

Rauchbeherrschung in unterirdischen Stationen

Im Gegensatz zu den typischen Situationen bei klassischen Hochbauten beeinflussen in unterirdischen Haltestellen klimatisch und Zugfahrt-bedingte Strömungsverhältnisse die Rauchausbreitung. Aufgrund der hier erforderlichen individuellen Lösungen ist die Wirksamkeit von Brandschutzmaßnahmen im Einzelnen zu überprüfen. Anhand eines Beispiels wird das Vorgehen mittels Brandsimulationen und Messung für einen solchen Fall vorgestellt.

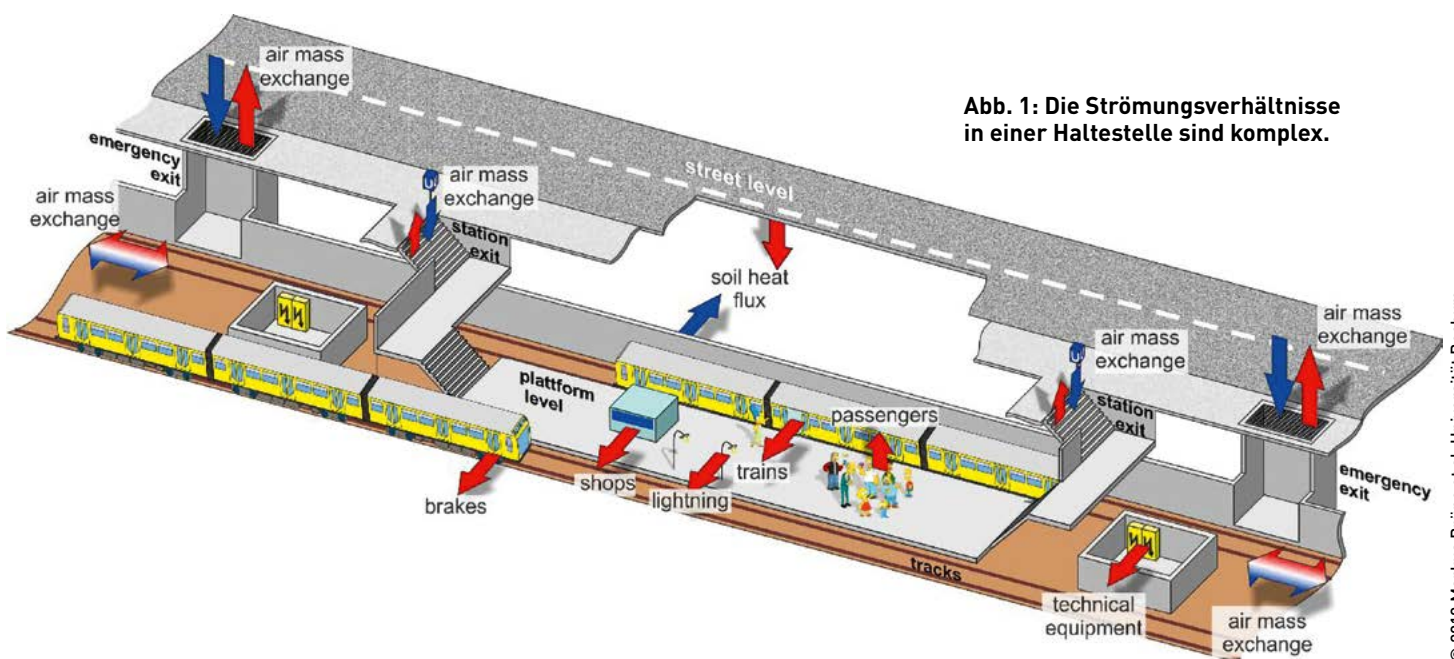


Abb. 1: Die Strömungsverhältnisse in einer Haltestelle sind komplex.

© 2018 Markus Brüne et al. Universität Bochum

**Elia Colombo, Verena Langner,
Matthias Siemon**

Unterirdische Bahnhöfe von Bahn und U-Bahn stellen eine besondere Herausforderung für den Brandschutz dar. Die Brandschutzkonzepte müssen die hohen Personenzahlen berücksichtigen, die vertikalen Fluchtwege und insbesondere die Beeinflussung der Rauchausbreitung durch die Luftströmung in den Tunnelsystemen. Bauliche Einschränkungen durch die tiefe Lage oder durch eine städtische Überbauung erschweren die Evakuierung und Entrauchung. Dies führt zu individuellen Lösungen, die im Einzelnen geprüft werden müssen.

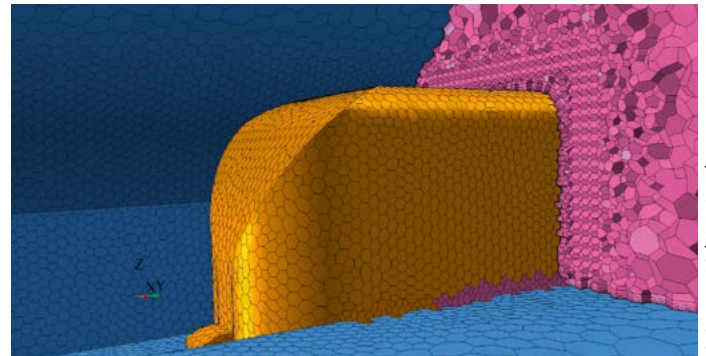
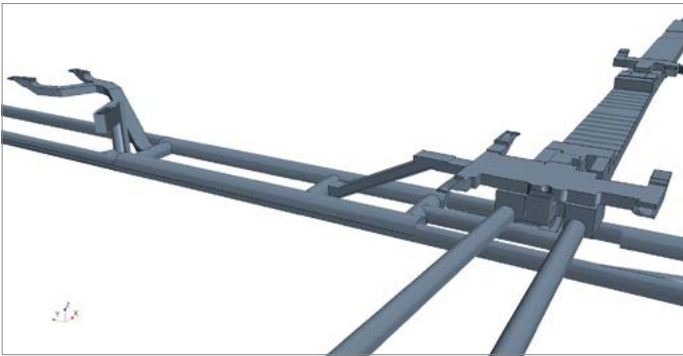
Ein Schwerpunkt der objektiven Überprüfung der Erfüllung der Sicher-

heitsanforderungen ist der Nachweis, dass die (Selbst)Rettung von Personen im Brandfall möglich ist. Bei der sogenannten ASET/RSET-Betrachtung wird überprüft, dass die rechnerisch ermittelte Evakuierungszeit (Required Safe Escape Time, «RSET») deutlich geringer ist als die mit Brandsimulationen ermittelte verfügbare Evakuierungszeit (Available Safe Escape Time, «ASET»). Die verfügbare Evakuierungszeit hängt von der Nutzbarkeit der Rettungswege ab, also beispielsweise davon, wie lange eine ausreichend hohe raucharme Schicht nachgewiesen werden kann. Dies wird für massgebende Szenarien mittels dreidimensionalen Simulationen der Rauchausbreitung nachgewiesen. Bei Aktualisierung von Brandschutzkonzepten bei Bestandsstationen, beispielsweise auf-

grund von steigenden Passagierzahlen oder bei Umbau, kann die Modellierung, basierend auf Messungen, verfeinert werden. Nachfolgend wird ein typisches Vorgehen für eine solche Brandsimulation für unterirdische Stationen vorgestellt, bei dem durch Messungen die Modellierungsgenauigkeit verbessert und die Strömungsmodellierung validiert wurden.

Anforderungen an die Brandsimulation

Die Strömungsverhältnisse in einer Haltestelle sind komplex: Luft kann aus den Tunnelröhren in die Haltestelle strömen, durch die gegenüberliegenden Röhren abströmen oder sich aufteilen und über verschiedene Aufgänge mit Verzweigungen durch verschiedene Ausgänge an die Oberfläche gelangen (vgl. Abb. 1).



© Gruner AG (Abb. 2-11)

Abb. 2/3: 3D-Modell der Haltestelle (links) und Diskretisierung im CFD-Simulationsmodell (CFD = Computational Fluid Dynamics) mit Polyederzellen (rechts).

Während an der Decke warme Luft nach oben steigt, kann in Bodennähe kalte Luft die Treppen herunterströmen. Die Luftbewegung wird durch den temperaturbedingten Auftrieb beeinflusst, der wiederum vom Wärmeeintrag von Betrieben, Beleuchtung, Bremswärme und Klimatisierung der Züge sowie thermisch trägen Wänden abhängt. Die Kolbenwirkung einfahrender Züge führt zu einer schwallartigen Verdrängung und Verwirbelung der Luft, was sich ebenfalls auf die Rauchausbreitung auswirkt. Bei Brandereignissen beeinflussen Brandauftrieb und Entrauchung die Strömung. Somit liefern vereinfachte analytische oder eindimensionale Betrachtungen in der Regel nicht ausreichend differenzierte Ergebnisse, und es bedarf zur Vorhersage der Rauchausbreitung einer dreidimensionalen Modellierung.

Grundströmung

Im Brandfall wird ab der Branddetektion, sobald möglich, zumindest auf der Ereignisstrecke, die Zugfahrt angehalten. Wenn keine Massnahmen dies verhindern, stellt sich in der Haltestelle bald eine klimatisch bedingte Grundströmung ein. Aufgrund der Evakuierungsdauer, welche üblicherweise im Bereich von fünf

bis 15 Minuten liegt, hat eine Grundströmung von wenigen Metern je Sekunde über einen Zeitraum von 300 bis 900 Sekunden einen bedeutenden Einfluss auf die Rauchausbreitung und muss daher berücksichtigt werden. Ähnlich dem Kamineffekt entsteht die Grundströmung in geneigten Tunnelröhren aufgrund der Temperaturunterschiede zwischen der Tunnel- und der Aussenluft. Sie wird jedoch auch durch die weiteren angeschlossenen Tunnel und Schächte beeinflusst. Da das 3D-Simulationsmodell in der Regel nur einen Teil des Tunnelnetzes abbildet, wird der Einfluss von angrenzenden Abschnitten bei Verfügbarkeit, basierend auf Messungen, modelliert. Andernfalls werden physikalische Annahmen getroffen. Ziel ist es, anhand des Modells, abhängig von klimatischen Vorgaben (z.B. «kalter Wintertag» oder «warmer Sommertag»), eine repräsentative Grundströmung für die untersuchten Brand-szenarien vorzugeben, die aufgrund der Geschwindigkeit und Richtung für die Rauchausbreitung kritisch ist.

Modellierung fahrender Züge

Aus Betriebsgründen kommt es vor, dass Züge, die in der Tunnelröhre zu einer Station mit Brandereignis unterwegs sind,

auch bis zu dieser Station weiterfahren müssen, um dort zu halten. Dies ist der Fall, wenn ein Stillstand im Tunnel nicht sicher ist oder wenn benachbarte Ausweichstationen bereits besetzt sind. Zur Beurteilung des Einflusses fahrender Züge auf die Rauchausbreitung muss in der Strömungssimulation sowohl die durch die Züge bewirkte Luftbewegung (Kolbeneffekt) als auch die bewirkte Versperung, z.B. nach dem Halt in der Station, modelliert werden. Bei Feldmodellberechnungen mit fortgeschrittenen Werkzeugen können fahrende Züge beispielsweise durch das Overset-Verfahren modelliert werden, bei dem bewegte Berechnungsnetze (Zugmodell) stehenden Netzen (Haltestellenmodell) überlagert werden.

Messung bei Bestandsbahnhöfen

Bei Bestandsbahnhöfen helfen Messungen der Strömung und der klimatischen Bedingungen beim Verständnis der Strömungsverhältnisse und somit bei der Definition kritischer Brandszenarien. Messungen liefern zudem für die Simulationen Eingangsgrößen, für die ansonsten Annahmen getroffen werden müssten. Einerseits betrifft dies Einflussgrößen ausserhalb des Modellierungsperrimeters

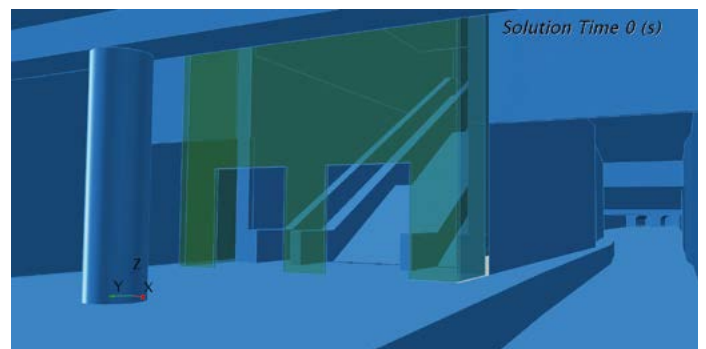
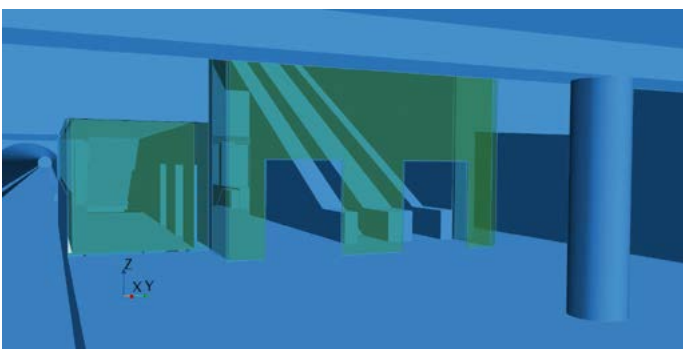


Abb. 4/5: Untersuchte Massnahme zur Verbesserung des Brandschutzes: Einhausungen an den Aufgängen.

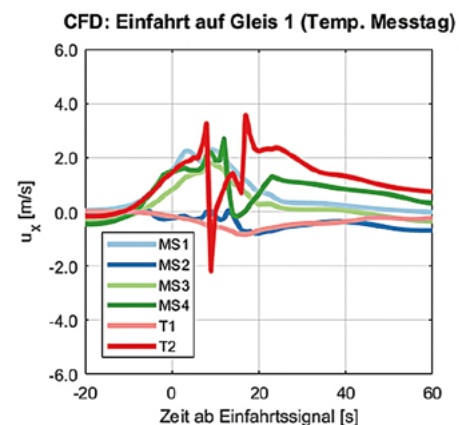
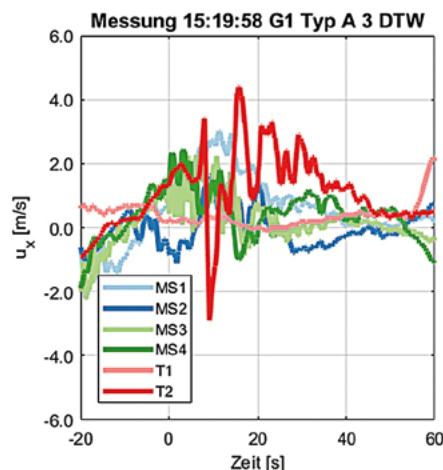


Abb. 6/7/8: Strömungsmessungen mit Ultraschallanemometer für die Strömungsanalyse, die Parametrisierung und Validierung des Simulationsmodells. Rechts: Vergleich der gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Orten zur Validierung der Simulation einer Zugeinfahrt.

wie der Einfluss von benachbarten Stationen und von Schächten im Tunnel auf die Grundströmung. Andererseits betrifft dies empirisch zu bestimmende Größen wie die tatsächlichen Temperaturverhältnisse im Untergrund oder das Fahrverhalten der Züge. Ausserdem liefern die Messungen Validierungsdaten zur Bestätigung der Gültigkeit des Modells. Mit diesen Zielen werden bei Betrieb und bei Betriebsruhe an wesentlichen Orten synchron Messungen der zeitlichen Verläufe von Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen durchgeführt. Hier haben sich Ultraschallanemometermessungen in den Tunneln, Gängen und Aufgängen der Untersuchungshaltestelle bewährt, in Kombination mit gleichzeitigen klimatischen Messungen an der Oberfläche.

Modellierung des Brandes

Das Brandereignis kann als zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Russmission, basierend auf einem abgestimmten Bemessungsbrand, vorgegeben werden. Der Bemessungsbrand geht dabei aus Studien diverser experimenteller und numerischer Brandversuche für verschiedene Brandlasten und Konfigurationen hervor, mit dem Ziel, eine realitätsnahe und auf der sicheren Seite liegende Brandsimulation zu ermöglichen. Durch den Bemessungsbrand wird vermieden, einen zu spezifischen Brandfall vorzugeben.

Beispiel: Wirksamkeit von Treppeneinhausungen

Als Untersuchungsbeispiel wird die Brandsimulation für eine bestehende U-Bahn-Station vorgestellt, deren brand-

schutztechnische Sicherheit bei Umbauarbeiten durch zusätzliche Einhausungen der Aufgänge verbessert werden sollte. Anhand der Simulationen sollte die Wirksamkeit dieser Massnahmen überprüft und Optimierungspotenzial aufgedeckt werden. Abb. 2 zeigt das dreidimensionale CFD-Modell dieser Haltestelle mit zwei Bahnsteigen (CFD = Computational Fluid Dynamics).

Abb. 3 zeigt die Diskretisierung anhand von Polyederzellen im Bereich eines Zugkopfes und Abb. 4/5 die geplanten Einhausungen (grün), welche dem Modell hinzugefügt wurden. Zum Verständnis der Strömungsverhältnisse in der Station wurden bei Betrieb synchron Messungen an verschiedenen Orten durchgeführt (vgl. Abb. 6.). Einige Messergebnisse dienten der Bestimmung von Simulationsparametern, andere der Validierung der Simulationsergebnisse. Abb. 7/8 zeigt einen Validierungsvergleich gemessener und berechneter Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Orten bei einer Zugeinfahrt. Anhand des Simulationsmodells wurden die Strömungsverhältnisse für verschiedene klimatische Bedingungen berechnet (warmer Sommertag, kalter Wintertag). Auf dieser Basis wurden kritische Szenarien für die Brandsimulationen vorgeschlagen (vgl. Abb. 9). Abb. 10 zeigt ein Ergebnis der Brandsimulationen, kurz nach Einfahrt des Gegenzuges zum Ereigniszug: Trotz Verwirbelung bei der Zugeinfahrt ist in diesem Fall die Rauchschichtung schnell wieder stabilisiert. In Abb. 11 erkennt man, dass zum dargestellten Zeitpunkt die Sichtweite in

zwei Meter Höhe nur in Brandnähe durch den Rauch reduziert wird, während der Aufgang dank der Einhausungen rauchfrei bleibt.

Erkenntnisse zum Brandschutz in unterirdischen Haltestellen

Die Analyse der Strömungsverhältnisse verschiedener Stationen und die Untersuchung verschiedener Brandszenarien und Massnahmen führte zu einigen allgemeingültigen Erkenntnissen.

- Mögliche Massnahmen können sowohl die Evakuierungszeit betreffen (z.B. Verbreiterung der Treppenaufgänge – in Bestandsgebäuden jedoch meist nicht möglich) oder Massnahmen zur Verbesserung der Verrauchungssituation sein (z.B. Einsatz von Rauchschürzen oder Einhausung eines Treppenaufgangs mit Brandschutzverglasung).
- Bei Zugbränden steigt die Leistung in der Regel langsam an. Ist bei Vollbrand jedoch die Evakuierung noch nicht abgeschlossen, muss zur Rauchbeherrschung mit grossen Volumenströmen aufwendig entraucht werden, möglichst in Brandnähe. Um dies zu vermeiden, können Massnahmen wie Löschsysteme in den Zügen sinnvoll sein.
- Zum Schutz der Rettungswege helfen Kombinationen von Schürzen, Einhausungen, schneller Detektion, lokaler oder entfernter Entrauchung, die Schaffung von Öffnungen nach draussen und Überdruckbelüftung in den Aufgängen. Zudem sind sichere Bereiche wichtig, wie z.B. rauchfrei

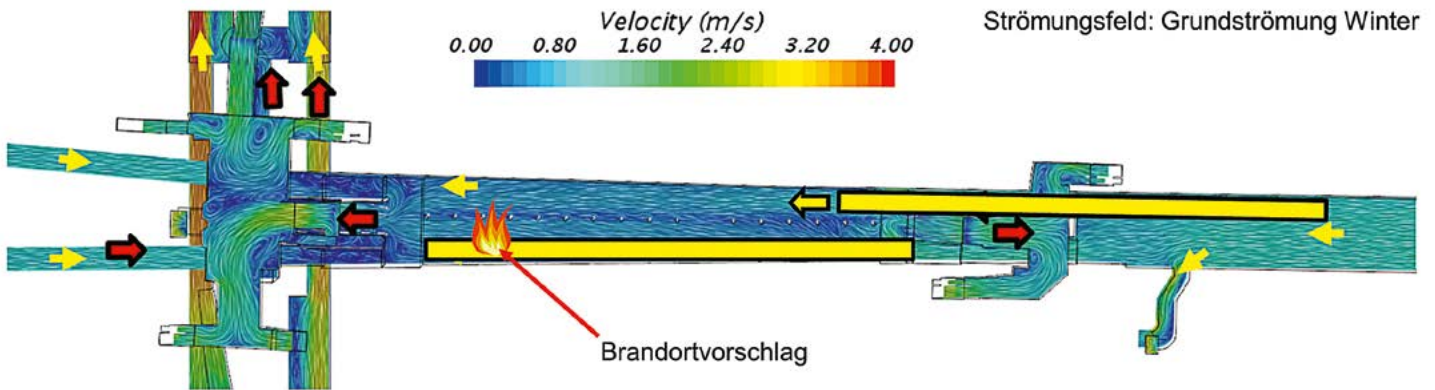


Abb. 9: Vorschlag eines ungünstigen Brandortes auf Basis der für winterliche Bedingungen berechneten Grundströmung.

gehaltene Nachbarröhren oder Wartebereiche vor den Aufgängen. Häufig genügt eine Teilmenge dieser Massnahmen für eine sichere Selbstrettung.

- Die Auslegung und Wichtigkeit der Massnahmen hängt stark von der Beschaffenheit der Stationen ab. So können zuweilen hohe Decken Rauch lange genug fassen, sodass lediglich

Schürzen und Einhausungen notwendig sind. Einseitige Entrauchung kann möglich sein, ohne Personen auf dem Bahnsteig zu gefährden. Insbesondere bei hohen Decken, zahlreichen breiten Aufgängen und nahen sicheren Bereichen kann oft eine Entfluchtung abgeschlossen werden, ehe eine Gefährdung durch die Rauchgase eintritt.

Fazit

Der Aufwand bei konkreten Nachweisen auf Grundlage komplexer Simulationen in Kombination mit Strömungsmessungen ist nicht unerheblich. Brandversuche mit realistischen Brandlasten sind jedoch wegen der Schadensgefahr nicht möglich. Auch eine Vereinfachung der Verhältnisse in unterirdischen Verkehrsanlagen und Tiefhaltstellen ist nicht in jedem Fall möglich. Zonenmodelle sind aufgrund der Komplexität oft nicht anwendbar. Die Anwendung von 3D-Brandsimulationen ermöglicht neben der Untersuchung der Rauchausbreitung im Brandfall auch eine konkrete Auslegung und Optimierung von wirksamen Massnahmen sowie die Überprüfung der Einhaltung der Sicherheitsanforderungen durch die technischen Behörden.

Aus kombinierten Untersuchungen (Messung und Simulation) werden zunehmend Erfahrungen gesammelt, die eine Vorgabe repräsentativer Brandszenarien ohne begleitende Messung ermöglichen sollen (z.B. im Rahmen des umfangreichen Forschungsvorhabens Orpheus, vgl. www.orpheus-projekt.de). ■

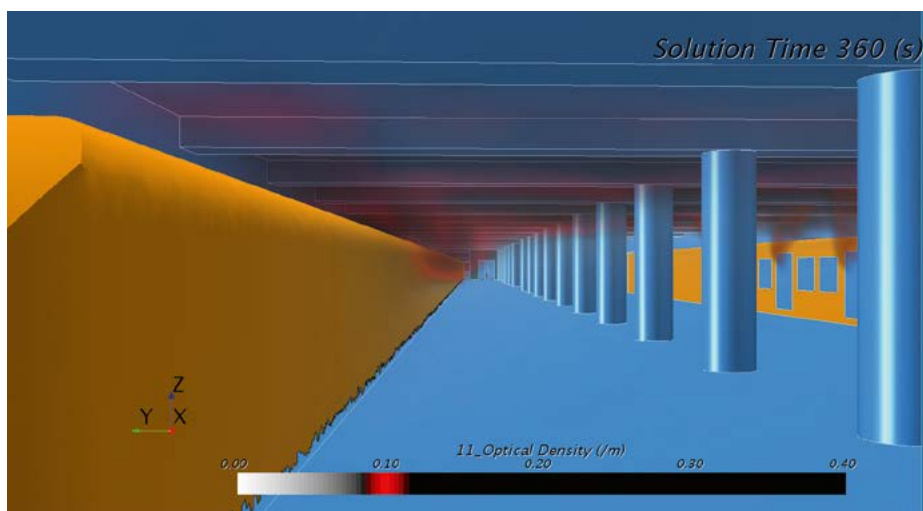
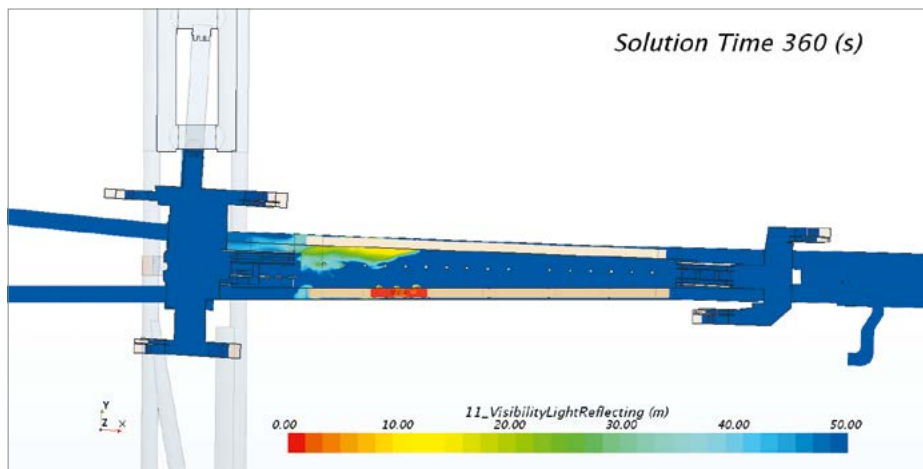


Abb. 10/11: Simulationsergebnisse bei einem Zugbrand, vier Minuten nach Brandbeginn (beide Züge bereits eingefahren): oben die Sichtweite, unten die Rauchverteilung.



DR.-ING. ELIA COLOMBO
Projektleiter Strömungssimulation und Strömungsmessung, Gruner AG
DIPL.-MATH. VERENA LANGNER
Niederlassungsleiterin, Gruner GmbH
DR.-ING. MATTHIAS SIEMON
Leiter Abteilung Brandschutz, Ingenieurmethoden, Gruner AG