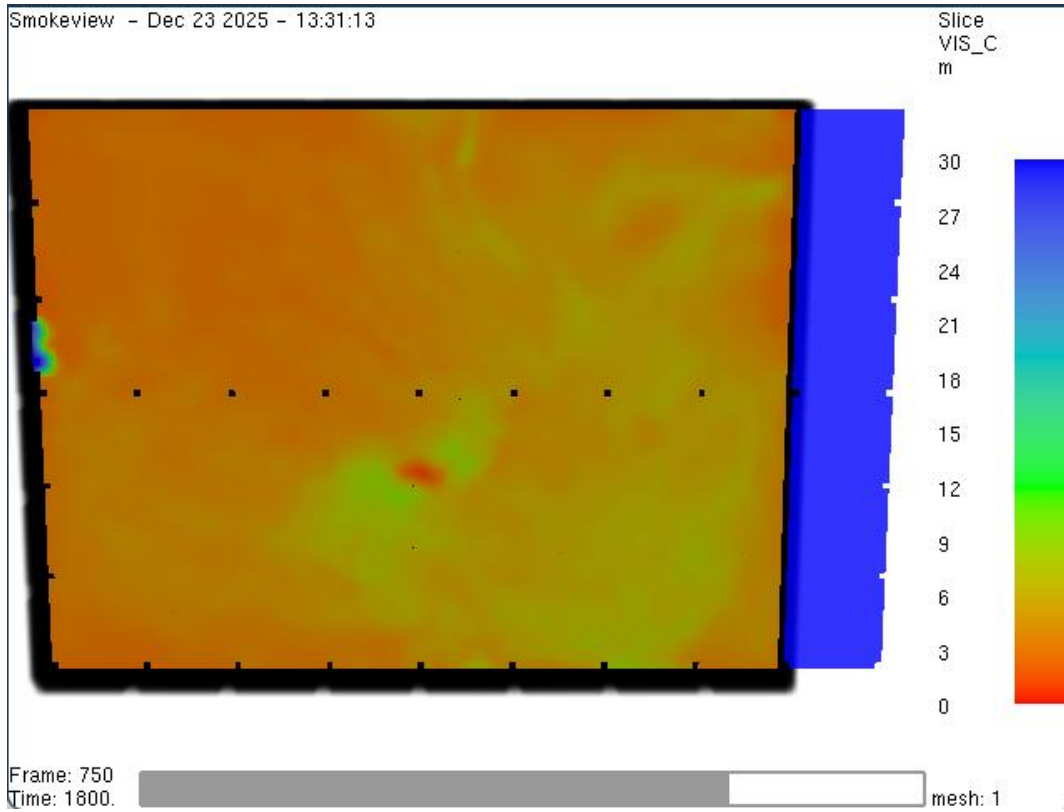


Bild A5.21: Sichtweite nach t=1800 s

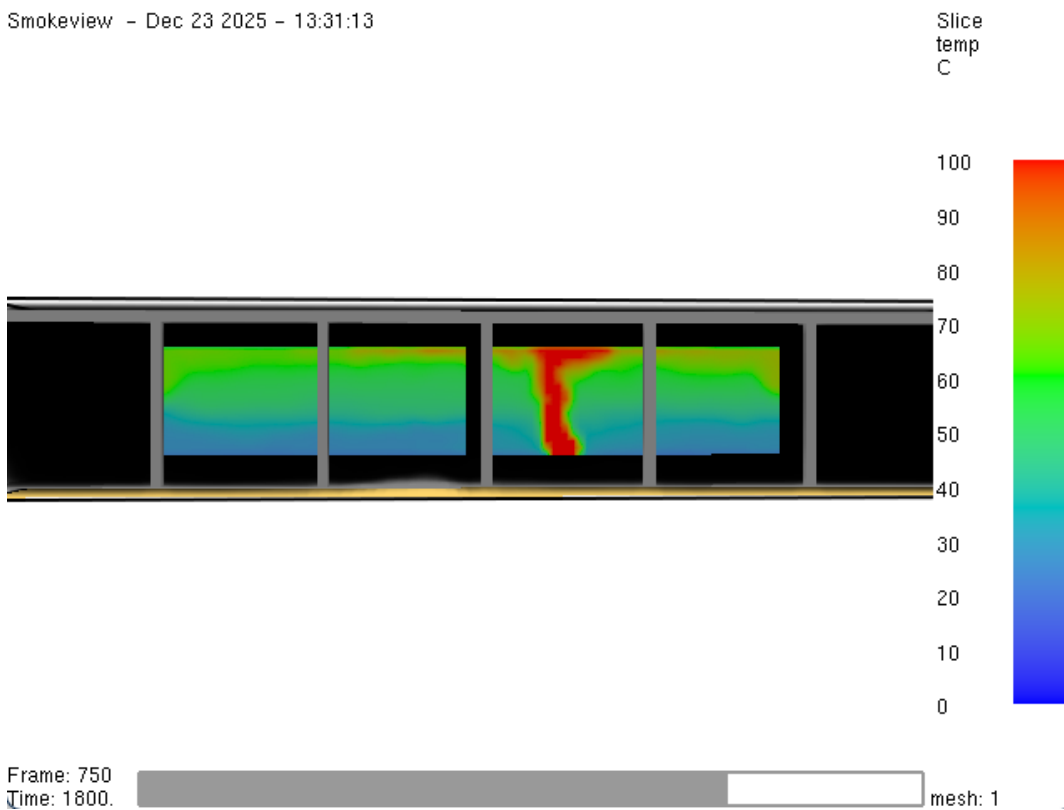


Bild A5.22: Temperatur nach t=1800s

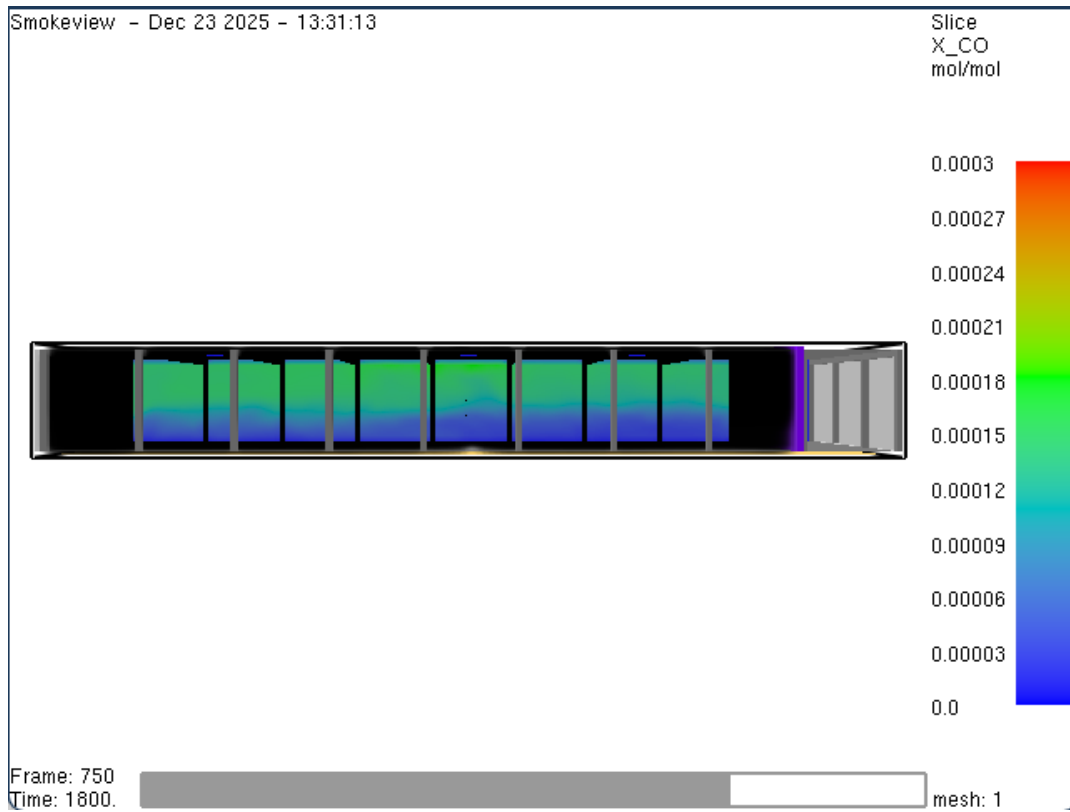


Bild A5.23: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1800 s

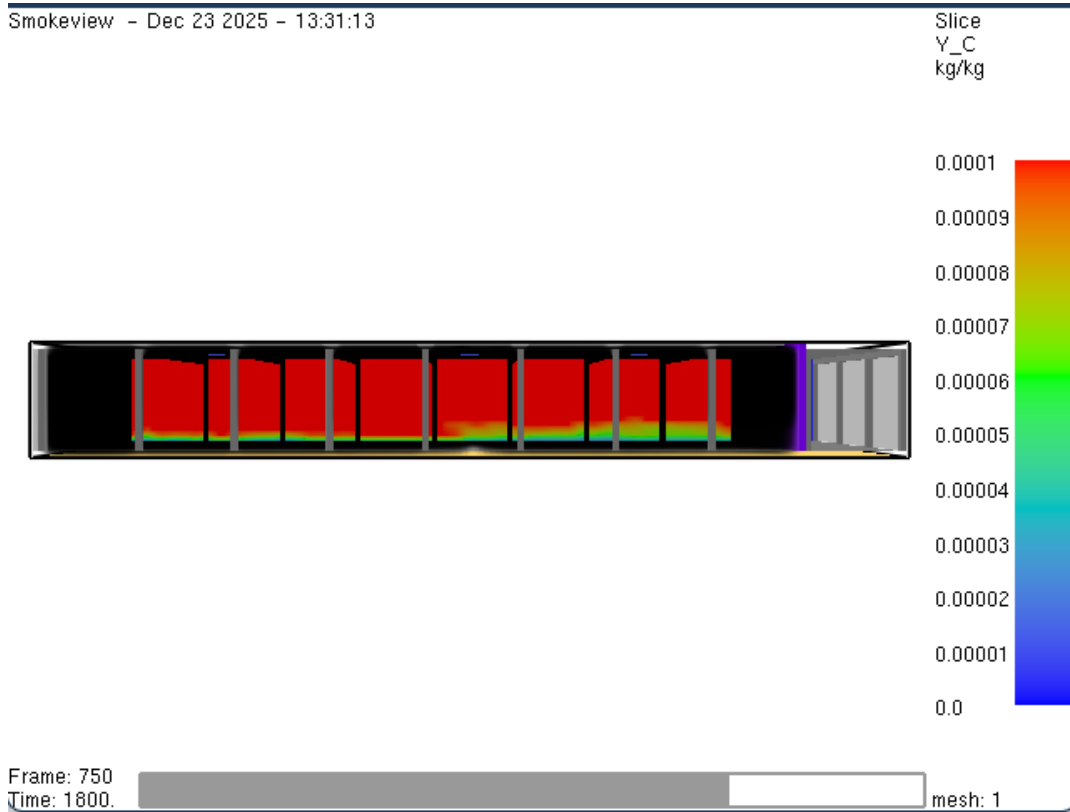


Bild A5.24: Rußausbeute nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

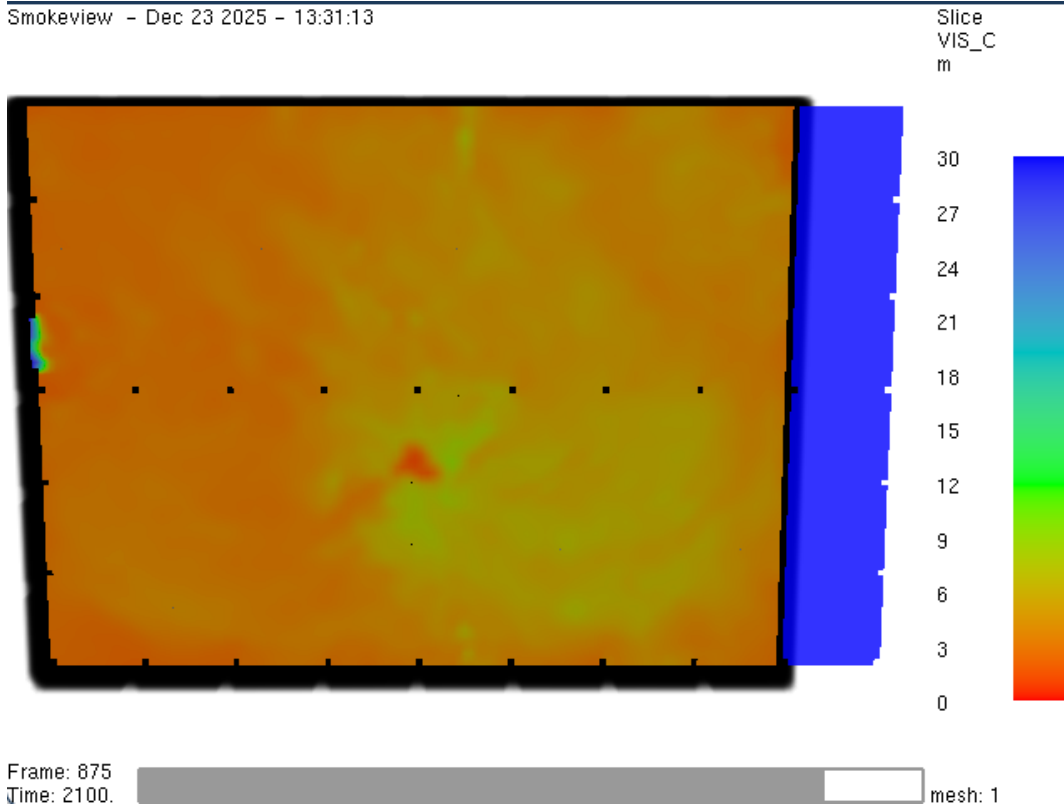


Bild A5.25: Sichtweite nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

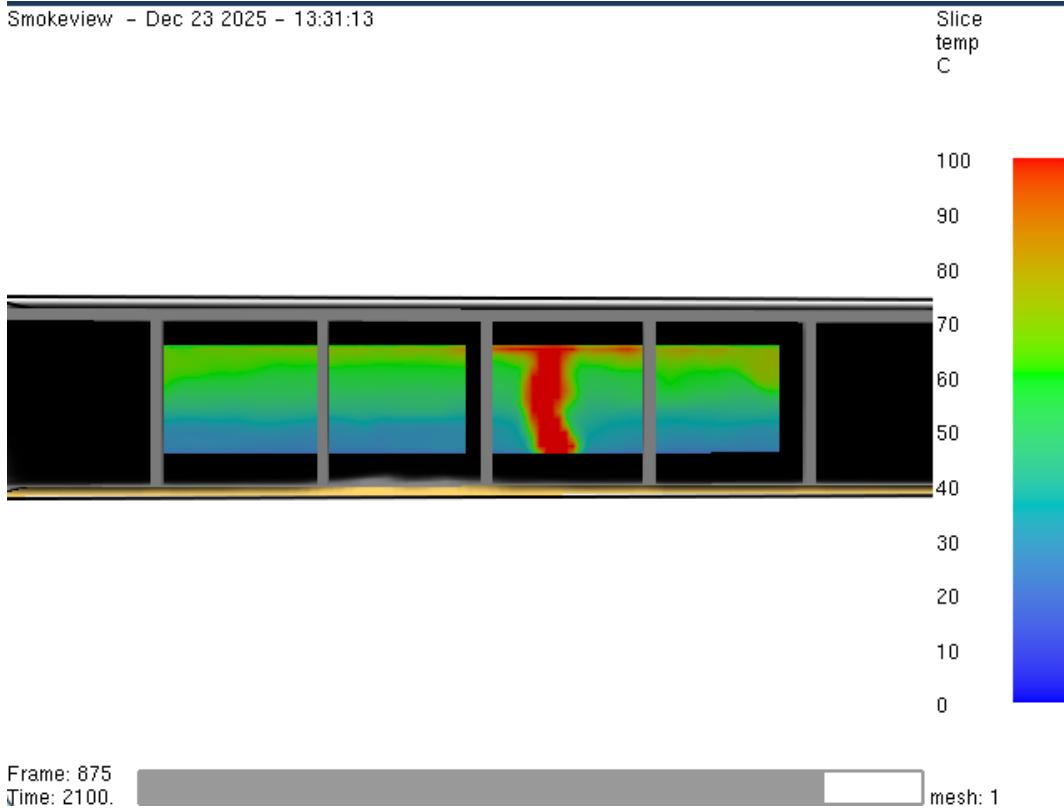


Bild A5.26: Temperatur nach t=2100 s

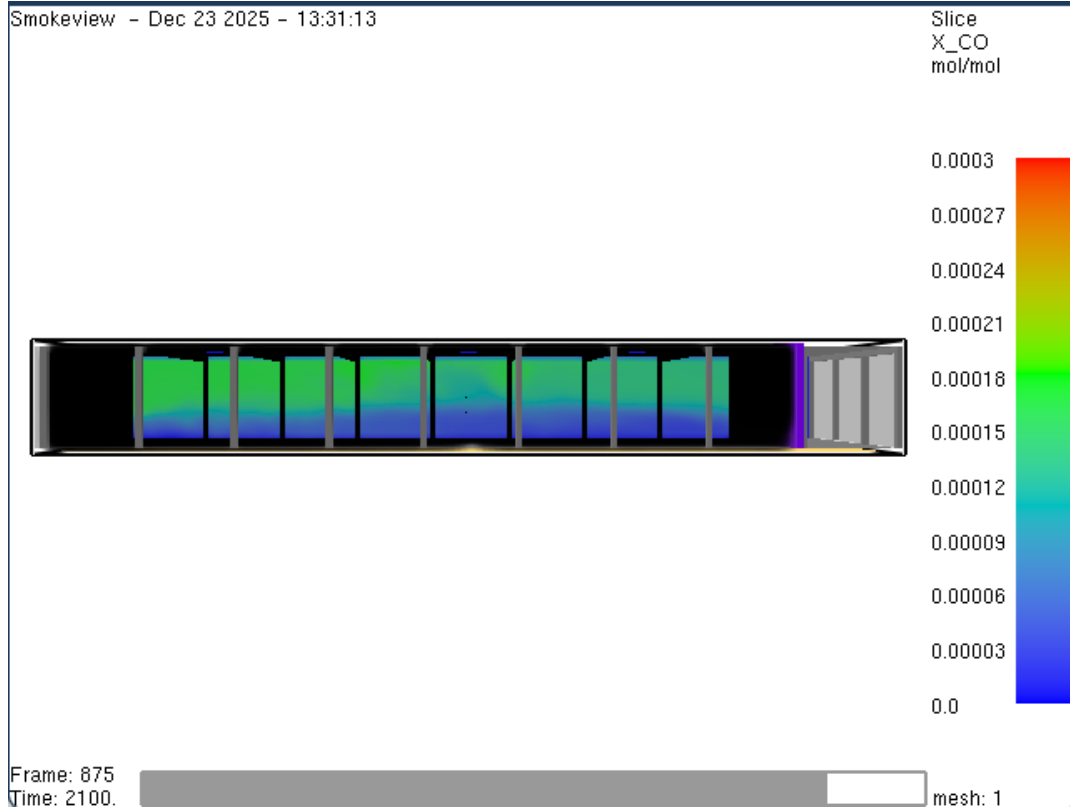


Bild A5.27: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2100 s

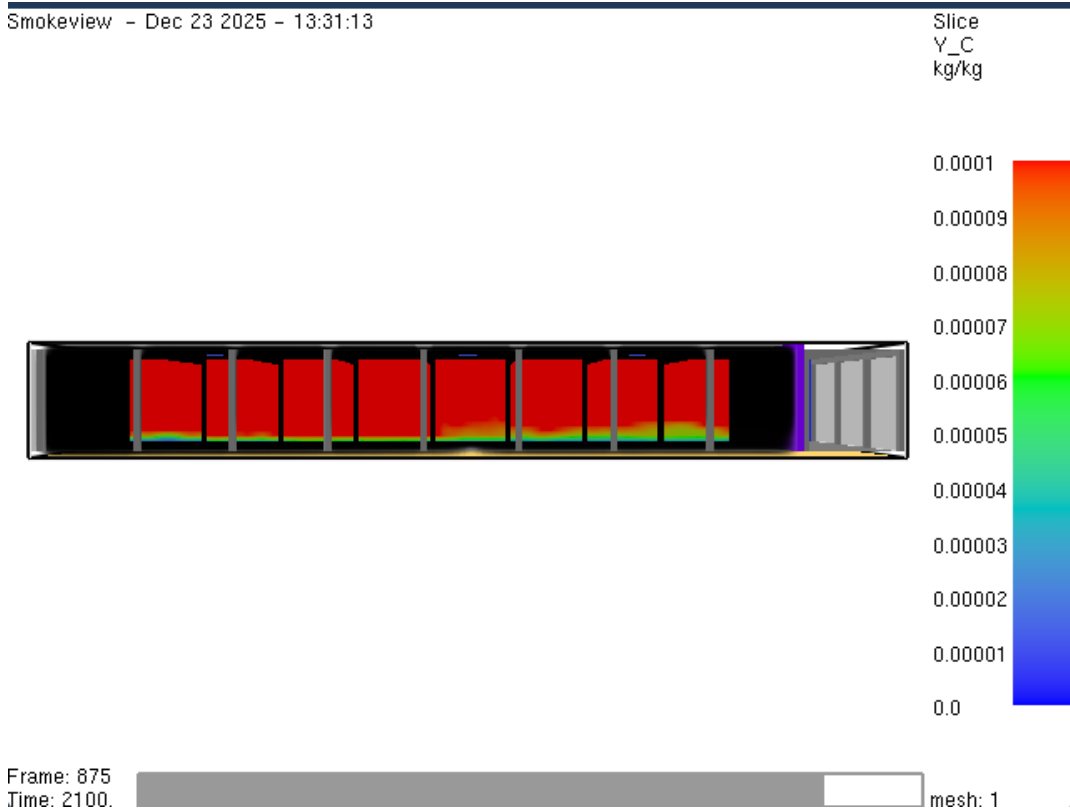
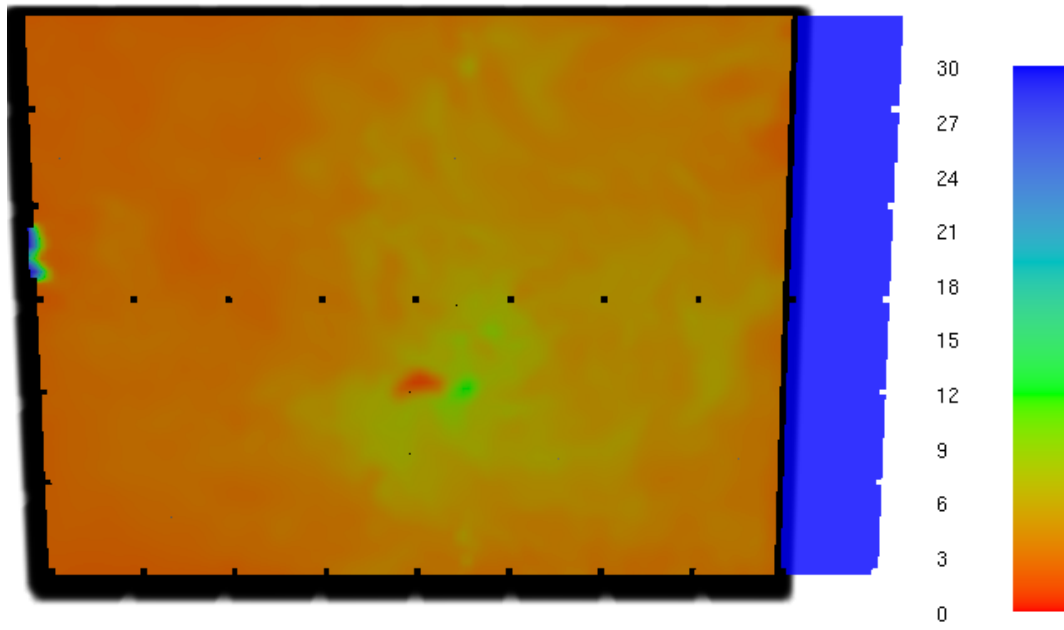


Bild A5.28: Rußausbeute nach t=2100 s

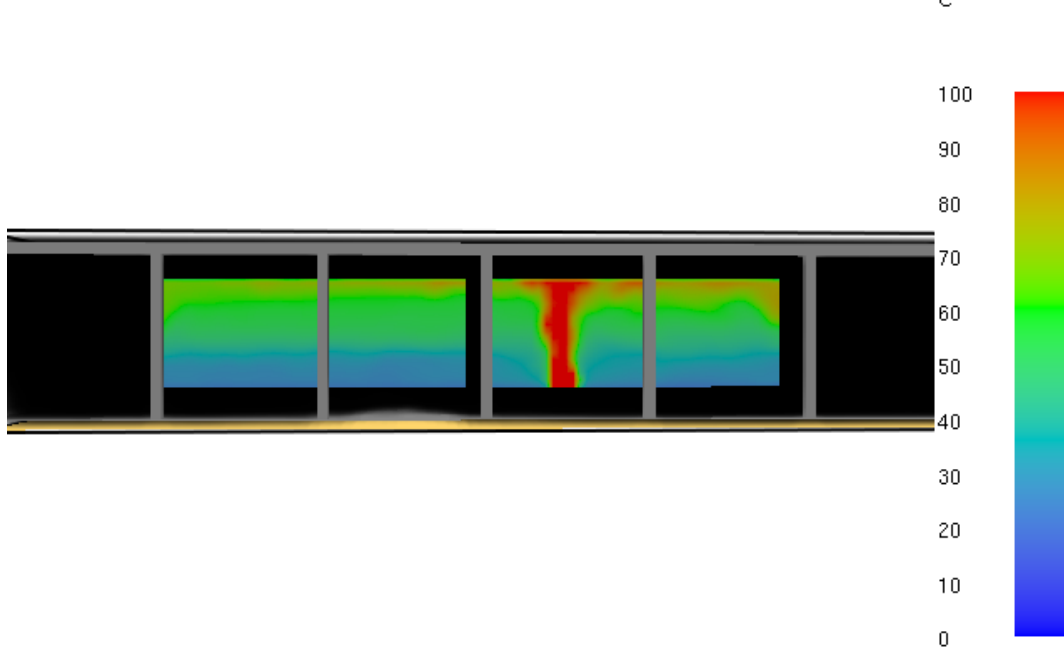
Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 1000
Time: 2400. mesh: 1

Bild A5.29: Sichtweite nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 1000
Time: 2400. mesh: 1

Bild A5.30: Temperatur nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

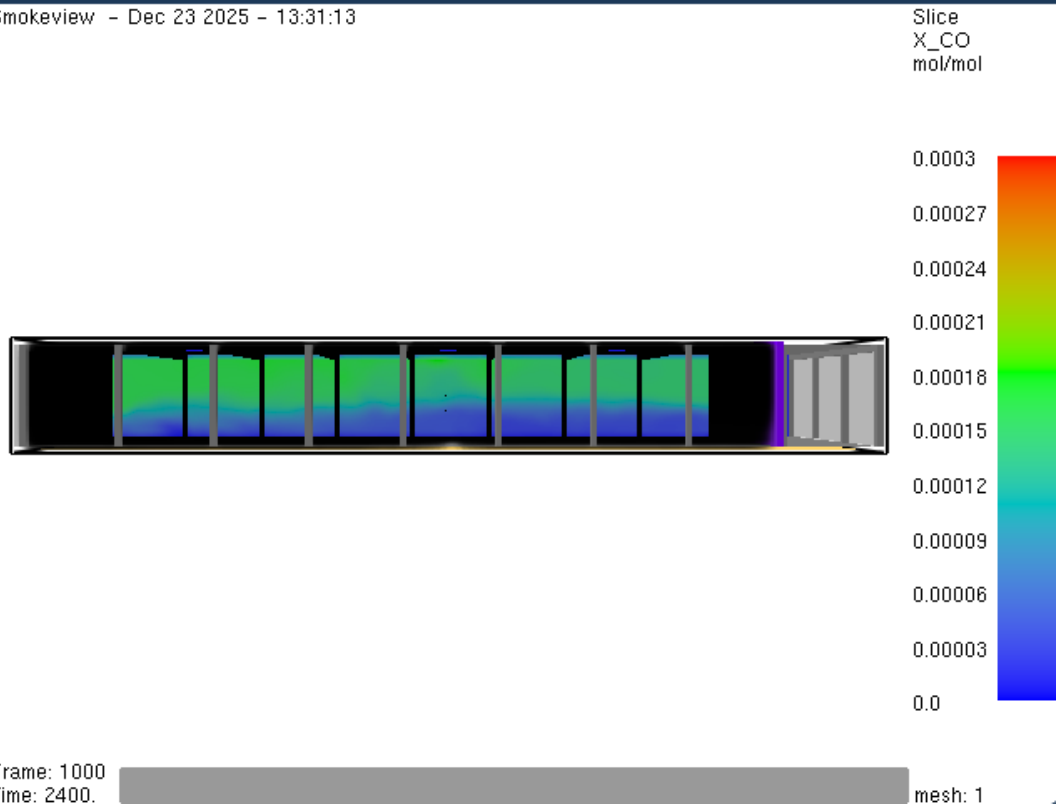


Bild A5.31: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

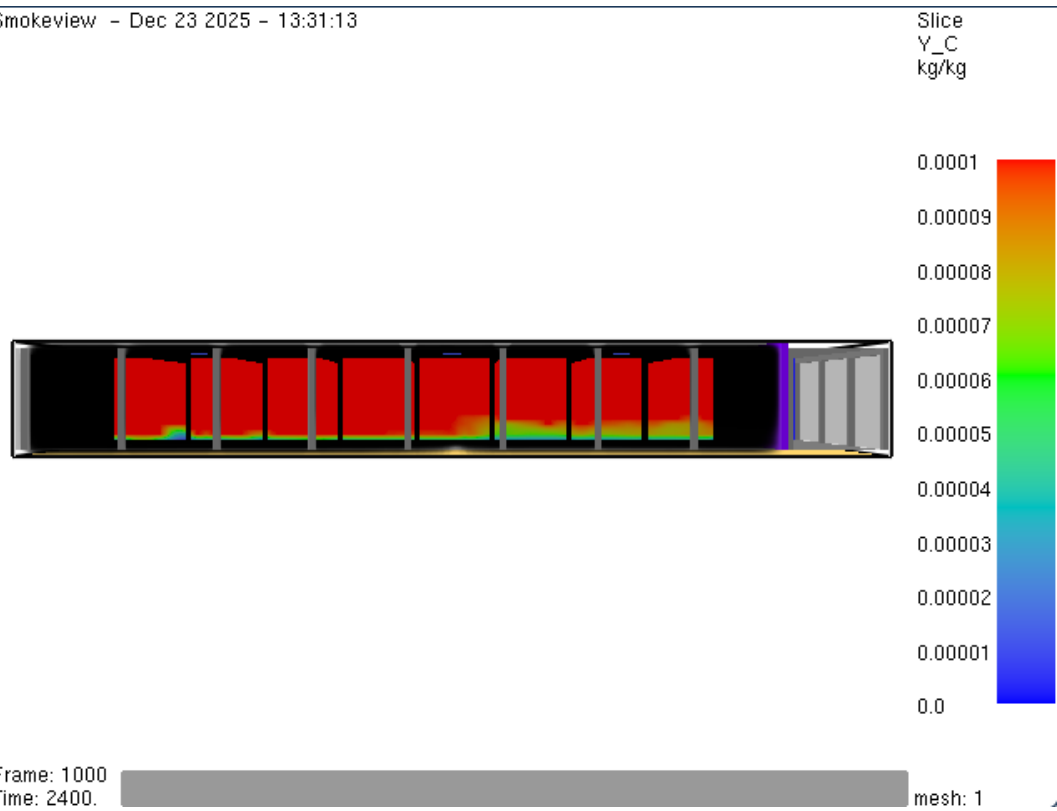


Bild A5.32: Rußausbeute nach t=2400 s

A6. Anhang zum FDS Beispiel Verkaufsstätte mit Sprinkleranlage

Quelltext FDS:

```

---FDS-Eingaben Realbrandversuch für Verkaufsstätte mit Sprinkleranlage--
---Definition der Grundeinstellungen (Simulationsprofil)---
&HEAD CHID='VK3', TITLE='Simulation Verkaufsstaeette mit Sprinkler'
&TIME T_END= 2400. /
&MESH IJK= 137, 92, 18, XB=0.0, 68.5, 0.0, 46.0, -0.5, 8.50 /
&MISC OVERWRITE = .FALSE. ,VISIBILITY_FACTOR = 8 / RESTART = .TRUE./
&DUMP NFRAMES = 1000, DT_RESTART = 100.0, MASS_FILE = .TRUE.,
DT_PL3D=30., PLOT3D_QUANTITY(1)= 'carbon monoxide', PLOT3D_QUANTITY(5)=
'TEMPERATURE' /

---Brand-Definition (REACTION)---
&REAC ID = 'Mischbrandlast_Drogerie'
      SOOT_YIELD = 0.060
      CO_YIELD = 0.024
      HEAT_OF_COMBUSTION = 17900
      N = 0.0
      C = 2.0
      H = 4.0
      O = 0.0
      RADIATIVE_FRACTION = 0.35/

---Definition der Materialien und Oberflächen---
---Materialien---
&MATL ID = 'BETON'
      CONDUCTIVITY = 1.4
      SPECIFIC_HEAT = 1.0
      DENSITY = 2000. /

&MATL ID = 'MAUERSTEIN'
      CONDUCTIVITY = 0.69
      SPECIFIC_HEAT = 0.84
      DENSITY = 1600. /

&MATL ID = 'GIPSKARTON'

```

ANHANG

CONDUCTIVITY = 0.48
SPECIFIC_HEAT = 0.84
DENSITY = 1440. /

---Oberflächen---

&SURF ID = 'STUETZE'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'BETON'
THICKNESS = 0.40 /

&SURF ID = 'TRAEGER'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'BETON'
THICKNESS = 0.40 /

&SURF ID = 'BRANDWAND'
RGB = 127,0,255
MATL_ID = 'BETON'
THICKNESS = 0.25 /

&SURF ID = 'AUSSENWAND'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'MAUERSTEIN'
THICKNESS = 0.50
TRANSPARENCY = 0.30 /

&SURF ID = 'DACH'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'GIPSKARTON',
THICKNESS = 0.10 /

&SURF ID = 'BODENPLATTE'
RGB = 128,128,128
MATL_ID = 'BETON'
THICKNESS = 0.25 /

&SURF ID='FEUER', RGB=255,0,0, HRRPUA=500, RAMP_Q = 'brand_kurve' /

---Festlegen der Zeitlichen Brandentwicklung (RAMP-FUNKTION)---

&RAMP ID='brand_kurve', T=0.0, F=0.0 /

&RAMP ID='brand_kurve', T=600.0, F=1.0 /

---Einfügen des Gebäudemodells--

&OBST XB=0.00,68.00,0.00,46.00,-0.25,0.00,SURF_ID='BODENPLATTE' /

&OBST XB=60.00,60.25,0.00,46.00,0.00,8.50, SURF_ID='BRANDWAND' /

&OBST XB=0.40,0.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=7.90,8.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=15.40,15.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=22.90,23.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=30.40,30.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=37.90,38.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=45.40,45.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=52.90,53.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=60.40,60.80,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,0.40,0.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,7.90,8.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,15.40,15.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,15.40,15.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=7.90,8.30,22.90,23.30,0.00, 8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=15.40,15.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=22.90,23.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=30.40,30.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=37.90,38.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=45.40,45.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=52.90,53.30,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=60.40,60.80,22.90,23.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,22.90,23.30,0.00, 8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,30.40,30.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,30.40,30.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,37.90,38.30,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=67.90,68.30,37.90,38.30,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /

```
&OBST XB=7.90,8.30,45.40,45.80,0.00,8.00, SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=15.40,15.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=22.90,23.30,45.40,45.80,0.00, 8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=30.40,30.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=37.90,38.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=45.40,45.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=52.90,53.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=60.40,60.80,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /
&OBST XB=67.90,68.30,45.40,45.80,0.00,8.00,SURF_ID='STUETZE' /

&OBST XB=0.40,0.80,0.40,45.80,7.40,8.00,SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=7.90,8.30,0.40,45.80,7.40,8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=15.40,15.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=22.90,23.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=30.40,30.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=37.90,38.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=45.40,45.80,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=52.90,53.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /
&OBST XB=67.90,68.30,0.40,45.80,7.40, 8.00, SURF_ID='TRAEGER' /

&OBST XB= 0.00,68.70, 0.00,0.50, 0.00,8.00,SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 0.00, 0.50, 0.00,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 0.00, 68.70, 45.70,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /
&OBST XB= 68.30,68.70, 0.00,46.20, 0.00, 8.00, SURF_ID='AUSSENWAND' /

&OBST XB= 0.00, 68.70, 0.00, 46.20, 8.00, 8.10, SURF_ID='DACH' /

---Implementierung der Sprinkleranlage---
&SPEC ID='WATER VAPOR' /
&PART ID='Wassertropfen', SPEC_ID='WATER VAPOR', DIAMETER=500. /

&PROP ID='Sprinkler',
    QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE',
    RTI= 50.,
    ACTIVATION_TEMPERATURE = 68.,
    PART_ID='Wassertropfen',
    FLOW_RATE=80
```

PARTICLE_VELOCITY=5.,
SPRAY_ANGLE=30.,80. /

&DEVC ID='Spr_1' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 4.35, 34.65, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 /
&DEVC ID='Spr_2' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 11.90, 7.00, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 /
&DEVC ID='Spr_3' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 19.35, 34.65, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 /
&DEVC ID='Spr_4' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 26.10, 11.55, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 /
&DEVC ID='Spr_5' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 33.85, 34.65, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 /
&DEVC ID='Spr_6' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 41.85, 11.55, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 /
&DEVC ID='Spr_7' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 49.35, 38.90, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 /
&DEVC ID='Spr_8' , PROP_ID='Sprinkler' , XYZ = 55.75, 11.55, 7.9 ,
ORIENTATION= 0, 0, -1 /

---Zu- und Abluftflächen (Öffnungen)---

Auslösung durch Sprinkleranlage:

&CTRL ID= 'Sprinkler_Aktiv', FUNCTION_TYPE='ANY', INPUT_ID='Spr_1',
'Spr_2','Spr_3','Spr_4','Spr_5','Spr_6','Spr_7','Spr_8' /

&CTRL ID= 'RWA_TIMER', FUNCTION_TYPE='TIME_DELAY',
INPUT_ID='Sprinkler_Aktiv', DELAY= 30.0 /

&CTRL ID= 'RWA_Start', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='RWA_TIMER' /

Abluft: 6x RWA im Dach a 1,50 x 1,50 m

&HOLE XB= 11.10, 12.60,10.80, 12.30,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
&HOLE XB= 11.10, 12.60,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
&HOLE XB= 26.10, 27.60,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
&HOLE XB= 33.60, 35.10,10.80, 12.30,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
&HOLE XB= 48.60, 50.10,10.80, 12.30,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /
&HOLE XB= 48.60, 50.10,34.0, 35.0,8.00, 8.10, CTRL_ID='RWA_Start' /

Zuluft: Ein Tor in Fassade a 4,0x 4,0 m, 2x Tür in Fassade 1,0 m x 2,0 m

&HOLE XB= -0.10, 0.50, 24.80, 28.80, 0.00, 4.00 /

ANHANG

&HOLE XB= 33.85, 34.85, -0.10, 0.50, 0.00, 2.00 /
&HOLE XB= 33.85, 34.85, 45.70, 46.30, 0.00, 2.00 /

Das Feuer

&VENT XB= 29.0,32.0, 15.0, 17.0, 0.01,0.01, SURF_ID='FEUER', IOR=3 /

---Messgeräte (DEVC)---

Messpunkt 1: Nah am Brandherd

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT',
ID='BRAND_LH' /

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 16.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER
TEMPERATURE', ID='BRAND_UT' /

&DEVC XB= 30.0, 30.5, 16.0, 6.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LOWER
TEMPERATURE', ID='BRAND_LT' /

Messpunkt 2: Hallenmitte

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT',
ID='MITTE_LH' /

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='UPPER
TEMPERATURE', ID='MITTE_UT' /

&DEVC XB= 34.0, 34.0, 23.0, 23.0, 0.0,8.0, QUANTITY='LOWER
TEMPERATURE', ID='MITTE_LT' /

Personenschutzwerte auf 2,50 m Höhe:

&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5,QUANTITY='TEMPERATURE', ID='MITTE_TEMP_2M' /

&DEVC XYZ= 34.0, 23.0, 2.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION',SPEC_ID='CARBON
MONOXIDE', ID='MITTE_CO_2M' /

---Visualisierung (SLCF)---

Temperaturen (Hitzeausbreitung):

&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /

HRRPUV:

&SLCF PBX= 30.0, QUANTITY='HRRPUV' /

Sichtweite und Gase:

&SLCF PBZ= 2.5, QUANTITY='VISIBILITY' /

&SLCF PBZ= 5.0, QUANTITY='VISIBILITY' /

```
&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' /
```

Ruß-Konzentration (Dichte des Rauches):

```
&SLCF PBY= 23.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='SOOT' /
```

---Druckausgleich---

```
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&TAIL /
```

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

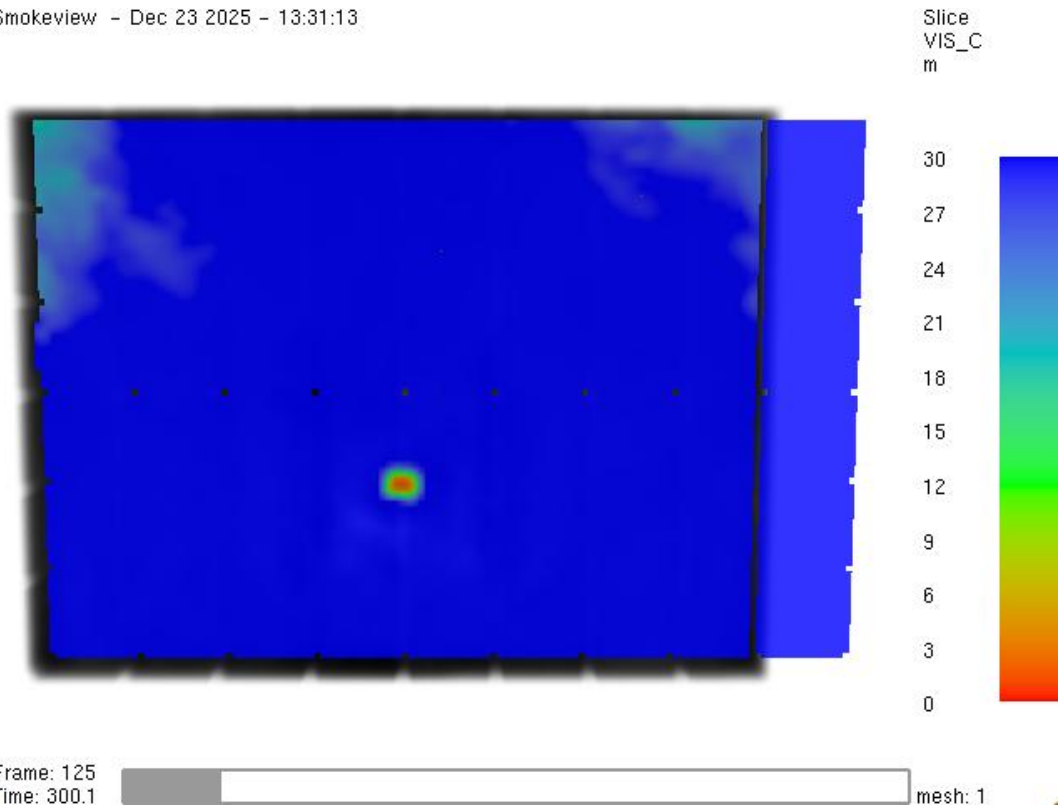


Bild A6.1: Sichtweite nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

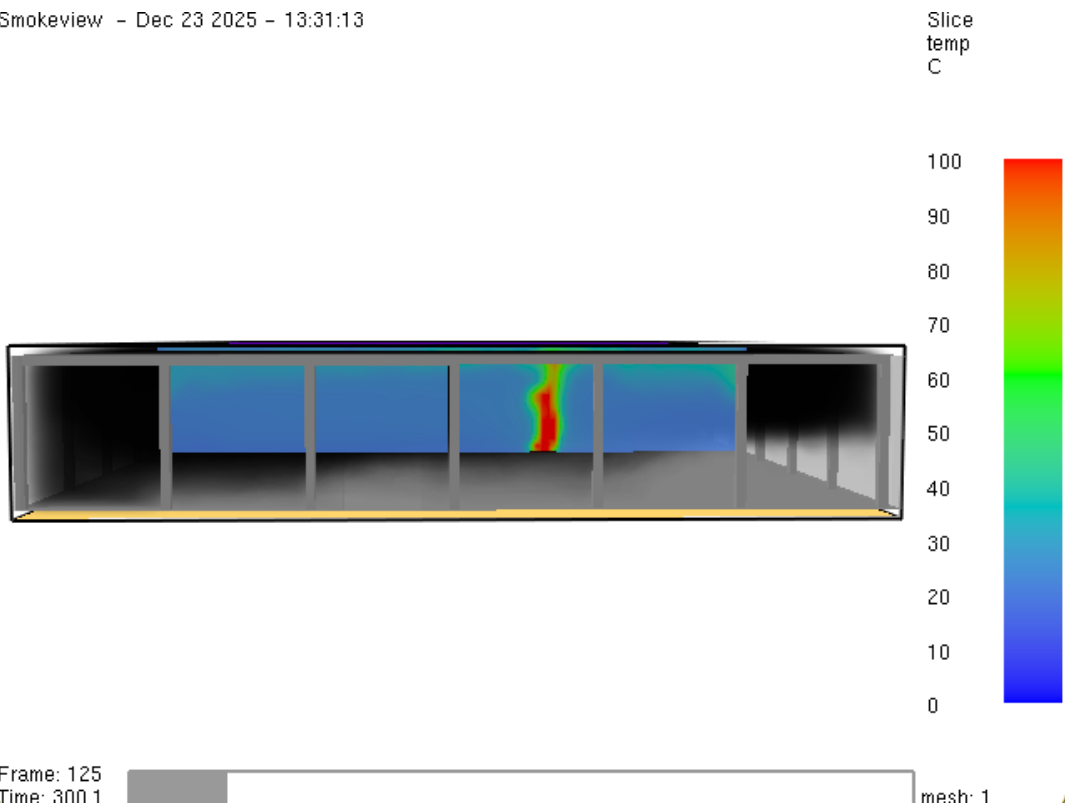


Bild A6.2: Temperatur nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

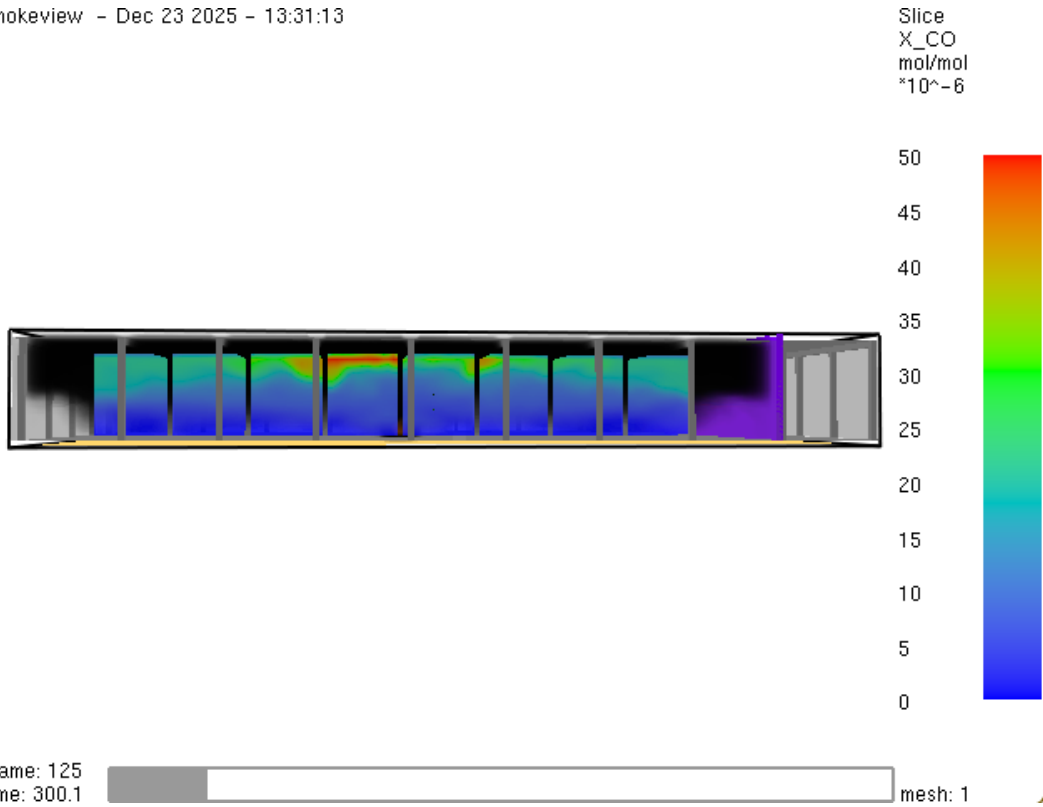


Bild A6.3: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

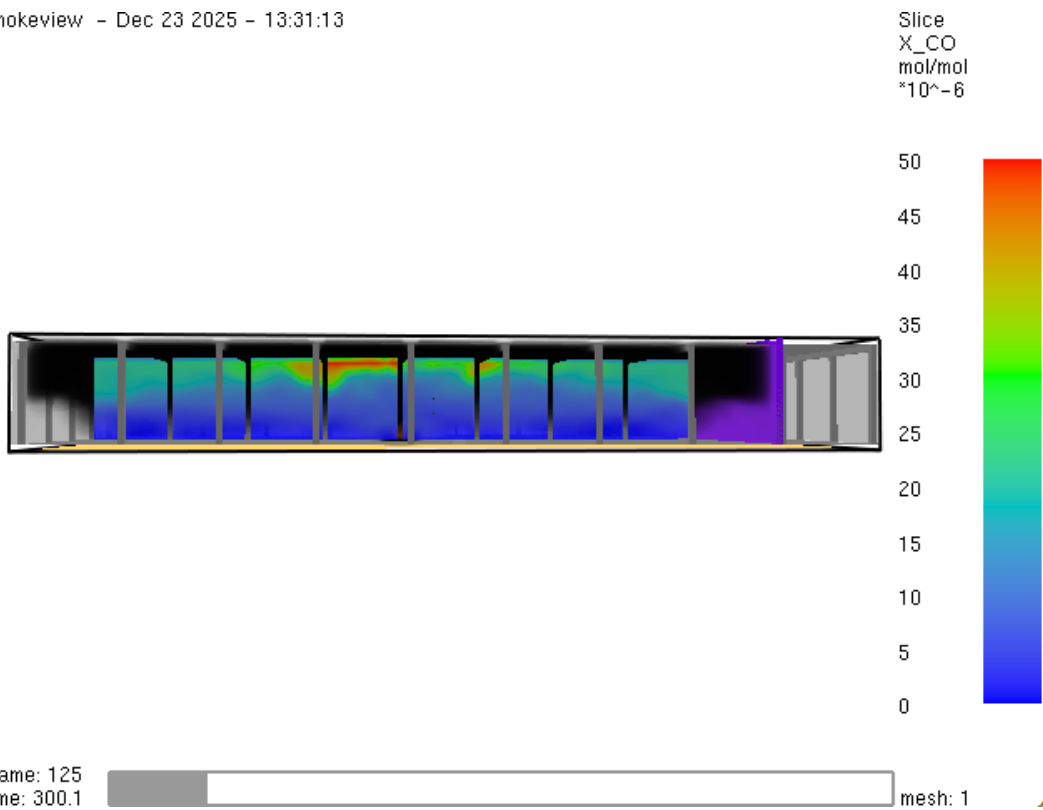


Bild A6.4: Rußausbeute nach t=300 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

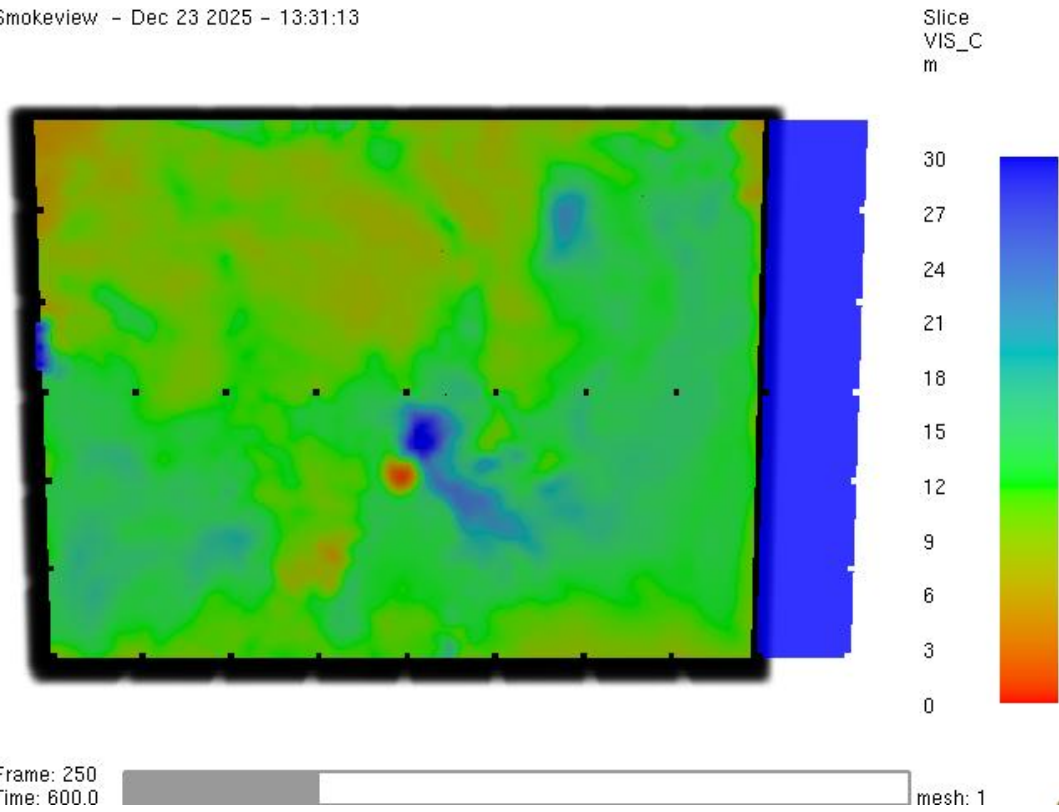


Bild A6.5: Sichtweite nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

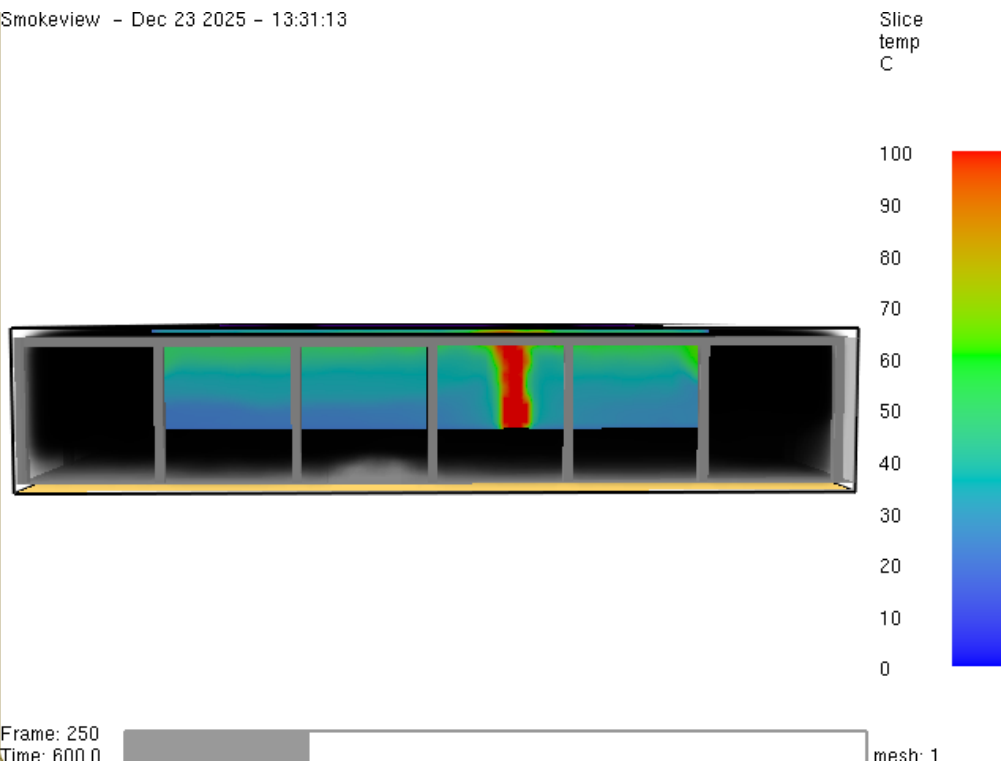


Bild A6.6: Temperatur nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

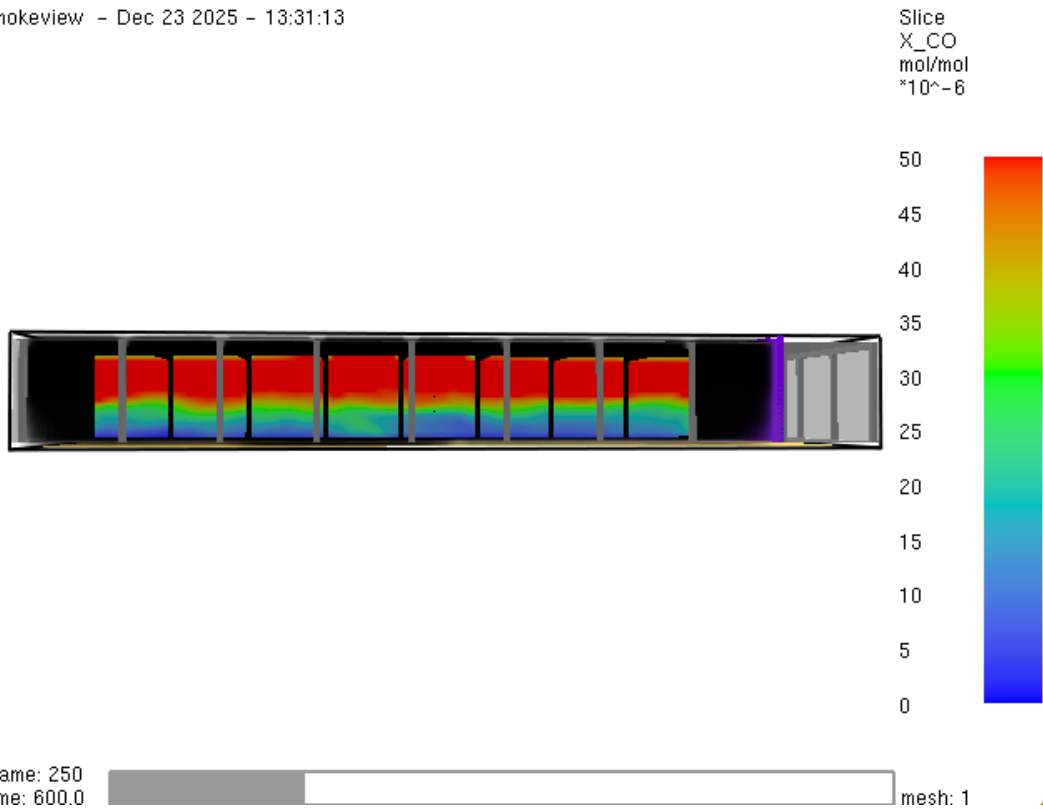


Bild A6.7: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

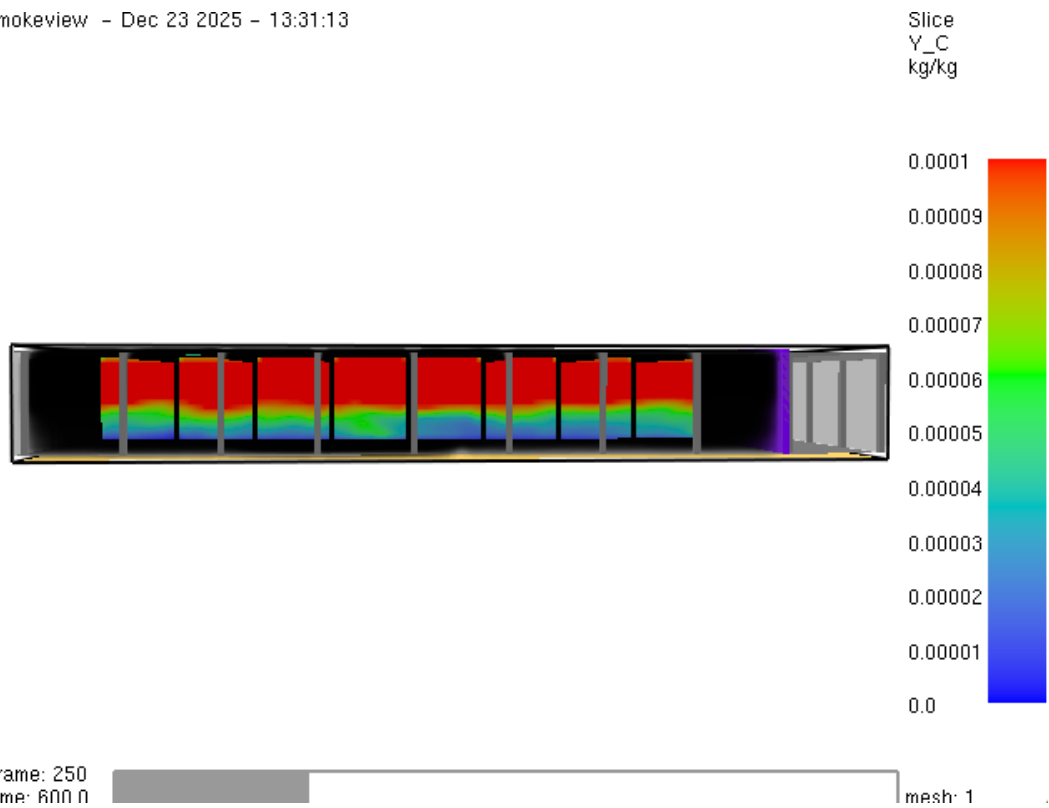


Bild A6.8: Rußausbeute nach t=600 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

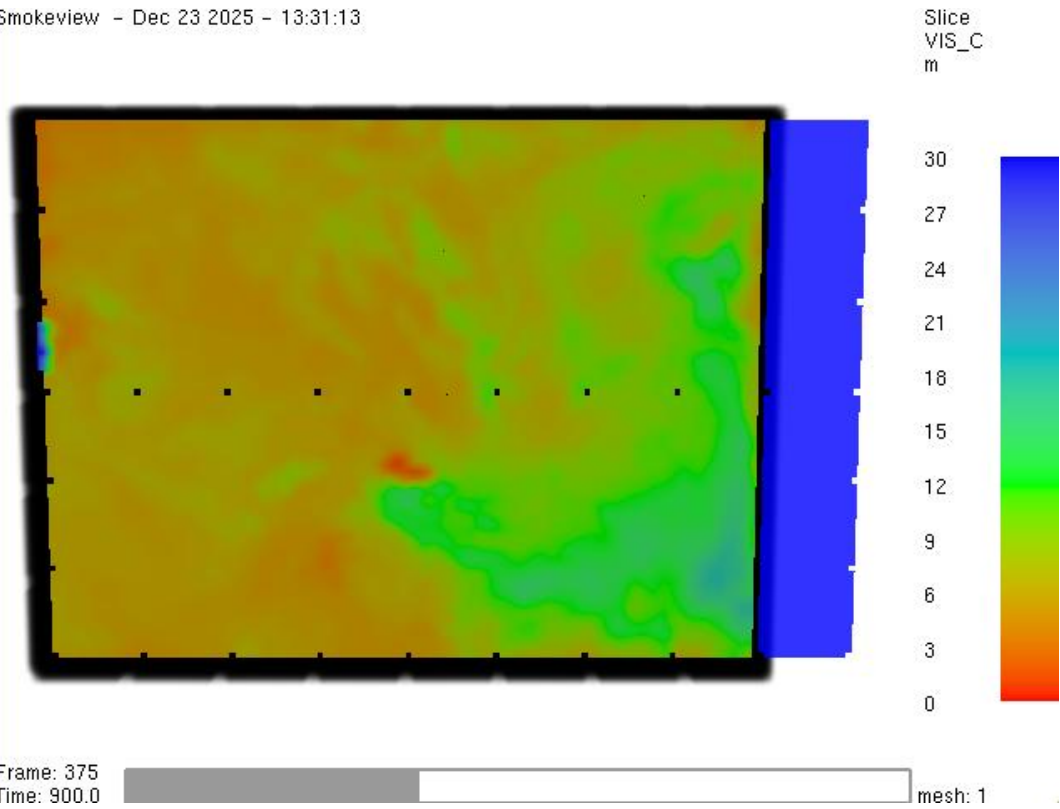


Bild A6.9: Sichtweite nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

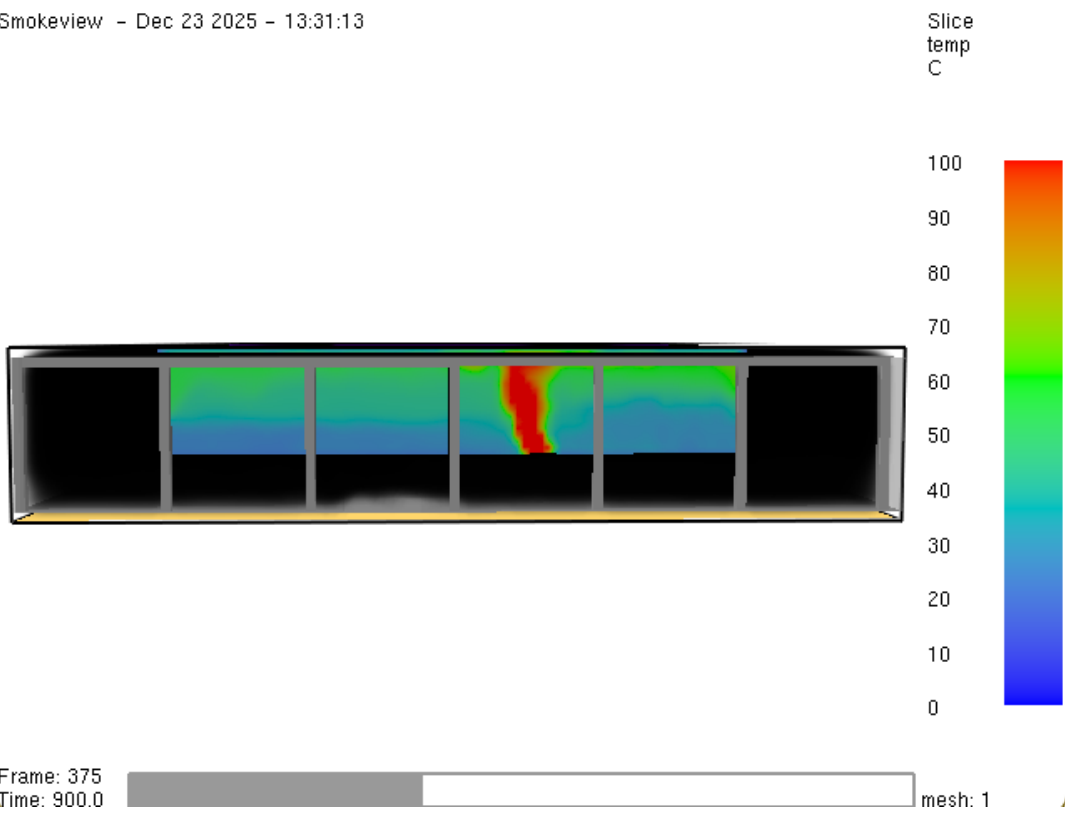


Bild A6.10: Temperatur nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

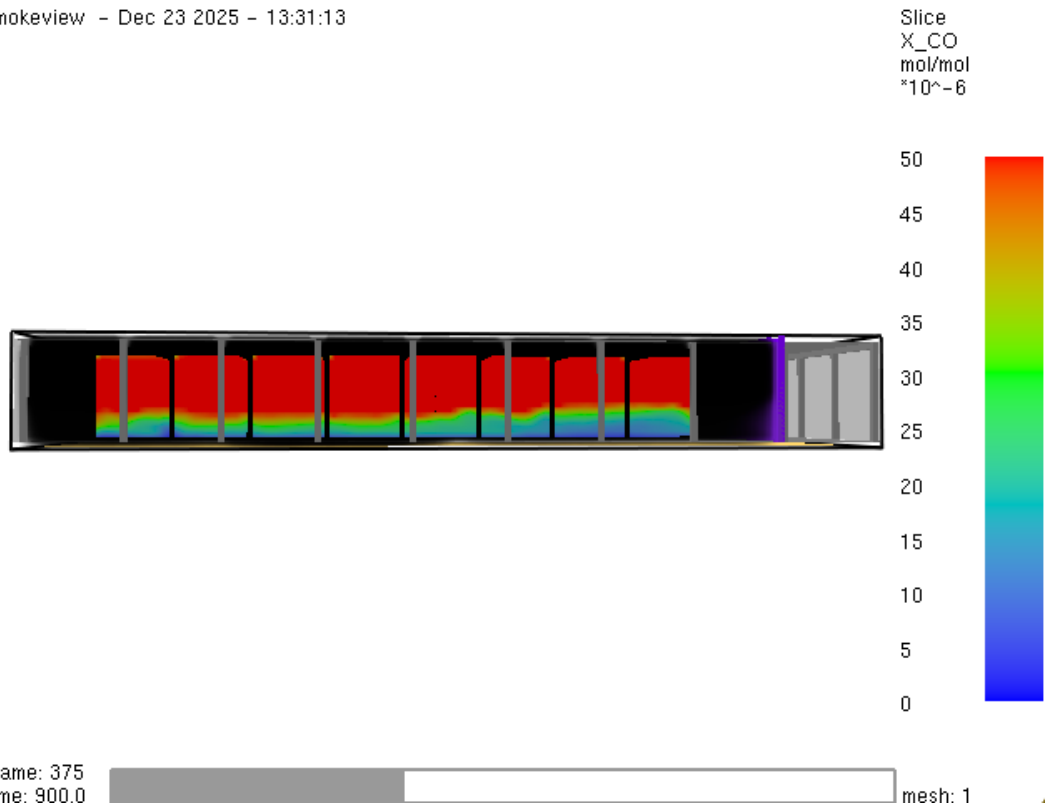


Bild A6.11: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

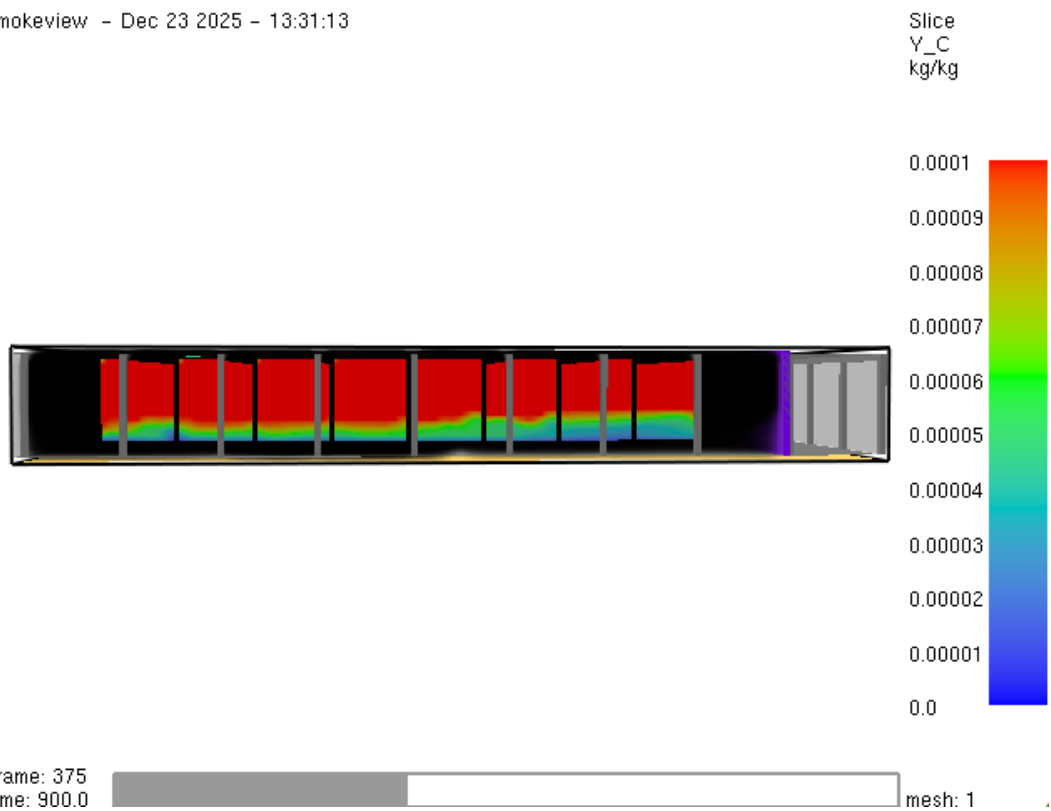
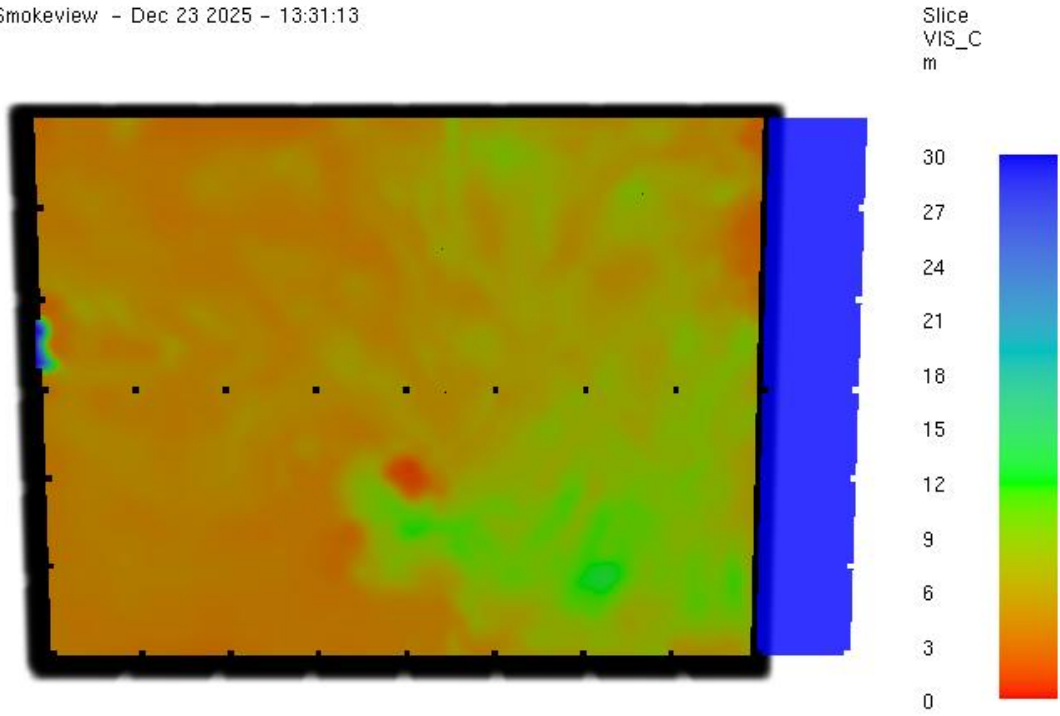


Bild A6.12: Rußausbeute nach t=900 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

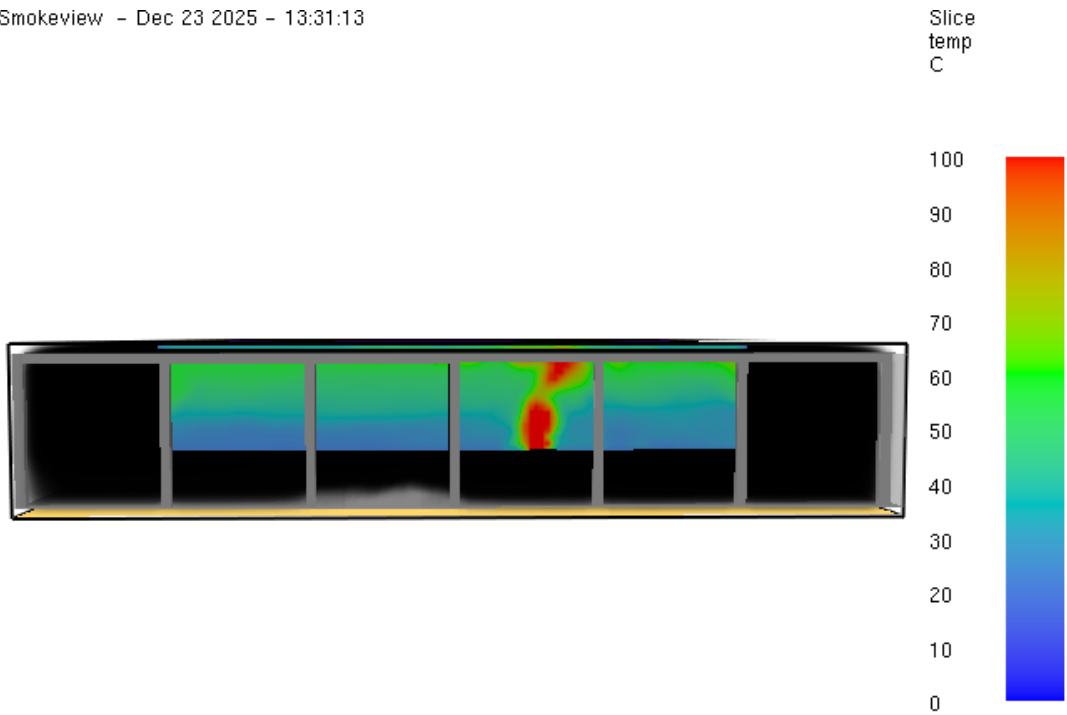


Frame: 500
Time: 1200

mesh: 1

Bild A6.13: Sichtweite nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13



Frame: 500
Time: 1200

mesh: 1

Bild A6.14: Temperatur nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

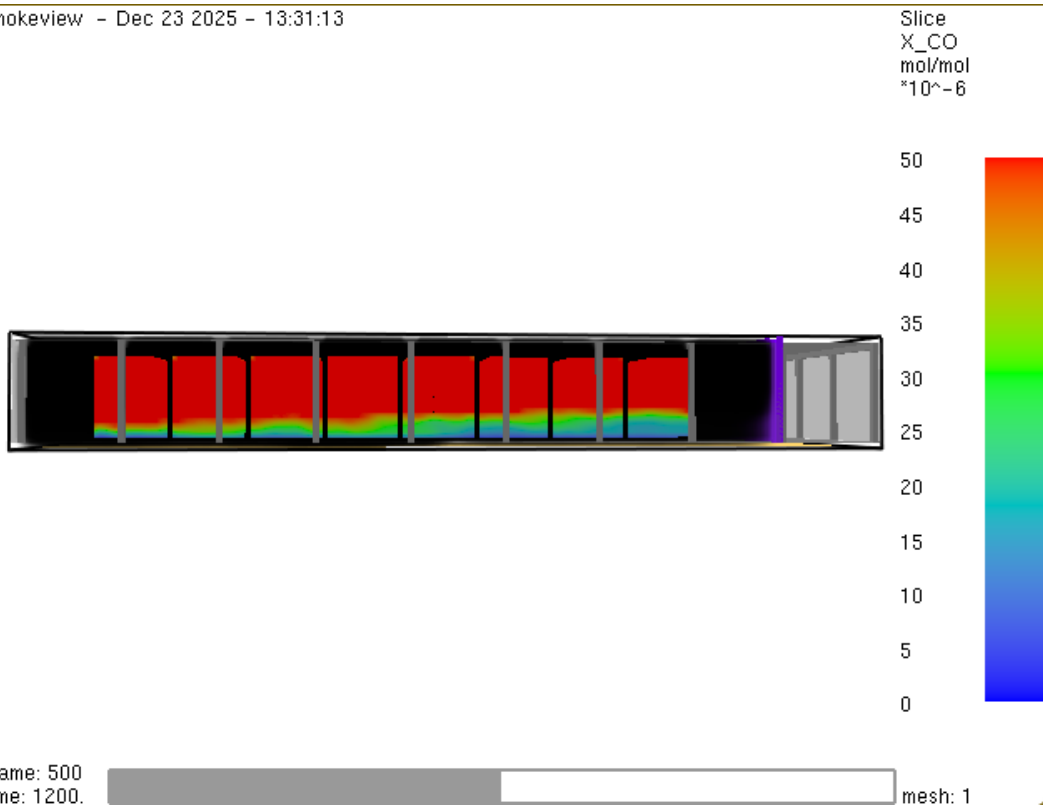


Bild A6.15: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

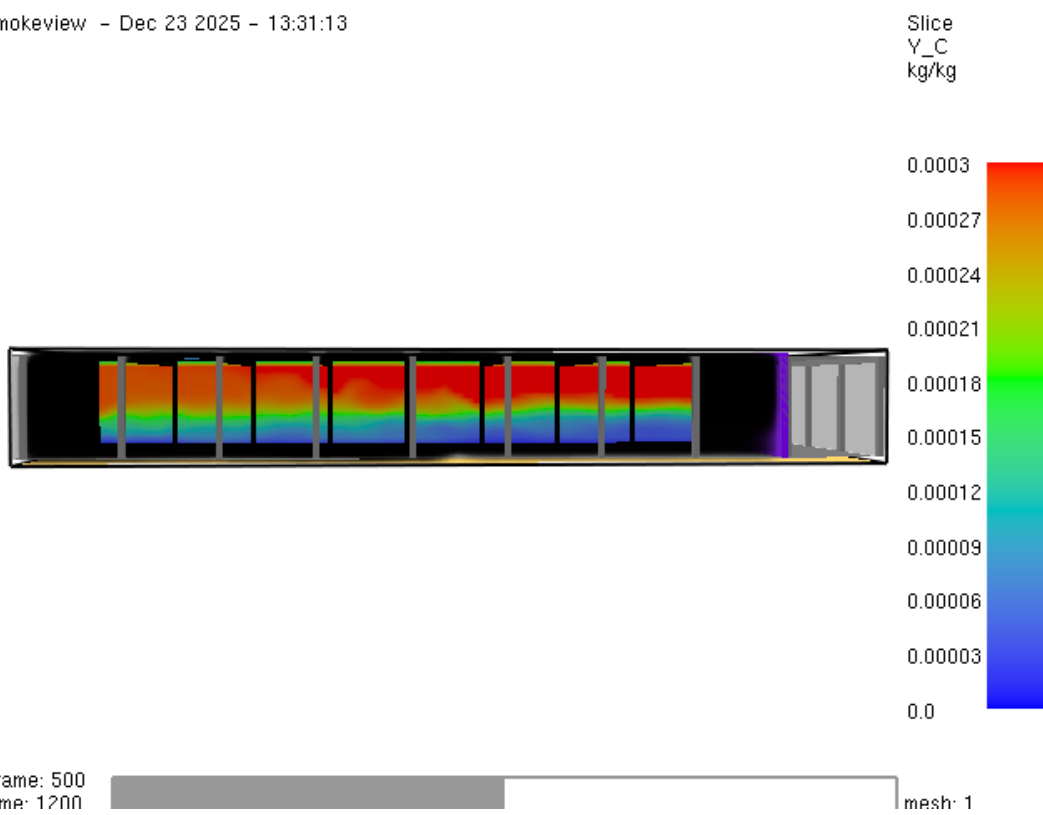


Bild A6.16: Rußausbeute nach t=1200 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

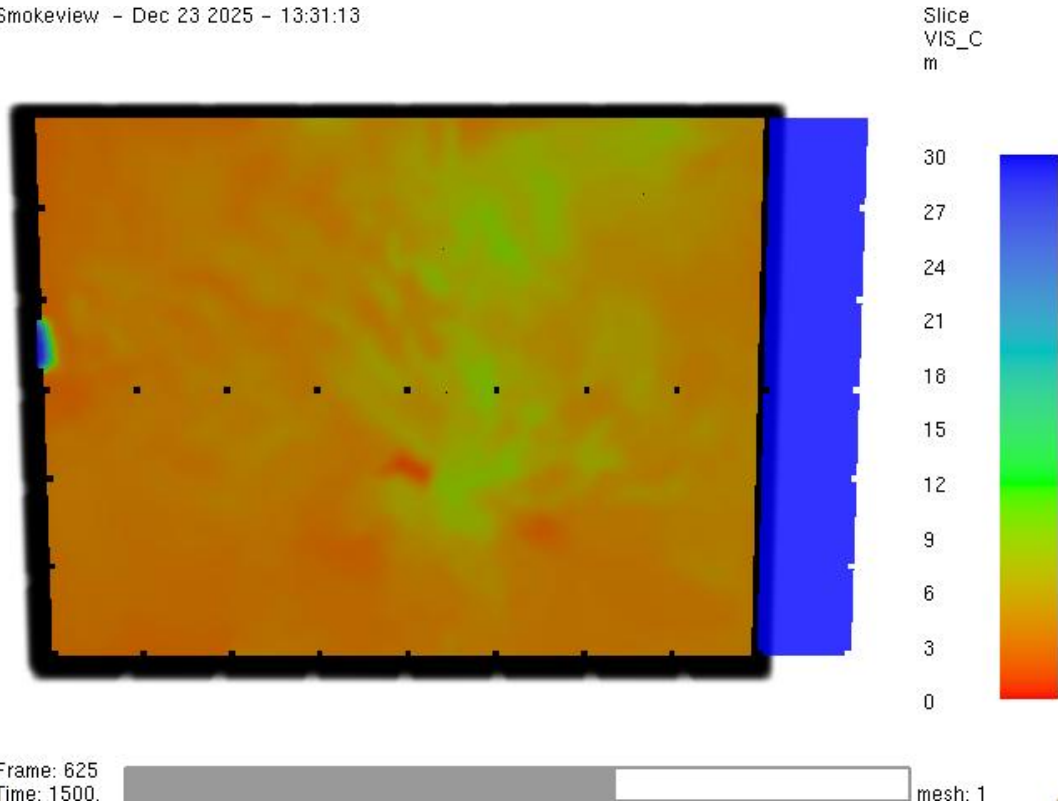


Bild A6.17: Sichtweite nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

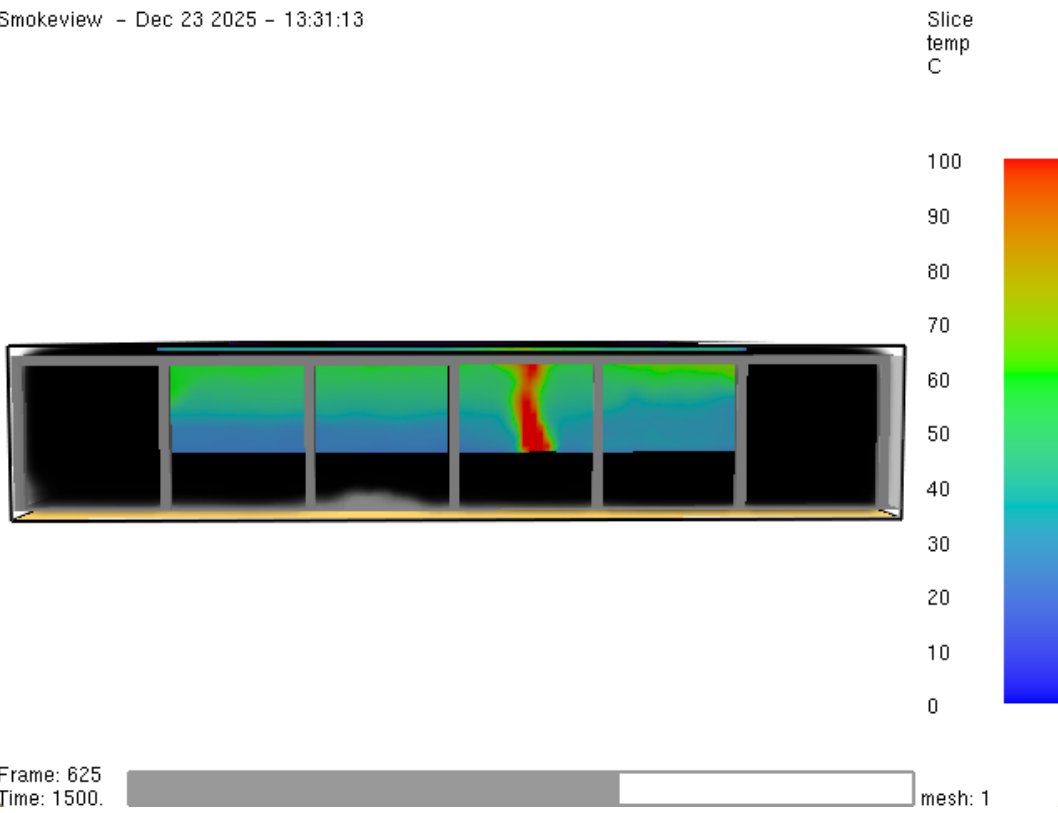


Bild A6.18: Temperatur nach t=1500 s

Smokeyview - Dec 23 2025 - 13:31:13

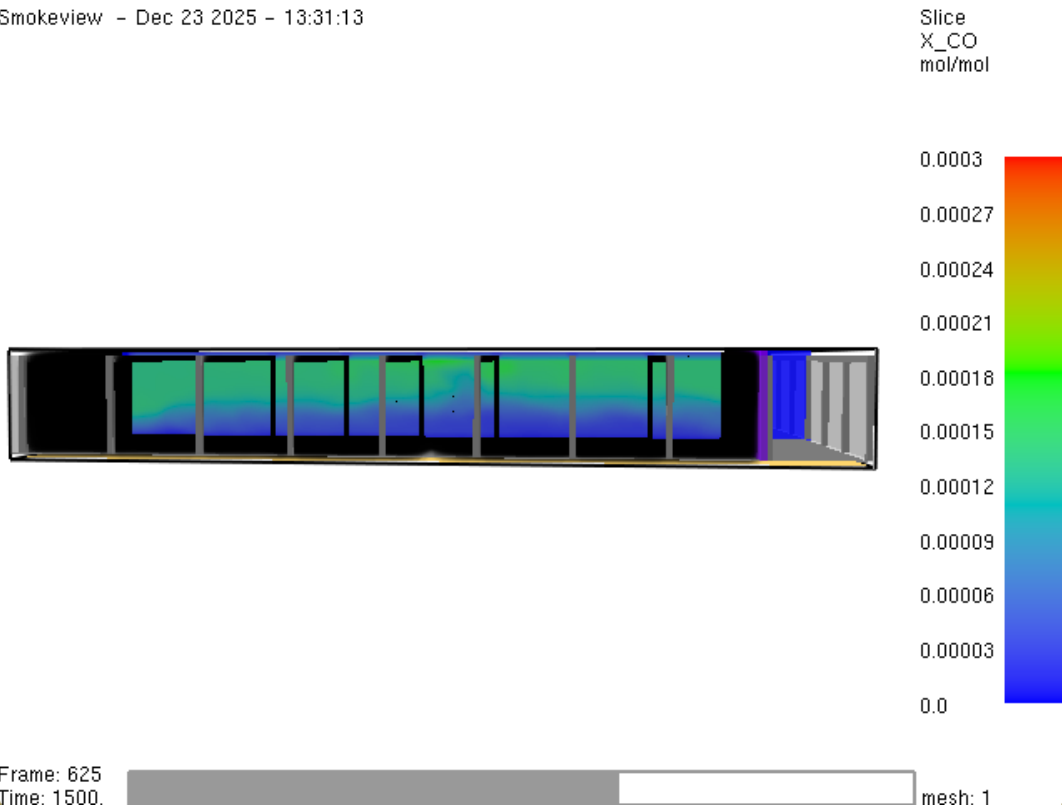


Bild A6.19: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1500 s

Smokeyview - Dec 23 2025 - 13:31:13

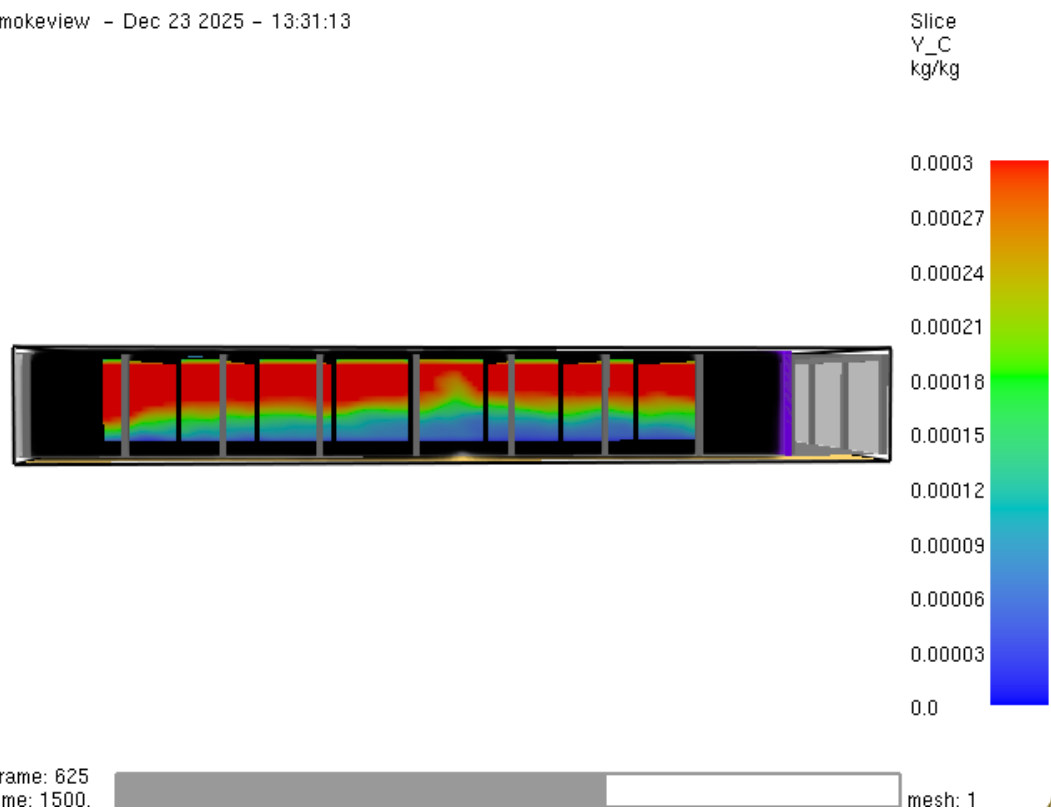


Bild A6.20: Rußausbeute nach t=1500 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

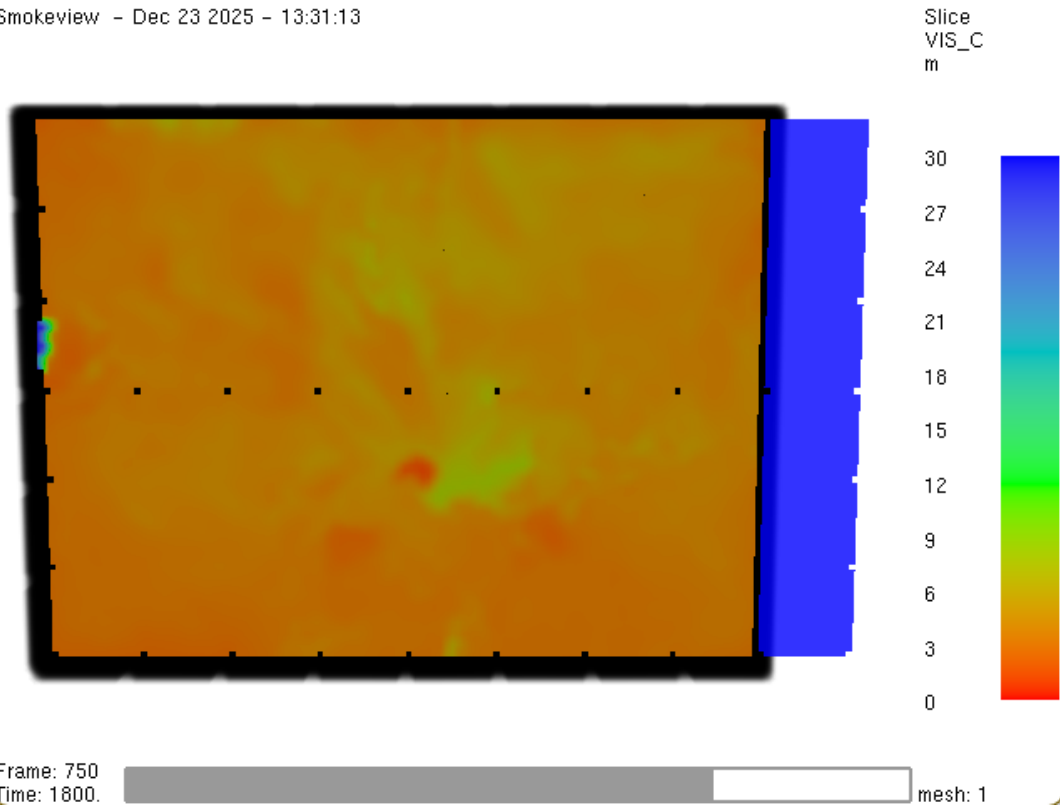


Bild A6.21: Sichtweite nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

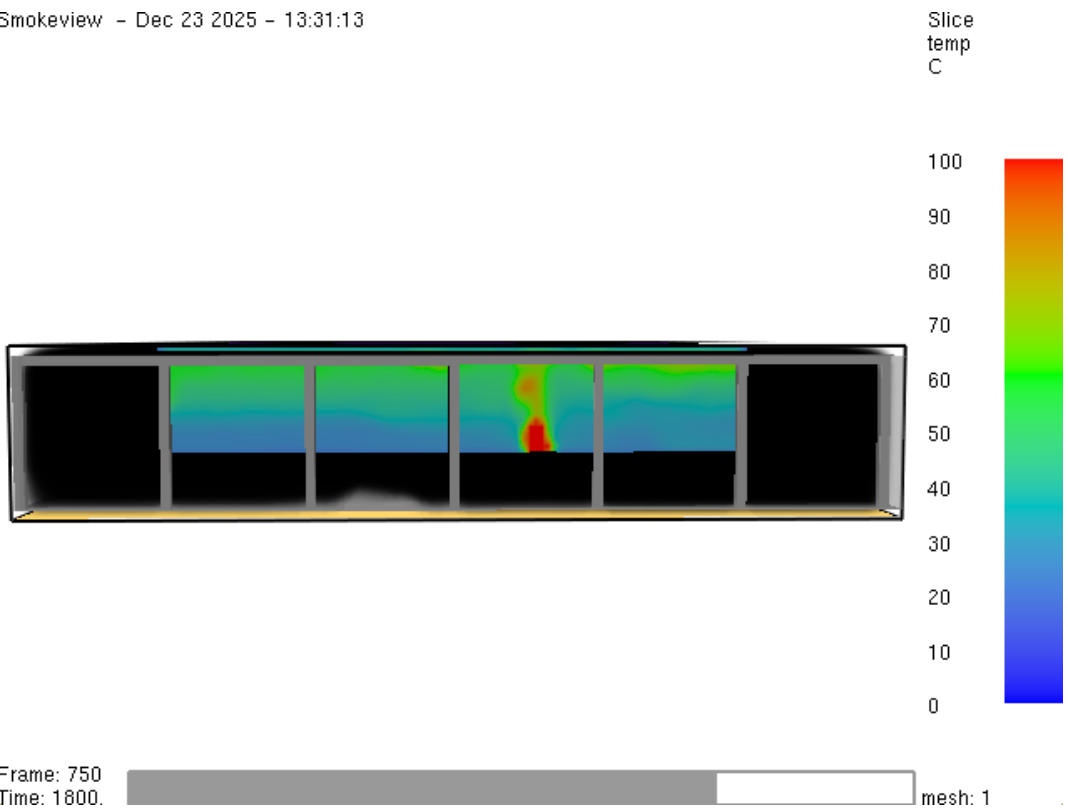


Bild A6.22: Temperatur nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

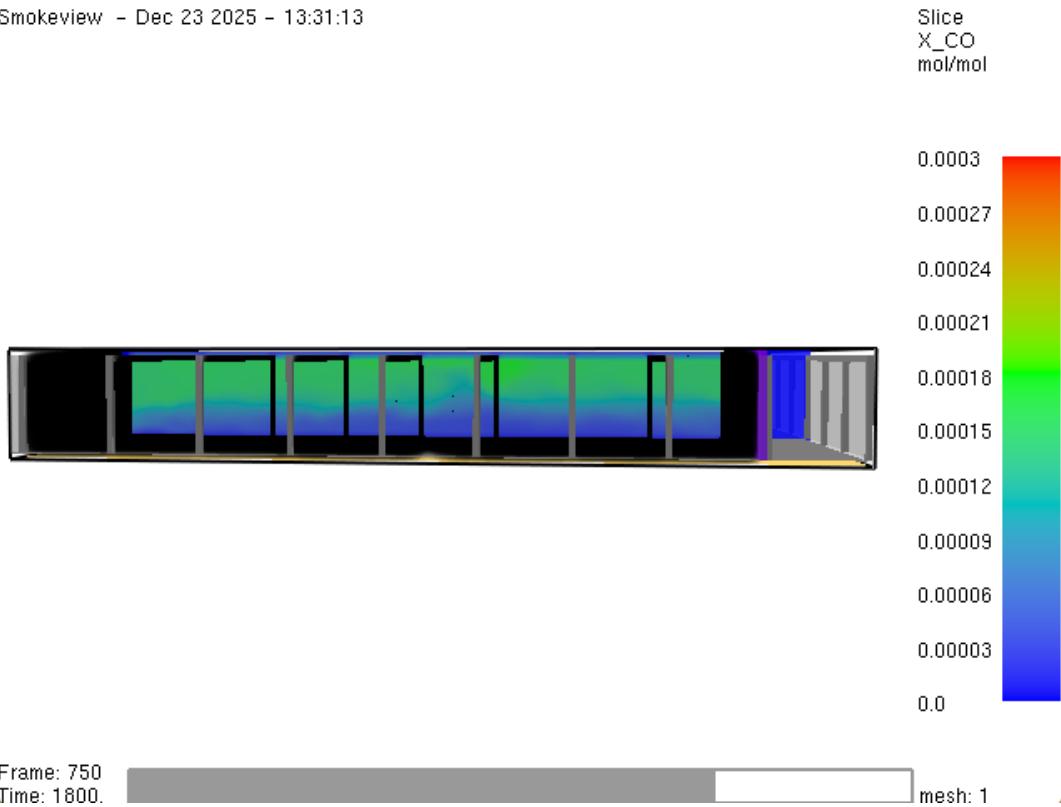


Bild A6.23: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=1800 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

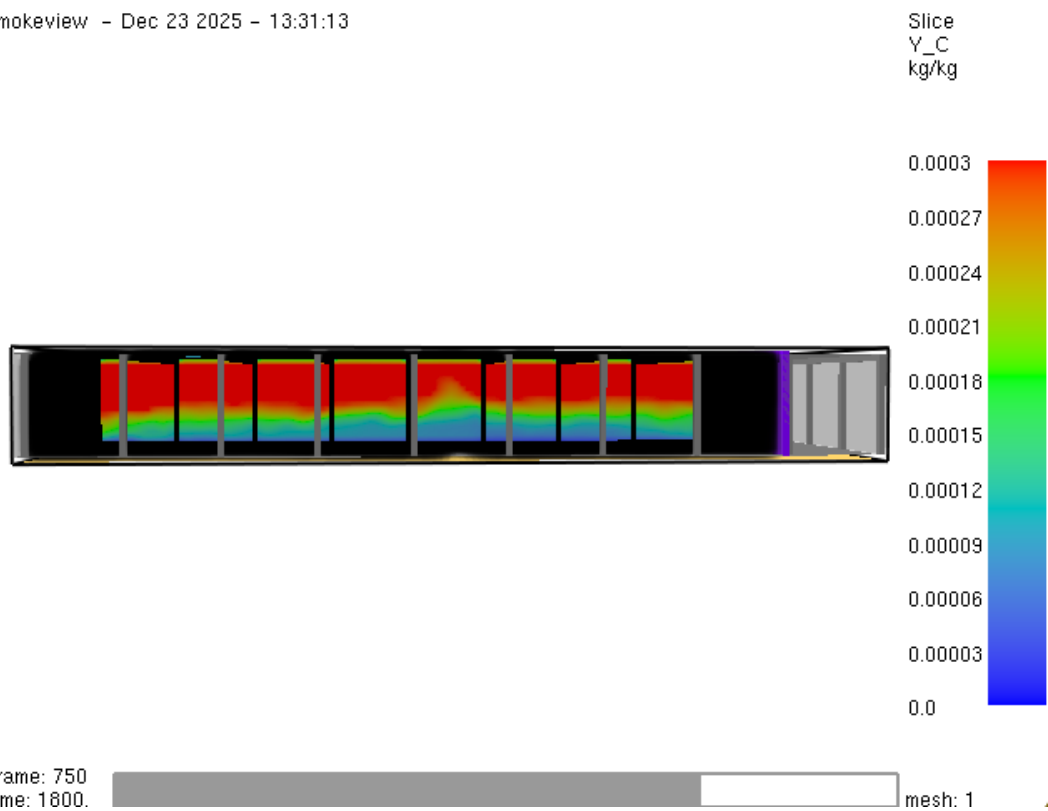


Bild A6.24: Rußausbeute nach t=1800 s

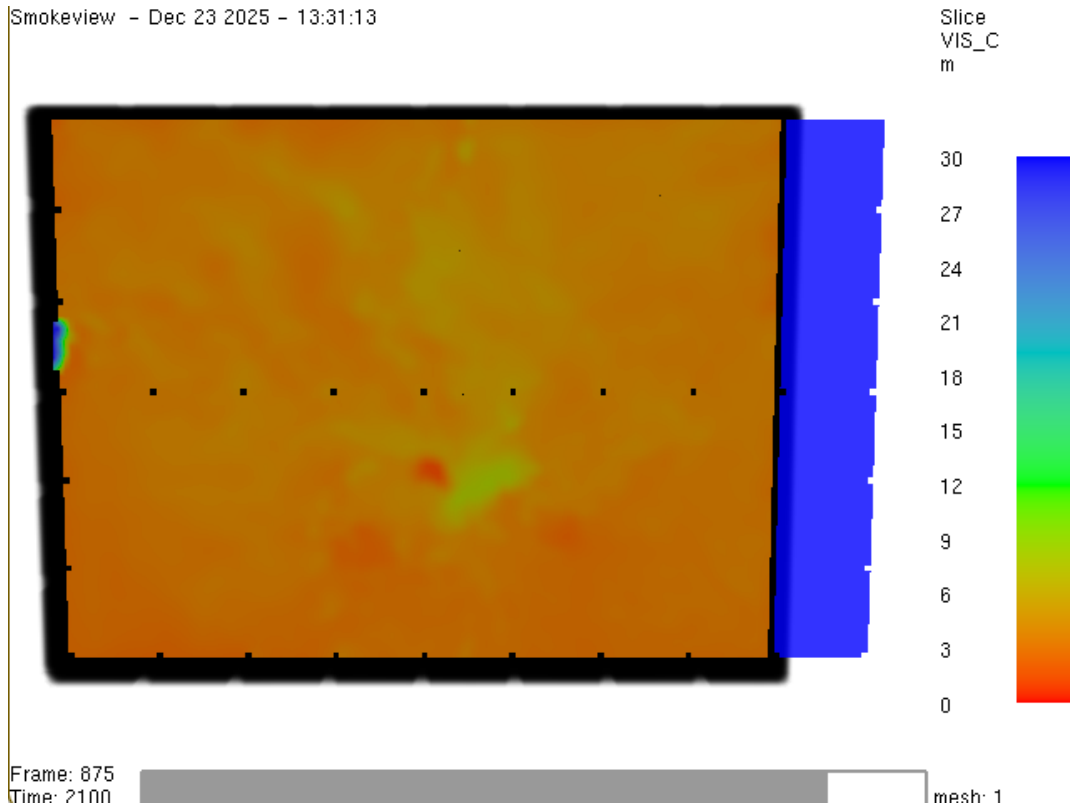


Bild A6.25: Sichtweite nach t=2100 s



Bild A6.26: Temperatur nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

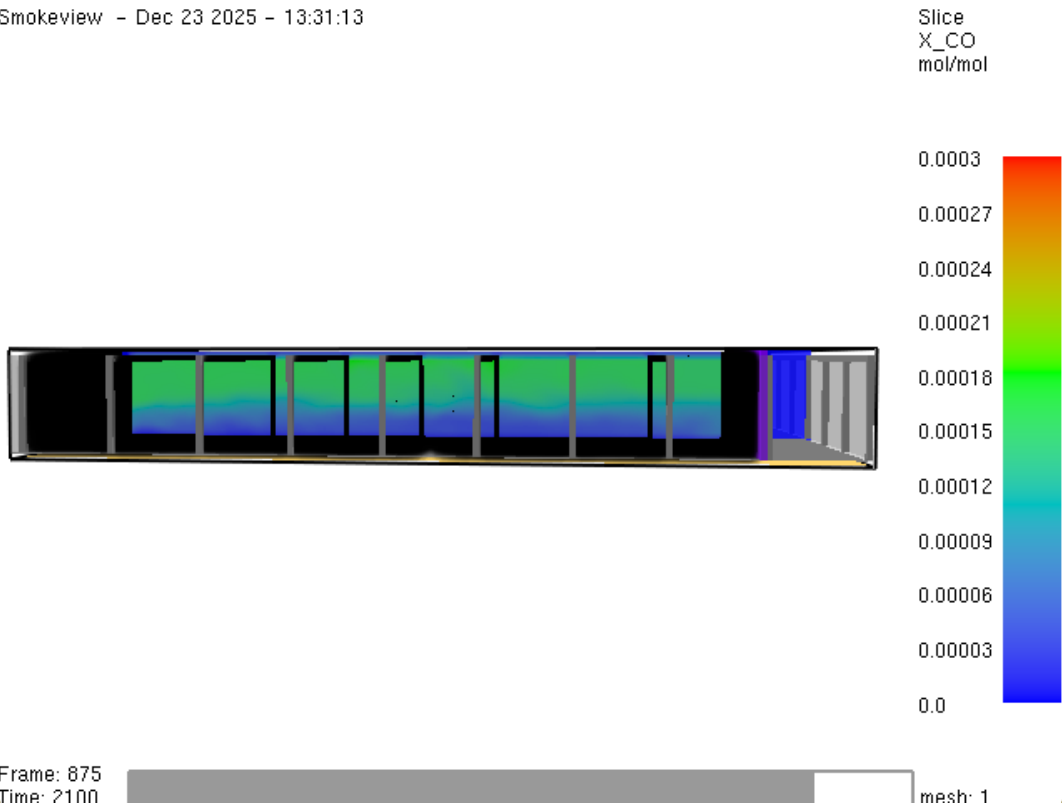


Bild A6.27: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

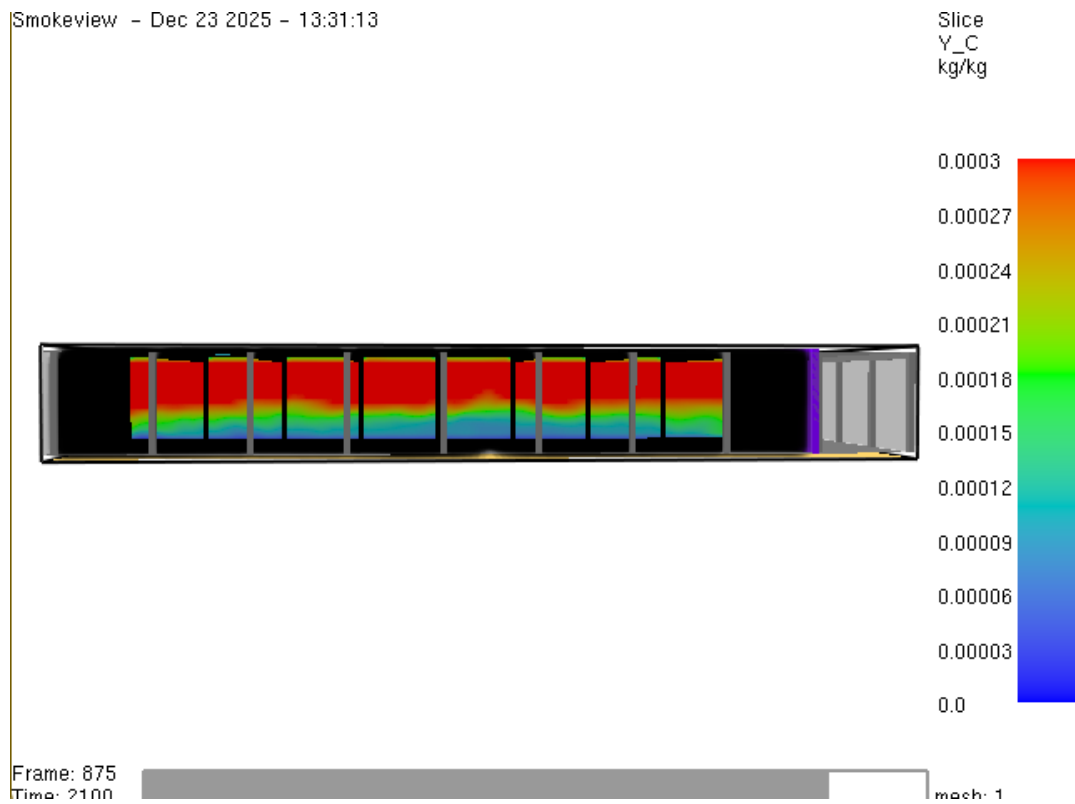


Bild A6.28: Rußausbeute nach t=2100 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

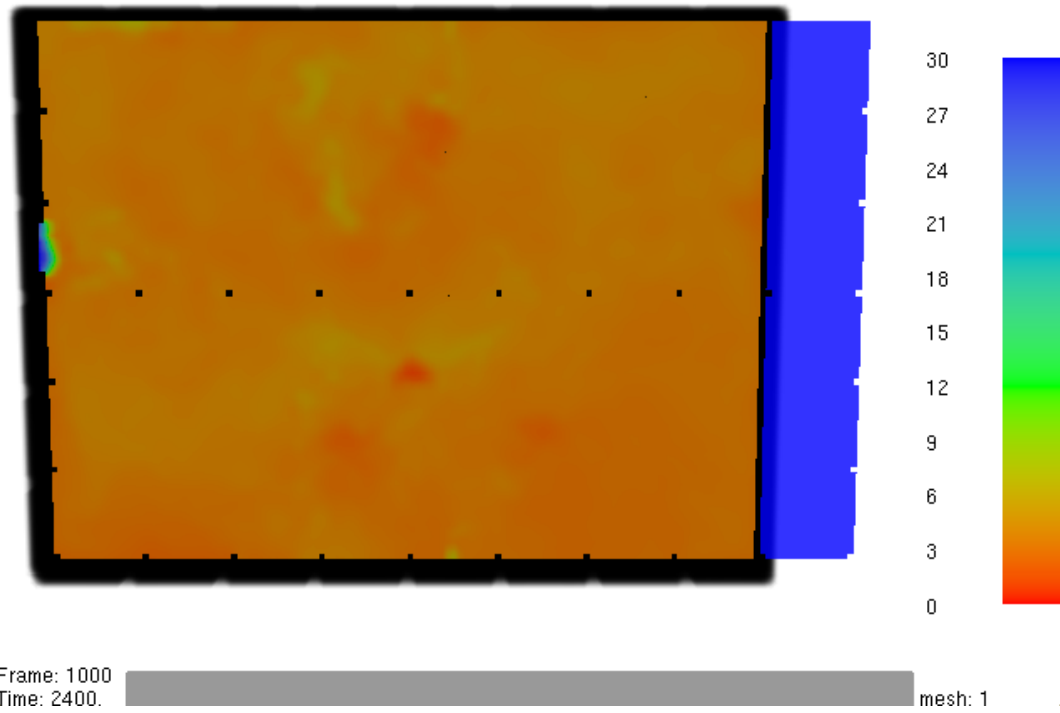


Bild A6.29: Sichtweite nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

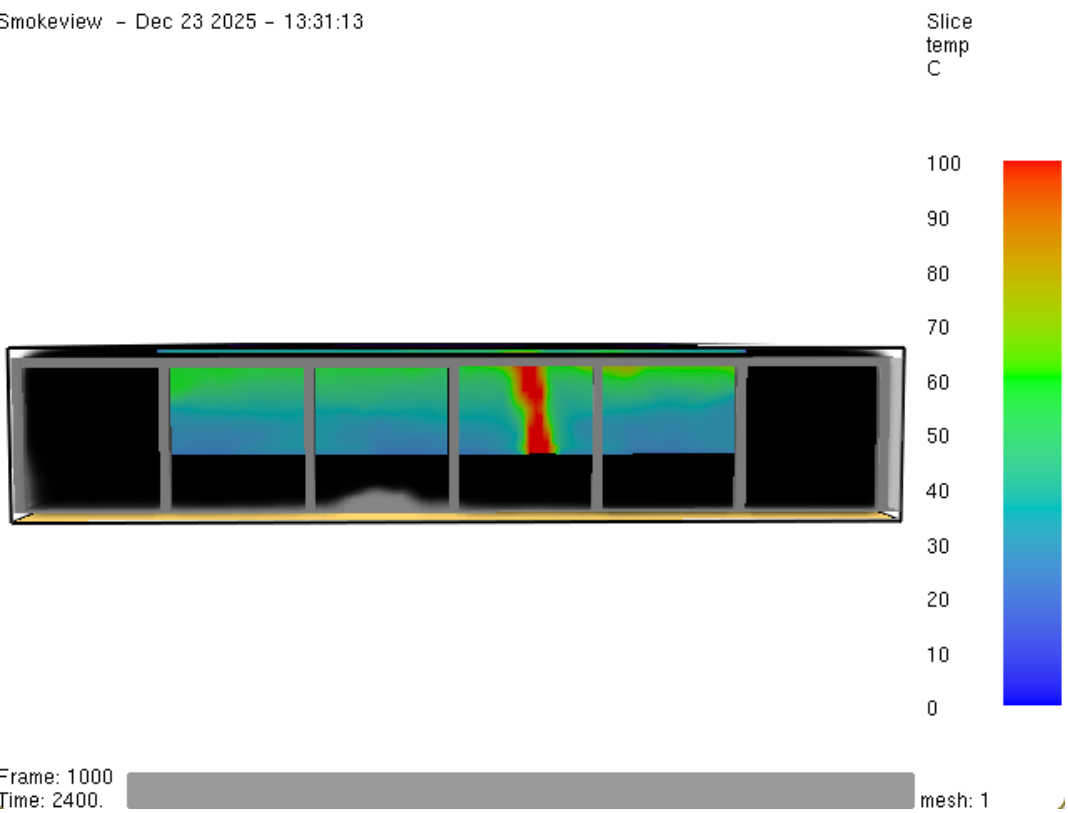


Bild A6.30: Temperatur nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

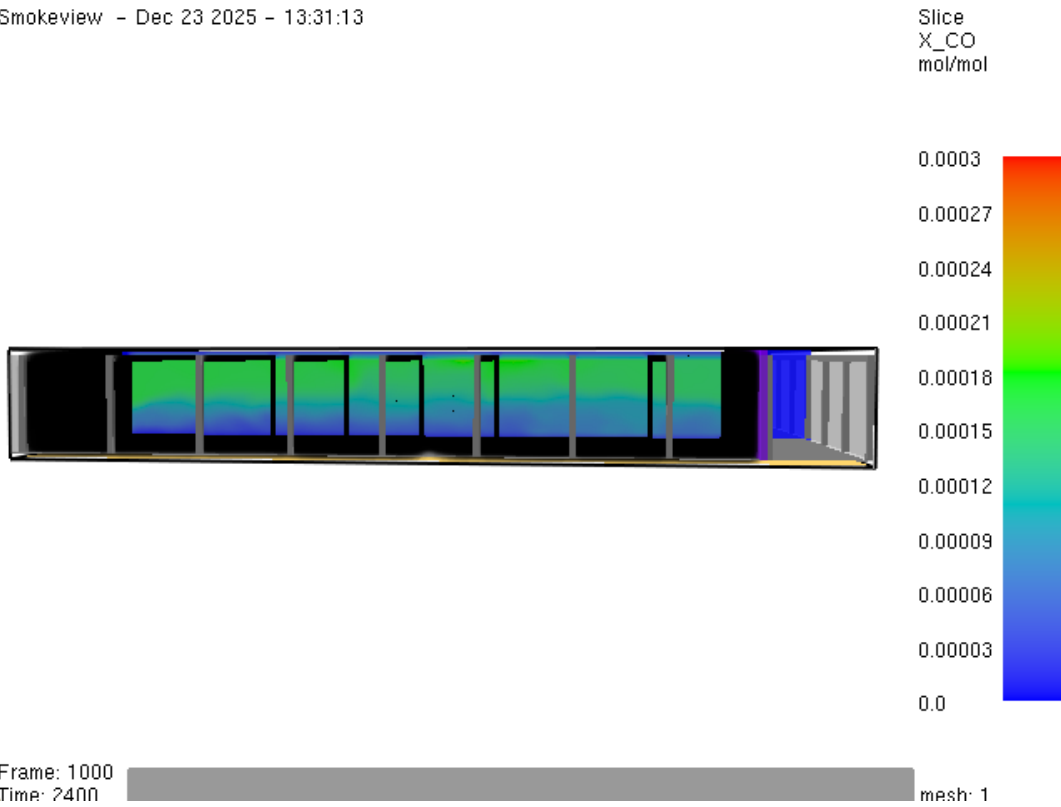


Bild A6.31: Kohlenmonoxid-Konzentration nach t=2400 s

Smokeview - Dec 23 2025 - 13:31:13

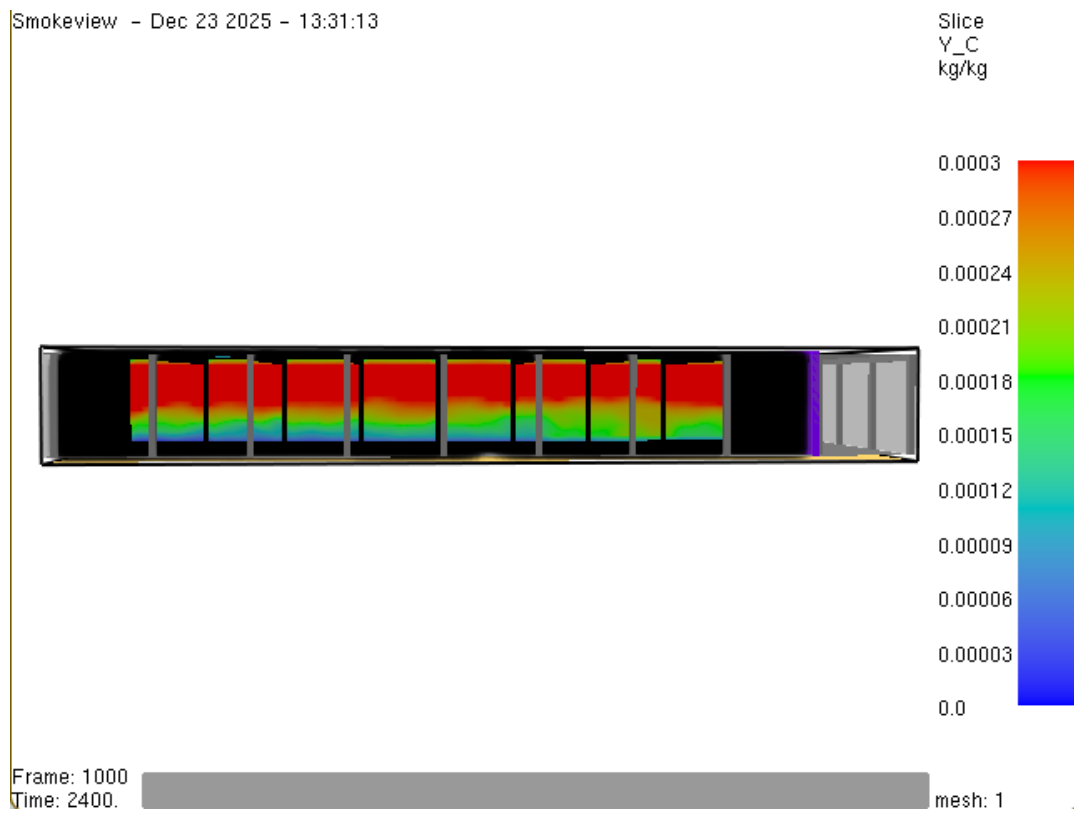


Bild A6.32: Rußausbeute nach t=2400 s