

Betrachtung der Wärmefreisetzung im Brandfall

Erstellt im Auftrag des



Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2
A-1030 Wien

Dokument-Nr.: FVT-110/10/Be V&U 10/10/6400 vom 20.12.2010



BERATENDE
INGENIEURE
CONSULTING
ENGINEERS
INGENIEURS
CONSEILS

ILF BERATENDE INGENIEURE

Feldkreuzstraße 3, A-6063 Rum bei Innsbruck
Tel: 0512-2412-0 / Fax: 0512-2412-5900
E-Mail: info@ibk.ilf.com



**Forschungsgesellschaft für
Verbrennungskraftmaschinen und
Thermodynamik mbH**

**FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR VERBRENNUNGS-
KRAFTMASCHINEN UND THERMODYNAMIK MBH**

Innfeldgasse 21 A, 8010 GRAZ
Telefon +43 (0) 316 873 - 7200
Telefax + 43 (0) 316 873 – 8080
E-Mail: office@fvt.at

Dokument-Nr. FVT-110/10/Be V&U 10/10/6400	Betrachtung der Wärmefreisetzung im Brandfall Zusammenfassung	Version: 2.0 freigegeben
---	---	-----------------------------

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	4
1.1	Status der RVS 09.02.31, August 2008.....	4
1.2	Änderungsbedarf.....	5
2	LÄNGSLÜFTUNG.....	6
2.1	Dreidimensionale Strömungsberechnung.....	6
2.1.1	Randbedingungen.....	6
2.1.2	Ergebnisse der dreidimensionalen Strömungsberechnung.....	8
2.2	Vorschlag 1D Berechnungsmodell.....	10
2.2.1	Berechnung des Auftriebes im Brandfall.....	10
2.2.2	Lufttemperatur am Brandort.....	10
2.2.3	Temperaturverlauf entlang der Tunnelachse.....	11
2.2.4	Auftriebskraft entlang der Tunnelachse.....	11
2.2.5	Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten für das 1D Berechnungsmodell.....	13
2.2.6	Zeichenerklärung.....	18
3	VERWENDETE LITERATUR.....	19

1 Einleitung

Die RVS 09.02.31 gibt Rahmenbedingungen vor, die die Wärmefreisetzung im Falle eines Brandes im Tunnel bei der Dimensionierung der Lüftungsanlage behandeln. Ziel dieser Vorgaben ist für einfache Tunnelanlagen die durch die Wärmefreisetzung entstehenden Auftriebskräfte in einer einfachen Art zu berücksichtigen und eine vergleichbare Berechnungsbasis zu gewährleisten.

Dieser Bericht stellt die Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Berechnungen zur Wärmefreisetzung in Tunneln mit Hufeisenprofil, erstellt durch ILF Beratende Ingenieure [4], sowie jener in Tunneln mit Kastenprofil, erstellt durch FVT mbH [3] dar. Die Arbeiten wurden im Rahmen der Überarbeitung der RVS 09.02.31 vom BMVIT in einem Forschungsprojekt teilweise finanziert und von den beiden Firmen ILF Beratende Ingenieure (Bernhard Höpperger und Jeanniene Croll) sowie FVT mbH (Peter Sturm, Michael Beyer und Michael Bacher) durchgeführt.

1.1 Status der RVS 09.02.31, August 2008

In Kapitel 6 der RVS 09.02.31 [2] wird dazu wie folgt ausgeführt:

Als Dimensionierungsbrand für die Lüftung wird für alle Tunnel < 3% Längsneigung mit 2 Fahrstreifen und üblichem Tunnelquerschnitt der Brand eines LKWs und zweier PKW festgelegt, womit sich eine Rauchgasmenge von 120 m³/s ergibt.

Bei davon abweichenden Anlageverhältnissen sind gesonderte Untersuchungen für Bemessungsansätze durchzuführen.

Die Druckwirkung der Luft im Tunnel durch die Erwärmung im Regelfall als auch im Brandfall ist bei der Bemessung gemäß folgenden Ansätzen zu berücksichtigen:

$$\Delta\rho_{\text{nat}} = \frac{(\rho_a \pm \rho_i) \cdot g \cdot L_{\text{Tunnel}} \cdot s}{100} \text{ [Pa]}$$

$$\Delta\rho_{\text{Brand}} = \frac{(\rho_i - \rho_{\text{Brand}}) \cdot g \cdot L_{\text{Tunnel}} \cdot s \cdot \eta_{\text{Brand}}}{100} \text{ [Pa]}$$

$$\Delta\rho = \frac{p}{R_L \cdot T} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

mit: $\Delta\rho_{\text{nat}}$ [Pa] Druckwirkung durch den natürlichen Auftrieb

$\Delta\rho_{\text{Brand}}$ [Pa] Druckwirkung durch die erwärmte Luft (Brand)

ρ [kg/m³] Dichte abhängig von der Temperatur und dem Aussendruck

L_{Brand} [m] Länge des Brandabschnittes

s [%] Längsneigung

s_{Brand} [%] Längsneigung im Brandabschnitt (L_{Brand})

η_{Brand} *Brandwirkungsgrad (Verhältnis von tatsächlicher zu theoretischer Wärmefreisetzung)*
Index a *außerhalb des Tunnels*

Für Tunnel mit gemischtem Pkw/Lkw-Verkehr ist der Dimensionierungsbrand mit 30 MW anzusetzen; für reinen Pkw-Verkehr mit 5 MW. Für Tunnel mit höherem Lkw-Anteil (> 15 %) ist die Auswirkung auf die Tunnelsicherheit auf Basis einer Tunnel-Risikoanalyse bzw. einer Risikobewertung darzustellen und als Maßnahme eine Erhöhung der Brandlast zu prüfen.

Für die Bemessungsbrände gelten folgende charakteristischen Werte:

Dimensionierungsbrand	5 MW	30 MW	50 MW
ΔT_{Brand} ohne Absaugung	25 K	65 K	90 K
ΔT_{Brand} mit Rauchabsaugung	20 K	40 K	65 K
ΔT_{nat}	10 K	10 K	10 K
L_{Brand}	400 m	800 m	800 m
η_{Brand}	0,85	0,75	0,75

Die obigen Werte stellen mittlere Erfahrungswerte dar, bei speziellen Anlageverhältnissen sind Abweichungen zu berücksichtigen.

Weitere relevante Vorgaben für die Lüftungsdimensionierung sind:

- Längslüftung (Punkt 4.2.1): 120 m³/s oder 2 m/s über den Querschnitt.
- Halbquer- und Querlüftungen (Punkt 4.2.2 und 4.2.3): 120 m³/s Absaugvolumenstrom

1.2 Änderungsbedarf

In der derzeitigen Berechnungsweise für den Brandauftrieb und der daraus resultierenden Druckdifferenz wird der Einfluss der Längsgeschwindigkeit und des Tunnelquerschnittes nicht berücksichtigt. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Strömung im Bereich eines Brandes ein stark dreidimensionales Verhalten aufweist und die Temperaturerhöhung der Luft sehr stark von der Längsströmungsgeschwindigkeit, Brandlast und dem Tunnelquerschnitt abhängt. Um diese Effekte zukünftig in der Lüftungsdimensionierung für längsgelüftete Straßentunnel zu berücksichtigen und die derzeit festgeschriebenen Temperaturerhöhungen des Temperaturblocks (siehe Auszug aus RVS 09.02.31) für unterschiedliche Längsströmungen, Brandlasten und Tunnelquerschnitte zu prüfen, wurden zusammen mit der Fa. ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH dreidimensionale Strömungsberechnungen durchgeführt. Mithilfe von den Strömungssimulationsprogrammen ANSYS Fluent und OpenFOAM wurden die räumliche Auftriebswirkung der heißen Rauchgase und die Temperaturverteilung bei unterschied-

Dokument-Nr. FVT-110/10/Be V&U 10/10/6400	Betrachtung der Wärmefreisetzung im Brandfall Zusammenfassung	Version: 2.0 freigegeben
---	---	-----------------------------

lichen Randparametern durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse dieser Rechnungen, soll eine einfache eindimensionale Berechnungsmethode gefunden werden, welche die dreidimensionalen Effekte in einer vertretbareren Genauigkeit berücksichtigt. Die Ergebnisse der dreidimensionalen Berechnungen sind in dem Bericht [4] für das Hufeisenprofil und [3] für das Rechteckprofil angeführt.

2 Längslüftung

Gemäß RVS 09.02.31 muss die Lüftungsdimensionierung so erfolgen, dass bei den zu berücksichtigenden Randbedingungen einen Volumenstrom von 120 m³/s (Dichte 1,2 kg/m³) oder eine Geschwindigkeit von 2 m/s über den Querschnitt erzielt werden muss. Als Dimensionierungsbrand ist in der Regel eine Brandleistung von 30MW bzw. 50 MW (LKW Anteil > 15%) zu prüfen.

2.1 Dreidimensionale Strömungsberechnung

2.1.1 Randbedingungen

Im Rahmen der zuständigen Arbeitsgruppe wurden folgende Randbedingungen festgelegt.

2.1.1.1 Tunnelgeometrie

Es werden zwei unterschiedliche Tunnelprofile betrachtet, welche standardmäßig für österreichische Straßentunnel verwendet werden. Eins davon ist das typische Profil für bergmännische Tunnel, das so genannte Hufeisenprofil und das andere ist ein einfaches Rechteckprofil, das typischerweise für Einhausungen verwendet wird. Die Berechnungen wurden für Hufeisenprofile sowie für Rechteckprofile mit einer Querschnittsfläche von 53 m² (zweispurig) und 70 m² (dreispurig) durchgeführt. Der Tunnel besitzt eine konstante Längsneigung von 1,5 % und eine Länge von 2850 m.

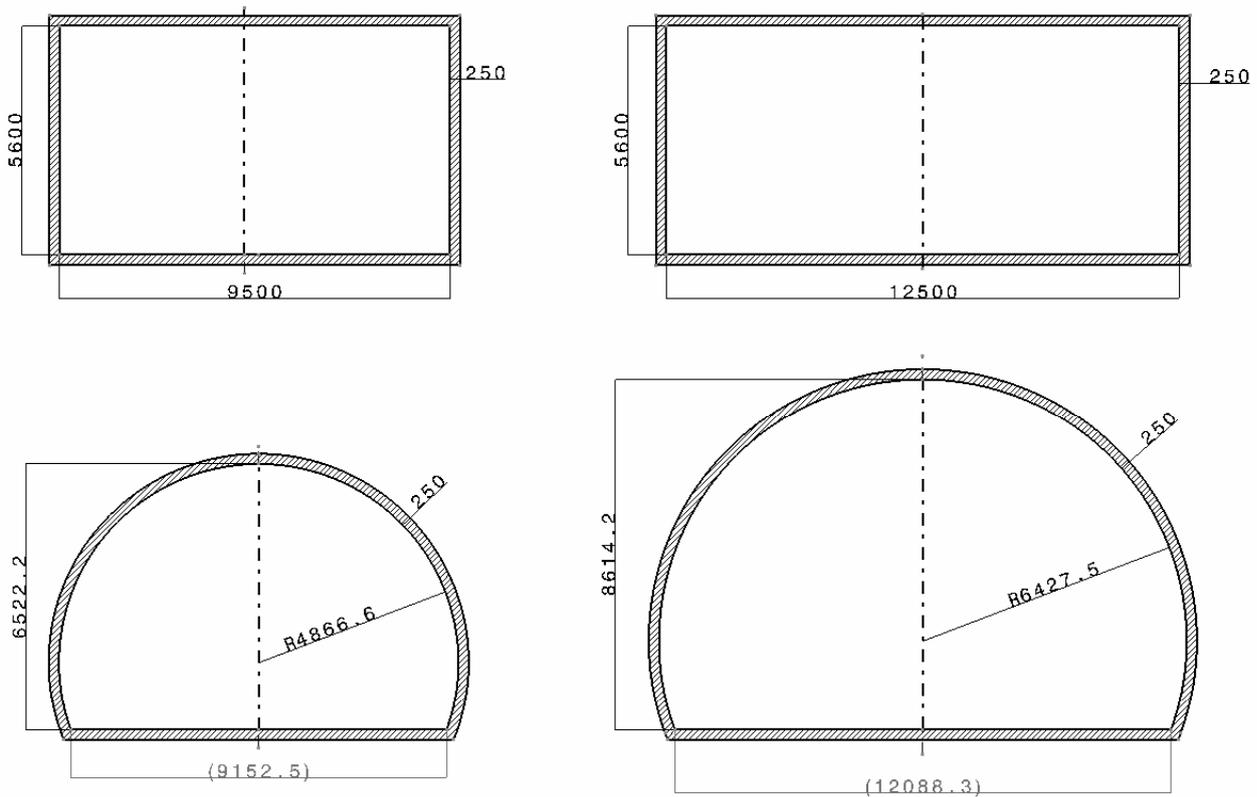


Abbildung 1: Querschnitte des Hufeisen- und Rechteckprofils (zweispurige Straßentunnel links, dreispurige Straßentunnel rechts)

Die umhüllende Betonschicht hat eine Stärke von 250 mm, welche die typische Konstruktion von österreichischen Straßentunneln entspricht. Die physikalischen Parameter der Betonschicht sind: spezifische Wärmekapazität von 1000 J/kgK, eine Dichte von 2400 kg/m³ und eine Wärmeleitfähigkeit von 2,0 W/mK. Diese Wand ist für die Berechnung der konvektiven Wärmeübertragung von Bedeutung und hat zu Simulationsbeginn eine Initialtemperatur von 15 °C.

2.1.1.2 Parameter für den Brandfall

Für die Wärmefreisetzung im Brandfall wurde eine Brandlast von 30 MW und 50 MW verwendet. Die Wärmequelle hat die Abmessungen 2 m breit, 3 m hoch und 18 m lang (repräsentiert einen brennenden LKW) und befindet sich tunnelmittig 350 m vom Einlassportal entfernt. Es wurde angenommen, dass die Brandleistung linear innerhalb von 5 Minuten auf die maximale Brandleistung ansteigt und dann 15 Minuten konstant bleibt. Die Simulationsdauer beträgt somit 20 Minuten.

Für die Wärmequelle wurde Heizöl mit einem Heizwert von 42,6 MJ/kg verwendet. Das ergibt für die Brandleistung von 30 MW einen Brennstoffmassenstrom von 0,704 kg/s und 1,174 kg/s entsprechend für 50 MW.

Die Simulationen wurden für drei unterschiedliche Geschwindigkeitskategorien durchgeführt: Bei einer Einströmgeschwindigkeit von 1,5 m/s, bei kritischer Geschwindigkeit und bei der Einströmgeschwindigkeit lt. RVS vorgegeben. Die Lufttemperatur wurde mit 15 °C (Dichte = 1,225 kg/m³) angenommen, wobei sich daraus die in der Tabelle 1 aufgelisteten Massenströme für die Einlassrandbedingung ergeben.

Tabelle 1: Simulationsfälle der dreidimensionalen Strömungsberechnung

		Rechteckprofil (TU-Graz)		Hufeisenprofil (ILF)	
		53 m ²	70 m ²	53 m ²	70 m ²
		Massenstrom in kg/s (Einlass) / Geschwindigkeit in m/s (Einlass)			
Wärmefreisetzung	30 MW	97,4 / 1,50	128,6 / 1,50	97,4 / 1,50	128,6 / 1,50
		144,1 / 2,22	178,4 / 2,08	146,7 / 2,26	171,5 / 2,00
				162,3 / 2,50	223,0 / 2,60
	50 MW	97,4 / 1,50	128,6 / 1,50	97,4 / 1,50	128,6 / 1,50
		146,7 / 2,26	171,5 / 2,00	146,7 / 2,26	171,5 / 2,00
		162,3 / 2,50	202,4 / 2,36	181,8 / 2,8	257,3 / 3,00

2.1.2 Ergebnisse der dreidimensionalen Strömungsberechnung

Eine Auflistung der durchgeführten Berechnungsfälle kann Tabelle 1 entnommen werden. Grundsätzlich weisen das Strömungsfeld und die Temperaturverteilung in der Nähe der Brandquelle ein stark dreidimensionales Verhalten auf. Diese dreidimensionale Zone erstreckt sich jedoch in den meisten Fällen über wenige hundert Meter. Innerhalb des größten Teils des Tunnels konnten eindimensionale Zustände festgestellt werden. Abbildung 2 zeigt die Temperaturverteilung in der Symmetrieebene des Tunnels und in Abbildung 3 die Temperaturverteilung in unterschiedlichen Tunnelquerschnitten am Brandort. Durch die zusätzliche Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren ist die aufgrund der Auftriebskräfte resultierende Sekundärströmung zu erkennen.

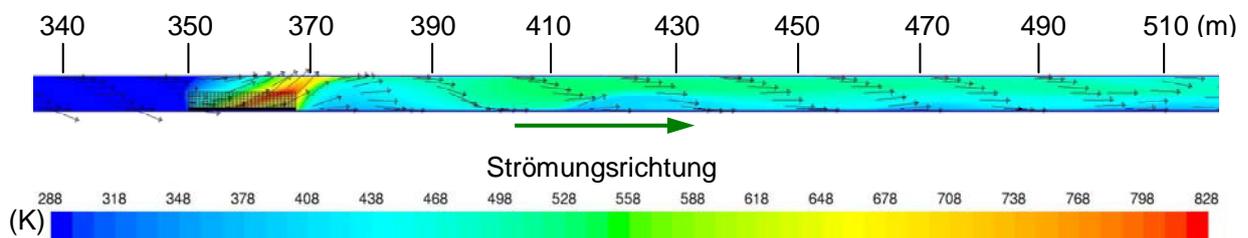


Abbildung 2: Temperaturverteilung in der Symmetrieebene des Rechtecktunnels mit 53 m² und einer Brandleistung von 50 MW bei kritischer Eintrittsgeschwindigkeit.

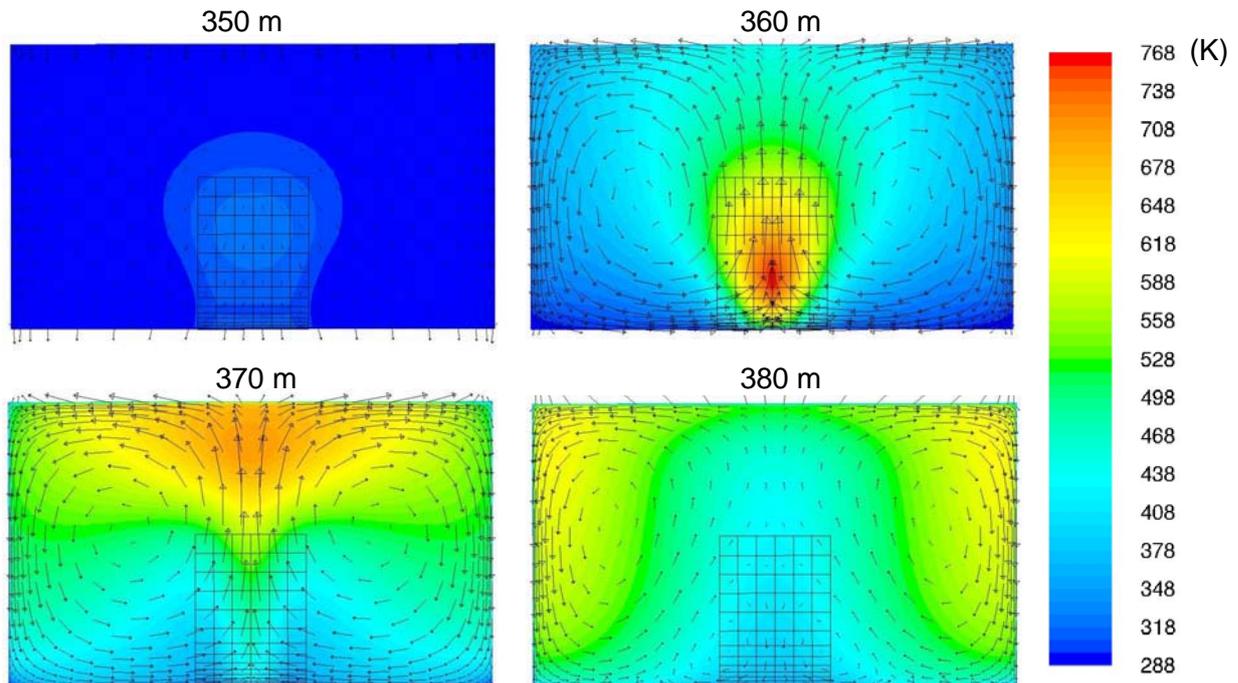


Abbildung 3: Temperaturverteilung und Sekundärströmung in den Tunnelquerschnitten 350, 360, 370 und 380 m vom Einlassportal für den Rechtecktunnel mit 53 m² und einer Brandleistung von 50 MW bei kritischer Einströmgeschwindigkeit.

Von größter Bedeutung sind die Temperaturverläufe entlang der Tunnelachse, da aus den unterschiedlichen Temperaturen Druckdifferenzen resultieren und dadurch Auftriebskräfte entstehen. Abbildung 4 zeigt die Temperaturverteilung entlang der Tunnelachse bei einer Wärmefreisetzung von 30 MW. Die Werte wurden über die Querschnittsfläche gemittelt. Zu erkennen ist die Temperaturerhöhung vom Brandort in Strömungsrichtung. Dieser Temperaturanstieg wirkt sich beginnend vom Brandort in Strömungsrichtung über 2,4 km aus. Diese Ausdehnung ist sehr viel länger als bei den Eureka FIRETUN Tests, bei denen eine thermische Beeinflussung über eine Länge von ungefähr 800 m vom Brandort in Strömungsrichtung, beobachtet wurde. Dieser Unterschied könnte aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen, wie z. B. eine höhere Wärmestrahlung oder, eher wahrscheinlich, durch eine geringere und veränderliche Wärmefreisetzung während den Brandversuchen, auftreten.

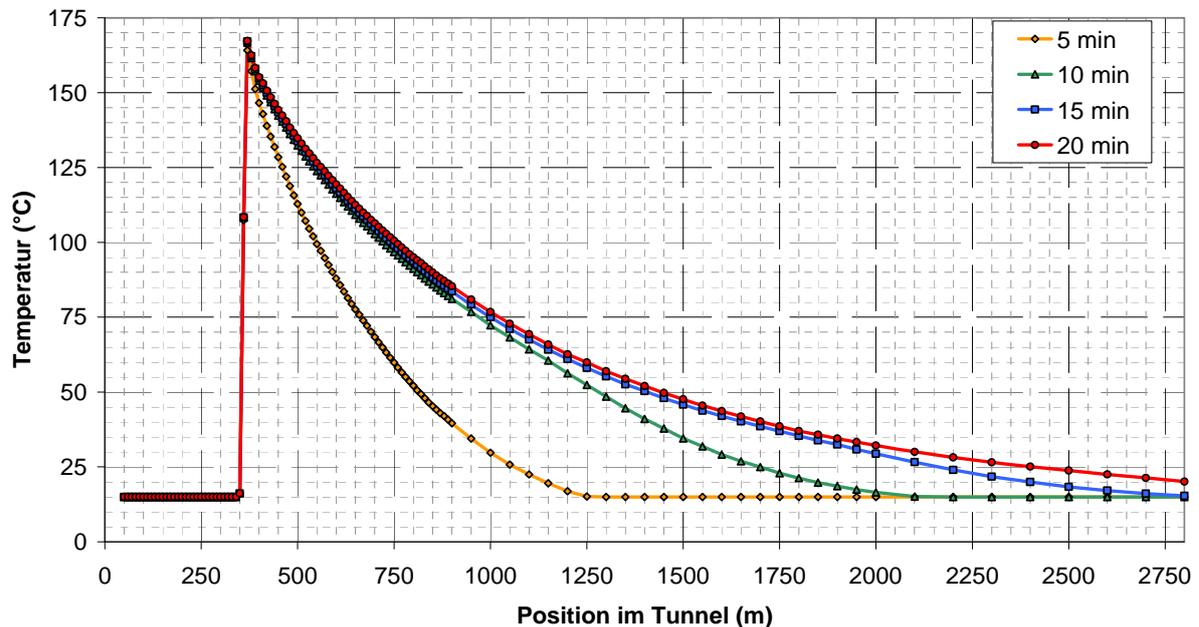


Abbildung 4: Flächengemittelter Temperaturverlauf entlang der Tunnelachse, Rechteckquerschnitt 53 m², 30 MW Wärmefreisetzung, Eintrittsgeschwindigkeit der Luft 2,22 m/s.

Die Detailergebnisse für alle durchgeführten Berechnungen finden sich in den Berichten [3] und [4].

2.2 Vorschlag 1D Berechnungsmodell

Nachfolgend wird ein eindimensionaler Berechnungsansatz vorgestellt, welcher auf den grundsätzlichen physikalischen Grundgleichungen [1] ausgeht und auf Basis der dreidimensionalen Strömungsberechnungen und den daraus resultierenden Temperaturverläufen entlang der Tunnelachse Parametrisiert wurde.

2.2.1 Berechnung des Auftriebes im Brandfall

Wie bereits erwähnt, treten bei Straßentunnel mit Längsneigungen bei einer Wärmefreisetzung zusätzliche Kräfte (Auftriebseffekte) auf, die bei der Auslegung einer Längslüftung berücksichtigt werden müssen. Diese Auftriebskräfte sind von der Größe der Wärmefreisetzung und von den daraus resultierenden Temperaturen abhängig und können durch den nachfolgenden eindimensionalen Ansatz berechnet werden.

2.2.2 Lufttemperatur am Brandort

Wird die Energie an einem Kontrollvolumen bilanziert, kann die Erhöhung der Lufttemperatur aufgrund einer Wärmefreisetzung, durch folgenden Ausdruck bestimmt werden:

$$T_{x,0} = \frac{\dot{Q} \cdot 10^6 \cdot \eta_{Brand}}{\dot{m} \cdot c_p} + T_i \quad (1)$$

Dokument-Nr. FVT-110/10/Be V&U 10/10/6400	Betrachtung der Wärmefreisetzung im Brandfall Zusammenfassung	Version: 2.0 freigegeben
---	---	-----------------------------

Die Temperatur $T_{x,0}$ beschreibt die Temperatur der Luft am Brandort ($x = 0$) und ist aufgrund des eindimensionalen Ansatzes die gemittelte Temperatur im Querschnitt. Beim Vergleichen der berechneten Temperaturen mit den flächengemittelten Temperaturen aus den dreidimensionalen Strömungsberechnungen stellte sich für alle Fälle bei den kein back-layering auftritt eine sehr gute Übereinstimmung heraus (Abweichung $\sim 1\%$). Bei den Fällen mit back-layering werden die Rauchgase durch das langsame Rückströmen und der Strömungsumkehr am Brandort im dreidimensionalen Fall um etwa 30% mehr erwärmt.

2.2.3 Temperaturverlauf entlang der Tunnelachse

Die Lufttemperatur am Brandort nimmt in Strömungsrichtung aufgrund der konvektiven Wärmeübertragung zur Tunnelwand kontinuierlich ab, bis die Temperatur der Tunnelwand erreicht wird. Diese konvektive Wärmeübertragung kann mit der folgenden Energiegleichung für eindimensionale Strömungen bestimmt werden.

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot d\tilde{T}_x + U \cdot \alpha \cdot (T_w - T_{x,0}) \cdot d\tilde{x} = 0 \quad (2)$$

Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass die Temperatur der Tunnelwand, der Wärmeübergangskoeffizient, der Tunnelumfang und die spezifische Wärmekapazität konstant sind und der Massenstrom im Tunnel bekannt ist.

Die Integration der Gleichung 2 von $x = 0$ (Brandort) bis x entlang der Tunnelachse ($d\tilde{x}$) liefert den folgenden Temperaturverlauf:

$$T_x = T_i + (T_{x,0} - T_w) \cdot e^{\left(\frac{-\alpha \cdot U \cdot x}{c_p \cdot \dot{m}}\right)} \quad (3)$$

Falls der Umfang im Tunnel nicht konstant ist, kann für die Berechnung der Temperatur am Ort x der gewichtete mittlere Umfang vom betrachteten Abschnitt x verwendet werden (siehe Gleichung 4 oder Gleichung 3 inkrementell betrachtet).

$$U = \frac{\sum_k x_k \cdot U_k}{x} \quad \text{with} \quad x = \sum_k x_k \quad (4)$$

2.2.4 Auftriebskraft entlang der Tunnelachse

Im nachfolgenden wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht die Auftriebskraft entlang der Tunnelachse abhängig von der Temperatur T_x zu berechnen. Die Auftriebskraft entsteht durch Längsneigungen im Tunnel und bewirkt eine Druckdifferenz, die durch folgenden Ansatz definiert werden kann:

$$dp = (\rho_i - \rho_x) \cdot g \cdot s \cdot dx \quad (5)$$

Die von der Position x abhängige Dichte ρ_x kann mithilfe der idealen Gasgleichung folgendermaßen definiert werden:

$$\rho_x = \frac{P_0}{R \cdot T_x} \quad (6)$$

Dokument-Nr. FVT-110/10/Be V&U 10/10/6400	Betrachtung der Wärmefreisetzung im Brandfall Zusammenfassung	Version: 2.0 freigegeben
---	---	-----------------------------

Es wird angenommen, dass der Druck p_0 konstant ist bzw. die Änderung des Absolutdruckes entlang der Tunnelachse sehr klein sind gegenüber der Temperaturänderung. Durch das Einfügen der Gleichung 6 in die Gleichung 5 kann die Differentialgleichung der aufgrund des Auftriebes verursachten Druckdifferenz gefunden werden.

$$d\tilde{p} = \left(\rho_i - \frac{p_0}{R \cdot \left[T_i + (T_{x,0} - T_W) \cdot e^{\left(\frac{-\alpha \cdot U \cdot \tilde{x}}{c_p \cdot \dot{m}} \right)} \right]} \right) \cdot g \cdot s \cdot d\tilde{x} \quad (7)$$

Die Integration von $x = 0$ bis x dieser Differentialgleichung führt zu der Auftriebskraft der heißen Rauchgase. Diese Gleichung kann für Straßentunnel mit konstanter Längsneigung und Umfang verwendet werden.

$$\Delta p = - \frac{g \cdot s \cdot \rho_i \cdot c_p \cdot \dot{m}}{\alpha \cdot U} \cdot \ln \left[\frac{T_i + (T_{x,0} - T_W) \cdot e^{\left(\frac{-\alpha \cdot U \cdot x}{c_p \cdot \dot{m}} \right)}}{T_{x,0}} \right] \quad (8)$$

Falls die Längsneigung und der Umfang des Straßentunnels nicht konstant bleiben, muss die Berechnung der Auftriebskraft in mehrere Abschnitte, bei denen der Umfang und die Längsneigung konstant sind, aufgeteilt werden. Dies kann entweder in inkrementeller Form oder durch das Aufsummieren aller Abschnitte mit konstanter Längsneigung praktiziert werden. Für den Fall, dass es mehrere Abschnitte mit unterschiedlichen Längsneigungen gibt (siehe Abbildung 5), kann die aufgrund des Auftriebes verursachte Druckdifferenz folgendermaßen berechnet werden (Index I, II usw. kennzeichnet die unterschiedlichen Abschnitte):

$$\Delta p = \Delta p_I + \Delta p_{II} + ..$$

$$\Delta p_I = - \frac{g \cdot s_I \cdot \rho_i \cdot \dot{m} \cdot c_p}{\alpha \cdot U} \cdot \ln \left\{ \frac{e^{\frac{-\alpha \cdot U \cdot \Delta x_I}{\dot{m}_i \cdot c_p}} [T_x(x=0) - T_W] + T_i}{T_x(x=0)} \right\}$$

$$\Delta p_{II} = - \frac{g \cdot s_{II} \cdot \rho_i \cdot \dot{m} \cdot c_p}{\alpha \cdot U} \cdot \ln \left\{ \frac{e^{\frac{-\alpha \cdot U \cdot \Delta x_{II}}{\dot{m}_i \cdot c_p}} [T_x(x=x_1) - T_W] + T_i}{T_x(x=x_1)} \right\} \quad \text{usw.}$$

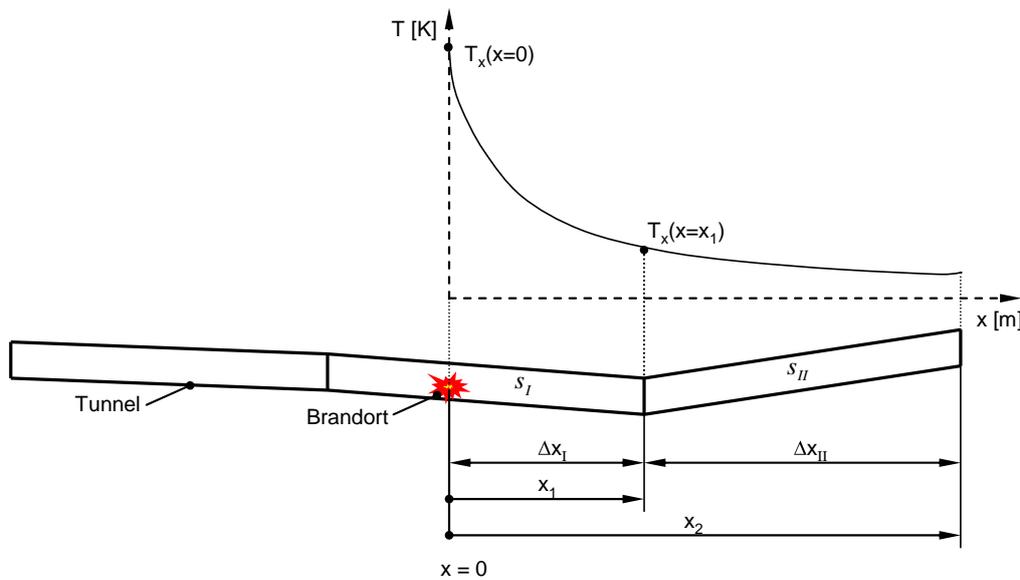


Abbildung 5: Skizze eines Tunnels mit mehreren Längsneigungen, Temperaturverlauf für einen eindimensionalen Fall.

Ist der Umfang innerhalb eines Längsneigungsabschnittes nicht konstant, kann alternativ für die Berechnung des Auftriebes der gewichtete Umfang des betrachteten Abschnittes herangezogen werden (siehe dazu Gleichung 4).

2.2.5 Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten für das 1D Berechnungsmodell

Die Herausforderung besteht nun darin, einen Wärmeübergangskoeffizienten aus einer Strömung, welche in der Nähe des Brandes ein stark dreidimensionales Verhalten hat, für den eindimensionalen Ansatz zu finden. Bei der Verwendung von herkömmlichen Ansätzen über die Nusselt- und Reynoldszahl werden abhängig von der lokalen wandnahen Geschwindigkeit sehr unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten berechnet. Da die wandnahe Geschwindigkeit sehr stark über den Tunnelquerschnitt variiert, ist somit die Berechnung eines mittleren Wärmeübergangskoeffizienten mit einem 1D Ansatz unzureichend genau (siehe Abbildung 6).

Um dennoch die dreidimensionalen Effekte ausreichend genau berücksichtigen zu können, wurden die Wärmeübergangskoeffizienten für die eindimensionale Berechnung des Auftriebes der heißen Rauchgase aus den dreidimensionalen Strömungsberechnungen abgeleitet. Dabei wurden alle durchgeführten dreidimensionalen Berechnungen mit dem zuvor beschriebenen eindimensionalen Annäherung (Gleichung 3) nachgerechnet. Die einzige Variable, die dabei geändert werden kann, ist der Wärmeübergangskoeffizient α . Durch mathematische Annäherung wurde der α -Wert für jeden eindimensionalen Fall angepasst, bis die beste Übereinstimmung zu den dreidimensionalen Ergebnissen erzielt wurde. Die Abbildung 6 und Abbildung 8 zeigen die Temperaturverläufe entlang der Tunnelachse für das Rechteckprofil sowie Abbildung 7 und Abbildung 9 die entsprechenden Temperaturverläufe für das Hufeisenprofil bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Wärmefreisetzungen. Da der 1D Ansatz nur für Strömungen ohne back-layering gilt, wurden die Fälle bei denen sich ein back-layering ausbildet, nicht betrachtet.

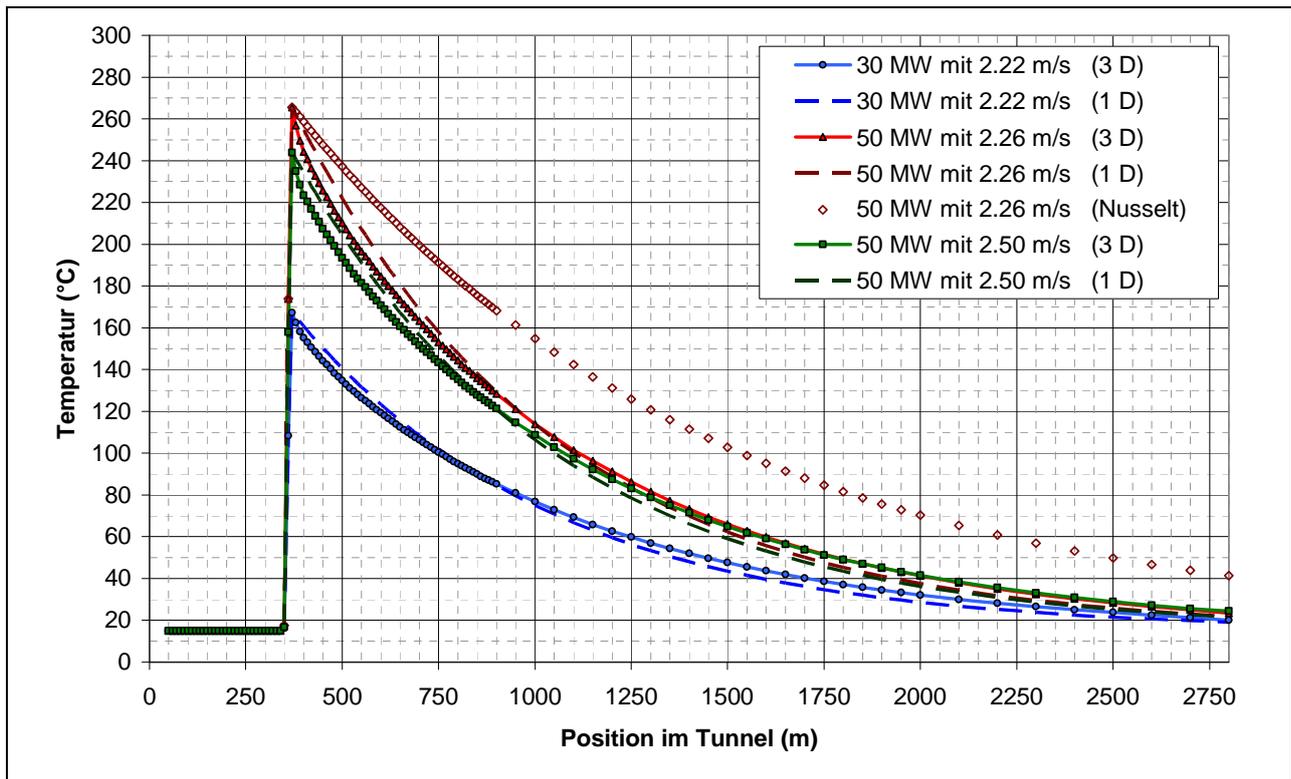


Abbildung 6: Temperaturverteilung entlang der Tunnelachse für den 3D und dem 1D Fall, Rechteckquerschnitt mit 53m², nach einer Simulationszeit von 20 Minuten.

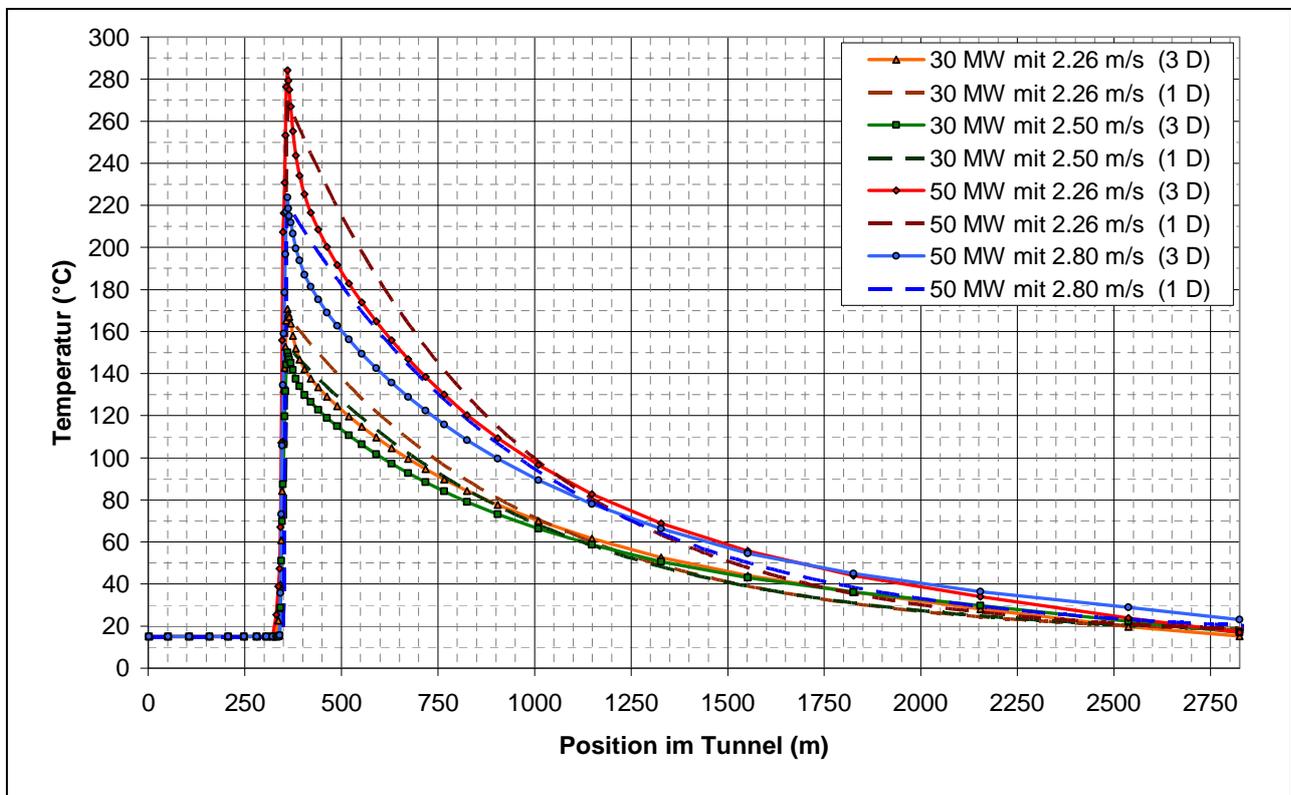


Abbildung 7: Temperaturverteilung entlang der Tunnelachse für den 3D und dem 1D Fall, Hufeisenprofil mit 53m², nach einer Simulationszeit von 20 Minuten.

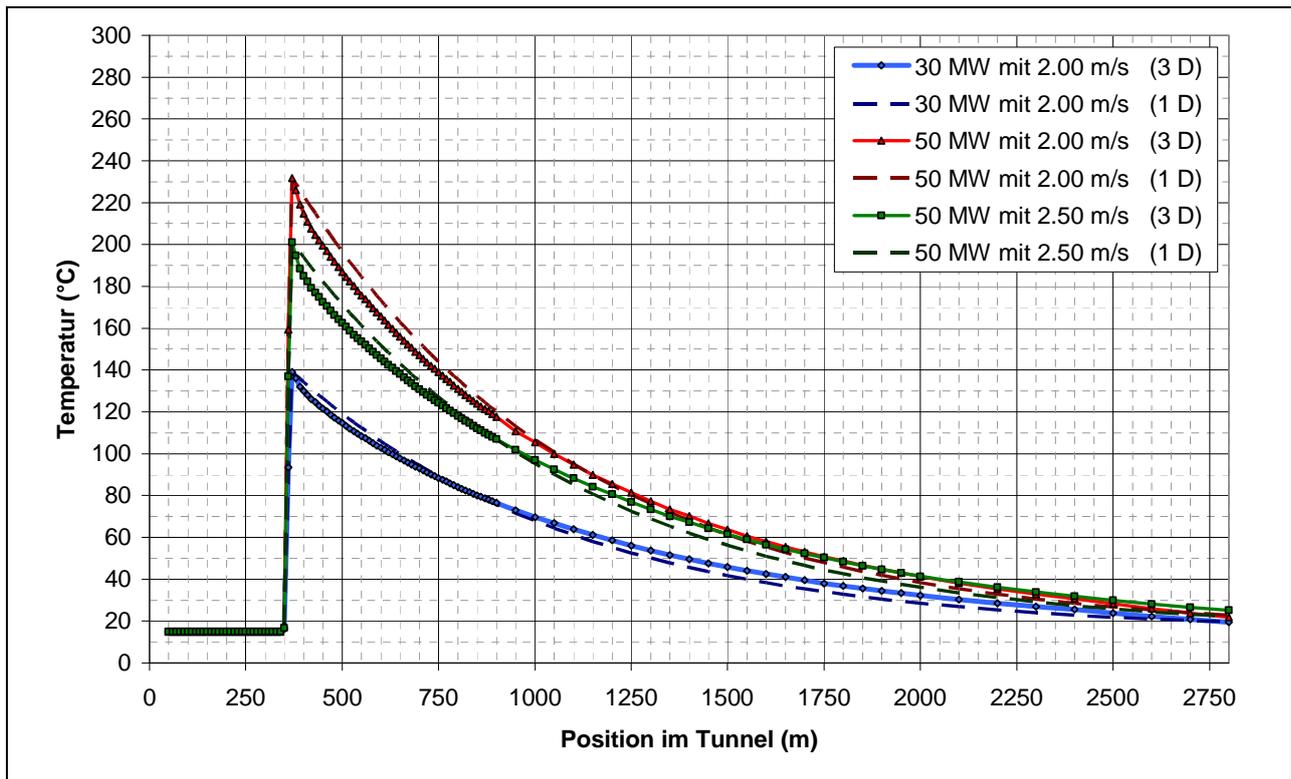


Abbildung 8: Temperaturverteilung entlang der Tunnelachse für den 3D und dem 1D Fall, Rechteckquerschnitt mit 70m², nach einer Simulationszeit von 20 Minuten.

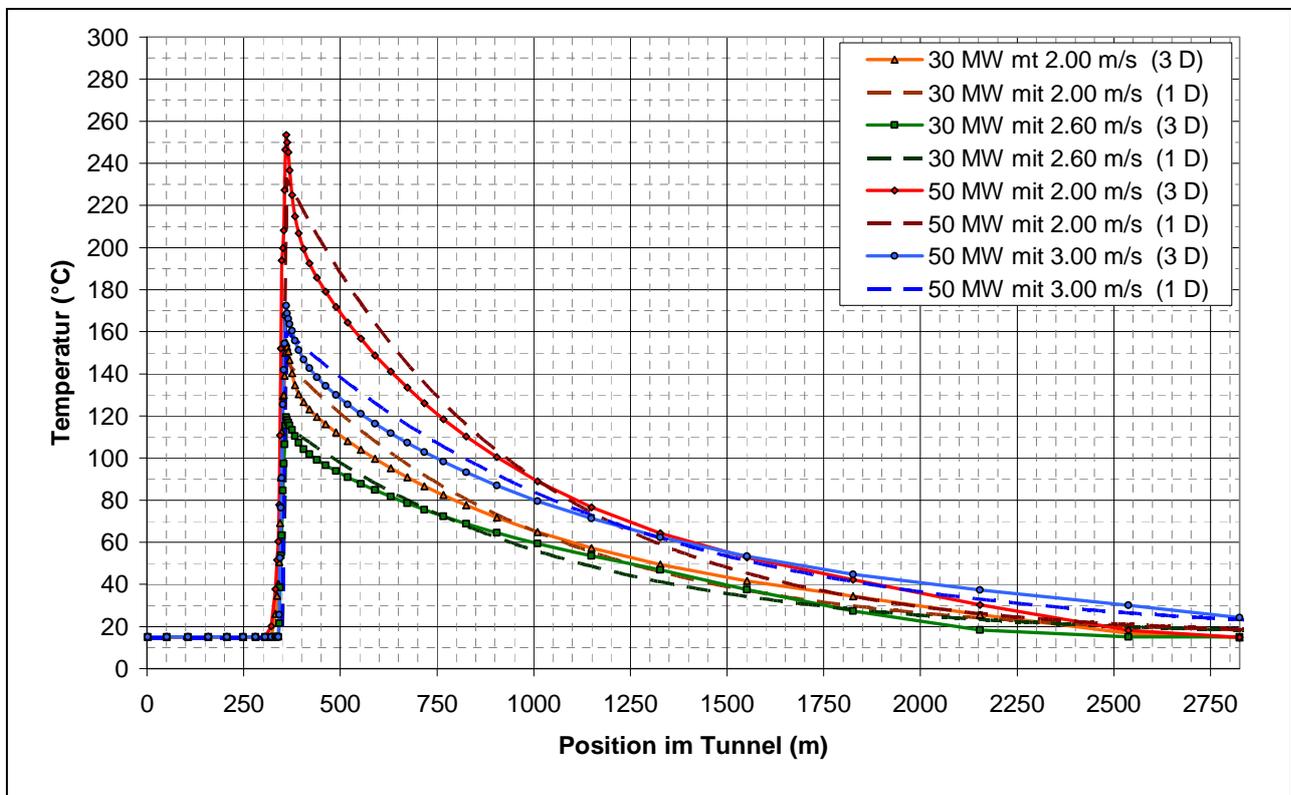


Abbildung 9: Temperaturverteilung entlang der Tunnelachse für den 3D und dem 1D Fall, Hufeisenprofil mit 70m², nach einer Simulationszeit von 20 Minuten.

Durch die Anpassung der 1D Temperaturverläufe an die 3D Temperaturverläufen konnten vernünftige Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten als Funktion der Eintrittsgeschwindigkeit gefunden werden. Interessanterweise besteht innerhalb der Anwendungsgrenzen (30 – 50 MW und 53 – 70 m²) kaum eine Abhängigkeit von den Tunnelquerschnitten und der Höhe der Wärmefreisetzung. Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der 1D – 3D Anpassung für das Rechteckprofil und das Hufeisenprofil. Um ein einfaches Berechnungsschema für die Lüftungsdimensionierung von Straßentunnel bereitstellen zu können, wäre eine einfache Gleichung für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten zumindest innerhalb bestimmter Geschwindigkeitsbereiche hilfreich. Bezogen auf die Werte in der zweiten Spalte der Tabelle 2 und Tabelle 3 konnte folgende zwei Gleichungen für die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten abgeleitet werden:

Rechteckprofil:

$$\alpha = 2,8 \cdot (u - 2,0) + 6,6 \quad [\text{W} / \text{m}^2 \text{K}] \quad \text{for } 2,0 \leq u \leq 3,0 \quad (9)$$

Hufeisenprofil:

$$\alpha = 1,15 \cdot (u - 2,0) + 8,4 \quad [\text{W} / \text{m}^2 \text{K}] \quad \text{für } 2,0 \leq u \leq 3,0 \quad (10)$$

Gleichung 10 wurde anhand der von der ILF zur Verfügung gestellten Wärmeübergangskoeffizienten abgeleitet (siehe Tabelle 3, Spalte 2 [4]). Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigt den Vergleich der α -Werte aus der 1D – 3D Anpassung mit den aus Gleichung 9 bzw. 10 berechneten α -Werten für das Rechteck- und Hufeisenprofil.

Eine ausführliche Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen für das Hufeisenprofil ist dem Endbericht der ILF [4] und entsprechend für das Rechteckprofil dem Endbericht der FVT [3] zu entnehmen.

Tabelle 2: Berechnete Wärmeübergangskoeffizienten für den eindimensionalen Ansatz der Rechteckprofile mit einer Wärmefreisetzung von 30 MW und 50 MW.

Luftgeschwindigkeit am Tunneleinlass	α aus 1D-3D An- passung	α linearer Ansatz*
m/s	W/m ² K	W/m ² K
2,00	-	6,6
2,04	6,7	6,7
2,26	7,3	7,3
2,36	7,6	7,6
2,50	8,0	8,0
3,00	-	9,4

*siehe Gleichung 9

Tabelle 3: Berechnete Wärmeübergangskoeffizienten für den eindimensionalen Ansatz der Hufeisenprofile mit einer Wärmefreisetzung von 30 MW und 50 MW.

Luftgeschwindigkeit am Tunneleinlass	α aus 1D-3D Anpassung	α linearer Ansatz*
m/s	W/m ² K	W/m ² K
2,00	8,0	8,4
2,26	8,2	8,7
2,50	8,6	9,0
2,60	9,7	9,1
2,80	9,7	9,3
3,00	9,4	9,6

*siehe Gleichung 10

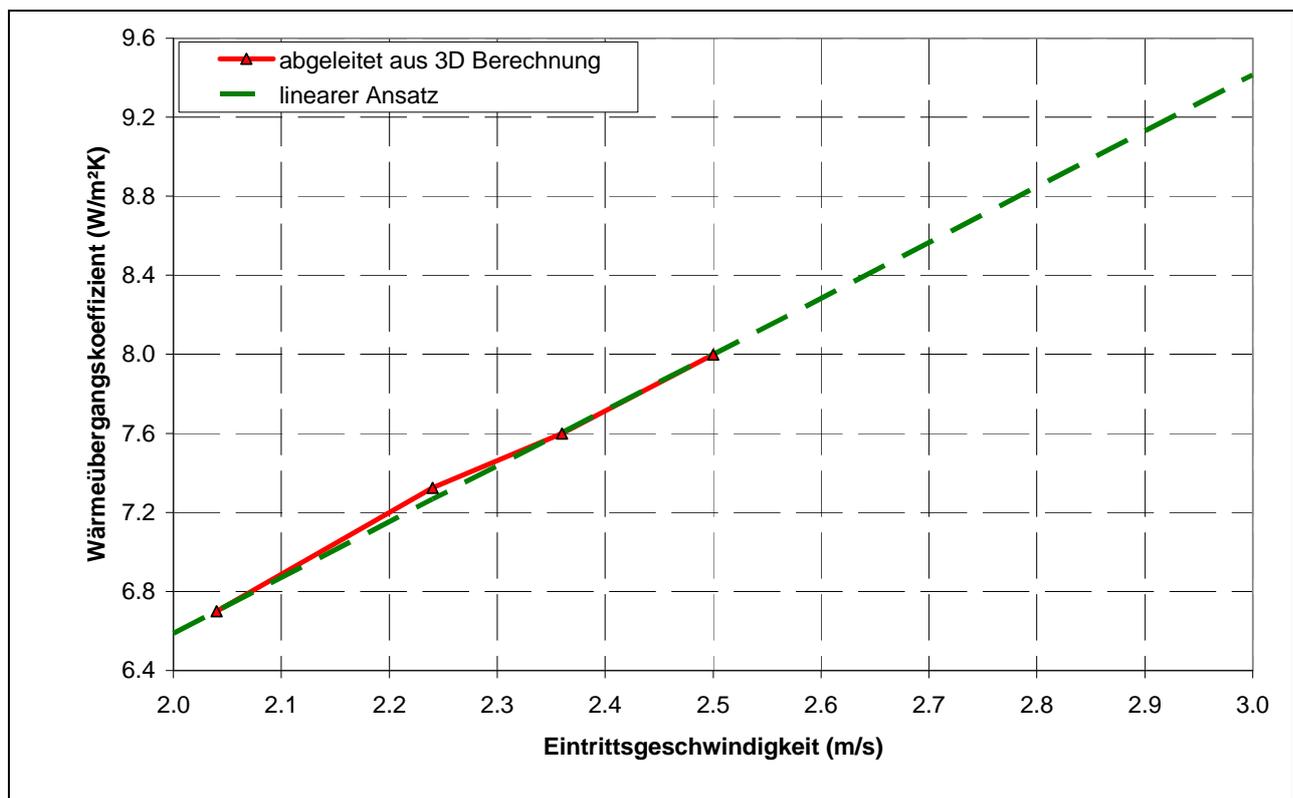


Abbildung 10: Vergleich der Wärmeübergangskoeffizienten abgeleitet aus der 3D Berechnung mit den Wärmeübergangskoeffizienten aus dem linearen Ansatz (Gleichung 9), für das Rechteckprofil

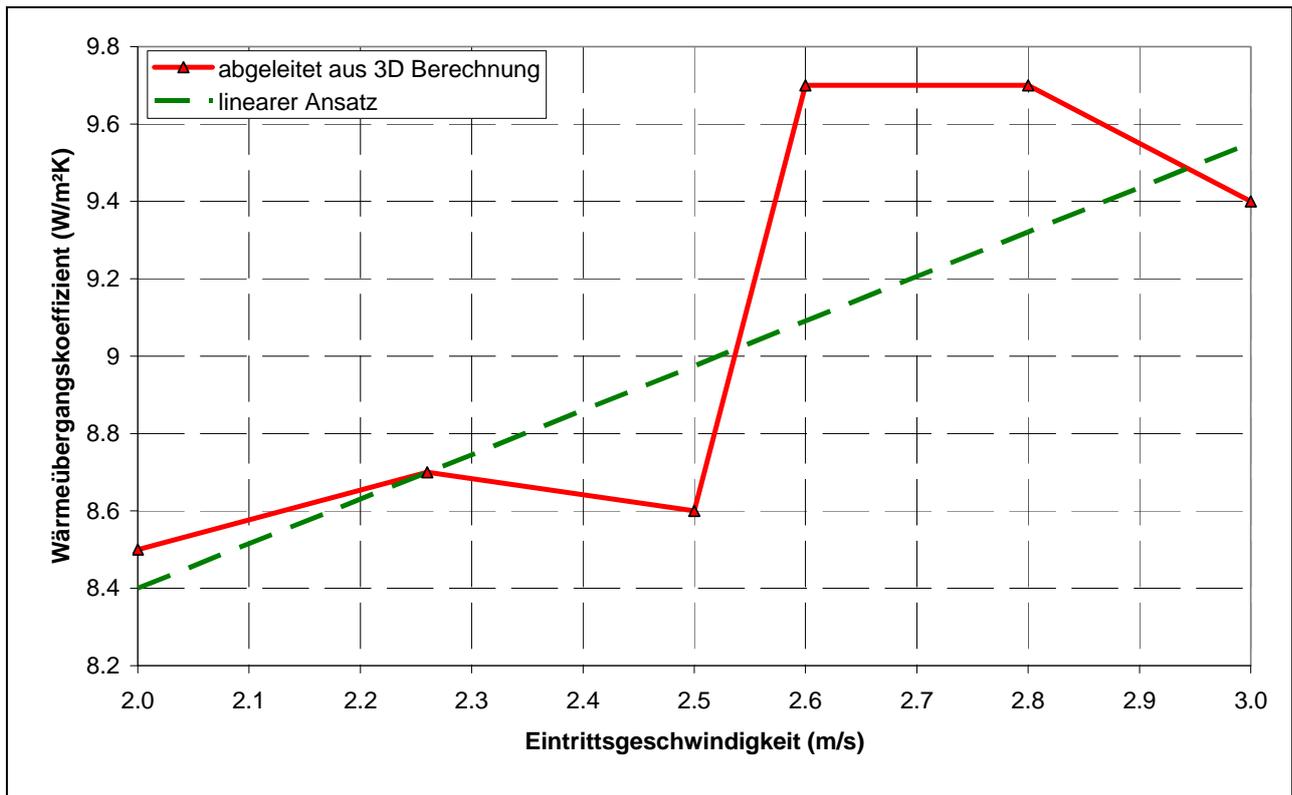


Abbildung 11: Vergleich der Wärmeübergangskoeffizienten abgeleitet aus der 3D Berechnung mit den Wärmeübergangskoeffizienten aus dem linearen Ansatz (Gleichung 10), für das Hufeisenprofil

2.2.6 Zeichenerklärung

T_w	[K]	Temperatur der Tunnelwand vor Ausbruch des Brandes
T_i	[K]	Tunnelinnentemperatur vor Brandausbruch, normalerweise gleich T_w
T_x	[K]	Temperatur an der Position x, beginnend vom Brandort ($x = 0$)
$T_{x,0}$	[K]	Temperatur am Brandort
x	[m]	Entfernung vom Brandort entlang der Tunnelachse
α	[W/(m² K)]	Wärmeübergangskoeffizient
U	[m]	Umfang
u	[m/s]	Einströmgeschwindigkeit
c_p	[J/(kg K)]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom im Tunnel
\dot{Q}	[W]	Brandleistung
η_{Brand}	(-)	Brandwirkungsgrad
g	[m/s²]	Erdbeschleunigung

Dokument-Nr. FVT-110/10/Be V&U 10/10/6400	Betrachtung der Wärmefreisetzung im Brandfall Zusammenfassung	Version: 2.0 freigegeben
---	---	-----------------------------

s	[-]	Längsneigung vom Tunnel
ρ_i	[kg/m ³]	Dichte der Luft vor Ausbruch des Brandes
ρ_x	[kg/m ³]	Dichte der Luft an der Position x
P	[Pa]	Druck (nach ISA 101325 Pa)
R	[J/(kg K)]	Spezifische Gaskonstante
Δp	[Pa]	Druckwirkung durch den Brandauftrieb
Index k	[-]	Kennzeichnet Abschnitte mit konstantem Umfang

3 Verwendete Literatur

- [1] Opstad K., Aune P., Henning J. E.: Fire emergency ventilation capacity for road tunnels with considerable slope. In 9th Int. Conf. Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels; BHR group publication 27; pp 535 – 543; 1997
- [2] BMVIT: RVS 09.02.31; Ausgabe 1.; August 2008, Wien
- [3] FVT: Schlussbericht. Forschungsprojekt – Auswirkungen des Temperaturverlaufes auf die Dimensionierung von längsgelüfteten Straßentunnel; Version 1.0; November 2010, Graz
- [4] ILF: 3D CFD-Berechnung der Temperaturkurven. RVS-Forschungsauftrag: Temperaturkurven stromab eines Brandes im Tunnel; Rev. 0; Oktober 2010, Innsbruck