

Schlussbericht

Forschungsprojekt - Auswirkungen der Berücksichtigung der Temperaturerhöhung im Brandfall auf die Dimensionierung von quergelüfteten Straßentunnel

Erstellt im Auftrag des



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

Dokument-Nr.: FVT-27/11/Be V&U 10/11/6400 vom 30.05.2011
D579-ILFI-AD-0003 / Rev. 0 vom 06.06.2011



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
VERBRENNUNGSKRAFTMASCHINEN UND
THERMODYNAMIK MBH**

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

Dieser Bericht darf nur vollinhaltlich, ohne Weglassen und Hinzufügen, veröffentlicht werden. Sollte er auszugsweise abgedruckt oder vervielfältigt werden, so ist vorher die schriftliche Genehmigung der Ersteller einzuholen.

Version	Dokumentenstatus	Verteilerstatus	Abteilung	Anzahl Seiten
1.0	freigegeben	Auftraggeber	V&U	44

Dokumentenhistorie

<i>Version</i>	<i>Ausgabe- datum</i>	<i>Dokumenten- status</i>	<i>Verteiler- status</i>	<i>Bearbeiter / Unterschrift</i>	<i>Änderungsgrund</i>
1.0	27.06.2011	freigegeben	Auftraggeber	Beyer	

Freigabe

<i>Name</i>	<i>Datum</i>	<i>Unterschrift</i>
Ao. Univ. -Prof. DI Dr. Peter Sturm		
Dipl.-HTL-Ing. Bernhard Höpperger		

Inhaltsverzeichnis

1	Zeichenerklärung	5
2	Einleitung	6
2.1	Berechnungsfälle	6
3	Geometrie	8
3.1	Bestandsanlagen	8
3.1.1	Katschbergtunnel.....	8
3.1.2	Tauerntunnel	8
3.2	Parameterstudie	8
4	Berechnungsmethode und Randbedingungen	10
4.1	Absaugmengen	10
4.2	Position des Brandortes und Bestimmung der mittleren Brandorttemperatur	10
4.3	Wärmeübertragung im Abluftkanal	11
4.4	Abluftklappe und Widerstandsbeiwerte	12
4.5	Leckagemengen	13
4.5.1	Leckagemengen der Abluftklappen	13
4.5.2	Bauwerksleckagen	14
4.6	Zusammenfassung der Berechnungsparameter und Randbedingungen	14
5	Berechnungsergebnisse	15
5.1	Vergleichsrechnung	15
5.1.1	Temperatur- und Dichteverlauf.....	15
5.1.2	Volumenstrom und Druckverlauf	16
5.2	Bestandsanlagen	17
5.2.1	Abluftkanal Katschbergtunnel.....	17
5.2.2	Abluftkanal Tauerntunnel.....	23
5.3	Parameterstudie	28
5.3.1	Abluftkanal mit 9 m ² Querschnittsfläche und Dimensionierungsbrand von 50 MW	29
5.3.2	Abluftkanal mit 12 m ² Querschnittsfläche und Dimensionierungsbrand von 50 MW	31
5.3.3	Abluftkanal mit 9 m ² Querschnittsfläche und Dimensionierungsbrand von 30 MW	34
5.3.4	Abluftkanal mit 12 m ² Querschnittsfläche und Dimensionierungsbrand von 30 MW	36
5.3.5	Auswirkungen auf maximal zulässige Abluftkanallänge	39

Dokument-Nr. FVT-27/11/Be V&U 10/11/6400	Forschungsprojekt - Auswirkungen der Berücksichtigung der Temperaturerhöhung im Brandfall auf die Dimensionierung von quergelüfteten Straßentunnel Schlussbericht	Version: 1.0 freigegeben
--	---	-----------------------------

6	Zusammenfassung	41
7	Verwendete Unterlagen	42
8	Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	43

1 Zeichenerklärung

T_W	[K]	Wandtemperatur des Abluftkanals vor Ausbruch des Brandes
T_i	[K]	mittlere Lufttemperatur im Tunnel bzw. Abluftkanal vor Ausbruch des Brandes, normalerweise gleich T_W
T_x	[K]	Temperatur an der Position x, beginnend vom Brandort bzw. von Absaugstelle ($x = 0$)
T_B	[K]	mittlere Temperatur am Brandort bzw. an Absaugstelle
x	[m]	Entfernung von der Absaugstelle entlang der Abluftkanalachse
Δx	[m]	Diskretisierung des Abluftkanals
α	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient
α_x	[W/(m ² K)]	ortsabhängiger Wärmeübergangskoeffizient
Nu_x	[-]	Ortsabhängige Nußelt-Zahl
U	[m]	Umfang des Abluftkanals
D_h	[m]	hydraulischer Durchmesser des Abluftkanals
c_p	[J/(kg K)]	mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom der Luft die über die Brandquelle strömt
\dot{Q}	[W]	Brandleistung
η_{Brand}	(-)	Brandwirkungsgrad lt. RVS 09.02.31
Re	[-]	Reynolds-Zahl
Pr	[-]	Prandtl-Zahl
λ	[W/K m]	Wärmeleitfähigkeit der Luft
\dot{V}_L	[m ³ /s]	Leckagevolumenstrom
p_u	[Pa]	Unterdruck im Abluftkanal
ρ_L	[kg/m ³]	Luftdichte der Leckage
A_L	[m ²]	Leckageöffnungen
ξ_L	[-]	Widerstandsbeiwerte der Leckageöffnungen
η_{VGE}	[-]	Wirkungsgrad der VGE lt. RVS 09.02.31
Index j	[-]	Laufvariable für Diskretisierung

Dokument-Nr. FVT-27/11/Be V&U 10/11/6400	Forschungsprojekt - Auswirkungen der Berücksichtigung der Temperaturerhöhung im Brandfall auf die Dimensionierung von quergelüfteten Straßentunnel Schlussbericht	Version: 1.0 freigegeben
--	---	-----------------------------

2 Einleitung

Im Zuge der Überarbeitung der RVS wurde die Fragestellung nach einer Auswirkung von brandbedingten Temperaturerhöhungen auf die Dimensionierung der Tunnellüftungsanlage erörtert. Für längsgelüftete Tunnel wurde dieses Thema bereits im Zuge eines vom BMVIT geförderten Forschungsprojektes [3] behandelt. Für quergelüftete Tunnelanlagen ergeben sich jedoch zusätzliche Fragestellungen. Hier sind vor allem die Auswirkungen auf die Druckverluste, daraus resultierend die Zunahme der elektrischen Anschlussleistung des Antriebsmotors des Abluftventilators sowie die erhöhte Unterdruckbelastung der Zwischendecke anzuführen.

Um nun zu prüfen, inwieweit sich die Berücksichtigung heißer Rauchgase bei der aerodynamischen Dimensionierung der Rauchgasabsaugung auf die Lüftung bestehender und zukünftiger Tunnel auswirkt, wurde das vorliegende Forschungsprojekt vom BMVIT initiiert. Dieses Forschungsprojekt wird in Form einer Arbeitsgemeinschaft von der Firma ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH Innsbruck und der Firma FVT mbH ausgeführt.

Verglichen zum Fahrraum im Tunnel können aufgrund der geringeren Querschnittsflächen und der höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Abluftkanal die dreidimensionalen Strömungs- bzw. Auftriebseffekte mit guter Genauigkeit vernachlässigt werden. Folglich werden die nachfolgenden Berechnungen mit eindimensionalen Strömungssimulationen anhand realer Tunnelgeometrien (Tunnel mit Halb- und Vollquerlüftung) durchgeführt. Betrachtet wird jeweils die Wärmefreisetzung von 30 und 50 MW im Fahrraum und die damit verbundene Erhöhung des abzusaugenden Rauchgasvolumens gegenüber dem derzeit in der RVS 09.02.31 definierten kalten Rauchgasvolumen von 120 m³/s (bei einer Dichte von 1,2 kg/m³ und einem Absolutdruck von 1013,25 hPa).

2.1 Berechnungsfälle

In der Arbeitsgemeinschaft wurden jeweils eine bestehende Anlage (Tauerntunnel und Katschbergtunnel) inklusive Lüftergebäude und als Parameterstudie weitere zwei unterschiedliche Abluftkanalquerschnitte ohne Lüftergebäude und Steigung berechnet. Bei den beiden Querschnitten für die Parameterstudie handelt es sich um einen 9 m² Abluftkanal entsprechend einem Profile für eine Ablufthalbquerlüftung und um einen 12 m² Abluftkanal entsprechend einem Profil für eine Vollquerlüftung. Die Bestandsanlagen sind mit einer Brandleistung von 30 MW und die Geometrien zur Parameterstudie jeweils mit 30 und 50 MW berechnet worden.

Die Aufteilung der Berechnungsfälle in der Arbeitsgruppe kann der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Aufteilung der Berechnungsfälle in der Arbeitsgruppe.

Geometrie	Brandlast		Brand- wirkungsgrad
	FVT	ILF	
Bestandsanlagen			
Katschbergtunnel	30 MW	-	75%
Tauerntunnel	-	30 MW	75%
Parameterstudie			
Halbquerlüftung 9 m ²	50 MW	30 MW	75%
Vollquerlüftung 12 m ²	50 MW	30 MW	75%

Zur Verifizierung der Strömungsberechnungen zwischen der Fa. FVT mbH und der Fa. ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH wird zusätzlich eine Vergleichsrechnung durchgeführt (siehe Punkt 5.1).

Dokument-Nr. FVT-27/11/Be V&U 10/11/6400	Forschungsprojekt - Auswirkungen der Berücksichtigung der Temperaturerhöhung im Brandfall auf die Dimensionierung von quergelüfteten Straßentunnel Schlussbericht	Version: 1.0 freigegeben
--	---	-----------------------------

3 Geometrie

3.1 Bestandsanlagen

3.1.1 Katschbergtunnel

Beim Katschbergtunnel wird die Abluft über zwei Abluftventilatoren abgesaugt (siehe Abbildung 3-1). Somit halbieren sich die Absaugmengen, wobei die Druckverluste von beiden Ventilatoren aufgebracht werden müssen. Die Querschnittsfläche des Abluftkanals beträgt $9,01 \text{ m}^2$. Der Kanal fällt von der Abluftklappe zu den Abluftventilatoren mit $1,5 \%$. Der Abluftkanal hat einen Umfang von $12,9 \text{ m}$ und eine Länge von 2600 m . Danach teilt sich der Abluftkanal in zwei Kanäle mit jeweils einer Querschnittsfläche von $8,33 \text{ m}^2$, einer Länge von etwa 100 m und einem Umfang von 11 m . Die Abluft strömt dann über die beiden Axialventilatoren und wird dahinter wieder in einem Kanal vereint, indem sie dann nach einigen Umlenkungen schlussendlich das Lüftergebäude verlässt.

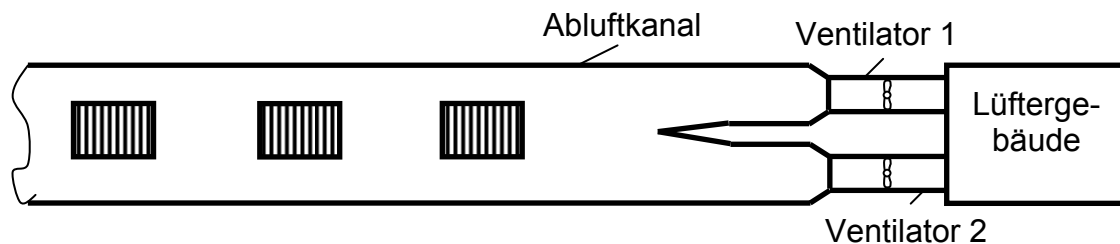


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Lüftungssystems der Abluft vom Katschbergtunnel.

3.1.2 Tauerntunnel

Am Tauerntunnel sind Ost- und Weströhre jeweils in vier Lüftungsabschnitte eingeteilt. Betrachtet wird der südlichste Lüftungsabschnitt der Oströhre. Der Luftkanal hat hier eine Länge von etwa 1400 m bei einer Querschnittsfläche von 9 m^2 und einem Umfang von $12,8 \text{ m}$. Der einzelne Abluftventilator für diesen Lüftungsabschnitt ist im Lüftergebäude des Südportals untergebracht. Die Luftführung im Lüftergebäude beinhaltet einige Umlenkungen, bevor die Abluft schließlich in die freie Umgebung ausströmt.

3.2 Parameterstudie

Für die Parameterstudie wurde ein Profil für den Abluftkanal entsprechend einer Ablufthalbquerlüftung mit einem Querschnitt von 12 m^2 und einem Umfang von $17,81 \text{ m}$ (Abbildung 3-2 rechts) sowie ein Profil entsprechend einer Vollquerlüftung mit 9 m^2 und einem Umfang von $13,13 \text{ m}$ (Abbildung 3-2 links) ausgewählt.

Die Länge des Abluftkanals beträgt jeweils 2500 m, da diese lt. RVS 09.02.31 die empfohlene Maximallänge eines Lüftungsabschnittes ist.

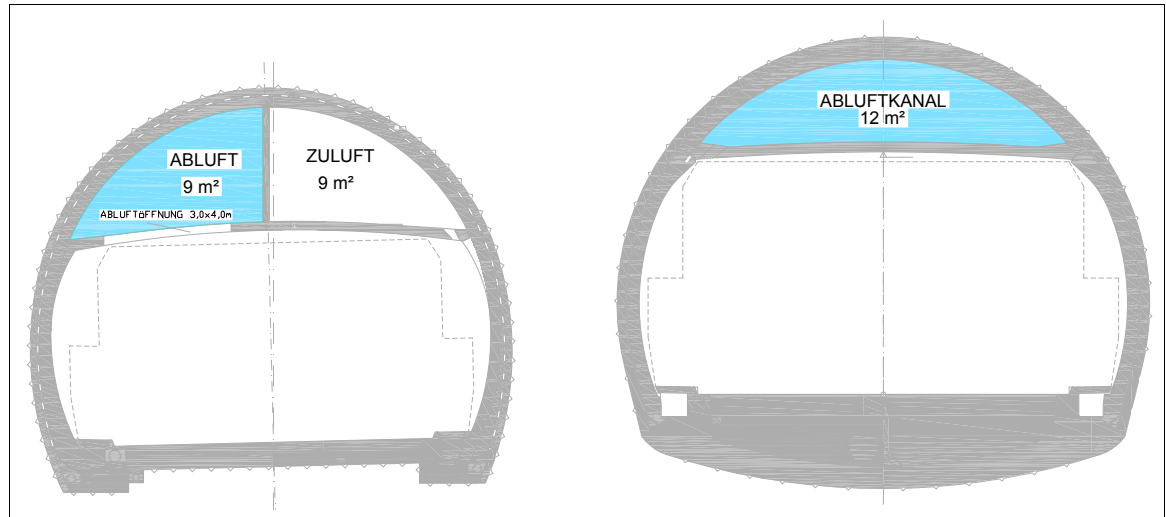


Abbildung 3-2: Profil einer Ablufthalbquerlüftung links und einer Vollquerlüftung rechts.

Dokument-Nr. FVT-27/11/Be V&U 10/11/6400	Forschungsprojekt - Auswirkungen der Berücksichtigung der Temperaturerhöhung im Brandfall auf die Dimensionierung von quergelüfteten Straßentunnel Schlussbericht	Version: 1.0 freigegeben
--	---	-----------------------------

4 Berechnungsmethode und Randbedingungen

Die zuvor aufgelisteten Berechnungsfälle werden einmal nach aktueller RVS 09.02.31 und einmal unter Berücksichtigung der heißen Rauchgase durchgeführt.

4.1 Absaugmengen

Laut aktueller RVS 09.02.31 muss das Lüftungssystem bei einer Quer- bzw. Halbquerlüftung im Brandfall unabhängig von der Brandleistung an jeder beliebigen Stelle des Abluftkanals in einem Abschnitt von 150 m mindesten 120 m³/s (bei einer Temperatur von 20 °C und einem Absolutdruck von 1013,25 hPa) der Tunnelluft absaugen können. Die Angaben des abzusaugenden Volumenstromes von 120 m³/s bei einer Temperatur von 20 °C und einem Absolutdruck von 1013,25 hPa definieren einen abzusaugenden Massenstrom von 144,52 kg/s. Diese Absaugmenge wird bei der Auslegung mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase beibehalten. Bei einer Punktabsaugung ist lt. RVS 09.02.31 ein Volumenstrom von 200 m³/s, abzusaugen das wiederum einem Massenstrom von 240.87 kg/s entspricht.

4.2 Position des Brandortes und Bestimmung der mittleren Brandorttemperatur

Um den ungünstigsten Fall zu betrachten, wird angenommen, dass der Brandort im Fahrraum direkt unter einer Abluftklappe liegt, eine Zuströmung zur Abluftklappe im Fahrraum von beiden Seiten gewährleistet ist (wie lt. RVS 09.02.31 definiert) und die Zuströmung die Absaugmenge von 144,52 kg/s nicht überschreitet (siehe dazu Abbildung 4-1). Mit diesem Ansatz kann anhand einer einfachen Energiebilanzierung die mittlere Temperatur an der Absaugstelle (gleich mittlere Temperatur am Brandort) durch folgende Gleichung ermittelt werden.

$$T_B = \frac{\dot{Q} \cdot \eta_{Brand}}{\dot{m} \cdot c_p} + T_i$$

Diese Gleichung wurde ohne Berücksichtigung der Abbrandmasse und Erwärmung des Brennmediums hergeleitet. Werden diese beiden Effekte berücksichtigt, erhöhen sich bei konstanter Brandleistung \dot{Q} dadurch der Massenstrom und die spezifische Wärmekapazität, sodass die mittlere Temperatur am Brandort geringer wäre. Unter diesen Annahmen und der Voraussetzung, dass ausschließlich über eine Stelle abgesaugt wird, kann die mittlere Temperatur an der Absaugstelle somit je nach Dimensionierungsbrand (Brandwirkungsgrad = 0,75) und Lüftungssystem maximal Werte, wie sie in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgelistet sind, annehmen. Wird ein höherer Massenstrom als lt. RVS 09.02.31 vorgeschrieben abgesaugt, verringern sich die mittleren Temperaturen. Die lokal auftretenden Temperaturen, wie z.B. an der Abluftklappe, können je nach Strö-

mungssituation und Brandentwicklung deutlich über den mittleren Temperaturen liegen. Die Temperatur vor Ausbruch des Brandes T_i wurde für die nachfolgenden Untersuchungen mit 20 °C angenommen.

Tabelle 2: Mittlere Temperaturen am Brandort in Abhängigkeit der Brandquelle und dem Lüftungssystem.

Brandquelle	Punktabsaugung Absaugmenge: 240,87 kg/s	Halbquer- und Querlüftung Absaugmenge 144,52 kg/s
30 MW	93 °C + T_i	154 °C + T_i
50 MW	153 °C + T_i	255 °C + T_i

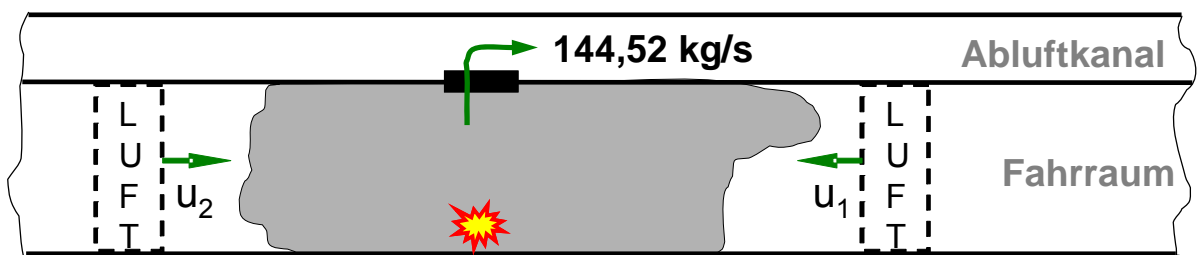


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Absaug Szenarios im Brandfall für Halbquer- und Querlüftung.

4.3 Wärmeübertragung im Abluftkanal

Die Temperatur der abgesaugten heißen Rauchgase nimmt im Abluftkanal in Strömungsrichtung aufgrund der konvektiven Wärmeübertragung zur Wand des Abluftkanals kontinuierlich ab. Der Temperaturverlauf kann mit der nachfolgenden Energiegleichung (Gleichung 1) für eindimensionale Strömungen bestimmt werden. Bei den künftigen Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass die Wandtemperatur des Abluftkanals in der Zeit der Selbstrettungsphase (etwa 20 Minuten) annähernd konstant und gleich der Lufttemperatur vor Ausbruch des Brandes ($T_w = T_i$) ist. Wie bereits im Eingang erwähnt, können aufgrund der geringeren Querschnittsflächen und der höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Abluftkanal die dreidimensionalen Strömungs- bzw. Auftriebseffekte mit guter Genauigkeit vernachlässigt werden. Infolgedessen, kann der Wärmeübergangskoeffizient über einen eindimensionalen Ansatz (Nußelt - Zahl) bestimmt werden.

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot d\tilde{T}_x + U \cdot \alpha \cdot (T_w - \tilde{T}_x) \cdot d\tilde{x} = 0 \quad (1)^{[4]}$$

Da sich die Geometrie des Abluftkanals (\dot{m} und U), die Stoffwerte der Luft (c_p usw.), und dadurch der Wärmeübergangskoeffizient entlang der Kanallängsachse ändern, ist es notwendig die Energiegleichung für die konvektive Wärmeübertragung zu diskretisieren. Andernfalls kann die Gleichung 1 entlang der Kanal-

längsachse von der Absaugstelle $x=0$ bis zum Ort x integriert werden (Siehe dazu Gleichung 3)

$$T_{x_{-j+1}} = T_{x_{-j}} + (T_W - T_{x_{-j}}) \cdot \frac{U_j \cdot \alpha_{x_{-j}}}{\dot{m}_j \cdot c_{p-j}} \cdot \Delta x \quad (2)$$

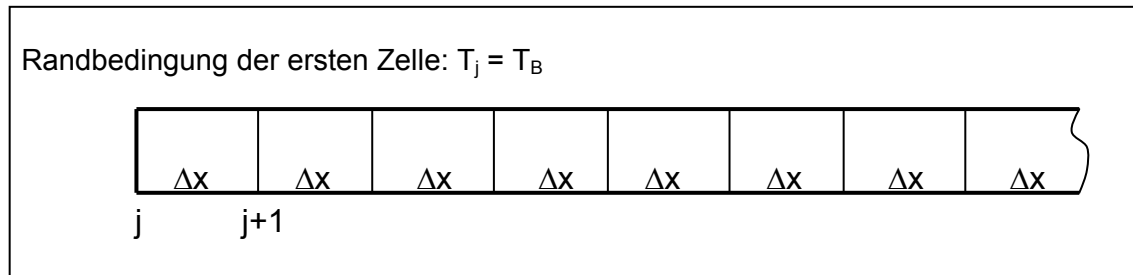


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Diskretisierung des Abluftkanals.

$$T_x = T_W + (T_B - T_W) \cdot e^{\left(\frac{-\alpha \cdot U \cdot x}{c_p \cdot \dot{m}}\right)} \quad (3)^{[4]}$$

Der lokale Wärmeüberganskoeffizient α_x wird über die lokale Nußelt-Zahl Nu_x (Differentiation der mittleren Nußelt-Zahl nach Gnielinski) für ausgebildeter turbulenter Strömung ($Re \geq 10^4$) berechnet (Ref. [5]).

$$Nu_x = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{D_h}{x}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \quad \text{mit} \quad \xi = (1,8 \cdot \log_{10} \cdot Re - 1,5)^{-2} \quad (4)^{[5]}$$

$$\alpha_x = \frac{Nu_x \cdot \lambda}{D_h} \quad (5)^{[5]}$$

4.4 Abluftklappe und Widerstandsbeiwerte

In der Arbeitsgemeinschaft wurde eine Abluftklappengröße von 3 m x 4 m, eine freie Durchströmfläche von 9,6 m², ein Klappenabstand von 100 m und ein Widerstandsbeiwert der Klappeneinströmung von 1,65 bezogen auf die mittlere Durchströmgeschwindigkeit vereinbart. Weiters ist ein Wandreibungskoeffizient für den Reibungsverlust der Strömung im Abluftkanal von 0,017 bestimmt worden.

4.5 Leckagemengen

4.5.1 Leckagemengen der Abluftklappen

Die Abluftklappen dürfen lt. RVS 09.02.31 bestimmte Leckagemengen in Abhängigkeit des Unterdruckes im Abluftkanal nicht überschreiten. In Tabelle 3 sind die druckabhängigen Leckagemengen, wie sie in der RVS 09.02.31 definiert sind, aufgelistet. Werden die Werte in einem Diagramm (Abbildung 4-3) eingetragen, dann ist zu erkennen, dass sich die Wertetabelle aus zwei geraden zusammensetzt. Mithilfe der beiden Geradengleichungen (Gleichung 6 und 7) konnten die Leckagemengen der Abluftklappen in Abhängigkeit des Unterdruckes im Abluftkanal berechnet werden.

Tabelle 3: Zulässige Leckagemengen in Abhängigkeit des Prüfdruckes lt. RVS 09.02.31 [2]

Temperatur (°C)	Druck (N/m ²)	Volumenstrom (m ³ /s/m ²)
20	4000	0,10
20	3500	0,09
20	3000	0,08
20	2500	0,07
20	2000	0,06
20	1500	0,055
20	1000	0,05

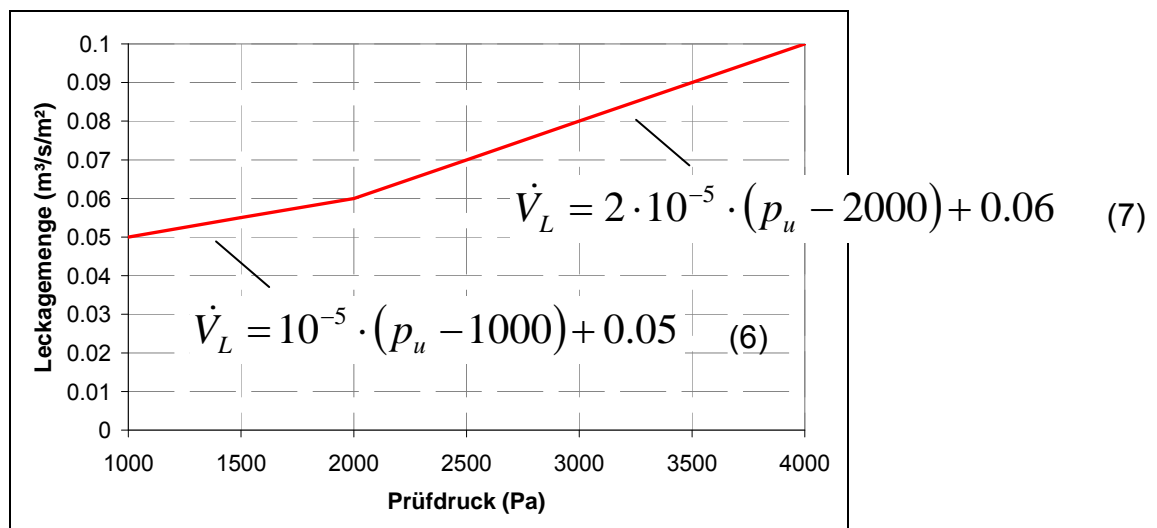


Abbildung 4-3: Verlauf der zulässigen Leckagemengen in Abhängigkeit des Prüfdrucks.

4.5.2 Bauwerksleckagen

Die Bauwerksleckage im Abluftkanal darf lt. RVS 09.02.31 5 m³/s/km nicht überschreiten. Da diese Angaben unabhängig der Temperatur zu sehen sind, müsste der Abluftkanal bei der Auslegung mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase aufgrund der höheren Unterdrücke dichter sein als bei der bisherigen Auslegung. Für die Untersuchungen wurde jedoch angenommen, dass die zulässigen Leckagemengen bei einer Temperatur von 20°C nicht überschritten werden dürfen. Weiters wurde in der Arbeitsgemeinschaft vereinbart, dass die Leckagemengen druckabhängig, unter der Berücksichtigung, dass die lt. RVS 09.02.31 definierten Leckagen von 5m³/s/km nicht überschritten werden, nach Gleichung 8 berechnet werden. Um dies zu gewährleisten, wird bei der Auslegung ohne Berücksichtigung der heißen Rauchgase (Absaugmenge 120 m³/s und 20°C) das Verhältnis von Leckagegröße A_L zu Widerstandsbeiwert der Leckageöffnung $\sqrt{\xi}$ solange variiert bis sich die Leckagemenge von 5 m³/s/km einstellen. Bei der Auslegung mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase wird dieses Verhältnis beibehalten, wodurch sich die Leckagemengen aufgrund des höheren Unterdruckes im Abluftkanal erhöhen. Diese Berechnungsmethode berücksichtigt den schlechteren Fall, da andernfalls die Leckage in beiden Fällen gleich wäre.

$$\dot{V}_L = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{u-j}}{\rho_{L-j}}} \cdot \frac{A_L}{\sqrt{\xi}} \quad (8)$$

Abschließend wurden die berechneten zulässigen Leckagemengen der Abluftklappe und des Bauwerks, wie in der RVS 09.02.31 vorgegeben, verdoppelt.

4.6 Zusammenfassung der Berechnungsparameter und Randbedingungen

Tabelle 4: Auflistung der Berechnungsparameter und Randbedingungen aller Berechnungsfälle

Bezeichnung	Wert
Größe der Abluftklappen	12 m ²
Freie Durchströmfläche der Abluftklappen	9,6 m ²
Abstand der Abluftklappen	100 m
Widerstandsbeiwert der Klappeneinströmung bezogen auf mittlere Durchströmgeschwindigkeit der Abluftklappe	1,65
Leckage der Abluftklappen bezogen auf 12 m ²	lt. Tabelle in RVS 09.02.31 + 100 %
Bauwerksleckage	(5 m ³ /s/km + 100 %)
Wandreibungskoeffizient	0,017 0,0175 (Katschberg)
Länge des Abluftkanals für Parameterstudie (ohne Steigung und Lüftergebäude)	2500 m

Dokument-Nr. FVT-27/11/Be V&U 10/11/6400	Forschungsprojekt - Auswirkungen der Berücksichtigung der Temperaturerhöhung im Brandfall auf die Dimensionierung von quergelüfteten Straßentunnel Schlussbericht	Version: 1.0 freigegeben
--	---	-----------------------------

5 Berechnungsergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse werden in unterschiedlichen Diagrammen mit nachfolgenden Verläufen dargestellt.

- Druckverlauf im Abluftkanal
- Verlauf des Volumenstroms im Abluftkanal
- Temperatur- und Dichteverlauf im Abluftkanal
- Ventilatorleistung in Abhängigkeit der Länge des Abluftkanals unter Berücksichtigung des VGE-Wirkungsgrades lt. RVS 09.02.31 von $\eta_{VGE} = 0,7$.
- Verhältnis der Ventilatorleistung „warm“ (mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase) zu der Ventilatorleistung „kalt“ (ohne Berücksichtigung der heißen Rauchgase) in Abhängigkeit der Abluftkanallänge.

Da für die Berechnungen ein eindimensionaler Ansatz gewählt wurde, ist immer nur von flächengemittelten Temperaturen und Dichten die Rede. Lokal können natürlich höhere Temperaturen bzw. niedrigere Dichten auftreten.

5.1 Vergleichsrechnung

Für die unterschiedlichen Berechnungsfälle wurden im Vorfeld zwischen der Fa. FVT mbH und der Fa. ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH die Randbedingungen abgestimmt. Eine Vergleichsrechnung wurde angefertigt, deren Ergebnisse in den folgenden Diagrammen vorgestellt werden. Die Vergleichsrechnung erfolgte für den Rechenfall mit 9 m² Luftkanal-Querschnittsfläche und 30 MW Dimensionierungsbrand.

5.1.1 Temperatur- und Dichteverlauf

In Abbildung 5-1 sind vergleichend die von der Fa. FVT mbH und der Fa. ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH errechneten Temperatur- und Dichteverläufe aufgetragen. Im Bereich kurzer Kanallängen zeigen sich hier leichte Unterschiede, die aber unter 8° Temperaturdifferenz bleiben. Die Ursache der leichten Differenzen zwischen den Ergebnissen liegt in der Berechnung der lokalen Stoffgrößen, wie z.B. dem Wärmeübergangskoeffizienten, der spezifischen Wärmekapazität, etc. Diese Werte variieren über die Länge des Luftkanals und müssen approximativ berechnet werden. Insgesamt kann jedoch festgehalten werden, dass beide Berechnungen, welche absolut unabhängig erstellt wurden, eine sehr gute Übereinstimmung finden.

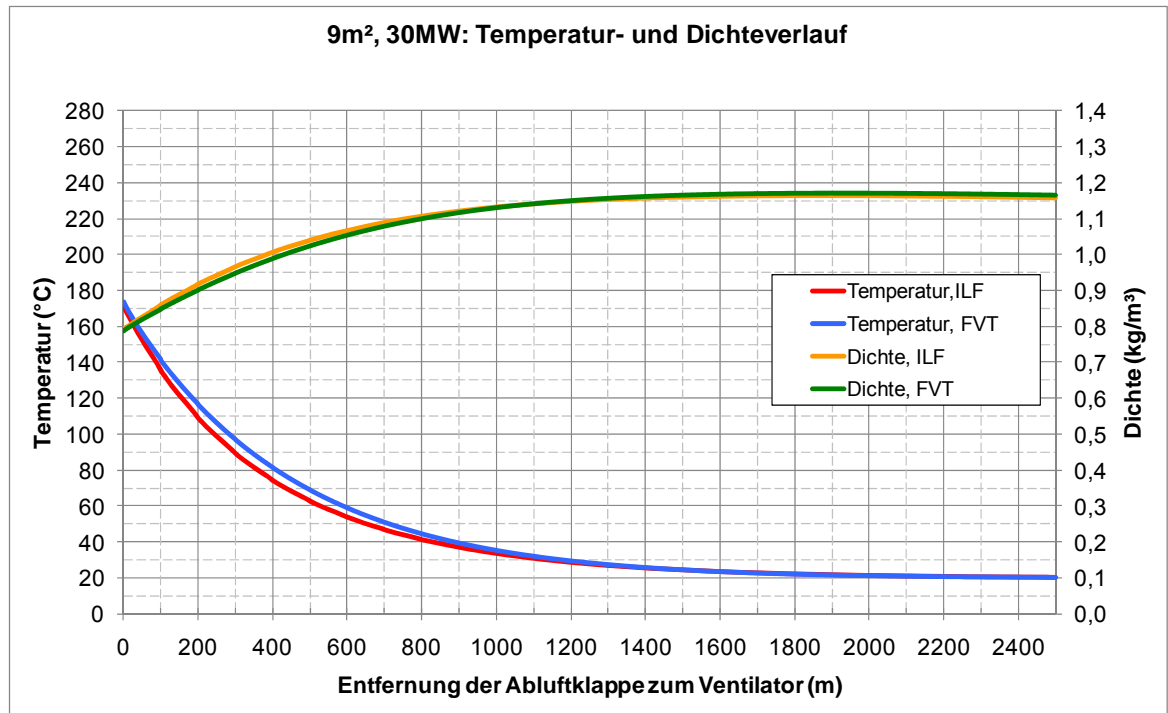


Abbildung 5-1: Vergleichsrechnung, Temperatur und Dichte in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m² Profil mit 50 MW.

5.1.2 Volumenstrom und Druckverlauf

Abbildung 5-2 zeigt die Verläufe von Druckdifferenz und Volumenstrom. Entsprechend der Differenzen, die sich in Temperatur- und Dichteverlauf zeigen, unterscheiden sich auch die berechneten Volumenströme im Bereich kleiner Kanallängen. Bezüglich der Druckdifferenzen zeigen sich deutlichere Unterschiede zwischen den Rechenergebnissen der Fa. FVT mbH und der Fa. ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH. Diese Differenzen wirken sich aufgrund der von der Druckdifferenz abhängigen Leckage auch auf den Verlauf des Volumenstromes aus. Daher ergeben sich auch im Bereich größerer Luftkanallängen unterschiedliche Volumenströme. Die Volumenströme differieren um maximal 4,8 m³/s bzw. um 2,5 % des von der Fa. ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH berechneten Volumenstromes.

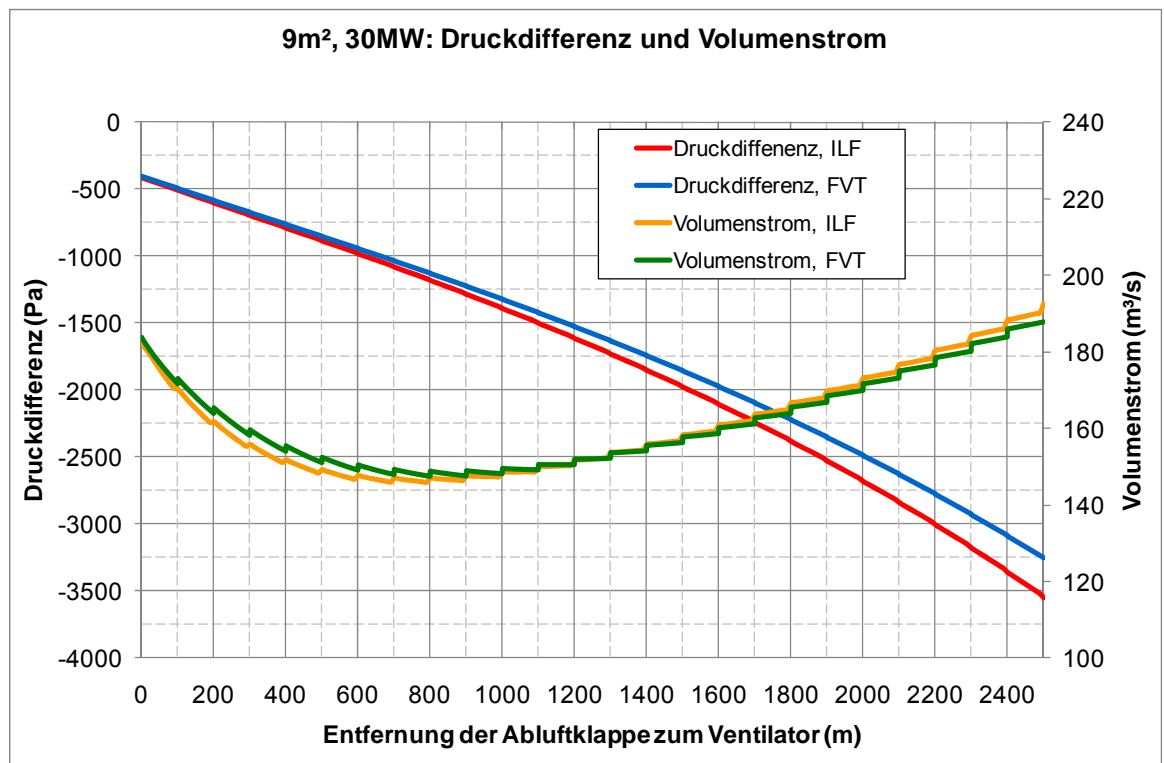


Abbildung 5-2: Vergleichsrechnung, Druckdifferenz und Volumenstrom in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m² Profil mit 30 MW.

5.2 Bestandsanlagen

Wie bereits erwähnt, wurden als Bestandsanlagen der Katschbergtunnel und der Tauerntunnel gewählt und inklusive Lüftergebäude berechnet.

5.2.1 Abluftkanal Katschbergtunnel

Im Zuge dieser Untersuchung wurde neben der Auslegung „kalt“ bzw. „warm“ mit jeweils einem abzusaugenden Massenstrom von 144,5 kg/s eine zusätzliche Variante betrachtet. In dieser Variante wird berechnet, welcher Volumenstrom (mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase) abgesaugt werden kann, wenn die bestehenden Abluftventilatoren verwendet und mit maximaler Leistung betrieben werden. Um die auszuwertenden Verläufe in Abhängigkeit der Kanallänge zu erstellen, wurden sechs unterschiedliche Absaugpositionen betrachtet, welche in Tabelle 5 aufgelistet sind. In Abbildung 5-3 sind die Betriebspunkte der bestehenden Axialventilatoren im Kennfeld für die unterschiedlichen Absaugpositionen eingetragen.

Abschließend ist noch zu erwähnen, dass bei der Betrachtung der Ergebnisse die Aufteilung der Absaugmengen auf zwei Abluftventilatoren zu beachten ist.

Tabelle 5: Auflistung der Absaugpositionen im Abluftkanal Katschbergtunnel

Absaugposition	Entfernung der Axialventilatoren zur Abluftklappe
1	100 m
2	500 m
3	1000 m
4	1500 m
5	2000 m
6	2600 m

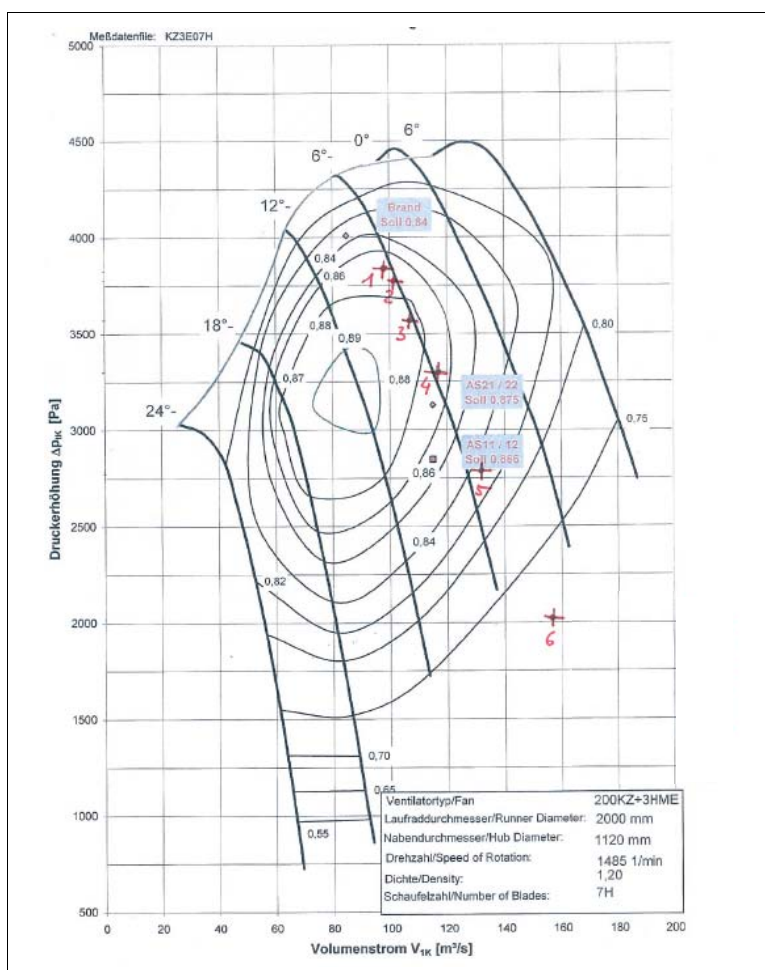


Abbildung 5-3: Kennfeld der bestehenden Axialventilatoren inkl. Betriebspunkte unterschiedlicher Absaugpositionen (Ref. [6])

5.2.1.1 Temperatur- und Dichteverlauf

In nachfolgender Abbildung 5-4 ist die mittlere Temperatur am Abluftventilator in Abhängigkeit der Kanallänge der drei Berechnungsvarianten dargestellt. Bei der Berechnungsvariante in der die maximale Leistung (Erhöhung des Volumenstromes bis die zur Verfügung stehende el. Leistung erreicht wird) der bestehenden Abluftventilatoren verwendet werden, wird ein höherer Massenstrom als die erforderlichen 144,52 kg/s abgesaugt (siehe Abbildung 5-6), weshalb die mittleren Temperaturen entsprechend niedriger berechnet werden.

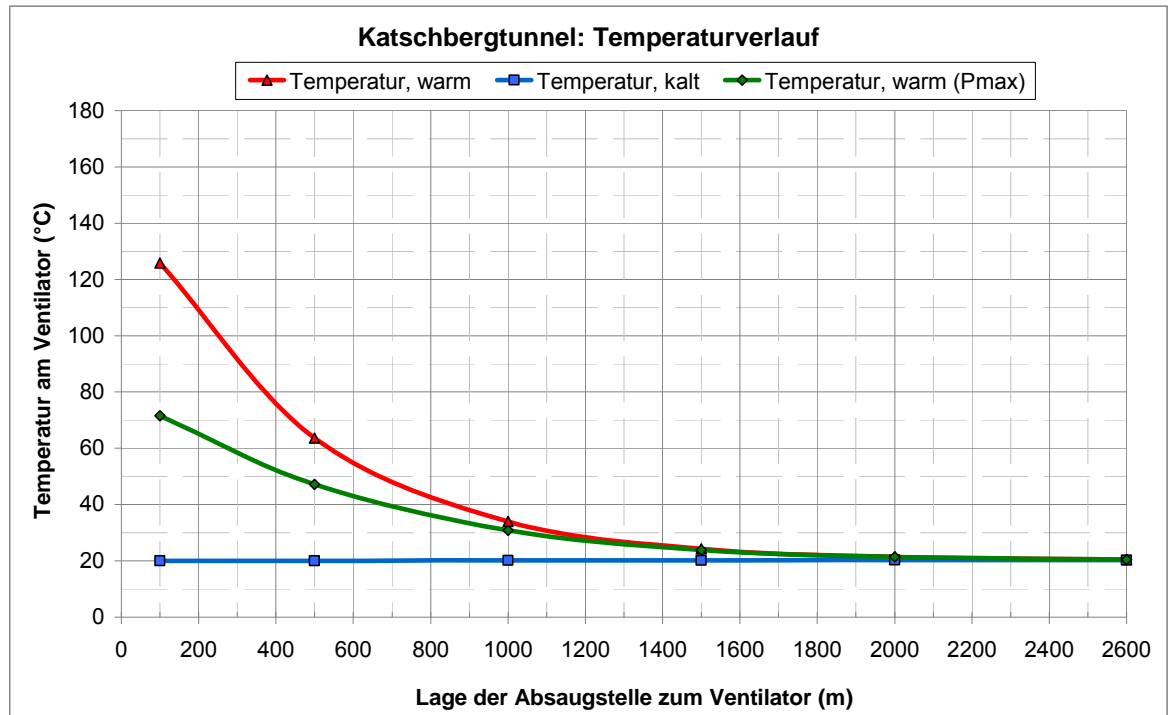


Abbildung 5-4: Temperatur am Abluftventilator in Abhängigkeit der Absaugstelle - Katschbergtunnel 30 MW.

Die Dichte der Luft verhält sich reziprok zu den Temperaturen. Zudem nimmt die Dichte mit zunehmender Kanallänge aufgrund des steigenden Unterdruckes im Abluftkanal ab. Letzteres ist bei der kalten (Lufttemperatur 20°C) Auslegung zu erkennen (siehe Abbildung 5-5).

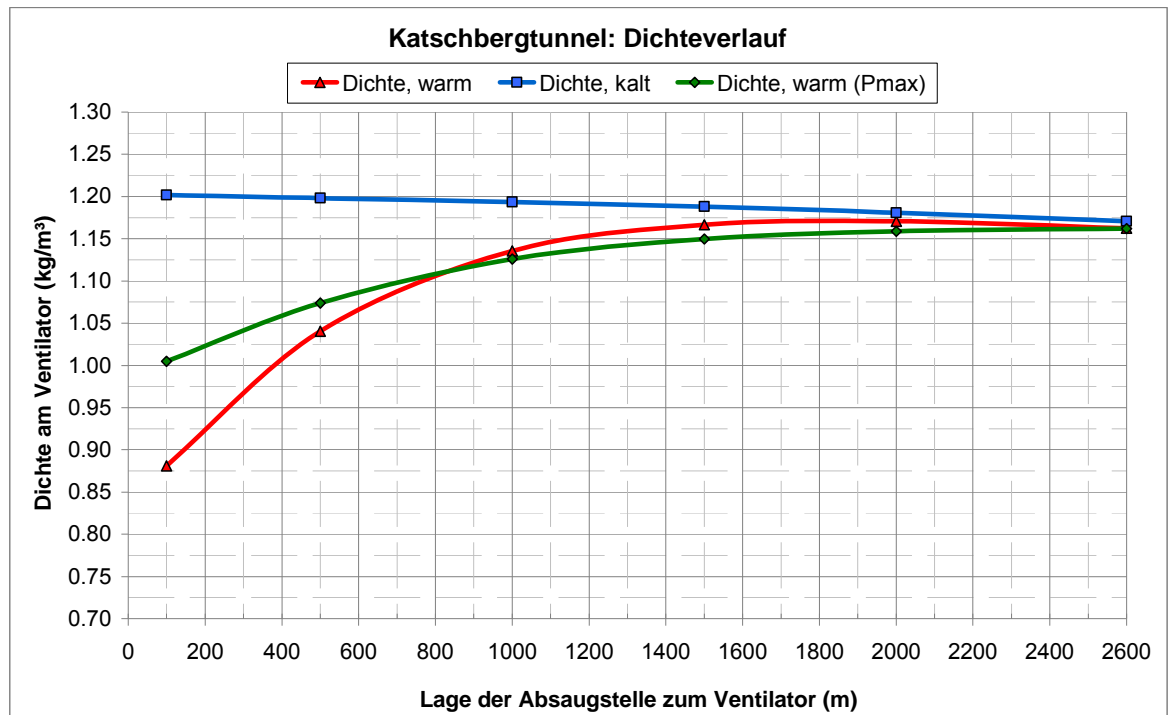


Abbildung 5-5: Dichte am Abluftventilator in Abhängigkeit der Absaugstelle – Katschbergtunnel 30 MW.

5.2.1.2 Volumenstrom

Bei sehr geringen Kanallängen, wird bei der warmen Auslegung die Luft an der Kanalwand kaum abgekühlt, wodurch verglichen zur kalten Auslegung bei konstantem Massenstrom höhere Volumenströme entstehen (siehe Abbildung 5-6). Mit zunehmender Kanallänge kühlen sich die heißen Rauchgase immer mehr an der Kanalwand ab, sodass der Volumenstrom einerseits sinkt aber andererseits aufgrund der zunehmenden Leckage ansteigt. Nach einer Kanallänge von etwa 1600 m erreichen die heißen Rauchgase wieder annähernd die Ausgangstemperatur bzw. die Temperatur der Kanalwand (20°C). Somit ergeben sich zwangsweise die gleichen Volumenströme am Abluftventilator wie bei der kalten Auslegung. Es ist lediglich ein Achsversatz zu verzeichnen, der aufgrund der höheren Leckage (höherer Unterdruck im Abluftkanal aufgrund der höheren Reibungsverluste) zustande kommt. Wird mit den bestehenden Abluftventilatoren an jeder Absaugposition stets die maximale Leistung gefahren, so kann bei den geringeren Abluftkanallängen ein weitaus höherer Volumenstrom als lt. RVS 09.02.31 erforderlich abgesaugt werden. Obwohl die bestehenden Abluftventilatoren für die weitest entfernte Abluftklappe mit einem abzusaugenden Volumenstrom von 120 m³/s (bei 20 °C) ausgelegt wurde, ist es möglich den erforderlichen Volumenstrom nach der Auslegung mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase abzusaugen. In beiden Fällen wird die maximale Leistung der Abluftventilatoren erreicht, nur wurde für die warme Auslegung (Abbildung 5-6 rote Kurve) der Wirkungsgrad lt. RVS 09.02.31 ($\eta = 0,7$) und für die Auslegung mit Berücksichti-

gung der bestehenden Abluftventilatoren (Abbildung 5-6 grüne Kurve) immer der aktuelle Wirkungsgrad laut Kennfeld herangezogen (siehe Abbildung 5-3).

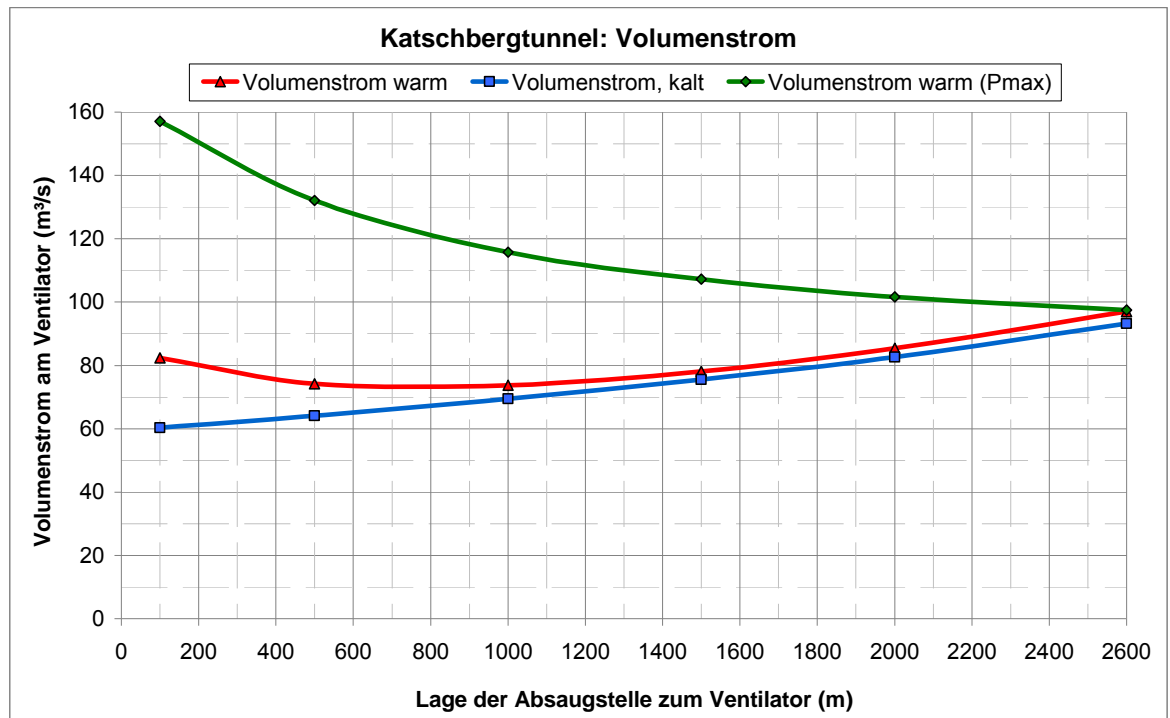


Abbildung 5-6: Volumenstrom am Abluftventilator in Abhängigkeit der Absaugstelle – Katschbergtunnel 30 MW.

5.2.1.3 Druckverlauf

Der Druckverlust nimmt mit zunehmender Kanallänge aufgrund der wachsenden Reibungsverluste und der zunehmenden Leckage (steigender Volumenstrom und dadurch Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit) zu. Bei der Auslegung mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase steigt der Volumenstrom und somit die Strömungsgeschwindigkeit proportional mit der Temperatur, wobei die Dichte proportional mit der Temperatur fällt. Da in die Berechnung der Reibungsverluste die Strömungsgeschwindigkeit quadratisch und die Dichte linear eingehen steigen die Reibungsverluste linear an. Zudem werden die Reibungsverluste aufgrund der Zunahme der Leckagen bedingt durch die höheren Unterdrücke im Abluftkanal überlagert. Werden die bestehenden Axialventilatoren immer mit maximaler Leistung gefahren, so ergeben sich durch die höheren Absaugmengen größere Strömungsverluste. Bei der Abluftkanallänge von 2600 m ergeben sich für die warme Auslegung (siehe Abbildung 5-7 rote Kurve) und die Auslegung mit den bestehenden Abluftventilatoren (siehe Abbildung 10 grüne Kurve) infolge der ähnlichen Absaugmengen (siehe Abbildung 5-6) annähernd die gleichen Unterdrücke.

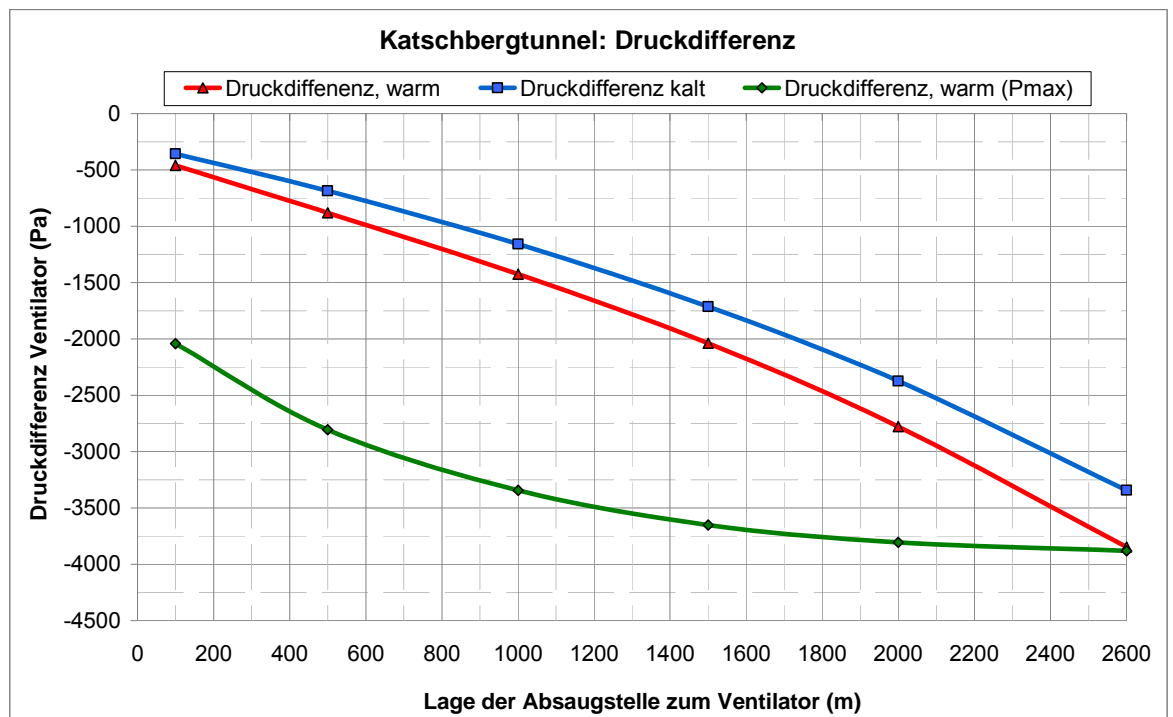


Abbildung 5-7: Dichterverläufe in Abhängigkeit der Absaugstelle – Katschbergtunnel 30 MW.

5.2.1.4 Ventilatorleistung

In Abbildung 5-8 ist die Leistung der unterschiedlichen Auslegungsvarianten in Abhängigkeit der Kanallänge dargestellt. Die Ventilatorleistung für die Auslegung mit und ohne Berücksichtigung der heißen Rauchgase wurde wie bereits erwähnt mit dem Wirkungsgrad lt. RVS 09.02.31 berechnet und die Auslegung mit den bestehenden Axialventilatoren der Wirkungsgrad entsprechend deren Kennlinie verwendet. Aus diesem Grund ergibt sich für die letztere Auslegungsvariante bei der Kanallänge von 2600 m verglichen zur warmen Auslegung bei annähernd gleichem Volumenstrom und Druckverlust (Siehe Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7) eine geringere Leistung und fällt mit der Leistung der kalten Auslegung zusammen, da dieser Punkt der Anlagendimensionierung (maximale Leistung der bestehenden Abluftventilatoren) entspricht.

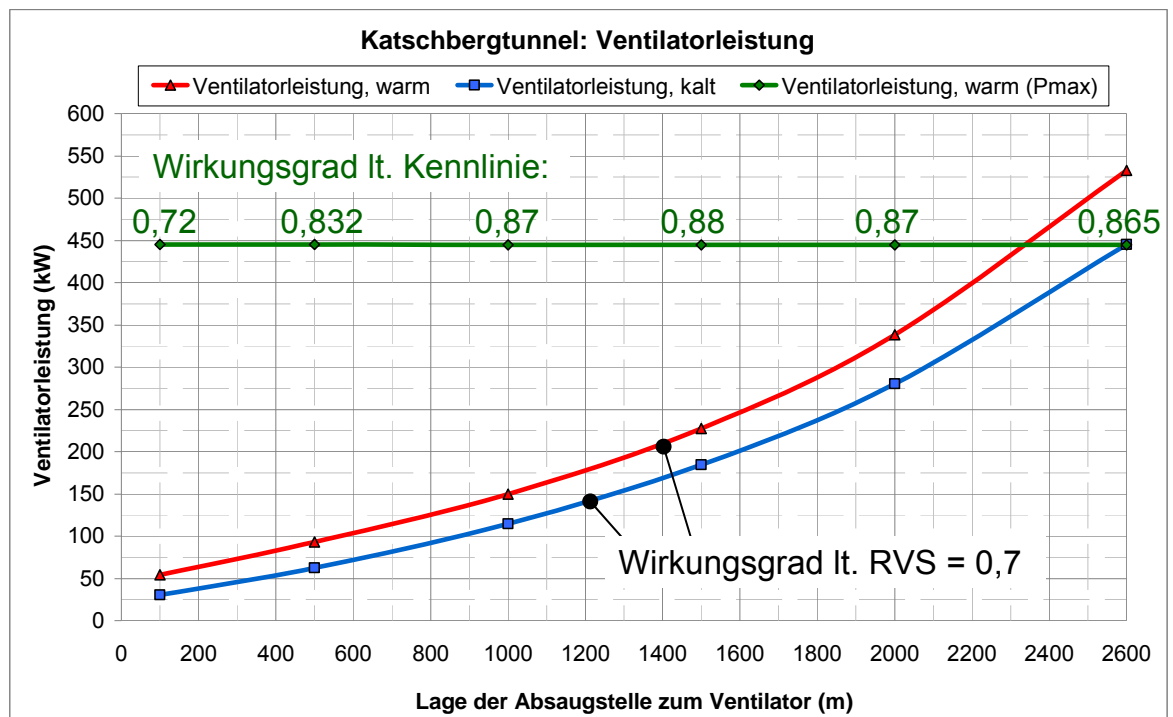


Abbildung 5-8: Ventilatorleistung in Abhängigkeit der Absaugstelle – Katschbergtunnel 30 MW.

5.2.2 Abluftkanal Tauerntunnel

Wie für den Katschbergtunnel wurden auch für den Tauerntunnel die Auslegungsvarianten „kalt“ und „warm“ betrachtet. Bei beiden Varianten wird an der Klappe ein Massenstrom von 144,5 kg/s abgesaugt. Neben diesen beiden Varianten wurde außerdem untersucht, welcher heiße Volumenstrom an der Klappe maximal abgesaugt werden kann, wenn der Ventilator nach der Auslegungsvariante „kalt“ auf einen kalten Volumenstrom ausgelegt wurde. Diese Variante wird im Folgenden mit „Vmax“ bezeichnet. Für alle Varianten wurde allein der ungünstigste Fall betrachtet, bei dem über die weitest entfernte Abluftklappe abgesaugt wird und sich entsprechend die längste Luftkanallänge von 1400 m ergibt. Bei der Auslegungsvariante „Vmax“ erfolgt die Berechnung wie bei der Variante „warm“ unter Berücksichtigung der Lufterhitzung und der damit einhergehenden Dichteveriation. Anstatt der Vorgabe des abzusaugenden Massenstromes an der Klappe wird hier der abgesaugte Volumenstrom solange variiert, bis die erforderliche Ventilatorleistung bei maximaler Luftkanallänge von 1400 m mit jener übereinstimmt, die für gleiche Luftkanallänge bei der Auslegung „kalt“ ermittelt wurde. Bei der Auslegung „kalt“ ist für die Rauchabsaugung über die entferntesten Klappe (Luftkanallänge von 1400 m) eine Ventilatorleistung von 674 kW erforderlich. Für die Auslegungsvariante „Vmax“ wird diese Leistung von 674 kW vorgegeben und ermittelt welcher Volumenstrom bei dieser Leistung an der Klappe tatsächlich abgesaugt werden kann. Das Ergebnis soll die Differenz aufzeigen, zwischen dem nach RVS geforderten Absaugvolumenstrom und dem Volumenstrom, der bei kalter Auslegung tatsächlich abgesaugt werden kann.

5.2.2.1 Temperatur- und Dichteverlauf

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Berechnungsvarianten jeweils in einem gemeinsamen Diagramm aufgetragen. Abbildung 5-9 zeigt den Temperaturverlauf entlang des Luftkanals. Für die Rechnung „kalt“ liegt die Temperatur definitionsgemäß bei konstanten 20°C. Die Temperaturverläufe für die Rechnung „warm“ und die Rechnung „Vmax“ liegen dicht beieinander. Über die Länge des Luftkanals zeigt sich die Abkühlung durch die Wärmeübertragung in das Bauwerk. Am Ende des etwa 1400 m langen Luftkanals wird die Ausgangstemperatur von 20°C noch nicht ganz erreicht. In Abbildung 5-10 ist der zugehörige Dichteverlauf dargestellt.

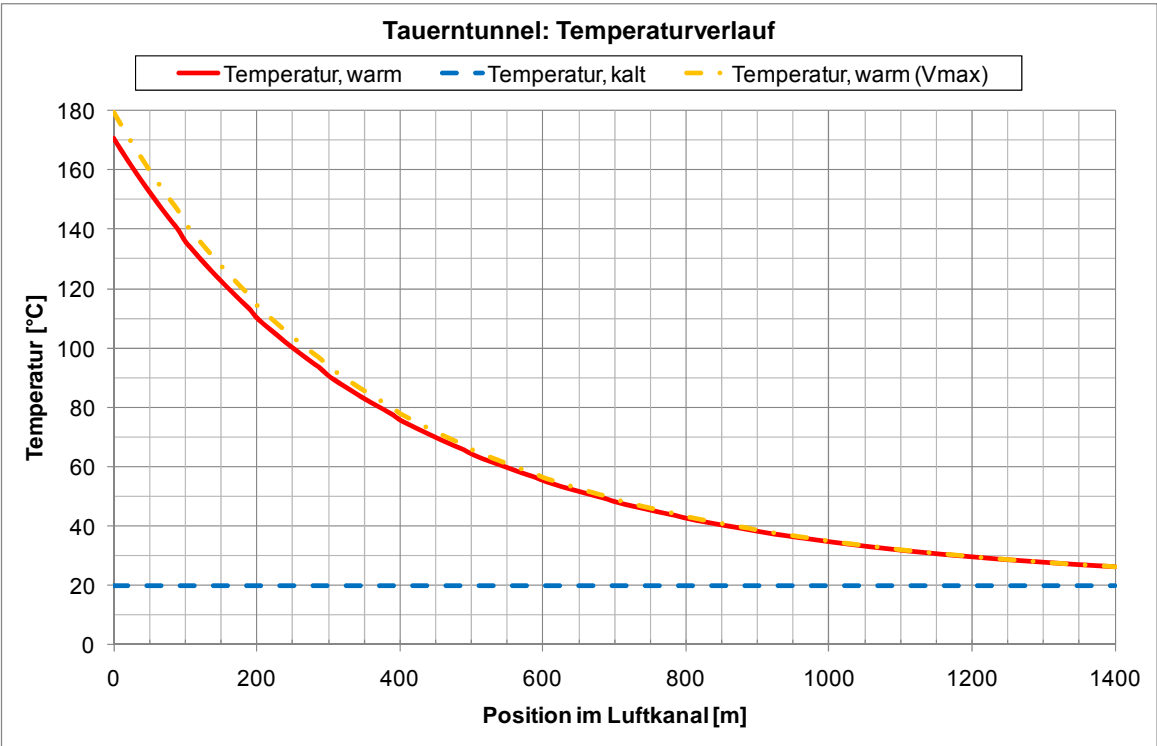


Abbildung 5-9: Temperaturverlauf entlang des Luftkanals - Tauerntunnel 30 MW.

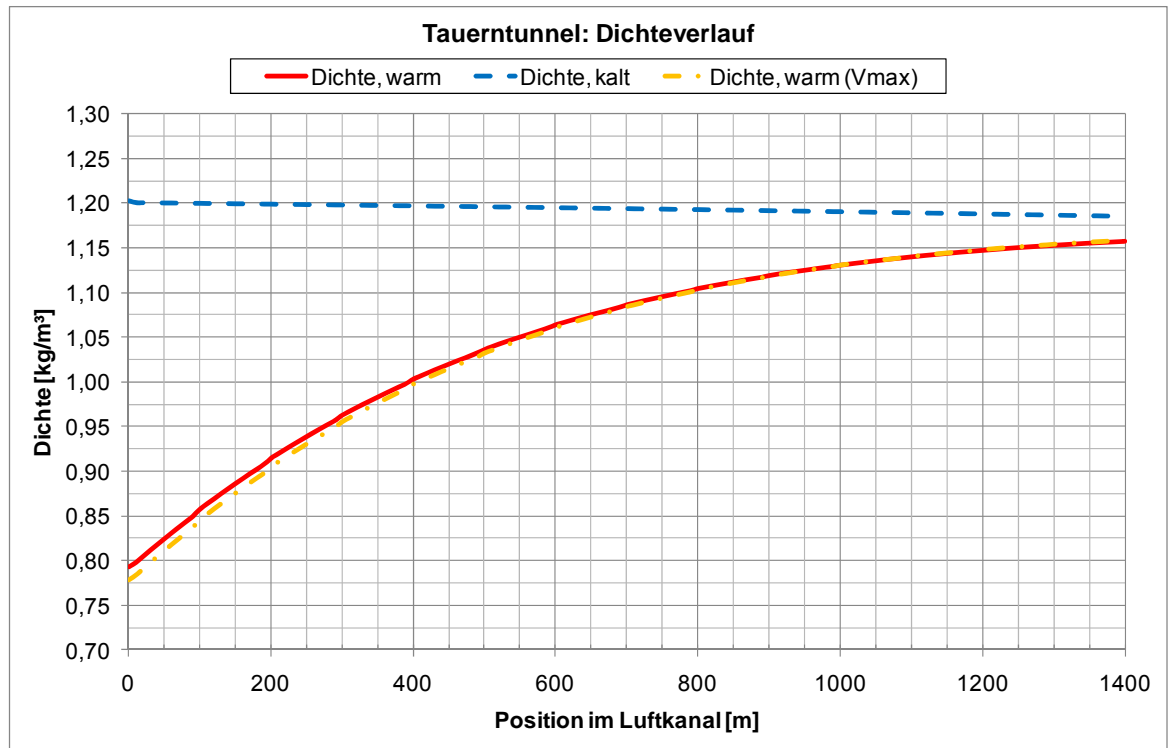


Abbildung 5-10: Dichteverlauf entlang des Luftkanals - Tauerntunnel 30 MW.

5.2.2.2 Volumenstrom

Bei Betrachtung der Volumenströme, die sich entlang des Luftkanals einstellen zeigen sich für die Berechnungsvariante „warm“ unterschiedliche Einflüsse. Aufgrund der konvektiven Wärmeübertragung an der Kanalwand sinkt die Temperatur, was zu einem Anstieg der Dichte und entsprechend zu einer Abnahme des Volumenstromes führt. Die Darstellung des Temperaturverlaufes im vorangegangenen Abschnitt zeigt den zunächst sehr hohen Temperaturgradienten nahe der Abluftklappe und die zunehmende Abflachung des Temperaturverlaufes bei Annäherung an das Kanallende. Der Dichteinfluss auf den Volumenstromverlauf nimmt entsprechend mit zunehmender Entfernung von der Abluftklappe ab. Dem Einfluss der Dichtevariation überlagert sich der Volumenstromanstieg durch die Leckagezuströmung. Im stromab gelegenen Kanalbereich überwiegt dieser Einfluss.

Wird die erforderliche Ventilatorleistung auf Basis der „kalten“ Auslegung ermittelt, kann mit dem entsprechend dimensionierten Abluftventilator der nach Auslegung „warm“ erforderliche Volumenstrom nicht gefördert werden. Der maximal an der Klappe absaugbare Volumenstrom ist um etwa 6,7 m³/s geringer als der nach Auslegung warm geforderte Absaugvolumenstrom von 182,2 m³/s.

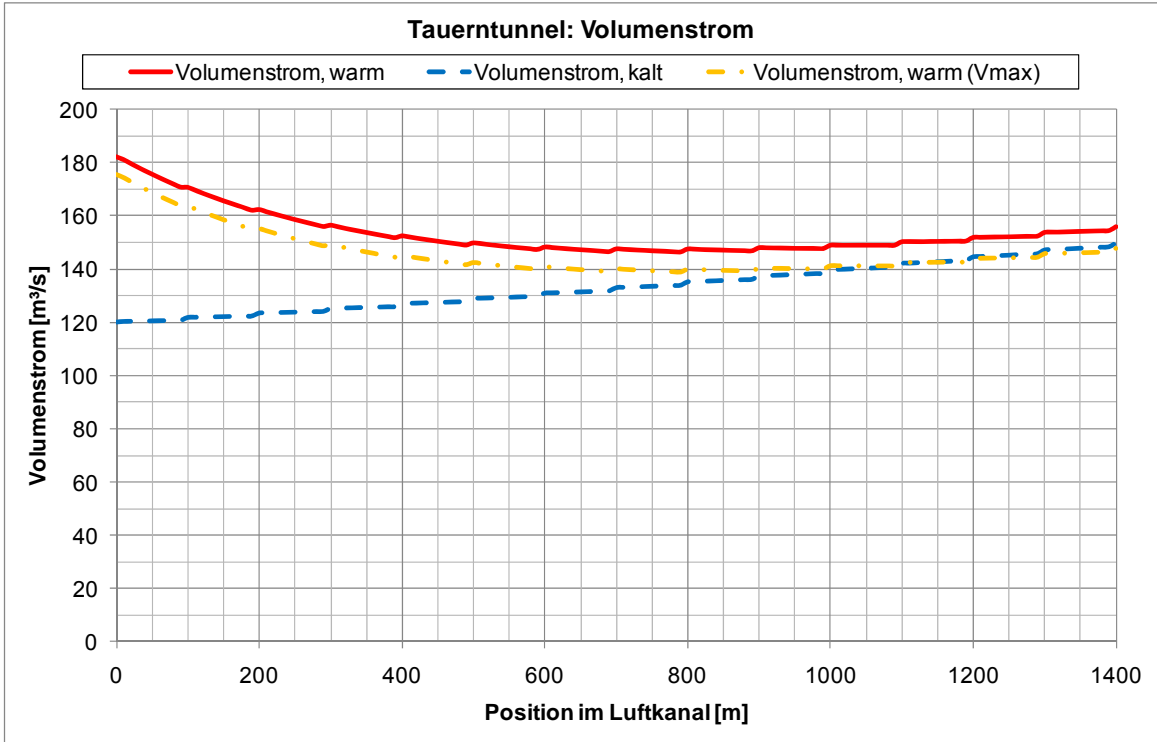


Abbildung 5-11: Volumenstrom in Abhängigkeit der Position im Luftkanal - Tauerntunnel 30 MW.

5.2.2.3 Druckverlauf

In Abbildung 5-12 ist der Druckverlust entlang des Luftkanals dargestellt. Die Einflüsse der Dichteveriation sowie der Leckageströme auf die Reibungsverluste entlang des Luftkanals wurde bereits in Abschnitt 5.2.1.3 diskutiert. Die leckagebedingte Zunahme des Volumenstromes bewirkt einen Anstieg der Reibungsverluste entlang des Luftkanals. Die Berücksichtigung des Temperaturanstieges bei der Auslegung „warm“ hat einen Anstieg des Volumenstromes zur Folge, der im Vergleich zur Auslegung „kalt“ für höhere Druckverluste sorgt.

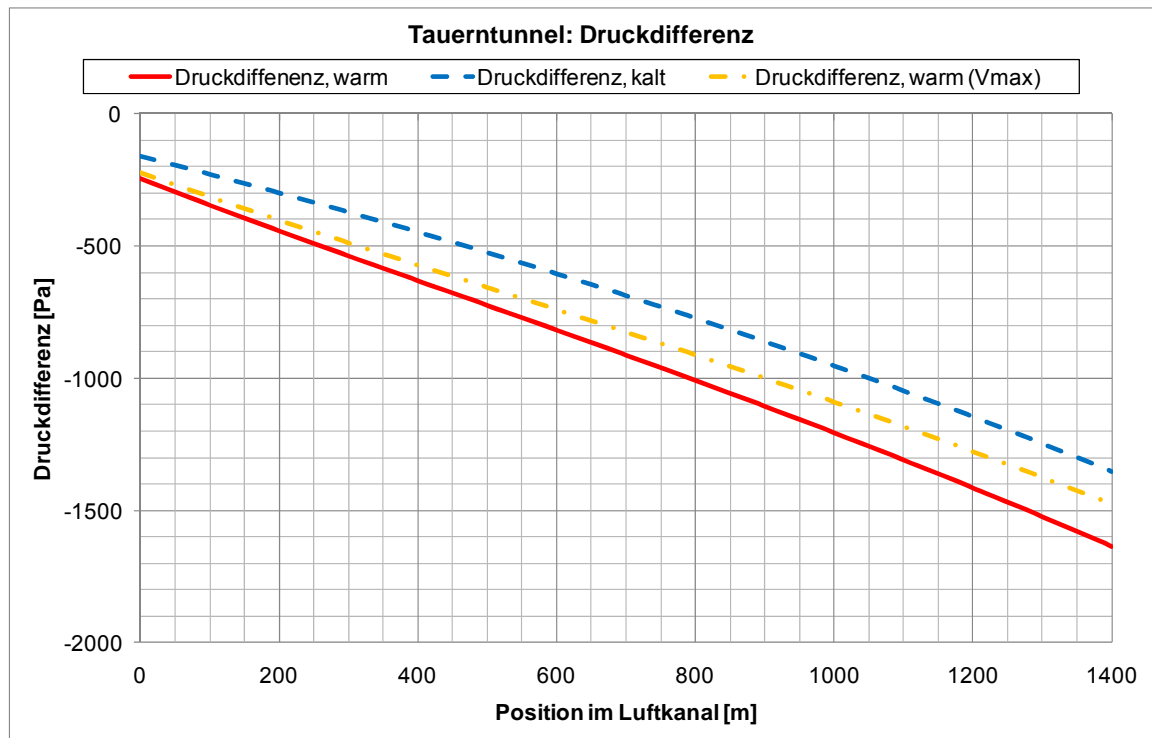


Abbildung 5-12: Druckdifferenz in Abhängigkeit der Position im Luftkanal - Tauerntunnel 30 MW.

5.2.2.4 Ventilatorleistung

Die erforderliche Ventilatorleistung bei Absaugung über die entfernteste Abluftklappe ist für alle drei Auslegungsvarianten unter Berücksichtigung des konstanten Wirkungsgrades der VGE lt. RVS 09.02.31 in Abbildung 5-13 dargestellt. Für die Varianten „kalt“ und „Vmax“ ergeben sich definitionsgemäß dieselben Ventilatorleistungen. Entsprechend der Ventilatorauslegung „kalt“ ist eine Ventilatorleistung von 674 kW erforderlich. Unter Berücksichtigung der Dichteveriation ist eine deutlich höhere Ventilatorleistung von 787 kW erforderlich.

In die Berechnung der Ventilatorleistung gehen neben den Druckverlusten im Luftkanal auch die Druckverluste der Kaverne ein. Im ungünstigsten Fall eines Brandes mit Absaugung über die entfernteste Abluftklappe (Luftkanallänge 1400 m) ergeben sich die folgenden Gesamtdruckverluste:

Auslegung „kalt“: -1354 Pa (Luftkanal) – 1796 Pa (Kaverne) = -3150 Pa
 Auslegung „warm“: -1637 Pa (Luftkanal) –1901 Pa (Kaverne) = -3538 Pa
 Auslegung „Vmax“: -1479 Pa (Luftkanal) –1712 Pa (Kaverne) = -3191 Pa

Die Gesamtdruckverluste werden für die Berechnung der erforderlichen Ventilatorleistung herangezogen.

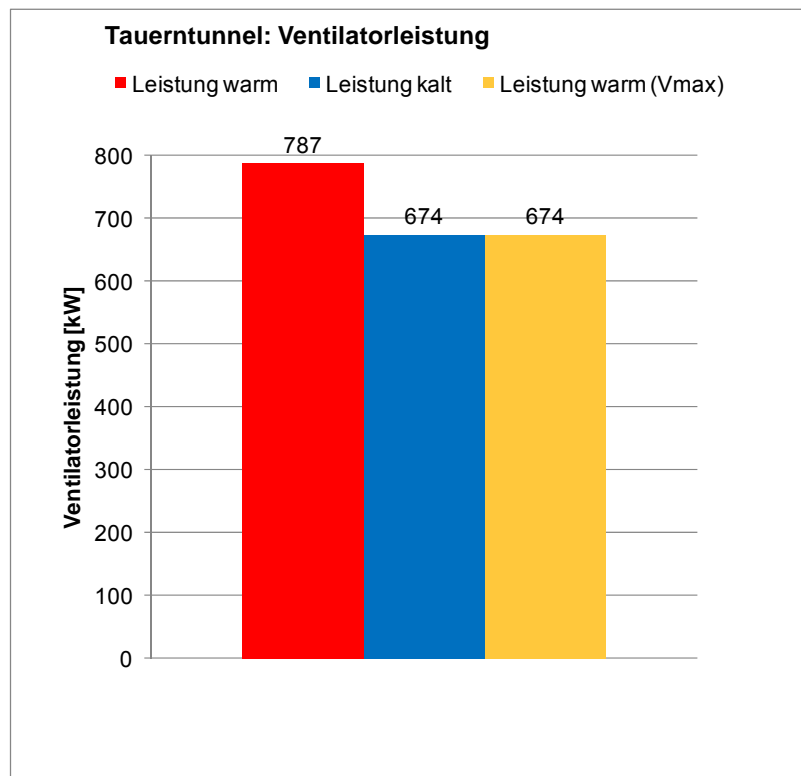


Abbildung 5-13: erforderliche Ventilatorleistung- Tauerntunnel 30 MW.

5.3 Parameterstudie

Zu Beginn werden die Berechnungsergebnisse mit dem Dimensionierungsbrand von 50 MW und anschließend die mit dem Dimensionierungsbrand von 30 MW dargestellt. Der Temperatur- und Dichteverlauf, der Volumenstrom und Druckverlauf sowie der Leistungsverlauf und das Leistungsverhältnis werden jeweils zusammen in einem Diagramm abgebildet. Durch die Annahme, dass der Abluftventilator direkt nach dem Abluftkanal ohne Umlenkungen und nachfolgendem Lüftergebäude positioniert ist, können die Diagramme auf zwei verschiedene Arten gelesen werden. Einerseits kann beispielsweise die Temperatur als Temperaturverlauf im Abluftkanal und andererseits als Temperatur am Ventilator nach einer bestimmten Kanallänge abgelesen werden. Im ersten Fall sind die Werte auf der Ordinate als Abluftkanallänge und im zweiten Fall als Entfernung der Abluftklappe zum Abluftventilator zu sehen. Die Position der offenen Abluftklappe ist bei beiden Fällen an der Stelle null.

5.3.1 Abluftkanal mit 9 m² Querschnittsfläche und Dimensionierungsbrand von 50 MW

5.3.1.1 Temperatur- und Dichteverlauf

In Abbildung 5-14 sind der Temperaturverlauf und der Dichteverlauf für die beiden Berechnungsvarianten in Abhängigkeit der Abluftkanallänge dargestellt. Die Temperatur unmittelbar an der Abluftklappe beträgt bei der warmen Auslegung etwa 274 °C. Wäre z.B. der Abluftventilator 200 m nach der Abluftklappe positioniert, würde die Lufttemperatur am Abluftventilator etwa 180 °C bzw. nach 600 m etwa 80 °C betragen. Nach einer Kanallänge von 1600 m wird annähernd wieder die Ausgangstemperatur erreicht. Die Dichte ist wieder reziprok zur Temperatur zu sehen und sinkt zusätzlich linear mit dem Unterdruck im Abluftkanal.

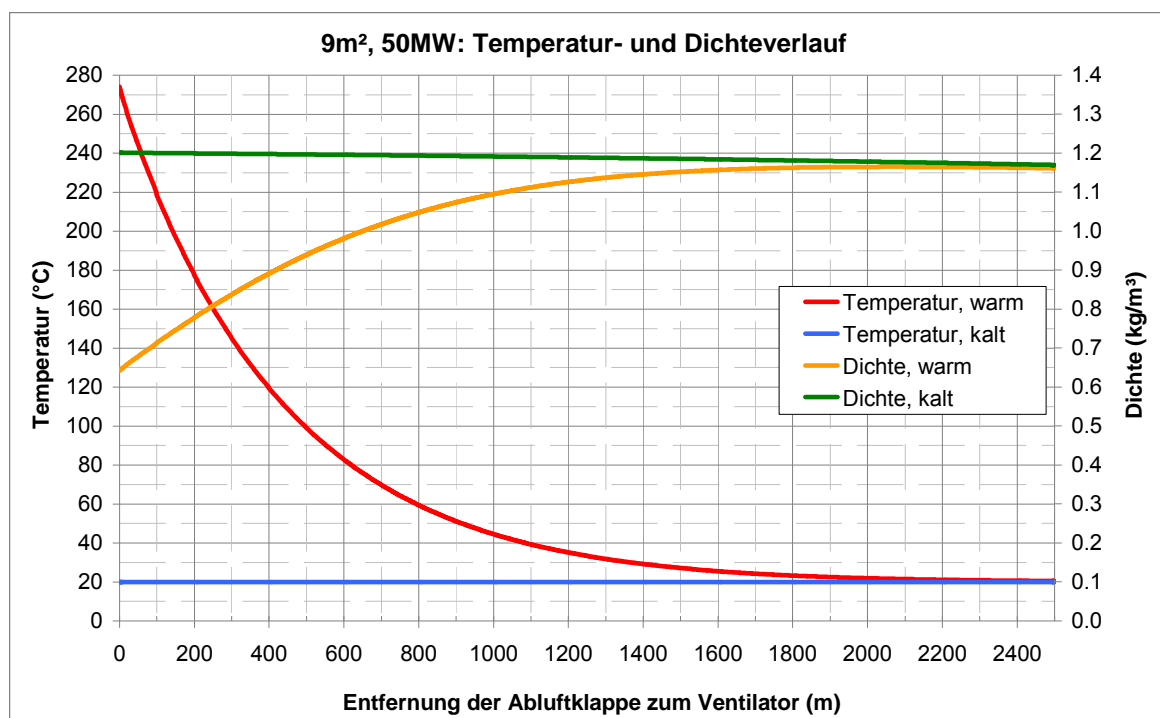


Abbildung 5-14: Temperatur und Dichte in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m² Profil mit 50 MW.

5.3.1.2 Volumenstrom und Druckverlauf

Die nachfolgende Abbildung 5-15 zeigen die Volumenströme und Druckdifferenzen in Abhängigkeit der Abluftkanallänge. Anstelle der bisherig erforderlichen Absaugmenge von 120 m³/s bei 20 °C müssen unter der Berücksichtigung der heißen Rauchgase etwa 224 m³/s abgesaugt werden. Nach beispielsweise einer Kanallänge von 300 m kühlt die Luft soweit ab, sodass der Abluftventilator nur mehr 180 m³/s fördern müsste. Der Volumenstrom nimmt immer weiter ab, bis die Ausgangstemperatur nach etwa einer Kanallänge von 1600 m wieder erreicht wird und steigt dann entsprechend der Bauwerksleckagen und Abluftklappenleckagen (Sprung im Verlauf) an. Der Druckverlust nimmt mit zunehmender

Kanallänge zu und ist bei der Auslegung mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend größer. Bei dieser Auslegung wird der lt. RVS 09.03.02 maximal auftretende Unterdruck von 3000 Pa bereits nach einer Kanallänge von 2200 m erreicht.

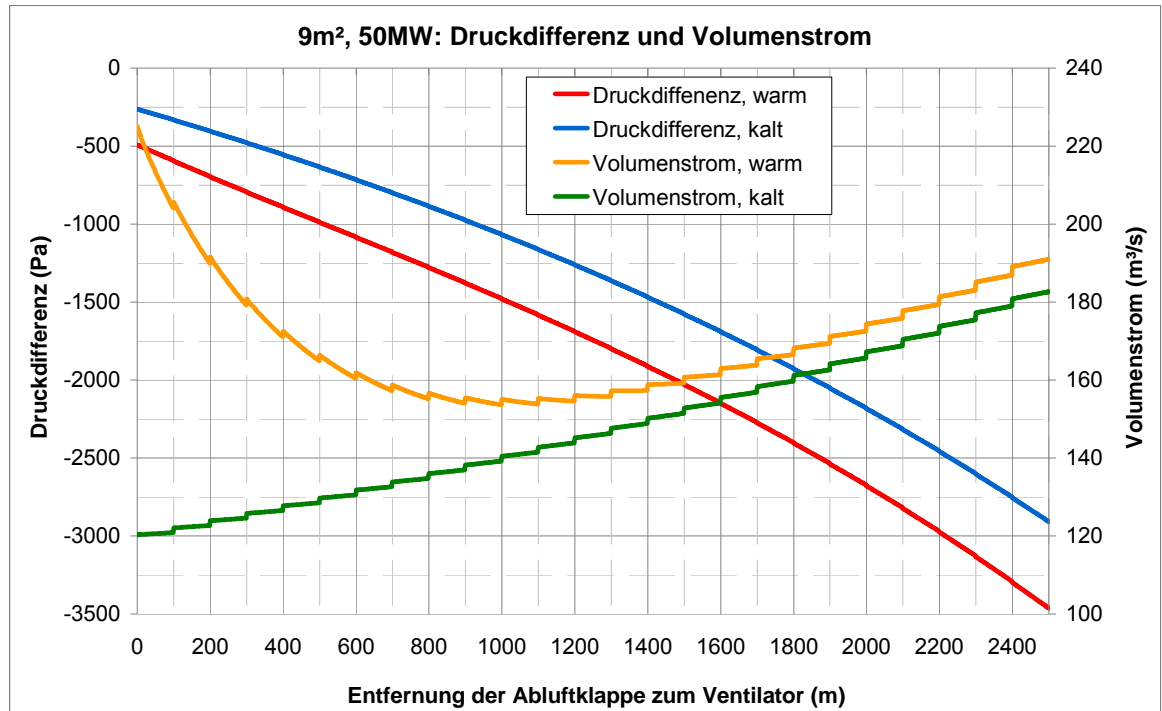


Abbildung 5-15: Druckdifferenz und Volumenstrom in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m² Profil mit 50 MW.

5.3.1.3 Leistungsverlauf und Leistungsverhältnis

Die Ventilatorleistung (Abbildung 5-16) wird aus dem Produkt von Volumenstrom und Druckverlust unter Berücksichtigung des konstanten Wirkungsgrades der VGE berechnet. Der Leistungsbedarf ist bei der Auslegung mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase durch den höheren Volumenstrom und Druckverlust größer. Dieser Leistungsanstieg wirkt sich bei kurzen Abluftkanälen wegen den höheren Temperaturen (dadurch höhere Volumenströme) sehr viel mehr aus als bei längeren Abluftkanälen. Deshalb liegt das Leistungsverhältnis bei kurzen Abluftkanälen zwischen 1,5 und 3 und bei längeren Abluftkanälen zw. 1,3 und 1,5.

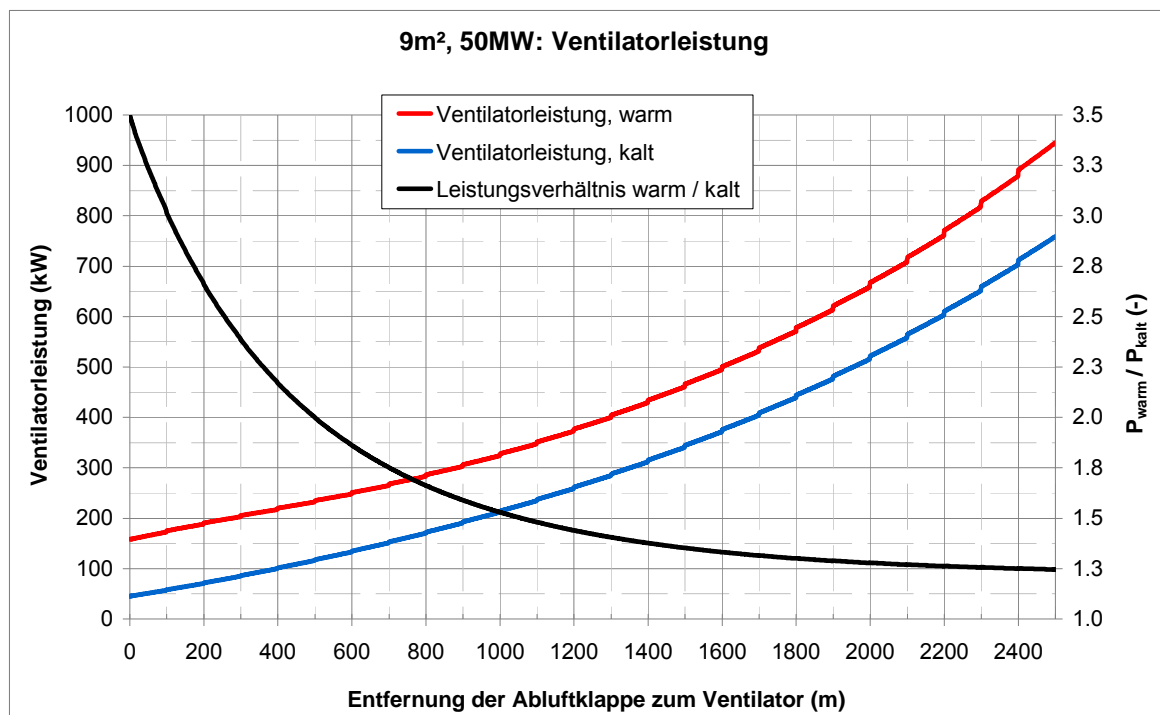


Abbildung 5-16: Ventilatorleistung und Leistungsverhältnis in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m² Profil mit 50 MW.

5.3.2 Abluftkanal mit 12 m² Querschnittsfläche und Dimensionierungsbrand von 50 MW

5.3.2.1 Temperatur- und Dichteverlauf

In nachfolgender Abbildung 5-17 ist wieder der Temperatur und der Dichteverlauf in Abhängigkeit der Abluftkanallänge dargestellt. Die beiden Verläufe sind mit denen des vorherigen Berechnungsfalls (Abluftkanal von 9 m² und Brandleistung von 50 MW) annähernd identisch, da die Absaugmengen in beiden Fällen gleich sind. Es wäre zu erwarten, dass die heißen Rauchgase durch die größere Oberfläche des Abluftkanals schneller abgekühlt werden. Dieser Zusammenhang wird aber durch die Tatsache, dass der Wärmeübergangskoeffizient aufgrund der geringeren Strömungsgeschwindigkeiten gemindert wird, kompensiert.

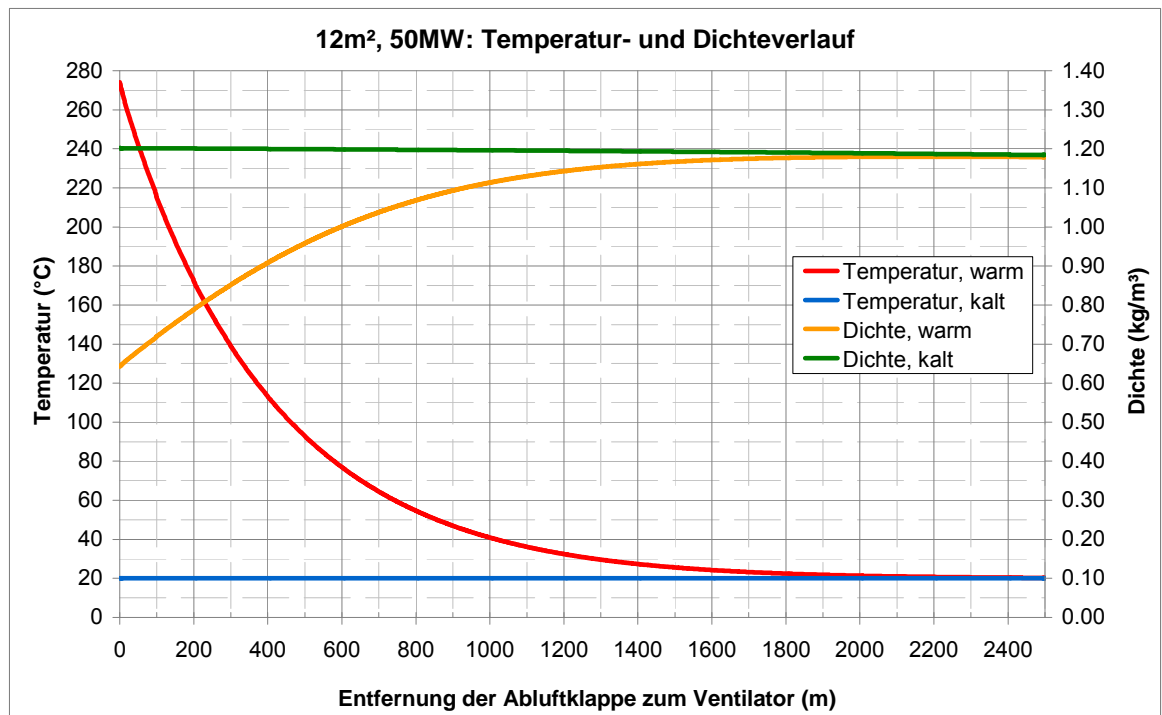


Abbildung 5-17: Temperatur und Dichte in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m² Profil mit 50 MW.

5.3.2.2 Volumenstrom und Druckverlauf

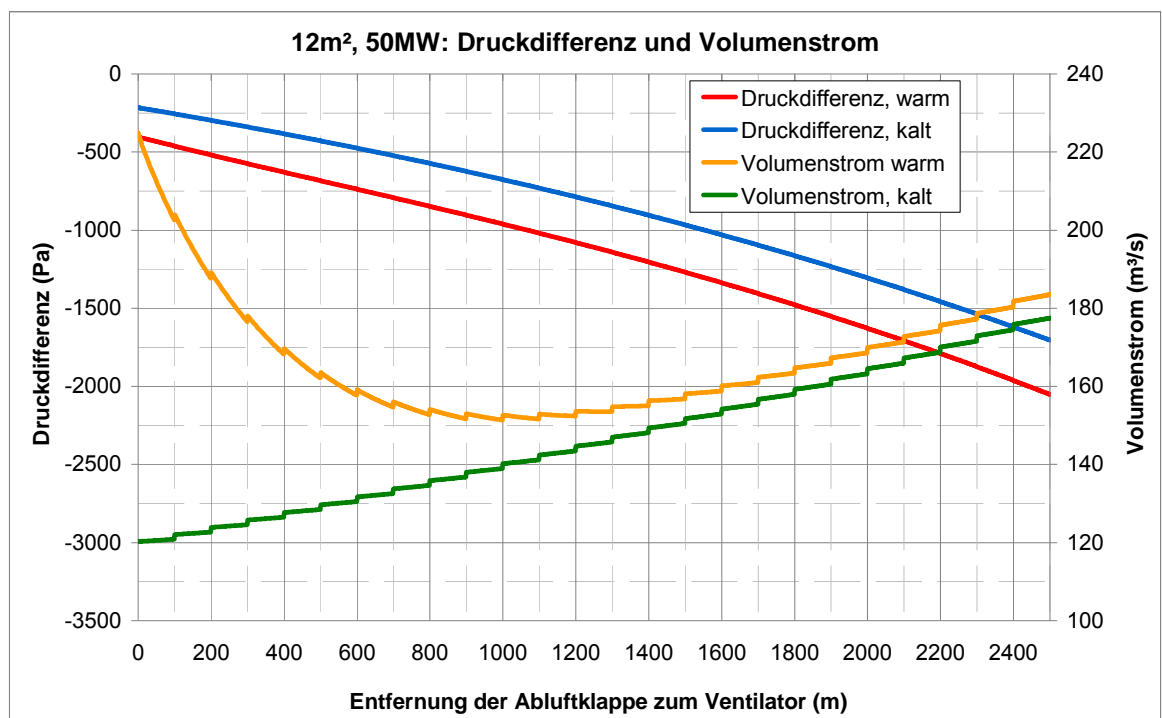


Abbildung 5-18: Druckdifferenz und Volumenstrom in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m² Profil mit 50 MW.

In Abbildung 5-18 sind wieder der Volumenstrom und der Druckverlauf in Abhängigkeit der Abluftkanallänge dargestellt. Der Volumenstrom ist an der Ansaugstelle (Position 0 an der Ordinate) identisch zu dem in Abbildung 5-15, da dieselbe Abluftklappengröße verwendet wurde. Im Abluftkanal ist der Volumenstrom jedoch aufgrund des größeren Kanalquerschnittes geringer, wodurch auch der Druckverlust geringer ausfällt. Die weitere Charakteristik der Verläufe ist gleich wie in Punkt 5.3.1.2 bzw. 5.2.1.2 und 5.2.1.3 beschrieben.

5.3.2.3 Leistungsverlauf und Leistungsverhältnis

In Abbildung 5-19 sind der Leistungsverlauf und das Leistungsverhältnis in Abhängigkeit der Abluftkanallänge dargestellt. Verglichen zu den Ergebnissen mit der Kanalquerschnittsfläche von 9 m² sind die Absolutwerte der Ventilatorleistungen durch die geringeren Volumenströme und Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend geringer (siehe Abbildung 5-16). Werden jedoch die Verhältnisse (Auslegung mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase zur Auslegung ohne Berücksichtigung der heißen Rauchgase) gebildet, dann ergeben sich die gleichen Werte. Der Grund liegt darin, dass sich die geometrischen Abhängigkeiten beim Bilden des Leistungsverhältnisses herauskürzen und lediglich die temperaturbedingten Abhängigkeiten zu trage kommen. Da beide Fälle (9 m² und 12 m²) mit einer Brandleistung von 50 MW berechnet wurden, sind auch die Leistungsverhältnisse gleich. Es wäre lediglich ein Unterschied zu verzeichnen, wenn es Unterschiede in den Temperaturverläufen gäbe.

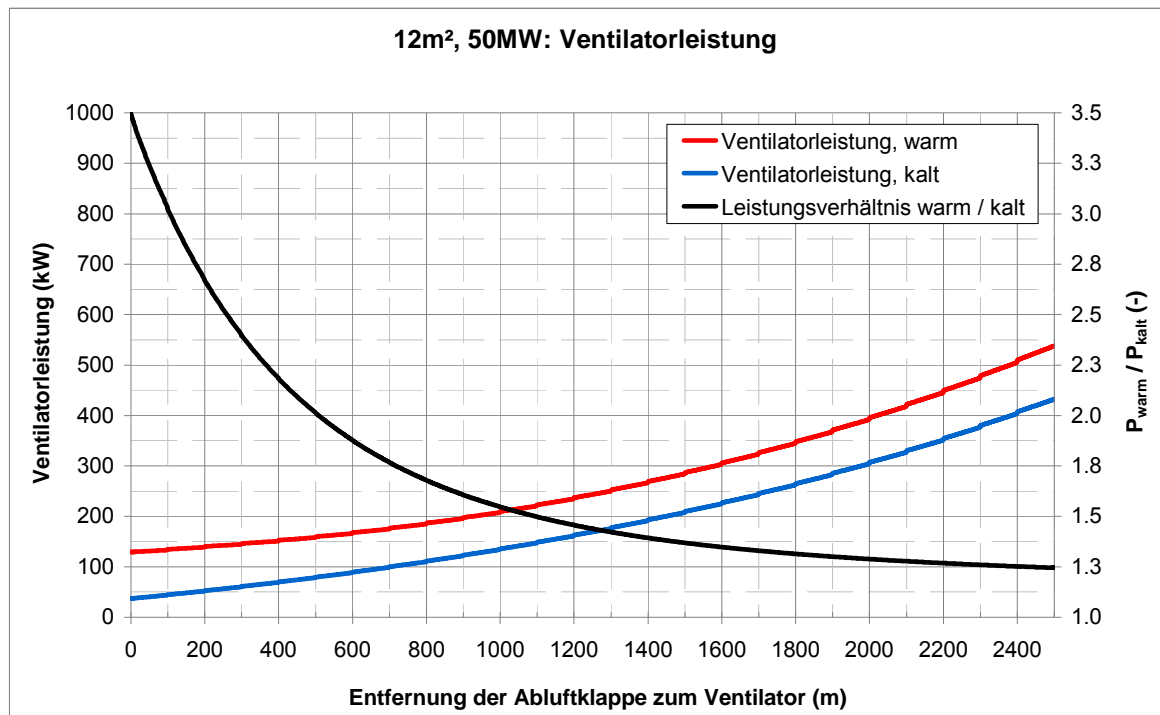


Abbildung 5-19: Ventilatorleistung und Leistungsverhältnis in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m² Profil mit 50 MW.

5.3.3 Abluftkanal mit 9 m² Querschnittsfläche und Dimensionierungsbrand von 30 MW

5.3.3.1 Temperatur- und Dichteverlauf

Abbildung 5-20 zeigt Temperatur- und Dichteverlauf für die Berechnungsvarianten „warm“ und „kalt“. Die Verläufe der Strömungsgrößen sind über der Länge des Abluftkanals aufgetragen, wobei wie eingangs beschrieben, die x-Achse auch als Position im Luftkanal gelesen werden kann. Unter Berücksichtigung des Temperaturanstieges in der Auslegungsvariante „warm“ liegt die Lufttemperatur an der Abluftklappe bei etwa 171°C. 200 m stromab der Abluftklappe herrscht eine Temperatur von etwa 109°C, 600 m stromab der Abluftklappe ist die Lufttemperatur schon auf etwa 54°C abgekühlt. Ab einer Kanallänge von 1400 m liegt die Temperatur am Ende des Luftkanals wieder bei der Ausgangstemperatur von 20°C.

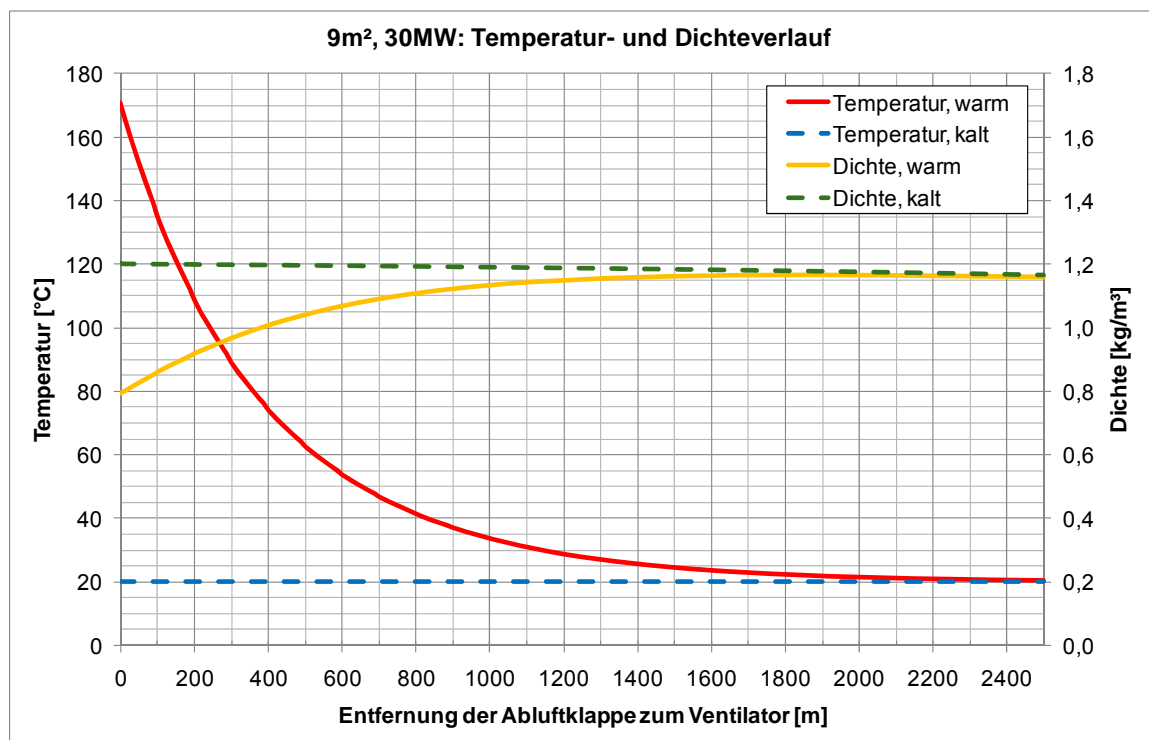


Abbildung 5-20: Temperatur und Dichte in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m² Profil mit 30 MW

5.3.3.2 Volumenstrom und Druckverlauf

Volumenstrom und Druckverlauf sind für beide Auslegungsvarianten in Abbildung 5-21 dargestellt. Aufgrund der Leckage ist bei einem 2500 m langen Luftkanal nach Auslegung „kalt“ am Ventilator ein Volumenstrom von 186 m³/s abzusaugen. „Warm“ ergibt sich am Ende eines 2500 m langen Luftkanals ein entsprechend höherer Volumenstrom von 193 m³/s. Ist der Luftkanal nur 300 m lang, muss der Ventilator einen warmen Volumenstrom von 156 m³/s fördern.

Bei der Auslegungsvariante „warm“ wird der lt. RVS 09.03.02 maximal auftretende Unterdruck von 3000 Pa ab einer Kanallänge von 2200 m überschritten.

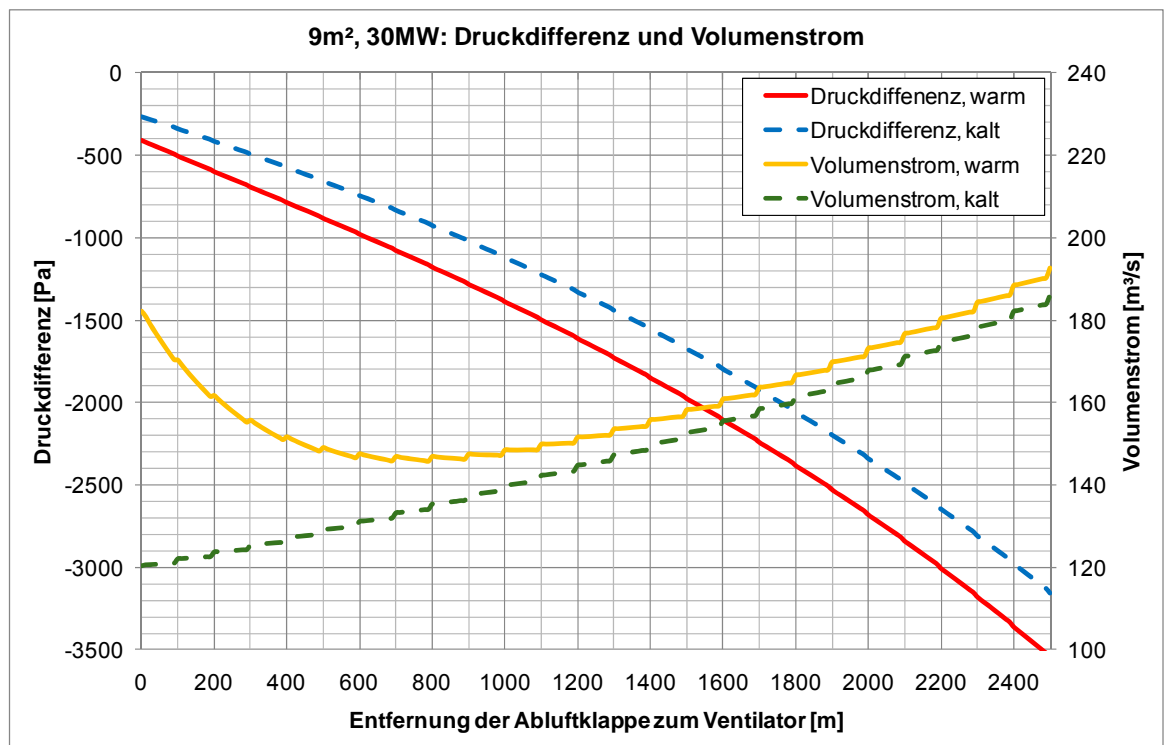


Abbildung 5-21 Druckdifferenz und Volumenstrom in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m² Profil mit 30 MW.

5.3.3.3 Leistungsverlauf und Leistungsverhältnis

Abbildung 5-22 zeigt die erforderliche Ventilatorleistung in Abhängigkeit der Luftkanallänge. Mit steigenden Volumenströmen sowie mit steigenden Druckverlusten nimmt auch die erforderliche Ventilatorleistung zu. Wie die vorangegangenen Betrachtungen zeigen, ergeben sich bei Auslegung „warm“ höhere Volumenströme und auch größere Druckverluste als bei der Auslegungsvariante „kalt“. Aus der Berücksichtigung des Temperaturanstieges folgt daher ein größerer Leistungsbedarf. Mit zunehmender Luftkanallänge steigen die Druckverluste mit den in Kapitel 5.2.1.3 erläuterten Einflüssen. Mit der Kanallänge steigt folglich auch der Leistungsbedarf. Aufgrund der großen Temperaturgradienten nahe der Abluftklappe ergeben sich für kurze Kanallängen sehr viel deutlichere Unterschiede zwischen den Auslegungsvarianten „warm“ und „kalt“. Entsprechend weist das Leistungsverhältnis im Bereich kleiner Luftkanallängen hohe Werte und einen großen Gradienten auf.

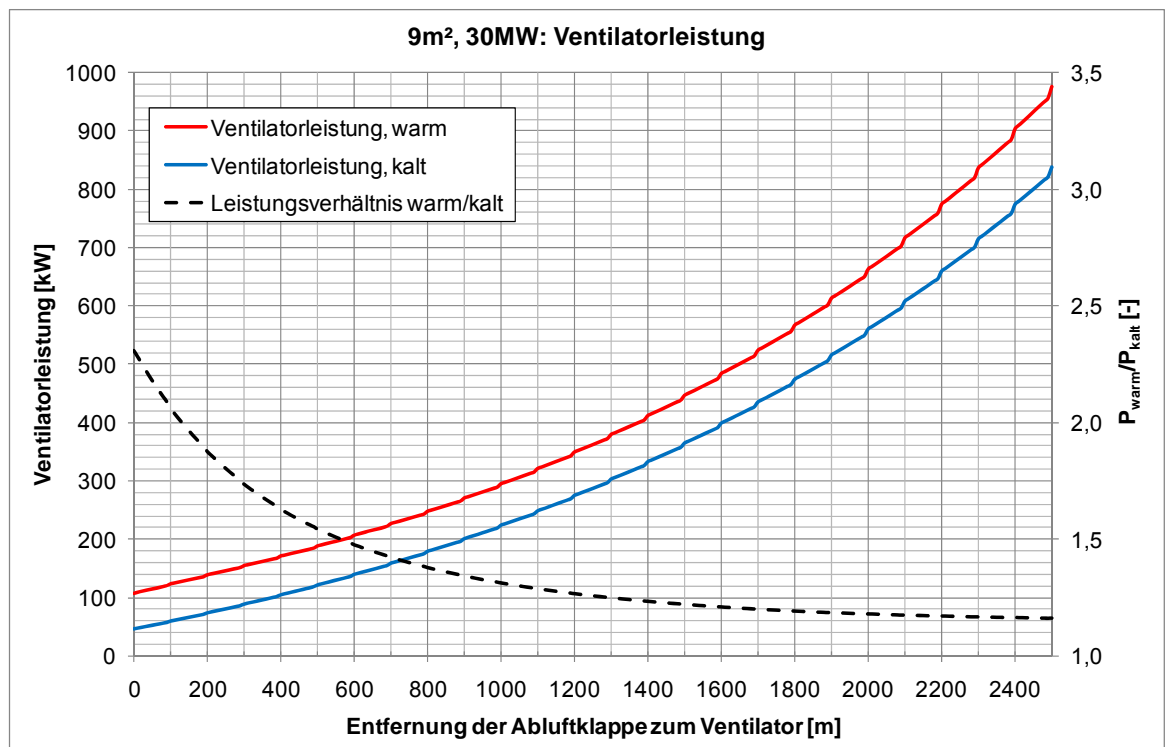


Abbildung 5-22: Ventilatorleistung und Leistungsverhältnis in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m² Profil mit 30 MW.

5.3.4 Abluftkanal mit 12 m² Querschnittsfläche und Dimensionierungsbrand von 30 MW

5.3.4.1 Temperatur- und Dichteverlauf

Abbildung 5-23 zeigt den Temperatur- und den Dichteverlauf in Abhängigkeit der Luftkanallänge. Auch für den Rechenfall mit 30 MW Dimensionierungsbrand sind die Verläufe für die Querschnittsflächen von 9 m² und 12 m² einander sehr ähnlich. Der Grund ist, wie bereits in Abschnitt 5.3.2.1 beschrieben, dass bei 12 m² Querschnittsfläche für die Wärmeübertragung auf die Kanalwand einerseits eine größere Oberfläche vorhanden ist, aber andererseits durch die geringeren Strömungsgeschwindigkeiten der Wärmeübergangskoeffizient geringer ist. Beide Effekte scheinen sich nahezu auszugleichen.

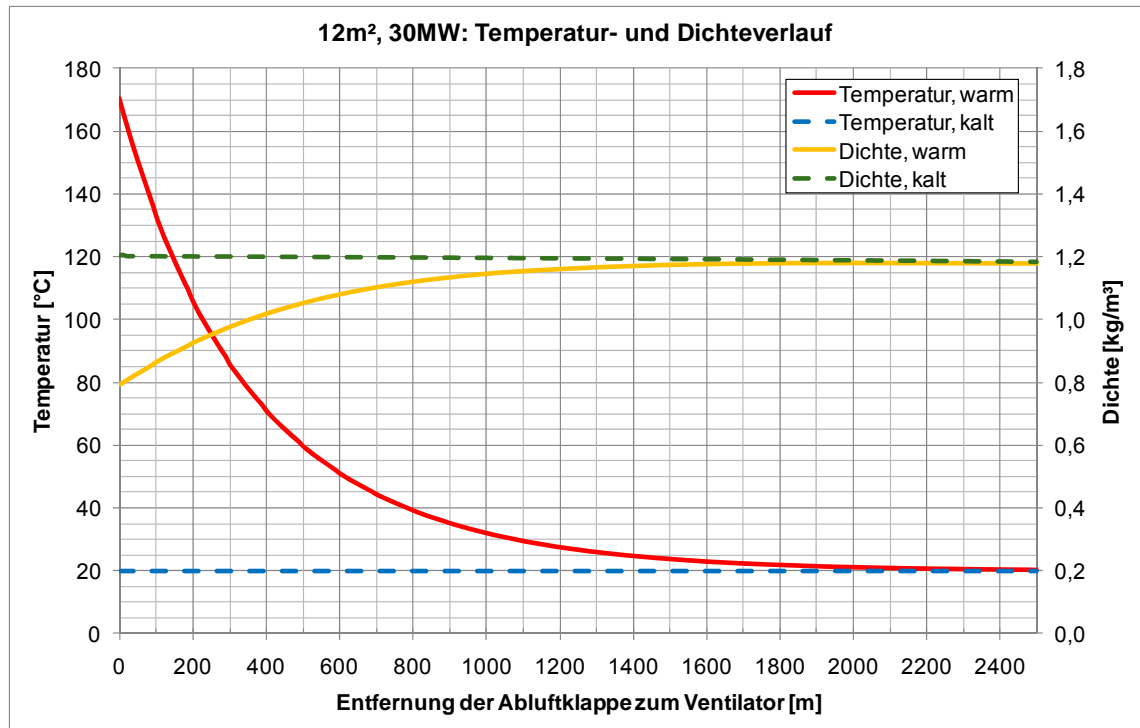


Abbildung 5-23: Temperatur und Dichte in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m² Profil mit 30 MW.

5.3.4.2 Volumenstrom und Druckverlauf

In Abbildung 5-24 sind Volumenstrom und Druckverlauf in Abhängigkeit der Luftkanallänge aufgetragen. Die Verläufe zeigen sich mit den zuvor bereits erläuterten Charakteristiken.

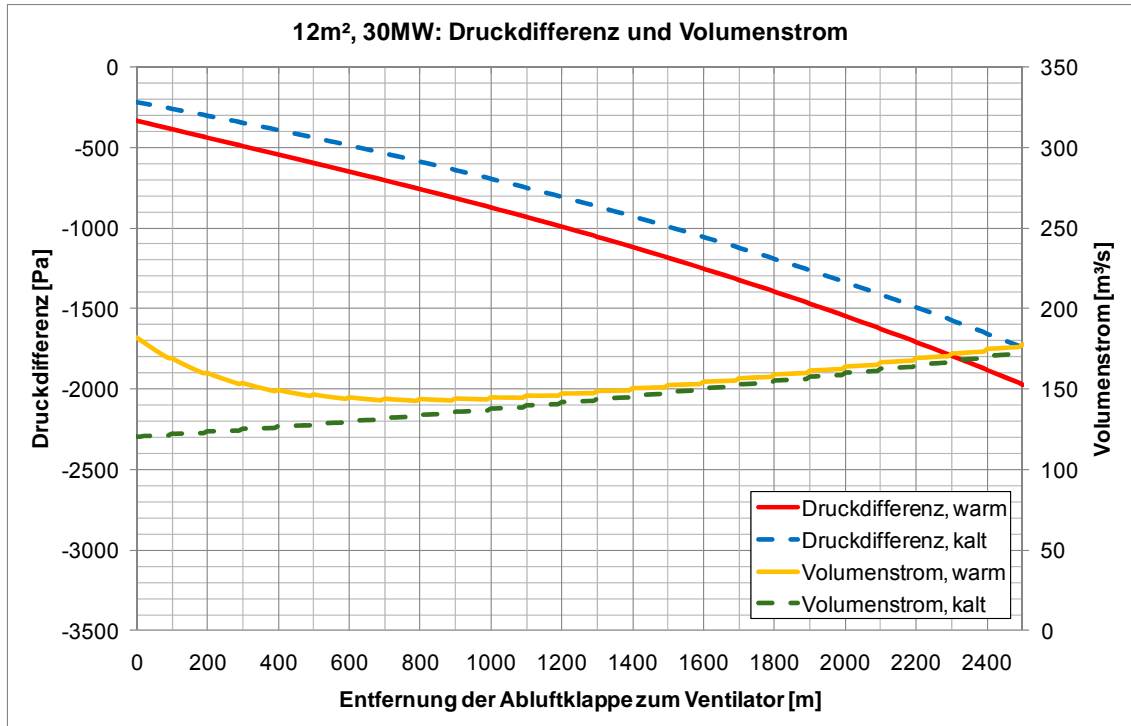


Abbildung 5-24: Druckdifferenz und Volumenstrom in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m² Profil mit 30 MW.

5.3.4.3 Leistungsverlauf und Leistungsverhältnis

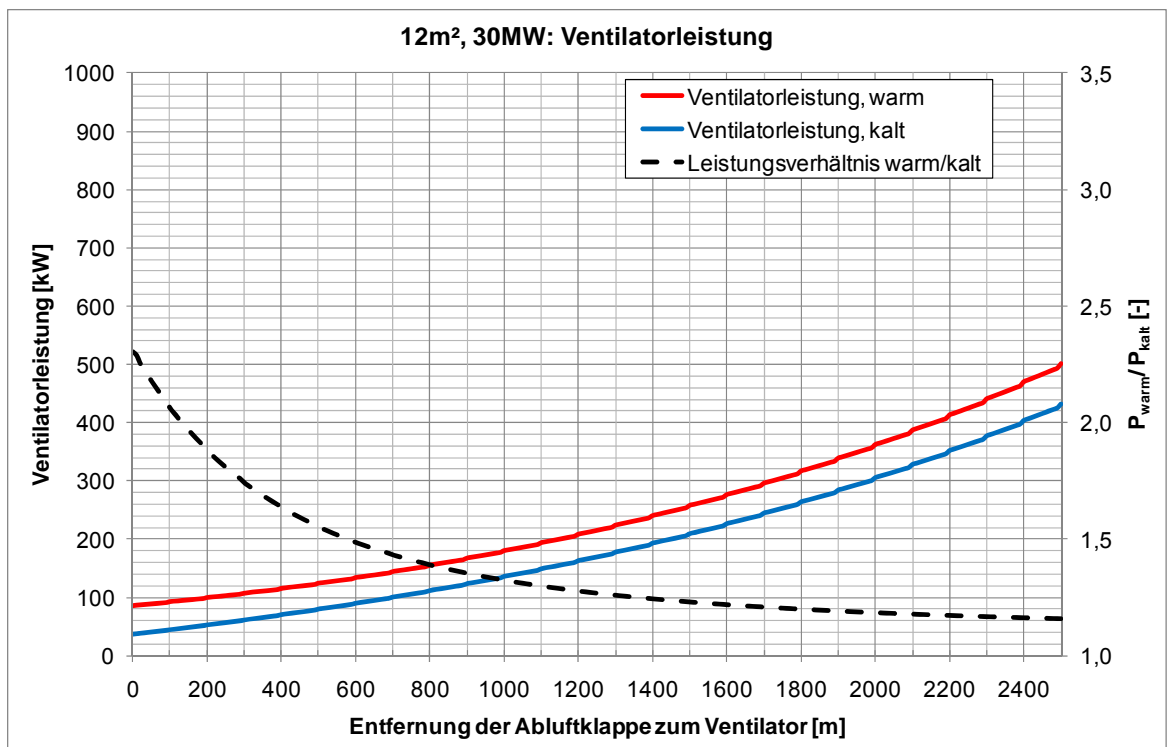


Abbildung 5-25: Ventilatorleistung und Leistungsverhältnis in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m² Profil mit 30 MW.

Dokument-Nr. FVT-27/11/Be V&U 10/11/6400	Forschungsprojekt - Auswirkungen der Berücksichtigung der Temperaturerhöhung im Brandfall auf die Dimensionierung von quergelüfteten Straßentunnel Schlussbericht	Version: 1.0 freigegeben
--	---	-----------------------------

Abbildung 5-25 zeigt für beide Auslegungsvarianten die Ventilatorleistung in Abhängigkeit der Entfernung zwischen Abluftklappe und Ventilator. Der schwarze Linienverlauf gibt wie gehabt das Leistungsverhältnis der Auslegung mit und ohne Berücksichtigung des brandbedingten Temperaturanstieges wieder. Obgleich die erforderliche Ventilatorleistung im Vergleich zur Rechnung mit 9 m² Luftkanal-Querschnittsfläche deutlich geringer ist, liegt das Leistungsverhältnis wie schon bei der Rechnung für einen 50 MW Brand für beide Luftkanalquerschnitte bei gleichen Werten.

Im Vergleich der Luftkanalrechnung für 30 MW und 50 MW bei gleicher Geometrie werden die temperaturbedingten Abhängigkeiten deutlich. Aufgrund der höheren Temperaturen im Falle des 50 MW Brandes ergeben sich hier deutlich höhere Leistungsverhältnisse von 1,3 bis 3,5. Das Leistungsverhältnis für den 30 MW Brand liegt bei Kanallängen bis zu 2500 m in einem Bereich von 1,2 bis 2,3.

5.3.5 Auswirkungen auf maximal zulässige Abluftkanallänge

Die RVS 09.02.31 schreibt vor, dass das Lüftungssystem so zu dimensionieren ist, dass die maximale Druckdifferenz zw. Abluftkanal und Fahrraum 3000 Pa nicht überschreitet und die Länge des Lüftungsabschnittes in der Regel nicht länger als 2500 m sein sollte. Durch diese Bedingung wird der Lüftungsabschnitt bei der warmen Auslegung durch die höheren Strömungsverluste bereits ab einem Abluftkanalquerschnitt von 9 m² reduziert. Bei einem Dimensionierungsbrand von 30 MW ergab sich eine maximale Kanallänge von etwa 2300 m und bei einem Dimensionierungsbrand von 50 MW eine maximale Kanallänge von 2200 m (siehe Abbildung 5-26). Bei dem Abluftkanalquerschnitt von 12 m² sind durch den großen Querschnitt die Strömungsverluste deutlich geringer, sodass bei jedem Berechnungsfall der maximal zulässige Lüftungsabschnitt von 2500 m verwendet werden kann.

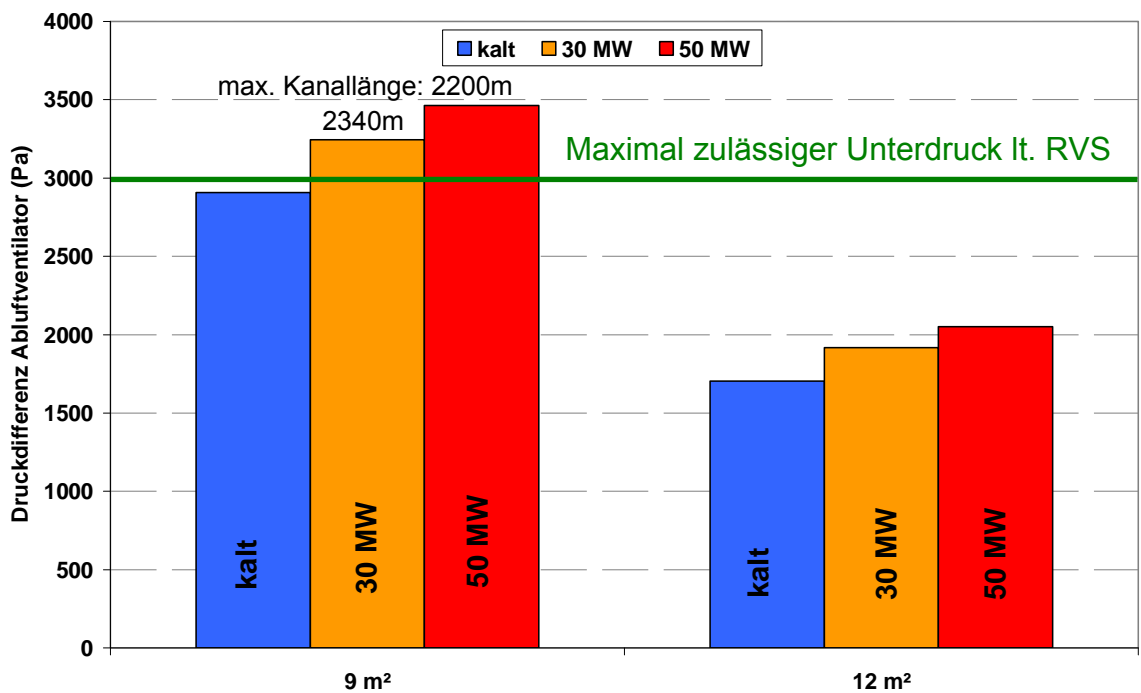


Abbildung 5-26: Druckdifferenz am Abluftventilator bei einer Lüftungsabschnittlänge von 2500 m.

Dokument-Nr. FVT-27/11/Be V&U 10/11/6400	Forschungsprojekt - Auswirkungen der Berücksichtigung der Temperaturerhöhung im Brandfall auf die Dimensionierung von quergelüfteten Straßentunnel Schlussbericht	Version: 1.0 freigegeben
--	---	-----------------------------

6 Zusammenfassung

In der derzeitigen RVS 09.02.31 werden für die aerodynamische Dimensionierung von quergelüfteten Lüftungssystemen brandbedingte Temperatureinflüsse nicht berücksichtigt. Um zu überprüfen, inwieweit sich die Absaugung heißer Rauchgase auf die Dimensionierung der Lüftungsanlage bestehender und zukünftiger Tunnelanlagen auswirkt, wurde das vorliegende Forschungsprojekt vom BMVIT initiiert. Dieses Forschungsprojekt wurde in Form einer Arbeitsgemeinschaft von der Firma ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH Innsbruck und der Firma FVT mbH ausgeführt.

Die Untersuchung wurde mithilfe eindimensionaler Strömungssimulationen anhand realer Tunnelgeometrien (Tunnel mit Halb- und Vollquerlüftung) durchgeführt. Betrachtet wurden der Tauerntunnel (durchgeführt von ILF) und der Katschbergtunnel (durchgeführt von FVT) bei einem Dimensionierungsbrand von 30 MW als Bestandsanlagen und zwecks Parameterstudie jeweils ein Abluftkanal mit einem Profil entsprechend einer Abluft-Halb- (12 m²) und einer Abluft-Vollquerlüftung (9 m²) mit jeweils einem Dimensionierungsbrand von 30 MW (durchgeführt von ILF) und 50 MW (durchgeführt von FVT).

Die Berechnungen der Bestandsanlagen haben gezeigt, dass bei gleichem Massenstrom am Absaugort die Ventilatorleistungen mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase um etwa 17% höher liegen als bei der bisherigen Auslegung nach RVS 09.02.31. Werden jedoch die Wirkungsgrade entsprechend der Kennlinien der bestehenden Abluftventilatoren für die Berechnung der Ventilatorleistung herangezogen, so können auch die Absaugmengen unter Berücksichtigung der heißen Rauchgase, jedoch ohne Reserven, bewältigt werden (siehe Abbildung 5-6).

Durch die Durchführung der Parameterstudie wurde deutlich, dass die Erhöhung der Ventilatorleistung bei der Auslegung mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase verglichen zur Auslegung ohne Berücksichtigung der heißen Rauchgase bei gleichem Absaugmassenstrom nur vom Dimensionierungsbrand abhängig und somit unabhängig von der Querschnittsgröße des Abluftkanals ist (siehe Abbildung 5-16, Abbildung 5-19, Abbildung 5-22 und Abbildung 5-25). Die Erhöhung der Ventilatorleistung beträgt bei einem Dimensionierungsbrand von 30 MW je nach Abluftkanallänge zw. 50 % (Abluftkanallänge von 600 m) und 16 % (Abluftkanallänge von 2500 m) und bei einem Dimensionierungsbrand von 50 MW zw. 90 % (Abluftkanallänge von 600 m) und 25 % (Abluftkanallänge von 2500 m). Die Auswirkungen der Ventilatorleistung mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase sind bei kurzen Abluftkanallängen aufgrund der geringen Kühlstrecke deutlich größer als bei längeren Abluftkanälen, bei denen eine stärkere Kühlung der heißen Rauchgase stattfindet. Weiters haben sich bei der Betrachtung mit Berücksichtigung der heißen Rauchgase höhere Unterdrücke aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Abluftkanal ergeben, die wiederum bei Abluftkanalquerschnitten welche kleiner als 10 m² sind zu einer Beschränkung der Abluftkanallänge, durch das Erreichen des lt. RVS maximal erlaubten Druckdifferenz zw. Fahrraum und Abluftkanal (3000 Pa), führen.

Dokument-Nr. FVT-27/11/Be V&U 10/11/6400	Forschungsprojekt - Auswirkungen der Berücksichtigung der Temperaturerhöhung im Brandfall auf die Dimensionierung von quergelüfteten Straßentunnel Schlussbericht	Version: 1.0 freigegeben
--	---	-----------------------------

7 **Verwendete Unterlagen**

- [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] Polifke, W./ Kopitz, J. (2009, 2. Aufl., aktualisierte Auflage): Wärmeübertragung. Grundlagen, analytische und numerische Methoden. Germany: München
- [5] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC): VDI-Wärmeatlas; 10. Auflage, Springer-Verlag, Karlsruhe und Düsseldorf Juni 2005
- [6] ASFINAG: Aerodynamische Abnahmemessungen an den Zuluft- und Abluftventilatoren im Tunnel Katschberg; April 2008, Heidenheim

8 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Aufteilung der Berechnungsfälle in der Arbeitsgruppe.	7
Tabelle 2: Mittlere Temperaturen am Brandort in Abhängigkeit der Brandquelle und dem Lüftungssystem.	11
Tabelle 3: Zulässige Leckagemengen in Abhängigkeit des Prüfdruckes lt. RVS 09.02.31 [2].....	13
Tabelle 4: Auflistung der Berechnungsparameter und Randbedingungen aller Berechnungsfälle.....	14
Tabelle 5: Auflistung der Absaugpositionen im Abluftkanal Katschbergtunnel	18
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Lüftungssystems der Abluft vom Katschbergtunnel.	8
Abbildung 3-2: Profil einer Ablufthalbquerlüftung links und einer Vollquerlüftung rechts.	9
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Absaug Szenarios im Brandfall für Halbquer- und Querlüftung.	11
Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Diskretisierung des Abluftkanals.	12
Abbildung 4-3: Verlauf der zulässigen Leckagemengen in Abhängigkeit des Prüfdruckes.	13
Abbildung 5-1: Vergleichsrechnung, Temperatur und Dichte in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m ² Profil mit 50 MW.....	16
Abbildung 5-2: Vergleichsrechnung, Druckdifferenz und Volumenstrom in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m ² Profil mit 30 MW.	17
Abbildung 5-3: Kennfeld der bestehenden Axialventilatoren inkl. Betriebspunkte unterschiedlicher Absaugpositionen (Ref. [6])	18
Abbildung 5-4: Temperatur am Abluftventilator in Abhängigkeit der Absaugstelle - Katschbergtunnel 30 MW.	19
Abbildung 5-5: Dichte am Abluftventilator in Abhängigkeit der Absaugstelle – Katschbergtunnel 30 MW.	20
Abbildung 5-6: Volumenstrom am Abluftventilator in Abhängigkeit der Absaugstelle – Katschbergtunnel 30 MW.	21
Abbildung 5-7: Dichterverläufe in Abhängigkeit der Absaugstelle – Katschbergtunnel 30 MW.	22
Abbildung 5-8: Ventilatorleistung in Abhängigkeit der Absaugstelle – Katschbergtunnel 30 MW.	23
Abbildung 5-9: Temperaturverlauf entlang des Luftkanals - Tauerntunnel 30 MW.	24
Abbildung 5-10: Dichteverlauf entlang des Luftkanals - Tauerntunnel 30 MW.....	25
Abbildung 5-11: Volumenstrom in Abhängigkeit der Position im Luftkanal - Tauerntunnel 30 MW.	26
Abbildung 5-12: Druckdifferenz in Abhängigkeit der Position im Luftkanal - Tauerntunnel 30 MW.	27
Abbildung 5-13: erforderliche Ventilatorleistung- Tauerntunnel 30 MW.	28
Abbildung 5-14: Temperatur und Dichte in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m ² Profil mit 50 MW.	29
Abbildung 5-15: Druckdifferenz und Volumenstrom in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m ² Profil mit 50 MW.....	30
Abbildung 5-16: Ventilatorleistung und Leistungsverhältnis in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m ² Profil mit 50 MW.....	31
Abbildung 5-17: Temperatur und Dichte in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m ² Profil mit 50 MW.	32
Abbildung 5-18: Druckdifferenz und Volumenstrom in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m ² Profil mit 50 MW.....	32
Abbildung 5-19: Ventilatorleistung und Leistungsverhältnis in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m ² Profil mit 50 MW.....	33
Abbildung 5-20: Temperatur und Dichte in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m ² Profil mit 30 MW	34

Dokument-Nr. FVT-27/11/Be V&U 10/11/6400	Forschungsprojekt - Auswirkungen der Berücksichtigung der Temperaturerhöhung im Brandfall auf die Dimensionierung von quergelüfteten Straßentunnel Schlussbericht	Version: 1.0 freigegeben
--	---	-----------------------------

Abbildung 5-21 Druckdifferenz und Volumenstrom in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m² Profil mit 30 MW..... 35

Abbildung 5-22: Ventilatorleistung und Leistungsverhältnis in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 9 m² Profil mit 30 MW..... 36

Abbildung 5-23: Temperatur und Dichte in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m² Profil mit 30 MW. 37

Abbildung 5-24: Druckdifferenz und Volumenstrom in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m² Profil mit 30 MW..... 38

Abbildung 5-25: Ventilatorleistung und Leistungsverhältnis in Abhängigkeit der Abluftkanallänge – 12 m² Profil mit 30 MW..... 38

Abbildung 5-26: Druckdifferenz am Abluftventilator bei einer Lüftungsabschnittlänge von 2500 m..... 40