



Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit

Messung der Strömungsgeschwindigkeiten
in Querschnitten von zwei
Tunnelbauwerken

Philip De Monte, BSc

Februar 2021



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 25.02.2021

Unterschrift Verfasser/in
Philip De Monte

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit ergreifen, um mich bei allen Personen zu bedanken, die mich beim Abschluss meines Studiums unterstützt haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Gert und Renate de Monte. Sie haben mir dieses Studium ermöglicht, haben mich dabei immer unterstützt und waren zu jeder Zeit mein sicherer Rückhalt.

Für die Ermöglichung der Arbeit und die Betreuung bedanke ich mich bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler, Herrn Dipl.-Ing. Erik Schuller und Herrn Dipl.-Ing. Robert Wenighofer. Außerdem bedanke ich mich bei allen MitarbeiterInnen des Lehrstuhls für Subsurface Engineering, die ich im Laufe meines Masterstudiums kennenlernen durfte und die mich während meines Studiums begleitet haben.

Abschließend bedanke ich mich beim gesamten Team der ARGE SBT 1.1 Tunnel Gloggnitz, die mir die Möglichkeit zur Mitarbeit und der Durchführung von Messungen am Baulos gegeben haben. Ein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Hannes Hauer und Herrn Dipl.-Ing. Ricardo Simon für die umfangreiche Unterstützung.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die derzeit verwendeten Belüftungssysteme in Tunnelbauwerken im Bau- und Betriebszustand, die strömungsmechanischen Grundlagen zur Auslegung von Belüftungsanlagen und die Möglichkeiten zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten, um die Steuerung und Funktionsfähigkeit der Belüftungsanlagen zu gewährleisten. Im Bauzustand ist die wichtigste Aufgabe der Belüftung, die im Tunnel arbeitenden Personen und die Verbrennungsmotoren der Fahrzeuge und Maschinen mit Frischluft zu versorgen und die durch die Vortriebsarbeiten und den Betrieb der Fahrzeuge entstehende Abluft aus dem Tunnel zu fördern. Im Betriebszustand ist besonders bei Straßenverkehrstunneln aufgrund der verbrennungsbedingten Emissionen ein stetiger Luftaustausch und gute Sichtbedingungen zu gewährleisten. Dafür kommen im Bau- und Betriebszustand je nach Länge, Verkehrsaufkommen und Komplexität der Tunnelbauwerke unterschiedliche Belüftungssysteme zum Einsatz, welche im ersten Abschnitt der Arbeit im Detail beschrieben werden. Die Auslegung und Dimensionierung von Tunnelbelüftungssystemen basiert auf strömungsmechanischen Grundgleichungen wie der Kontinuitätsgleichung, der Impulsgleichung, der Energiegleichung und der Bernoulli-Gleichung. Diese dienen zur mathematischen Beschreibung der Luftströmungen in Tunneln und der auftretenden Strömungsverluste. Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in Tunneln kommen im Bau- und Betriebszustand unterschiedliche Messgeräte und Messverfahren zum Einsatz. Im Bauzustand werden die Strömungsgeschwindigkeiten der Luft zur Feststellung von Leckagen wie Beschädigungen an Lutten, und zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit des Belüftungssystems gemessen. Im Betriebszustand wird durch den permanenten Abgleich zwischen IST-Geschwindigkeiten und vorgegebenen SOLL-Geschwindigkeiten das Belüftungssystem automatisch geregelt. Im Zuge des praktischen Teils der Arbeit wurden Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten am Zentrum am Berg und am Baulos Gloggnitz des Semmering-Basistunnel durchgeführt. Am Zentrum am Berg sind in allen Tunnelröhren Strahlventilatoren und in einem Lüftergebäude im Portalbereich des Straßentunnels zwei Axialventilatoren zur Absaugung der Luft über einen Abluftkanal installiert. Die Messergebnisse zeigen, dass mit den beiden Axialventilatoren die größte Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum erzeugbar ist. Die Baulüftung am Baulos Gloggnitz ist als Umluftbewetterung ausgeführt, bei der über eine Tunnelröhre Frischluft zugeführt und über die andere Tunnelröhre die Abluft abgeführt wird. Die Messergebnisse zeigten einige Leckagen durch beschädigte Lutten und geöffnete Wetterwände, die daraufhin behoben wurden. Zusätzlich dazu wurde die erforderliche Leistung der Ventilatoren angepasst, um dauerhaft eine ausreichende Frischluftversorgung der Arbeitsbereiche zu gewährleisten.

Abstract

This diploma thesis gives an overview of the ventilation systems currently used in tunnels in the construction and operating states, the fluid mechanical principles for designing ventilation systems and the possibilities for measuring the flow velocities in order to ensure the control and functionality of the ventilation systems. In the construction stage, the most important task of ventilation is to supply people working in the tunnel and the combustion engines of the vehicles and machines with fresh air and to convey the exhaust air produced by the tunneling work and the operation of the vehicles out of the tunnel. In the operating state, a constant exchange of air and good visibility conditions must be ensured, especially in road tunnels, due to the combustion-related emissions. For this purpose, different ventilation systems are used in the construction and operating states, depending on the tunnel length, traffic volume and complexity of the tunnel structures, which are described in detail in the first section of this thesis. The design and dimensioning of tunnel ventilation systems is based on basic fluid mechanical equations such as the continuity equation, the momentum equation, the energy equation and the Bernoulli equation. These are used to mathematically describe the air flows in tunnels and the flow losses that occur. Different measuring devices and measuring methods are used to measure the flow velocities in tunnels in the construction and operating states. In the construction state, the air flow velocities are measured to detect leaks, such as damage to air ducts, and to check the functionality of the ventilation system. In the operating state, the ventilation system is automatically controlled by the permanent comparison between ACTUAL velocities and specified TARGET velocities. For the practical part of the thesis, measurements of the flow velocity were carried out at the Zentrum am Berg and at the Gloggnitz construction lot of the Semmering Base Tunnel. Jet fans are installed in all tunnel tubes at the Zentrum am Berg and two axial fans are installed in a building at the portal area of the road tunnel to extract the air via an exhaust duct. The measurement results show that the highest flow velocity in the tunnel can be generated with the two axial fans. The ventilation system at the Gloggnitz construction site is designed as a recirculation ventilation system, in which fresh air is supplied via one tunnel tube and the exhaust air is extracted via the other tunnel tube. The measurement results showed some leakages due to damaged air ducts and open ventilation walls, which were then repaired. In addition to this, the required output of the fans was adjusted in order to permanently guarantee a sufficient supply of fresh air to the working areas.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Aufgabenstellung	3
3	Belüftung von Tunnelbauwerken	4
3.1	Baulüftung.....	4
3.2	Eisenbahntunnel.....	8
3.3	Straßentunnel	9
3.4	Lüftungssysteme	12
4	Theoretische Grundlagen der Strömungs-mechanik	18
4.1	Allgemeines	18
4.2	Bernoulli-Gleichung	18
4.3	Druckverluste bei Rohrströmungen	19
4.4	Aerodynamik der Tunnelströmung	22
4.5	Aerodynamik einer Lutte	23
5	Inbetriebnahme der Lüftungsanlage am Zentrum am Berg	26
5.1	Allgemeines	26
5.2	Montage und Installation der Ventilatoren	28
6	Messung der Strömungsgeschwindigkeiten am Zentrum am Berg.....	38
6.1	Allgemeines	38
6.2	Messgeräte	39
6.3	Messaufbau und Messprogramm.....	43
6.4	Messergebnisse.....	45
7	Messung der Strömungsgeschwindigkeiten am Baulos Gloggnitz	49
7.1	Allgemeines	49
7.2	Messgeräte	51
7.3	Bewetterungskonzept	53
7.4	Messaufbau und Messprogramm.....	59
7.5	Messergebnisse.....	62
8	Zusammenfassung und Ausblick	73
9	Literaturverzeichnis	76
10	Abbildungsverzeichnis	79
11	Tabellenverzeichnis.....	80

1 Einleitung

Seit dem Jahr 1999, in dem zwei verheerende Brandereignisse in Tunnelbauwerken stattfanden, entstand eine europaweite Diskussion über die Sicherheit und die Belüftung in Tunneln. Am 24.03.1999 fing ein LKW im 11,6 km langen Mont-Blanc-Tunnel in Fahrtrichtung Italien Feuer. Das Sicherheitskonzept und das Belüftungssystem waren zum damaligen Zeitpunkt bereits 34 Jahre alt und dementsprechend nicht für ein solches Ereignis ausgelegt. Ein Großbrand brach aus, welcher zu einem 53 Stunden langen Feuerwehreinsatz führte, um das Feuer unter Kontrolle zu bringen. Dabei kamen 39 Personen ums Leben. Zwei Monate später, am 29.05.1999 geschah im Tauern Tunnel ein folgenschwerer Auffahrunfall mit mehreren beteiligten Fahrzeugen, welcher einen riesigen Brand auslöste. Dabei kamen 12 Personen ums Leben und der Tunnel wurde auf einer Länge von 500 m stark beschädigt. Innerhalb von drei Monaten wurde der Tunnel renoviert und auch das Sicherheitskonzept erneuert. [14]

Bis zu diesen Ereignissen waren Tunnelbelüftungen darauf ausgelegt, die Schadstoffkonzentrationen von CO, NO_x etc. möglichst gering zu halten und gute Sichtverhältnisse zu gewährleisten. Der Schutz von Personen und des Bauwerks im Brandfall wurde in der Planung kaum berücksichtigt. Nun war neben der Versorgung mit Frischluft, Verdünnung der Schadstoffe und Reduzierung der Trübe im Tunnel ein weiteres Ziel, die Rauch- und Temperaturbelastung im Brandfall zu verringern, sowie bessere Fluchtbedingungen zu schaffen und das Bauwerk zu schützen. Im Zuge dessen wurde die Richtlinie des europäischen Parlaments über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz 2004 erlassen. Diese wurde im Mai 2006 mit dem Straßentunnelsicherheitsgesetz [24] vom österreichischen Parlament in nationales Recht umgesetzt. Dementsprechend wurden auch die nationalen Richtlinien zur Konzeption und Ausführung von Lüftungsanlagen in den einzelnen europäischen Ländern, in Österreich die RVS 09.02.31 [19], überarbeitet und angepasst. Darin befinden sich Bemessungsgrundlagen für die Dimensionierung von Tunnellüftungsanlagen sowie deren Anforderungen.

Im Betriebsfall darf die Gesundheit der Verkehrsteilnehmer und des Betriebspersonals unter Berücksichtigung der Aufenthaltsdauer im Tunnel keinen Schaden aufgrund von zu hohen Schadstoffgehalten in der Luft erleiden und die erforderliche Anhaltesichtweite ist zu jeder Zeit zu gewährleisten. Im Brandfall sind die Rauchfreihaltung der Fluchtwege sicherzustellen, sichere Bedingungen für die Einsatzkräfte zu ermöglichen und ein möglichst geringes Schadensausmaß für Personen, Fahrzeuge und das Tunnelbauwerk zu erreichen.

Die sicherheitstechnischen Einrichtungen in Tunneln wie unter anderem die Lüftungsanlage haben auf Basis der Richtlinien bei der Planung und Inbetriebnahme die geforderten technischen Mindestanforderungen zu erfüllen. Durch die in der RVS 09.02.31 genau beschriebene Durchführung, ist der Aufwand der Inbetriebnahmen von Lüftungsanlagen extrem gestiegen. Die Wahl der geeigneten Lüftungsanlage ist abhängig von projektspezifischen Parametern wie der Tunnellänge oder dem Verkehrsaufkommen und der sicherheitstechnischen Aspekte für den Betriebs- und Brandfall.

Zur Steuerung der Lüftungsanlagen werden mit fix im Tunnel verbauten Strömungsmessgeräten die Längsströmungsgeschwindigkeiten gemessen. Anhand dieser Daten wird auch die Funktionsfähigkeit der Lüftung überprüft und die Strömung im Ereignisfall geregelt. Bei der Inbetriebnahme der Strömungsmessgeräte ist die Eignung des Messgerätes in Kombination mit dem Montageort nachzuweisen. Für jede Messanordnung ist mit einer Referenzströmungsmessung zu zeigen, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Tunnelquerschnitt erfasst wird.

Im Baubetrieb spielt die Belüftung eine ähnlich wichtige Rolle. In verschiedenen Richtlinien wie zum Beispiel der SIA 196 [22] sind die Anforderungen an die Belüftung und die Entstaubung von Tunnelröhren während der Bauphase definiert. Die richtige Dimensionierung und Umsetzung der Baulüftung spielt sowohl aus arbeitshygienischer als auch aus wirtschaftlicher und technischer Sicht eine wichtige Rolle. Besonders die Gesundheit der Beschäftigten, aber auch die Einsatzfähigkeit von Mensch und Maschine ist von einer ausreichenden Belüftung abhängig. Bei unzureichender Belüftung erhöht sich die Unfallgefahr und der Ausfall von technischen Anlagen, darunter leidet wiederum die Arbeitsleistung. [22]

Die Wahl eines geeigneten Belüftungssystems ist von den Parametern des Projektes, wie z.B. der Vortriebslänge oder der Vortriebsart, abhängig und ist in allen Projektphasen stufengerecht zu berücksichtigen. Ein Angebot hat eine Berechnung des notwendigen Frischluftbedarfs für die entsprechenden Vortriebsverfahren mit einem Lüftungssystem, das diesen Frischluftbedarf deckt, zu enthalten. Als Nachweis dafür und zur Bestimmung von Ventilator Kenndaten, Luttendurchmessern und Energiekosten ist eine Lüftungstechnische Berechnung erforderlich. Um die Funktionsfähigkeit des Lüftungssystems während der Betriebsdauer zu gewährleisten, sind regelmäßige Kontrollen durchzuführen. Dies wird durch Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten in den Tunnelröhren und in den Lutten, durch Kontrollen der Luttenstränge auf Leckstellen und durch Staubmessungen bewerkstelligt.

2 Aufgabenstellung

Tunnel werden sowohl im Bau-, als auch im Betriebszustand mechanisch belüftet. Einerseits um die Abgase von dieselbetriebenen Maschinen und Sprengschwaden zu verdünnen und andererseits um im Normalbetrieb den Frischluftbedarf zur Einhaltung bestimmter Luftqualitätsgrenzen zu gewährleisten, beziehungsweise um im Brandfall die entstehenden Rauchgase kontrolliert abzuleiten. Dafür werden, abhängig von Parametern wie der Vortriebsart, der Tunnellänge und dem Verkehrsaufkommen, unterschiedliche Lüftungssysteme eingesetzt. Um die Funktionsfähigkeit zu überprüfen und Lüftungssysteme automatisch zu steuern, werden sowohl im Bau- als auch im Betriebszustand Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist anhand von zwei praktischen Beispielen die Vorgehensweise bei Strömungsgeschwindigkeitsmessungen im Bau- und Betriebszustand zu zeigen und die Ergebnisse, sowie die gewonnenen Erkenntnisse zu erörtern und zu vergleichen. Dafür werden Messungen am Baulos Gloggnitz des Semmering-Basistunnels und am Zentrum am Berg (ZaB) durchgeführt. Als Vergleichswerte für die Messergebnisse werden die im Vorhinein berechneten Lüftungskonzepte herangezogen. Um das Zusammenspiel zwischen Strömungsmessungen und Lüftungssystem zu zeigen, ist zusätzlich die Montage der Ventilatoren und die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage am ZaB zu dokumentieren.

Die strömungsmechanischen Grundlagen zur Dimensionierung von Tunnellüftungsanlagen sowie die Funktionsweisen von Lüftungssystemen sind als Basis für die Strömungsgeschwindigkeitsmessungen ebenfalls zu erörtern.

3 Belüftung von Tunnelbauwerken

3.1 Baulüftung

Sowohl der konventionelle Vortrieb mit seinen einzelnen Arbeitsschritten Bohren, Laden, Sprengen, Schüttern und Sichern sowie der maschinelle Vortrieb erzeugen eine Menge an Gasen und Stäuben, die die Tunnelatmosphäre belasten und die Gesundheit der Beschäftigten gefährden. Bei einer unzureichenden Belüftung steigt die Gefahr von Unfällen und der Ausfall von technischen Anlagen, dadurch vermindert sich die Vortriebsleistung. Wird die Bewetterung bei der Planung der einzelnen Projektphasen nicht ausreichend berücksichtigt, führt dies zu Behinderung und Mehrkosten des Vortriebs, zu erhöhten Sicherheitsrisiken (z.B. im Brandfall) oder zu aufwendigen Neuinstallationen.

Laut SIA 196 [22] hat die Bewetterung neben der Frischluftversorgung die Aufgabe, folgende Schadstoffe zu verdünnen:

- Sprengschwaden
- Dieselabgase
- Staub
- Erdgas
- Radon-Zerfallsprodukte
- Weitere Schadstoffe aus Arbeitsprozessen (z.B. Schwarzbelagsarbeiten)

Die höchstzulässigen, nicht gesundheitsschädlichen Konzentrationen von gas-, dampf- oder staubförmigen Schadstoffen in der Luft sind durch die maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Werte) festgelegt. Die MAK-Werte werden entweder als „Tagesmittelwert“ mit einem Beurteilungszeitraum von acht Stunden pro Tag und einer durchschnittlichen Wochenarbeitszeit von 40 Stunden (42 Stunden in Schichtbetrieben), oder als „Kurzzeitwert“ mit einem Beurteilungszeitraum von 15 Minuten angegeben. Die Kurzzeitwerte dürfen innerhalb von acht Stunden höchstens eine Stunde lang überschritten werden.

In Österreich sind die MAK-Werte in der Grenzwertverordnung (GKV) festgelegt und veröffentlicht. [10] Folgende Werte sind im Untertagebau relevant:

Stoff	Tagesmittelwert		Kurzzeitwert	
	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
Stickstoffmonoxid	25	30	-	-
Stickstoffdioxid	3	6	6	12
Kohlenstoffmonoxid	30	33	60	66
Kohlenstoffdioxid	5000	9000	10000	18000
Schwefeldioxid	0,5	1,3	1	2,7
Formaldehyd	0,3	0,37	0,6	0,74

Tabelle 1: MAK-Werte für Gase der Sprengschwaden und Dieselmotoremissionen [10]

Stoff	Tagesmittelwert		Kurzzeitwert	
	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
Quarz	-	0,15	-	-
Quarzfeinstaub	-	4	-	-

Tabelle 2: MAK-Werte für Staub [10]

Stoff	Tagesmittelwert		Kurzzeitwert	
	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
Methan	10000	-	Explosionsgefahr maßgebend	
Schwefelwasserstoff	5	7	5	7

Tabelle 3: MAK-Werte für Erdgas [10]

Die Einhaltung der Grenzwerte ist durch regelmäßige Messungen zu kontrollieren. Zeigen die Messungen eine Überschreitung, darf der Arbeitsplatz erst wieder betreten werden, wenn durch entsprechende technische Maßnahmen wie z.B. eine verstärkte Bewetterung oder eine Besprühung des Haufwerks mit Wasser zur Staubvermeidung die Werte wieder unterschritten sind. Die Dimensionierung der Bewetterung nach Grenzwerten ist schwierig. Daher gelten laut Bauarbeiterschutzverordnung [4] folgende Vorgaben zur Einhaltung der MAK-Werte:

„Die Bewetterung ist als ausreichend anzusehen, wenn

- die in Brusthöhe gemessene Luftgeschwindigkeit mindestens 0,20 m/s beträgt.
- für jeden Beschäftigten mindestens eine Frischluftmenge von 2 m³/min zugeführt wird.
- für jeden eingesetzten Verbrennungsmotor mindestens eine Frischluftmenge von 4 m³/min pro kW Nennleistung zugeführt wird.“

Die Lüftungsanlage ist so zu dimensionieren, dass der jeweilige maximale Luftbedarf abgedeckt und die Frischluft am Ort der Schadstoffemissionen zu Verfügung gestellt wird.

Die beschriebenen MAK-Werte und Vorgaben sind während aller Bauphasen durch einen natürlichen oder künstlich erzeugten Luftstrom einzuhalten. Dafür kommen je nach Projekt und Bauweise verschiedene Lüftungskonzepte zur Anwendung. Um einen Luftstrom zu erzeugen und an einen bestimmten Ort zu fördern, werden üblicherweise Axialventilatoren und Lutten verwendet. Bei Axialventilatoren als gebräuchlichste Bauform ist die Drehachse des Laufrades parallel zur Strömungsrichtung und die Luft wird durch das Axiallaufrad beschleunigt. Lutten sind Röhren, durch die sowohl Frisch- als auch Abluft transportiert wird. Sie bestehen aus Kunststoff oder Blech, wobei im Tunnelbau meist Kunststofflütten verwendet werden, da diese billiger und leichter zu montieren sind. Lutten werden abhängig von der Größe des Ventilators, die sich wiederum aus dem erforderlichen Volumenstrom ergibt, in verschiedenen Durchmessern von 300 mm bis 3000 mm hergestellt.

Drückende Bewetterung

Bei der drückenden Bewetterung (Abb. 3-1) wird die Frischluft über eine Lutte dem Arbeitsbereich zugeführt. Der Ventilator wird üblicherweise im Portalbereich außerhalb des Tunnels situiert, um sicherzustellen, dass unbelastete Luft angesaugt wird. Lange Lüttenleitungen erfordern zusätzliche zwischengeschaltete Ventilatoren, um ausreichend Leistung und Druck zu erzeugen, sodass die erforderliche Frischluftzufuhr im Arbeitsbereich gegeben ist. Die schadstoffbelastete Luft strömt durch den Hohlraum Richtung Portal und beeinträchtigt dadurch nachgeschaltete Arbeitsbereiche. Dies ist ein Nachteil der drückenden Bewetterung.

Bei Sprengarbeiten ist der Tunnel zu verlassen oder die Mineure halten sich in einen Schwadencontainer auf, bis die Sprengschwaden vorbeigeströmt sind. Um die bei mechanischem Vortrieb, z.B. mit Tunnelbagger, erhöhte Staubbelastung zu minimieren sind als zusätzliche Maßnahmen z.B. Entstauber einzusetzen. Auch beim maschinellen Vortrieb sind die Stäube vor Ort zu fassen und mit Entstaubungsanlagen aus der Tunnelluft abzuscheiden. [22]

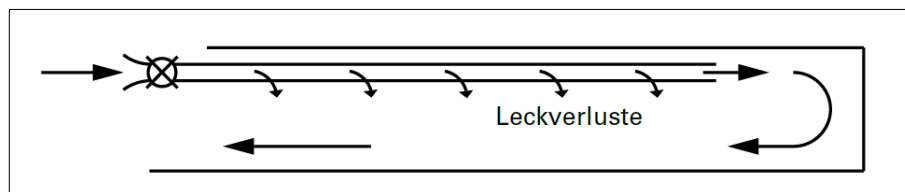


Abb. 3-1: Drückende Bewetterung [22]

Saugende Bewetterung

Bei der saugenden Bewetterung (Abb. 3-2) wird die schadstoffbelastete Luft über eine oder mehrere Lutten von den Arbeitsbereichen abgesaugt und die Frischluft strömt über den Hohlraumquerschnitt zu diesen Arbeitsbereichen. Durch nachgeschaltete Arbeitsbereiche und das langsame Strömen besteht die Möglichkeit, dass die Frischwetter auf dem Weg zur Ortsbrust bereits verschmutzt und erwärmt werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Saugwirkung nur in unmittelbarer Nähe des Luttenendes auftritt. Dadurch treten besonders bei großen Abständen zwischen Ortsbrust und Luttenende Bereiche auf, aus denen die schadstoffbelastete Luft nicht abgesaugt wird. Um ein Aussedimentieren von Staub in den Lutten zu verhindern, ist eine Mindestströmungsgeschwindigkeit im Luttenquerschnitt von 20 m/s erforderlich. Dadurch sind die Lutten aus einem steifen Material, üblicherweise aus Stahl, herzustellen. Kunststofflutten können aufgrund der hohen Geschwindigkeit nicht verwendet werden, da der vorherrschende Druck zu hoch wäre. Zusätzlich dazu ist der Verschleiß der Ventilatoren aufgrund der Staubanteile in der Luft wesentlich höher.

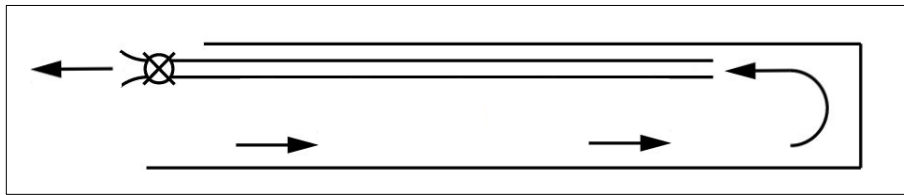


Abb. 3-2: Saugende Bewetterung [22]

Falls notwendig besteht auch die Möglichkeit mit einem umschaltbaren Axialventilator eine umkehrbare Belüftung, die je nach Bedarf drückend oder saugend bewettert, zu installieren. Dieses System kommt allerdings aufgrund der Gefahr des Aussedimentierens von Staub in der Lutte und der Trägheit der Luftsäule im Hohlraumquerschnitt im Tunnelbau selten zur Anwendung und wird eher im Bergbau eingesetzt.

Umluftbewetterung

Bei Projekten mit mehr als einer Tunnelröhre und langen Vortrieben, ist eine Umluftbewetterung (Abb. 3-3) am wirtschaftlichsten. Dabei wird z.B. bei zwei parallel geführten Tunnelröhren die Frischluft über eine Röhre zu- und die Abluft über die andere Röhre abgeführt. Mit Ventilatoren in ausgewählten Querschlägen wird die Strömung von der Frischluftröhre in die Abluftröhre unterstützt. Die Arbeitsbereiche werden mit weiteren Ventilatoren und Lutten drückend bewettert.

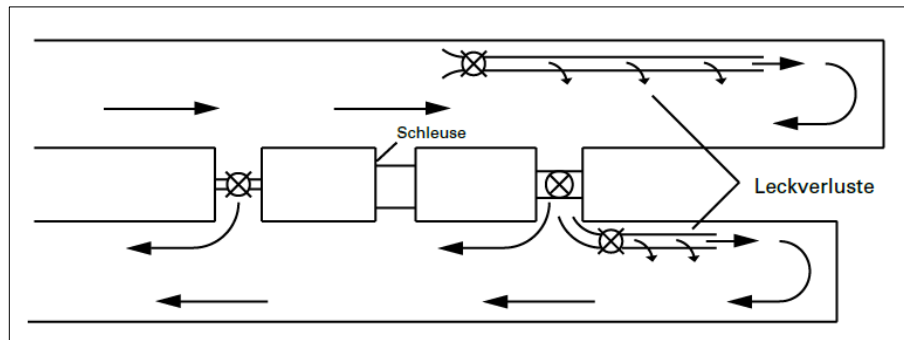


Abb. 3-3: Umluftbewetterung in zwei parallelen Tunnelröhren [22]

Bei Umluftbewetterungen lassen sich große Luftmengen wirtschaftlich verteilen und wieder aus dem Tunnel fördern. Voraussetzung für das Funktionieren von Umluftsystemen ist eine ausreichende Abdichtung der Querschläge, sonst entstehen Verwirbelungen im Luftstrom und die Arbeitsbereiche werden nicht mit ausreichend Frischluft versorgt.

Besonders Lutten werden häufig durch Baumaschinen beschädigt, daher sind regelmäßige Kontrollen durchzuführen. Die Leckverluste werden mit einer erhöhten Frischluftmenge in der Auslegung des Lüftungssystems berücksichtigt. Eine detaillierte Berechnung von Bewetterungssystemen ist in der SIA 196 [22] erörtert.

3.2 Eisenbahntunnel

Durch den elektrischen Antrieb der Triebfahrzeuge und die daraus folgende geringe Schadstofffreisetzung, sowie den ausreichenden Luftaustausch beim Durchfahren der Züge, ist bei Eisenbahntunneln im Betriebsfall keine mechanische Belüftung erforderlich. Die Ausnahme sind die Betriebsräume, meist in Querschlägen situiert, in denen die elektrischen Anlagen untergebracht sind. In diesen Räumen ist für ein geeignetes Luftklima (Temperatur von ca. 20°C und geringe Luftfeuchtigkeit) zu sorgen, um einen zuverlässigen Betrieb der technischen Ausrüstung zu gewährleisten. [5] Die Temperatur in den Tunnelröhren und den Querschlägen ist abhängig von der Gesteins- und Umgebungstemperatur. Sind Gesteins- und Umgebungstemperatur hoch, ist dementsprechend die Temperatur im Tunnel hoch und die Betriebsräume sind mit Klimaanlage auszustatten. Sonst ist eine Belüftung mit Ventilatoren ausreichend. Diese Ergebnisse gehen aus einer Studie am Beispiel des Koralmtunnels hervor, die 2018 bei der „Tunnel Safety and Ventilation“ Konferenz in Graz vorgestellt wurde. [9]

Eine weitere Ausnahme stellt die Belüftung während Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten dar. Für diese Arbeiten werden meist dieselbetriebene Fahrzeuge eingesetzt. Deshalb ist zum Schutz der ArbeitnehmerInnen eine ausreichende

Belüftung sicherzustellen. Die Schadstoffkonzentrationen gemäß Grenzwerteverordnung [10] dürfen nicht überschritten werden.

Für den Brandfall in Eisenbahntunneln sind Anforderungen in der TSI für „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ [26] geregelt. Für Tunnel mit Längen von über 1000 m sind sichere Bereiche zur Evakuierung von Personen aus Zügen vorzusehen. Diese haben eine ausreichende Kapazität aufzuweisen, um alle Reisenden und das Zugpersonal aufzunehmen. Der sichere Raum bietet solange Schutz für die Personen, bis die Evakuierung aus dem Tunnel erfolgt ist. Dazu ist eine mechanische Belüftung notwendig, um den sicheren Bereich vor Verrauchung zu schützen. Zusätzlich sind, abhängig von der Tunnellänge und der eingesetzten Personenfahrzeuge (laut [26] eingeteilt in Kategorie A und B), Brandbekämpfungsstellen vor jedem Portal und innerhalb des Eisenbahntunnels zu errichten, die unter anderem über eine Löschwasserversorgung verfügen. Beispielsweise ist für einen Tunnel mit einer Länge von über 20 km, der mit Personenfahrzeugen der Kategorie B befahren wird, ein maximaler Abstand zwischen den Brandbekämpfungsstellen von 20 km einzuhalten. Dies ergibt sich, weil gemäß [27] für Personenfahrzeuge der Kategorie B eine Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h für einen Zeitraum von 15 Minuten aufrecht zu erhalten ist ($80 \text{ km/h} * 0,25 \text{ h} = 20 \text{ km}$). Um eine Evakuierung in den sicheren Bereich zu gewährleisten, ist die Ausbreitung der Rauchgase entlang der Fluchtwege einzudämmen. Dies wird üblicherweise mit einer unterstützenden mechanischen Belüftung an den Brandbekämpfungsstellen bewerkstelligt.

3.3 Straßentunnel

Durch den motorisierten Verkehr in Straßentunneln werden verbrennungsbedingte Schadstoffe freigesetzt, daher ist auch im Betriebsfall eine entsprechende Belüftung erforderlich. Diese wird mit einem natürlichen oder mechanischen Belüftungssystem ausgeführt. Auch das Risiko von Unfällen und dadurch verursachte Fahrzeugbrände sind in Straßentunnel aufgrund der hohen Unfallrate deutlich größer als in einem Eisenbahntunnel. Daher hat die Sicherstellung der Schutzziele im Brandfall einen besonders hohen Stellenwert. [5]

Abhängig von der Tunnellänge, dem Verkehrsaufkommen und der Verkehrsführung sind Straßentunnel mit einem mechanischem Lüftungssystem auszustatten. Bis zu einer Tunnellänge von 500 m besteht auch die Möglichkeit eine natürliche Lüftung einzurichten. Folgende Vorgaben sind unter anderem laut Straßentunnel-Sicherheitsgesetz [24] einzuhalten:

- „In Tunneln von mehr als 1 000 m Länge, deren Verkehrsaufkommen 2000 Fahrzeuge je Fahrstreifen übersteigt, ist ein mechanisches Lüftungssystem einzubauen.
- In Tunneln mit Gegenverkehr und/oder stockendem Richtungsverkehr dürfen Längslüftungssysteme nur verwendet werden, wenn eine Tunnel-

Risikoanalyse zeigt, dass dies annehmbar ist und/oder spezielle Maßnahmen, beispielsweise angemessene Verkehrssteuerung, kürzere Abstände zwischen den Notausgängen, Rauchabsaugung in regelmäßigen Abständen, getroffen werden.

- Quer- und Halbquerlüftungssysteme sind in Tunneln zu verwenden, in denen ein mechanisches Lüftungssystem erforderlich und eine Längslüftung gemäß vorigem Punkt nicht zulässig ist. Diese Systeme müssen in der Lage sein, den Rauch im Brandfall abzusaugen.
- Sowohl in Gegenverkehrs- als auch Richtungsverkehrstunneln von mehr als 3000m Länge, deren Verkehrsaufkommen 2000 Fahrzeuge je Fahrstreifen übersteigt und die ein Quer- und/oder Halbquerlüftungssystem aufweisen, sind hinsichtlich der Lüftung folgende Mindestmaßnahmen zu treffen:
 - Es sind steuerbare Abluftklappen einzubauen, die getrennt oder in Gruppen betätigt werden können.
 - Die Geschwindigkeit des in Längsrichtung verlaufenden Luftstroms ist ständig zu überwachen und die Steuerung des Lüftungssystems ist entsprechend anzupassen.“

Die im Betrieb durch Kraftfahrzeuge freigesetzten Schadstoffe haben abhängig von ihrer Zusammensetzung giftige, reizbildende oder sichtbehindernde Eigenschaften. Die Lüftungsanlagen haben die Aufgabe ausreichend Frischluft in die Tunnel einzubringen und somit sichere Verhältnisse für die Verkehrsteilnehmer zu schaffen, sowie die Schadstoffe zu verdünnen. Als Kriterium für die Luftqualität in Tunneln werden üblicherweise die CO-Konzentration, die NO_x-Konzentration und die Sichttrübung durch Partikel herangezogen. Die derzeit gültigen Emissionsgrenzwerte der genannten Parameter sind in der europäischen Verordnung Nr. 715/2007/EG [28] festgelegt und zusätzlich auch in nationalen Richtlinien wie der RVS in Österreich, oder der RABT in Deutschland angegeben.

Der notwendige Frischluftbedarf ist von der Tunnellänge, der Verkehrsstärke, der Verkehrszusammensetzung und der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Folgende Formel ist zur Berechnung der erforderlichen Frischluftmenge anwendbar: [17]

$$Q = \frac{G_{tun}}{C_{adm} - C_{amb}} \quad Gl. (3-1)$$

Q...erforderliche Frischluftmenge in m³/s

G_{tun}...Gesamtemissionserzeugungsrate des Schadstoffes entlang des relevanten Tunnels in g/s

C_{adm}...zulässige Konzentration in g/m³

C_{amb}...Schadstoffkonzentration in der Frischluft in g/m³

Um die erforderliche Frischluftmenge bezogen auf die Sichtverhältnisse zu berechnen, wird derselbe formelmäßige Zusammenhang verwendet, allerdings sind die Konzentrationen C durch den Extinktionskoeffizient K zu ersetzen. [17]

$$Q = \frac{G_{\text{tun}}}{K_{\text{adm}} - K_{\text{amb}}} \quad \text{Gl. (3-2)}$$

Q ...erforderliche Frischluftmenge in m^3/s

G_{tun} ...Gesamtemissionserzeugungsrate des Schadstoffes entlang des relevanten Tunnels in m^2/s

K_{adm} ...zulässiges Niveau des Extinktionskoeffizienten in m^{-1}

K_{amb} ...Umgebungslevel des Extinktionskoeffizienten in m^{-1}

Die Ergebnisse dieser Berechnungen dienen als Hilfe zur Auswahl eines geeigneten Lüftungssystems und -konzepts.

In Straßentunneln werden Brände durch Unfälle mit PKWs, LKWs oder Bussen, verursacht. Bei großen Brandkatastrophen sind üblicherweise mehrere Fahrzeuge beteiligt. Dadurch, dass sich in Tunneln der entstehende Rauch im Hohlraum ausbreitet, werden die Sichtverhältnisse stark verschlechtert. Die Brandeinwirkung auf die Konstruktion von Tunneln wird durch spezielle Temperatur-Zeit-Verläufe sogenannte Brandkurven beschrieben. Diese dienen als Grundlage für die Bemessung der Konstruktion und die Auslegung von Flucht- und Rettungsmöglichkeiten im Brandfall.

Die Stärke der Wärme- und Rauchfreisetzung ist besonders vom Brennstoff abhängig und spielt für die Dimensionierung eines Lüftungssystems eine wichtige Rolle. Anhand von unterschiedlichen Realbrandversuchen, wie zum Beispiel denen im Memorial Tunnel in der USA oder im Runehamar Tunnel in Norwegen, wurden verschiedene Brandleistungen getestet. [6] Diese variieren zwischen 2,5 MW und 8,0 MW bei Bränden mit ein bis drei PKW und erreichen Werte von 20,0 MW bis 50,0 MW bei Bränden mit LKW. Die Versuche im Runehamar Tunnel haben gezeigt, dass auch kurzfristige Brandleistungsspitzen von bis zu 200,0 MW möglich sind. Dementsprechend groß sind auch die Rauchgasmengen, die abhängig von den Brandleistungen entstehen. Bei einer Brandleistung von ca. 40 MW werden ungefähr $120 \text{ m}^3/\text{s}$ Rauchgas freigesetzt.

Die Hauptaufgabe der Tunnelbelüftung im Brandfall besteht darin, für betroffene Personen die Temperatur- und Rauchbelastung möglichst gering zu halten, um die Möglichkeit zur Selbst- und Fremdreterung zu gewährleisten. Dafür ist besonders auf die Rauchfreihaltung der Fluchtwege zu achten. Zusätzlich ist die Kontrolle der Rauchausbreitung in der Tunnelröhre durch die Belüftung aufrecht zu erhalten, um gute Sichtverhältnisse und eine möglichst lange Aufenthaltsdauer im Tunnel zu gewährleisten. Dies funktioniert indem die Rauchsichtung erhalten wird, denn

Rauch steigt auf und darunter verbleibt mehr oder weniger saubere, atembare Luft. Eine weitere Möglichkeit ist den Rauch in Richtung eines Portals zu blasen, beziehungsweise durch Abluftklappen im Bereich der Brandstelle abzusaugen. Diese Variante ist bei Tunneln mit Richtungsverkehr zu bevorzugen, bei Gegenverkehr ist die intakte Rauchschiebung die bessere Lösung, weil über beide Portale Fahrzeuge in den Tunnel einfahren und je nach Lüftungssystem nicht immer Abluftklappen zur Absaugung vorhanden sind. Weiters sind durch die Belüftung gute Brandbekämpfungsbedingungen zu ermöglichen und das Schadensausmaß bezüglich des Bauwerks und den Fahrzeugen zu verringern.

3.4 Lüftungssysteme

Um die sicherheitstechnischen Anforderungen in Straßen- und auch Eisenbahntunneln sowohl im Betriebs- als auch im Brandfall zu erfüllen, kommen unterschiedliche Lüftungssysteme zum Einsatz. Die geeignete Wahl ist abhängig von der Tunnellänge, der Längsneigung, dem Verkehrsaufkommen (Verkehrsstärke und Stauhäufigkeit) und der Verkehrsführung (Gegen- oder Richtungsverkehr). Die Entscheidungskriterien zur Wahl des passenden Lüftungssystems ist für Straßentunnel im Allgemeinen in der europäischen Richtlinie 2004/54/EG [18] und in weiterer Folge in den nationalen Richtlinien wie der RABT in Deutschland oder der RVS 09.02.31 [19] in Österreich vorgegeben. Maßgebend für die Entscheidung sind die Wirtschaftlichkeit und die sicherheitstechnische Analyse im Betriebs- und Brandfall. Bei Eisenbahntunneln sind, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, Anforderungen bezüglich des Lüftungssystems im Brandfall in der TSI [26] angegeben. Generell werden die Lüftungssysteme je nach Belüftungsart in natürliche und mechanische Belüftung unterteilt.

Natürliche Lüftung

Bei einer natürlichen Lüftung entsteht die Längsströmung im Tunnel einerseits durch meteorologische Bedingungen wie Winddruck oder barometrische Druckdifferenzen, die durch Höhenunterschiede zwischen den Portalen entstehen, und andererseits durch den Kolbenschub der durchfahrenden Fahrzeuge. Bei kurzen Tunneln bis zu einer Länge von ca. 700 m mit Richtungsverkehr reicht der Schub der Fahrzeuge aus, um den Tunnel ausreichend zu belüften. Bei Gegenverkehr oder Richtungsverkehr mit möglicher Staubildung ist eine natürliche Belüftung meist nicht ausreichend. Aus diesem Grund werden natürliche Lüftungen in Österreich nur bis zu einer Tunnellänge von 500 m ausgebildet. Im Brandfall entweichen die entstehenden Rauchgase über die beiden Portale, oder über das höher gelegene Portal bei Tunnel mit Längsneigung. [5]

Mechanische Lüftung

Bei der mechanischen Lüftung wird die Luftströmung künstlich mittels Ventilatoren unterstützt. Je nach Strömungsrichtung im Tunnel lassen sich die Lüftungssysteme in Längs-, Halbquer- und Vollquerlüftung unterteilen.

Längslüftung

Bei der Längslüftung strömt die frische Luft über ein Portal ein und die verbrauchte Luft über das andere Portal wieder aus. Die Strömung wird durch Strahlventilatoren oder Saccardo-Systeme erzeugt (Abb. 3-4 und Abb. 3-5).

Strahlventilatoren sind eine spezielle Bauform von Axialventilatoren. Bei beiden verläuft die Drehachse des Axiallaufrades parallel zum Luftstrom, allerdings ist bei Strahlventilatoren das Axiallaufrad in der Mitte einer länglichen Röhre montiert. Die Strahlventilatoren sind im Tunnel an der Firste, den Ulmen oder in Lüfternischen montiert. Sie saugen Luft aus dem Tunnelraum an und verdichten, sowie blasen diese in Längsrichtung aus. Die Beschleunigung des Luftstrahls überträgt sich auf die umgebende Tunnelluft und erzeugt so eine Längsströmung der Tunnelluft in Strahlrichtung. Ein kleiner Teil der Strömung geht durch Wandreibung und Impulsübertragungsverlust verloren. Üblicherweise ist die Blasrichtung bei Strahlventilatoren umkehrbar, um z.B. im Brandfall die entstehenden Rauchgase über das näherliegende Portal auszublenden. Bei Platzmangel in der Tunnelröhre werden die Ventilatoren in Ausnahmefällen im Portalbereich angebracht, dabei ist allerdings die Strömung nicht umkehrbar. Deshalb sind in solchen Fällen an beiden Portalen Strahlventilatoren anzuordnen, um bei Bedarf die Längsströmung vom einen oder anderen Portal zu beeinflussen. [5]

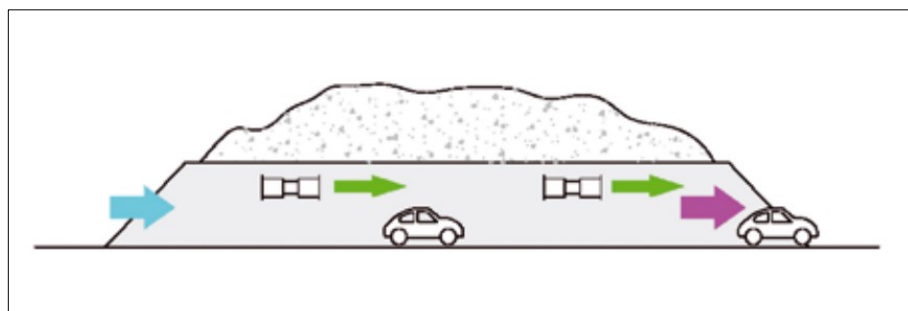


Abb. 3-4: Längslüftung mit Strahlventilatoren [16]

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung einer Längslüftung ist das sogenannte Saccardo-System. Dieses System wurde vom italienischen Ingenieur Marco Saccardo speziell für die Belüftung von Eisenbahntunnel entwickelt und im Jahr 1898 patentiert (UK Patent Nummer 2026). [25] Dabei wird über ein Lüftergebäude, das sich üblicherweise oberhalb eines Portals befindet, Frischluft angesaugt und über eine

Einbringöffnung mit einer erhöhten Geschwindigkeit von ca. 30 m/s in den Verkehrsraum geblasen. Der eingebrachte Impuls überträgt sich auf die Luftsäule im Tunnel und bewirkt eine Längsströmung in Strahlrichtung. Ein Vorteil dieses Systems ist eine geringere erforderliche Höhe des Tunnels, weil keine Ventilatoren direkt im Querschnitt angebracht werden. Zusätzlich ist die Wartung einfacher, da diese von außerhalb des Fahrraumes und ohne Unterbrechung des Verkehrs erfolgt. Aufgrund der zusätzlichen Kosten durch die Errichtung eines Ansaugbauwerkes kommen Saccardo-Systeme meist nur in Spezialfällen wie z.B. bei der Sanierung des Holmesdale Tunnels zum Einsatz. [25]

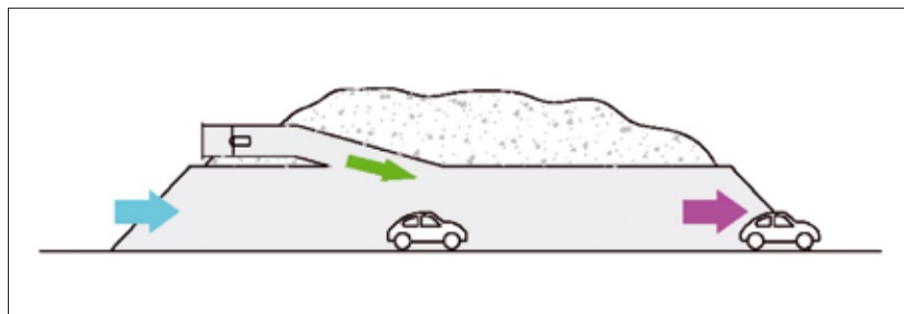


Abb. 3-5: Längslüftung mit Saccardo-System [16]

In Österreich wurde eine Adaption des Saccardo-Systems patentiert, bei der die Frischluft über meist oberhalb des Fahrraumes angeordneten Frischluftkanälen und steuerbare Lamellenklappen zugeführt wird. Durch die verstellbaren Lamellenklappen besteht die Möglichkeit einen Treibstrahl in beide Längsrichtungen zu erzeugen. Diese Form der Längslüftung wird oft beim Umbau des Lüftungssystems im Zuge einer Sanierung, wie z.B. beim Katschbergtunnel, oder Arlbergtunnel angewendet. [5]

Halbquerlüftung

Üblicherweise wird bei einer Halbquerlüftung mit Hilfe von Axialventilatoren Frischluft über Ansaugbauwerke angesaugt und durch einen Zuluftkanal punktuell in den Tunnel eingebracht (Abb. 3-6). Die Öffnungen im Zuluftkanal, der parallel über dem Fahrraum verläuft, werden mit steuerbaren Drosselblechen ausgeführt. Die Abluft strömt über die Tunnelportale aus. Die Drosselbleche sind in regelmäßigen Abständen von ca. 100 m mittig in den Zwischendecken zwischen Zuluftkanal und Verkehrsraum verbaut. Je nach Öffnungswinkel der Bleche ist der Strömungsquerschnitt und der Widerstandsbeiwert einstellbar. Damit wird die erforderliche Frischluftmenge zur Einhaltung der erlaubten Schadstoffkonzentrationen reguliert.

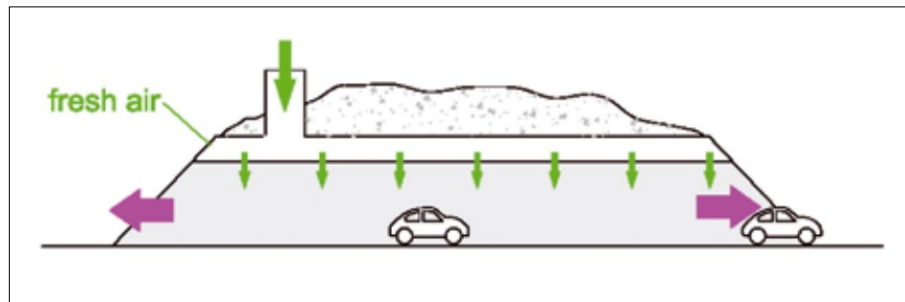


Abb. 3-6: Halbquerlüftung [16]

Der Nachteil dieses Systems ist, dass im Brandfall die Rauchausbreitung nicht kontrollierbar ist. Daher wird die Funktionsweise der Halbquerlüftung oft so ausgeführt, dass die Abluft über einen Abluftkanal abgesaugt und die Frischluft über die Portale einströmt. Bei dieser Variante werden im Falle eines Fahrzeugbrandes die Rauchgase konzentriert über dem Brandherd aus dem Verkehrsraum abgesaugt und dadurch wird die Rauchausbreitung im Tunnel vermieden. Alternativ werden Halbquerlüftungssysteme auch mit umschaltbaren Axialventilatoren ausgeführt. Dadurch wird im Betriebsfall Frischluft über die Lamellenklappen eingebracht und im Brandfall besteht die Möglichkeit, die Rauchgase konzentriert abzusaugen. [16]

Bei Portaldruckdifferenzen, die bei Gebirgstunneln aufgrund der Höhendifferenz zwischen den Portalen häufig auftreten, ist eine zusätzliche Unterstützung der Längsströmung notwendig. Daher wird die Halbquerlüftung oft in Kombination mit einer Längslüftung wie zum Beispiel beim Gleinalmtunnel oder beim Bosrucktunnel ausgeführt. [5]

Vollquerlüftung

Bei der Vollquerlüftung wird wie bei der Halbquerlüftung Frischluft mit Axialventilatoren über Ansaugbauwerke angesaugt und durch einen parallel zum Verkehrsraum laufenden Zuluftkanal punktuell in den Tunnel eingebracht. Zwischen dem Verkehrsraum und dem Zuluftkanal sind in regelmäßigen Abständen entlang der Tunnelachse Öffnungen angeordnet, durch die Frischluft zur Verdünnung der Schadstoffe zugeführt wird. Die Zuluftöffnungen sind mit Drosselblechen versehen. Im Unterschied zur Halbquerlüftung wird über einen parallel zum Zuluftkanal angeordneten Abluftkanal über gleichmäßig verteilte Öffnungen die Abluft abgesaugt. Die Absaugöffnungen sind ebenfalls mit steuerbaren Lamellenklappen versehen. Somit wird eine Strömung im Querschnitt erzeugt (Abb. 3-7). [5]

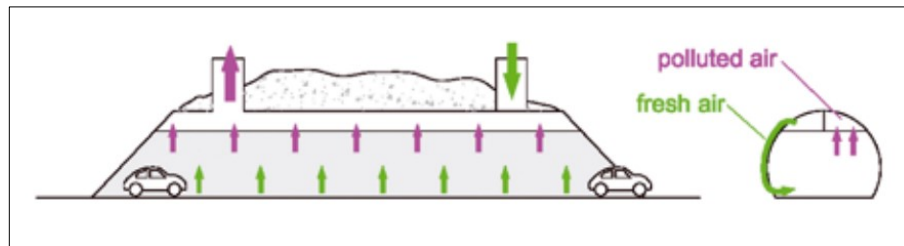


Abb. 3-7: Vollquerlüftung [16]

Im Brandfall werden die Rauchgase gleich wie bei der Halbquerlüftung gezielt über die eingebauten Lamellenklappen abgesaugt, um die Rauchausbreitung im Verkehrsraum zu vermeiden. Vollquerlüftungen werden häufig bei langen Tunneln eingesetzt, wobei durch die nicht ausreichenden maximalen Ventilatorleistungen Druckdifferenzen resultieren. Dadurch ist eine Aufteilung in mehrere Lüftungsabschnitte erforderlich. Die innen liegenden Tunnelabschnitte werden üblicherweise zusätzlich durch Stollen oder Schächte belüftet. [5]

Punktabsaugung

Eine spezielle Variante der Längslüftung ist die Punktabsaugung (Abb. 3-8). Bei diesen Systemen wird die verbrauchte Tunnelluft mit Abluftventilatoren aus dem Verkehrsraum abgesaugt und über Schächte oder Stollen ins Freie geführt. Durch die Absaugung strömt die Frischluft über die Portale nach, wodurch eine Längsströmung im Tunnel erreicht wird. Der Abstand zwischen den Absaugstellen ist von der Tunnellänge, dem Frischluftbedarf und dem Verkehrsaufkommen abhängig. Um die Längsströmung zusätzlich zu verstärken und eine Unter- bzw. Überbelüftung in gewissen Tunnelabschnitten die z.B. durch meteorologische Einflüsse wie Wind entsteht zu vermeiden, werden die Tunnel mit Punktabsaugung im Regelfall zusätzlich mit Strahlventilatoren ausgestattet. [5]

Im Brandfall werden die Rauchgase gezielt über den nächstgelegenen Lüftungsschacht abgesaugt. Aufgrund von thermischen und meteorologischen Einflüssen, wie z.B. Wärmeabgabe der Fahrzeuge und Wind, entsteht möglicherweise in den Tunnelabschnitten vor und nach der Absaugstelle eine gleichgerichtete Längsströmung. In diesem Fall strömen gewisse Rauchgasmengen an der Absaugstelle vorbei. Um dies zu verhindern, ist auch im Brandfall die Steuerung der Längsströmung durch Strahlventilatoren notwendig. [5]

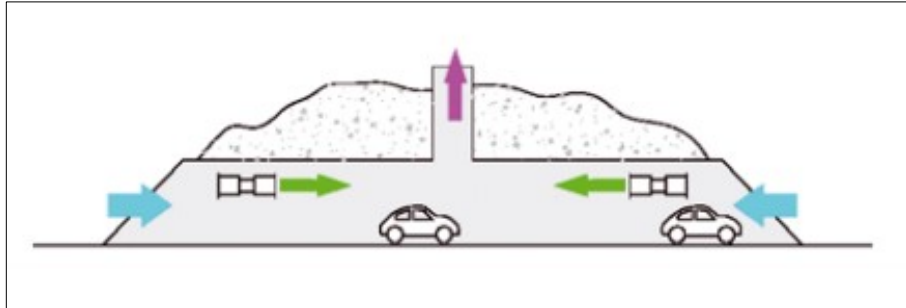


Abb. 3-8: Punktabsaugung [16]

Kombinierte Systeme

Wie bereits bei den einzelnen Lüftungssystemen beschrieben, werden die Straßentunnel aufgrund der hohen Anforderungen an die Lüftungsanlage mit kombinierten Lüftungssystemen ausgestattet. Besonders Halb- und Vollquerlüftungen, aber auch Punktabsaugungen werden oft mit zusätzlichen Strahlventilatoren ausgestattet, um die Längsströmung im Tunnel zu unterstützen. [5]

4 Theoretische Grundlagen der Strömungsmechanik

4.1 Allgemeines

Um das physikalische Verhalten von Fluiden wie z.B. Luft mathematisch zu beschreiben, werden Gleichungen der Strömungsmechanik angewandt. Die Basis dafür sind die erhaltenden Grundgleichungen von Kontinuität, Impuls und Energie. Diese beruhen auf folgenden Axiomen [20]:

- Masseerhaltung: Masse wird weder erzeugt noch vernichtet.
- Impulserhaltung: Die zeitliche Änderung des Impulses eines Körpers ist gleich der Summe der auf diesen Körper wirkenden Kräfte. [20]
- Energieerhaltung: Energie bleibt erhalten und kann weder erzeugt noch vernichtet werden.

Diese Erhaltungssätze sind die Grundlage um die Luftströmung in Tunneln mathematisch zu beschreiben und dadurch die Lüftungssysteme in längs- und quergelüfteten Tunneln mit eindimensionalen stationären Berechnungsmethoden, das heißt nur in eine Koordinatenrichtung und ohne zeitliche Änderung, zu dimensionieren. Die eindimensionale Berechnung ist aufgrund der relativ zum Durchmesser großen Länge bei Tunneln möglich.

4.2 Bernoulli-Gleichung

Die Bernoulli-Gleichung ist eine Bilanzgleichung für die mechanische Energie und besagt, dass die Energie für stationäre Strömungen und reibungsfreie Fluide entlang einer Stromlinie konstant ist. Die Bernoulli-Gleichung ist zwischen zwei Punkten einer Stromlinie wie folgt definiert [20]:

$$\frac{c_1^2}{2} + gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{c_2^2}{2} + gz_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad \text{Gl. (4-1)}$$

c ...Geschwindigkeit in m/s
 g ...Erdbeschleunigung in m/s²
 z ...Höhe in m
 p ...Druck in Pa
 ρ ...Dichte in kg/m³

Die drei Terme auf den beiden Seiten der Gleichung stehen für die kinetische-, die potentielle- und die Druckenergie in den Bilanzierungspunkten 1 und 2.

Da bei Strömungen von Fluiden mechanische Energie durch Dissipation verloren geht (Druckverluste durch Reibung) oder mechanische Energie von außen zugeführt wird, wird dies in der Bernoulli-Gleichung berücksichtigt. Dafür wird die Gl. 4-1 formal mit den Termen $\Delta p_v/\rho$ für Druckverluste auf der rechten Seite und $\Delta p/\rho$ für zugeführten Druck auf der linken Seite ergänzt. Somit ergibt sich die sogenannte erweiterte Bernoulli-Gleichung für stationäre Strömungen zwischen zwei Punkten einer Stromlinie wie folgt [20]:

$$\frac{c_1^2}{2} + gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{\Delta p}{\rho} = \frac{c_2^2}{2} + gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{\Delta p_v}{\rho} \quad \text{Gl. (4-2)}$$

Die Bernoulli-Gleichung wird unter anderem zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit bei Messungen mittels Staudruckrohr oder Prandtlsonde (Abschnitt 6.2 und 7.2) angewendet.

4.3 Druckverluste bei Rohrströmungen

Kreisförmiger Querschnitt

Die Druckverluste sind unter anderem von der Geometrie des Strömungsraumes und von Einbauten abhängig. Bei Rohrströmungen nehmen sie mit der durchströmten Länge proportional zu, da sie durch Reibung hervorgerufen werden.

Wird ein gerades Rohrstück mit der Länge L und dem Durchmesser D von einem Fluid mit der Geschwindigkeit c durchströmt, ist der Druckverlust folgendermaßen definiert [20]:

$$\frac{\Delta p_v}{\rho} = \lambda \frac{L}{D} \frac{c^2}{2} \quad \text{Gl. (4-3)}$$

Δp_v ...Druckverlust in Pa

ρ ...Dichte in kg/m^3

λ ...Rohrreibungszahl

L ...Länge in m

D ...Durchmesser in m

c ...Geschwindigkeit in m/s

Die dimensionslose Rohrreibungszahl λ ist eine Funktion der Reynoldszahl Re und der relativen Wandrauigkeit. Die Reynoldszahl beschreibt den Strömungszustand, also

ob eine Strömung laminar oder turbulent ist. Bei einer laminaren Strömung treten keine Turbulenzen auf, das Fluid strömt in nicht vermischten Schichten. Bei einer turbulenten Strömung wird die Bewegung des Fluids durch unregelmäßige Schwankungsbewegungen überlagert, die zu einer Durchmischung der Strömung führt. Für turbulente Strömungen ist die Rohrreibungszahl nur durch Messungen ermittelbar. Für laminare Strömungen und ohne Einfluss der Wandrauigkeit lässt sich die Rohrreibungszahl wie folgt berechnen [20]:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad \text{Gl. (4-4)}$$

λ ...Rohrreibungszahl

Re...Reynoldszahl

Um den Einfluss der relativen Rauigkeit zu berücksichtigen, wurden diverse empirische Formeln entwickelt. Werte für die Rohrreibungszahl sind in der einschlägigen Fachliteratur (z.B. [12]) zu finden.

Nicht-kreisförmiger Querschnitt

Die, im Vergleich zum kreisförmigen Querschnitt, nicht vorhandene Größe ist der Durchmesser D , der bei nicht-kreisförmigen Querschnitten über die Fläche A und den Umfang U angenähert wird. Da bei Rohren die Beziehung $A/U=D/4$ gilt, wird für den nicht-kreisförmigen Querschnitt der hydraulische Durchmesser D_{hydr} definiert [20]:

$$D_{hydr} = \frac{4A}{U} \quad \text{Gl. (4-5)}$$

D_{hydr} ...hydraulischer Durchmesser in m

A ...Querschnittsfläche in m^2

U ...Umfang in m

Die Berechnung des Druckverlustes (Gl. (4-3)) gilt näherungsweise auch für Rohre mit nicht-kreisförmigen Querschnitten, wenn der Rohrdurchmesser durch den hydraulischen Durchmesser ersetzt wird. Je ähnlicher der Querschnitt einem Kreis entspricht, umso genauer ist diese Näherung.

Einbauten

Durch Einbauten in einem Rohrstück wird der Verlauf der Rohrströmung gestört und ein zusätzlicher Widerstand oder Druckverlust entsteht. Zu den Einbauten zählen zum einen Hindernisse im Rohr wie z.B. Messeinrichtungen, aber auch Querschnittsänderungen wie Düsen oder Diffusoren und Umlenkungen wie Krümmer. Im Gegensatz zu Druckverlusten durch Reibung nimmt bei Einbauten der

Druckverlust nicht proportional mit der Länge zu, sondern tritt nur im Bereich der Einbauten auf. Unabhängig von der Art des Einbaus und vom Strömungsverlauf in der Nähe der Einbaustelle gilt für den Druckverlust folgende Beziehung [20]:

$$\frac{\Delta p_v}{\rho} = \zeta \frac{c^2}{2} \quad \text{Gl. (4-6)}$$

Δp_v ...Druckverlust in Pa
 ρ ...Dichte in kg/m³
 ζ ...Druckverlustzahl
 c ...Geschwindigkeit in m/s

Der dimensionslose Koeffizient ζ in Abhängigkeit der Geometrie des Strömungsraumes wurde für die praktisch wichtigen Einbauten experimentell ermittelt. Eine ausführliche Beschreibung zur Ermittlung und eine Zusammenstellung von Werten ist unter anderem in [8] angeführt.

Tunnelbauwerke

Die Druckverluste aufgrund von Wandreibung werden mit Gl. 4-3 ermittelt, wobei der hydraulische Durchmesser des Tunnels gemäß Gl. 4-5 in die Gleichung eingesetzt wird. „Der Einfluss der Reynoldszahl auf die Rohrreibungszahl λ ist bei typischen Tunneldurchmessern und den entsprechenden Strömungsgeschwindigkeiten vernachlässigbar“. [12] Bei zweistreifigen Straßentunneln mit Richtungs- oder Gegenverkehr, mit betonierter Tunnellaubung, sowie Einbauten wie Beleuchtungskörper und Verkehrszeichen wird die Rohrreibungszahl λ mit 0,015 angenommen. [3]

Zusätzlich zu den Wandreibungsverlusten entsteht ein Druckabfall beim Einströmen der Luft in den Tunnel. Er wird durch die Beschleunigung der ruhenden Außenluft und durch die Eintrittsverluste am Portal verursacht. Abgeleitet von Gl. 4-6 wird er durch folgende Beziehung beschrieben [12]:

$$\frac{\Delta p_v}{\rho_t} = -(1 + \zeta) \frac{c_t^2}{2} \quad \text{Gl. (4-7)}$$

Δp_v ...Druckverlust in Pa
 ρ_t ...Luftdichte in kg/m³
 ζ ...Druckverlustzahl
 c_t ...Geschwindigkeit in m/s

Der Index t steht für den Tunnel (bzw. Verkehrsraum). Die Druckverlustzahl ζ wird für scharfkantige Portale mit 0,6 angenommen. [3]

Die Gleichungen der Druckverluste werden sowohl bei der mathematischen Beschreibung der Tunnelströmung, als auch bei der Dimensionierung von Lutten und Ventilatoren angewandt.

4.4 Aerodynamik der Tunnelströmung

Die Längsgeschwindigkeit im Tunnel wird einerseits durch die Druckverluste (Abschnitt 4.3) und andererseits durch Verkehrs-, meteorologische und thermische Einflüsse beeinflusst. Jedes durch den Tunnel fahrende Fahrzeug hat aufgrund des Fahrtwiderstandes eine Wirkung auf die Tunnelströmung. Durch diese Kolbenwirkung wird ein Druckabfall zwischen dem Tunnelquerschnitt vor und hinter dem Fahrzeug verursacht. Die Druckwirkung der Fahrzeuge wird über die Widerstandsfläche C_{Fz} (Produkt aus Widerstandsbeiwert ζ_{Fz} und Fahrzeugstirnfläche A_{Fz}) und die Geschwindigkeit c_{Fz} (positiv, wenn die Fahrtrichtung gleich der Strömungsrichtung ist) berechnet. Die Widerstandsfläche C_{Fz} ist abhängig von der durch die Fahrzeuge versperrte Fläche im Tunnelquerschnitt, dem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und dem Fahrzeug selbst. Grundsätzlich werden bei der Dimensionierung von Lüftungsanlagen mittlere Widerstandsflächen für PKWs und LKWs verwendet. Laut [3] beträgt die mittlere Widerstandsfläche für PKWs $0,9 \text{ m}^2$ und für LKWs $5,2 \text{ m}^2$.

Meteorologische Einflüsse wie barometrische Druckdifferenzen und Windeinflüsse führen in den Tunneln zu Druckunterschieden. Vor allem bei großen Gebirgsketten, die Gebiete mit unterschiedlichem Wetter trennen, treten hohe Differenzen auf. Auch Winddrücke, die auf die Portale wirken, spielen eine Rolle. Dieser erreicht bei einer Windgeschwindigkeit c_w maximal den Wert des Staudruckes. Die barometrischen Drücke (bezogen auf gleiche Höhe) an den beiden Portalen und die entsprechenden Windverhältnisse werden durch meteorologische Langzeitmessungen ermittelt.

Aufgrund von thermischen Einflüssen wie der Wärmeabgabe der Fahrzeuge, geothermischen Effekten und der Wärmeabgabe der Beleuchtung ist die Temperatur im Verkehrsraum nicht gleich der Umgebungstemperatur der Außenluft. Der Temperaturunterschied und die Wärmezufuhr in den Verkehrsraum sind im Voraus sehr schwer zu bestimmen, deswegen werden in der Praxis Erfahrungswerte herangezogen. Laut RVS 09.02.31 [19] wird beispielsweise eine Temperaturerhöhung im Tunnel von 10°C gegenüber der Außentemperatur angegeben. Bei Tunneln mit Längsneigung entsteht durch den Temperaturunterschied zwischen Außen- und Tunnelluft ein Auf- oder Abtrieb. Ein positiver Druckunterschied ergibt einen thermischen Auftrieb und ein negativer einen thermischen Abtrieb. Die Berechnung der einzelnen Einflüsse ist in [5] im Detail beschrieben.

Durch Anwendung der Druckverluste und der beschriebenen Einflüsse, wird die Druckgleichung für natürliche Längslüftungen wie folgt zusammengefasst [5]:

$$(1 + \zeta + \lambda \frac{L_t}{D_t}) \frac{\rho_t}{2} c_t^2 = \Delta p_{Fz} + \Delta p_{Met} + \Delta p_a \quad \text{Gl. (4-8)}$$

ζ ...Druckverlustzahl

λ ...Rohrreibungszahl

L ...Länge in m

D ...Durchmesser in m

ρ ...Luftdichte in kg/m³

c ...Geschwindigkeit in m/s

Δp_{Fz} ...Druckwirkung der Fahrzeuge in Pa

Δp_{Met} ...Meteorologische Druckänderung in Pa

Δp_a ...Thermische Druckänderung in Pa

Der Index t steht für den Tunnel (bzw. Verkehrsraum). Die linke Seite der Gleichung beschreibt die Strömungsverluste aufgrund von Wandreibung und Druckverlust am einströmenden Portal und der rechte Teil enthält die Druckänderungen die durch Verkehr, meteorologische und thermische Einflüsse auftreten.

4.5 Aerodynamik einer Lutte

Die Lüftungssysteme im Baubetrieb haben die Aufgabe in allen Bauphasen die Schadstoffe zu verdünnen, die Mindestströmungsgeschwindigkeit von 0,20 m/s in allen Bereichen des Tunnels zu gewährleisten und die arbeitenden Personen mit Frischluft zu versorgen. Zusätzlich dazu sind Druck- und Leckverluste in den mit dem Baufortschritt länger werdenden Luttenleitungen in der Dimensionierung zu berücksichtigen. Daraus ergibt sich ein Mindestvolumenstrom und ein Gesamtdruck, der von Ventilatoren aufzubringen ist.

Der Druckverlust durch Reibung in einer Lutte wird gemäß Gl. 4-3 und die Einzelverluste durch Eintritt, Krümmung, etc. werden durch Gl. 4-6 beschrieben. Der dynamische Druckverlust am Austritt der Lutte ist wie folgt definiert [22]:

$$\Delta p_{dyn} = \frac{\rho}{2} c^2 \quad \text{Gl. (4-9)}$$

Δp_{dyn} ...dynamischer Druckverlust in Pa

ρ ...Luftdichte in kg/m³

c ...Strömungsgeschwindigkeit in m/s

Lutten haben an den Stoßstellen der einzelnen Elemente und sehr oft durch Beschädigungen immer undichte Stellen. Diese werden über die ganze Abschnittslänge gleichmäßig verteilt angenommen und in der Berechnung von Lutten berücksichtigt. Die Leckverluste sind proportional einer Leckfläche f^* und der Strömungsgeschwindigkeit c durch die undichten Stellen und beeinflussen den statischen, sowie dynamischen Druck in der Lutte. Die Werte für die Leckflächen f^* und die Rohrreibungszahlen λ , die ebenfalls bei der Berechnung des statischen Drucks berücksichtigt wird, sind in [22] je nach Luttenzustand und Wartung klassifiziert:

- S-Lutte: Neue, oder sehr gut erhaltene Lutte mit Einheitslängen > 100 m und wenig Kupplungen (sehr kleine Undichtigkeits- und Reibungsverluste)
- A-Lutte: Neue, oder gut erhaltene und mit kleinem Beschädigungsrisiko eingebaute Lutte (kleine Undichtigkeits- und Reibungsverluste)
- B-Lutte: Seit einiger Zeit in Betrieb stehende oder mehrfach eingesetzte, regelmäßig gewartete Lutte (mittlere Undichtigkeits- und Reibungsverluste)

Abhängig von den Luttenklassen sind folgende Werte für die Leckfläche und die Rohrreibungszahl angegeben:

Luttenklasse	Rohrreibungszahl λ	Leckfläche f^*
S-Lutte	0,015	5 mm ² /m ²
A-Lutte	0,018	10 mm ² /m ²
B-Lutte	0,024	20 mm ² /m ²

Tabelle 4: Werte der Luttenklassen S,A,B [22]

Der erforderliche statische Druck p_1 am Luttenanfang lässt sich mit Hilfe von Diagrammen anhand der Länge L , des Durchmessers D und des statischen Drucks am Luttenende p_0 bestimmen. Die Diagramme variieren je nach Luttenklasse und sind in [22] veröffentlicht.

Der Gesamtdruckverlust, der vom Ventilator aufzubringen ist, ergibt sich aus der Summe des statischen Druckes, des dynamischen Druckes und der Summe der Einzeldruckverluste [22]:

$$p_{vent} = p_1 + \frac{\rho}{2} c^2 + \sum \zeta \frac{\rho}{2} c^2 \quad \text{Gl. (4-10)}$$

- P_{vent} ...Gesamtdruck in Pa
- p_1 ...statischer Druck in Pa
- ρ ...Luftdichte in kg/m³
- c ...Strömungsgeschwindigkeit in m/s
- ζ ...Druckverlustzahl

Die Druckverlustzahl ζ ist abhängig von der geometrischen Form der Bauteile, wie z.B. Schutzgitter oder Krümmer, die zu Einzeldruckverlusten führen. Entsprechende Werte sind in [22] angegeben. Für die Ventilatorleistung ist immer der Gesamtdruck maßgebend. Auf Grundlage des erforderlichen Luftbedarfs ergibt sich der zu fördernde Volumenstrom \dot{V}_{erf} der Ventilatoren aus der Anzahl an Personen im Arbeitsbereich und der Leistung der dieselbetriebenen Fahrzeuge. Zusätzlich dazu ist ein prozentualer Luftverlust $\Delta\dot{V}$ pro 100 m Luttenlänge abhängig von der Luttenklasse zu berücksichtigen [22]:

$$\dot{V} = \dot{V}_{erf} \left(1 + \Delta\dot{V} \frac{L}{100} \right) \quad \text{Gl. (4-11)}$$

\dot{V} ...Volumenstrom (m³/s)

L ...Luttenlänge (m)

Für die Luttenklasse B wird ein Luftverlust von 2 % und für die Luttenklasse A ein Luftverlust von 1 % angenommen. [22]

Die Berechnung von Umluftsystemen, bei denen die Frischluft zum Großteil über den gesamten Querschnitt eingebracht wird, erfolgt wie bei Tunneln im Betrieb. Die Mengenverluste, die in Lutten auftreten, entfallen und der Druckverlust durch Wandreibung wird mit dem hydraulischen Durchmesser (Gl. 4-3) ermittelt. Die zur Bewetterung der Tunnelröhren am Semmering-Basistunnel, Baulos Gloggnitz (Abschnitt 7.3) eingesetzten Ventilatoren und Lutten wurden anhand dieser Formeln berechnet.

5 Inbetriebnahme der Lüftungsanlage am Zentrum am Berg

5.1 Allgemeines

Das Zentrum am Berg (ZaB) ist ein von der Montanuniversität Leoben geführtes Tunnelforschungszentrum am steirischen Erzberg. Die Anlage besteht aus mehreren Untertagebauwerken, unter anderem aus den parallel geführten Straßentunnel-Nord (ST-N) und Straßentunnel-Süd (ST-S), den nebeneinander angeordneten Eisenbahntunnel-West (EBT-W) und Eisenbahntunnel-Ost (EBT-O) und einem bestehenden Versuchstollen, dem sogenannten Presserstollen. Die einzelnen Tunnelröhren mit ihren Torabschlüssen sind im Grundriss in Abb. 5-1 dargestellt. Die unterschiedlichen Typenbezeichnungen der Tore spielen für die Belüftung keine Rolle, da sie sich nur in ihren Abmaßen unterscheiden.

Der Eisenbahntunnel-West ist mit beiden Röhren des Straßentunnels verbunden. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, Belüftungstests oder andere Versuche mit zwei oder drei offenen Portalen durchzuführen. Der Eisenbahntunnel-Ost ist 180 m lang und ist nur über einen Querschlag mit dem Eisenbahntunnel-West verbunden. Der Presserstollen ist jeweils über Verbindungstunnel mit den beiden Straßentunneln und über einen Querschlag mit den Eisenbahntunneln verbunden.

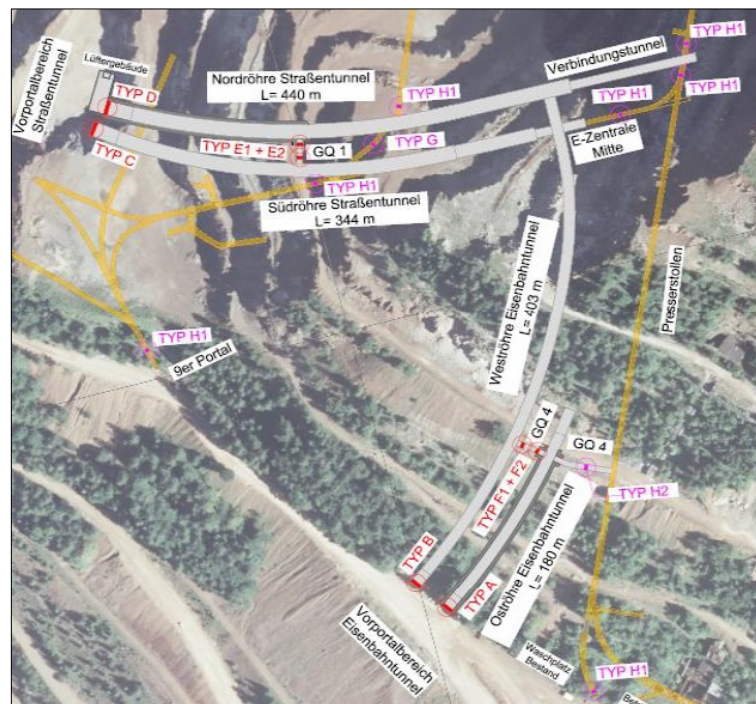


Abb. 5-1: Übersichtslageplan ZaB [15]

Aufgrund der Tatsache, dass das ZaB eine Forschungseinrichtung ist, wurden in den Tunnelröhren verschiedene Lüftungssysteme installiert um die unterschiedlichen Belüftungsmöglichkeiten in Versuchen anzuwenden.

Der Straßentunnel-Nord wird sowohl mit einer Längslüftung als auch mit einer Halbquerlüftung belüftet. Am Portal befindet sich ein Lüftergebäude mit zwei Axialventilatoren, die die Abluft über einen Abluftkanal der über dem Verkehrsraum liegt, absaugen. Die Absaugung erfolgt über drei Abluftklappen, die in regelmäßigen Abständen vom Portal bis Tunnelmeter 150,0 (TM 150,0) angeordnet sind. Die Halbquerlüftung kommt besonders bei Brandversuchen zum Einsatz, um die Rauchgase konzentriert über die Abluftklappen abzusaugen. Zusätzlich dazu sind im Straßentunnel-Nord bei TM 211,6 zwei parallel angeordnete Strahlventilatoren verbaut. Somit besteht die Möglichkeit über die Verbindung mit dem Eisenbahntunnel-West, oder dem Straßentunnel-Süd eine Längslüftung auszubilden, beziehungsweise die Axialventilatoren der Halbquerlüftung zu unterstützen. Bei geschlossenen Straßentunnelportalen und aktiven Axialventilatoren im Straßentunnel-Nord ist auch eine Längslüftung über den Eisenbahntunnel-West möglich.

Im Straßentunnel-Süd ist derzeit nur ein Strahlventilator bei TM 62,0 eingebaut. Zusätzlich dazu sind noch zwei parallele Strahlventilatoren bei TM 261,5 und ein weiterer Strahlventilator bei TM 62,0 vorgesehen. Somit wird der Straßentunnel-Süd ausschließlich mittels Längslüftung über die Verbindung zum Straßentunnel-Nord oder zum Eisenbahntunnel-West bewettert.

Der Eisenbahntunnel-West ist mit zwei parallelen Strahlventilatoren bei TM 50,3 ausgestattet. Bei TM 170,0 und TM 352,4 sind weitere Einbaustellen für jeweils zwei Strahlventilatoren vorgesehen. Alle eingebauten Strahlventilatoren haben eine umkehrbare Blasrichtung. Somit ist die Strömungsrichtung vom Portal Eisenbahntunnel in Richtung Portale der Straßentunnel oder umgekehrt möglich.

Der Eisenbahntunnel-Ost ist mit einen Strahlventilator bei TM 106,3 ausgerüstet. Je nach eingestellter Blasrichtung des Strahlventilators wird die einströmende Luft vom Portal in Richtung Tunnelendwand beschleunigt, kehrt dort um und strömt im Querschnitt wieder Richtung Portal. Oder die Abluft wird Richtung Portal beschleunigt und die Frischluft strömt im Querschnitt Richtung Tunnelendwand. Diese beiden Varianten sind ähnlich der drückenden und saugenden Belüftung im Baubetrieb, weil dort die Bewetterungen nach dem gleichen Prinzip funktionieren. Eine Übersicht der gesamten Lüftungsanlage des ZaB ist in Abb. 5-2 dargestellt.

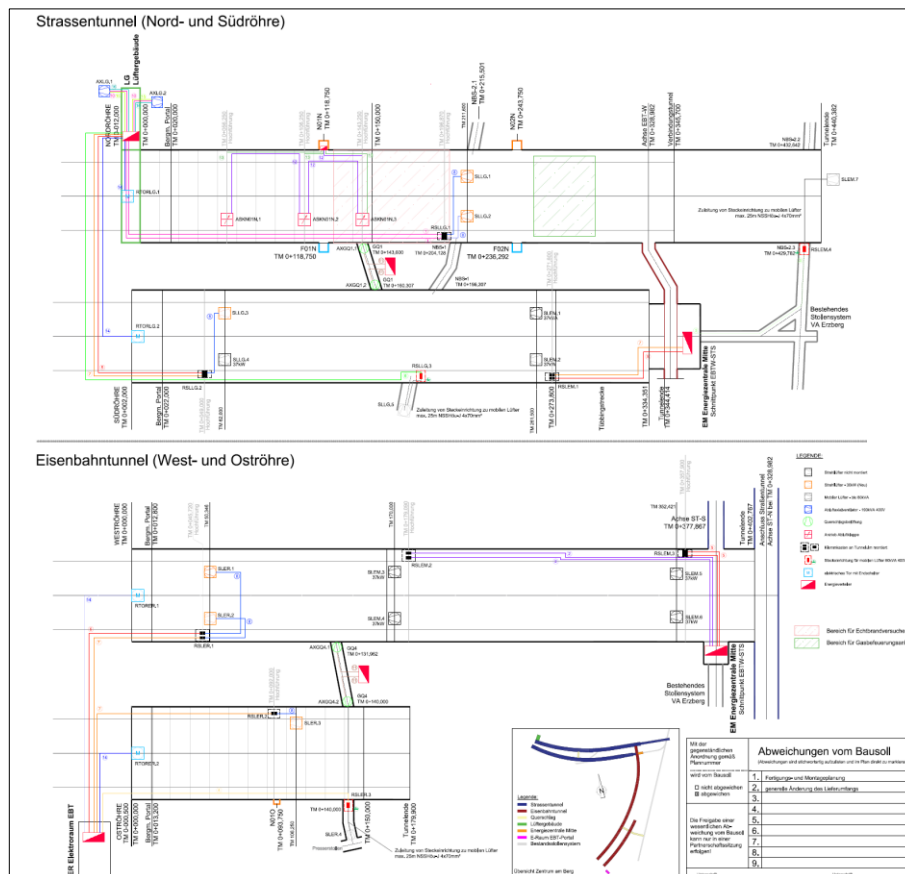


Abb. 5-2: Übersichtsplan Lüftungsanlage ZaB [7]

5.2 Montage und Installation der Ventilatoren

Die Installation und Inbetriebnahme der Lüftungsanlage am ZaB erfolgte im Mai und Juni 2020 von der Dürr Austria GmbH. Dabei wurden Ventilatoren eingebaut, elektrisch angeschlossen und die Steuerung am Leitstand des ZaB installiert. Im Zuge der Inbetriebnahme wurden zunächst im Straßentunnel-Süd bei TM 62,0 und im Eisenbahntunnel-West bei TM 50,3 drei neue Strahlventilatoren montiert. Am ZaB sind derzeit insgesamt sechs Strahlventilatoren des Typs A-T5NR8"JT5/1120/GR/6 der Firma Witt & Sohn eingebaut. Die Ventilatoren sind mit Schalldämpfern an beiden Enden (Länge 1 m, Gewicht 163 kg) ausgeführt. Einige technische Daten gemäß Datenblatt Witt & Sohn sind in der nachstehenden Tabelle 5 zusammengefasst.

technische Daten	Einheit	vorwärts	rückwärts
Stand Schub T	N	1200	1100
Ausblasgeschw. u	m/s	33,4	31,8
Volumenstrom \dot{V}	m ³ /s	32,9	31,4
Motorleistung P	kW	30,0	30,0
Drehzahl n	1/min	1470	1470
Durchmesser d	mm	1000	
Ventilator Masse m	kg	673	

Tabelle 5: Technische Daten der Strahlventilatoren [30]

Als erster Schritt der Montage wurden Schablonen mit den vorgegebenen Bohrlochabständen angefertigt und diese direkt an der Spritzbetonschale befestigt. Darauf folgend wurden Bohrlöcher für Gewindestangen (Durchmesser 100 mm) in der Tunnelfirste angezeichnet. Danach wurden die Löcher (Durchmesser 140 mm) händisch mit einem Bohrhammer gebohrt. Um das Bohrklein zu entfernen, wurden die Bohrlöcher zwei Mal ausgeblasen und mit einer Bürste gereinigt. Anschließend wurde das Bohrloch mit Injektionsmörtel auf Zementbasis (Hilti-HIT-HY 200-A) verfüllt. Dann wurden die Gewindestangen (Länge ca. 50 cm) in das Bohrloch eingebracht und der Injektionsmörtel ca. 45 Minuten ausgehärtet. Pro Ventilator wurden 4 Gewindestangen für die Montage der U-Profil Träger (Abb. 5-3) verbaut. Nach dem Aushärten wurden die U-Profil Träger (2 pro Ventilator) als Halterung für die Ventilatoren an den Gewindestangen mit Muttern angeschraubt. Die Höhe der U-Profil Träger zueinander wurde mittels Wasserwaage eingerichtet.



Abb. 5-3: U-Profil Träger

Die Montage der Ventilatoren wurde mit Hilfe eines Staplers durch Anheben und exakter Positionierung zwischen den U-Profil Trägern durchgeführt (Abb. 5-4). Pro U-Profil wurde jeder Ventilator zwei Mal verschraubt. Zusätzlich dazu wurden die Ventilatoren mit zwei Schienen, die im 45° Winkel zum Ventilator an der Spritzbetonschale angeschraubt wurden, an der Tunnelfirste befestigt. Damit war die Montage der beiden Ventilatoren im EBT-W abgeschlossen (Abb. 5-5).



Abb. 5-4: Anheben eines Ventilators mittels Stapler



Abb. 5-5: Strahlventilatoren im EBT-W

In weiterer Folge wurden die elektrotechnischen Anschlüsse installiert und die Inbetriebnahme der Steuerung der Ventilatoren nach folgenden Punkten durchgeführt:

- Alle elektrischen Anschlüsse der Ventilatoren wurden im Schaltkasten auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft.
- Danach wurden die Ventilatoren eingeschaltet und kontrolliert, ob die angezeigte Strömungsrichtung mit der tatsächlichen übereinstimmt. Die Überprüfung erfolgte mit den bereits eingebauten Geräten zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit. Derselbe Vorgang wurde auch mit der umgekehrten Strömungsrichtung durchgeführt.
- Stimmen die Strömungsrichtungen nicht überein, sind alle elektrischen Anschlüsse erneut zu kontrollieren und gegebenenfalls umzuschließen.
- Als letztes wurde überprüft, ob die Schaltknöpfe zur Steuerung direkt am Schaltkasten (Abb. 5-6) den vorgegebenen Befehl ausführen. Dabei wurden z.B. die Ventilatoren über die Schaltknöpfe eingeschaltet und im Tunnel kontrolliert, ob sie tatsächlich aktiv sind.



Abb. 5-6: Steuerknöpfe am Schaltkasten

Die Steuerung im Betrieb erfolgt entweder über den Computer im Leitstand des ZaB, oder direkt an den Schaltkästen, die sich in einem Container neben dem Bürogebäude befinden.

Im Lüftergebäude beim Portal Straßentunnel-Nord wurden zwei Axialventilatoren zur Absaugung der Luft über einen Abluftkanal eingebaut. Die beiden Ventilatoren, Type 250HN-3HM der Firma Zitron Nederland BV, Baujahr 1982 wurden gebraucht übernommen. Die technischen Daten der baugleichen Ventilatoren sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

technische Daten	Einheit	Zuluft	Abluft
Volumenstrom \dot{V}	m^3/s	90/150	105
elektrische Leistungsaufnahme P	kW	40/190	190
Drehzahl n	1/min	371/744	744

Tabelle 6: Technische Daten Axialventilatoren [31]

Im Zuluftbetrieb sind zwei Konfigurationen einstellbar. Die erste mit 40 kW elektrischer Leistungsaufnahme, liefert bei einer Drehzahl von 371 1/min einen maximalen Volumenstrom von 90 m³/s und die zweite mit 190 kW elektrischer Leistungsaufnahme und 744 1/min produziert einen maximalen Volumenstrom von 150 m³/s. Im Abluftbetrieb ist nur die zweite Konfiguration einstellbar. Die Ursache darin liegt in der nicht symmetrischen Bauweise, deshalb ist auch der maximale Volumenstrom im Abluftbetrieb geringer. Am ZaB wurden die Ventilatoren so eingebaut, dass die Absaugung der Luft im Zuluftbetrieb stattfindet.

Die Lage der Axialventilatoren 1 und 2, sowie die drei Abluftklappen sind in Abb. 5-7 schematisch dargestellt, der Abluftkanal verläuft im ST-N bis TM 150,0.

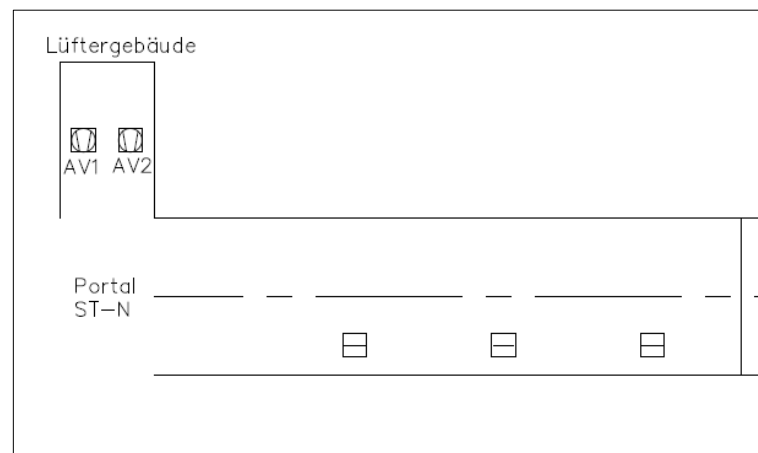


Abb. 5-7: Lage der Axialventilatoren und Abluftklappen



Abb. 5-8: Axialventilator 2

Zunächst wurden von der Firma Dürr Austria GmbH alle elektrischen Anschlüsse der Ventilatoren erneuert. Im Anschluss daran wurde eine neue Steuerung implementiert, mit der die einzelnen Parameter wie Drehzahl oder Volumenstrom einstellbar sind und die im Betrieb ebenfalls über den Leitstand des ZaB steuerbar ist. Dies war um einiges aufwendiger als bei den Strahlventilatoren, da für die Axialventilatoren noch keine digitale Steuerung vorhanden war. Somit wurde ein neues Steuerungsprogramm von der Firma Dürr Austria GmbH implementiert (Abb. 5-9).



Abb. 5-9: Digitales Steuerungsprogramm

Folgende Parameter sind bei den Axialventilatoren einstellbar:

- Drehzahl n_1 und n_2
- Volumenstrom \dot{V}
- Schaufelwinkel α

Wobei zwischen Hand- und Automatikbetrieb unterschieden wird. Im Handbetrieb wird die Drehzahl n_1 oder n_2 , der Volumenstrom \dot{V} und der Schaufelwinkel α eingestellt. Im Automatikbetrieb wird nur der Volumenstrom vorgegeben und die Ventilatoren regeln die anderen Einstellungen automatisch. Zusätzlich dazu ist ein Sensor am Gehäuse der Ventilatoren angebracht, der die Schwingungen (Vibrationen) misst und Drucksensoren vor und hinter dem Laufrad zur Messung von statischem Druck und Totaldruck. Über die Druckmessung wird auch der Volumenstrom automatisch von der Steuerungssoftware berechnet.

Zu Beginn der Inbetriebnahme wurden die Schwingungssensoren auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft. Danach wurde die mechanische Klappe zum Abluftkanal geöffnet und die Winkel der Laufradflügel auf die sogenannte „Segelstellung“ eingestellt. In dieser Segelstellung werden kein Schub und somit auch kein Volumenstrom erzeugt. Hierbei wurde auch die Drehrichtung überprüft. Dann wurde der Ventilator 1 bis zu der Drehzahl $n_1 = 371$ 1/min angefahren. Danach wurde auf die höhere Drehzahl $n_2 = 744$ 1/min umgeschaltet und der Schaufelwinkel sukzessive erhöht. Mit größer werdendem Schaufelwinkel steigt der Volumenstrom und die Leistung. Bei einem Schaufelwinkel von $\alpha = 18^\circ$ wurde ein Volumenstrom von $\dot{V} = 145$ m³/s und eine Leistung von $P = 190$ kW erreicht. Da die vorgegebene Maximalleistung 190 kW beträgt, wurde der maximale Schaufelwinkel für den Ventilator 1 mit 18° festgelegt. Dieser Testlauf wurde mit drei geöffneten Abluftklappen in Richtung Verkehrsraum durchgeführt. Um zu überprüfen, ob eine Veränderung des Volumenstroms auftritt, wurde zunächst eine und danach zwei Abluftklappen geschlossen. Bei einer Geschlossenen trat keine Veränderung auf, bei zwei Geschlossenen jedoch sank der Volumenstrom auf $\dot{V} = 136$ m³/s. Die Leistung blieb dabei konstant.

Als nächstes wurde versucht den Ventilator 1 direkt bis zur Drehzahl n_2 mit einem Schaufelwinkel von $\alpha = 18^\circ$ und danach bei $\alpha = 14^\circ$ zuerst auf die Drehzahl n_1 und dann auf n_2 anzufahren, um schneller einen höheren Volumenstrom zu erreichen. Beides war nicht erfolgreich, da bei beiden Versuchen die zulässige Stromstärke überschritten und der Stromkreis getrennt wurde.

Im nächsten Schritt wurde die mechanische Klappe von Ventilator 2 zum Abluftkanal geöffnet und der Ventilator bis zu der Drehzahl $n_1 = 373$ 1/min in Segelstellung bei $\alpha = -34^\circ$ angefahren. Der Schaufelwinkel wurde Schritt für Schritt erhöht, bis die bei Drehzahl n_1 maximale Leistung $P = 40$ kW erreicht wurde. Dies war bei einem Schaufelwinkel von $\alpha = 0^\circ$ der Fall. Bei dieser Stellung erreichte der Ventilator einen Volumenstrom von $\dot{V} = 65-85$ m³/s. Dann wurde der Schaufelwinkel wieder auf $\alpha = -34^\circ$ zurückgestellt und der Ventilator auf die höhere Drehzahl $n_2 = 744$ 1/min umgeschaltet. Der Schaufelwinkel wurde wie vorhin solange erhöht, bis die maximal zulässige Leistung erreicht wurde. Bei einem Schaufelwinkel von $\alpha = -10^\circ$ lieferte der Ventilator eine Leistung von $P = 187$ kW und einen Volumenstrom von $\dot{V} = 130-150$ m³/s. Auffällig war, dass bei Ventilator 2 der Volumenstrom nicht konstant war. Die Ursache dafür ist, dass beide Ventilatoren um 90° zum Abluftkanal gedreht sind. Das heißt die Strömungsrichtung wird im Lüftergebäude im rechten Winkel umgelenkt, wobei der Kurvenradius der Strömung beim zweiten Ventilator kleiner ist als beim Ersten. Aufgrund dieser Gegebenheit entstehen Verwirbelungen der Strömung und daraus folgt eine ungleichmäßige Anströmung des Laufrades. Dadurch werden schwankende Werte des Volumenstroms verursacht.

Während des Anfahrens von Ventilator 2 wurde festgestellt, dass der Schwingungssensor und die Temperatursensoren im Motor nicht funktionierten. Dies wurde behoben und erneut kontrolliert.

Da die Schaufelwinkel der beiden Ventilatoren nicht auf den gleichen Ausgangswert kalibriert waren, stimmten die Werte für die Segelstellung nicht überein. Daher wurde bei beiden Ventilatoren die Segelstellung auf $\alpha = -16^\circ$ kalibriert und auch die vorhandene Analoganzeige (Abb. 5-10) auf diesen Wert eingestellt. Mit der neuen Einstellung der Schaufelwinkel wurden nun wieder beide Ventilatoren bis zur maximalen Leistung angefahren, um die kalibrierten maximal zulässigen Schaufelwinkel zu bestimmen. Bei Ventilator 1 war für die Drehzahl n_1 ein größtmöglicher Schaufelwinkel von $\alpha = 26^\circ$ und für n_2 ein größtmöglicher Schaufelwinkel von $\alpha = 16^\circ$ einstellbar. Für Ventilator 2 wurden maximale Schaufelwinkel von $\alpha = 20^\circ$ bei n_1 und $\alpha = 10^\circ$ bei n_2 bestimmt. Jeder der beiden Ventilatoren erreichte bei der Drehzahl n_1 einen Volumenstrom von $\dot{V} = 80\text{-}85 \text{ m}^3/\text{s}$ und bei der Drehzahl n_2 einen Wert von $\dot{V} = 140\text{-}150 \text{ m}^3/\text{s}$.



Abb. 5-10: Analoganzeige des Schaufelwinkels

In weiterer Folge wurde der Parallelbetrieb von beiden Ventilatoren getestet. Damit ist der größtmögliche Volumenstrom erreicht worden, jedoch ist darauf zu achten, dass beide Ventilatoren immer ungefähr gleich viel Luft ansaugen. Angefahren wurden beide Ventilatoren bis zur Drehzahl n_1 , bei einem Schaufelwinkel von $\alpha = 12^\circ$ beim Ventilator 1 und $\alpha = 8^\circ$ beim Ventilator 2. Die Schaufelwinkel wurden bis auf $\alpha = 26^\circ$ bei Ventilator 1 und $\alpha = 20^\circ$ beim Ventilator 2 schrittweise erhöht. Bei diesen Winkeln erreichte jeder Ventilator eine Leistung von $P = 37 \text{ kW}$ und einen Volumenstrom von jeweils $\dot{V} = 63\text{-}68 \text{ m}^3/\text{s}$. Danach wurde bei beiden Ventilatoren der Schaufelwinkel auf $\alpha = -14^\circ$ zurückgestellt und auf die Drehzahl n_2 umgeschaltet. Die Schaufelwinkel wurden wieder sukzessive erhöht, beim Ventilator 1 auf $\alpha = 12^\circ$ und beim Ventilator 2 auf $\alpha = 8^\circ$. Dabei erreichte jeder der beiden Ventilatoren eine Leistung von $P = 159 \text{ kW}$ und einen Volumenstrom von $\dot{V} = 115\text{-}120 \text{ m}^3/\text{s}$, somit

wurde insgesamt ein maximaler Volumenstrom von ca. $\dot{V} = 240 \text{ m}^3/\text{s}$ erzeugt. Die maximale Leistung der Ventilatoren liegt zwar bei $P = 190 \text{ kW}$, allerdings wurde bei $P = 159 \text{ kW}$ gestoppt, um eine Überlastung des Stromnetzes zu verhindern.

Der vorletzte Schritt der Inbetriebnahme war die Installation des Automatikbetriebes. Bei diesem wird nur der Volumenstrom vorgegeben und die Regelung der Ventilatoren stellt automatisch den dafür erforderlichen Schaufelwinkel ein und hält den Volumenstrom mit einer Toleranz von $\pm 10 \text{ m}^3/\text{s}$ konstant. Zunächst wurde jeder Ventilator einzeln getestet. Nach Vorgabe von verschiedenen Werten für den Volumenstrom wurde darauf geachtet welchen Schaufelwinkel die Regelung der Ventilatoren einstellt. Der maximal einstellbare Volumenstrom pro Ventilator bei Drehzahl n_2 ist $\dot{V} = 140 \text{ m}^3/\text{s}$, Ventilator 1 erreicht diesen mit einem Schaufelwinkel von $\alpha = 12^\circ$ und Ventilator 2 mit $\alpha = 8^\circ$. Die Leistung beträgt dabei bei beiden ca. $P = 170 \text{ kW}$. Bei größeren Volumenströmen wurde zeitweise die maximale Leistung überschritten, daher wurde die mögliche Eingabe mit $\dot{V} = 140 \text{ m}^3/\text{s}$ beschränkt. Bei der geringeren Drehzahl n_1 ist bei jedem der beiden Ventilatoren der maximale Volumenstrom $\dot{V} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$, bei einem Schaufelwinkel des Ventilators 1 von $\alpha = 26^\circ$ und des Zweiten von $\alpha = 20^\circ$. Danach wurde der Automatikbetrieb mit beiden Ventilatoren parallel getestet. Zunächst mit Drehzahl n_1 , wo ein maximaler Volumenstrom pro Ventilator von $\dot{V} = 70 \text{ m}^3/\text{s}$ mit Schaufelwinkel $\alpha = 26^\circ$ für Ventilator 1 und $\alpha = 20^\circ$ für Ventilator 2 erreicht wurde. Bei der Drehzahl n_2 ist ein maximaler Volumenstrom pro Ventilator von $\dot{V} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einem Schaufelwinkel von $\alpha = 4^\circ$ für Ventilator 1 und $\alpha = 0^\circ$ für Ventilator 2 möglich. Der insgesamt maximal einstellbare Volumenstrom wurde mit $\dot{V} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ begrenzt, da durch die auftretenden Schwankungen aufgrund der Toleranz die Gefahr zur Überlastung des Stromnetzes besteht.

Zum Abschluss wurden verschiedene Volumenströme im Parallelbetrieb vorgegeben, um zu kontrollieren ob die Leistung und der Schaufelwinkel bei beiden Lüftern immer ungefähr gleich ist. Damit wurde die Regelung noch optimiert.

6 Messung der Strömungsgeschwindigkeiten am Zentrum am Berg

6.1 Allgemeines

Sowohl im Brandfall als auch im Betriebsfall ist die Messung der Strömungsgeschwindigkeit in Tunnellängsrichtung für die Lüftungssteuerung essenziell wichtig. Durch einen permanenten Abgleich der IST-Geschwindigkeiten und der vorgegebenen SOLL-Geschwindigkeiten erfolgt die Regelung des Lüftungssystems. Ohne Messung der Geschwindigkeit ist die Steuerung nur begrenzt einsatzfähig. Daher sind sehr hohe Ansprüche an die Messgeräte bezüglich Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu stellen. Im Rahmen der Inbetriebnahme von Tunnellüftungsanlagen ist daher eine sorgfältige Überprüfung und Abnahme der installierten Geschwindigkeitsmessgeräte erforderlich. [21]

Um eine unter Verkehr oder bei Stau möglichst unbeeinflusste Messung zu ermöglichen, werden die Messgeräte in einer Höhe von ca. 4,50 m und in ausreichendem Abstand zu Hindernissen wie Strahlventilatoren, oder großen Verkehrsschildern montiert. Die Messwerte eines Messquerschnittes ergeben sich entweder aus einer Linienmessung oder aus dem Mittelwert zwei gegenüberliegender Punktmessungen.

Bei einer Linienmessung werden im Querschnitt zwischen zwei Messgeräten entlang einer Linie Ultraschallimpulse durch den Verkehrsraum gesendet. Die beiden Messsensoren sind in der Regel in einem Winkel von 45° bis 60° zueinander versetzt an den Tunnelwänden angebracht. Bei dieser Messanordnung wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit durch die Ultraschallimpulse und unter Anwendung eines Umrechnungsfaktors zur Berücksichtigung der Geschwindigkeitsänderungen in Abhängigkeit des First- und Ulmenabstandes ermittelt. [11]

Bei der Punktmessung werden zwei Strömungsmessgeräte in einem Messquerschnitt beidseitig an den Tunnelwänden montiert und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit aus dem Mittelwert der beiden Einzelmessungen und unter Anwendung eines Umrechnungsfaktors zur Berücksichtigung der Geschwindigkeitsänderungen in Abhängigkeit des First- und Ulmenabstandes ermittelt. [11]

In den einschlägigen Normen der allgemeinen Lüftungstechnik sind zur Ermittlung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit Netzmessungen über den gesamten Querschnitt vorgesehen. Sie ermöglichen eine sehr genaue Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit und der Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt, sind aber in den nationalen Tunnelrichtlinien nicht vorgegeben, da sie in Tunneln sehr schwer umsetzbar sind. In einem Tunnel ist oft aufgrund äußerer Einflüsse wie Wind

und Portaldrücke keine konstante Strömungsgeschwindigkeit über einen längeren Zeitraum messbar. Zusätzlich sind bei den vergleichsweise großen Tunnelquerschnitten sehr viele Messpunkte mit einer großen Anzahl an Messgeräten erforderlich und die betroffene Tunnelröhre ist während dem Auf- und Abbau des Messnetzes und der Messung selbst nicht befahrbar. Daher kommen bei Tunneln üblicherweise Linien- und Punktmessungen zum Einsatz. In [21] sind durchgeführte Netzmessungen in Tunneln und der Vergleich mit üblichen Messverfahren detailliert beschrieben.

6.2 Messgeräte

Staudruckrohr

Dieses Messgerät beruht auf dem Staudruckprinzip, welches sich aus der Energieerhaltung herleitet. Dabei wird der Totaldruck auf der Anströmseite und der statische Druck auf der Abströmseite gemessen und die Differenz dieser beiden Größen bestimmt. Diese Druckdifferenz entspricht dem dynamischen Druck, der nach Bernoulli (Gl. (3-1)) direkt proportional dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit ist. Über einen Differenzdruckmessumformer wird der ermittelte Staudruck in einen digitalen Messwert umgewandelt und daraus die Geschwindigkeit berechnet. Die Dichte der Luft ist abhängig vom Umgebungsdruck und der Lufttemperatur, weshalb beide gemessen und bei der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden.[11]

Ein Vorteil der Differenzstaudruckrohre ist, dass sie an beiden Seiten Anströmöffnungen besitzen, somit ist die Messung der Strömungsgeschwindigkeit in beide Richtungen möglich. Die Messung erfolgt durch Punktmessungen, das heißt zwei Staudruckrohre werden gegenüberliegend an den Tunnelwänden montiert und der Mittelwert der beiden Einzelmessungen gebildet. In Abb. 6-1 ist ein am Zentrum am Berg eingebautes Differenzstaudruckrohr dargestellt.



Abb. 6-1: Staudruckrohr LG-2020 (IAG)

Ultraschallsensoren

Bei diesem Messverfahren wird die Strömungsgeschwindigkeit nach dem Laufzeitverfahren ermittelt. Das Messsystem besteht aus kombinierten Sender- und Empfängereinheiten, die gegenüberliegend in einem Winkel von 45° bis 60° versetzt zueinander montiert werden. Wenige Millisekunden lange Ultraschallimpulse werden von den Sender- zu den Empfängereinheiten, wie in Abb. 6-2 dargestellt, gesendet. Dabei beeinflusst die Luftströmung aufgrund des Dopplereffekts die Laufzeit der Schallimpulse. Basierend auf der Differenz der Laufzeiten wird die Strömungsgeschwindigkeit, die Strömungsrichtung und die Lufttemperatur errechnet. Die Messungen sind unabhängig von der Luftdichte und der Luftfeuchte und erfolgen nach dem Prinzip der Linienmessung. Die Ultraschallmessung bietet somit eine wesentlich zuverlässige Messung als Punktmessungen, da die Strömungsgeschwindigkeit über den gesamten Tunnelquerschnitt ermittelt wird. [11]



Abb. 6-2: Ultraschallsensor D-FL 220T (DURAG), Sendeeinheit

Am ZaB sind in allen Tunnelröhren Messgeräte zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit eingebaut. Sowohl Staudruckmessgeräte der Firma Industrie Automation Graz (IAG) als auch Ultraschallmessgeräte der Firmen DURAG Group und SICK AG sind montiert. Die Geräte wurden von den jeweiligen Herstellern installiert und kalibriert. Die Ausgabe aller Messwerte erfolgt zentral im Leitstand. Der Leitstand befindet sich im Bürogebäude des ZaB, von dort werden alle technischen Systeme in den Tunnelröhren zentral gesteuert. Tabelle 7 zeigt eine Übersicht der verwendeten Messgeräte und Messstellen einschließlich der Messunsicherheiten laut Hersteller. Der Messbereich ist für alle Geräte gleich und liegt zwischen -20 m/s und 20 m/s. Die Bezeichnungen LG 01 – 07 sind im Computerprogramm zur Steuerung der Lüftungsanlage vorgegeben und dienen zur einfacheren Zuordnung der Messwerte. Abb. 6-3 zeigt die Lage der Messstellen und der eingebauten Ventilatoren in den Straßen- und Eisenbahntunneln.

Bezeichnung	Messstelle	Messgerät	Messunsicherheit
LG 01	ST-N, TM 28	LG-2020 (IAG)	$\pm 0,1$ m/s
LG 02	ST-N, TM 175	D-FL 220T (DURAG)	$+0,2$ m/s
LG 03	ST-S, TM 52	LG-2020 (IAG)	$+0,1$ m/s
LG 04	ST-S, TM 165	FLAWSIC200 (SICK)	$+0,1$ m/s
LG 05	EBT-W, TM 100	LG-2020 (IAG)	$+0,1$ m/s
LG 06	EBT-W, TM 255	D-FL 220T (DURAG)	$+0,2$ m/s
LG 07	EBT-O, TM 55	FLAWSIC200 (SICK)	$+0,1$ m/s

Tabelle 7: Messstellen und eingebaute Messgeräte

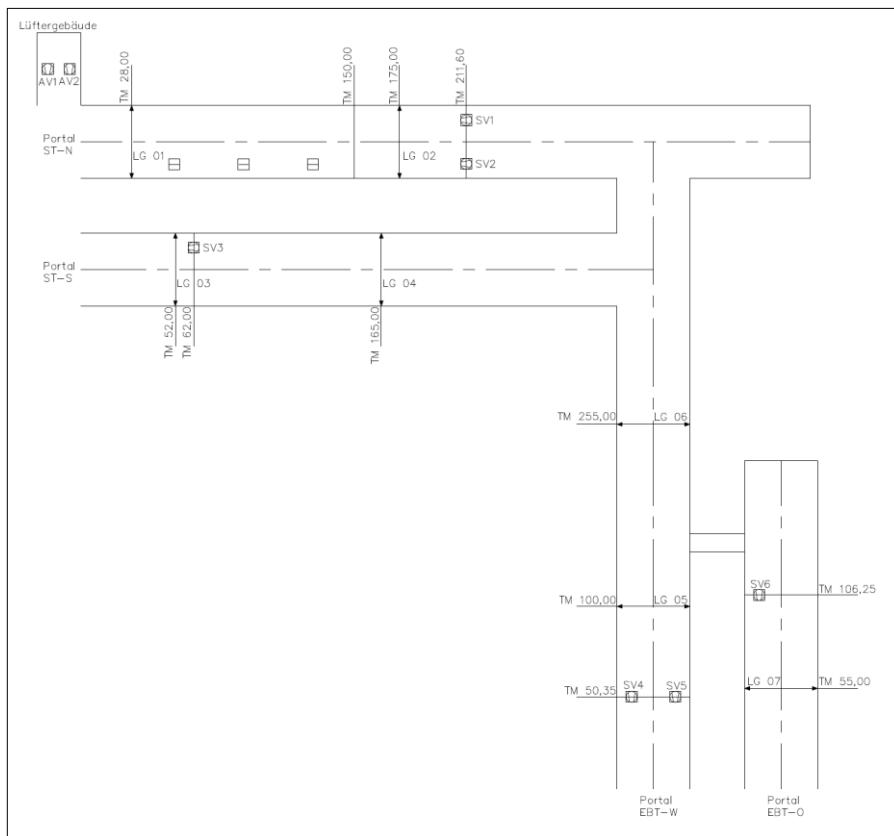


Abb. 6-3: Grundriss der Tunnelröhren mit Messstellen und Ventilatoren

6.3 Messaufbau und Messprogramm

Nach der Inbetriebnahme wurden mit Unterstützung der Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (FVT) in Graz Messungen der mittleren Strömungsgeschwindigkeit am ZaB durchgeführt.

Der Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in den Tunnelröhren von verschiedenen Kombinationen eingeschalteter Ventilatoren und geöffneten oder geschlossenen Tunnelportalen wurde untersucht. Dies wurde mit den eingebauten Messgeräten überprüft. Folgende 19 Kombinationen von offenen bzw. geschlossenen Portalen/Tunnelröhren und eingeschalteten Lüftern wurden betrachtet:

Nr.	ST-N	ST-S	EBT-W	EBT-O	AV 1,2	SV 1,2	SV 3	SV 4,5	SV 6	Strömungs- Richtung
1	offen	zu	zu	zu	1,1	0	0	0	0	Lüftergebäude
2	offen	zu	zu	zu	1,1	0	0	0	0	Lüftergebäude
3	offen	zu	offen	zu	1,1	0	0	0	0	Lüftergebäude
4	offen	offen	zu	zu	1,1	0	0	0	0	Lüftergebäude
5	offen	offen	zu	zu	1,1	0	1	0	0	Lüftergebäude
6	offen	offen	zu	zu	1,1	1	1	0	0	Lüftergebäude
7	offen	offen	zu	zu	1,1	1,1	1	0	0	Lüftergebäude
8	offen	offen	zu	zu	0	1,1	1	0	0	Portal ST-N
9	offen	offen	zu	zu	0	1,1	1	0	0	Portal ST-S
10	offen	offen	zu	zu	0	1,1	0	0	0	Portal ST-S
11	offen	offen	offen	zu	0	1,1	0	1,1	0	Portal ST-N
12	offen	offen	offen	zu	0	1,1	1	1,1	0	Portal ST-N
13	offen	offen	offen	zu	0	1,1	0	1,1	0	Portal EBT-W
14	offen	offen	offen	zu	0	1,1	1	1,1	0	Portal EBT-W
15	offen	zu	offen	offen	0	1,1	0	1,1	1	Portal EBT-O
16	zu	zu	offen	offen	0	0	0	0	1	Portal EBT-O
17	zu	zu	offen	offen	0	0	0	1,1	1	Portal EBT-W
18	offen	zu	offen	offen	0	1,1	0	1,1	0	Portal EBT-W
19	zu	offen	offen	offen	0	0	1	1,1	0	Portal ST-S

0 = AUS; 1 = EIN; 1,1 = 2 Ventilatoren parallel EIN

Tabelle 8: Messprogramm

Sobald eine stationäre Strömung für die jeweilige Schaltung erreicht wurde, wurde mit den Messwerten über die Zeitspanne von 10 Minuten der Mittelwert gebildet. Kurzzeitige Schwankungen werden dadurch im Messergebnis minimiert.

Bei den Schaltungen 1 bis 4 wurden nur die beiden Axialventilatoren im Lüftergebäude eingeschaltet und die Luft vom Portal des ST-N angesaugt und über die geöffneten Klappen in den Abluftkanal gesaugt. Bei der zweiten Schaltung war die Verbindungstür zum Presserstollen geöffnet. Dies hatte aber keinen Einfluss auf die Strömung. Beim dritten Versuch wurde das Portal des EBT-W und beim Vierten das Portal des ST-S geöffnet, um zu überprüfen, ob die Axiallüfter einen Unterdruck erzeugen und Luft von den geöffneten Portalen nachströmt.

Für die Schaltungen 5 bis 7 wurde die Strömung der Axialventilatoren durch eine zusätzliche Strömung vom Portal des ST-S unterstützt, da die beiden Straßentunnel über den EBT-W miteinander verbunden sind. Dafür wurden die Strahlventilatoren im ST-N und ST-S eingeschaltet, SV 3 saugt Luft vom Portal ST-S an und bläst diese Richtung EBT-W und SV 1 und 2 erzeugen eine Strömung Richtung Portal ST-N. Für Schaltung 8 wurden die Axialventilatoren im Lüftergebäude abgeschaltet und eine Strömung in Richtung Portal ST-N nur mit den Strahlventilatoren SV 1-3 erzeugt. Bei den Schaltungen 9 und 10 wurde die Strömungsrichtung im ST-N und ST-S durch die Umkehr der Blasrichtung der Strahlventilatoren 1-3 umgedreht.

Bei den Schaltungen 11 bis 14 wurden die Strahlventilatoren (SV 1,2 und SV 4,5) im ST-N und EBT-W eingeschaltet und eine Strömung zwischen den Portalen der Straßentunnel und dem Portal EBT-W erzeugt. Bei den Schaltungen 12 und 14 wurde zusätzlich der Strahlventilator im ST-S aktiviert, um von dort aus die Strömung zwischen Portal ST-S und EBT-W zu verstärken. Die Strömungsrichtung wurde ebenfalls umgekehrt und sowohl in Richtung der Straßentunnelportale N und S als auch in Richtung des Portals EBT-W eingestellt.

Für die Schaltungen 15 bis 17 wurden die Querschlagtüren zwischen dem EBT-W und dem EBT-O geöffnet und der Strahlventilator im EBT-O auch eingeschaltet, um festzustellen ob die Luft in Richtung des Portals EBT-O strömt. Bei Kombination 15 waren die Portale der Eisenbahntunnel und das Portal ST-N geöffnet und alle Ventilatoren in diesen Tunnelröhren (SV 1,2,4,5,6) aktiv. Bei Schaltung 16 war nur der Strahlventilator im EBT-O aktiv, das heißt nur diese Tunnelröhre wurde mechanisch belüftet und die auftretenden Strömungen im EBT-W waren durch den SV 6 bedingt. Bei Schaltung 17 wurde das Portal ST-N geschlossen und nur die Strahlventilatoren SV 4-6 in den Eisenbahntunneln eingeschaltet.

Bei den Schaltungen 18 und 19 wurde noch einmal eine Strömung zwischen dem EBT-W und den beiden Straßentunnelröhren erzeugt, wobei jeweils das Portal jenes Straßentunnels mit abgeschaltetem Strahlventilator geschlossen wurde und der Querschlag zwischen EBT-W und EBT-O offenblieb.

6.4 Messergebnisse

Die Messgeräte LG 01 bis LG 07 waren bei jeder Schaltung aktiv und haben über die jeweilige Zeitspanne von 10 Minuten alle zwei Sekunden einen Wert gemessen. Somit sind für jede Schaltung 300 Werte pro Messgerät vorhanden, aus denen jeweils der Mittelwert ermittelt wurde. In Tabelle 9 sind die berechneten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten für die einzelnen Schaltungen zusammengefasst.

Da bei den einzelnen Schaltungen diverse Portale geschlossen oder Ventilatoren abgeschaltet wurden, um gezielt Strömungen in gewissen Tunnelröhren zu erzeugen, sind nur die Messstellen in den jeweils betroffenen Tunnelröhren relevant. Die aussagekräftigen Messwerte sind grün hinterlegt. Die Vorzeichenkonvention der Messgeräte ist so gewählt, dass die Strömung zu den Portalen der Straßentunnel positiv und zu den Portalen der Eisenbahntunnel negativ ist.

Schaltung	LG 01	LG 02	LG 03	LG 04	LG 05	LG 06	LG 07
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
1	-3,95	-0,11	0,29	-0,19	0,07	0,14	0,20
2	-4,00	-0,04	0,18	-0,21	0,11	0,16	0,21
3	-2,88	0,49	0,18	-0,19	1,25	1,13	0,20
4	-3,30	0,51	-0,80	-1,05	0,17	0,18	0,20
5	-2,85	0,74	-0,96	-1,09	-0,23	0,07	0,23
6	-2,66	0,35	-1,15	-1,19	-0,43	0,01	0,23
7	-2,26	0,31	-1,42	-1,29	-0,53	-0,02	0,25
8	1,62	0,19	-0,99	-1,06	-0,61	-0,08	0,25
9	-1,93	-0,86	-0,55	0,97	-0,64	-0,14	0,24
10	-1,57	-0,69	0,46	0,91	-0,34	-0,20	0,26
11	2,07	0,34	-0,63	-0,53	1,68	1,44	0,26
12	2,05	0,37	-0,52	-0,66	1,55	1,36	0,24
13	-2,69	-1,05	-0,09	-0,19	-1,88	-1,62	0,25
14	-2,89	-1,27	-0,50	0,66	-1,89	-1,43	0,24
15	0,23	-0,03	0,12	0,23	0,81	0,35	-0,26
16	0,46	-0,02	0,04	-0,09	0,33	0,26	-0,31
17	0,68	-0,01	0,01	-0,19	-0,64	0,06	0,84
18	-2,29	-1,05	0,05	-0,21	-1,85	-1,67	0,42
19	0,23	0,00	-0,45	1,09	1,46	1,18	0,55

Tabelle 9: Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten der Schaltungen

Die gemittelten Messwerte des Messgerätes LG 02 sind bei mehreren Schaltungen nicht plausibel. Der Grund dafür ist, dass das Messgerät in einem zu geringen Abstand von den Strahlventilatoren SV 1, SV 2 eingebaut ist und daher eine Verwirbelung der Strömung im Messquerschnitt auftritt. Dies ist bei den Schaltungen 6, 7, 8, 11 und 12 der Fall. Das gleiche Problem tritt bei Messgerät LG 03 auf, da es zu nahe am Strahlventilator SV 3 montiert ist. Die gemittelten Messwerte dieses Messgerätes sind bei den Schaltungen 9, 14 und 19 nicht plausibel.

Bei Schaltung 1 und 2 ist erkennbar, dass durch die eingeschalteten Axialventilatoren im Lüftergebäude nur Frischluft vom Portal ST-N angesaugt und über die Abluftklappen Richtung Lüftergebäude transportiert wird. In den restlichen Tunnelbereichen stellt sich keine auffällige Strömung in Richtung der Abluftklappen ein. Die geöffnete Verbindungstür zum Presserstollen bei der Schaltung 2 hat keine Auswirkung auf die Strömung im ST-N.

Schaltung 3 zeigt zusätzlich zur Frischluftzufuhr über das Portal ST-N eine Strömung vom Portal EBT-W in Richtung der Abluftklappen, das heißt bei geöffnetem Portal EBT-W wird zusätzlich Frischluft angesaugt. Der Wert von LG 02 zeigt zwar eine Strömung in Richtung Portal ST-N an, allerdings geringer als LG 05 und 06 weil an der Messstelle die Strömung von der angesaugten Luft der Axialventilatoren beeinflusst wird. Bei Schaltung 4 ist das Portal ST-S geöffnet und dementsprechend wird Frischluft in Richtung der Abluftklappen angesaugt. Allerdings ist die Strömung vom Portal ST-S nicht so hoch wie die vom Portal EBT-W bei Schaltung 3. Bei Schaltung 5 ist der Zustrom ausgehend vom Portal ST-S aufgrund des eingeschalteten Strahlventilators SV 3 höher als bei Schaltung 4, erkennbar durch die höheren gemittelten Messwerte von LG 02 bis LG 04. Eine weitere Erhöhung der Strömung vom Portal ST-S und gleichzeitige Abnahme vom Portal ST-N zeigen die Schaltungen 6 und 7, da zusätzlich die Strahlventilatoren SV 1 und SV 2 eingeschaltet wurden.

Bei Schaltung 8 waren nur die Strahlventilatoren im ST-N und ST-S (SV 1, SV 2 und SV 3) aktiv. Die Strömungsrichtung der Ventilatoren wurde so eingestellt, dass die Frischluft am Portal ST-S ein und am Portal ST-N wieder ausströmt. Die gemittelten Messwerte von LG 01, LG 03 und LG 04 zeigen dies. Für die Schaltung 9 wurde die Strömungsrichtung der Ventilatoren umgedreht, die gemittelten Messwerte von LG 01, LG 02 und LG 04 bestätigen dies. Bei Schaltung 10 wurde der Strahlventilator SV 3 abgeschaltet. Dementsprechend ist die Strömungsgeschwindigkeit in Richtung Portal ST-S etwas geringer als bei Schaltung 9.

Bei Schaltung 11 wurden die Strahlventilatoren im ST-N (SV 1 und SV 2) und im EBT-W (SV 4 und SV 5) eingeschaltet und eine Strömung vom Portal EBT-W in Richtung Portale der Straßentunnel hergestellt. Die zugehörigen gemittelten Messwerte zeigen die erwarteten Ergebnisse. Für die Schaltung 12 wurde zusätzlich der Strahlventilator SV 3 im ST-S in Richtung EBT-W eingeschaltet. Die Messergebnisse zeigen im Vergleich zur Schaltung 11 keine Abweichungen. Das heißt, dass die zusätzliche

Frischlufte durch den ST-S kaum Einfluss auf die Strömung zwischen dem EBT-W und dem ST-N hatte.

Bei Schaltung 13 und 14 wurde die Strömungsrichtung umgedreht, die Luft strömte vom Portal ST-N Richtung Portal EBT-W. Die negativen Vorzeichen der Messergebnisse von Schaltung 13 zeigen dies. Für die Schaltung 14 wurde zusätzlich der Strahlventilator SV 3 in Richtung des Portals ST-S eingeschaltet. Daraus folgt eine höhere Strömungsgeschwindigkeit im ST-N und im ST-S, erkennbar durch die gemittelten Messwerte LG 01, LG 02 und LG 04.

Für die Schaltung 15 wurde der Querschlag zwischen EBT-W und EBT-O geöffnet und zusätzlich zu den Strahlventilatoren SV 1, SV 2, SV 4 und SV 5 in Richtung des Querschlages der Strahlventilator SV 6 im EBT-O in Richtung des Portals eingeschaltet. Damit wurde überprüft, welcher Anteil der Strömung durch den Querschlag in den EBT-O strömt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Strömungsgeschwindigkeit zwischen dem EBT-W und dem ST-N sehr gering ist, weil sowohl vom Portal ST-N als auch vom Portal EBT-W Frischluft angesaugt wird. Im EBT-O entsteht eine Strömung in Richtung des Portals, der Grund dafür ist aber der eingeschaltete Strahlventilator SV 6 und nicht die Luftzufuhr über den Querschlag. Bei Schaltung 16 wurden die Strahlventilatoren im EBT-W und ST-N abgeschaltet. Somit war nur der Strahlventilator SV 6 im EBT-O aktiv. Der gemittelte Messwert LG 07 ist im Vergleich zu Messung 15 etwas höher. Dies zeigt, dass die eingeschalteten Ventilatoren im EBT-W und ST-N keinen Einfluss auf die Strömung im EBT-O hat. Bei Schaltung 17 wurde die Strömungsrichtung des Strahlventilators SV 6 umgedreht und zusätzlich die Strahlventilatoren SV 4 und SV 5 in Richtung Portal EBT-W aktiviert. Die Messwerte LG 05 und LG 07 zeigen, dass sich nun eine Strömung ausgehend vom Portal EBT-O über den Querschlag in Richtung Portal EBT-W einstellt. Ein weiteres Indiz dafür ist der sehr geringe negative gemittelte Messwert LG 06. Er zeigt, dass im EBT-W nach dem Querschlag keine Strömung Richtung Portal auftritt.

Bei Schaltung 18 wurde noch einmal eine Strömung vom Portal ST-N in Richtung Portal EBT-W mit den aktiven Strahlventilatoren SV 1, SV 2, SV 4 und SV 5 hergestellt. Allerdings wurde diesmal das Portal des ST-S geschlossen. Die Messergebnisse sind ähnlich zu Messung 13. Das bedeutet, dass das geschlossene Portal des ST-S keinen Einfluss auf die Strömung hatte. Bei Schaltung 19 wurden die Strömungsgeschwindigkeiten zwischen dem ST-S und dem EBT-W bei geschlossenem Portal des ST-N gemessen. Die Ergebnisse zeigen eine kontinuierliche Strömung vom Portal EBT-W in Richtung Portal ST-S.

Der Grund für die Durchführung der Strömungsgeschwindigkeitsmessungen war, zu untersuchen welche Kombinationen von geöffneten Tunnelröhren und eingeschalteten Ventilatoren für den Normalbetrieb einsetzbar sind. Zusätzlich ist von Interesse, welche Strömungsgeschwindigkeiten mit den einzelnen Schaltungen erreichbar sind.

Mit den Axialventilatoren ist eine maximale Absauggeschwindigkeit über die Abluftklappen von ca. 4 m/s im Verkehrsraum des ST-N möglich. Dies ist besonders für die Rauchabsaugung bei Brandversuchen wichtig. Eine Lüftung mit ausschließlich aktiven Strahlventilatoren ist am effizientesten vom ST-N zum EBT-W, da bei dieser Verbindung am wenigsten Krümmungen im Wetterweg auftreten und somit die Strömungsverluste am geringsten sind. Die Ergebnisse der Schaltungen 11 bis 14 und 18 zeigen die Strömungsgeschwindigkeiten dieser Kombination. Auch über die Verbindung zwischen dem ST-S und dem EBT-W bzw. zwischen den beiden Straßentunnelröhren ist eine Längsbelüftung der Tunnelröhren möglich. Allerdings treten bei diesen Kombinationen größere Krümmungen der Wetterwege auf. Die Ergebnisse der Schaltungen 8,9 und 19 zeigen die Strömungsgeschwindigkeiten bei diesen Kombinationen. Der EBT-O ist immer mit dem Strahlventilator SV 6 eigens zu belüften, da aufgrund der geringeren Querschnittsfläche im Querschlag keine ausreichende Luftzufuhr vom EBT-W möglich ist.

Die Messgeräte LG 02 und LG 03 wurden in zu geringem Abstand zu den Strahlventilatoren SV 1 und SV 2 sowie SV 3 eingebaut, weshalb deren Messwerte oft nicht plausibel sind. In der RVS 09.02.31 [19] ist vorgegeben, dass Messquerschnitte mindestens 20 m von Verkehrszeichen oder ähnlichen Störstellen und wenn möglich mindestens 100 m von Strahlventilatoren oder Pannenbuchten entfernt anzuordnen sind. Dies ist aufgrund der geringen Tunnellängen am ZaB allerdings nicht umsetzbar. Somit sind die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten der Messgeräte LG 02 und LG 03 bei eingeschalteten Strahlventilatoren SV 1, SV 2 und SV 3 mit Strömung in Richtung der Portale ST-N und ST-S zu vernachlässigen.

7 Messung der Strömungsgeschwindigkeiten am Baulos Gloggnitz

7.1 Allgemeines

Im Baubetrieb dient die Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt hauptsächlich zur Feststellung von Leckagen, die durch Unregelmäßigkeiten in den Messergebnissen erkannt werden, und bei Umluftsystemen zur Kontrolle der Funktionsfähigkeit des gesamten Systems. Zusätzlich dazu ist eine Druckmessung in den Lutten durchzuführen, um die ordnungsgemäße Strömung der Luft zu überprüfen und ebenfalls auftretende Leckagen festzustellen. Die Ventilatoren werden nicht wie im Betrieb durch einen SOLL-IST Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten gesteuert, sondern je nach erforderlicher Frischluftmenge mit der dementsprechenden Leistung betrieben.

Die Messungen erfolgen entweder mit mobilen Messgeräten, mit denen an mehreren Messquerschnitten in der gesamten Tunnelröhre gemessen wird. Oder mit fix eingebauten Messgeräten die im Vorhinein im Lüftungskonzept miteingeplant werden. Diese sind in ausreichendem Abstand zu den Ventilatoren und etwaigen strömungsbeeinflussenden Objekten zu montieren. In den einschlägigen nationalen Normen und Richtlinien ist nicht vorgegeben wie oft die Strömungsmessungen durchzuführen sind, allerdings ist in regelmäßigen Abständen zu messen, um ein funktionierendes Belüftungssystem und eine ausreichende Frischluftzufuhr zu gewährleisten.

Der Semmering-Basistunnel verläuft zwischen Gloggnitz in Niederösterreich und Mürzzuschlag in der Steiermark und ist insgesamt 27,3 km lang. Das seit 2012 in Umsetzung befindliche Projekt ist in fünf Baulose, den Portalbereich Gloggnitz, den Portalbereich Mürzzuschlag, den Tunnelabschnitt Gloggnitz (SBT 1.1), den Tunnelabschnitt Fröschnitzgraben (SBT 2.1) und den Tunnelabschnitt Grautschenhof (SBT 3.1), unterteilt. Den Auftrag für den Tunnelabschnitt Gloggnitz hat die ARGE SBT 1.1 Tunnel Gloggnitz bestehend aus der Implenia Österreich GmbH, der Hochtief Infrastructure GmbH und der Thyssen Schachtbau GmbH erhalten. Das insgesamt 7,4 km lange Baulos ist in zwei Baustellen, den Portalbereich Gloggnitz und den Zwischenangriff Göstritz unterteilt. Vom Portalbereich Gloggnitz werden zwei, ca. 4,5 km lange eingleisige Tunnelröhren konventionell mit Bagger- und Sprengvortrieb aufgefahren. Der Zwischenangriff Göstritz ist aufgrund der schwierigen geologischen Verhältnisse in diesem Bereich notwendig. Hier werden zunächst ein ca. 1 km langer Zugangstunnel mit zwei Schachtkopfkavernen und jeweiligen Verbindungstunnelröhren zu den Kavernen, sowie eine Schachtkopfüberfahrt mit zwei Schachtglocken vorgetrieben. Die Schachtglocken dienen zur Umlenkung der Seilwinden für die Schachtförderung. Anschließend werden zwei 250 m tiefe Schächte

abgeteuft und zwei für den Baubetrieb notwendige Schachtfußkavernen vorgetrieben. Von den Kavernen aus werden die beiden Streckenröhren in Richtung Mürzzuschlag ca. 1500 m bis zum Anschluss an das Baulos Fröschnitzgraben und in Richtung Gloggnitz ca. 1200 m bis zum vorgesehenen Durchschlagspunkt im konventionellen Vortrieb aufgeföhren. Zusätzlich dazu werden noch 16 Querschläge im Abstand von maximal 500 m zwischen den beiden Streckenröhren hergestellt. Die Fertigstellung des Tunnels ist für das Jahr 2026 und die Inbetriebnahme für das Jahr 2027 geplant. [13] In Abb. 7-1 sind alle Untertagebauwerke des Bauloses dargestellt.

Zum Stand im Oktober 2020 ist die Tunnelröhre Gleis 1 vom Portal Gloggnitz 3450 m und die Tunnelröhre Gleis 2 3770 m im vollen Querschnitt vorgetrieben. Ungeföhhr 2000 m der Innenschale ist im Gleis 2 fertiggestellt. Die Querschläge 1 bis 7 sind ebenfalls bereits aufgeföhren, in den Querschlägen 1, 2 und 4 ist bereits die Innenschale eingebaut. Aufgrund eines Verbrauchs an der Ortsbrust von Gleis 1 im April 2019 konnte der Querschlag 8, der logistisch für den Schutterbetrieb notwendig war, nicht aufgeföhren werden. Daher wurde zusätzlich zu den geplanten Querschlägen ein weiterer Querschlag (7A) hergestellt. Beim Zwischenangriff Göstritz sind der Zugangstunnel, die Schachtkopfkavernen, die Schachtkopfüberfahrt inklusive Schachtglocken, die Schächte und die beiden Schachtfußkavernen fertig gebaut. In den Schachtglocken werden die Seilwinden für den Personenkorb, den Skip zum Schuttern und der Schachtarbeitsbühne umgelenkt. Derzeit findet der Vortrieb der Streckenröhren Richtung Gloggnitz und die logistischen Vorarbeiten für den Vortrieb Richtung Mürzzuschlag statt. In Zusammenarbeit mit den zuständigen Personen der ARGE SBT 1.1 Tunnel Gloggnitz wurden im Zuge dieser Diplomarbeit Strömungsgeschwindigkeitsmessungen am gesamten Baulos durchgeführt.

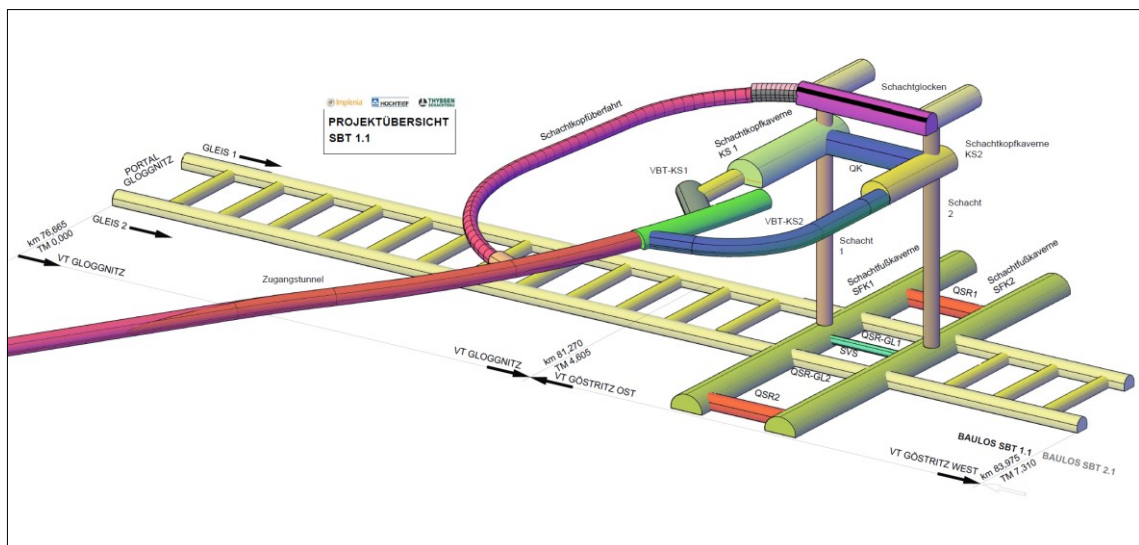


Abb. 7-1: 3D - Modell Baulos SBT 1.1 [1]

7.2 Messgeräte

Flügelradanemometer

Anemometer sind Messgeräte zur lokalen Messung der Strömungsgeschwindigkeit. Sie kommen zur Windmessung in unterschiedlichen Bereichen, zum Beispiel bei Wetterstationen oder Windkraftanlagen, zum Einsatz. Bei Flügelradanemometern wird durch ein hindurchströmendes Fluid der Rotor so schnell gedreht, dass die steil angestellten Blätter nahezu parallel angeströmt werden. Die gesuchte Strömungsgeschwindigkeit wird aus der Winkelgeschwindigkeit des Flügelrades berechnet, bei modernen Geräten funktioniert dies elektronisch und bei älteren Geräten wurden die Messergebnisse mechanisch auf eine skalierte Anzeige übertragen. [29] Der Durchmesser des Flügelrades variiert je nach Anwendung und Anströmgeschwindigkeit. Flügelradanemometer, wie in Abb. 5-3, kommen bei Tunnelbelüftungssystemen üblicherweise als mobile Messgeräte zum Einsatz, da sie handlich und einfach zu bedienen sind. Die Messergebnisse werden direkt am Handmessgerät abgelesen.

Für die Messungen am Baulos Gloggnitz wurden Flügelradanemometer der Firma Lambrecht meteo GmbH (Abb. 7-2) und der Firma Testo GmbH mit zugehörigen elektronischen, digitalen Handmessgeräten (Abb. 7-3) verwendet.



Abb. 7-2: Flügelradanemometer



Abb. 7-3: zugehöriges Handmessgerät

Das Handmessgerät ist durch ein Kabel mit dem Flügelradanemometer verbunden und dient zur direkten digitalen Ausgabe der Messwerte.

Prandtlsonde

Mit der Prandtlsonde wird wie bei der Staudruckmessung der Totaldruck und der statische Druck gemessen und daraus der dynamische Druck berechnet. Die Prandtlsonde besteht aus einem Rohr mit einer Öffnung an der Spitze und in gewissem Abstand zur Spitze ringförmig angeordneten seitlichen Bohrungen. Die Öffnung an der Spitze dient zur Messung des Totaldrucks, indem sie entgegen der Strömungsrichtung gerichtet wird. Der statische Druck wird über ringförmige und normal zur Strömungsrichtung stehenden Bohrungen gemessen. Die Differenz dieser beiden Drücke entspricht nach der Bernoulli-Gleichung (Gl. 4-1) der dynamische Druck. Über den dynamischen Druck lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids errechnen. [20] Das Prandtlrohr wird durch Schläuche mit einem elektronischen Anzeigegerät verbunden und je nach Anschluss der Totaldruck, der statische Druck oder beide gemessen. Die unterschiedlichen Anschlussmöglichkeiten sind in Abb. 7-4 dargestellt.

Die Messungen in den Lutten wurden mit einer Prandtlsonde durchgeführt, indem die Sonde über ein kleines Loch in die Lutte eingeführt wurde. Das Loch wurde mit einem Messer aufgeschnitten und danach mit Klebeband wieder verschlossen.

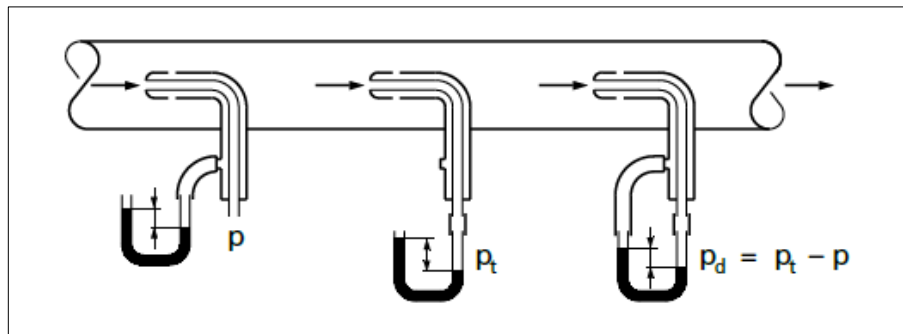


Abb. 7- 4: Anschluss der Schläuche für die Druckmessungen [22]

7.3 Bewetterungskonzept

Da sowohl beim Portalbereich Gloggnitz als auch beim Zwischenangriff Göstritz Bauarbeiten untertage stattfinden, sind dementsprechend für beide eigene Bewetterungskonzepte erforderlich. Die Planung und Dimensionierung der erforderlichen lüftungstechnischen Ausstattung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma Korfmann Lufttechnik GmbH. Am gesamten Baulos sind insgesamt über 40 Ventilatoren der Firma Korfmann Lufttechnik GmbH im Einsatz, wobei einige fix verbaut sind und andere je nach Erfordernis variabel positioniert werden. Der Großteil der verwendeten Ventilatoren sind Axialventilatoren (AL) mit Durchmessern von 800 mm bis 1700 mm und einer Leistung bis zu 250 kW. Eine weitere eingesetzte Bauart sind doppelstufige Axialventilatoren in gegenläufiger Ausführung (GAL), die im Gegensatz zu den einfachen Axialventilatoren mit zwei hintereinander geschalteten Laufrädern ausgestattet sind. Dadurch wird ein höherer Druck erzeugt.

Die erforderliche Frischluftmenge und die daraus resultierende Ventilatorleistung wurde auf Basis der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Vorgaben festgelegt. Das Bewetterungskonzept in Gloggnitz wurde abhängig vom Vortriebsfortschritt in drei Phasen unterteilt. Bei Phase 0 wurde das Konzept als drückende Bewetterung in beiden Tunnelröhren (Gleis 1 und Gleis 2) ausgeführt. Die Frischluft wurde am Portal mit zwei Ventilatoren des Typs AL 14-900 ($D = 1400$ mm, $P = 90$ kW) angesaugt und über Lutten ($D = 1,8$ m) in den Arbeitsbereich gefördert. Das Ausbruchsmaterial wurde ausschließlich mit Muldenkippern aus den beiden Tunnelröhren geschüttet. Beim Vortrieb waren zwei Muldenkipper, ein Radlader, ein Tunnelbagger und 10 Personen im Einsatz. Der erforderliche Frischluftbedarf im Tunnel wurde auf Basis der eingesetzten, dieselbetriebenen Fahrzeuge und der Personen vor Ort im Bewetterungskonzept des Bauloses [23] berechnet. In der Phase 0 ist eine Frischluftmenge von $\dot{V} = 40,2$ m³/s erforderlich.

Ab TM 750 wurde eine zunächst 500 m lange Bandanlage zum Fördern des Ausbruchsmaterials in der Tunnelröhre Gleis 1 aufgebaut. Mit fortschreitendem Vortrieb wurde die Förderbandanlage verlängert. Das Bewetterungskonzept wurde

dementsprechend umgestellt (Phase 1). Ein Radlader, ein Tunnelbagger und ein Muldenkipper waren immer noch für die Förderung von der Ortsbrust zu einem Zwischenlager bei der Bandanlage vorgeschalteten Brecher erforderlich und 10 Personen arbeiteten im Vortrieb. Der in Phase 1 berechnete Frischluftbedarf der nach wie vor drückenden Bewetterung ist $\dot{V} = 33,4 \text{ m}^3/\text{s}$. [23]

Ab TM 2000 erfolgte der Wechsel zu Phase 2, die derzeit noch angewendet wird und bis zum Durchschlag bei TM 4605 in Verwendung bleibt. Die Belüftung erfolgt mit einer Umluftbewetterung, bei der über Gleis 1 Frischluft eingeblasen und die Abluft über Gleis 2 abgeführt wird. Über, je nach Baufortschritt, ein oder zwei geöffnete Querschläge strömt die Luft von Gleis 1 in Richtung Gleis 2. Zwei Axialventilatoren (Typ AL 16-1600) am Portal von Gleis 1 saugen die erforderliche Frischluft an und beschleunigen diese. Mit einer Schleuse im Portalbereich wird gewährleistet, dass immer eine Wetterwand geschlossen bleibt und somit keine Frischluft am Portal ausströmt. Laut Bewetterungskonzept [23] ist, um die Vortriebe in Gleis 1 und Gleis 2 zu bewettern, eine Frischluftmenge von insgesamt $\dot{V} = 110 \text{ m}^3/\text{s}$ ($55 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Ventilator) in die Tunnelröhre einzubringen. Der Volumenstrom setzt sich aus $37 \text{ m}^3/\text{s}$ Frischluftbedarf im Schutterbetrieb pro Vortrieb und zusätzlich $36 \text{ m}^3/\text{s}$ zur Berücksichtigung von Querschlagsleckagen und Portalwandleckagen zusammen. Um den Luftstrom in Richtung Ortsbrust zu lenken sind die Querschläge 1-6 mit Wetterwänden versehen. Im Querschlag 5 befinden sich zwei hintereinander geschaltete Axialventilatoren (Typ AL 17-2000), die die Frischluft über eine Faltlutte ($D = 1,8 \text{ m}$; $L = 1575 \text{ m}$) in den Arbeitsbereich von Gleis 2 transportieren. $50\text{-}60 \text{ m}^3/\text{s}$ der gesamten eingebrachten Frischluft werden durch die beiden Ventilatoren angesaugt. $37 \text{ m}^3/\text{s}$ der Frischluft werden mit einem gegenläufigen Axialventilator (Typ GAL 14 900/900) bei TM 2760 mittels Faltlutte ($L = 580 \text{ m}$) Richtung Ortsbrust von Gleis 1 transportiert. Die Abluft aus Gleis 1 wird über die Querschläge 7 und 7A mit Hilfe von drei Axialventilatoren (Typ AL 8-150) Richtung Gleis 2 geblasen. Aufgrund des Überdrucks, der durch die eingeblasene Frischluft im Gleis 1 entsteht, sowie durch die Luftströmung der Ventilatoren in den Querschlägen 7 und 7A wird eine zum Tunnelportal gerichtete Strömung in Gleis 2 erzeugt.

Die Interventionskaverne (IVK), die zur Sanierung des Verbruchs errichtet wurde, wird mit einer Faltlutte ($D = 1,5 \text{ m}$; $L = 400 \text{ m}$), die an einen gegenläufigen Axialventilator (Typ GAL 12-450/450) angeschlossen ist, bewettert. Der Ventilator steht in Gleis 2 bei TM 3160 und saugt die Frischluft über den Querschlag 7 an. Um die Sprengschwaden aus dem Arbeitsbereich im Gleis 2 schneller abzusaugen, ist zusätzlich ein Axialventilator (Typ AL 8-150) bei TM 3564 mit einer Spirallutte ($D = 1,1 \text{ m}$; $L = 435 \text{ m}$) installiert. Abb. 7-5: Grundriss Umluftsystem Tunnelabschnitt Gloggnitz Phase 2. Abb. 7-5 zeigt schematisch das Bewetterungskonzept in Phase 2.

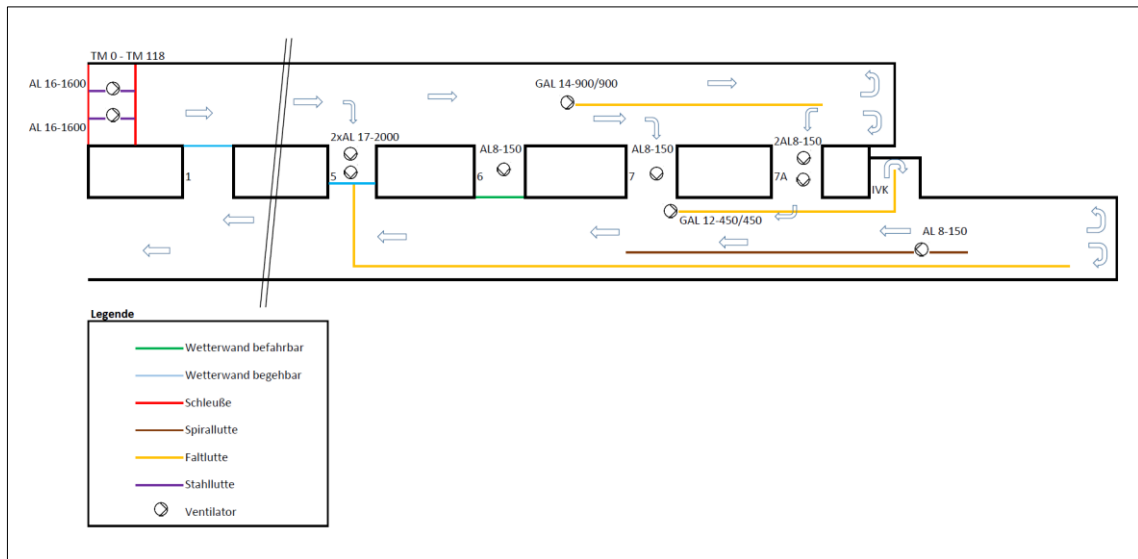


Abb. 7-5: Grundriss Umluftsystem Tunnelabschnitt Gloggnitz Phase 2

Das Bewetterungskonzept für den Zwischenangriff Göstritz ist aufgrund der unterschiedlichen Untertagebauwerke die nacheinander vorgetrieben werden komplexer, funktioniert aber nach Fertigstellung der Schächte und Schachtfußkavernen ebenfalls mit einem Umluftsystem. Insgesamt wurden fünf Phasen im Bewetterungskonzept festgelegt. Beim Vortrieb des Zugangstunnels (ZGT) wurde eine drückende Bewetterung bis zur Ortsbrust mit einem Ventilator am Portal (Typ AL 17-2500) und einer Lutte ($D = 2$ m) eingerichtet (Phase 0). Das Schüttern erfolgte mit drei Muldenkippern und 10 Personen arbeiteten im Vortrieb. Somit war laut [23] eine Frischluftmenge von $\dot{V} = 52$ m³/s erforderlich.

Nach Fertigstellung des Zugangstunnels wurden die Schachtkopfüberfahrt und die Schachtglocken aufgefahren (Phase 1). Zur Sicherstellung der Frischluftversorgung beim Vortrieb dieser Untertagebauwerke wurde ein zweiter Luttenstrang ($D = 2$ m) mit einem Ventilator (Typ AL 17-2500) am Portal montiert. Aufgrund beengter Platzverhältnisse wurde nur mit einem Radlader geschüttet und sechs Personen arbeiteten im Vortrieb. Die erforderliche Frischluftmenge bei der ebenfalls drückenden Bewetterung betrug $\dot{V} = 13,8$ m³/s. [23] Aufgrund des wachsenden Frischluftbedarfs im Zuge der darauffolgenden Vortriebe der Schachtkopfkavernen, sowie der Schächte wurde der Ventilator am Portal überdimensioniert. Laut Hersteller ist ein maximaler Volumenstrom von $\dot{V} = 70$ m³/s möglich.

Nach Ausbruch der beiden Schachtkopfkavernen (KS1 und KS2) sowie der Querkaverne (QK) wurde in Phase 2 auf eine Umluftbewetterung umgestellt. Dazu wurden die beiden bestehenden und ein neuer Luttenstrang ($D = 2,4$ m) in die Schachtkopfkaverne 2 geführt. Von dort strömte die Luft über die Querkaverne in Richtung KS 1 und durch den Zugangstunnel wieder zum Portal. Die Schachtglocken wurden mit zwei Axialventilatoren (Typ AL 10-330) und Spirallutten ($D = 1,1$ m)

ausgestattet, die im späteren Schachtförderbetrieb diesen Bereich mit Frischluft versorgen. Die Frischluft wird von der KS2 über den Schacht 2 angesaugt. Zusätzlich dazu wurde ein Axialventilator (Typ AL 12-550) mit einer Faltlutte ($D = 1,5 \text{ m}$) in der Schachtkopfüberfahrt eingebaut, der die verbrauchte Luft in Richtung Zugangstunnel fördert. Abb. 7-6 zeigt schematisch das Bewetterungskonzept in Phase 2.

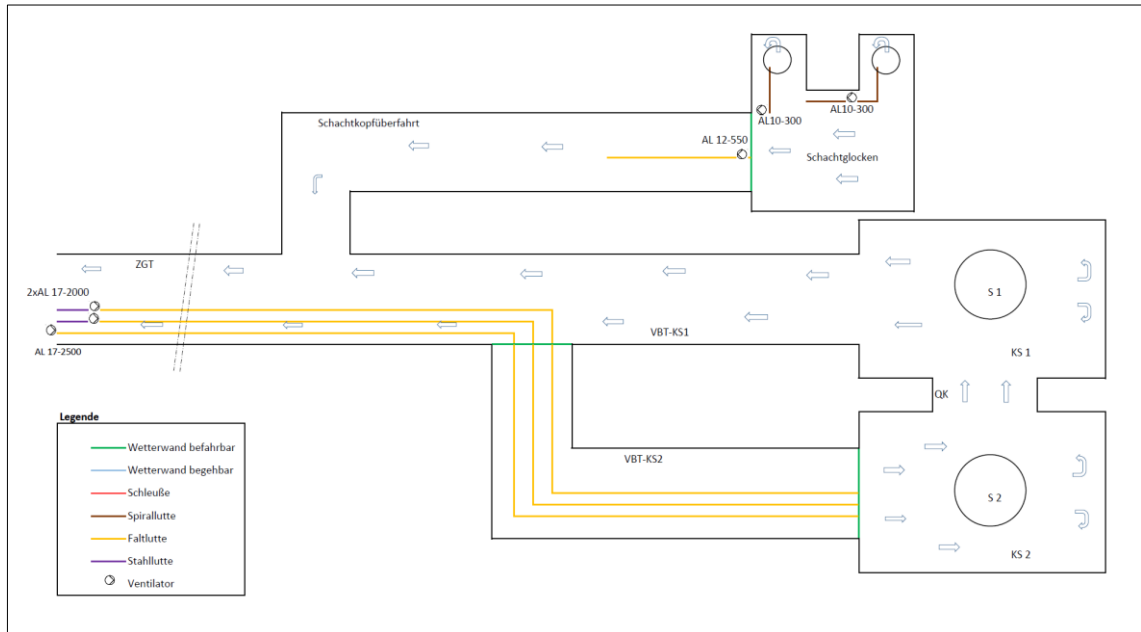


Abb. 7-6: Grundriss Umluftsystem Zwischenangriff Göstritz Phase 2

Für das Abteufen der Schächte wurde eine drückende Bewetterung in den Schächten eingerichtet. Dazu wurden zwei Axialventilatoren in der Schachtkopfkaverne 2 installiert und mit Lutten beide Schächte belüftet. Für die Berechnung der maximal benötigten Frischluftmenge wurde das Auswettern nach einer Sprengung zugrunde gelegt. Hierbei ist ein Austausch der fünffachen Luftmenge des Arbeitsbereichs, der untersten 40 m im Schacht innerhalb von 10 Minuten zu gewährleisten. Die erforderliche Frischluftmenge pro Schacht ergab sich demnach durch [23]:

$$A * H * 5 = V; \frac{V}{t} = \dot{V} \quad \text{Gl. (5-1)}$$

- A...Querschnittsfläche in m^2
- H...Höhe in m
- V...Volumen in m^3
- t...Zeit in s
- \dot{V} ...Volumenstrom in m^3/s

Somit ergibt sich bei einer Querschnittsfläche A von 50 m^2 (mit $D = 8 \text{ m}$) und einer Höhe H von 40 m ein Volumen V von 10000 m^3 . Die erforderliche Frischluftmenge ist bei einer Zeit t von 10 Minuten $\dot{V} = 16,75 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nach Fertigstellung der Schächte und des Schachtverbindungsstollens (SVS) wurde eine Umluftbewetterung eingerichtet (Phase 3). Diese bleibt während des Auffahrens der Schachtfußkavernen und der vier Vortriebe der Tunnelröhren in Richtung Gloggnitz und Fröschnitzgraben bis zum Durchschlag in Betrieb. Über Schacht 2 erfolgt die Frischluftzufuhr und über Schacht 1 und den Zugangstunnel wird die Abluft abgeführt. Die Frischluftzufuhr über die drei Luttenstränge bleibt aus Phase 2 erhalten. Beim Auffahren der Schachtfußkavernen waren ein Tunnelbagger, zwei Radlader und 10 Personen im Einsatz. Die erforderliche Frischluftmenge betrug $\dot{V} = 16,6 \text{ m}^3/\text{s}$. [23]

Während der Strömungsgeschwindigkeitsmessungen war der Vortrieb der Schachtfußkavernen (SFK1 und SFK2) und der Querschläge (QSR1, QSR2, QSR-GL1 und QSR-GL2) größtenteils abgeschlossen. Parallel fanden Vorbereitungsarbeiten für den Beginn der Vortriebe der Tunnelröhren Gleis 1 und Gleis 2 statt. Währenddessen wurden ca. $60 \text{ m}^3/\text{s}$ Frischluft in die Kavernen eingebracht. Die Verteilung der Frischluft in den Schachtfußkavernen erfolgte mit sechs mobilen Axialventilatoren, die je nach Bedarf beliebig, montiert an den Ulmen, positioniert wurden. Zwei Axialventilatoren befanden sich im QSR-GL2, zwei Axialventilatoren im QSR-GL1 und ein Axialventilator im SVS, alle mit der gleichen Bauart (Typ AL 8-150). Ein Axialventilator (Typ AL 12-550) wurde im QSR1 montiert. Sie alle erzeugten eine Luftströmung in Richtung ausziehendem Schacht S1. Da mit dem Streckenvortrieb des Gleis 2 in Richtung Fröschnitzgraben begonnen wurde, wurde dort der Vortrieb mit einem Axialventilator (Typ AL 8-150) bewettert. Abb. 7-7 zeigt schematisch das Umluftsystem in den Schachtfußkavernen der Phase 3.

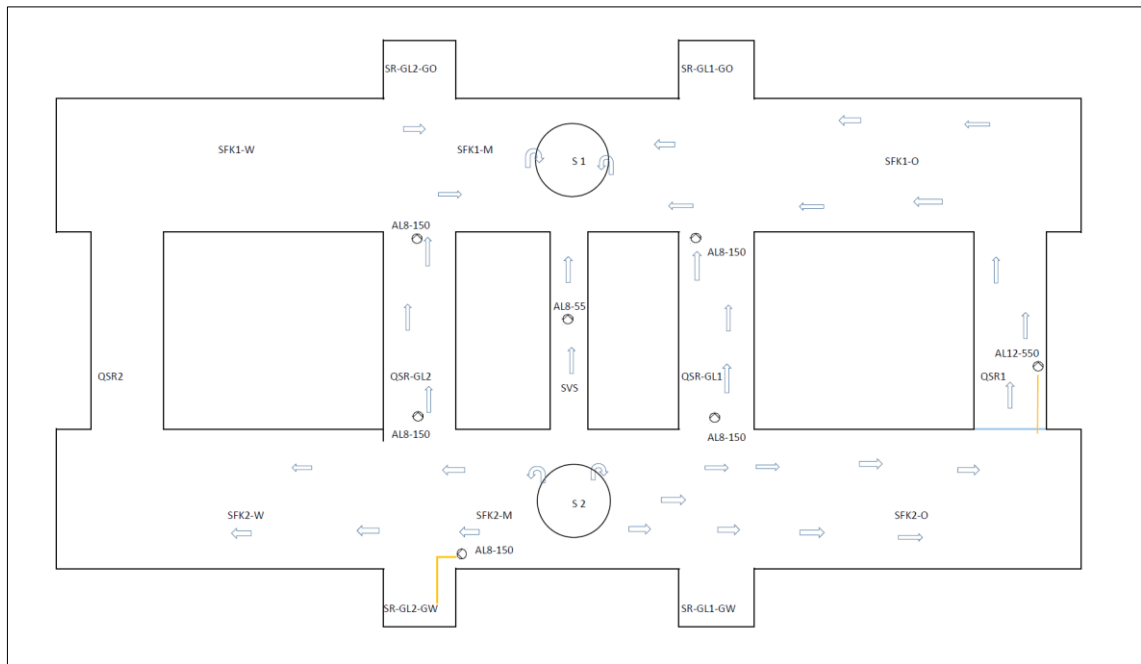


Abb. 7- 7: Grundriss Umluftsystem in den Schachtfußkavernen Phase 3

Sobald die anderen drei konventionellen Streckenvortriebe starten, wird in Phase 4 der Schacht 2 mit Wetterwänden eingehaust und sechs weitere Axialventilatoren (4 AL 16-1100 und 2 AL 8-150) in der Einhausung installiert, die genaue Position ist in Abb. 5–20 ersichtlich. Vier der montierten Axialventilatoren (Typ AL 16-1100) verbringen die Frischluft über eine Faltlutte (D = 1,8 m) zur Ortsbrust der Vortriebe. Zwei kleinere Axialventilatoren (Typ AL 8-150) versorgen die Schachtfußkavernen und die Querschläge mit Frischluft. Die Frischluftzufuhr funktioniert wie in den beiden vorigen Phasen über die drei Luttenstränge. Jeder Vortrieb ist laut [23] mit einer Frischluftmenge von $\dot{V} = 43,5 \text{ m}^3/\text{s}$ zu versorgen, was in Summe einen Wert von $\dot{V} = 174 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt. Pro Vortrieb sind ein Radlader, ein Tunnelbagger, zwei Muldenkipper, sowie 10 Personen im Einsatz. Das Ausbruchsmaterial von den Vortrieben in Richtung Fröschnitzgraben wird mit Muldenkippern zum Skip in Schacht 2 und das Ausbruchsmaterial der Vortriebe in Richtung Gloggnitz wird mit Muldenkippern zum Skip in Schacht 1 transportiert. Mit den Skips wird das Material in die Schachtkopfkavernen und von dort mit einer Bandanlage auf die Baustelleneinrichtungsfläche gefördert. Abb. 7-8 zeigt schematisch das Umluftsystem in den Schachtfußkavernen der Phase 4.

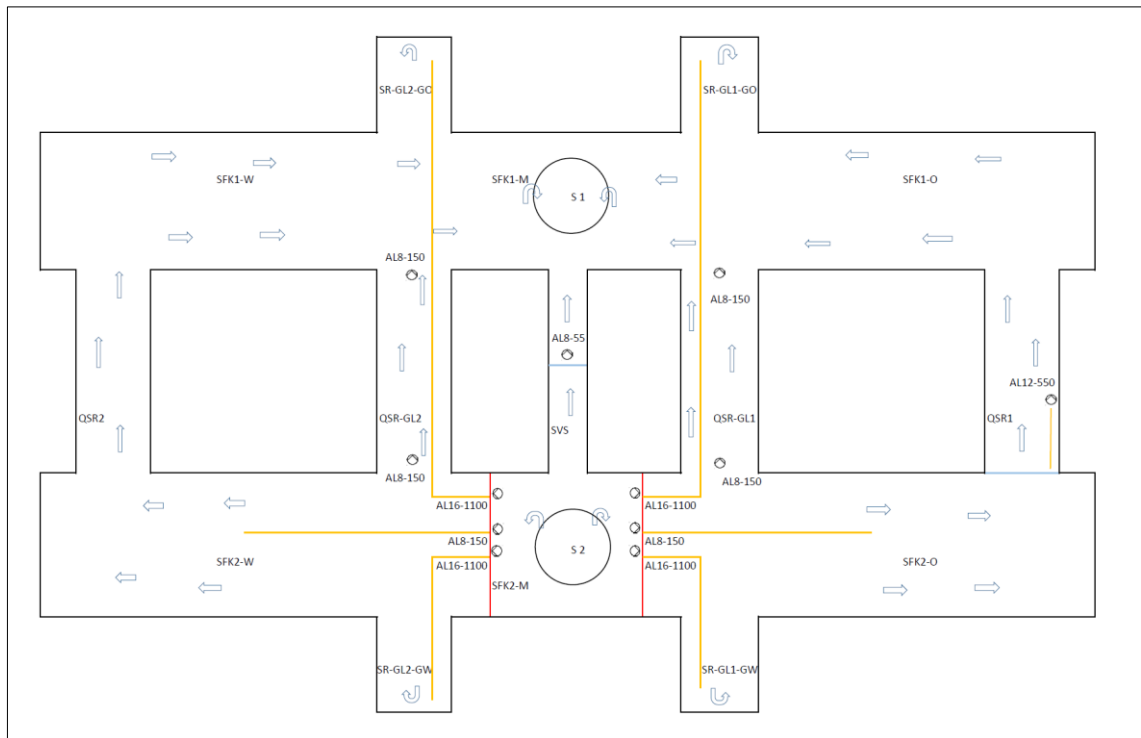


Abb. 7-8: Grundriss Umluftsystem in den Schachtfußkavernen Phase 4

7.4 Messaufbau und Messprogramm

Neben den Luftqualitätsmessungen, wie Sichttrübe- oder Gasmessungen, sind während der Bauphase Strömungsgeschwindigkeitsmessungen durchzuführen um die Funktionsfähigkeit der Bewetterungssysteme zu überprüfen. Besonders auf Leckagen z.B. durch Beschädigungen an Lutten ist zu achten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden in Zusammenarbeit mit der ARGE SBT 1.1 und der Firma Korfmann Lufttechnik GmbH Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten am gesamten Baulos durchgeführt.

Die Messungen werden an mehreren Stellen im Tunnel mit einer sogenannten „Schleifenmessung“ durchgeführt. Dabei wird das an einer Stange befestigte Flügelradanemometer schleifenförmig über den gesamten Querschnitt bis zu einem Abstand von ca. 50 cm zum Hohlraumrand bewegt. Das Handmessgerät speichert alle 2 s den Wert der zu diesem Zeitpunkt gemessenen Strömungsgeschwindigkeit. Die Messdauer pro Querschnitt beträgt 60 s und aus den 30 Werten dieser Zeitspanne wird der Mittelwert berechnet. Dies entspricht der mittleren Luftströmungsgeschwindigkeit über den gesamten Querschnitt. Um zu überprüfen welche Luftströmung tatsächlich z.B. in Arbeitsbereichen vorhanden ist, werden über die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten und die Querschnittsflächen Volumenströme berechnet. Diese werden mit den Werten der Bewetterungskonzepte verglichen und über auftretende Abweichungen Leckagen festgestellt.

Zusätzlich zu den Strömungsgeschwindigkeiten in den Querschnitten wurde im Zwischenangriff Göstritz in den drei Lutten, die vom Portal des Zugangstunnels bis zur Schachtkopfkaverne verlaufen, der statische Druck und die Strömungsgeschwindigkeiten gemessen. Die fünf Messungen wurden am Luttenanfang, -ende und im Bereich der Abzweigung zum VBT-KS2 durchgeführt. Dadurch wurden Leckagestellen und Druckverluste festgestellt.

Die Strömungsgeschwindigkeit wurde in allen aufgefahrenen Tunnelröhren und Querschlägen im Querschnitt schleifenförmig gemessen und über die zugehörige Fläche der Volumenstrom berechnet. Die Regelquerschnittsflächen sind in Abb. 7-9 und Abb. 7-10 dargestellt. In allen Untertagebauwerken ist die Außenschale mit Spritzbeton hergestellt, Unterschiede in der Querschnittsfläche ergeben sich durch die unterschiedliche Sohlauauffüllung und durch die teilweise eingebaute Innenschale. In Gleis 1 ist bis TM 2500 die Fahrbahn betoniert (Querschnittsfläche $A = 56,0 \text{ m}^2$) und danach bis zur Ortsbrust die Sohle mit Ausbruchsmaterial aufgeschüttet ($A = 51,0 \text{ m}^2$). In Gleis 2 ist bis TM 2000 die Innenschale bei einer Querschnittsfläche von $A = 46 \text{ m}^2$ eingebaut und danach ebenfalls die Sohle aufgeschüttet ($A = 51,0 \text{ m}^2$). Alle Querschläge haben ohne Innenschale eine Querschnittsfläche von $A = 22,0 \text{ m}^2$, bei Querschlag 4 ist diese bereits eingebaut ($A = 20,5 \text{ m}^2$). Der Zugangstunnel im Zwischenangriff Göstritz hat ebenfalls eine Querschnittsfläche von $A = 56,0 \text{ m}^2$, die Schachtkopfüberfahrt und die Schachtglocken haben Flächen von $A = 30,5 \text{ m}^2$ und $A = 98,6 \text{ m}^2$. Die Querkaverne hat eine Querschnittsfläche von $A = 108,8 \text{ m}^2$. Die Werte der Schachtkopf- und Schachtfußkavernen sind nicht angegeben, da in diesen Bereichen keine Messungen durchgeführt wurden. Die Querschläge zwischen den Schachtfußkavernen haben den selben Querschnitt wie Gleis 1 mit betonierter Fahrbahn ($A = 56,0 \text{ m}^2$). Die Schächte haben bei einem Durchmesser von $D = 8,0 \text{ m}$ eine Querschnittsfläche von $A = 50,3 \text{ m}^2$. Die Innenschale ist im Zwischenangriff Göstritz in keiner der Tunnelröhren eingebaut.

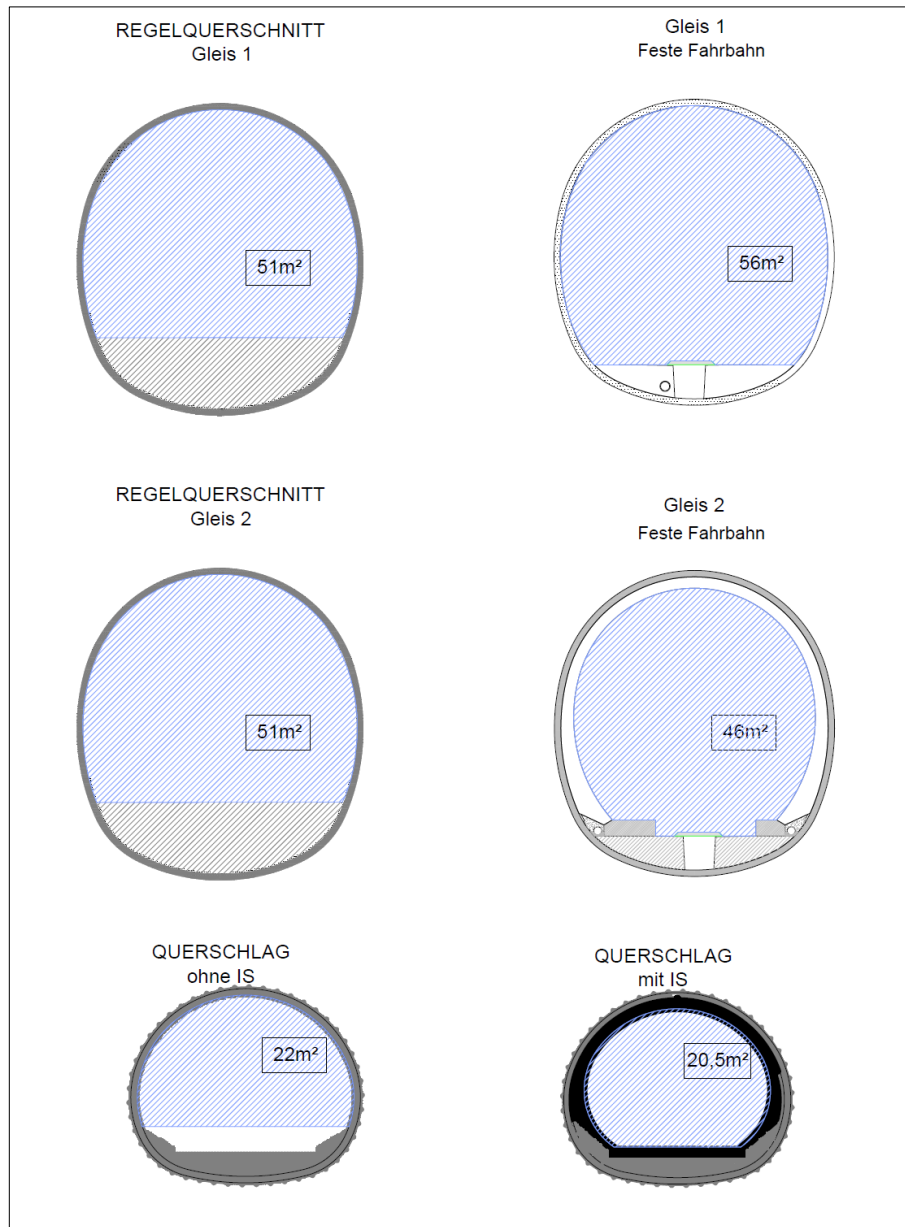


Abb. 7-9: Querschnittsflächen Tunnelabschnitt Gloggnitz [2]

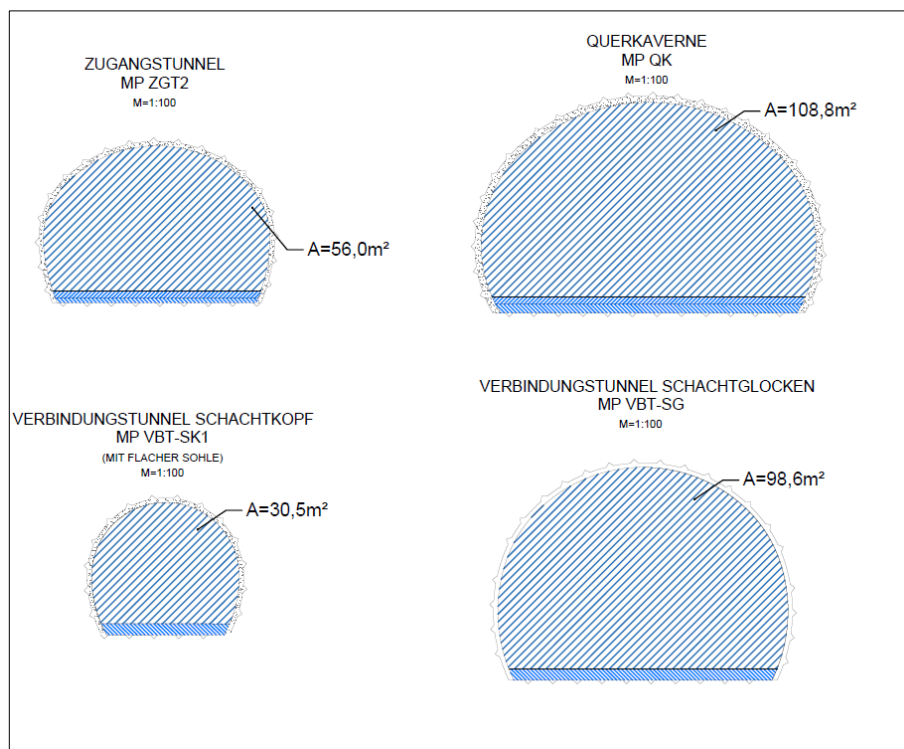


Abb. 7-10: Querschnittsflächen Zwischenangriff Göstritz [2]

7.5 Messergebnisse

Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten entsprechen den Mittelwerten der Schleifenmessungen für jeden Standpunkt bei einer Messdauer von jeweils 60 s. Mit der jeweiligen Regelquerschnittsfläche wird der zugehörige Volumenstrom berechnet. Die Messungen im Tunnelabschnitt Gloggnitz wurden am 27.05.2020 und am 11.08.2020 durchgeführt. Gemessen wurde jeweils in beiden Tunnelröhren (GL 1 und GL 2) und in fünf der acht fertiggestellten Querschlügen (QS 1 – 7A). In den Querschlügen 1, 2 und 5 waren keine Messungen möglich, da in QS 1 und QS 2 einige Geräte und Baumaterialien untergebracht sind und in QS 5 die beiden Ventilatoren zur Bewetterung von Gleis 2 stehen (Abb. 7-11).



Abb. 7-11: Ventilatoren in QS 5

Bei den Messungen am 27.05.2020 wurde zusätzlich die Strömung nach einer Sprengung überprüft um festzustellen, ob die Absaugung der Schwaden funktioniert. Die Auswertung der Messungen sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 zusammengefasst.

Messung	Ort	TM	Geschw. c	Querschnitt A	Volumenstrom \dot{V}
		m	m/s	m ²	m ³ /s
1	GL 1	280	0,6	56,0	33,6
2	GL 1	430	0,6	56,0	33,6
3	GL 1	470	0,5	56,0	28,0
4	GL 1	590	0,6	56,0	33,6
5	GL 1	835	0,7	56,0	39,2
6	GL 1	900	0,6	56,0	33,6
7	QS 3		0,3	22,0	6,6
8	QS 3		1,0	22,0	22,0
9	GL 1	1220	1,5	56,0	84,0
10	GL 1	1310	1,5	56,0	84,0
11	GL 1	1715	1,4	56,0	78,4
12	GL 1	1795	1,4	56,0	78,4
13	QS 4		0,1	20,5	2,1
14	GL 1	2090	1,5	56,0	84,0
15	GL 1	2160	0,6	56,0	33,6
16	GL 1	2580	0,9	51,0	45,9
17	GL 1	2630	0,8	51,0	40,8
18	QS 6		0,2	22,0	4,4
19	GL 1	2760	0,8	51,0	40,8
20	GL 1	2780	0,3	51,0	15,3
21	GL 1	3050	0,3	51,0	15,3
22	QS 7		-0,8	22,0	17,6
23	GL 1	3120	0,5	51,0	25,5
24	GL 2	3130	1,1	51,0	56,1
25	QS 7		0,8	22,0	17,6
26	GL 2	3320	0,1	51,0	5,1
27	GL 2	3290	0,7	51,0	35,7
28	QS 7A		1,8	22,0	39,6
29	QS 7A		0,0	22,0	0,0
30	GL 2	3450	0,2	51,0	10,2
31	GL 2	3140	0,7	51,0	35,7
32	GL 2	3170	0,6	51,0	30,6
33	QS 7A		0,1	22,0	2,2
34	GL 2	3320	0,6	51,0	30,6
35	GL 2	3610	0,4	51,0	20,4
36	GL 1	2150	0,8	56,0	44,8
37	GL 1	2095	1,5	56,0	84,0

Tabelle 10: Auswertung der Messungen Tunnelabschnitt Gloggnitz 27.05.2020

Bei den Messungen 1 bis 6 liefen die beiden Ventilatoren am Portal nur mit einer Drehzahl von 1200 1/min und nicht wie üblich mit 2700 1/min, da Arbeiten im Bereich der Ventilatoren stattfanden. Dadurch wurden nur rund 34 m³/s Frischluft eingebracht. Bei den Messungen 7 und 8 im QS 3 wurde zuerst ein Tor in der Wetterwand geöffnet und bei Messung 8 die Tore beider Wetterwände, um zu überprüfen, wie viel Volumenstrom dadurch verloren geht. Nach Messung 8 waren die Arbeiten im Bereich der Ventilatoren abgeschlossen und die Frequenz der Portallüfter wurde auf 2700 1/min erhöht. Der Messquerschnitt 15 war hinter den beiden Ventilatoren in QS 5, die Gleis 2 mit Frischluft versorgen. Durch die berechneten Volumenströme von Messung 14 und 15 ist erkennbar, dass die Ventilatoren ca. 50m³/s Frischluft von Gleis 1 nach Gleis 2 fördern. Bis QS 5 traten kaum Leckagen auf, die angesaugte Frischluft strömte ohne signifikante Verluste zu den Ventilatoren in QS 5 bzw. weiter in Gleis 1 (Messungen 9 bis 21). Die Schwankungen der Geschwindigkeiten und Volumenströme bei den Messungen 15 bis 17 folgten aus den in der Realität abweichenden Querschnittsflächen aufgrund der unterschiedlich hoch aufgeschütteten Sohle, sowie aus Messungenauigkeiten. Messquerschnitt 20 war hinter dem Ventilator, der den Ortsbrustbereich in Gleis 1 bewettert. Dieser saugte ca. 25 m³/s an. Um die Mindestgeschwindigkeit von 0,3 m/s hinter dem Ventilator in Gleis 1 zu gewährleisten, ist eine höhere Frischluftmenge am Portal einzublasen. Bei Messung 22 wurde eine Strömung von Gleis 2 in Richtung Gleis 1 festgestellt, obwohl diese laut Bewetterungskonzept umgekehrt geplant ist. Bei Messung 28 war der Ventilator im QS 7A eingeschaltet. Dadurch entstand eine Zirkulation der Luft zwischen QS 7 und QS 7A, weil der Ventilator die Abluft von Gleis 2 wieder über den QS 7 ansaugte. Dies erklärt auch die umgekehrte Strömungsrichtung bei Messung 22. Die Messungen 31 bis 37 wurden nach einer Sprengung durchgeführt. Daraus wurde geschlossen, dass der Ventilator zur Absaugung der Sprengschwaden zu aktivieren ist, aber wieder abzuschalten ist sobald die Vortriebsarbeiten fortgesetzt werden. Denn nach den 15 Minuten, die zur Absaugung der Schwaden eingeplant sind, wird hauptsächlich die zugeführte Frischluft über die Lutte abgesaugt. Dadurch strömt ein geringerer Volumenstrom durch den Tunnelquerschnitt und somit ist die Strömungsgeschwindigkeit vom Arbeitsbereich bis zum Luttenende zu gering.

Messung	Ort	TM	Geschw. c	Querschnitt A	Volumenstrom \dot{V}
		m	m/s	m ²	m ³ /s
1	GL 1	280	1,4	56,0	76,7
2	GL 1	600	1,3	56,0	72,8
3	GL 1	700	1,4	56,0	76,2
4	QS 2		0,1	20,5	2,1
5	GL 1	900	1,3	56,0	73,9
6	GL 1	1200	1,3	56,0	71,7
7	QS 3		0,5	22,0	11,7
8	GL 1	1300	1,3	56,0	73,9
9	GL 1	1700	1,2	56,0	65,5
10	QS 4		0,1	20,5	2,1
11	GL 1	1800	1,1	56,0	61,0
12	GL 1	2100	1,2	56,0	65,5
13	GL 1	2200	1,2	56,0	65,5
14	GL 1	2590	1,0	56,0	58,2
15	QS 6		0,0	22,0	0,0
16	GL 1	2640	1,0	51,0	52,5
17	GL 1	2730	1,1	51,0	58,1
18	GL 1	2835	0,9	51,0	45,9
19	GL 1	2960	0,9	51,0	44,4
20	GL 1	3290	-0,7	51,0	36,7
21	QS 7A		0,5	22,0	11,2
22	QS 7		1,3	22,0	28,2
23	IVK		0,3	51,0	15,3
24	IVK		0,0	51,0	0,0
25	GL 2	3270	0,2	51,0	11,7
26	GL 2	3120	1,1	51,0	57,6
27	GL 2	2680	1,1	51,0	55,6
28	GL 2	2600	1,1	51,0	57,6
29	GL 2	3440	0,8	51,0	39,8
30	GL 2	3270	0,8	51,0	42,8
31	GL 2	1800	1,3	46,0	58,4
32	GL 2	950	1,5	46,0	69,0
33	GL 2	200	1,5	46,0	68,1
34	GL 2	100	1,3	54,0	69,1

Tabelle 11: Auswertung der Messungen Tunnelabschnitt Gloggnitz 11.08.2020

Bei diesen Messungen liefen die Ventilatoren am Portal mit 2400 1/min Drehzahl. Bei Messung 7 war das Tor in der Wetterwand zu Gleis 1 aufgrund von Schalarbeiten geöffnet. Dadurch wurde der laminare Luftstrom in Gleis 1 lokal beim Tor zu QS 3 unterbrochen und geringe Verluste traten auf. Die Ventilatoren im QS 5 waren aufgrund von Reparaturarbeiten an der Lutte nicht eingeschaltet. Außer bei QS 3 traten bis QS 6 kaum Leckagen auf, die angesaugte Frischluft strömte ohne

signifikante Verluste weiter in Gleis 1 bis zum Ventilator bei TM 2760 (Messungen 1 bis 17). Messung 18 war hinter dem Ventilator, der den Arbeitsbereich in Gleis 1 bewettert. Dieser war mit 1500 1/min eingeschaltet und saugte ca. 15 m³/s an. Die Messung 20 wurde zwischen der Ortsbrust von Gleis 1 und QS 7A durchgeführt, dementsprechend strömte die Luft weg von der Ortsbrust zurück in Richtung QS 7A. Über QS 7A und QS 7 strömte die Luft aufgrund des Überdrucks von Gleis 1 in Richtung Gleis 2 (Messung 21 und 22). Zusätzlich steht in Gleis 2 ein Ventilator, der über QS 7 die IVK bewetterte. Dieser unterstützte die Strömung von Gleis 1 Richtung Gleis 2. Wenn die Lüfter in QS 5 abgeschaltet sind wird der Ortsbrustbereich von Gleis 2 nicht drückend bewettert. Daher entwickelt sich erst ab ca. TM 3250 eine Strömung in Richtung Portal, weil ab TM 3300 die Luft vom QS 7A in den Gleis 2 strömt. Dies ist durch die Messungen 25 bis 28 erkennbar. Ab Messung 29 waren die Ventilatoren in QS 5 mit 1800 1/min wieder eingeschaltet. Dadurch wurde der Ortsbrustbereich in Gleis 2 mit einem Volumenstrom von ca. 40 m³/s versorgt und die Strömung in Richtung Portal bis zum QS 7A war ebenfalls wieder vorhanden (Vergleich Messung 28 und 30). Mit rückschreitendem TM nimmt der Volumenstrom in Gleis 2 kontinuierlich zu, erkennbar durch die Messungen 31 bis 34.

Die Messungen im Zwischenangriff Göstritz fanden am 26.05.2020 und am 06.08.2020 statt. Gemessen wurde im Zugangstunnel, in den Schachtglocken, in der Schachtkopfüberfahrt, im einziehenden Schacht 2 und in den Querschlägen zwischen den Schachtfußkavernen. Im Zuge der ersten Messreihe wurden die Druck- und Geschwindigkeitsmessungen in den drei Lutten durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 12, Tabelle 13 und Tabelle 14 zusammengefasst.

Messung	Ort	TM	Geschw. c	Querschnitt A	Volumenstrom \dot{V}
		m	m/s	m ²	m ³ /s
1	ZGT	50	2,5	56,0	140,0
2	ZGT	70	2,4	56,0	134,4
3	ZGT	90	2,5	56,0	140,0
4	VBT-SK1	859	0,3	30,5	9,2
5	ZGT	890	1,0	56,0	56,0
6	VBT-KS2	50	0,2	56,0	11,2
7	S 2	20	1,2	50,3	60,4
8	QK	Tor	0,6	22,5	13,5
9	QSR GL 1	25	0,6	56,0	33,6
10	QSR 1	25	1,2	56,0	67,2
11	QSR GL 2	25	1,5	56,0	84,0
12	QSR GL 2	25	0,6	56,0	33,6
13	ZGT	950	0,8	56,0	44,8

Tabelle 12: Auswertung der Messungen Zwischenangriff Göstritz 26.05.2020

Alle drei Ventilatoren am Portal waren mit 1500 1/min eingeschaltet. Dadurch wurden rund 90 m³/s Frischluft angesaugt, allerdings wurde im Zugangstunnel ein ausziehender Volumenstrom von 140 m³/s ermittelt (Messung 1 bis 3). Da die Ventilatoren während den Messungen mit einer niedrigeren Frequenz als üblich liefen, stimmten die Werte der ein- und ausziehenden Luft nicht überein. In der Schachtkopfüberfahrt wurde eine geringe Strömung in Richtung Zugangstunnel gemessen (Messung 4). Die Ventilatoren in der Schachtglocke waren abgeschaltet, daher wurde keine Messung durchgeführt. Durch die Messungen 5 und 13 im ZGT ist eine Zunahme der Abluftmenge mit rückschreitendem TM erkennbar, dies zeigt einen funktionierenden Abluftstrom vom Schacht 1 in Richtung Portal. Bei Messung 6 wurde die Strömung in der Schleuse, die im Verbindungstunnel zur Schachtkopfkaverne 2 eingerichtet ist, überprüft. Messung 7 wurde direkt im einziehenden Schacht 2 in 20 m Tiefe vom Personenkorb aus durchgeführt. Rund 60 m³/s Frischluft ziehen in die Schachtfußkavernen, der Rest der eingebrachten Luft zirkuliert in den Schachtkopfkavernen. Die Frischluftversorgung der Schachtfußkavernen war für die zum damaligen Zeitpunkt durchgeführten Arbeiten ausreichend. Eine Messung im ausziehenden Schacht 1 war aufgrund eines Umbaus der Schachtförderanlage nicht möglich. Messung 8 wurde im offenen Tor der eingebauten Wetterwand in der Querkaverne durchgeführt. Die Luft strömte von der Schachtkopfkaverne 1 in Richtung Schachtkopfkaverne 2. Das heißt, dass ein Teil der Luft zwischen den beiden Schächten zirkuliert und Abluft aus Schacht 1 wieder über Schacht 2 in die Schachtfußkaverne gefördert wird. Bei dem Umfang an Arbeiten in der Schachtfußkaverne ist dies kein großes Problem, wenn allerdings mehrere Vortriebe gleichzeitig laufen, ist diese Zirkulation unbedingt zu vermeiden. Daher ist das Tor in der Querkaverne immer zu schließen. Die Luft strömt in allen Querschlägen der Schachtfußkavernen (Messung 9 bis 12) von SFK 2 in Richtung SFK 1. Im Querschlag QSR 2 waren damals mehrere Maschinen abgestellt, weshalb der Platz für eine Messung zu gering war.

Messung	Ort	TM	Geschw. c	Querschnitt A	Volumenstrom \dot{V}	stat. Druck P
Lutte 1		m	m/s	m ²	m ³ /s	Pa
1	ZGT	100	6,5	4,5	29,4	1150
2	ZGT	859	4,8	4,5	21,7	1000
3	ZGT	910	4,5	4,5	20,4	1030
4	VBT- KS2	10	1,8	4,5	8,1	40
5	VBT- KS2	100	4,3	4,5	19,5	25
Lutte 2						
1	ZGT	100	10,2	3,1	32,0	700
2	ZGT	859	3,8	3,1	11,9	300
3	ZGT	910	3,5	3,1	11,0	280
4	VBT- KS2	10	3,5	3,1	11,0	175
5	VBT- KS2	100	6,4	3,1	20,1	40
Lutte 3						
1	ZGT	100	8,2	3,1	25,8	1330
2	ZGT	859	6,9	3,1	21,7	570
3	ZGT	910	6,8	3,1	21,4	380
4	VBT- KS2	10	4,7	3,1	14,8	-
5	VBT- KS2	100	6,7	3,1	21,0	60

Tabelle 13: Auswertung der Luttenmessungen Zwischenangriff Göstritz 26.05.2020

Insgesamt wurde über die Lutten ein Volumenstrom von 60,6 m³/s in die Schachtkopfkaverne 2 gefördert. Die Abnahme der Geschwindigkeit und des statischen Druckes mit zunehmender Länge im Zugangstunnel war bei Lutte 2 höher als bei den anderen beiden (Vergleich Messung 1 mit Messung 2 und 3). Der Grund dafür war eine aufgerissene Verbindungsstelle zweier Luttenelemente, die zu einer Leckage führte (Abb. 7-12).



Abb. 7-12: Leckagestelle bei Lutte 2

Eine Problemstelle ist die Abzweigung vom ZGT in den Verbindungstunnel VBT-KS2, da dort eine Kurve mit kleinem Radius auftritt. Bei Messung 4 wurden statische Drücke von 40 - 175 Pa und Geschwindigkeiten von 1,8 - 4,7 m/s gemessen. Die hohen Schwankungen im Vergleich zu den Messungen davor und danach treten aufgrund der Verwirbelungen in der Strömung infolge der Krümmung der Lutten auf. Am Ende der Lutte wurden statische Drücke von 25 - 60 Pa und Geschwindigkeiten von 4,3 - 6,7 m/s gemessen. Hier ist darauf zu achten, dass beim Anschluss der Lutten an die Wetterwand der Luttenquerschnitt nicht verringert wird. Um bei der Montage die Lutte leichter durch die Öffnung in der Wetterwand zu führen, wird das Ende oft mit Seilen zusammengebunden. Im Zuge der Messungen wurden diese Seile gelöst, um den Luttenquerschnitt wieder zu vergrößern (Abb. 7-13).



Abb. 7-13: Anschluss der Lutte an die Wetterwand

Messung	Ort	TM	Geschw. c	Querschnitt A	Volumenstrom \dot{V}
		m	m/s	m ²	m ³ /s
1	ZGT	100	2,7	56,0	153,4
2	ZGT	200	2,5	56,0	141,1
3	ZGT	400	2,1	56,0	115,4
4	ZGT	500	2,0	56,0	109,8
5	ZGT	645	1,8	56,0	98,0
6	ZGT	695	1,6	56,0	91,3
7	ZGT	810	1,5	56,0	82,9
8	SG2		0,0	98,6	0,0
9	SG1		0,0	98,6	0,0
10	VBT-SK1	240	0,0	30,5	0,0
11	VBT-SK1	200	0,3	30,5	10,1
12	VBT-SK1	50	0,4	30,5	11,9
13	VBT-SK1	105	0,4	30,5	12,5
14	ZGT	900	1,3	56,0	70,6
15	QK		0,4	108,8	44,6
16	QK		1,3	22,5	28,1
17	QK		0,6	108,8	64,2
18	VBT-KS1		1,0	56,0	53,8
19	ZGT	960	0,7	56,0	40,3
20	QSR 1		0,2	56,0	11,2
21	QSR 1		0,6	56,0	30,8
22	GL1 GO		0,4	56,0	21,8
23	QSR GL1		0,5	56,0	28,0
24	QSR GL2		1,2	56,0	64,4
25	QSR 2		0,7	56,0	38,1

Tabelle 14: Auswertung der Messungen Zwischenangriff Göstritz 06.08.2020

Bei den Messungen am 06.08.2020 war ein Portalventilator mit 1800 1/min und die anderen beiden mit 2400 1/min eingeschaltet. Die Messungen 1 bis 7 zeigen einen zunehmenden Volumenstrom in Richtung Portal des Zugangstunnels. Die beiden Ventilatoren in der Schachtglocke waren wie bei den ersten Messungen abgeschaltet, daher war auch keine Geschwindigkeit messbar (Messung 8 und 9). In der Schachtkopfüberfahrt war der Ventilator aktiv, dadurch wurde eine Strömung Richtung Zugangstunnel erzeugt (Messung 10 bis 13). Messung 16 fand direkt im Tor der Wetterwand in der Querkaverne statt. Die Messungen 15 und 17 wurden vor und hinter der Wetterwand durchgeführt. Die Luft strömte von Schachtkopfkaverne 2 in Richtung Schachtkopfkaverne 1, das heißt der einziehende Schacht zieht im Gegensatz zur letzten Messung keine Abluft mehr an. Durch den aktiven Lüfter in QSR1 strömte die Luft von der SFK 2 in Richtung SFK 1 (Messung 20 und 21). Da die Lüfter im QSR-GL1 abgeschaltet waren, kam es zu einem Wetterkurzschluss. Die Luft aus dem QSR 1 strömte über die SFK 1 und den QSR-GL1 wieder zurück in die SFK 2 (Messung 23). Das gleiche Problem trat auch im westlichen Teil der Schachtfußkavernen auf. Über QSR-GL2 strömte die Luft in Richtung SFK1 und über QSR 2 wieder zurück in die SFK 2 (Messung 24 und 25). Da die Abluft trotzdem über den Schacht 1 auszog und bei den durchgeführten Arbeiten in den Schachtfußkavernen keine gezielte Bewetterung notwendig war, wurde dieses Problem bis zum Start der Vortriebe der Streckenröhren nicht behoben. Mit dem Vortrieb in der Streckenröhre SR-GL1-GO wurde zum damaligen Zeitpunkt gerade erst begonnen, daher wurde er noch nicht drückend mit einer Lutte bewettert.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden zu Beginn die Anforderungen an die Belüftung von Tunnelbauwerken im Baubetrieb wie die Verdünnung der Schadstoffe und die Frischluftversorgung der Personen im Tunnel erörtert. Dafür wird in der Bauphase am häufigsten eine drückende Bewetterung, bei der am Portal Frischluft durch Ventilatoren angesaugt und über Luttenleitungen in den Arbeitsbereich gefördert wird, eingesetzt. Die saugende Bewetterung kommt im Tunnelbau eher selten zur Anwendung, da die Lutten aus einem steifen Material auszuführen sind. Die Montage und Verlängerung der Lutten wird dadurch aufwendiger. Umluftsysteme werden in erster Linie bei Vortrieben von zwei oder mehreren Tunnelröhren verwendet. Damit lassen sich große Luftmengen untertage wirtschaftlich verteilen. Allerdings ist besonders auf die Abdichtung von z.B. Querschlägen zu achten, um Leckagen zu vermeiden und die ausreichende Frischluftversorgung der Arbeitsbereiche zu gewährleisten.

Im Betrieb spielt die Belüftung bei Eisenbahntunneln eine untergeordnete Rolle, da sie nur für Wartungsarbeiten und Räume mit elektrischen Anlagen benötigt wird. Bei Straßentunneln hat die Belüftung die Verdünnung von verbrennungsbedingten Schadstoffen und Trübe-Emissionen sicherzustellen. Ab einer Tunnellänge von 500 m ist eine mechanische Belüftung zu installieren, bei kürzeren Tunneln ist eine natürliche Belüftung ausreichend. Abhängig von der Tunnellänge, dem Verkehrsaufkommen und der Verkehrsführung werden Systeme wie die Längslüftung, die Halbquerlüftung, die Vollquerlüftung oder die Punktabsaugung verwendet.

Die Auslegung und Dimensionierung von Lüftungssystemen erfolgt auf Basis von Gleichungen der Strömungsmechanik. Die Kontinuitäts-, die Impuls-, die Energie- und die Bernoulli-Gleichung bilden die Grundlage für die mathematische Beschreibung einer Luftströmung in Tunneln und Lutten. Besonders die mit der Luttenlänge zunehmenden Druck- und Leckverluste sind zu berücksichtigen. Mit diversen Computerprogrammen besteht auch die Möglichkeit die Dimensionierung von Tunnelbelüftungsanlagen mit numerischen Simulationen durchzuführen.

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit der Luft in Tunneln erfolgt im Betriebszustand mit Staudruck- oder Ultraschallsensoren, die in regelmäßigen Abständen im Tunnel verbaut sind. Durch einen permanenten Vergleich von SOLL- und IST-Geschwindigkeiten wird ein zu viel oder zu wenig an Luft ermittelt und in Folge die Leistung der Ventilatoren automatisch angepasst. Im Baubetrieb wird die Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt mit mobilen Messgeräten wie z.B. einem Flügelradanemometer durchgeführt. In Lutten wird mit einer Prandtlsonde gemessen. Die Ventilatoren werden ebenfalls über einen SOLL-IST Vergleich der erforderlichen Frischluftmenge gesteuert.

Im Zuge der Inbetriebnahme der Lüftungsanlage am Zentrum am Berg wurden zunächst drei neue Strahlventilatoren eingebaut und die beiden Axialventilatoren im Lüftergebäude generalüberholt. Die Strömungsgeschwindigkeitsmessungen wurden mit den fix verbauten Staudruck- und Ultraschallmessgeräten durchgeführt. Die Messergebnisse zeigen, dass eine Längslüftung des Tunnelsystems am effizientesten vom Eisenbahntunnel-West zum Straßentunnel-Nord ist, da bei dieser Verbindung am wenigsten Krümmungen im Wetterweg auftreten. Auch über die Verbindung zwischen dem Eisenbahntunnel-West und dem Straßentunnel-Süd ist eine Längslüftung möglich. Im Straßentunnel-Nord ist mit den beiden Axialventilatoren eine Absaugung über die Abluftklappen mit einer maximalen Geschwindigkeit im Verkehrsraum von ca. 4 m/s erreichbar. Dies ist besonders für die Rauchabsaugung bei Brandversuchen wichtig. Der Eisenbahntunnel-Ost ist mit dem eingebauten Ventilator eigens zu belüften, da aufgrund der geringen Querschnittsfläche im Querschlag keine ausreichende Luftzufuhr vom Eisenbahntunnel-West möglich ist.

Das Baulos Gloggnitz am Semmering-Basistunnel besteht aus zwei getrennten Untertagebaustellen, dem Tunnelabschnitt Gloggnitz und dem Zwischenangriff Göstritz. Beim Tunnelabschnitt Gloggnitz finden zwei parallelaufende Vortriebe der Streckenröhren Gleis 1 und Gleis 2 statt. Der Zwischenangriff Göstritz besteht aus einem Zugangstunnel mit Schachtkopfkavernen, zwei Schächten und Schachtfußkavernen. Von den Schachtfußkavernen werden die beiden Streckenröhren Richtung Gloggnitz und Richtung Baulos Fröschnitzgraben vorgetrieben. Sowohl im Tunnelabschnitt in Gloggnitz, als auch im Zwischenangriff in Göstritz ist ein Umluftsystem eingerichtet. Am Portal in Gloggnitz wird die Frischluft in eine Tunnelröhre eingeblasen und mit Lutten in die Arbeitsbereiche der beiden Tunnelröhren gefördert. Die Abluft wird über Ventilatoren in zwei geöffneten Querschlägen in die andere Tunnelröhre und von dort in Richtung Portal geblasen. Im Zwischenangriff Göstritz erfolgt die Umluftbewetterung über die beiden Schächte. Die Frischluft wird über Lutten zum einziehenden Schacht und von dort in die Schachtfußkavernen gefördert. Die Abluft zieht durch den ausziehenden Schacht und den Zugangstunnel Richtung Portal. Aufgrund der sich ständig verändernden Arbeitsabläufe durch z.B. neue Vortriebsabschnitte ist auch die Bewetterung dementsprechend laufend anzupassen und zu überprüfen.

Die Strömungsgeschwindigkeitsmessungen im Tunnelabschnitt Gloggnitz zeigten eine Zirkulation der Luft zwischen zwei Querschlägen, wenn in einem der Querschläge der Ventilator abgeschaltet ist. Dies ist zu vermeiden, um die Funktionsfähigkeit der Umluftbewetterung zu gewährleisten. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die im Vortrieb des Gleis 2 eingerichtete Absaugung der Sprengschwaden mit einem zusätzlichen Ventilator und einer ca. 200 m langen Lutte nicht zwingend notwendig ist. Bei den Messungen im Zwischenangriff Göstritz trat in den Schachtfußkavernen ein Wetterkurzschluss auf, weil in zwei der vier Querschläge zwischen den Schachtfußkavernen die Ventilatoren abgeschaltet waren. Außerdem zieht ein Teil der Abluft in der Schachtkopfkaverne vom ausziehenden in den einziehenden Schacht

und zurück in die Schachtfußkaverne. Solche Wetterkurzschlüsse sind, sobald die vier Vortriebe der Streckenröhren starten, unbedingt zu vermeiden.

Bei den Messungen am Zentrum am Berg wurde aufgezeigt, dass die Messwerte der Staudruck- und Ultraschallsensoren als Eingangsgrößen für die Steuerung der Ventilatoren nutzbar sind. Mit einer Netzmessung über den gesamten Querschnitt besteht die Möglichkeit die Genauigkeit der verbauten Messgeräte zu prüfen und zu kalibrieren. Bei den Messungen am Semmering-Basistunnel wurde ersichtlich, dass die Messgenauigkeit im Baubetrieb aufgrund ständig wechselnder Einflüsse wie Baustellenverkehr, geöffnete Wetterwände oder elektrische Wartungsarbeiten deutlich geringer ist. Eine so hohe Genauigkeit wie im Betrieb ist allerdings auch nicht notwendig.

Das Belüftungssystem am Zentrum am Berg ist in weiterer Folge für Belüftungstests, aber auch Brandversuche mit gezielter Rauchabsaugung einsetzbar. Dabei ist die Steuerung der Ventilatoren auf Basis der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten einfach handzuhaben. Die Durchführung von Netzmessungen über den gesamten Querschnitt ist ein Thema für weitere Arbeiten auf diesem Gebiet. Am Semmering-Basistunnel ist die Funktionsfähigkeit der Bewetterungskonzepte während der restlichen Bauphase weiterhin regelmäßig mit Messungen der Strömungsgeschwindigkeit zu überprüfen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] ARGE SBT 1.1 Tunnel Gloggnitz: 3D-Modell Baulos SBT 1.1. (unveröffentlicht)
Ausführungsplanung ARGE SBT 1.1 Tunnel Gloggnitz, 2020
- [2] ARGE SBT 1.1 Tunnel Gloggnitz: Regelquerschnittsflächen. (unveröffentlicht)
Ausführungsplanung ARGE SBT 1.1 Tunnel Gloggnitz, 2020
- [3] ASTRA 13001: Lüftung der Straßentunnel – Systemwahl, Dimensionierung und
Ausstattung. Bundesamt für Straßen ASTRA, Bern, 2008
- [4] Bauarbeiterschutzverordnung: Verordnung des Bundesministers für Arbeit,
Soziales und Konsumentenschutz über Sicherheit und Gesundheitsschutz auf
Baustellen und auf auswärtigen Arbeitsstellen
(Bauarbeiterschutzverordnung – BauV). Österreich, 2020
- [5] Beyer, M.: Eindimensionale Berechnungsmethoden zur Auslegung von
Lüftungsanlagen in Tunneln unter besonderer Berücksichtigung
dreidimensionaler Strömungseffekte. (Diss.) Institut für
Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2018
- [6] Blofeld, J.: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln.
Bundesanstalt für Straßenwesen, Verlag für neue Wissenschaft GmbH,
Bremerhafen, 2009
- [7] Dürr Austria GmbH, Übersichtsplan Lüftungsanlage ZaB. (unveröffentlicht)
Planunterlagen Allgemeine Elektrotechnik ZaB, Gleisdorf, 2019
- [8] Fried, E., Idelchik I.E.: Flow Resistance: A Design Guide for Engineers.
Hemisphere Publishing Cooperation, New York, 1989
- [9] Fruhwirt, D., Bacher, M., Sturm, P.-J., Steiner, H.: Change in Thermal Conditions
during Construction and Operation of a long Railway Tunnel – Taking the
Koralmtunnel as an Example. In H. Eichseder (Ed.), Reports 9th International
Conference "Tunnel Safety and Ventilation" (IVT Mitteilungen; Vol. 100), (S. 30-
45), Verlag der Technischen Universität Graz, 2018
- [10] Grenzwertverordnung (GKV): Verordnung des Bundesministers für Arbeit,
Soziales und Konsumentenschutz über Grenzwerte für Arbeitsstoffe sowie über
krebserzeugende und fortpflanzungsgefährdende (reproduktionstoxische)
Arbeitsstoffe (Grenzwertverordnung 2020 – GKV 2020). Österreich, 2020
- [11] Grässlin, U., Nodirolo, G., Drost, U.: Luftströmungsmessung in
Straßentunneln. Bundesamt für Straßen ASTRA, Bern, 2013

- [12] Haerter, A.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Lüftungsanlagen von Straßentunnel. (Diss.) Dissertationsdruckerei Leemann AG, Zürich, 1961
- [13] Hochtief Infrastructure GmbH: SBT 1.1 Tunnel Gloggnitz. <https://hochtief.at/projekte/sbt-11-tunnel-gloggnitz-noe>, am 21.10.2020
- [14] Höhrhan, R.: Tunnel Accidents and their Impact on relevant Guidelines in Austria. International Conference "Tunnel Safety and Ventilation", (S. 1-8), Graz, 2002
- [15] Laabmayr und Partner ZT GmbH: Übersichtslageplan mit Orthofoto ZaB. (unveröffentlicht) Planunterlagen ZaB, Salzburg, 2017
- [16] PIARC (C3.3): Road Tunnels: Operational Strategies for Emergency Ventilation. World Road Association (PIARC), La Defense Cedex, France, 2011
- [17] PIARC (C4): Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation. World Road Association (PIARC), La Defense Cedex, France, 2019
- [18] Richtlinie 2004/54/EG: des europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderung an die Sicherheit von Tunneln in transeuropäischen Straßennetz
- [19] RVS 09.02.31.: Tunnel/Tunnelausrüstung/Belüftung – Grundlagen. Richtlinie, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien, 2014
- [20] Schade, H., Kunz, E., Kameier, F., Paschereit, C.: Strömungslehre, 4. Auflage. De Gruyter Verlag, Berlin/Boston, 2013
- [21] Schmölder, G.: Tunnellüftungsanlagen und deren Regelung – Messungen und Untersuchungen für eine erfolgreiche Inbetriebnahme. (Diss.) Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2016
- [22] SIA 196: Baulüftung im Untertagebau. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1998
- [23] Simon, R.: Bewetterungskonzept Semmering-Basistunnel Baulos 1.1. (unveröffentlicht), ARGE SBT 1.1 Tunnel Gloggnitz, 2020
- [24] Straßentunnel-Sicherheitsgesetz: Bundesgesetz über die Sicherheit von Straßentunneln, BGBl. 1 Nr. 54/2006, Änderungen: 1. Novelle BGBl. 1 Nr. 111/2010; 2. Novelle BGBl. 1 Nr. 96/2013, Österreich, 2013

- [25] Tarada, F.: Impulse Ventilation for Tunnels - A State of the Art Review, 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, New Brunswick, New Jersey, 2009
- [26] TSI-SRT-1303: Verordnung (EU) Nr. 1303/2014 der Kommission vom 18.November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ im Eisenbahnsystem der Europäischen Union, 2014
- [27] TSI-WAG-1302: Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission vom 18.November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge - Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems der Europäischen Union, 2014
- [28] Verordnung (EG) Nr. 715/2007: des europäischen Parlaments und Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, 2007
- [29] Wikipedia: Anemometer, <https://de.wikipedia.org/wiki/Anemometer>, am 15.10.2020
- [30] Witt und Sohn AG: Datenblatt Strahlventilatoren. Produktbroschüre Witt und Sohn AG, Pinneberg, 2019
- [31] Zitron Nederland BV: Datenblatt Axialventilatoren ZaB. Hengelo, Niederlande, 1982

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1: Drückende Bewetterung [22].....	6
Abb. 3-2: Saugende Bewetterung [22].....	7
Abb. 3-3: Umluftbewetterung in zwei parallelen Tunnelröhren [22].....	8
Abb. 3-4: Längslüftung mit Strahlventilatoren [16].....	13
Abb. 3-5: Längslüftung mit Saccardo-System [16].....	14
Abb. 3-6: Halbquerlüftung [16].....	15
Abb. 3-7: Vollquerlüftung [16].....	16
Abb. 3-8: Punktabsaugung [16].....	17
Abb. 5-1: Übersichtslageplan ZaB [15].....	26
Abb. 5-2: Übersichtsplan Lüftungsanlage ZaB [7].....	28
Abb. 5-3: U-Profil Träger.....	30
Abb. 5-4: Anheben eines Ventilators mittels Stapler.....	30
Abb. 5-5: Strahlventilatoren im EBT-W.....	31
Abb. 5-6: Steuerknöpfe am Schaltkasten.....	32
Abb. 5-7: Lage der Axialventilatoren und Abluftklappen.....	33
Abb. 5-8: Axialventilator 2.....	33
Abb. 5-9: Digitales Steuerungsprogramm.....	34
Abb. 5-10: Analoganzeige des Schaufelwinkels.....	36
Abb. 6-1: Staudruckrohr LG-2020 (IAG).....	40
Abb. 6-2: Ultraschallsensor D-FL 220T (DURAG), Sendeeinheit.....	41
Abb. 6-3: Grundriss der Tunnelröhren mit Messstellen und Ventilatoren.....	42
Abb. 7-1: 3D - Modell Baulos SBT 1.1 [1].....	50
Abb. 7-2: Flügelradanemometer.....	51
Abb. 7-3: zugehöriges Handmessgerät.....	52
Abb. 7- 4: Anschluss der Schläuche für die Druckmessungen [22].....	53
Abb. 7-5: Grundriss Umluftsystem Tunnelabschnitt Gloggnitz Phase 2.....	55
Abb. 7-6: Grundriss Umluftsystem Zwischenangriff Göstritz Phase 2.....	56
Abb. 7- 7: Grundriss Umluftsystem in den Schachtfußkavernen Phase 3.....	58
Abb. 7-8: Grundriss Umluftsystem in den Schachtfußkavernen Phase 4.....	59
Abb. 7-9: Querschnittsflächen Tunnelabschnitt Gloggnitz [2].....	61
Abb. 7-10: Querschnittsflächen Zwischenangriff Göstritz [2].....	62
Abb. 7-11: Ventilatoren in QS 5.....	63
Abb. 7-12: Leckagestelle bei Lutte 2.....	70
Abb. 7-13: Anschluss der Lutte an die Wetterwand.....	71

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: MAK-Werte für Gase der Sprengschwaden und Dieselmotoremissionen [10]	5
Tabelle 2: MAK-Werte für Staub [10]	5
Tabelle 3: MAK-Werte für Erdgas [10]	5
Tabelle 4: Werte der Luttenklassen S,A,B [22]	24
Tabelle 5: Technische Daten der Strahlventilatoren [30]	29
Tabelle 6: Technische Daten Axialventilatoren [31]	32
Tabelle 7: Messstellen und eingebaute Messgeräte	42
Tabelle 8: Messprogramm	43
Tabelle 9: Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten der Schaltungen	45
Tabelle 10: Auswertung der Messungen Tunnelabschnitt Gloggnitz 27.05.2020	64
Tabelle 11: Auswertung der Messungen Tunnelabschnitt Gloggnitz 11.08.2020	66
Tabelle 12: Auswertung der Messungen Zwischenangriff Göstritz 26.05.2020	67
Tabelle 13: Auswertung der Luttenmessungen Zwischenangriff Göstritz 26.05.2020	69
Tabelle 14: Auswertung der Messungen Zwischenangriff Göstritz 06.08.2020	71