KANTON AARGAU

DEPARTEMENT
BAU, VERKEHR UND UMWELT
Abteilung Tiefbau

GEMEINDE Suhr, Gränichen, Oberentfelden IO/AO

STRASSE Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung Raum Suhr (VERAS)
NK240, NK241, K242

BEREICH D954 D962

OBJEKT Los 2

Lüftungsbericht Fahrraumlüftung

Vorstudien	Vorprojekt	Bauprojekt	Auflageprojekt	Ausführungsprojekt	Ausgeführtes Werk



PROJEKTVERFASSER

IG PRELO
% F. Preisig AG, Zürich

FPREISIG AG Lombardi

Markus, Schneider
Teilprojektleiter Los 2

Erstellt: 31.05.2024

BAUHERR

Abteilung Tiefbau
Realisierung
PS-Nr.: 640-203830

Andreas, Drohomirecki
Projektleiter ATB

Dok. Nr.: 2603

Änderungsverzeichnis

Rev.	Projektverfasser			Bauherr			Bemerkungen
	Datum	Name	Visum	Datum	Name	Visum	
0.1	26.09.2022	MaiJ					Entwurf
0.2	14.10.2022	MaiJ					Entwurf – Anpassung Synoptik
0.3	14.07.2023	MaiJ, MeY					Entwurf Anpassungen Bau
04	21.08.2023	MaiJ, MeY					Abgabe Vernehmlas-sung
1.0	31.01.2024	J. Maier	MaiJ	31.01.2024	M. Tobler	MT	Abgabe Bauprojekt
2.0	31.05.2024	J. Maier, Y. Métry	MaiJ, MeY	31.05.2024	M. Tobler	MT	Abgabe Auflageprojekt

Inhaltsverzeichnis

Glossar **8**

Abkürzungen **9**

Nomenklatur **10**

1. Zusammenfassung **11**
1.1 Einleitung 11
1.2 Ziel des Berichts 12
1.3 Methodik der Auslegung 12
1.4 Ergebnisse 13

2. Projektgrundlagen **14**
2.1 Quellenverzeichnis 14
2.1.1 Normen, Bestimmungen und Richtlinien 14
2.1.2 Projektspezifische Grundlagen 14
2.1.3 Allgemeine Referenzen 15
2.2 Geometrie des Bauwerks 15
2.2.1 Allgemeine Daten 15
2.2.2 Situationsplan 17
2.2.3 Längenprofil 18
2.2.4 Normalprofil 19
2.2.5 Fluchtwege und Notausgänge 22
2.3 Verkehrsdaten 22
2.4 Meteorologische Daten 23
2.4.1 Temperatur und barometrischer Druck 23
2.4.2 Durchschnittliche Windgeschwindigkeit 24
2.5 Schallschutz 24
2.6 Berechnungssoftware 25
2.6.1 Berechnungstool für die Auslegung der Längslüftung im Normalbetrieb 25
2.6.2 Berechnungstool für die Auslegung der Längslüftung im Ereignisbetrieb 25
2.6.3 Camatt 26

3. Festlegung des Lüftungssystems **27**

4. Auslegung der Fahrraumlüftung **29**
4.1 Normalbetrieb 29
4.1.1 Ziel der Normallüftung 29
4.1.2 Emissionsberechnung und Frischluftbedarf 29
4.1.3 Erforderlicher Druck für den Normalbetrieb 32
4.2 Ereignisbetrieb 32
4.2.1 Ziel der Ereignislüftung 32
4.2.2 Ereignisse zur Lüftungsauslegung 33
4.2.3 Dynamik der Ereignisse 33
4.2.4 Geforderte Längsströmung im Fahrraum 34
4.2.5 Erforderlicher Druck für den Ereignisbetrieb 34
4.3 Strahlventilatoren 35
4.3.1 Anordnung 35
4.3.2 Einbauwirkungsgrad 36
4.3.3 Anzahl 37
4.3.4 Überprüfung der Anzahl an Strahlventilatoren im eindimensionalen Modell 38

4.3.5 Technische Spezifikation 39
4.4 Instrumentierung 39
4.4.1 Anordnung....39
4.4.2 Luftströmungsmessgeräte 39
4.4.3 Sichttrübungsmessung 40
4.4.4 Kohlenmonoxid Messung....40
4.4.5 Rauchmelder....40
4.4.6 Thermischer Linienmelder 41
4.4.7 Technische Spezifikation 41

5. Betriebskonzept 42

6. Schnittstellen....43
6.1 Schnittstellen zum Bau....43
6.1.1 Anordnung der Strahlventilatoren in Längsrichtung....43
6.1.2 Anordnung der Strahlventilatoren im Querschnitt....43
6.2 Schnittstellen zu Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen....43
6.2.1 Elektrische Anschlüsse und Verkabelung....43
6.2.2 Räumliche Anordnung Strahlventilatoren / BSA....43
6.2.3 Verkehrsleitsystem....43
6.2.4 Lüftung der Fluchtwege 43
6.3 Alarmierung der Tunnelbenutzer....44

7. Technische Spezifikation 45
7.1 Strahlventilatoren 45
7.1.1 Schwingungsmessung 46
7.1.2 Abrissschalter....46
7.1.3 Ersatzteile 47
7.2 Luftströmungsmessgeräte....47
7.3 Sichttrübungsmessung....47
7.4 Rauchmelder....47
7.5 Thermischer Linienmelder....47

8. Abnahme 48

9. Bauprogramm....49

10. Investitions- und Betriebskosten 50
10.1 Investitionskosten....50
10.2 Betriebs- und Unterhaltskosten....51

11. Unterschriften....53

Anhang A: Aerodynamik Konstanten und Formeln für die Fahrraumlüftung 54
A.1 Druckverluste im Bauwerk....54
A.2 Druckwirkung durch den Verkehr 54
A.3 Natürlicher Kamineffekt 54
A.4 Barometrische Druckdifferenz 55
A.5 Druckwirkung durch Wind....55
A.6 Brandauftrieb 55

Anhang B: Anordnung der Lüftungskomponenten....56
B.1 Anordnung der Lüftungseinrichtungen 57
B.2 Normalprofil (Raumbesetzung)....58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Geometrische Daten des Tunnels Wynematte. 16
Tabelle 2-2: Längsneigungsverlauf des Tunnels Wynematte, in Richtung Bern. 18
Tabelle 2-3: Normalprofile des Tunnels Wynematte, in Richtung Bern. 19
Tabelle 2-4: Lage und Distanzen der Notausgänge am Fahrraum. 22
Tabelle 2-5: Verkehrsdaten für die Jahre 2025 bis 2040 (prognostizierte Werte). 22
Tabelle 2-6: Jahresmittelwert der Lufteigenschaften im Tunnel Wynematte. 24
Tabelle 2-7: Richtung und Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe über Grund und auf den Portalen Wynematte und Helgefeld. 24
Tabelle 2-8: Belastungsgrenzwerte für Strassenverkehrslärm gemäss Lärmschutz-Verordnung im Normalbetrieb [8]. 25
Tabelle 3-1: Bewertung des Risikoniveaus für den Tunnel Wynematte (Gegenverkehr). 28
Tabelle 4-1: Dimensionierungswerte der Luftqualität im Fahrraum. 29
Tabelle 4-2: Richtungsaufteilung des Verkehrs zur Berechnung des Frischluftbedarfs bei Gegenverkehr. 29
Tabelle 4-3: Frischluftbedarf für die Luftqualität im Tunnel; berechnete Verkehrsfälle betrachten verschiedene Fahrgeschwindigkeiten und Verkehrsaufteilungen mit prognostizierten Verkehrsdaten für das Jahr 2040. 31
Tabelle 4-4: Erforderlicher Druck der Strahlventilatoren für den Normalbetrieb und eine Frischluftmenge QFL im Fahrraum. 32
Tabelle 4-5: Ereignisse für die Auslegung der Lüftungsanlage. 33
Tabelle 4-6: Dynamik der Ereignisse im Brandfall für die Modellierung der Brandszenarien [hh:mm:ss]. 34
Tabelle 4-7: Anforderung zur Auslegung der Strahlventilatoren für einen Tunnel mit Gegenverkehr. 34
Tabelle 4-8: Erforderlicher Druck der Strahlventilatoren für den Ereignisbetrieb und eine Strömungsgeschwindigkeit von 1.50 m/s im Fahrraum. 35
Tabelle 4-9: Erforderlicher Druck der Strahlventilatoren für den Ereignisbetrieb und eine Strömungsgeschwindigkeit von 2.56 m/s im Fahrraum. 35
Tabelle 4-10: Einbauwirkungsgrad für verschiedene Einbaukonfigurationen. 37
Tabelle 4-11: Anzahl an Strahlventilatoren für verschiedene Einbaukonfigurationen; (*) maximaler Wert für den erforderlichen Druck beim Ausfall einer SV-Gruppe oder eine Zielgeschwindigkeit von 2.56 m/s beim Einsatz aller SV. 38
Tabelle 4-12: Brandszenarien für die Überprüfung der Anzahl an Strahlventilatoren. 38
Tabelle 4-13: Position der Luftströmungsmessgeräte. 40
Tabelle 7-1: Technische Daten der Strahlventilatoren; * gegebene Schubleistung für die Baugruppe mit Schalldämpfern und ohne Strahlablenker; ** nur für SV im Rechteckprofil. 46
Tabelle 7-2: Technische Daten der Schwingungsmessung. 46
Tabelle 7-3: Technische Daten des Abrissschalters. 47
Tabelle 7-4: Ersatzteile für Strahlventilatoren. 47
Tabelle 10-1: Investitionskosten für die Lüftungskomponenten des Tunnels Wynematte (Preisstand Dezember 2020). 51
Tabelle 10-2: Betriebs- und Unterhaltskosten für die Fahrraumlüftung des Tunnels Wynematte. 52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Übersicht des Tagbautunnels Wynematte aus Beilage 2606.[24] 12
Abbildung 2-1: Situationsplan des Tunnels Wynematte Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. 17
Abbildung 2-2: Längenprofil des Tunnels Wynematte auf Seite Wynematte.[29] 18
Abbildung 2-3: Längenprofil des Tunnels Wynematte auf Seite Helgefeld. [30] 18
Abbildung 2-4: Normalprofil des Tunnels Wynematte, Gewölbe (+3%), Länge ca. 575 m [24] 20
Abbildung 2-5: Tunnelprofil des Tunnels Wynematte, Rechteck, Länge ca. 269 m [24]. 21
Abbildung 3-1: Bestimmung der Hauptgruppe des Lüftungssystems des Tunnels Wynematte (Gegenverkehr, 844 m Länge). 28
Abbildung 4-1: Brandkurve des Lastwagenbrands. 33
Abbildung 4-2: Mögliche Anordnung und Aussendurchmesser der Strahlventilatoren im Querschnitt. 36
Abbildung 4-3: Resultate der Strömungsgeschwindigkeit aus verschiedenen CFD-Berechnungen in Camatt; die Selbstrettungsphase berücksichtigt den Ausfall einer SV-Gruppe; in der Brandbekämpfung werden alle SV eingesetzt. 39
Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Tunnels mit den Hauptinstallationen der Lüftungssystem. 42
Abbildung 0-1: Anordnung der Ventilatorgruppen und Sensorik der Fahrraumlüftung. 57
Abbildung 0-2: Anordnung der Lüftungskomponenten im Querschnitt, Gewölbeprofil. 58
Abbildung 0-3: Anordnung der Lüftungskomponenten im Querschnitt, Rechteck. 58

Glossar

Back-layering	Zurückströmen von Rauch bei Tunnelbränden.
Ereignisbetrieb	Betrieb der Lüftung bei einem Ereignis.
Frischluftbedarf	Luftvolumenstrom, der für eine ausreichende Verdünnung der Schadstoffe in den Tunnel eingebracht werden muss.
Hydraulischer Durchmesser	Charakteristische Länge für die Bestimmung des Druckverlustes in einem Rohr oder Stollen, berechnet aus Umfang und Querschnittfläche.
Massgebende Längsneigung	Grösster Wert der mittleren Längsneigung über einen 800 m langen Tunnelabschnitt.
Normalbetrieb	Betrieb der Lüftung zur Sicherstellung der Luftqualität.
Normalprofil	Darstellung eines typischen Tunnelquerschnitts.
Schub	Kraftwirkung von Strahlventilatoren.
Selbstrettung	Bei einem Brandereignis fliehen die Tunnelbenutzer in der ersten Phase ohne Unterstützung der Rettungsdienste aus dem Tunnel.
Standschub	Kraftwirkung eines Strahlventilators unter definierten Umgebungsbedingungen.
Winddruck	Statischer Druck durch Wind von aussen auf das Tunnelportal.

Abkürzungen

ASTRA	Bundesamt für Strassen
AVA	Aargau Verkehr AG (vormals WSB)
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BP	Bauprojekt
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstung
CHF	Schweizer Franken
CO	Kohlenmonoxid
DTV	Durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen
FU	Frequenzumrichter
Fz	Fahrzeuge
GV	Gegenverkehr
ISO	International Organization for Standardization
LSV	Lärmschutzverordnung
LW	Lastwagen
LWA	Lastwagenanteil, Anteil der Lastwagen am Gesamtverkehr
MSV	Massgebendes stündliches Verkehrsaufkommen
MwSt.	Mehrwertsteuer
NA	Notausgang
PIARC	Association mondiale de la route
PV	Projektverfasser
PW	Personenwagen
PWE	Personenwageneinheiten
RL	Richtlinie
RV	Richtungsverkehr
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
ST	Sichttrübung
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
SV	Strahlventilator
TP	Teilprojekt
VERAS	Verkehrsinfrastruktur-Entwicklung Raum Suhr
VLS	Verkehrsleitsystem
VP	Vorprojekt
VS	Vorstudie
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Nomenklatur

A	m^2	Fläche
C_D	-	Strömungswiderstandskoeffizient
c_{lim}	ppm	Dimensionierungswert für die Konzentration einer gasförmigen Substanz (CO)
D	m	Durchmesser
e	$m^3/h/Fz$	Spezifische Schadstoffemission eines Fahrzeuges
E	m^3/s	Gesamte Schadstoffemission der Fahrzeuge
F	N	Schub
g	m/s^2	Schwerefeld
h	m	Höhe
k_{lim}	m^{-1}	Extinktionskoeffizient, Dimensionierungswert für die Sichtweite
L	m	Länge
n	-	Anzahl
p	Pa	Druck
Q	m^3/s	Volumenstrom
R	J/kg/K	Gaskonstante (287.1 für trockene Luft)
s	%	Neigung
T	K	Temperatur
v	m/s	Geschwindigkeit
Δ	-	Differenz von Werten
ρ	kg/m^3	Luftdichte

1. Zusammenfassung

1.1 Einleitung

Die Region um Suhr und insbesondere das Suhrer Dorfzentrum sind seit Jahren einem stetigen wachsendem Verkehrsaufkommen ausgesetzt. Daher versucht die Gemeinde Suhr mit einer zentrums- und bahnhofsnahen Verdichtung des Wohnraums Voraussetzungen für eine Reduktion des Verkehrswachstums zu schaffen.

Die Verkehrsbelastung hat zur Folge, dass einerseits während den Hauptverkehrszeiten die Wohnbevölkerung täglich durch erhebliche Immissionen betroffen ist und andererseits der Verkehrsfluss stark beeinträchtigt wird. Der Kanton Aargau hat die Verkehrsprobleme erkannt und liess bereits vor Jahren Umfahrungslösungen planerisch untersuchen.

Mit der Vorstudie (VS) NK241 Ostumfahrung Suhr wurde das Generelle Projekt aus dem Jahre 2001 komplett überarbeitet sowie an die neuen Bedürfnisse und Gegebenheiten angepasst. In den Jahren 2018 und 2019 wurde aufbauend auf der Vorstudie die festgelegte Linienführung zum Vorprojekt (VP) weiterentwickelt. Dabei wurde das Projekt in 3 Teilprojekte aufgeteilt, was 2021 im Bauprojekt (BP) der Ostumfahrung Suhr resultierte.

Der vorliegende technische Bericht behandelt die lüftungstechnischen Aspekte des Tagbautunnels Wynematte, welcher ein Bestandteil des Teilprojekts 2 ist. Von Norden nach Süden umfasst das Teilprojekt:

- den Knoten Hintere Bahnhofstrasse;
- die Grundwasserwanne Wynematte (mit Stapelbecken und Pumpwerk);
- den Tagbautunnel Wynematte;
- 3 Notausgänge mit Fluchttreppenhäusern ins Freie;
- die Grundwasserwanne Helgefeld (mit Pumpwerk);
- den Knoten Südanbindung.

Der Tagbautunnel Wynematte besteht aus einer zweispurigen Röhre, welche im Gegenverkehr befahren wird. Seine Länge beträgt 844 m mit unterschiedlichen Steigungs- und Gefälleanteilen. Im Mittel liegt der Tunnel auf einer Höhe von 3911 m.ü.M. Die Fahrraumlüftung des Tunnels Wynematte wird im Bedarfsfall als Längslüftung mittels Strahlventilatoren betrieben. Aus dem Fahrraum führen drei Fluchtwege durch überdruckbelüftete Fluchttreppenhäuser ins Freie.

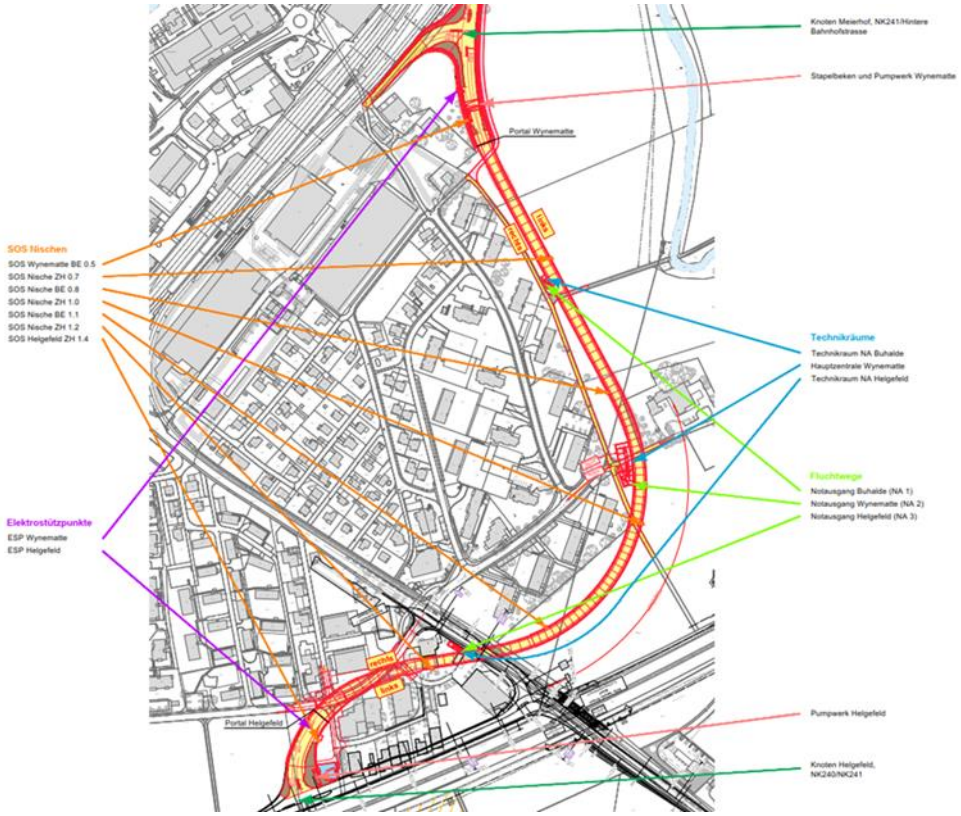


Abbildung 1-1: Übersicht des Tagbautunnels Wynematte aus Beilage 2606.[24]

1.2 Ziel des Berichts

Ziel des vorliegenden Berichtes ist die Beschreibung der Fahrraumlüftung. Der Bericht beinhaltet die Auslegung der Fahrraumlüftung des Tagbautunnels Wynematte für den Normal- und Ereignisbetrieb, die technischen Spezifikationen der Lüftungseinrichtungen sowie die Schnittstellen zum Bau und zu den weiteren Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen (BSA). Angaben zu den notwendigen Messeinrichtungen für die Sichttrübung, Strömungsgeschwindigkeit und Ereignisdetektion sowie eine Kostenschätzung der Lüftungseinrichtungen schliessen diesen technischen Bericht ab.

Die Planung der Belüftung der Notausgänge bzw. der Fluchttreppenhäuser ist nicht Gegenstand dieses Berichtes. Die Steuerung der Lüftung und die Belüftung der Notausgänge werden separat in den jeweiligen technischen Berichten 6003 [21] «Steuerungsbericht Lüftung» und 6004 [22] «Belüftung der Notausgänge» erarbeitet.

1.3 Methodik der Auslegung

Die Projektierungsarbeiten laufen nach den folgenden Teilschritten ab:

1. Zusammenstellung der Grunddaten, vgl. Kapitel 2
   a. Tunneldaten, vgl. Kapitel 2.2
   b. Verkehrsdaten, vgl. Kapitel 2.3
   c. Meteorologische Daten, vgl. Kapitel 2.4
2. Wahl des Lüftungssystems, vgl. Kapitel 3
3. Dimensionierung des Lüftungssystems
   a. Auslegung der Fahrraumlüftung für den Normalbetrieb, vgl. Kapitel 4.1
   b. Auslegung der Fahrraumlüftung für den Ereignisbetrieb, vgl. Kapitel 4.2
4. Ausstattung

   a. Auslegung der Lüftungskomponenten unter Berücksichtigung der Leistungs- und Platzbedürfnisse (Anordnung), vgl. Kapitel 4.3
   b. Anordnung der Messeinrichtungen, vgl. Kapitel 4.4
5. Betriebskonzept, vgl. Kapitel 4.4.7
6. Technische Spezifikationen, vgl. Kapitel 6
7. Beschreibung der Schnittstellen zu Bau- und Elektroplanung, vgl. Kapitel 6
8. Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten, vgl. Kapitel 8

1.4 Ergebnisse

Der Tunnel Wynematte wird mit einem Längslüftungssystem ausgestattet. Die Tunnellüftung beinhaltet vier (4) Strahlventilatoren mit symmetrischen Beschaufelung (reversierbarer Blasrichtung). Die Strahlventilatoren haben einen Laufraddurchmesser von ≤1’330 mm, einen Standschub von je ≥980 N und werden mit Frequenzumrichtern (FU) betrieben.

Im Normalbetrieb werden die Strahlventilatoren bei Bedarf eingesetzt, um eine ausreichende Luftqualität im Fahrraum zu gewährleisten. Die Lüftungsstrategie im Ereignisfall basiert darauf, dass im mittleren Tunnelabschnitt eine Strömungsgeschwindigkeit von 1.0 m/s in der vorherrschenden Strömungsrichtung (bei der Alarmauslösung erfasst) als Zielwert für die Regelung dient. In den Portalbereichen wird je nach Situation aus dem Portal ausgeblasen.

Gute Fluchtmöglichkeiten sind durch die kontrollierte, langsame Rauchausbreitung und kurze Fluchtwegabstände gegeben. Die Notausgänge bzw. die Fluchtwege für die Tunnelbenutzer im Tunnel Wynematte führen in drei (3) Fluchttreppenhäuser. Der maximale Fluchtwegabstand beträgt 280 m. Um die Fluchttreppenhäuser von Rauchgasen freizuhalten, werden sie separat belüftet (Überdruck).

Für die Steuerung der Lüftung im Normalbetrieb und im Ereignisfall werden sechs (6) Luftströmungsmessgeräten und zwei (2) Sichttrübungsmessgeräte installiert. Zudem wird der Tunnel Wynematte mit 16 Rauchmeldern und einem thermischen Linienmelder ausgerüstet.

2. Projektgrundlagen

Die Lüftungsauslegung baut auf die Projektgrundlagen des Vorprojekts und insbesondere des technischen Berichts BSA [23] auf. Es werden die aktuell gültigen Richtlinien und Normen angewendet. Zudem werden die aktuell verfügbaren Verkehrszahlen und die meteorologischen Daten zu Grunde gelegt.

2.1 Quellenverzeichnis

2.1.1 Normen, Bestimmungen und Richtlinien

[1] ASTRA. Lüftung der Strassentunnel – Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung. Richtlinie 13001, V3.01, 04.07.2022.
[2] ASTRA. Branddetektion in Strassentunneln. Richtlinie 13004, V2.10, 04.12.2008.
[3] ASTRA. Bauteile Komponenten, Werkstoffe. Fachhandbuch BSA, Technisches Merkblatt 23001-12120, V2.30, 01.01.2021.
[4] ASTRA. Bauteile Themen, Schutzzonen / Klimatische Bedingungen. Fachhandbuch BSA, Technisches Merkblatt 23001-12210, V2.30, 01.01.2021.
[5] ASTRA. Bauteile Lüftung, Funktionen der Lüftungssteuerung. Fachhandbuch BSA, Technisches Merkblatt 23 001-11315, V2.00, 01.01.2015.
[6] ASTRA. Bauteile Lüftung, Sensorik. Fachhandbuch BSA, Technisches Merkblatt 23 001-11320, V2.00, 01.01.2015.
[7] ASTRA. Bauteile Lüftung, Längslüftung. Fachhandbuch BSA, Technisches Merkblatt 23 001-11330, V1.30, 01.01.2022.
[8] BAFU. Lärmschutz-Verordnung (LSV). Bundesamt für Umwelt, SR 814.41 (1986), Stand am 1. Juli 2021.
[9] HBEFA. Handbook Emission Factors for Road Transport. The Handbook Emission Factors for Road Transport, HBEFA Version 4.2.2, 24. February 2022.
[10] ISO. Industrial Fans – Performance testing of jet fans. International Organization for Standardization, Standard 13350, 2015.
[11] ISO. Industrial Fans – Tolerances, methods of conversion and technical data presentation. International Organization for Standardization, Standard 13348, 2007.
[12] PIARC. Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation. Association mondiale de la route, Technical Committee D.5 Road Tunnels, Report 2019R02EN, 2019.
[13] SIA. Projektierung Tunnel, Strassentunnel. Norm 197/2, 1. Oktober 2004.
[14] SIA. Befestigungen in Beton und Mauerwerk. Norm 179, 1. Juli 1998.
[15] SUVA. Akustische Grenz- und Richtwerte. Online www.suva.ch, Arbeitssicherheit / Gesundheitsschutz, Bereich Chemie, Physik & Ergonomie, 2020.
[16] SUVA. Aktuelle Grenzwerttabelle – MAK-Werte. Online www.suva.ch/grenzwerte, Gesundheitsschutz, Abteilung Arbeitsmedizin, 2022.
[17] NFPA. Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways. National Fire Protection Association, Code 502, 2017.

2.1.2 Projektspezifische Grundlagen

[18] BVUATB Aarau, Tobler Martina. VERAS; Vernehmlassung-Genehmigung Faktenblatt Los 2, FS 1 Fluchtwege. E-Mail vom 28.01.2022.
[19] BVUATB Aarau, Tobler Martina. VERAS Factsheet Nr.6 Lüftung. E-Mail vom 28.01.2022.
[20] Erb+Partner. NK241 Ostumfahrung Suhr, Trasse, Verkehrsmengengerüst. Plan Nummer 2323ca027.cdr, 21.03.2022.

[21] Lombardi AG. NK241 Ostumfahrung Suhr, B-177 Tunnel Wynematte, Steuerungsbericht Fahrraumlüftung, 012.241.001-03-2604_LUE_Bericht_20230821.
[22] Lombardi AG. NK241 Ostumfahrung Suhr, B-177 Tunnel Wynematte, Belüftung der Notausgänge, 012.241.001-03-2605_UED_Bericht_20230821.
[23] Gähler und Partner AG. Vorprojekt NK 241 Ostumfahrung Suhr – Technischer Bericht BSA. Kanton Aargau, Department Bau, Verkehr und Umwelt, 640-203100, V1.1, 29.03.2019.
[24] Lombardi AG. NK241 Ostumfahrung Suhr, B-177 Tunnel Wynematte, Übersichtsplan Objekte VERAS, 012.241.001-03-2606_Übersichtsplan_20230821
[25] Lombardi AG. NK241 Ostumfahrung Suhr, B-177 Tunnel Wynematte, Normalprofile, B-177-05-102_NP Tunnel_20220926
[26] Lombardi AG. NK241 Ostumfahrung Suhr, B-177 Tunnel Wynematte, Wirkmatrix, 012.241.001-03-2664_Wirkmatrix_20230821
[27] Lombardi AG. NK241 Ostumfahrung Suhr, B-177 Tunnel Wynematte, Bauprogramm Los2, 012.241.001-01-2041_Bauprogramm
[28] Lombardi AG. NK241 Ostumfahrung Suhr, B-177 Tunnel Wynematte, Technischer Beschrieb- und Sicherheitsausrüstung, 012.241.001-03-2601_TB_BSA_20230821
[29] IG PRELO. NK241 Ostumfahrung Suhr, B-177 Tunnel Wynematte, Längenprofil NK241 Teil 1, 012.241.001-02-2141-1_LP_NK241-1
[30] IG PRELO. NK241 Ostumfahrung Suhr, B-177 Tunnel Wynematte, Längenprofil NK241 Teil 2, 012.241.001-02-2142_LP_NK241-2

2.1.3 Allgemeine Referenzen

[31] Meteotest AG. Meteonorm 8 – Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education. Product details at meteonorm.com.
[32] Federal Office of Topography swisstopo. Geo.admin.ch. https://map.geo.admin.ch, abgerufen am 12.05.2022.
[33] Bundesamt für Energie. Windatlas der Schweiz, Modellierter Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit und -Richtung 50 m Höhe über Grund. Website: map.geo.admin.ch, abgerufen am 12.05.2022.
[34] Beyer M., Sturm P. J., Saurwein M., Bacher M. Evaluation of Jet Fan Performance in Tunnels. 8th International Conference “Tunnel Safety and Ventilation”, Graz, Austria, 2016.
[35] Lombardi SA. Galleria Ascona – Rapporto d’analisi definizione progetti – Impianto di ventilazione. 05.02.2021.
[36] Lombardi SA. Autostrada SALT (Tronco Ligure-Toscano) – Galleria Pian del Lupo – Verifica della ventilazione longitudinale – Prove prestazionali. 2020.0107.003, maggio 2022.

2.2 Geometrie des Bauwerks

Im Rahmen des Projekts Ostumfahrung Suhr werden ein rund 844 m langer Tagbautunnel und daran anschliessende Grundwasserwannen erstellt. Der Tunnel Wynematte besteht aus einer zweispurigen Röhre, welche im Gegenverkehr befahren wird.

2.2.1 Allgemeine Daten

Die geometrischen Hauptdaten des Tunnels Wynematte sind in der nachfolgenden Tabelle 2-1 aufgeführt.

Tunnel Wynematte	**In Richtung Bern**
Gesamtlänge (Portal-Portal)	844 m
Mittlere Höhe über Meer	391 m.ü.M.
Portalhöhe Wynematte	389 m.ü.M.
Portalhöhe Helgefeld	392 m.ü.M.
Mittlere Längsneigung	0.49%
Massgebende Längsneigung (über 800 m)	0.50%
Tunnelprofil	Gewölbe (575 m) / Rechteck (269 m)
Querschnittsfläche Fahrraum	62.8 m^2 / 61.5 m^2
Umfang Fahrraum	31.2 m / 33.1
Hydraulischer Durchmesser Fahrraum	8.05 m / 7.43 m

Tabelle 2-1: Geometrische Daten des Tunnels Wynematte.

2.2.2 Situationsplan

Vom Knoten «Hintere Bahnhofstrasse» führt das Trassee der Ostumfahrung Suhr über die Grundwasserwanne Wynematte zum Tunnelportal Wynematte (Nord), KM 0+584, hinunter. Der Tunnel folgt dem östlichen und südöstlichen Siedlungsrand von Suhr entlang der Überbauungen Buhaldeweg und Wynemattestrasse. Anschliessend unterquert der Tunnel das meterspurige Bahntrassee der Aargau Verkehr AG (AVA, vormals WSB), die Gränicherstrasse und einen Teil der Gewerbezone. Der Tunnel führt weiter unterhalb der Ringstrasse zum Portal Helgefeld (Süd), KM 1+428, wo die Grundwasserwanne Helgefeld anschliesst. Am Ende der Grundwasserwanne liegt der Knoten Südanbindung, welcher die Verbindung zur Gränicherstrasse und zum Obertelweg bzw. zur zukünftigen Südumfahrung Suhr herstellt. Der Situationsplan des Tunnels Wynematte ist in der Abbildung 2-1 dargestellt.

Entlang des Tagbautunnels sind in Abständen von 164 m bis 280 m drei Notausgänge (NA 1 bei KM 0+748, NA 2 bei KM 0+976, NA 3 bei KM 1+256) angeordnet, welche an die Oberfläche führen. Im Bereich des Notausgangs Wynematte (NA2) befindet sich als unterirdisches Bauwerk die Zentrale Wynematte. Bei den Notausgängen Buhalde (NA1) und Helgefeld (NA3) sind unterirdisch jeweils ein Technik- und ein Providerraum angeordnet.

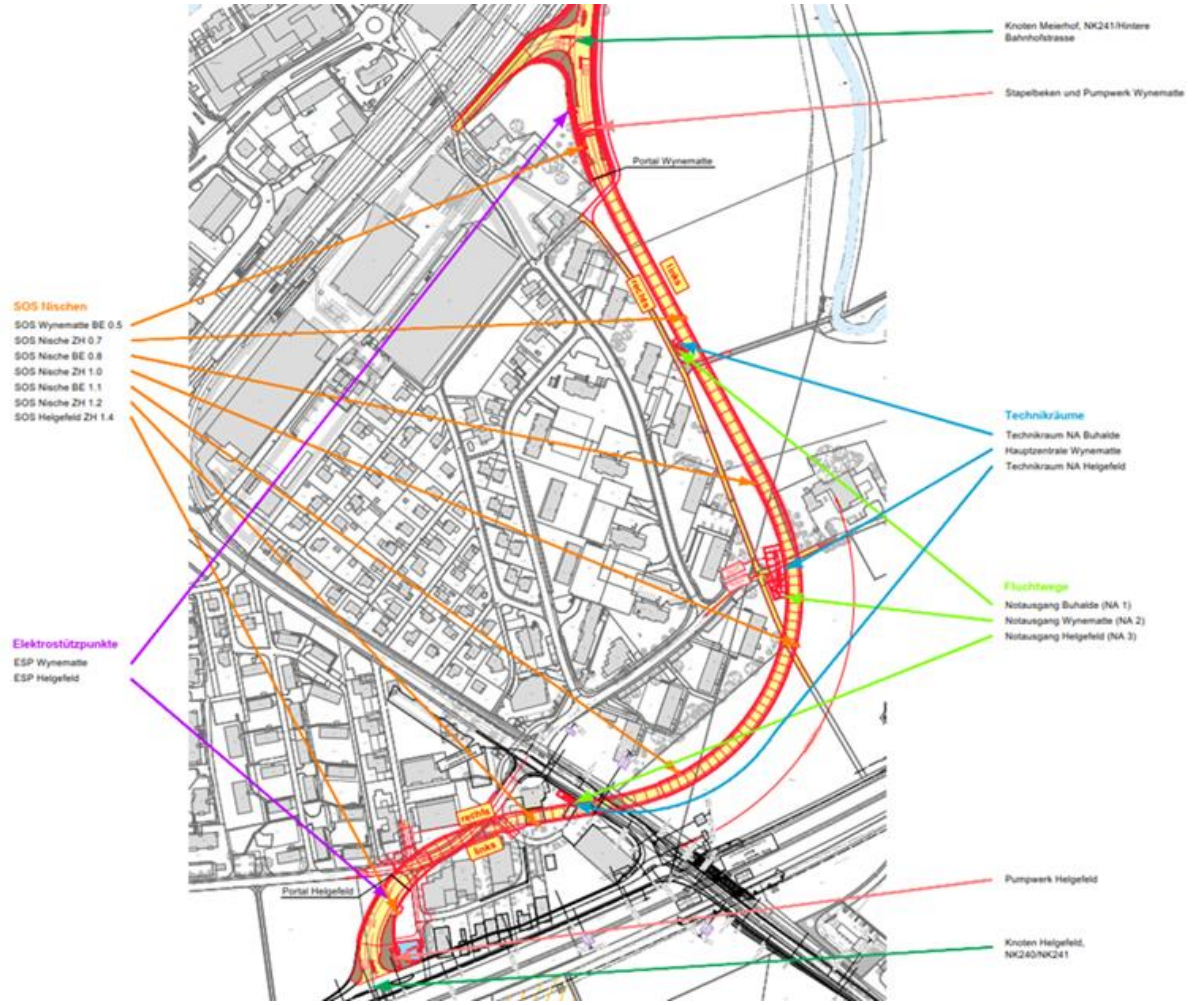


Abbildung 2-1: Situationsplan des Tunnels Wynematte **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**.

2.2.3 Längenprofil

Der Tunnel folgt einem linearen Höhenprofil (Gefälle von 0.37%), welches vom Portal Wynematte zum Portal Helgefeld ansteigt. Die Tunnelportale sind vollständig eingegraben. In den Vorportalbereichen sinkt die Fahrbahn von der Grundhöhe jeweils durch steile Rampen (Gefälle von 5%) ab. Der Verlauf ist in Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3 dargestellt und die homogenen Segmente der Längsneigung in den überdeckten Bereichen sind in der Tabelle 2-2 gegeben.

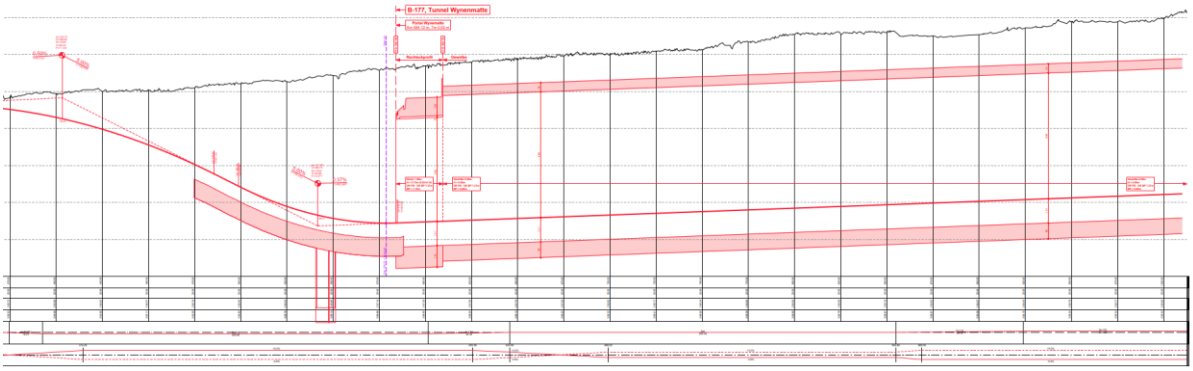


Abbildung 2-2: Längenprofil des Tunnels Wynematte auf Seite Wynematte.[29]

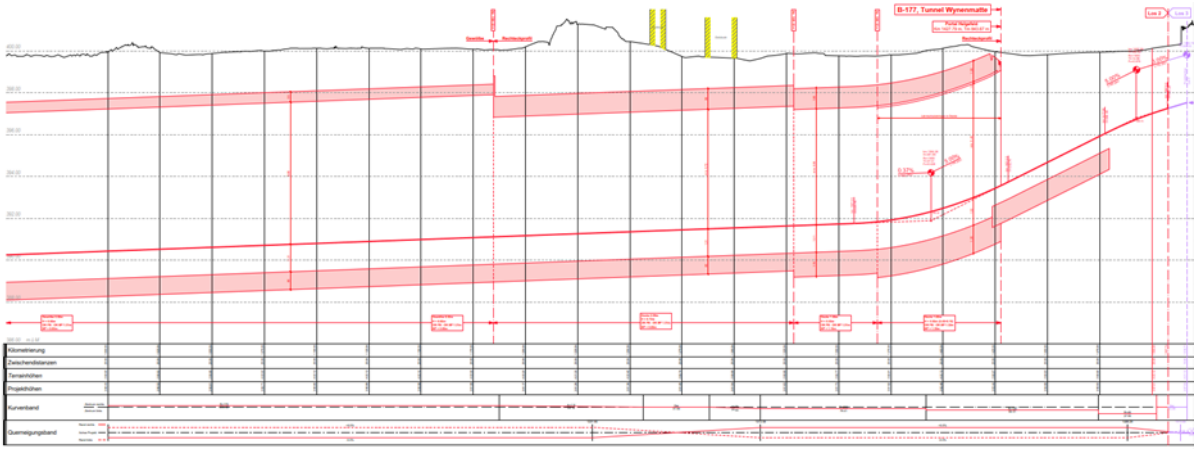


Abbildung 2-3: Längenprofil des Tunnels Wynematte auf Seite Helgefeld. [30]

Kilometrierung Start	Länge / Längsneigung	Kilometrierung Ende
KM 0+542	852 m / 0.37%	KM 1+394
KM 1+394	34 m / 5.00%	KM 1+428

Tabelle 2-2: Längsneigungsverlauf des Tunnels Wynematte, in Richtung Bern.

2.2.4 Normalprofil

Der Tunnel Wynematte besteht aus zwei (2) Normalprofilen. Der zentrale Abschnitt mit einen Gewölbeprofil erstreckt sich von kurz innerhalb des Portals Wynematte bis östlich des Bahntrasses der AVA. Die Abschnitte an den jeweiligen Tunnelenden sind rechteckig. Die homogenen Segmente der Tunnelprofile sind in der Tabelle 2-3 angegeben.

Der Wechsel auf den Rechteckquerschnitt auf der Seite Helgefeld erfolgt aufgrund der geringeren Überdeckung und der grossen Aufweitung im Bereich des Portals. Aus optischen Gründen werden beide Portale als Rechteckprofil ausgebildet, was im Portalbereich Wynematte einen Wechsel vom Gewölbe zum Rechteckprofil zur Folge hat. Der Übergang eines Profils zum anderen erfolgt abrupt, ohne Abschrägung.

Kilometrierung Start	Länge / Profil	Fläche	Umfang	Hydraulischer Durchmesser	Kilometrierung Ende
KM 0+584	26 m / Rechteckprofil	61.5 m^2	33.1 m	7.43 m	KM 0+610
KM 0+610	575 m / Gewölbeprofil	62.8 m^2	31.2 m	8.05 m	KM 1+185
KM 1+185	114 m / Rechteckprofil	61.5 m^2	33.1 m	7.43 m	KM 1+299
KM 1+299	30 m / Rechteckprofil	Variabel (SV-Nische)			KM 1+329
KM 1+329	99 m / Rechteckprofil	Variabel (Aufweitung)			KM 1+428

Tabelle 2-3: Normalprofile des Tunnels Wynematte, in Richtung Bern.

Die Normalprofile des Tunnels Wynematte sind in Abbildung 2-4 «Gewölbeprofil» und Abbildung 2-5 «Rechteckprofil» dargestellt.

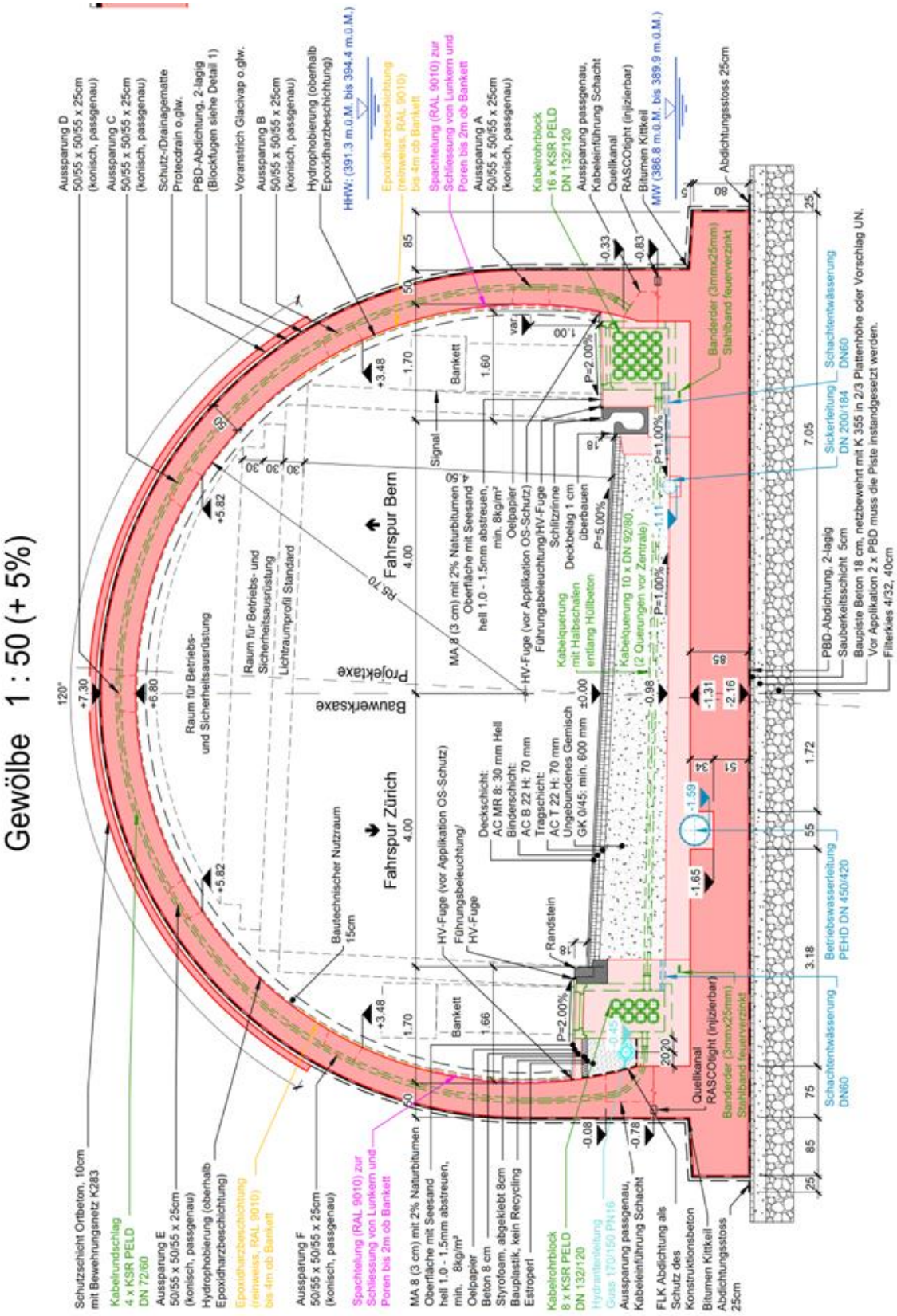


Abbildung 2-4: Normalprofil des Tunnels Wynematte, Gewölbe (+3%), Länge ca. 575 m [24].

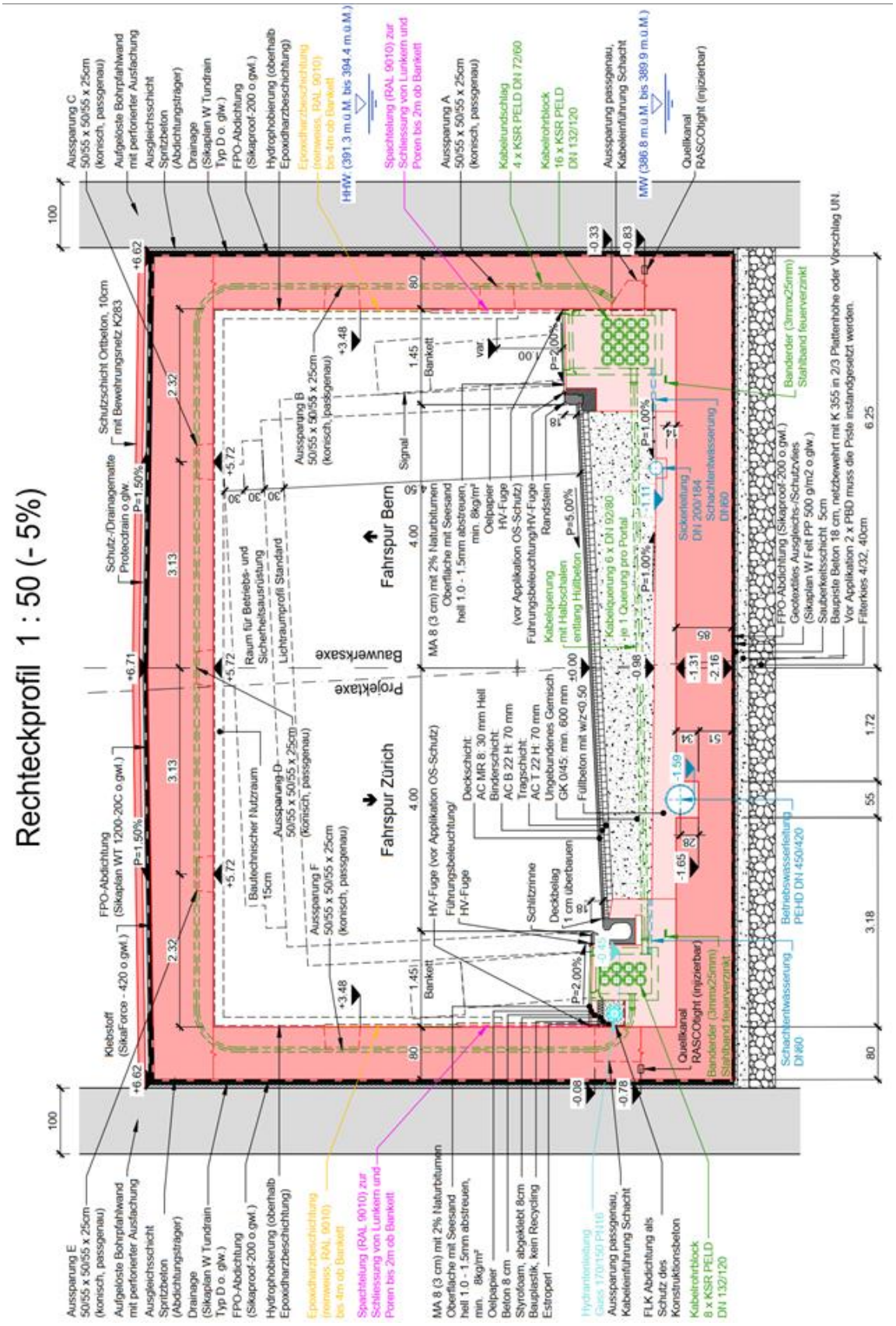


Abbildung 2-5: Tunnelprofil des Tunnels Wynematte, Rechteck, Länge ca. 269 m [24].

2.2.5 Fluchtwege und Notausgänge

Gemäss SIA Norm 197/2 [13], §8.8.2.3 sind die Fluchtwege aus dem Fahrraum in regelmässigen Abständen auf einer Seite auszuführen. Bei Tagbautunneln beträgt der maximale Abstand der Fluchtwege 280 m. Die Forderung des gleichmässigen Abstands kann aufgrund der Gegebenheiten an der Oberfläche nicht eingehalten werden. Mit der Anordnung der drei (3) Notausgänge (NA) gemäss Tabelle 2-4 werden diese Fluchtweganforderungen im Tunnel Wynematte teilweise übertroffen.

Die definitiven Positionen der Notausgangstüren im Fahrraum wurden im Faktenblatt (FS) 1 [18] «Fluchtwege» präsentiert und abschliessend durch eine elektronische Kommunikation am 28.01.2022 festgelegt.

Notausgänge des Tunnels Wynematte	Kilometrierung	Distanz zum nächsten Ausgang
Tunnelportal Nord	KM 0+584	164 m
Notausgang Buhalde (NA 1)	KM 0+748	228 m
Notausgang Wynematte (NA 2)	KM 0+976	280 m
Notausgang Helgefeld (NA 3)	KM 1+256	172 m
Tunnelportal Süd	KM 1+428	-

Tabelle 2-4: Lage und Distanzen der Notausgänge am Fahrraum.

2.3 Verkehrsdaten

Der Tunnel Wynematte wird mit Gegenverkehr und eine Fahrspur pro Fahrtrichtung betrieben. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist für alle Fahrzeugkategorien, Lastwagen (LW) und Personenwagen (PW), auf 60 km/h festgelegt. Die Verkehrsprognose für das Jahr 2040 [20] nennt für die Tunnelstrecke einen durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) von 14‘300 Fz/Tag und einen Lastwagenanteil am DTV von 6%.

Für die Dimensionierung gemäss ASTRA RL 13001 [1] werden die Verkehrsdaten im Jahr der geplanten Eröffnung und 10 Jahre danach (Summe beider Fahrrichtungen) benötigt. Die Verkehrsprognose geht von einer Eröffnung des Tunnels im Jahr 2030 aus. Die mittlere Verkehrszunahme bis 2040 wird mit einer Zuwachsrate von 1.5% pro Jahr gerechnet. Der Lastwagenanteil wird als gleichbleibend angenommen.

Der massgebliche stündliche Verkehr (MSV) wird mit 14% vom DTV berechnet (Regionalverkehr). Die für die Lüftungsauslegung massgebenden maximalen Verkehrsdichten werden auf die Personenwageneinheit (PWE) bezogen. Hinsichtlich des Längenbedarfs zählt 1 PW als 1 PWE, und 1 LW als 2 PWE. Die daraus berechneten Verkehrszahlen für das Eröffnungsjahr und 10 Jahre danach sind in Tabelle 2-5 dargestellt.

Jahr	DTV	LWA	MSV (alle Fz)	PWE/h/Fahrstreifen
2025	11’400 Fz/Tag	6%	1'600 Fz/h	850 PWE/h/Fahrstreife
2030	12’300 Fz/Tag	6%	1'730 Fz/h	920 PWE/h/Fahrstreife
2035	13’300 Fz/Tag	6%	1'860 Fz/h	990 PWE/h/Fahrstreife
2040	14’300 Fz/Tag	6%	2'000 Fz/h	1'060 PWE/h/Fahrstreife

Tabelle 2-5: Verkehrsdaten für die Jahre 2025 bis 2040 (prognostizierte Werte).

Bei Stillstand der Fahrzeuge ist pro Fahrstreifen mit einer Verkehrsdichte von 150 PWE/km zu rechnen. Die Verkehrskapazität in Tunneln mit Gegenverkehr und flüssigem Verkehr beträgt 1’800 PWE pro Stunde und Fahrstreifen [1]. Gemäss den Verkehrszahlen kann der Tunnel Wynematte als nicht staugefährdet betrachtet werden. Ausserdem wird die spezielle Verkehrsführung mit Kreuzung und Ampeln an beiden Tunnelenden durch das Verkehrsleitsystem (VLS) geregelt, welche die Stauwahrscheinlichkeit weiter reduziert, vgl. auch Kapitel 6.2.3.

Die Annahmen für das mittlere LW-Gewicht und den Dieselanteil bzw. Elektroanteil bei den PW lauten:

- LW-Gewicht: 18 t (Regionalverkehr)
- Dieselanteil der PW: 27% (Jahr 2040)
- Elektroanteil der PW: 41% (Jahr 2040)

2.4 Meteorologische Daten

2.4.1 Temperatur und barometrischer Druck

Die Aussenlufttemperatur in Suhr wurde mit dem Programm Meteonorm [31] ermittelt. Die monatliche Temperatur variiert im Mittel zwischen einem Minimum von –2.3°C im Februar und einem Maximum von 19.6°C im Juli. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 8.0°C.

Da es um den Neubau des Tunnels Wynematte geht, wird die innere Lufttemperatur anhand des Richtwerts für bergmännisch erstellte Tunnel abgeschätzt. Gemäss ASTRA RL 13001 [1] wird die Temperaturdifferenz zwischen Fahrraum und Umgebung für Tunnel im Mittelland mit 1°C pro 450 m Tunnellänge berechnet. Die Temperatur im Fahrraum ist in der Regel weitgehend konstant und liegt meist einige Kelvin über der mittleren Jahrestemperatur. Es ergibt sich damit die massgebende Temperaturdifferenz von 1.8°C für die Berechnung der temperaturbedingte Druckdifferenz (vgl. Anhang A: Aerodynamik Konstanten).

Die Lufteigenschaften werden mit den hypsometrischen Formeln (1) bis (6), der internationalen Standard-Referenzatmosphäre und der Projekthöhe (391 m.ü.M.) berechnet und sind in der Tabelle 2-6 zusammengefasst.

$$p(h) = p_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta h} \cdot \frac{h}{T_0}\right)^{5.255} \quad (1)$$

$$\rho(h) = \frac{p(h)}{RT} \quad (2)$$

$$p_0 = 101'325 \text{ Pa} \quad (3)$$

$$T_0 = 288.15 \text{ K} \quad (4)$$

$$\rho_0 = \frac{p_0}{RT_0} = 1.225 \text{ kg/m}^3 \quad (5)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta h} = -0.0065 \text{ K/m} \quad (6)$$

Eigenschaft	Aussenluft (beide Portale)	Fahrraumluft
Temperatur	8.0°C	9.8°C
barometrischer Druck	96'727 Pa	
Luftdichte	1.18 kg/m^3	1.17 kg/m^3

Tabelle 2-6: Jahresmittelwert der Lufteigenschaften im Tunnel Wynematte.

2.4.2 Durchschnittliche Windgeschwindigkeit

Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit dient zur Berechnung des Winddruckes auf die Portale, vgl. Anhang A: Aerodynamik Konstanten und Formeln. Der Jahresmittelwert in 50 m Höhe über Grund, $u_{Wind,\ 50m}$, wird durch die vom Windatlas Schweiz modellierte Windrose an den respektiven Tunnelportalen bestimmt [33]. Die Geschwindigkeit auf der Höhe des jeweiligen Portals wird mittels eines logarithmischen Windprofils berechnet:

$$u_{Wind,\ Portal} = u_{Wind,\ 50m} \frac{\ln\left(\frac{h_{Portal}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{50m}}{z_0}\right)} \quad (7)$$

Die durch die vertikale Scherung verursachte Intensitätsänderung führt zu einer starken Verlangsamung der Windgeschwindigkeit nahe am Boden. Unter Berücksichtigung der Tieflage der Tunnelportale wird eine Portalhöhe, h_{Portal}, von 3 m über Grund verwendet. Gleichung (7) berücksichtigt die Art des Geländes und die darauf befindlichen Hindernisse durch die Rauhigkeitslänge, z_0. In der Berechnung wird ein Wert von 0.4 angesetzt, was einem repräsentativen Oberflächentyp mit zahlreichen Hindernissen, wie z.B. Häusern mit niedriger und mittlerer Gebäudehöhe oder Wäldern und unwegsamem Gelände entspricht.

Die berechnete Windgeschwindigkeit an den Portalen Wynematte und Helgefeld sind in der Tabelle 2-7 gegeben. Die ungünstigere Geschwindigkeit ist am Portal Helgefeld mit einem Mittelwert von 1.63 m/s zu erwarten. Diese ist für die Auslegung der Tunnellüftung massgebend.

Portal	Richtung	Windgeschwindigkeit 50 m über Grund	Windgeschwindigkeit auf Portalhöhe
Wynematte	158° (SSE)	2.80 m/s	1.59 m/s
Helgefeld	37° (NNE)	2.90 m/s	1.63 m/s

Tabelle 2-7: Richtung und Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe über Grund und auf den Portalen Wynematte und Helgefeld.

2.5 Schallschutz

Der Lärm im Fahrraum und in der Umgebung soll aus verschiedenen Gründen begrenzt werden:

- Schutz der Gesundheit;
- Möglichkeit der Kommunikation;
- Vermeidung von Panik.

Für den Normalbetrieb dient die Lärmschutzverordnung (LSV) als Grundlage zur Beurteilung der Lärmbelastung in der Umgebung [8]. In der Umgebung der Tunnelportale und im Einflussbereich von Aussenluftfassungen und Abluftkaminen müssen im Betrieb bei normalen Verkehrszuständen die Anforderungen des Schallschutzes eingehalten werden. Die Belastungsgrenzwerte für Strassenverkehrslärm sind in der Tabelle 2-8 gegeben.

Der Richtwert für die Lärmbelastung im Ereignisbetrieb im Fahrraum sowie in der Umgebung des Tunnels entspricht dem SUVA-Grenzwert von 85 dB(A) für Dauerbelastung am Arbeitsplatz [15]. Dieser

Wert ist massgebend für den Fahrraum und damit für die Auslegung der Schalldämpfer der Strahlventilatoren. Der Schallleistungspegel je Strahlventilator für beide Blasrichtungen ist vom Lieferanten zu garantieren und wird während der Werksprüfung geprüft: Saugseitiger Schallleistungspegel in Hauptblas- und Reversierrichtung max. 103 dB(A). Die Schallmessung erfolgt gemäss der ISO-Norm 13350 [10] mit einer Messunsicherheit von +4 dB(A) gemäss der ISO-Norm 13348 [11].

Bereich	Empfindlichkeitsstufe	Planungswert (Tag / Nacht)		Immissionsgrenzwert (Tag / Nacht)		Alarmwert (Tag / Nacht)	
Portal Wynematte	II	55 dB(A)	45 dB(A)	60 dB(A)	50 dB(A)	70 dB(A)	65 dB(A)
Portal Helgefeld	III	60 dB(A)	50 dB(A)	65 dB(A)	55 dB(A)	70 dB(A)	65 dB(A)

Planungswerte gelten für die Errichtung neuer lärmerzeugender Anlagen und für die Ausscheidung und Erschliessung von Bauzonen für lärmempfindliche Gebäude (Wohnungen); Immissionsgrenzwerte legen die Schwelle fest, ab welcher der Lärm die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden erheblich stört. Sie gelten für bestehende lärmerzeugende Anlagen und für Baubewilligungen von lärmempfindlichen Gebäuden (Wohnungen); Alarmwerte sind ein Kriterium für die Dringlichkeit der Sanierungen und den Einbau von Schallschutzfenstern.
Tabelle 2-8: Belastungsgrenzwerte für Strassenverkehrslärm gemäss Lärmschutz-Verordnung im Normalbetrieb [8].

2.6 Berechnungssoftware

2.6.1 Berechnungstool für die Auslegung der Längslüftung im Normalbetrieb

Die Auslegung für den Normalbetrieb erfolgt anhand eines intern von der Lombardi-Gruppe programmierten Berechnungsmodells. Das Tool basiert auf ein monodimensionales Modell und berechnet die erforderliche Frischluftmenge für die Einhaltung einer ausreichenden Luftqualität im Fahrraum. Aus der der Frischluftmenge entsprechenden Strömungsgeschwindigkeit wird der erforderliche Schub der Strahlventilatoren definiert.

Die Emissionsberechnung erfolgt gemäss Anhang III der Richtlinie ASTRA 13001 [1]. Dieser Anhang enthält die Grundgleichungen und die spezifischen Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) und Sichttrübe (ST) der Fahrzeugkategorien PW und LW. Die Emissionswerte gelten für die Dimensionierung der Tunnellüftungsanlagen. Sie basieren auf den Werten in der PIARC [12], die bis zum Jahr 2035 angegeben sind. Die Variation der Emissionswerte über das Jahr 2035 hinaus beruht auf den Angaben der Anteile der Antriebskonzepte nach dem Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA, Version 4.2.2 [9].

2.6.2 Berechnungstool für die Auslegung der Längslüftung im Ereignisbetrieb

Die Auslegung der Längslüftung erfolgt anhand eines intern von der Lombardi-Gruppe entwickeltes Berechnungstools. Dieses Tool berechnet ausgehend von einem monodimensionalen Modell den durch die Strahlventilatoren erzeugten Schub und die Widerstände entlang des Tunnels. Berücksichtigte Widerstände sind:

- Druckverluste im Bauwerk
- Druckwirkungen durch den Verkehr
- natürlicher Kamineffekt
- barometrische Druckdifferenz
- Druckwirkung durch Wind
- Brandauftrieb

2.6.3 Camatt

Das ausgelegte Lüftungssystem wird mit dem Programm Camatt geprüft. Diese eindimensionale kommerzielle Berechnungssoftware (1D CFD), Version 2.20, entwickelt vom CETU (Centre d'Etude des Tunnels), löst das aerodynamische Gleichungssystem und ermöglicht die Simulation von Bränden in Tunneln. Das Tool berücksichtigt atmosphärische Effekte, die Ausrüstung des Tunnels und Fahrzeuge in einem thermisch gekoppelten Bereich.

3. Festlegung des Lüftungssystems

Die Wahl des Lüftungssystems basiert auf den Angaben der ASTRA RL 13001 [1]. Die Richtlinie gilt für alle Strassentunnel (Tagebau sowie Untertagbau) der Nationalstrassen mit einer durchschnittlichen Längsneigung kleiner als 5%. Die Lüftungssysteme werden in drei Hauptgruppen unterteilt:

- Natürliche Tunnellüftung;
- Mechanische Tunnellüftung ohne Absaugung;
- Mechanische Tunnellüftung mit Absaugung.

Die Wahl der Hauptgruppe des Lüftungssystems erfolgt pro Tunnelröhre mit den folgenden Arbeitsschritten:

- Festlegung der grundlegenden Verkehrsart. Aus sicherheitstechnischen Überlegungen sind dreigrundlegende Verkehrsarten zu unterscheiden:
  - RV 1: Richtungsverkehr mit geringer Stauhäufigkeit;
  - RV 2: Richtungsverkehr mit grosser Stauhäufigkeit;
  - GV: Gegenverkehr;
- Festlegung der massgebenden Tunnellänge. Diese entspricht im Allgemeinen der Distanz zwischen den Portalen. Bei verzweigten Tunnelsystemen ist die maximale Weglänge von Brandrauch für die massgebende Tunnellänge bestimmend.
- Bestimmung der möglichen Hauptgruppe(n) des Lüftungssystems aufgrund der ermittelten Verkehrsart und Tunnellänge.
- Befindet man sich im Übergangsbereich von zwei Hauptgruppen von Lüftungssystemen, muss die Wahl mit Hilfe der Einflussgrössen (Gesamtverkehr, Lastwagenverkehr und Längsneigung im Tunnel) verfeinert werden. Damit wird die Tunnelröhre einem von drei (3) Risikoniveaus zugeordnet.
- Befindet man sich weiterhin im Übergangsbereich von zwei Hauptgruppen von Lüftungssystemen, muss die Wahl mit Hilfe einer umfassenden Beurteilung getroffen werden. Der Entscheid ist nachvollziehbar zu begründen.

Der Tagbautunnel Wynematte besteht aus einer Tunnelröhre und wird im Gegenverkehr betrieben. Die massgebende Tunnellänge ist 844 m. Für die Systemwahl fällt die Röhre in den Übergangsbereich «Lüftung ohne Absaugung» und «Lüftung mit Absaugung». Die Beurteilung des Risikoniveaus ist deshalb erforderlich und erfolgt in der Tabelle 3-1.

Die Beurteilung der Einflussgrösse Gesamtverkehr von 9'700 Fahrzeugen pro Tag und Spur (im Jahr 2040) liegt im mittleren Bereich (M). Der durchschnittliche Lastwagenverkehr im Tunnel liegt mit 587 Fahrzeugen pro Tag und Spur ebenfalls im mittleren Bereich (M). In der Beurteilung der Einflussgrösse Längsneigung über jeweils 800 m Länge liegt der Tunnel mit 0.51% im unteren Bereich (U). Aus den Teilbewertungen der drei Einflussgrössen (MMU) ergibt sich die Gesamtbewertung des Risikoniveaus B. Aus diesen Untersuchungen ergibt sich (vgl. Abbildung 3-1) als geeignete Hauptgruppe des Lüftungssystems für den Tunnel Wynematte eine mechanische Lüftung ohne Absaugung.

Mit den heute gültigen Emissionswerten wird die Lüftung ohne Absaugung von Brandrauch oder anderen bei einem Ereignis freigesetzten Gasen als Längslüftung mit Strahlventilatoren ausgeführt (Längslüftung). Auf eine Längslüftung mit zusätzlicher Immissionsschutzlüftung wird verzichtet.

Einflussgrösse	Tunnel Wynematte	Bewertung
Gesamtverkehr (max. Prognosewert zwischen 2030 und 2040), DTV pro Fahrstreife	9'700 Fz/Tag/Spur	Mitte (M): Wert liegt zwischen 8’000 und 12'000 Fz/Tag/Spur
Lastwagenverkehr, LW pro Tag und Fahrstreife	582 Fz/Tag/Spur	Mitte (M): Wert liegt zwischen 500 und 1'200 Fz/Tag/Spur
Massgebende Längsneigung im Tunnel (über jeweils 800 m Länge)	0.50%	Unten (U): Wert liegt zwischen null (0) und 1.5%
Gesamtbewertung	MMU	Mittleres Risikoniveau (B)

Tabelle 3-1: Bewertung des Risikoniveaus für den Tunnel Wynematte (Gegenverkehr).

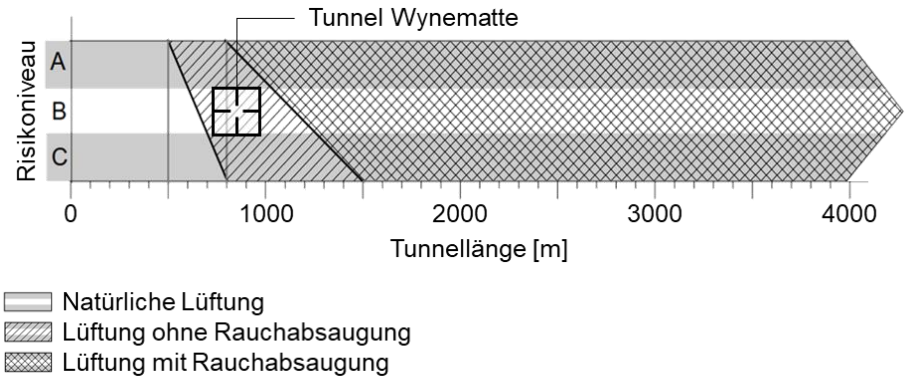


Abbildung 3-1: Bestimmung der Hauptgruppe des Lüftungssystems des Tunnels Wynematte (Gegenverkehr, 844 m Länge).

4. Auslegung der Fahrraumlüftung

Im Tunnel Wynematte wird eine mechanische Lüftung ohne Absaugung im Ereignisfall (Längslüftung) realisiert.

4.1 Normalbetrieb

Der Begriff Normalbetrieb umfasst alle in der Planung berücksichtigten Verkehrsfälle, einschliesslich stockenden Verkehrs und Stau.

4.1.1 Ziel der Normallüftung

Ziel der Fahrraumlüftung im Normalbetrieb ist es eine ausreichende Luftqualität im Fahrraum zu gewährleisten. Um diese Luftqualität zu gewährleisten, muss der Fahrraum mit Frischluft versorgt werden.

Die Verkehrsdaten sind die prognostizierte Werte für das Jahr 2040 (vgl. Kapitel 2.3). Eine Stausituation in einem Gegenverkehrs-Tunnel kann a-priori nicht ausgeschlossen werden. Zur Bestimmung des Frischluftbedarfs sind deshalb neben dem MSV je nach Eintretenswahrscheinlichkeit auch Verkehrsfälle mit stockendem Verkehr und mit Stau zu berücksichtigen.

Für die Auslegung der Lüftung sind gemäss ASTRA RL 13001 [1] und auf der Grundlage von SUVA [16] und PIARC [12] die in der Tabelle 4-1 definierten Dimensionierungswerte der Luftqualität im Fahrraum zu verwenden.

Dimensionierungswert	
CO-Konzentration, $c_{lim, CO}$	60 ppm
Sichttrübung, $k_{lim, ST}$	0.005 m^{-1}

Tabelle 4-1: Dimensionierungswerte der Luftqualität im Fahrraum.

4.1.2 Emissionsberechnung und Frischluftbedarf

Die Berechnung des Frischluftbedarfs erfolgt im Anschluss an die Ermittlung der Emissionen der Einzelfahrzeuge. Die Fahrraumlüftung wird so ausgelegt, dass für alle Verkehrsfälle die Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte möglich ist.

In der ASTRA RL 13001 [1] werden Verkehrsfälle vorgegeben, welche für die Auslegung verwendet werden. Im Tunnel Wynematte werden Fahrgeschwindigkeiten zwischen null (0) und der signalisierten Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h angesetzt. Dazu sind den Berechnungen für den Tunnel mit Gegenverkehr die Richtungsaufteilungen des Verkehrs gemäss Tabelle 4-2 zu Grunde zu legen.

Richtung	**Verkehrsaufteilung**			
→ Bern	20%	40%	60%	80%
→ Zürich	80%	60%	40%	20%

Tabelle 4-2: Richtungsaufteilung des Verkehrs zur Berechnung des Frischluftbedarfs bei Gegenverkehr.

4.1.2.1 Frischluftbedarf zur Begrenzung der CO-Konzentration

Die gesamte CO-Emission über die Tunnel- bzw. Abschnittslänge ist:

$$E_{CO} = \frac{n_{PW} \cdot e_{PW,\,CO} + n_{LW} \cdot e_{LW,\,CO}}{3600} \tag{8}$$

Dabei bezeichnet n_{PW} die Anzahl der PW und n_{LW} die Anzahl der LW im Tunnel bzw. im betrachteten Abschnitt bei fliessendem und bei instabilem Verkehrsfluss. Bei unterschiedlichen Emissionswerten über die Tunnellänge oder die Fahrstreifen setzt sich die Gesamtemission aus der Summe der Teilbeiträge zusammen.

Die notwendige Frischluftmenge zur ausreichenden Verdünnung der CO-Emission ist:

$$Q_{FL,\,CO} = \frac{E_{CO}}{c_{lim,\,CO}} \cdot 10^6 \tag{9}$$

mit dem Dimensionierungswert für die CO-Konzentration, $c_{lim,\,CO}$, aus der Tabelle 4-1.

4.1.2.2 Frischluftbedarf zur Begrenzung der Sichttrübung

Die gesamte Sichttrübe-Emission über die Tunnel- bzw. Abschnittslänge ist:

$$E_{ST} = \frac{n_{PW} \cdot e_{PW,\,ST} + n_{LW} \cdot e_{LW,\,ST}}{3600} \tag{10}$$

Dabei bezeichnet n_{PW} die Anzahl der PW und n_{LW} die Anzahl der LW im Tunnel bzw. im betrachteten Abschnitt bei fliessendem und bei instabilem Verkehrsfluss. Bei unterschiedlichen Emissionswerten über die Tunnellänge oder die Fahrstreifen setzt sich die Gesamtemission aus der Summe der Teilbeiträge zusammen.

Die Frischluftmenge zur ausreichenden Verdünnung der Sichttrübe-Emission ist:

$$Q_{FL,\,ST} = \frac{E_{ST}}{k_{lim,\,ST}} \tag{11}$$

mit dem Dimensionierungswert für die CO-Konzentration, $k_{lim,\,ST}$, aus der Tabelle 4-1.

4.1.2.3 Minimaler Frischluftbedarf

Zur Berücksichtigung instationärer Effekte wird weiterhin für die Dimensionierung eine minimale Frischluftmenge in Abhängigkeit des Fahrraumquerschnitts, A_{Tunnel}, gefordert.

$$Q_{FL,\,min} = 1.5 \cdot A_{Fahrraum} \tag{12}$$

Für den Tunnel Wynematte, mit einer Querschnittsfläche von 62.8 m^2, beträgt die minimale Frischluftmenge 94.2 m^3/s. Die entsprechende Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum erlaubt einen Luftwechsel innerhalb 10 Minuten (Zielwert ≤20 Minuten).

4.1.2.4 Massgebender Frischluftbedarf

Die notwendige Frischluftmenge ist für jeden Verkehrsfall einzeln zu bestimmen und beträgt:

$$Q_{FL} = \max\left(Q_{FL,\,CO},\, Q_{FL,\,ST},\, Q_{FL,\,min}\right) \tag{13}$$

Auf jedem Fall darf die maximale, durch die Lüftungsanlage unterstützte Luftgeschwindigkeit im Fahrraum zur Gewährleistung des Frischluftbedarfs in Tunneln mit Gegenverkehr 6 m/s nicht überschreiten (entspricht 376.8 m^3/s). Gleichung (13) wird daher

$$Q_{FL} = \min\left(\max\left(Q_{FL,\,CO},\, Q_{FL,\,ST},\, Q_{FL,\,min}\right),\, 376.8\right) \tag{14}$$

Die Berechnung der Emissionen (CO und ST) und den sich daraus ergebenden Frischluftbedarf für die einzelnen Verkehrsfälle erfolgt mit dem Berechnungstool für die Auslegung der Längslüftung im Normalbetrieb, vgl. Kapitel 2.6.1. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-3 dargestellt. Es zeigt sich, dass das ein Frischluftbedarf von bis 9.6 m³/s bei einer Verkehrsverteilung von 60/40% bzw. 40/60%, also bei leicht asymmetrischem Verkehr für die Sichttrübe zu erwarten ist. In den meisten Fällen für Fahrgeschwindigkeiten grösser oder gleich 10 km/h wird der Frischluftbedarf für CO und ST ohne mechanische Lüftung durch den Kolbeneffekt und meteorologische oder thermische Effekte erfüllt.

Der massgebende Frischluftbedarf liegt damit bei Q_{FL} = 94.2 m³/s.

#	Verkehrsaufteilung Bern	Verkehrsaufteilung Zürich	Fahrgeschwindigkeit	Frischluftbedarf für CO, $Q_{FL, CO}$	Frischluftbedarf für ST, $Q_{FL, ST}$
1	80%	20%	0 km/h	0.8 m³/s	0.9 m³/s
2	80%	20%	10 km/h	1.0 m³/s	6.1 m³/s
3	80%	20%	20 km/h	0.9 m³/s	6.8 m³/s
4	80%	20%	30 km/h	0.6 m³/s	7.0 m³/s
5	80%	20%	40 km/h	0.5 m³/s	7.2 m³/s
6	80%	20%	50 km/h	0.5 m³/s	7.2 m³/s
7	80%	20%	60 km/h	0.4 m³/s	7.2 m³/s
8	60%	40%	0 km/h	1.1 m³/s	1.2 m³/s
9	60%	40%	10 km/h	1.3 m³/s	8.1 m³/s
10	60%	40%	20 km/h	1.2 m³/s	9.0 m³/s
11	60%	40%	30 km/h	0.8 m³/s	9.4 m³/s
12	60%	40%	40 km/h	0.7 m³/s	9.6 m³/s
13	60%	40%	50 km/h	0.6 m³/s	9.6 m³/s
14	60%	40%	60 km/h	0.5 m³/s	9.6 m³/s
15	40%	60%	0 km/h	1.1 m³/s	1.2 m³/s
16	40%	60%	10 km/h	1.3 m³/s	8.0 m³/s
17	40%	60%	20 km/h	1.2 m³/s	9.0 m³/s
18	40%	60%	30 km/h	0.8 m³/s	9.3 m³/s
19	40%	60%	40 km/h	0.7 m³/s	9.6 m³/s
20	40%	60%	50 km/h	0.6 m³/s	9.6 m³/s
21	40%	60%	60 km/h	0.5 m³/s	9.5 m³/s
22	20%	80%	0 km/h	0.8 m³/s	0.9 m³/s
23	20%	80%	10 km/h	0.9 m³/s	6.0 m³/s
24	20%	80%	20 km/h	0.8 m³/s	6.7 m³/s
25	20%	80%	30 km/h	0.6 m³/s	7.0 m³/s
26	20%	80%	40 km/h	0.5 m³/s	7.1 m³/s
27	20%	80%	50 km/h	0.4 m³/s	7.2 m³/s
28	20%	80%	60 km/h	0.4 m³/s	7.1 m³/s

Tabelle 4-3: Frischluftbedarf für die Luftqualität im Tunnel; berechnete Verkehrsfälle betrachten verschiedene Fahrgeschwindigkeiten und Verkehrsaufteilungen mit prognostizierten Verkehrsdaten für das Jahr 2040.

4.1.3 Erforderlicher Druck für den Normalbetrieb

Der von den Strahlventilatoren aufzubringende Druck, Δp_{FL}, entspricht der Summe der Druckwirkungen durch den Verkehr und der Druckverluste über die Tunnellänge bei Durchströmung mit der notwendigen Frischluftmenge, Q_{FL}, sowie der meteorologisch-thermischen Gegendrücke, vgl. Anhang A: Aerodynamik Konstanten und Formeln. Der dynamische Druck, der von den Strahlventilatoren erzeugt werden muss, ergibt sich aus der Gleichung (15).

$$\Delta p_{FL} = \Delta p_{Fahrraum} + \Delta p_{Fahrzeug} + \Delta p_{Natürlich} + \Delta p_{Barometrisch} + \Delta p_{Wind} \quad (15)$$

Im Normalbetrieb werden die Strahlventilatoren in die Richtung der vorherrschenden Luftströmung im Tunnel aktiviert. Der Verkehr bestimmt normalerweise die Richtung der Strömung. Wenn der Verkehr jedoch symmetrisch verteilt oder gering ist, kann die Luftgeschwindigkeit von einer Richtung in die andere um dem Nullpunkt schwanken. In diesem Fall muss das Lüftungssystem eine Richtung wählen, die Luft in die gewählte Richtung beschleunigen, und diese Strömung auch bei Gegenverkehr bis zu einer bestimmten Schwelle gemäss einer vordefinierten Hysteresekurve beibehalten. Zur Gewährleistung einer ausreichend breite Hysteresekurve und einer robusten Regelung, muss die Lüftung in der Lage sein, stark asymmetrischen Verkehr zu herrschen.

Der Grenzfall ist gegeben, wenn die Strahlventilatoren bereits in Richtung des dominierenden Verkehrs gegen den barometrischen- und Winddruck eingeschaltet sind und es zu einer Umkehrung der Verkehrsverteilung kommt. Die Lüftungssteuerung soll in diesem Fall den erhöhten Widerstand mittels Luftströmungsmessgeräte feststellen und die Schubrichtung der Strahlventilatoren umkehren. Diese Logik ist im Steuerungsbericht [21] näher erläutert. Den erforderlichen Druck der Strahlventilatoren ohne Kolbeneffekt wird in der Tabelle 4-4 gerechnet.

Einzeldruckwirkungen im Normalbetrieb	
Wandreibung und Einzelverluste im Tunnel	4.5 Pa
Natürlicher Kamineffekt	0.3 Pa
Barometrische Druckdifferenz	4.2 Pa
Druckwirkung durch Wind	3.0 Pa
Erforderlicher Druck für eine Frischluftmenge Q_{FL}	**11.7 Pa**

Tabelle 4-4: Erforderlicher Druck der Strahlventilatoren für den Normalbetrieb und eine Frischluftmenge Q_{FL} im Fahrraum.

4.2 Ereignisbetrieb

Der Begriff Ereignisbetrieb umfasst die Prozesse und Abläufe sowie die Schnittstellen zu den externen Stellen (Ereignisdienste) bei Ereignissen.

4.2.1 Ziel der Ereignislüftung

Bei einem Fahrzeugbrand im Tunnel soll die Lüftung:

- die Selbstrettung der Tunnelbenützer unterstützen, indem die Verrauchung der Fluchtwege minimiert wird;
- die Zugangswege der Rettungskräfte von Rauch freihalten;
- nach dem Brand den Tunnel entrauchen.

Bei einem Unfall ohne Fahrzeugbrand sollen zudem mit Hilfe der Lüftung so weit als möglich flüchtige, toxische Substanzen von den Tunnelbenützern ferngehalten werden.

4.2.2 Ereignisse zur Lüftungsauslegung

Die Ereignisse für die Auslegung des Lüftungssystems unter Notfallbedingungen sind gemäss ASTRA RL 13001 [1] in zwei Kategorien eingeteilt: Ereignisse mit Energiefreisetzung oder ohne.

Im ersten Fall ist die Freisetzung von Energie hauptsächlich auf einen Brand zurückzuführen, bei dem Wärmeenergie und giftige Stoffe in der Umgebung freigesetzt werden. Der Brand wird durch ein schweres Fahrzeug ausgelöst und entwickelt eine maximale Brandleistung von 30 MW. Davon sind 2/3 konvektive und 1/3 strahlende Energie. Die Leistung des Brandes wächst linear für 10 Minuten bis auf die maximale Wärmeleistung an. Der entwickelte Brand bleibt für 50 Minuten konstant. Circa 60 Minuten nach Brandbeginn fängt die Brandleistung an abzunehmen. Die Quelle ist innerhalb 90 Minuten erschöpft. Die Brandkurve ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

Im Weiteren sind auch Unfälle mit einer Freisetzung von gefährlichen Substanzen ohne Brand und somit mit einer Brandleistung von 0 MW zu berücksichtigen. Ereignisse ohne Brand können mit den heute üblichen Mess- und Detektionseinrichtungen nur optisch erkannt werden. Ist ein Lastwagen in ein Ereignis verwickelt, muss grundsätzlich damit gerechnet werden, dass gefährliche, flüchtige Substanzen freigesetzt werden könnten. Es ist sinnvoll, in diesem Fall die Lüftungsanlage wie bei einem Brand zu betreiben.

	Lastwagenbrand	**Schadstoff-Freisetzung**
Brandleistung nominal	30 MW	0 MW
Freigesetzte Energie	30 GJ	0 GJ
Freisetzung gefährdender Gase	80 m^3/s	20 m^3/s
Dauer	≥ 60 Minuten	≥ 20 Minuten

Tabelle 4-5: Ereignisse für die Auslegung der Lüftungsanlage.

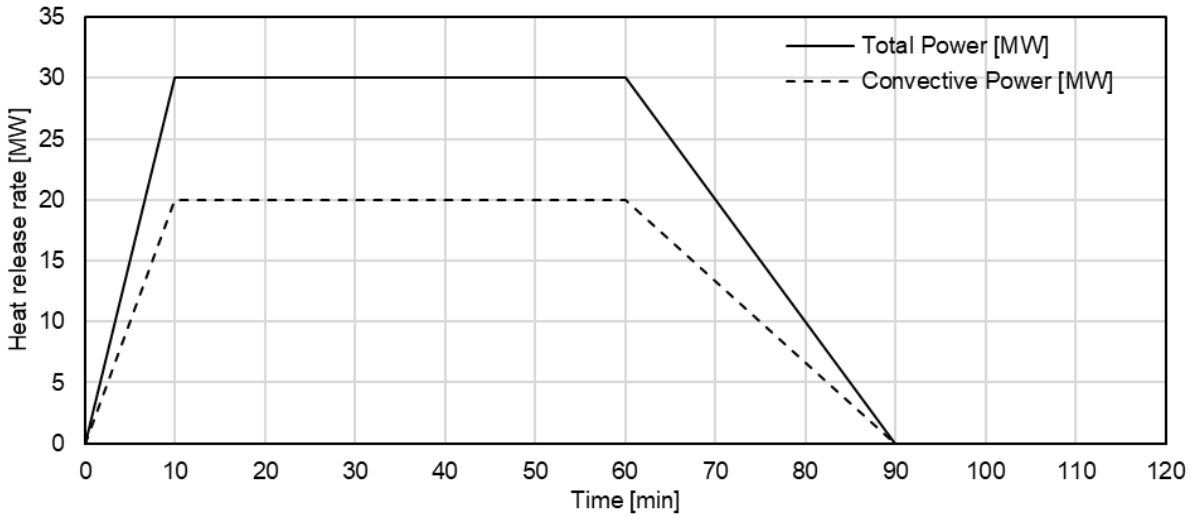


Abbildung 4-1: Brandkurve des Lastwagenbrands.

4.2.3 Dynamik der Ereignisse

Der Tunnel wird mit einem Brandmeldesystem und einem automatischen Leitsystem ausgestattet. Das System wird so ausgelegt, dass ein Unfall innerhalb der ersten Minuten nach Beginn eines Brandes erkannt werden kann. Nach der Detektion werden die Ampeln an den Portalen und im Tunnel verwendet, um den einfahrenden Verkehr zu stoppen. Für die Auslegung wird mit einer (verzögerten)

Tunnelschliessung nach 3 Minuten gerechnet [1], Abschnitt 7.2.3.2. Es wird davon ausgegangen, dass gleichzeitig die Aktivierung der Belüftung erfolgt.

Die Dynamik der Ereignisse für die Auslegung der Tunnellüftung abweicht von der Wirkmatrix [26] (konservatives Vorgehen), und wird in der Tabelle 4-6 zusammengefasst.

Zeit	Ereignis
00:00:00	Beginn des Ereignisses (Lastwagenbrand)
00:01:00	Branddetektion
00:03:00	Tunnelschliessung durch Ampeln an den Portalen und im Tunnel
00:03:00	Inbetriebnahme des Lüftungsregimes (Selbstrettung) der Strahlventilatoren
00:21:00	Umschaltung der Lüftungsstrategie auf Brandbekämpfung

Tabelle 4-6: Dynamik der Ereignisse im Brandfall für die Modellierung der Brandszenarien [hh:mm:ss].

4.2.4 Geforderte Längsströmung im Fahrraum

Bei einem Ereignis breiten sich die freigesetzten Gase in Längsrichtung durch den Tunnel aus. Die Richtung und die Geschwindigkeit dieser Gase im Fahrraum werden mit Hilfe der Strahlventilatoren beeinflusst. Für die Auslegung der Strahlventilatoren ist der ungünstigste Ereignisort im Tunnel zu berücksichtigen. Die in der Tabelle 4-7 definierten Fälle bilden die Grundlage für die Auslegung der Strahlventilatoren für den Ereignisfall.

Bei Rauch im Bereich von Strahlventilatoren dürfen diese nur in besonderen Fällen betrieben werden, kaum aber in der Selbstrettungsphase, siehe Kapitel 7.5, Steuerungsbericht [21].

Bei einem Brand in der Nähe einer Strahlventilatorgruppe kann es zum Ausfall dieser Lüftungsaggregate kommen. In diesem speziellen Fall muss gemäss ASTRA RL 13001 [1] der Schub der verbleibenden Strahlventilatoren mindestens 90% des Sollwertes betragen. Umformuliert auf die Geschwindigkeit, muss die Längslüftung 95% der geforderte Längsströmung sichern können.

Fahrrichtung am Ereignisort	Freigesetzte Energie	Geforderte Längsströmung	Geforderte Längsströmung beim Ausfall einer SV-Gruppe
Tal- und Bergfahrt	LW-Brand	1.50 m/s nach unten	1.42 m/s nach unten

Tabelle 4-7: Anforderung zur Auslegung der Strahlventilatoren für einen Tunnel mit Gegenverkehr.

Neben den Anforderungen der ASTRA RL 13001 [1] wurde im Bauprojekt [23] entschieden, die Tunnellüftung für eine gerichtete Entrauchung ohne back-layering in der Brandbekämpfungsphase (nach erfolgter Evakuierung der Tunnelbenutzer) auszulegen. Diese Bedingung wird mit der kritischen Geschwindigkeit im Tunnel erreicht. Die kritische Geschwindigkeit wird für den Gewölbebereich mit 2.56 m/s angesetzt [17]. Die Dimensionierung der Längslüftung erfolgt also gemäss ASTRA RL 13001 [1] und eine kritische Geschwindigkeit in der Brandbekämpfungsphase unter Einsatz aller SV [19].

4.2.5 Erforderlicher Druck für den Ereignisbetrieb

Der von den Strahlventilatoren aufzubringende Druck, Δp_{ER}, entspricht der Summe der Druckwirkungen durch den Verkehr und der Druckverluste über die Tunnellänge bei Durchströmung mit einer Zielgeschwindigkeit sowie der meteorologisch-thermischen Gegendrücke, vgl. Anhang A: Aerodynamik

Konstanten und Formeln. Der dynamische Druck, der von den Strahlventilatoren erzeugt werden muss, ergibt sich aus der in Gleichung (16).

$$\Delta p_{ER} = \Delta p_{Fahrraum} + \Delta p_{Fahrzeug} + \Delta p_{Natürlich} + \Delta p_{Barometrisch} + \Delta p_{Wind} + \Delta p_{Brand} \quad (16)$$

Betrachtet wird der massgebende stündliche Verkehr im Jahr 2040. Die Verkehrsverteilung wird so gewählt, dass der Tunnel 3 Minuten nach Brandausbruch möglichst voll mit Fahrzeugen ist. Der erforderliche Druck der Strahlventilatoren für eine Strömungsgeschwindigkeit von 1.50 m/s ist in der Tabelle 4-8 angegeben. Der erforderliche Druck der Strahlventilatoren für die kritische Geschwindigkeit von 2.56 m/s ist hingegen in der Tabelle 4-9 angeführt.

Einzeldruckwirkungen im Ereignisbetrieb	
Wandreibung und Einzelverluste im Tunnel	4.2 Pa
Stehende Fahrzeuge im Fahrraum (64 PKW, 4 LKW)	1.7 Pa
Natürlicher Kamineffekt	0.3 Pa
Barometrische Druckdifferenz	4.2 Pa
Druckwirkung durch Wind	3.0 Pa
Brandauftrieb (30 MW)	8.5 Pa
Erforderlicher Druck für eine Zielgeschwindigkeit von 1.50 m/s (Einsatz aller SV)	**21.8 Pa**
Erforderlicher Druck beim Ausfall einer SV-Gruppe	**19.6 Pa**

Tabelle 4-8: Erforderlicher Druck der Strahlventilatoren für den Ereignisbetrieb und eine Strömungsgeschwindigkeit von 1.50 m/s im Fahrraum.

Einzeldruckwirkungen im Ereignisbetrieb	
Wandreibung und Einzelverluste im Tunnel	12.2 Pa
Stehende Fahrzeuge im Fahrraum (64 PKW, 4 LKW)	4.8 Pa
Natürlicher Kamineffekt	0.3 Pa
Barometrische Druckdifferenz	4.2 Pa
Druckwirkung durch Wind	3.0 Pa
Brandauftrieb (30 MW)	8.5 Pa
Erforderlicher Druck für eine Zielgeschwindigkeit von 2.56 m/s	**33.0 Pa**

Tabelle 4-9: Erforderlicher Druck der Strahlventilatoren für den Ereignisbetrieb und eine Strömungsgeschwindigkeit von 2.56 m/s im Fahrraum.

4.3 Strahlventilatoren

4.3.1 Anordnung

Infolge von Projektänderungen in der SIA-Phase 32 entfallen die Anforderungen an ein grosses Lichtraumprofil für Ausnahmetransporte von Typ 1, was den Mindestabstand der Decke zur Fahrbahn reduziert hat. Auch wurde die verfügbare Fläche im Rechteckprofil (für Lüftungseinrichtungen) durch bauliche Optimierungen stark reduziert.

Während der Selbstrettung im Ereignisfall wird in Tunneln mit einer Längslüftung und Gegenverkehr (mit Tunnelnutzern auf beiden Seiten des Brandes) die Rauchschichtung gefördert. Strahlventilatoren in der Nähe oder im Rauch können die Rauchschichtung zerstören und müssen unbedingt

ausgeschaltet werden. In diesem Fall reduziert sich die Anzahl an verfügbaren Strahlventilatoren. Aus diesem Grund erfolgt die Installation der Strahlventilatoren mit grossen Zwischenabständen.

Eine portalnahe Anordnung der SV wird vorgeschlagen. Im Gewölbeprofil werden die SV an die Gewölbedecke über der Fahrbahn installiert, KM 0+674. Im Rechteckprofil (Seite Helgefeld) werden die SV in eine seitlichen Ventilatornische über 3 Blöcke (30 m) installiert, KM 1+314. Die SV werden seitlich neben dem verkehrstechnischen Nutzraum an der Tunnel Decke angeordnet.

In Längsrichtung ist von einem Mindestabstand zwischen Strahlventilatoren von 100 m sowie zwischen Strahlventilatoren und Tunnelportal von 80 m auszugehen. Zwischen Strahlventilatoren und Luftströmungsmessgeräte oder grossen Verkehrsschildern ist ebenfalls ein Mindestabstand von 100 m anzustreben. Da die Strahlventilatoren mit beiden Blasrichtungen betrieben werden können, kann ihr Abstand zu den Portalen nicht reduziert werden. Zudem würde eine Anordnung in unmittelbarer Portalnähe die Einhaltung der Belastungsgrenzwerte für Lärm erschweren. Die definitiven Positionen der Ventilatorgruppen sind in Abbildung 0-1 angegeben.

Über den Fahrstreifen montierte Ventilatoren müssen einen Sicherheitsabstand vom Lichtraumprofil von 30 cm aufweisen. Der Deckenabstand der Gehäuse der SV soll mindestens 30 cm betragen. Bei den SV im Rechteckprofil wird dieser Abstand durch spezielle Aufhängungen auf 20 cm reduziert, und als Folge der grösseren aerodynamischen Verluste werden diese mit Strahlablenker (stromauf- und stromabwärts) versehen. Zwischen den Strahlventilatoren muss ein Abstand von mindestens einem Durchmesser eingehalten werden. Die möglichen Anordnungen der Strahlventilatoren im Querschnitt sind in Abbildung 4-2 dargestellt.

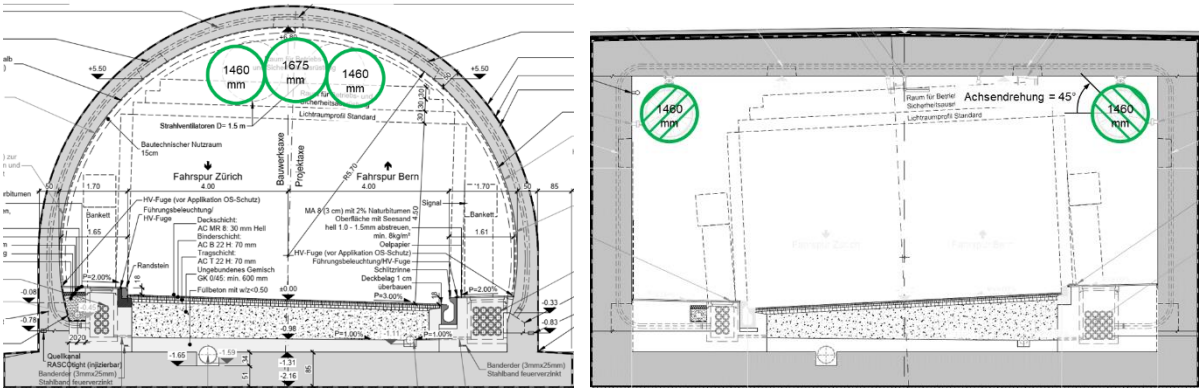


Abbildung 4-2: Mögliche Anordnung und Aussendurchmesser der Strahlventilatoren im Querschnitt.

4.3.2 Einbauwirkungsgrad

Es werden Strahlventilatoren ohne Schutzgitter vorgesehen. Es werden paarweise sowie einzeln angeordnete SV im Querschnitt untersucht.

Der Mindestabstand zu den Tunnelwänden im Gewölbeprofil beträgt 30 cm. Im Rechteckprofil ist dieser Abstand auf 20 cm reduziert.

Die SV im Rechteckprofil werden mit Strahlablenkern einer Achsendrehung von 45° und einem Ablenkwinkel von 17-19° in Richtung verkehrstechnischen Nutzraum ausgerüstet (vgl. Abbildung 4-2).

Für die untersuchten Konfigurationen werden die in der Tabelle 4-10 dargestellten Einbauwirkungsgrade, η_{Einbau}, berücksichtigt. Diese Werte stammen aus der Literatur [34] und wurden durch Felduntersuchungen vergleichbarer Einstellung bestätigt [35][36].

	Konfiguration	Strahlgeschwindigkeit	Einbauwirkungsgrad
1	1-SV pro Querschnitt, Gewölbe (ohne Gitter, ohne Strahlablenker)	~ 30 m/s	76%
2	1-SV pro Querschnitt, Gewölbe (ohne Gitter, ohne Strahlablenker)	~ 40 m/s	80%
3	2-SV pro Querschnitt, Gewölbe (Radstand 2D, ohne Gitter, ohne Strahlablenker)	~ 30 m/s	78%
4	2-SV pro Querschnitt, Gewölbe (Radstand 2D, ohne Gitter, ohne Strahlablenker)	~ 40 m/s	82%
5	2-SV pro Querschnitt, Rechteck (1 Einheit pro äussere Ecke, ohne Gitter, mit Strahlablenker)	~ 40 m/s	85%

Tabelle 4-10: Einbauwirkungsgrad für verschiedene Einbaukonfigurationen.

4.3.3 Anzahl

Die vom Strahlventilator erzeugte Druckdifferenz, Δp_{SV}, wird mit der Gleichung (17) berechnet. Die Gleichung beinhaltet

- die Korrektur für die lokale Luftdichte (vgl. Tabelle 2-6),
- der Einbauwirkungsgrad (vgl. Tabelle 4-10), und
- die Umwandlung des statischen in dynamischen Schub.

In der Berechnung werden die technischen Daten von Ventilatoren verschiedener Hersteller herangezogen. Es werden nur voll reversierbare SV mit symmetrischer Beschaufelung und einem maximalen Aussendurchmesser, D_{aussen}, von 1'600 mm berücksichtigt (vgl. Abbildung 4-2). Zur Einschränkung der technischen Herausforderungen wird auf die Bewertung von SV mit einer Motorleistung über 55 kW verzichtet.

$$\Delta p_{SV} = \frac{\rho_{Fahrraum}}{1.20} \cdot \eta_{Einbau} \cdot \frac{v_{SV} - v_{Fahrraum}}{v_{SV}} \cdot \frac{F_{SV}}{A_{Fahrraum}} \quad (17)$$

Die Anzahl der benötigten SV wird dann berechnet, indem der erforderliche Druck (für Frischluft oder im Ereignisfall), durch den vom SV erzeugten Druck dividiert wird:

$$n_{SV} = \frac{\max(\Delta p_{FL}, \Delta p_{ER})}{\Delta p_{SV}} \quad (18)$$

Die Anzahl an Strahlventilatoren für zwei Einbaukonfigurationen ist in der Tabelle 4-11 angegeben.

Es zeigt sich, dass die Konfiguration 2, mit Einzelstrahlventilatoren im Gewölbeprofil, eine grosse Motorleistung erfordert (55 kW). Anderseits erreichen die Konfigurationen 3 und 5 mit paarweise Strahlventilatoren den erforderlichen Druck schon mit Motoren einer Leistung von 22 kW.

Die Kombination von SV-Konfigurationen 3+5, mit insgesamt vier (4) SV je einem Aussendurchmesser von 1’330 mm, einer Motorleistung von 22.0 kW und einem Standschub von 980 N (gegebene Schubleistung für die Baugruppe mit Schalldämpfern und ohne Strahlablenker) wird daher ausgewählt. Die Strahlventilatoren werden an zwei (2) Positionen jeweils mit ca. 100 m Abstand zu den Portalen installiert, vgl. Abbildung 0-1.

Die berechnete Anzahl an SV wird für den Ereignisfall durch vertiefte Berechnungen in einem eindimensionalen instationären CFD-Modell geprüft, vgl. Kapitel 4.3.4.

Kombination der SV-Konfigurationen		D_{aussen}	Motor-leistung	Stand-schub	Strahlge-schwindigkeit	Anzahl für den Ereignisbetrieb*	Anzahl Gruppen
2+5	Einzel- und paarweise SV	1’460 mm	55.0 kW	1’715 N	35.0 m/s	2	2
3+5	Paarweise SV	1’330 mm	22.0 kW	980 N	29.5 m/s	3	2

Tabelle 4-11: Anzahl an Strahlventilatoren für verschiedene Einbaukonfigurationen; (*) maximaler Wert für den erforderlichen Druck beim Ausfall einer SV-Gruppe oder eine Zielgeschwindigkeit von 2.56 m/s beim Einsatz aller SV.

4.3.4 Überprüfung der Anzahl an Strahlventilatoren im eindimensionalen Modell

Die empfohlene Kombination der SV-Konfiguration, mit einer gesamten Anzahl von vier (4) SV auf zwei (2) SV-Gruppen wird für den Ereignisfall unter ungünstigen Bedingungen im Berechnungsprogramm Camatt überprüft.

Die Brandszenarien sind in der Tabelle 4-12 zusammengefasst. Alle Brandszenarien berücksichtigen eine Brandleistung von 30 MW und einen Gegendruck aus Wind, Barometrische und Auftrieb Effekte, von 8.0 Pa. Die Verkehrsdaten sind aus dem Kapitel 2.3 für das Referenzjahr 2040 übernommen. Die Dynamik der Ereignisse ist im Kapitel 4.2.3 beschrieben. Weitere Randbedingungen sind aus dem Kapitel 2 abgeleitet.

Die Strömungsberechnungen zeigen, dass die Konfiguration 3 alle Lüftungsziele erfüllt. Die Resultate der Strömungsgeschwindigkeit für den verschiedenen Brandszenarien sind in Abbildung 4-3 dargestellt.

Brandszenario		Brandposition	Verkehrsaufteilung Richtung Bern	Verfügbare SV	Lüftungsziel
1	BS-14-Selbstrettung	100 m vom Portal Wynematte	20% / 80%	2	1.42 m/s nach unten
2	BS-24-Selbstrettung	Mitte des Tunnels	Symmetrisch	2	1.42 m/s nach unten
3	BS-34-Selbstrettung	100 m vom Portal Helgefeld	80% / 20%	2	1.42 m/s nach unten
4	BS-14-Brandbekämpfung	100 m vom Portal Wynematte	20% / 80%	4	2.56 m/s nach unten
5	BS-24-Brandbekämpfung	Mitte des Tunnels	Symmetrisch	4	2.56 m/s nach unten
6	BS-34-Brandbekämpfung	100 m vom Portal Helgefeld	80% / 20%	4	2.56 m/s nach unten

Tabelle 4-12: Brandszenarien für die Überprüfung der Anzahl an Strahlventilatoren.

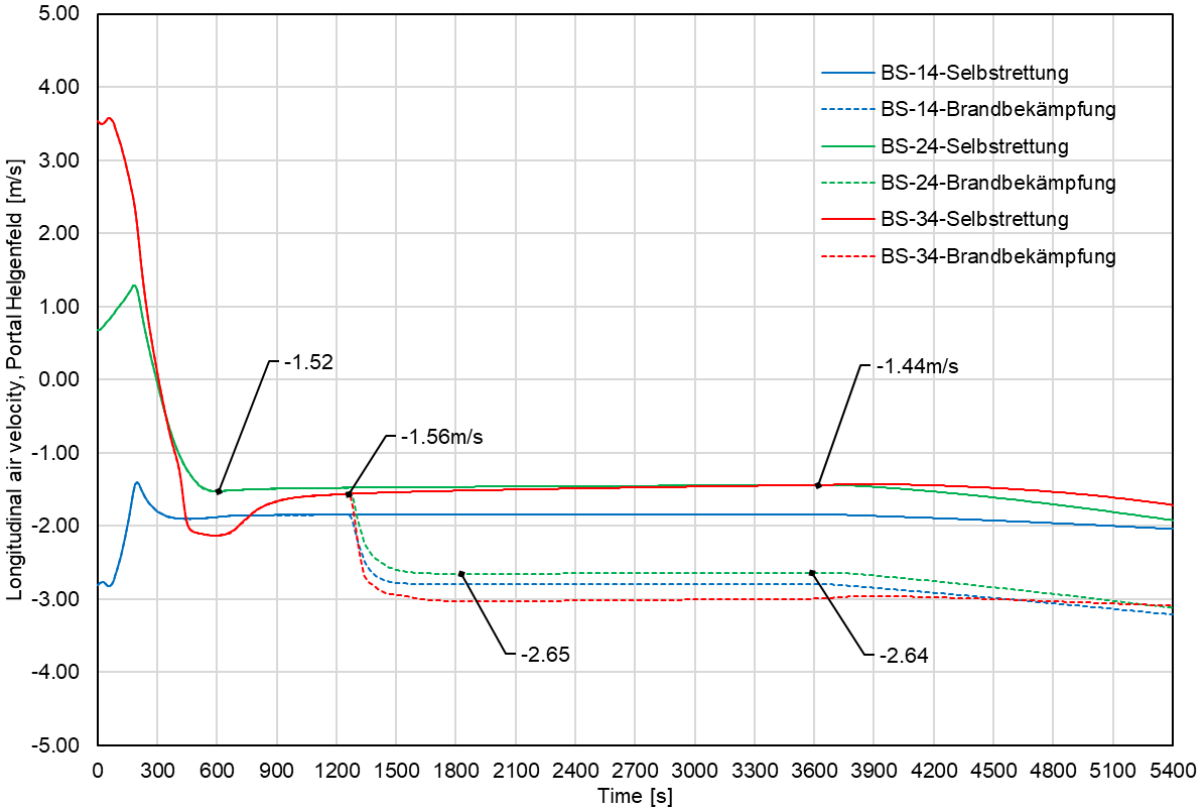


Abbildung 4-3: Resultate der Strömungsgeschwindigkeit aus verschiedenen CFD-Berechnungen in Camatt; die Selbstrettungsphase berücksichtigt den Ausfall einer SV-Gruppe; in der Brandbekämpfung werden alle SV eingesetzt.

4.3.5 Technische Spezifikation

Verweis auf das Kapitel 7.

4.4 Instrumentierung

4.4.1 Anordnung

Die Anzahl der wichtigsten Messeinrichtungen im Tunnel, d.h. Luftströmungsmessgeräte, Sichttrübungsmessgeräte und Rauchmelder wird in den folgenden Kapiteln definiert. Die Position der Sensorik in der Längsrichtung kann der Abbildung 0-1 entnommen werden. Die Anordnung im Querschnitt ist in Abbildung 0-2 und Abbildung 0-3 dargestellt.

4.4.2 Luftströmungsmessgeräte

Zur Regelung der Längsgeschwindigkeit im Ereignisfall sind Strömungsmesswerte erforderlich. Gemäss ASTRA Richtlinie 13001 [1] ist ein Lüftungsabschnitt mindestens mit 3 unabhängigen Luftströmungsmessgeräten in einem Fahrraumquerschnitt vorzusehen (plausibilisierbare Strömungsmessung mit Strömungswert und Strömungsrichtung). Gemäss ASTRA technischem Merkblatt 23001-11320 [6] ist in jeder Portalnähe eine in sich plausibilisierbare Gruppe anzuordnen.

Der Tunnel Wynematte besteht aus einem Lüftungsabschnitt. Daher werden insgesamt 2 Dreiergruppen (oder 6 Luftströmungsmessgeräten) vorgesehen.

Die Redundanz ist beim Ausfall einer Gruppe gewährleistet. Die drei Messquerschnitte einer Gruppe sind in Abständen von ca. 20 m voneinander zu installieren (vgl. Tabelle 4-13).

Die Luftströmungsmessgeräte sind als Ultraschall-Linienmessgeräte ausgebildet. Bei der Positionierung der Luftströmungsmessgeräte müssen gemäss ASTRA TM 23001-11320 [6] die folgenden Mindestabstände zwingend eingehalten werden:

- Nächster Abstand zu Ausstellbuchten: 100 m;
- Abstand zu Strahlventilatoren: 100 m;
- Traverse mit grossflächiger Beschilderung (z.B. Wegweiser), Änderungen des Fahrraumquerschnitts oder ähnliche Störstellen: 40 bis 70 m.

Die Anordnung der Messgeräte ist in Abbildung 0-1 dargestellt und kann der Tabelle 4-13 entnommen werden. Die Geräte sind ausserhalb des verkehrstechnischen Nutzraums an der Tunnelwand mindestens 30 cm unter der Decke in ca. 4.50 m über der Fahrbahn zu montieren.

Luftströmungsmessgeräte		BSA Metrierung	Position im Tunnel
LM - Gruppe 1 (LMG1)	LM11 – Empfänger	KM 0+794	210 m
	LM11 – Sender	KM 0+804	220 m
	LM12 – Empfänger	KM 0+814	230 m
	LM12 – Sender	KM 0+824	240 m
	LM13 – Empfänger	KM 0+834	250 m
	LM13 – Sender	KM 0+844	260 m
LM - Gruppe 2 (LMG2)	LM21 – Empfänger	KM 1+094	510 m
	LM21 – Sender	KM 1+104	520 m
	LM22 – Empfänger	KM 1+114	530 m
	LM22 – Sender	KM 1+124	540 m
	LM23 – Empfänger	KM 1+134	550 m
	LM23 – Sender	KM 1+144	560 m

Tabelle 4-13: Position der Luftströmungsmessgeräte.

4.4.3 Sichttrübungsmessung

Im Tunnel Wynematte werden zwei (2) Sichttrübungsmessungen installiert.

Für die Raucherkennung werden Rauchmelder verwendet.

Die Anordnung der Messgeräte ist in Abbildung 0-1 dargestellt. Die Geräte sind ausserhalb des verkehrstechnischen Nutzraums an der Tunnelwand in ca. 2.2 m Höhe zu montieren.

4.4.4 Kohlenmonoxid Messung

Die Berechnung des Frischluftbedarfs hat ergeben, dass auf eine CO-Messung verzichtet werden kann, da die massgebende Grösse für den Normalfall der minimale Frischluftbedarf ist (vgl. Kapitel 4.1.2.4).

4.4.5 Rauchmelder

Rauchmeldern sind Teil der Brandmeldeanlage. Die maximale Distanz zwischen Rauchmeldern beträgt 50 m [2].

Der Tunnel Wynematte wird somit mit Sechzehn (16) Rauchmeldern ausgerüstet.

Die Anordnung der Messgeräte ist in Abbildung 0-1 dargestellt. Der Sicherheitsabstand der Geräte und Befestigungselemente zum Lichtraumprofil muss mindestens 30 cm betragen. Die bestgeeignete Platzierung im Tunnel ist je nach Sensor im oberen Bereich der Wand oder an der Decke über der Normalspur.

4.4.6 Thermischer Linienmelder

Der Tunnel Wynematte wird mit einem (1) thermischen Linienmelder ausgerüstet.

Der thermischer Linienmelder ist Teil der Brandmeldeanlage und dient:

1. der Branddetektion bei kleiner Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel und
2. der Lokalisierung eines Brandes mit grosser Hitze und wenig Rauch (Rauchmelder reagiert auf Brand mit viel Rauch und geringer Hitze).

Dieser muss eine eindeutige Zuordnung zu den Brandabschnitten ermöglichen. Im Übrigen sind die Anforderungen der ASTRA Richtlinie Branddetektion in Strassentunneln [2] massgebend.

4.4.7 Technische Spezifikation

Verweis auf das Kapitel 7.

5. Betriebskonzept

Der Tunnel Wynematte wird mit einem Längslüftungssystem ausgestattet. Die Fahrraumlüftung beinhaltet vier (4) Strahlventilatoren, die in 2er-Gruppen installiert werden. Der Tunnel verfügt über drei (3) Notausgänge, die durch überdruckbelüftete Fluchttreppenhäuser ins Freie führen. Eine schematische Darstellung der Hauptkomponenten ist in Abbildung 5-1 gegeben.

Eine rasche Detektion und eine automatische Steuerung sind dabei vorausgesetzt. Die Lüftungssteuerung soll mit den Strahlventilatoren die folgenden Funktionen übernehmen:

- Normalbetrieb;
- Ereignisbetrieb (Brand);
- Testbetrieb.

Im Normalbetrieb wird der Tunnel grundsätzlich natürlich belüftet (Kolbeneffekt) und bei Bedarf, wenn die Luftqualität im Fahrraum nicht ausreichend ist, durch Strahlventilatoren unterstützt.

Im Ereignisbetrieb stehen die Strahlventilatoren für die Regelung der Strömungsgeschwindigkeit zur Verfügung. Durch die mechanische Längslüftung werden die Bedingungen zur Selbstrettung der Tunnelbenutzer und für die Einsatzkräfte in der anschliessenden Brandbekämpfungsphase möglichst positiv beeinflusst.

Detaillierte Angaben an der Lüftungssteuerung und Steuerungsalgorithmen der Lüftungsanlage werden separat im Steuerungsbericht Lüftung [21] behandelt.

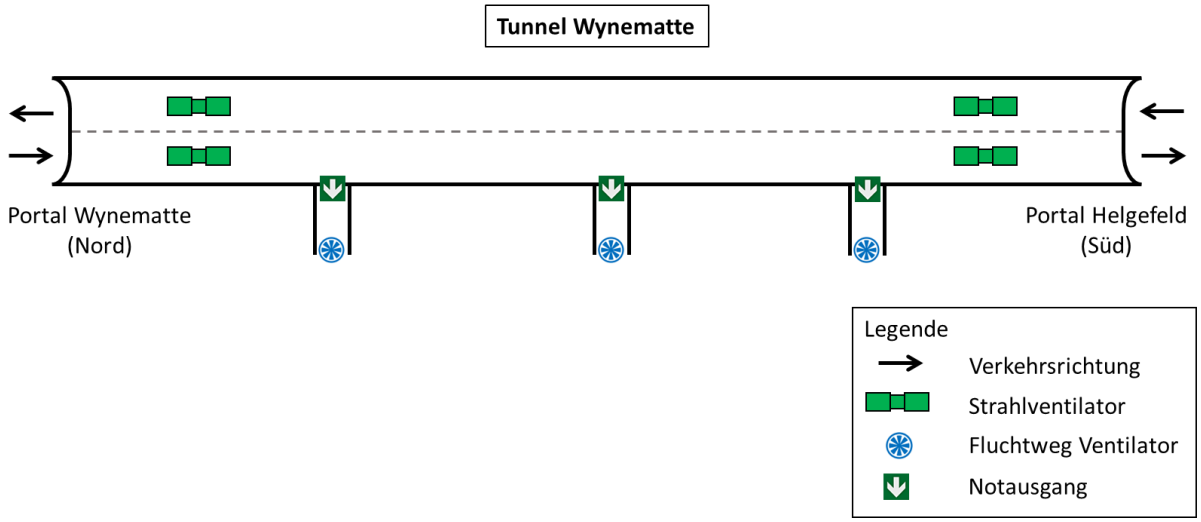


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Tunnels mit den Hauptinstallationen der Lüftungssystem.

6. Schnittstellen

6.1 Schnittstellen zum Bau

6.1.1 Anordnung der Strahlventilatoren in Längsrichtung

Verweis auf das Kapitel 4.3.1.

6.1.2 Anordnung der Strahlventilatoren im Querschnitt

Der Abstand zwischen den Strahlventilatoren ist zu maximieren, um die Montage und Wartung zu gewährleisten. Die Bohrung der Löcher und die Befestigung der Aufhängung der Strahlventilatoren an der Decke wird durch den Strahlventilatoren-Lieferanten durchgeführt.

6.2 Schnittstellen zu Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen

Die Schnittstelle zwischen Lüftung und Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) bezüglich der Strahlventilatoren ist in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

6.2.1 Elektrische Anschlüsse und Verkabelung

Bei der Auslegung der Energieversorgung wird die nächstgrössere Motorenbaureihe eingeplant. Es ergibt sich dann eine Anschlussleistung von 30 kW (Total 120 kW).

6.2.2 Räumliche Anordnung Strahlventilatoren / BSA

Verweis auf das Kapitel 4.3.1.

6.2.3 Verkehrsleitsystem

Die Anzahl an Fahrzeuge muss mit Ampeln an den Kreuzungen an beiden Tunnelportalen geregelt werden, um das Stauaufkommen im Tunnel zu reduzieren.

6.2.4 Lüftung der Fluchtwege

Die Lüftung der direkt nach aussen führenden Fluchtstollen wird im Normalbetrieb dauernd in Betrieb sein. Bei geschlossener Schleuse und geschlossener Notausgangstür, wird die mechanische Lüftung der Fluchtstolle dauernd einen Überdruck gegenüber dem Fahrraum von mindestens 50 Pa erzeugen. Dabei beträgt der Luftstrom durch Leckagen und allfällige separate Öffnungen 0.5 bis 1.0 m^3/s. Das kumulative Eindringen von maximal 3 m^3/s im Fahrraum nach drei Notausgängen kann eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von <0.05 m/s erzeugen und ist damit vernachlässigbar.

Im Ereignisfall werden alle Fluchtwege parallel mit einem erhöhten Volumenstrom belüftet. Mit drei gleichzeitig geöffneten Notausgangstüren werden etwa 8 m^3/s Frischluft im Fahrraum eingeblasen. Die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum beträgt maximal <0.15 m/s.

Es wird daher geschlossen, dass die Belüftung der Fluchtwege einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Fahrraumlüftung hat.

Nähere Angaben zur Auslegung der Lüftung der Fluchtwege sind im Bericht «Belüftung der Notausgänge» [22] zu finden.

6.3 Alarmierung der Tunnelbenutzer

Eine zusätzliche Voraussetzung und Ergänzung der Instrumentierung ist die schnelle optische und akustische Alarmierung der Tunnelbenutzer im Ereignisfall. Details zu den Alarmierungsanlagen sind im Technischen Beschrieb der Beriebs- und Sicherheitsausrüstung [28] zu entnehmen.

7. Technische Spezifikation

Die Ausstattung muss dem aktuellen Stand der Technik und den Richtlinien des ASTRA entsprechen. Im Weiteren ist auf folgende Punkte zu achten:

- Gute Zugänglichkeit für die Wartung und den Unterhalt;
- Korrosionsbeständigkeit bzw. Korrosionsschutz der Komponenten;
- Verfügbarkeit der Ersatzteile.

Weitere Angaben können der ASTRA Richtlinie 13001 [1] entnommen werden.

7.1 Strahlventilatoren

Die Angaben zu Strahlventilatoren im technischem Merkblatt 23001-11330 [7] «Längslüftung» sind generell zu berücksichtigen.

Gemäss Kapitel 4.3 wird ein einziges Typ Strahlventilatoren für die Fahrraumlüftung benötigt. Die SV werden voll reversierbar ausgeführt. Die Strahlventilatoren werden, zusätzlich zu den Aufhängungen, mit Schwingungsdämpfern und einer Fallsicherung ausgerüstet. Die Strahlventilatoren werden zur Regelung der Längsströmung mit Frequenzumrichtern betrieben. Die technischen Spezifikationen der SV sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Neben den angegebenen Kenndaten sind für Strahlventilatoren folgende Angaben zu beachten:

- Nutzungsdauer von 20 Jahren ohne Reduktion der Leistungsfähigkeit, gemäss SIA 197/2 [13];
- Die Strahlventilatoren müssen eine Brandbeständigkeit von 120 Minuten unter 400°C haben;
- Für die Strahlventilatoren (Zone 20, Korrosionsklasse C5) sind gemäss ASTRA technischem Merkblatt 23001-12210 [4] die folgenden Materialien anwendbar:
  - Befestigungselemente im Bauwerk: Edelstahl 1.4529 [3][14];
  - Aufhängekonstruktion: Edelstahl 1.4571 [3][14];
  - Gehäuse, Schalldämpfer: Edelstahl 1.4571 [3];
- Zur Problemerkennung werden eine fest eingebaute Schwingungsmessung sowie einen Abrissschalter vorgesehen.

Beschreibung	Wert / Einheit
Laufraddurchmesser	1’120 mm
Aussendurchmesser	≤1’330 mm
Schalldämpfer Länge	≤2’000 m (pro Seite, 2-seitig)
Gesamtes Gewicht (inkl. Sensorik)	~1‘500 kg
Antrieb	mit FU
Motornennleistung	≤22 kW
Anschlussleistung	ca. 30 kW
Anschlussspannung	3 x 400 V, 50 Hz
cos φ	>0.85 bei Nennleistung
Elektrischer Wirkungsgrad	>85%
Isolation der Ständerwicklung	H (EN 60034-1)
Lüfterklasse / Auswuchtgüte	BV-3 / G 2.5 (ISO 14694)
Drehzahl	≤1'500 rpm
Standschub Hauptblasrichtung (ρ=1.20 kg/m^3) *	≥980 N
Standschub Reversierrichtung (ρ=1.20 kg/m^3) *	≥980 N
Ausblasgeschwindigkeit	~29.5 m/s
Volumenstrom	~29.1 m^3/s
Schalldruckpegel, 3 m, 45°, Freifeld	≤85 dB(A)
Lagerlebensdauer L10	40’000 h (Normalbedingung)
Ablenkwinkel des Strahlablenkers **	≥17° und ≤19°
Achsendrehung des Strahlablenkers **	45° in Richtung verkehrstechnischen Nutzraum

Tabelle 7-1: Technische Daten der Strahlventilatoren; * gegebene Schubleistung für die Baugruppe mit Schalldämpfern und ohne Strahlablenker; ** nur für SV im Rechteckprofil.

7.1.1 Schwingungsmessung

Die Messung erfolgt für den radialen Komponenten der durch den SV erzeugten Schwingungen.

Beschreibung	Wert / Einheit
Gewicht	<200 g
Ausgänge	Digital / Analog (4…20 mA)
Frequenzbereich	10…1000 Hz
Messbereich	0…20 mm/s
Messgenauigkeit	±1 mm/s
Schutzart	>IP65

Tabelle 7-2: Technische Daten der Schwingungsmessung.

7.1.2 Abrissschalter

Der Abrissschalter muss die Abtrennung des SV Gehäuse von der Aufhängung erkennen können.

Beschreibung	Wert / Einheit
Gewicht	<200 g
Schaltelement	Öffner (NC)
Schutzart	>IP65
Gebrauchsdauer	20 Jahre

Tabelle 7-3: Technische Daten des Abrissschalters.

7.1.3 Ersatzteile

Beschreibung	Anzahl
Schwingungsmessung	1 St.
Abrissschalter	1 St.

Tabelle 7-4: Ersatzteile für Strahlventilatoren.

7.2 Luftströmungsmessgeräte

Detaillierte Vorgaben an die Messgeräte sind im ASTRA technischem Merkblatt 23001-11320 [6] «Sensorik» zu finden.

Ein Messbereich von ±12 m/s mit einer Messgenauigkeit von ±0.2 m/s bei 3 m/s und sonst ±5% des Endwerts ist erforderlich [1].

7.3 Sichttrübungsmessung

Detaillierte Vorgaben an die Messgeräte sind im ASTRA technischem Merkblatt 23001-11320 [6] «Sensorik» zu finden.

Ein Messbereich von 0 bis 0.015 m^{-1} und einer Messgenauigkeit von ±0.0001 m^{-1} ist erforderlich [1].

Die Sensoren der Sichttrübe werden mit einer Nebelkorrektur ausgerüstet.

7.4 Rauchmelder

Ein Messbereich von 0 bis 0.15 m^{-1} und einer Messgenauigkeit von ±0.001 m^{-1} ist erforderlich.

Die Rauchmelder werden mit einer Nebelkorrektur ausgerüstet.

7.5 Thermischer Linienmelder

Eine Einsatztemperatur von -10°C bis +60°C und einer Messgenauigkeit von ±3°C ist erforderlich.

8. Abnahme

Nachfolgend sind die verschiedenen Etappen bis zur Endabnahme der Lüftungsanlage in chronologischer Reihenfolge grob aufgeführt:

- Überprüfung von Systemkomponenten;
- Prüfung in der Werkstatt (FAT);
- Montagekontrolle;
- Inbetriebnahme;
- Vorläufige Vor-Ort-Prüfung (SAT);
- Electrosuisse-Kontrolle;
- Probezeit;
- Abnahme;
- Garantiezeit;
- Endprüfung vor Ort.

Details werden in der Ausführung definiert.

9. Bauprogramm

Details zum Bauprogramm sind dem Dokument 012.241.001-01-2041_Bauprogramm zu entnehmen.

10. Investitions- und Betriebskosten

Die Kostenschätzung (±15%) erfolgt für den mechanischen Teil der Lüftungskomponenten und ist nachfolgend zusammengestellt.

Die Gesamtkosten der Investition, Betriebs und Unterhalts (inkl. MwSt.) auf dem Zeithorizont von 20 Jahren ist mit 2,700,00 CHF gerechnet. In der Berechnung sind die jährliche Teuerungsrate auf 2.0% und der langjähriger Zinssatz auf 3.0% gesetzt.

10.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten (inkl. MwSt.) sind auf 920,000 CHF geschätzt. Die Kosten beinhalten die Lüftungssteuerung sowie die Dienstleistungen des Unternehmers, Dritte und Planers. Die einzelnen Beträge sind in Tabelle 10-1 gelistet.

System / Kostenart	Beschreibung	Betrag
Längslüftung	Frequenzumformer Strahlventilatoren 22 kW	40,000 CHF
	Strahlventilatoren 22kW	132,000 CHF
	Messgeräte Strahlventilator (Schwingung, T)	20,000 CHF
	Stillstandsheizung Strahlventilator	6,000 CHF
	Anschlussdose / Steckdose Typ CEE	12,000 CHF
	Kabel FE180	37,500 CHF
Lüftungssteuerung	Luftstrommessung	96,000 CHF
	Sichttrübungsmessung	28,000 CHF
	Sensorikschrank Luftstrommessung/ST/CO	20,000 CHF
	Sensorikschrank T/RM	20,000 CHF
	Anlagesteuerung PLC IPC IHM Schnittstellen Klemme	60,000 CHF
	Lokalsteuerung RTU Schnittstellen Klemme	20,000 CHF
	Kabel Sensorik	16,000 CHF
Dienstleistungen Unternehmer	Engineering	10,000 CHF
	Softwareprogrammierung (Steuerung)	30,000 CHF
	Montage	82,000 CHF
	Entsorgung	0 CHF
	Prüfungen FAT, SAT	15,000 CHF
	Qualitätssicherung	5,000 CHF
	Inbetriebnahme	5,000 CHF
	Komplete Dokumentation	12,000 CHF
	Ausbildung	1,000 CHF
	Transport und Verpackung	10,000 CHF
	Montage- und Transportbühne für Strahlventilatoren	50,000 CHF
	Ersatzteile (exkl. komplette Reserveeinheiten)	5,000 CHF
	Wartung & Unterhalt während Garantiezeit	10,000 CHF
Dienstleistungen Dritte	Gebietseinheit, Blaulichtorganisation	10,000 CHF
Dienstleistungen Planer	Projektierung Planer	51,000 CHF
	Bauleitung Planer	51,000 CHF
Total	Total Investitionskosten (ohne MwSt.)	854,500 CHF
	MwSt.	69,215 CHF
	Total Investitionskosten (inkl. MwSt.)	923,715 CHF
	Total Investitionskosten auf CHF 1'000.- abgerundet	**924,000 CHF**

Tabelle 10-1: Investitionskosten für die Lüftungskomponenten des Tunnels Wynematte (Preisstand Dezember 2020).

10.2 Betriebs- und Unterhaltskosten

Die jährlichen Betriebskosten basieren auf Energiekosten von 22 Rappen pro kW Stunde. Die Betriebszeit für die Fahrraumlüftung ist auf etwa 300 Stunden pro Jahr geschätzt.

Die jährlichen Unterhaltskosten der Strahlventilatoren sind mit den Ansätzen gemäss ASTRA Richtlinie 13001 [1] auf die Investitionskosten bezogen.

Es ergeben sich Betriebs- und Unterhaltskosten von ca. 57‘000 CHF/Jahr (inkl. MwSt.).

System / Kostenart	Beschreibung	Betrag
Betriebskosten	Jährlicher Energieverbrauch (kWh) Fahrraum	6,600 CHF/Jahr
Unterhaltskosten der Anlage	20 Jahre (1. bis 20. Jahr)	49,542 CHF/Jahr
Total	Total Betriebs- und Unterhaltskosten (inkl. MWST)	56,142 CHF/Jahr
	Total Betriebs- und Unterhaltskosten auf CHF 1'000.- abgerundet	**57,000 CHF/Jahr**

Tabelle 10-2: Betriebs- und Unterhaltskosten für die Fahrraumlüftung des Tunnels Wynematte.

11. Unterschriften

Bauherr (Projektleiterin)

Kanton Aargau

Departement Bau, Verkehr und Umwelt

Abteilung Tiefbau

Aarau, 31.05.2024 _____ _____

Ort, Datum Martina Tobler

Projektverfasser

IG PRELO c/o F. Preisig AG

Lombardi

Firmato digitalmente da GIAN PAOLO NODIROLI
DN: cn=GIAN PAOLO NODIROLI, c=CH
Data: 2024.05.20 15:45:54 +02'00'

Luzern, 31.05.2024_____ _____

Ort, Datum Gian Paolo Nodiroli, PL Yves Métry, PL Stv.

Anhang A: Aerodynamik Konstanten und Formeln für die Fahrraumlüftung

A.1 Druckverluste im Bauwerk

Die Druckverluste im Bauwerk sind hauptsächlich auf den Portalen, Hindernissen oder Abschnittsänderungen sowie auf die Rauheit der Tunnelwände zurückzuführen. Die Länge des Tunnels, $L_{Fahrraum}$, und die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel, $v_{Fahrraum}$, sowie die Luftdichte, $\rho_{Fahrraum}$, und den hydraulischen Durchmesser, D_h, haben deutlichen Einfluss auf den erzeugten Widerstand.

$$\Delta p_{Fahrraum} = \frac{\rho_{Fahrraum}}{2} \cdot v^2_{Fahrraum} \cdot \left(\zeta_{Ein} + \lambda \cdot \frac{L_{Fahrraum}}{D_h} + \zeta_{Aus} + \zeta_{Querschnitt}\right) \quad (19)$$

Die Verlustkoeffizienten in Gleichung (19) sind in der ASTRA RL 13001 [1] definiert:

- Einströmverlustkoeffizient in die Tunnelröhre, $\zeta_{Ein} = 0.6$;
- Ausströmverlustkoeffizient aus der Tunnelröhre, $\zeta_{Aus} = 1.0$;
- Einzelverlustkoeffizient für die kleine Querschnittsänderung zwischen Rechteck und Gewölbe, $\zeta_{Querschnitt} = 0.2$;
- Reibungskoeffizient der Tunnelröhre, $\lambda = 0.015$.

A.2 Druckwirkung durch den Verkehr

Der Verkehr im Tunnel führt durch den Kolbeneffekt zu Druckverlusten oder -erhöhungen. Im Normalbetrieb und stark asymmetrischen Gegenverkehr kann der Kolbeneffekt in einer Richtung überwiegend sein und damit eine Strömung im Tunnel erzeugen. Andererseits, mit Stau oder stehende Fahrzeuge (z.B. beim Unfall) entsteht im Tunnel ein grösserer Widerstand.

Diese verkehrsbedingte Druckdifferenz wird als Summe der Druckdifferenzen der einzelnen Fahrzeuge berechnet. Gleichung (20) zeigt, dass der Kolbeneffekt mit dem Quadrat der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrzeug und Luft variiert:

$$\Delta p_{Fahrzeug} = \frac{\rho_{Fahrraum}}{2} \cdot \sum_{i}^{n} \left[abs\left(v_{Fz,i} - v_{Fr}\right) \cdot \left(v_{Fz,i} - v_{Fr}\right)\right] \cdot \frac{C_{D,Fahrzeug,i} \cdot A_{Stirn,Fahrzeug,i}}{A_{Fahrraum}} \quad (20)$$

Die Anzahl an Fahrzeuge, i, ist Verkehrsfall abhängig, vgl. Kapitel 2.3. Das Produkt aus dem Strömungswiderstandskoeffizient, $C_{D,Fahrzeug}$, und der Frontfläche, $A_{Stirn,Fahrzeug}$, wird in die ASTRA RL 13001 [1] getrennt für Personenwagen (PV) und Schwerfahrzeuge (HV) definiert:

- $\left(C_{D,Fahrzeug} \cdot A_{Stirn,Fahrzeug}\right)_{PV} = 0.9$
- $\left(C_{D,Fahrzeug} \cdot A_{Stirn,Fahrzeug}\right)_{HV} = 5.2$

A.3 Natürlicher Kamineffekt

Der natürliche Auftriebsdruck ändert sich mit dem Gang der Aussentemperatur während des Tages und über das Jahr. Dieser ist auf den Dichteunterschied der Luft (vgl. Kapitel 2.4.1) und den Höhenunterschied der Portale zurückzuführen (vgl. Tabelle 2-1). Anhand der Statistik der Umgebungsbedingungen in Suhr und die berechnete Temperaturdifferenz von 1.8 K zwischen dem Innenraum des Tunnels und der Umgebung kann der natürliche Auftriebsdruck abgeschätzt werden:

$$\Delta p_{Natürlich} = \left(\rho_{aussen} - \rho_{Fahrraum}\right) \cdot g \cdot \Delta h_{Fahrraum} = \left(\rho_{aussen} - \rho_{Fahrraum}\right) \cdot g \cdot L_{Fahrraum} \cdot \bar{s} \quad (21)$$

Der Höhenunterschied, Δh_{tunnel}, in Gleichung (21) entspricht das Produkt aus der Tunnellänge, L_{tunnel}, und der mittleren Längsneigung, $\bar{s}$. Für den Tunnel Wynematte ergibt sich damit eine Druckdifferenz für den Auftrieb oder Abtrieb von 0.3 Pa.

A.4 Barometrische Druckdifferenz

Die barometrische Druckdifferenz, $\Delta p_{Barometrisch}$, tritt in Tunneln auf, die eine wichtige Bergkette durchqueren. In diesen Fällen kann der atmosphärische Druck auf den Tunnelportalen erheblich variieren. Der Tunnel Wynematte durchstösst keine Bergketten. Trotzdem ist gemäss ASTRA RL 13001 [1] ein Mindestwert von 5 Pa pro Kilometer Portalabstand eingesetzt. Daraus berechnet sich die barometrische Druckdifferenz für den Tunnel Wynematte auf 4.2 Pa.

A.5 Druckwirkung durch Wind

Der Wind ist eine äussere Störung, die der Längslüftung des Tunnels entgegenwirken kann. In der Dimensionierung der Tunnellüftung muss deshalb der Winddruck auf die Portale berücksichtigt werden. Für die Auslegung wird der Staudruck, gebildet mit dem Mittelwert der Windgeschwindigkeit, $\bar{v}_{Wind}$, der jeweils ungünstigeren Richtung auf das Portal, verwendet:

$$\Delta p_{Wind} = \frac{\rho_{aussen}}{2} \cdot \bar{v}_{Wind}^2 \qquad (22)$$

Für den Tunnel Wynematte wird eine Windgeschwindigkeit von 1.63 m/s auf das Portal angenommen, vgl. Kapitel 0. Der daraus resultierende Staudruck auf das Portal beträgt somit 1.6 Pa. Um unvorhersehbare Wetterlagen zu berücksichtigen, wird in der Berechnung ein Winddruck von 3.0 Pa eingesetzt.

A.6 Brandauftrieb

In geneigten Tunneln können Dichtenunterschiede zwischen Luftmassen einen Auftrieb erzeugen. Unterschiedlich vom natürlichen Kamineffekt, wird hier die Temperaturerhöhung vom Brand verursacht. Die Referenzneigung ist nicht mehr der Durchschnittswert, sondern die lokale Neigung am Brandort. Die entstehenden Temperaturunterschiede sind wesentlich höher und damit auch den erzeugten Druckunterschied:

$$\Delta p_{Brand} = (\rho_{aussen} - \rho_{Brand}) \cdot g \cdot L_{Brand} \cdot s_{Brand} \qquad (23)$$

Als erste Abschätzung kann gemäss ASTRA RL 13001 [1] eine durchschnittliche Lufterwärmung von 65 K über 800 m angenommen werden. Diese Annahme ist für Tunnellüftung ohne Absaugbetrieb, bei Anströmung mit der kritischen Geschwindigkeit und bei konstanter Längsneigung gültig. Unter Berücksichtigung der maximalen Längsneigung über 800 m von 0.50% ergibt sich eine Druckdifferenz aufgrund des Brandauftriebs gleich 8.48 Pa.

Eine detaillierte Berechnung der Brandszenarien erfolgt mit dem Berechnungsprogramm CAMATT (vgl. Kapitel 2.6.3).

Anhang B: Anordnung der Lüftungskomponenten

B.1 Anordnung der Lüftungseinrichtungen

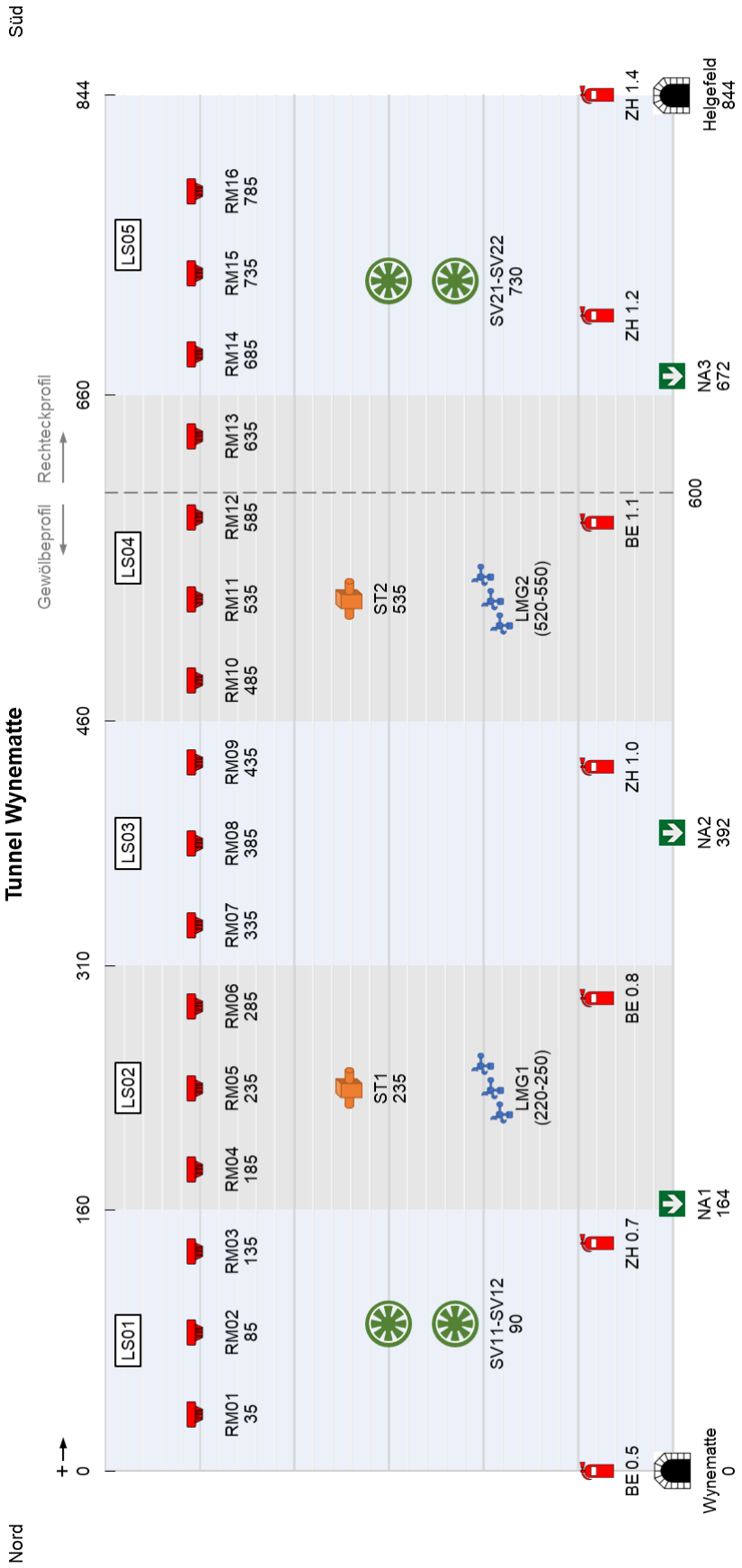


Abbildung 0-1: Anordnung der Ventilatorgruppen und Sensorik der Fahrraumlüftung.

B.2 Normalprofil (Raumbesetzung)

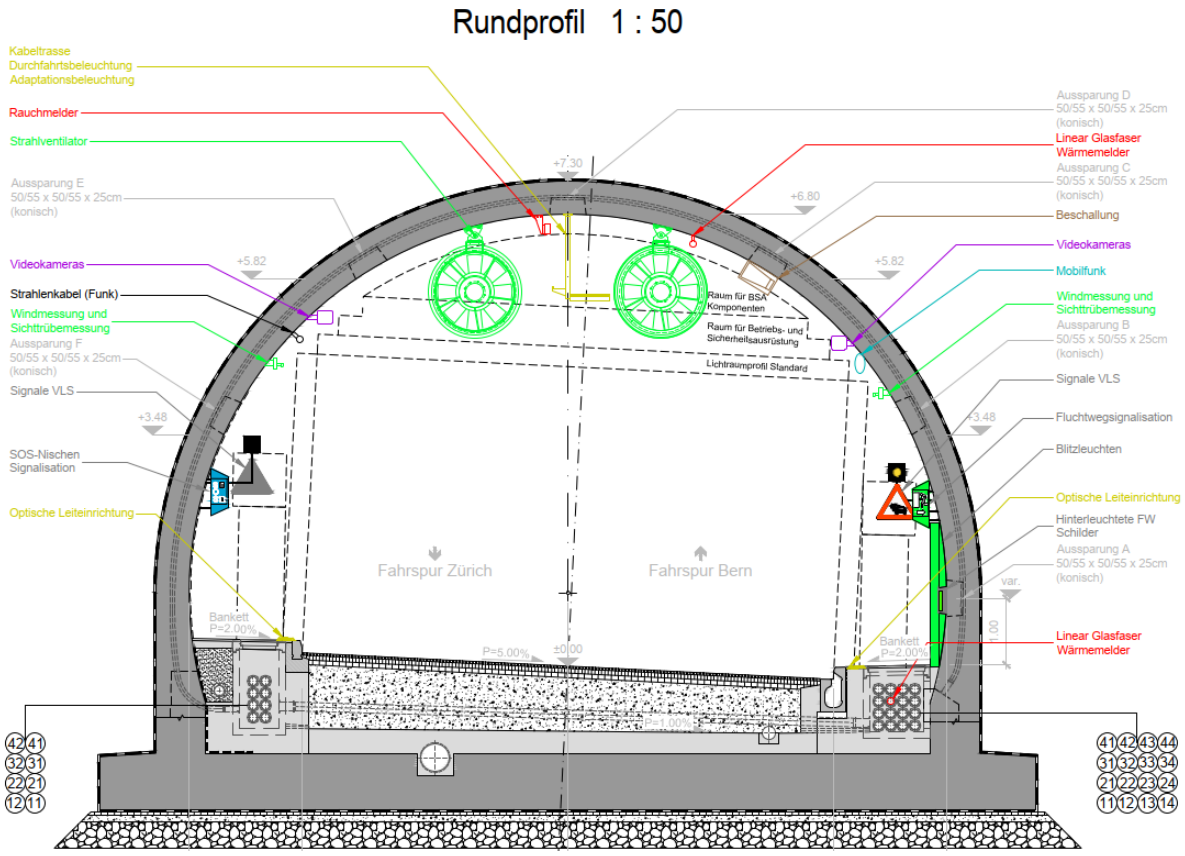


Abbildung 0-2: Anordnung der Lüftungskomponenten im Querschnitt, Gewölbeprofil.

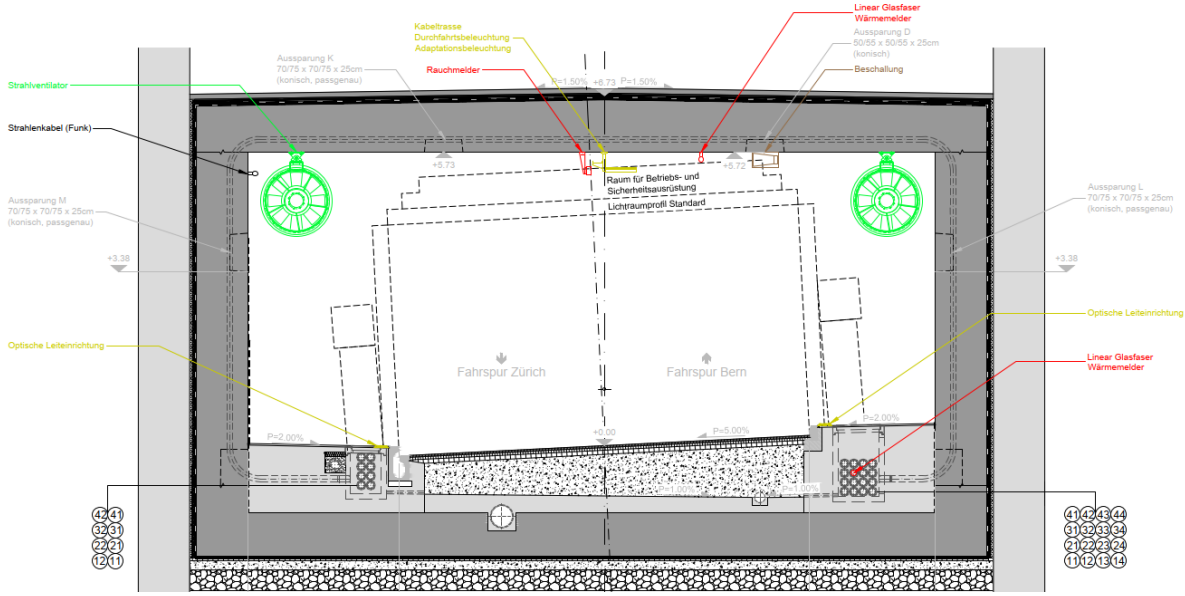


Abbildung 0-3: Anordnung der Lüftungskomponenten im Querschnitt, Rechteck.