



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle strade

Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung

**Quantification of the leakages into exhaust ducts in road
tunnels with concentrated exhaust systems**

**Quantification des fuites des canaux d'extraction dans
des tunnels routiers à extraction concentrée de fumée**

Version 1.0

Pöyry Infra AG
Reto Buchmann, dipl. Ing. FH
Samuel Gehrig, dipl. Ing. ETH

**Forschungsauftrag ASTRA 2007/004 auf Antrag des
Bundesamtes für Strassen (ASTRA)**

Dezember 2011

1346

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière. Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle strade

Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung

**Quantification of the leakages into exhaust ducts in road
tunnels with concentrated exhaust systems**

**Quantification des fuites des canaux d'extraction dans
des tunnels routiers à extraction concentrée de fumée**

Version 1.0

Pöyry Infra AG
Reto Buchmann, dipl. Ing. FH
Samuel Gehrig, dipl. Ing. ETH

**Forschungsauftrag ASTRA 2007/004 auf Antrag des
Bundesamtes für Strassen (ASTRA)**

Dezember 2011

1346

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Reto Buchmann (Ingenieurbüro)

Mitglieder

Samuel Gehrig (Ingenieurbüro)

Kilian Disler (Ingenieurbüro)

Begleitkommission

Präsident

Franz Zumsteg (Ingenieurbüro)

Mitglieder

Alain Jeanneret (ASTRA)

Sacha Solari (ASTRA)

Jean-Paul Kunsch (ETH)

Viktor Ruch (TBA Bern)

Rune Brandt (Ingenieurbüro)

Antragsteller

-

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von www.partnershop.vss.ch herunter geladen werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Ausgangslage	11
1.2	Auftrag	11
1.3	Forschungsziele	12
1.4	Vorgehen	12
2	Messkampagne	14
2.1	Auswahl der Messobjekte	14
2.2	Durchgeführte Messungen	15
2.3	Messverfahren	16
2.3.1	Tracergasmessung	16
2.3.2	Alternative Messmethoden	17
2.4	Ablauf der Messungen	19
2.4.1	Messaufbau	19
2.4.2	Messung	21
2.4.3	Abbau	21
2.5	Messergebnisse	22
2.6	Ergänzende Punktmessungen	22
3	Quantifizierung der Abluftkanalleckagen	23
3.1	Grundlagen	23
3.1.1	Quadratischer Ansatz	23
3.1.2	Linearer Ansatz	24
3.2	Konzept der Auswertung	27
3.3	Plausibilitätsprüfung und Filterung	27
3.3.1	Plausibilitätsprüfung 1. Etappe	27
3.3.2	Plausibilitätsprüfung 2. Etappe	28
3.4	Tunnelspezifische Auswertung	29
3.5	Globale Auswertung	32
3.5.1	Darstellung der Einzelwerte	33
3.5.2	Darstellung der Mittelwerte	33
3.5.3	Beurteilung und Wahl des Ansatzes	35
3.6	Quantifizieren der Leckagefläche f^*	36
3.6.1	Richtwerte für Tunnel vom Typ A	36
3.6.2	Richtwerte für Tunnel vom Typ B	36
3.7	Messunsicherheit / Fehlerfortpflanzung	37
3.8	Durchführung von Leckagemessungen mit erhöhter Genauigkeit	39
4	Methode für die praxisbezogene Anwendung	41
5	Weitere Erkenntnisse aus den Messungen	46
5.1	Druckverlust im Abluftkanal	46
5.1.1	Berechnung des Reibungskoeffizienten λ_{AK} aus den Messresultaten	46
5.1.2	Abschätzung der Druckverluste über Klappenantriebe	48
5.1.3	Erkenntnis	48
5.2	Druckverlust über offene Abluftklappen	49
5.2.1	Ansatz	49
5.2.2	Auswertung der Messergebnisse	50
5.2.3	Erkenntnis	51
5.3	Fiktive Leckagen	51
5.4	Resultate aus den Punktmessungen	52
6	Konstruktive Aspekte	53
6.1	Ursache, Einteilung und Herkunft von Leckagen	53
6.2	Abluftklappen	53
6.2.1	Form der Klappenblätter	53
6.2.2	Länge der Klappenblätter	54
6.2.3	Einbau	54
6.2.4	Auflagefläche	54
6.2.5	Leckagen	55
6.2.6	Alterung	56
6.3	Zwischendecke	56

6.3.1	Abdichtung der Quer- und Längsfugen	56
6.3.2	Entwässerung	57
6.4	Kabeldurchführungen	57
6.5	Zugänge	58
7	Analyse der aktuellen Richtlinien und Normen	59
7.1	Schweizer Richtlinien und Normen	59
7.2	Europäische Richtlinien und Normen	59
7.2.1	Österreichische Richtlinie RVS 09.02.31	59
7.2.2	Deutsche Richtlinie RABT	60
7.2.3	Französische Richtlinie	60
7.3	Diskussion / Beurteilung	60
7.3.1	Gesamtleckage	60
7.3.2	Klappenleckage	62
8	Vorschlag für weiteres Vorgehen.....	64
8.1.1	Definition von Abnahmewerten für die Dichtheit.....	64
8.1.2	Definition von Dimensionierungswerten für die Dichtheit.....	65
8.1.3	Definition von Vorgaben für die Durchführung von Abluftvolumenstrom- und Leckagemessung	65
8.1.4	Durchführen und Auswerten von weiteren Leckagemessungen	66
9	Zusammenfassung der Erkenntnisse	67
	Anhänge	71
	Literaturverzeichnis	96
	Abkürzungen	97
	Projektabschluss	99
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	102

Zusammenfassung

Ausgangslage

Die Rauchabsaugung erfolgt in der Regel durch einen Deckenkanal. Bei älteren Anlagen mit verteilter Absaugung stellt sich das Problem der Leckage nicht. In neuen Tunnelanlagen mit konzentrierter Rauchabsaugung über steuerbare Klappen muss im Deckenkanal über der Zwischendecke ein erheblicher Unterdruck erzeugt werden, um die erforderliche Abluftmenge erzeugen zu können. Dies führt zu Leckage, welche die Effizienz der Absaugung deutlich reduzieren und die Längsströmung im Fahrraum verfälschen können. Die Leckagen müssen soweit möglich und sinnvoll mit baulichen Massnahmen vermindert werden und die restliche Leckage muss bei der Auslegung der Anlage berücksichtigt werden. Fundierte Grundlagen zur Quantifizierung dieser Leckagen sind heute aber kaum vorhanden und die Unsicherheiten bei der Dimensionierung entsprechend gross. Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt soll dieser Unsicherheit begegnet werden.

Forschungsziel / Methode

Das primäre Ziel der Forschungsarbeit ist die Schaffung einer fundierten Grundlage zur Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen von Strassentunneln.

Die Forschungsarbeit wurde in 5 Phasen unterteilt: 1) Literaturrecherche, 2) Leckagemessungen, 3) Analyse der Messdaten, 4) Entwicklung einer praxisorientierten Methode zur Quantifizierung der Leckagen, 5) Empfehlungen bezüglich Prävention, Intervention und allenfalls Anpassung der Regelwerke.

Messkampagne

Zwischen August 2007 und September 2009 wurden gesamthaft 16 Leckagemessungen an 10 verschiedenen Schweizer Strassentunneln durchgeführt. Durch eine gezielte Auswahl der Tunnelobjekte (Geometrie, Alter, Konstruktion) konnte eine grosse allgemeingültige Aussagekraft der Resultate erreicht werden.

Für die Leckagemessungen wurde die bewährte Tracergasmessung mit konstanten Emissionen (SF_6) verwendet.

Messresultate

Die Rohdaten der Messkampagne sind 159 Daten-Tripels (Δp , Q , ρ). Sie sind nicht direkt geeignet zur Beurteilung der Leckagen, sie zeigen aber interessante Trends, wie z.B. den funktionalen Zusammenhang zwischen der Leckagemenge und dem Unterdruck oder die relativ grosse Streuung der Messdaten.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Hauptgründe für die grosse Streuung bei der Messunsicherheit, der Inhomogenität der Abluftkanäle und Materialdeformationen liegen.

Quantifizierung der Leckage

Eine praxisorientierte Methode für die Dimensionierung der Lüftung unter Berücksichtigung der Leckagen wurde entwickelt. Die Methode orientiert sich an einem bewährten Ansatz aus „ISETH Mitteilung Nr. 39“ (1978). Der Ansatz basiert auf einer makroskopischen Betrachtung. Dabei wird das Verhalten des Systems mathematisch beschrieben, während die unbekannt Parameter durch Messungen bestimmt werden. Die ermittelten Parameter sind als unscharfe Grössen zu betrachten.

Mit dieser Methode können die entscheidenden Grössen wie Leckagemenge, Unterdruck oder Ventilatorleistung direkt und einfach berechnet werden.

Empfehlungen / Ausblick

Bei einer Umsetzung und/oder Fortführung dieser Forschungsarbeit wird empfohlen, folgende Aspekte prioritär zu behandeln: a) Definition von Dimensionierungs- und Abnahmewerten für die Dichtheit der Abluftkanäle und Abluftklappen, b) Definition von Vorgaben für die Durchführung von Abluftvolumenstrom und Leckagemessung, c) Durchführung und Auswertung von weiteren Leckagemessungen.

Summary

Background

Smoke extraction is normally carried out with a false ceiling above the traffic space. In older tunnels with linear exhaust systems, leakages had not been a problem. In new tunnels with concentrated smoke extraction systems a high under-pressure in the exhaust ducts is necessary to achieve the required exhaust flow close to the fire. This results in leakages from the tunnel into the exhaust ducts. These leakages reduce the efficiency of the ventilation system and change the longitudinal flow in the traffic space. The leakages must be reduced as much as is possible and reasonable with constructional measures and the residual leakage must be considered in the design. As there was very little existing data to quantify this phenomenon, a Swiss research project was established to extensively investigate the leakages into the smoke exhaust ducts of road tunnels.

Research Aim

The principal objective of the research work has been to create a comprehensive basis for a better understanding of the leakages from tunnels into smoke exhaust ducts.

The research work is articulated in five phases: 1) literature search, 2) measurements of leakages, 3) analysis of the experimental data, 4) development of a practical method to calculate the leakages and 5) suggestions regarding prevention (e.g. reduction of the leakages), intervention (e.g. increase of the exhaust volume) and recommendations to be included in the existing norms.

Measurement Campaign

Between August 2007 and September 2009 a total of 16 leakage measurement campaigns in 10 different Swiss tunnels were carried out. In order to acquire a comprehensive set of data, the choice of tunnels reflected a wide range of types with respect to geometry, age, and construction method.

The measurements were carried out using the well-proven tracer gas method (SF_6) with constant emissions.

Measurement Results

The measured raw data consist of a set of 159 data-triplets (Δp , Q , ρ). They are not explicitly suited to quantify the leakages; however they do identify interesting features such as the dependence between leakage and under-pressure and the relatively wide scatter of the results.

The reasons for this scattered behaviour could be attributed to uncertainty of the measurements, to construction irregularities of the exhaust ducts, or to material deformation of the duct itself.

Quantifying of the Leakages

A practical method has been developed enabling the sizing of the exhaust system taking into account the leakages into the exhaust duct. These are quantified using a well-known approach described in ISETH Mitteilung Nr. 39 (1978). The concept is to consider the leakage flow in a macroscopic manner, so as to describe the behaviour of the system mathematically, while certain parameters are then derived from the measurements. The values obtained by this approach must be considered as bandwidth.

With this method it is possible to calculate in a straightforward manner relevant quantities such as volume flow, under-pressure at the end of the exhaust duct, and ventilator power.

Recommendations / Further Steps

For an adaptation and/or continuation of the present research work, priority should be given to the following tasks: a) define guaranteed values and design values for the tightness of exhaust ducts and dampers, b) define specifications for exhaust flow and leakage flow measurements, c) carry out and analyse more measurements.

Résumé

Situation initiale

L'extraction massive des fumées est en règle générale effectuée par un canal occupant la voûte du tunnel. Dans les installations anciennes d'extraction transversale, le problème des fuites ne se pose pas. Dans les tunnels modernes avec extraction massive des fumées à travers des clapets de ventilation télécommandés, une dépression considérable doit être maintenue dans le canal d'extraction au dessus du faux-plafond afin d'atteindre la quantité requise d'air extrait. Cette dépression engendre des fuites qui réduisent nettement l'efficacité de l'extraction et peuvent fausser l'écoulement prescrit dans l'espace de circulation. Les fuites doivent être réduites autant que possible et raisonnable par des mesures architecturales. Les fuites restantes doivent être considérées dans la conception des installations. Rares sont à ce jour les données fiables pour quantifier ces fuites et par conséquent grandes les incertitudes lors de la conception. Le présent projet de recherche tend à réduire ces incertitudes.

But de recherche / Méthode

Le but premier du projet de recherche est de créer une base de données fiable pour quantifier les fuites dans les canaux d'extraction des tunnels routiers.

Le projet de recherche est articulé en 5 parties : 1) recherche de littérature, 2) campagne de mesure des fuites, 3) analyse des résultats, 4) développement d'une méthode applicable en pratique pour quantifier les fuites, 5) formulation de recommandations portant sur la prévention, l'intervention et la modification des normes.

Campagne de mesure

Au total 16 campagnes de mesure ont été effectuées entre août 2007 et septembre 2009 dans 10 différents tunnels routiers suisses. Une haute signification des résultats a pu être obtenue par le choix ciblé des tunnels (géométrie, âge, construction).

Les mesures des taux de fuites ont été effectuées avec la méthode éprouvée de mesure au gaz traceur (SF₆) à émission constante.

Résultats

Les données brutes de la campagne de mesure consistent en 159 triplets (Δp , Q , ρ). À défaut de permettre et appréciation directe des fuites, ces données montrent néanmoins des tendances intéressantes, comme par exemple la dépendance fonctionnelle entre le taux de fuite et la dépression ou la dispersion relativement forte des mesures.

Les principales raisons de cette forte dispersion ont été identifiées ou sont supposées dans les incertitudes de mesures, l'inhomogénéité des canaux d'extraction et les déformations de composantes sous l'effet de la dépression.

Quantification des fuites

Une méthode pratique pour le dimensionnement de la ventilation tenant compte des fuites a été développée. La méthode est fondée sur l'approche éprouvée publiée dans la note ISETH Nr. 39 (1978). Cette approche est fondée sur une considération macroscopique du phénomène des fuites. Le système canal – fuites est décrit mathématiquement et

les paramètres inconnus déterminés par des mesures. Ces paramètres sont à considérer comme des estimations.

Les grandeurs déterminantes du dimensionnement comme le taux de fuite, la dépression et la puissance du ventilateur peuvent être calculées directement et simplement.

Recommandations / procédés ultérieurs

Dans l'application pratique et/ou la continuation de ce projet de recherche, il est recommandé de traiter les aspects suivants de façon prioritaire : a) définition de valeurs de dimensionnement et de réception pour l'étanchéité des canaux et des clapets d'extraction, b) définition de consignes pour l'exécution de mesure du flux volumique d'aspiration et du taux de fuite, c) exécution et évaluation de campagnes de mesures des fuites ultérieures.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das Lüftungssystem in Strassentunneln ist ein wichtiges Sicherheitssystem. Das primäre Ziel ist, im Ereignisbetrieb die Fluchtwege für die Tunnelbenutzer rauchfrei zu halten. In längeren Tunneln¹ muss gemäss ASTRA-Richtlinie [1] ein mechanisches Lüftungssystem mit Rauchabsaugung installiert werden. Ziel dabei ist, die Rauchgase konzentriert über dem Brandort abzusaugen und die Rauchausbreitung über gestauten Fahrzeugen zu minimieren.

Vom Absaugort werden die Rauchgase durch einen Abluftkanal via Lüftungszentrale und Rauchausslassöffnung ins Freie befördert. Der Abluftkanal (AK) ist üblicherweise, getrennt durch eine Zwischendecke, über dem Fahrraum angeordnet. Die Ventilatoren sind in der/den Lüftungszentrale/n angeordnet und arbeiten saugend, so dass der Abluftkanal im Unterdruck steht. Bei Undichtheiten des Kanals wird Fremdluft abgesaugt. Die Folgen sind:

- reduzierte Abluftmenge am Brandort;
- ungenaue Steuerung der Längsströmung, insbesondere dann, wenn die Messgeräte für die Strömungsmessung in den Portalbereichen positioniert sind.

Die ASTRA-Richtlinie [1] und auch andere europäische Richtlinien (RVS [2], RABT [3], Dossier Pilot [4]) fordern, dass die Leckagemenge zwischen dem Absaugort und den Abluftventilatoren in der Auslegung berücksichtigt werden muss.

Fundierte Grundlagen zur Quantifizierung dieser Leckagen sind heute aber kaum vorhanden und die Unsicherheiten bei der Dimensionierung entsprechend gross. Gerade die Leckagen haben aber nicht selten einen erheblichen Einfluss auf kostenintensive Entscheidungen seitens der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) und des Baus.

Literatur mit konkreten Angaben zur Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen ist nur sehr begrenzt vorhanden. Neben der Schweizer [1] und der österreichischen Richtlinie [2] konnten nur wenige Publikationen (z.B. [5] & [6]) gefunden werden, die sich explizit dem Thema widmen.

1.2 Auftrag

Pöyry Infra AG wurde im 2007 beauftragt, die Problematik der Abluftkanalleckagen umfassend zu untersuchen und die Leckagemenge zu quantifizieren. Basierend auf dieser Untersuchung gilt es, falls es sich als notwendig erweist, Vorschläge für die Anpassung von Schweizer Regelwerken zu machen.

Nicht Gegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit sind insbesondere folgende Punkte:

- Ausarbeiten der konkreten Richtlinie-, Norm- oder Merkblatt-Passagen;
- Vergleich und Evaluation der Messmethoden für die Leckagemessung;
- Definieren von Standards bezüglich Durchführung von Leckagemessungen in Abluftkanälen.

¹ > 2000 m – 3000 m bei Richtungsverkehr und geringer Stauhäufigkeit (RV1); > 800 m – 1500 m bei Richtungsverkehr und grosser Stauhäufigkeit (RV2) oder Gegenverkehr (GV)

1.3 Forschungsziele

Das primäre Ziel der Forschungsarbeit ist die Schaffung einer fundierten Grundlage zur Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen von Strassentunneln.

Im Weiteren gilt es, Aspekte, die im Zusammenhang mit Abluftkanalleckagen von Interesse sind, zu erfassen, untersuchen und dokumentieren.

1.4 Vorgehen

Die Forschungsarbeit wurde in 5 Phasen unterteilt, die in groben Zügen in Abbildung 1 dargestellt sind. Im Wesentlichen entspricht es dem Vorgehen, wie es im Projektbeschrieb [7] formuliert ist.

Die Phase 0 beinhaltete das Definieren der konkreten Forschungsziele. Diese Phase war Teil des Forschungsantrages.

In der ersten Phase wurden die erforderlichen Grundlagen beschafft. Die Hauptaufgaben dabei waren die Literaturrecherche, das Zusammentragen von Entwicklungs- und Forschungsarbeiten und von bereits durchgeführten Leckagemessungen sowie das Studium der Unterlagen.

Die zweite Phase umfasste die Planung und Durchführung der Messungen. Dazu gehörten neben der eigentlichen Messung das Definieren von Kriterien für die Wahl von geeigneten Tunnelobjekten, Begehungen, Vorabklärungen und Koordination mit allen Beteiligten (Tunneleigentümer, Betreiber, Planer und Messinstitut) und das Einholen der Bewilligung für die Leckagemessungen.

In der dritten Phase wurden die Messresultate ausgewertet und analysiert. Die Auswertung erfolgte in mehreren Stufen. In einem ersten Schritt wurden die Daten auf Plausibilität geprüft und es wurde folgendermassen vorgegangen:

Fall 1: Die Ergebnisse sind unplausibel. Diese Ergebnisse werden zur Nachprüfung und allenfalls zur Korrektur an das Messinstitut retourniert. Können keine Unstimmigkeiten gefunden werden, werden die Daten verworfen, anderenfalls werden sie erneut auf Plausibilität geprüft.

Fall 2: Die Ergebnisse sind plausibel. Diese Ergebnisse werden für die weitere Auswertung verwendet.

In einem zweiten Schritt wurden die Messergebnisse tunnelspezifisch und global ausgewertet. In einem dritten Schritt erfolgte eine Auswertung der Daten nach weiteren, indirekt mit Leckagen im Zusammenhang stehenden Aspekten.

In der vierten Phase wurden aufgrund der erzielten Erkenntnisse a) die bestehenden Regelwerke analysiert, b) eine praxisorientierte Methode zur Quantifizierung der Leckagen entwickelt und c) konstruktive Aspekte untersucht.

In der fünften Phase wurden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und Empfehlungen bezüglich Prävention, Intervention und Anpassung der Regelwerke definiert.

Der in Abbildung 1 dargestellte Ablauf in 5 Phasen gibt im Wesentlichen den chronologischen Ablauf wieder. Einige Tätigkeiten haben aber phasenübergreifend stattgefunden. So hat z.B. die Auswertung der Messresultate einige Zeit vor dem Abschluss der Messkampagne begonnen. Sinnvollerweise hat die Plausibilitätsprüfung jeweils zeitnah nach der Messung stattgefunden.

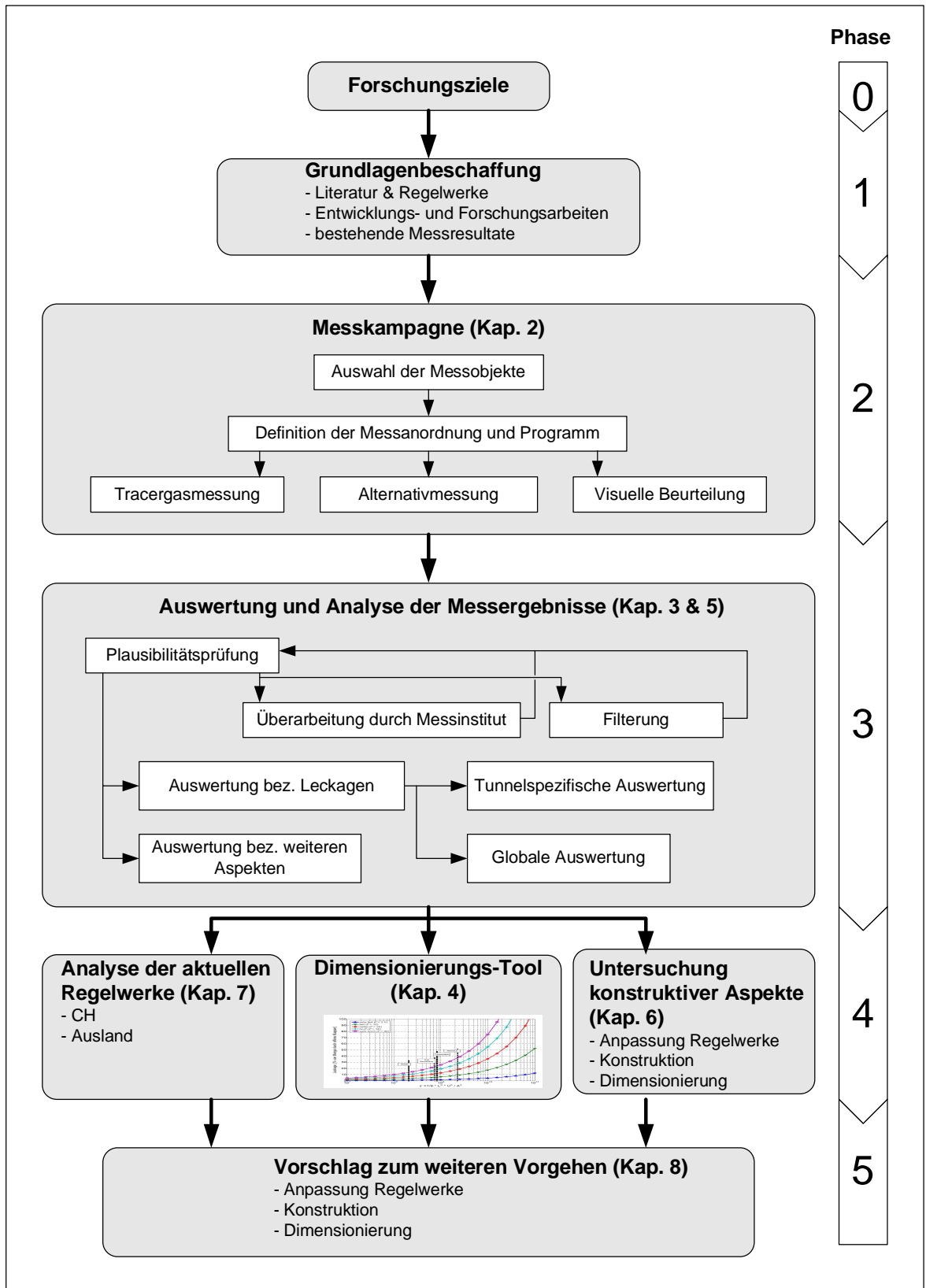


Abbildung 1: Schematische Übersicht der Vorgehensweise

2 Messkampagne

2.1 Auswahl der Messobjekte

Als Messobjekte kamen alle Tunnel in Frage, die über ein Lüftungssystem zur konzentrierten Rauchabsaugung verfügen. Die weitere Auswahl erfolgte nach folgenden Kriterien:

- **Tunneltyp:** Das Kriterium war, eine umfassende Messreihe zusammenzustellen, d.h., es sollten möglichst viele Tunneltypen berücksichtigt werden.
- **Nutzen von Synergien:** Das Kriterium war, die Leckagemessungen wenn möglich im Rahmen von Abnahmemessungen durchzuführen.
- **Berücksichtigen von verkehrstechnischen und organisatorischen Aspekten:** z.B. Möglichkeiten von Sperrungen, Bauablauf etc.

Bezüglich Tunneltypen waren für die Auswahl und die spätere Beurteilung folgende Aspekte relevant:

Alter und Baujahr

Das Alter hat einen massgeblichen Einfluss auf die Dichtheit des Abluftkanals. Diesbezüglich gilt es, zwei verschiedene Aspekte zu betrachten. Der eine ist die Alterung, der andere das Baujahr.

Mit steigendem Alter nimmt die Dichtheit des Abluftkanals wegen der Alterung der Baustanz (v.a. Zwischendecke und Innenring) und der Installationen (Dichtungsbänder, Brandabschottungen, Klappen etc.) vermutlich ab. Wie stark die Dichtheit abnimmt, ist aber weitgehend unbekannt.

Das Baujahr ist relevant, weil sich die Anforderungen an das Lüftungssystem in den Jahren zwischen 1995 – 2000 grundsätzlich geändert haben. Querlüftungssysteme wurden mehr und mehr durch Systeme mit konzentrierter Rauchabsaugung abgelöst. Ältere Tunnel, bei denen noch ein herkömmliches Querlüftungssystem installiert wurde, werden in der Regel auf ein System mit konzentrierter Rauchabsaugung umgerüstet. Bei der konzentrierten Rauchabsaugung ist ein relativ dichter Abluftkanal (AK) erforderlich. Weil bei den Querlüftungssystemen Leckagen kaum ein Problem waren, wurden beim Bau auch keine besonderen Massnahmen getroffen. Entsprechend sind die Abluftkanäle hinsichtlich Dichtheit relativ schlecht und müssen nachträglich abgedichtet werden. Es zeigt sich aber, dass die Dichtheit nicht die Werte von neuen Tunneln erreicht. Es werden in der weiteren Betrachtung zwei Tunneltypen unterschieden:

- Typ A: Tunnel, die mit einem System mit konzentrierter Rauchabsaugung gebaut wurden und bei denen die Dichtheit des Abluftkanals speziell berücksichtigt wurde.
- Typ B: Tunnel, die nachträglich auf ein System mit konzentrierter Rauchabsaugung gemäss [1] umgerüstet wurden (in der Regel Tunnel, die vor 1995 – 2000 eröffnet wurden).

Die Messkampagne umfasst Tunnel des Typs A und B, wobei es sich bei den Tunneln vom Typ A ausnahmslos um neue, beim Typ B um ältere Tunnel handelt. Um die altersbedingte Zunahme der Leckage zu beurteilen, wären aber Messresultate von neueren und älteren Tunneln vom gleichen Typ nötig. Mit den vorliegenden Messresultaten lässt sich somit keine oder nur eine sehr bedingte Aussage über die altersbedingte Zunahme der Leckage machen.

Anordnung der Lüftungszentrale (LZ)

Hinsichtlich der Anordnung der Lüftungszentrale(n) werden drei Typen unterschieden (vgl. Tabelle 1). In der durchgeführten Messkampagne sind alle drei Typen vorhanden.

Typ	Skizze	Beschreibung
L		Eine LZ, die an einem Ende des AK positioniert ist. Die abgesaugte Abluftmenge strömt immer in die gleiche Richtung, auch im Redundanzfall. Die zulässige Abluftkanallänge ist bis zu 50% geringer als bei Typ U und T und die zu erwartende Leckagemenge ist am grössten.
U		Zwei LZ, die an den beiden Enden des AK positioniert sind. Die abgesaugte Abluftmenge teilt sich auf, ausser im Redundanzfall. Die Leckagemenge ist am geringsten.
T		Eine LZ, die so positioniert ist, dass sie den AK in zwei Abschnitte teilt. Je Abschnitt strömt die abgesaugte Abluftmenge immer in die gleiche Richtung, auch im Redundanzfall. Je nach Position liegt die Leckagemenge zwischen Typ L und U. Der nicht durchströmte Abschnitt wird als toter Ast bezeichnet.

Tabelle 1: Anordnung der Lüftungszentralen

Abluftkanal-Typ

Der wichtigsten zwei Aspekte diesbezüglich sind: a) Abluftkanal über der Zwischendecke mit einem Abteil (Abluftkanal) oder zwei Abteile (Zu- und Abluftkanal) und b) handelt es sich beim Abluftkanal um einen Deckenkanal (getrennt vom Fahrraum mit einer Zwischendecke) oder einen separaten Stollen. Die Messkampagne umfasst ausschliesslich Deckenkanäle mit einem Abteil.

Weitere massgebende Faktoren sind Geometriedaten, Konstruktion der Zwischendecke und die Abdichtung der Längs- und Querfugen.

2.2 Durchgeführte Messungen

Zwischen August 2007 und September 2009 wurden gesamthaft 16 Leckagemessungen an 10 verschiedenen Schweizer Strassentunneln durchgeführt. Die Messungen sind in chronologischer Folge in Tabelle 2 dargestellt.

Nr.	Tunnel	Röhre	Eröffnung	Typ	LZ-Anordnung	Länge Tunnel	A _{AK} [m ²]	Datum
1	Flimsenstein	-	2007	A	T	2'922 m	11.5 m ²	22.08.07
2	San Bernardino	Süd	1967 ^(a)	B	U	6'600 m	11.0 m ²	09.10.07
3	San Bernardino	Mitte	1967 ^(a)	B	U	6'600 m	11.0 m ²	10.10.07
4	Giswil	-	2000	A	L	2'066 m	11.2 m ²	16.01.08
5	Raimeux	-	2007	A	T	3'211 m	9.9 m ²	20.02.08
6	Leissigen	-	1994	B	T	2'200 m	9.5 m ²	24.04.08
7	Aescher	Basel	2009	B	T	2'142 m	10.2 m ²	17.06.08
8	Aescher	Chur	2009	A	L	2'175 m	10.2 m ²	17.06.08
9	Stägjitschuggen	-	2008	A	L	2'302 m	12.4 m ²	23.09.08
10	Uetliberg	Basel	2009	A	T	4'439 m	16.7 m ²	22.10.08
11	Uetliberg	Chur	2009	A	T	4'499 m	16.7 m ²	23.10.08
12	Kirchenwald	Nord	2009	A	L	1'530 m	13.0 m ²	03.12.08
13	Aescher ^(b)	Basel	2009	A	L	2'175 m	10.2 m ²	17.03.09
14	Aescher ^(b)	Chur	2009	A	L	2'142 m	10.2 m ²	17.03.09
15	Islisberg	Luzern	2010	A	U	4'950 m	8.5 m ²	24.08.09
16	Islisberg	Zürich	2010	A	U	4'950 m	8.5 m ²	26.08.09

Tabelle 2: Ausgewählte Tunnelobjekte ^(a) Totalsanierung 1991 – 2008; ^(b) 2. Messung

2.3 Messverfahren

Für die Bestimmung und Beurteilung der Leckagen im Abluftkanal sind folgende Messgrößen massgebend:

- Volumenstrom an mehreren, aber mindestens an zwei Stellen über der Kanallänge;
- Absolutdruck der Luft im Abluftkanal an jeder Messstelle;
- Druckdifferenz zwischen Abluftkanal und Fahrraum an jeder Messstelle;
- Lufttemperatur an jeder Messstelle.

Die Messungen der Lufttemperatur sowie des Absolut- und Differenzdrucks stellen keine spezielle Herausforderung dar und können mit Standardgeräten durchgeführt werden.

Die Messung des Volumenstroms ist deutlich aufwendiger und es kommen verschiedene Messverfahren in Frage. Grundsätzlich kann zur Bestimmung der Leckagen in Abluftkanälen jede gängige Geschwindigkeits-, Volumenstrom- oder Massenstrommessmethode eingesetzt werden. Es zeigt sich aber, dass sich nicht jede Methode gleichermaßen eignet. Im Unterschied zu Labormessungen in z.B. kreisrunden Rohren sind für Volumenstrommessungen in Abluftkanälen einige erschwerende Aspekte zu berücksichtigen:

- **Beliebige Querschnittsformen:** Die Querschnitte der Abluftkanäle weichen in den meisten Fällen stark von regulären Querschnitten ab (z.B. kreisrund), von denen die Strömungsprofile bekannt sind.
- **Einbauten / Querschnittsänderungen:** Wegen Einbauten (z.B. Klappenantriebe) und/oder Querschnittsänderungen (z.B. Nischen) ist kaum mit einer voll entwickelten Strömung im Abluftkanal zu rechnen.
- **Stark unterschiedliche Volumenströme:** Die zu bestimmenden Volumenströme können stark variieren und liegen im Bereich von $1 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $200 \text{ m}^3/\text{s}$.
- **Beschränkte Zeitfenster:** Häufig sind die Messungen in begrenzten Zeitfenstern durchzuführen (z.B. Nachtspernung).
- **Betriebspunkt Abluftventilator:** Zusätzliche, durch die Messung generierte Druckverluste sind unerwünscht, da sie zu einer Verschiebung des Betriebspunktes führen.
- **Zugänglichkeit:** Die Zugänglichkeit in den Abluftkanal mit Messgeräten wie auch die Schlauch-/Kabelführung auf Fahrbahnniveau sind in der Regel stark eingeschränkt. Die Stromversorgung kann ein Problem darstellen.
- **Raue Umgebung:** Bei Messungen in Strassentunneln sind raue klimatische Bedingungen – Staub, Schmutz und Baustellenverkehr – zu berücksichtigen.

Für die Messkampagne im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde die Tracergasmessung mit konstanten Emissionen gewählt (vgl. Kapitel 2.3.1). Alternative Messmethoden sind im Kapitel 2.3.2 kurz beschrieben.

2.3.1 Tracergasmessung

Bei der Tracergasmessung erfolgt die Bestimmung des Volumenstroms indirekt über eine Konzentrationsmessung. Die abgesaugte Luft wird nach Eintritt in den Abluftkanal mit einer konstanten Menge SF_6 (3 – 5 ppm) angereichert². Nach ca. 60 hydraulischen Durchmessern (Mischlänge) bildet sich ein homogenes SF_6 -Luft-Gemisch. Nach dieser Mischlänge kann durch Messung der Konzentration der Luftvolumenstrom an beliebigen Stellen berechnet werden (vgl. Abbildung 2). Für ausführlichere Angaben zur Tracergasmethode sei z.B. auf [8] verwiesen.

² Als Tracergase eignen sich Gase, die ungiftig sind, nicht rasch chemisch reagieren, in der Luft sonst kaum vorhanden und auch in geringen Konzentrationen noch gut nachweisbar sind.

Für die Messung der SF₆-Konzentration kamen IR-PAS³- und NDIR⁴-Methoden zum Einsatz. Die Messverfahren sind anfällig gegen Luftdruck- und Temperaturschwankungen sowie querempfindlich gegen Wasserdampf. Unter entsprechender Berücksichtigung kann mit den erwähnten Methoden eine Messgenauigkeit von 4 – 5% vom Messwert erreicht werden (bei einem Vertrauensintervall von 95%).

Die Hauptvorteile der Tracergasmessung gegenüber einer geschwindigkeitsbasierten Methode sind primär: a) Unabhängigkeit vom Kanalquerschnitt, b) kein ungestörtes Strömungsprofil erforderlich und c) kein Einfluss auf den Betriebspunkt der Ventilatoren.

Als Nachteile müssen erwähnt werden, dass a) die Messungen relativ sensibel und wenig fehlertolerant sind, b) hochsensible Geräte in relativ rauer Tunnelumgebung erforderlich sind und c) keine Angaben über den Volumenstrom direkt vor Ort möglich waren.

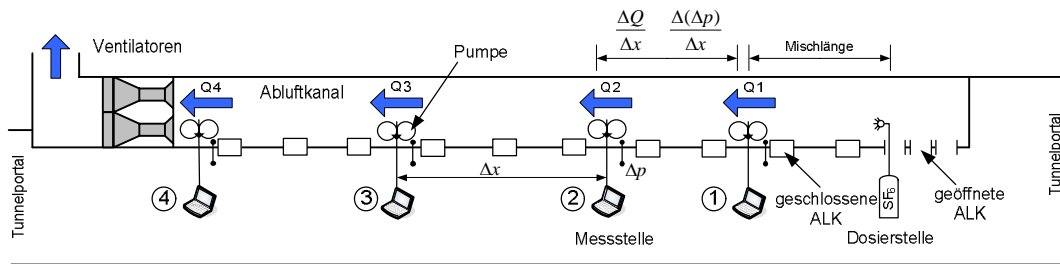


Abbildung 2: Tracergasmessung im Abluftkanal

2.3.2 Alternative Messmethoden

Neben der Tracergasmessung sind noch folgende Methoden für Volumenstrommessungen in Abluftkanälen gebräuchlich:

Netzmessung

Bei der Netzmessung wird der Kanalquerschnitt in verschiedene Teilquerschnitte unterteilt und dort die vorhandenen Geschwindigkeiten gemessen (vgl. Abbildung 3). Entsprechend der Grössenverteilung der Teilflächen werden ihre Beiträge zur mittleren Geschwindigkeit durch einen Faktor gewichtet. Die Unterteilung des Kanalquerschnittes in Teilquerschnitte und die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit erfolgen nach genormten Verfahren (z.B. Log-Linear, Log-Tschebycheff, Schwerelinienverfahren etc). Weitere Angaben sind der Norm VDI 2040 [12] zu entnehmen.

Die Messunsicherheit bei der Netzmessung in Abluftkanälen wird auf 5% geschätzt und ist hinsichtlich der Messunsicherheit mit der Tracergasmessung vergleichbar. Die Netzmessung wird regelmässig für die Volumenstrommessung in Abluftkanälen eingesetzt.

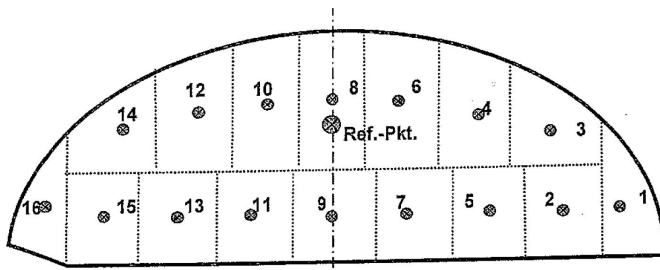


Abbildung 3: Beispiel eines Messgitters mit 16 Messpunkten und gleich grossen Teilflächen

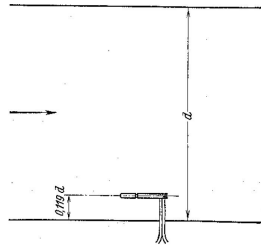
³ fotoakustische IR-Spektroskopie
⁴ nichtdispersive Infrarotmessverfahren

Einpunktmessung

Der Ansatz der Methode ist, ein Strömungsmessgerät so zu positionieren, dass unmittelbar die mittlere Geschwindigkeit ($v_m = Q/A$) gemessen wird (vgl. z.B. [9] oder [10]).

Bei der ausgebildeten turbulenten Rohrströmung in kreisrunden Rohren mit dem Durchmesser d wird die Entfernung von der Rohrwand y , wo v_m gemessen wird, mit $y = 0.119 \cdot d$ angegeben. Dieser Abstand ist unbeeinflusst von der Wandrauigkeit⁵ und gültig für alle $Re < 5 \cdot 10^6$. Gemäss [10] liegt der Fehler bei 0.7% – 2.5%.

Abbildung 4: Prinzip der Punktmessung mit einem Prandtl-Rohr



Bei nichtkreisrunden Querschnitten, wie dies bei Abluftkanälen meist der Fall ist, wird als Referenzdurchmesser d üblicherweise der hydraulische Durchmesser D_{hyd} herangezogen und die Messstelle über die Mitte der längsten Seite gesetzt. Alternativ kann als Referenzlänge auch die Kanalhöhe h verwendet werden. Beide Ansätze wurden auf Basis einer Untersuchung von Nikuradse [11] untersucht. Die Ergebnisse sind für beide Referenzlängen ähnlich:

- Der Volumenstrom wird tendenziell überschätzt.
- Die Messunsicherheit liegt in der Grössenordnung von 10% – 15%.
- Die Messung ist sensibel und unzuverlässig.

Für die Leckagemessung in Abluftkanälen ist die Einpunkt-Messmethode nicht geeignet.

Blendenmessung

Diese Methode basiert auf dem Energieerhaltungsgesetz. Der Volumenstrom Q ist proportional zur Quadratwurzel des Druckverlustes über ein Drosselgerät (weitere Angaben sind den Normen VDI 2040 [12] und VDI 2041 [13] zu entnehmen). Für die Messung in Abluftkanälen wird dazu quer im Abluftkanal eine Wand mit einer Blende eingebaut (vgl. Abbildung 5). Diese Methode wird z.T. im Ausland angewendet. In der Schweiz wird sie, zumindest in jüngster Zeit, nicht eingesetzt. Aus den nachfolgenden Gründen wird diese Methode als problematisch erachtet:

- Es können keine Normblenden eingesetzt werden. Die Eichung wird als problematisch erachtet.
- Aufgrund des grossen Blendenquerschnittes ist die Blenden-Anströmung nicht der Regel entsprechend. Der Einfluss ist schwierig zu erfassen.
- Der Zeit- und Kostenaufwand für die Messdurchführung (inkl. Auf- und Abbau) wird als sehr hoch beurteilt.
- Der Druckverlust über der Blende führt zu einer Verschiebung des Betriebspunktes des Abluftventilators.

Eine Beurteilung der Messunsicherheit im Rahmen dieser Forschungsarbeit konnte nicht gemacht werden. In Österreich wird dieses Messverfahren standardmässig eingesetzt.

⁵ Vorausgesetzt die Wandrauigkeit ist deutlich kleiner als der Wandabstand der Messsonde.



Abbildung 5: Beispiel einer montierten Messdüse im Abluftkanal (Quelle [14])

2.4 Ablauf der Messungen

Die Messungen wurden je nach Tunnel mit 1 – 2 Dosierstellen (DS) und 2 – 4 Messstellen (MS) durchgeführt. Bei Tunneln mit einer LZ-Anordnung Typ L waren eine, bei Typ T und Typ U zwei Dosierstellen erforderlich. Die Anzahl der Messstellen richtet sich nach der gewünschten Anzahl und Länge der einzelnen Abschnitte.

Der Ablauf der Messung gliedert sich in die drei Etappen *Aufbau*, *Messung* und *Abbau*. Ein nahtloser Übergang von Etappe zu Etappe ist nicht erforderlich.

Für eine komplette Leckagemessung sind zwischen 12 h (einfacher Aufbau mit 1 x DS und 2 x MS) und 20 h (aufwendiger Aufbau, 2 x DS und 4 x MS) einzuplanen. Voraussetzung zur Einhaltung dieser Zeiten ist eine gute Vorbereitung unter Berücksichtigung und Koordination von Sperrzeiten⁶, parallel laufenden Arbeiten im Abluftkanal und Betriebsbereitschaft der Lüftungsanlage (Steuerung und Aggregate).

2.4.1 Messaufbau

Bei jeder Dosier- und Messstelle sind Aufbauten im Abluftkanal und im Fahrraum sowie eine Schlauchverbindung dazwischen erforderlich. Für den Messaufbau sind bei 5 Mitarbeitern zwischen 4 h und 6 h einzurechnen. In der Regel ist eine Hebebühne o.ä. erforderlich.

Abbildung 6 zeigt eine Dosierstelle. Im Fahrraum befindet sich die SF₆-Gasflasche mit Heizmantel, montiert auf einer Präzisionswaage, ein Ventil zur Regelung des Massenstroms und die Datenlogger. Ein dünner Schlauch führt in den Abluftkanal und wird dort verzweigt (Eindüsung an drei Stellen). Ventilatoren sorgen für eine erhöhte Durchmischung. Die Schlauchführung ist problemlos durch die ohnehin offene Abluftklappe möglich.

Abbildung 7 zeigt eine Messstelle. Im Abluftkanal befinden sich neben dem Seitenkanalverdichter mit drei Ansaugstellen der Feuchte- und Temperatursensor und das Prandtl-Rohr. Mehrere Schläuche, einer davon mit ca. 30 mm Durchmesser, führen in den Fahrraum zu den Messgeräten und dem Datenlogger. Die Schlauchführung kann zu gewissen Problemen führen, weil die Abluftklappen geschlossen und andere Öffnungen in der Regel nicht vorhanden sind.

⁶ Wegen Lärmbelastung und Strombezugsbeschränkungen



Abbildung 6: Dosierstelle im Fahrraum (links) und im Abluftkanal (rechts)



Abbildung 7: Messstelle im Fahrraum (links) und im Abluftkanal (rechts)

Für die Kabel- und Schlauchführung vom Abluftkanal auf Fahrbahniveau ist eine Öffnung von ca. 60 mm erforderlich. Bei den Messungen für das Forschungsprojekt kamen drei verschiedene Methoden zum Einsatz:

Via Rundschläge

Bei dieser Variante wurden die Schläuche durch die Rundschläge geführt (vgl. Abbildung 8). Auch wenn diese Variante relativ elegant ist, hat sie sich im praktischen Einsatz nicht besonders bewährt. Einerseits kann das Einziehen der Schläuche Probleme darstellen, andererseits ist man bei der Wahl der Rundschläge stark durch die Belegung eingeschränkt. Nach der Messung müssen die Brandabschottungen bei den Rundschlägen ersetzt werden.



Abbildung 8: Kabel- und Schlauchführung durch die Rundschläge (Tunnel Flimsenstein)

Via offene Abluftklappen

Bei der Variante *Abluftklappen* wurden die Schläuche durch geöffnete und mit Brettern abgedeckte Abluftklappen geführt. Die Bretter wurden fahrbahnseitig auf den Klappenrahmen aufgelegt und vom Abluftkanal her befestigt (vgl. Abbildung 9). Diese Variante hat sich gut bewährt (Hebevorrichtung erforderlich). Ein Problem kann allenfalls die Auflage des Brettes auf dem Klappenrahmen (ungleiche Niveaus, Mittelsteg, vorstehende Schrauben etc.) und das Handling der Bretter darstellen. Die Dicke der Bretter und Querhölzer ist der grossen Fläche und Druckbelastung entsprechend zu wählen (Dicke der Bretter ca. 20 mm, Höhe x Breite der Querhölzer min. 80 x 60 mm).



Abbildung 9: Kabel- und Schlauchführung durch offene und mit Brettern verschlossene Abluftklappen (zwei Arten der Befestigung der Bretter: links mit Querhölzern und Gewindestangen, rechts mit Seilen und Anker im Gewölbe)

Via Mannlöcher

Sind die Abluftklappen mit Mannlöchern ausgestattet, so ergibt sich eine sehr einfache Möglichkeit für die Schlauchführung durch diese mit Brettern verschlossenen Öffnungen (vgl. Abbildung 10). Diese Variante hat sich bestens geeignet und wurde bei allen Tunneln der Westumfahrung Zürich angewendet.



Abbildung 10: Kabel- und Schlauchführung durch Mannlöcher in der Abluftklappe (Westumfahrung Zürich)

2.4.2 Messung

Vor Beginn und nach Abschluss der eigentlichen Messungen wurden die Messgeräte kalibriert. Die Messungen wurden bei verschiedenen Lüftungsszenarien durchgeführt. Die Dauer der Messkampagne ist abhängig von der Anzahl Szenarien, der Kanallänge und der Strömungsgeschwindigkeit im Abluftkanal. Pro Szenario ist mit 45' – 60' zu rechnen.

2.4.3 Abbau

Der Abbau umfasst die komplette Demontage der Messkomponenten und das Wiederherstellen des Ausgangszustands im Tunnel (z.B. schliessen der Mannlöcher). Für den Abbau ist bei 4 – 5 Mitarbeitern mit 3 h zu rechnen. In der Regel ist eine Hebebühne o.ä. erforderlich.

2.5 Messergebnisse

Die einzelnen Messungen sind in den Berichten [18] – [28] und den Messprotokollen im Anhang II dokumentiert.

Bemerkung

Bei den ersten drei Messungen gab es einige messtechnische Probleme. Grund dafür war hauptsächlich der Umstand, dass für die Messung der SF₆-Konzentration zwei unterschiedliche Messverfahren (NDIR und IR-PAS) eingesetzt wurden und die Druck- und Wasserdampf-Empfindlichkeit falsch berücksichtigt wurde. Die daraus entstandenen Messfehler konnten quantifiziert und nachträglich korrigiert werden.

Ab der 4. Messung wurde die SF₆-Konzentration bei allen Messstellen mit dem IR-PAS-Verfahren ermittelt.

2.6 Ergänzende Punktmessungen

Zur Messung von Volumenströmen respektive Leckagen in Abluftkanälen wird gelegentlich eine Einpunktmessung, wie sie in Kapitel 2.3.2 beschrieben ist, angewendet.

Bei einigen Tunneln (vgl. Tabelle 3) wurden parallel zur Tracergasmessung Einpunktmessungen mit einem Flügelradanemometer und in einem Fall zusätzlich mit einem Prandtl-Rohr durchgeführt. In Abbildung 5 ist der Aufbau der Messgeräte im Abluftkanal dargestellt.

Nr.	Tunnel / Röhre	Anzahl Messungen	Methode PR = Prandtl-Rohr FR = Flügelrad	Abstand y D _{hyd} = hyd. Durchmesser h = Kanalhöhe
5	Raimeux	10	PR & FR	0.119*D _{hyd} & 0.119*h
6	Leissigen	5	FR	0.119*D _{hyd}
7	Aescher / Basel	3	FR	0.119*D _{hyd}
8	Aescher / Chur	5	FR	0.119*D _{hyd}
10	Uetliberg / Basel	5	FR	0.153*D _{hyd} *
11	Uetliberg / Chur	6	FR	0.119*D _{hyd}

Tabelle 3: Einpunktmessungen (*y-Wert wurde fälschlicherweise gleich gewählt wie bei der Röhre Basel, D_{hyd} der Röhre Basel ist aber geringer)



Abbildung 11: Messaufbau im Tunnel de Raimeux mit Flügelrad und Prandtl-Rohr

3 Quantifizierung der Abluftkanalleckagen

3.1 Grundlagen

Der Absolutwert der Leckage eines Tunnels ist im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht besonders aussagekräftig, weil er von einer Vielzahl von Parametern abhängig ist. Der Einfluss einiger Parameter ist bekannt und berechenbar (z.B. Unterdruck, Kanallänge), der Einfluss anderer ist eher zufällig und kaum berechenbar (z.B. Alter, Abdichtung). Ziel ist, eine Methode zu finden, die die berechenbaren Einflussgrößen mathematisch erfasst und alle anderen zusammengefasst als Parameter berücksichtigt. Auf diese Art und Weise ist eine Quantifizierung der Leckage möglich, die sich vergleichen und auf andere Tunnel übertragen lässt.

Der hier angesetzte Ansatz basiert auf einer makroskopischen Betrachtung. Dabei wird das Verhalten des Systems mathematisch beschrieben, während die unbekannt Parameter durch Messungen bestimmt werden. Die dabei ermittelten Parameter sind als unscharfe Größen zu interpretieren.

Zur Beschreibung des Volumenstroms und des Unterdrucks im Abluftkanal unter Berücksichtigung von Leckagen sind grundsätzlich zwei Gleichungen erforderlich: eine Gleichung für die Impulserhaltung in der Hauptströmungsrichtung und eine Gleichung für die Beschreibung der Leckageströme quer zur Hauptströmungsrichtung. Letztere Gleichung setzt die Druckdifferenz über die Zwischendecke in Zusammenhang mit dem Leckagestrom durch die Zwischendecke. Für diesen funktionalen Zusammenhang sind verschiedene Ansätze möglich, deren zwei im Folgenden behandelt werden.

3.1.1 Quadratischer Ansatz

Der verwendete quadratische Ansatz ist in [16] und [17] beschrieben. Die Gleichung Gl. 1 beschreibt die Änderung des Unterdrucks (Druckverlust) im Abluftkanal in Hauptströmungsrichtung, die Gleichung Gl. 2 die Änderung des Volumenstroms (Leckagestrom durch die Zwischendecke). Die Gleichung Gl. 1 berücksichtigt turbulente Kanalströmungen und die Gl. 2 turbulente Leckageströmungen. Per Definition ist die Strömung turbulent, wenn $Re > ca. 2300$ ($Re = \text{Reynoldszahl} = u \cdot L / \nu$); liegt die Re -Zahl darunter, so ist die Strömung laminar. Der f^* -Wert ist eine dimensionslose Grösse, die ein Mass für die Undichtheit eines Kanals darstellt und zur Kennzeichnung der Zwischendecke dienen kann. Er wird bereits im Bergbau zur Kennzeichnung von Lüftungslutten erfolgreich eingesetzt (vgl. [17]). In diesem Forschungsprojekt wird er zur Quantifizierung der Porosität des Abluftkanals eingesetzt. Diese Anwendung beruht auf zwei Annahmen:

1. Die Leckageströmung ist turbulent.
2. Es gibt keine Wechselwirkung zwischen der Luft und der Struktur des Abluftkanals (z.B. keine elastischen Verformungen von Klappenflügeln unter dem Einfluss der Druckdifferenz).

$$\frac{d(\Delta p)}{dx} = \lambda \cdot \frac{1}{D_{hyd}} \cdot \frac{\rho}{2} u^2 \quad \text{Gl. 1}$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{U}{A} \cdot f_T^* \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad \text{Gl. 2}$$

Q:	Volumenstrom [m ³ /s]	ρ:	Luftdichte [kg/m ³]
A:	Fläche Abluftkanal [m ²]	u:	Geschwindigkeit Abluft [m/s]
U:	Umfang Abluftkanal [m]	f* _T :	turbulente effektive Leckagefläche [m ² /m ²], f* _T =f' _T /((1+ ζ) ^{0.5})
D _{hyd} :	hyd. Durchmesser Abluftkanal [m]	f' _T :	turbulente geometrische Leckagefläche [m ² /m ²] (Verhältnis Anteil Leckagefläche turbulente Strömung zur Mantelfläche des Abluftkanals)
λ:	Reibungskoeffizient [-]		
Δp:	Unterdruck Abluftkanal [Pa]		
ζ:	Verlustkoeffizient [-]		
x:	Koordinate längs des Abluftkanals [m]		

Die bekannten Parameter in Gl. 1 und Gl. 2 sind die Geometrievariablen (A, U und D_{hyd}) und die aus den Messungen pro Messstelle ermittelten Daten, nämlich Dichte (ρ), Unterdruck (Δp) und Strömungsgeschwindigkeit (u = Q/A). Die unbekannt Parameter sind der Reibungskoeffizient und die spezifische Leckagefläche f*. Diese Parameter werden aus den Messdaten ermittelt. Der genaue Rechengang zur Ermittlung der Einzelwerte der effektiven Leckagefläche f*_T sowie deren längengewichtete Mittelung einschliesslich Fehlerrechnung sind im Anhang I.1 enthalten.

3.1.2 Linearer Ansatz

Die Mantelfläche des Abluftkanals kann als poröses Medium angesehen werden, durch welches Luft aus dem Fahrraum in den Abluftkanal fliesst. Die laminare Strömung in porösen Medien wird beschrieben durch das Gesetz von Darcy (vgl. Gl. 3, Gl. 4 und Abbildung 12). Es besagt, dass der Volumenstrom Q eines Fluids, das eine Fläche A in einem porösen Medium laminar durchströmt, direkt proportional zum Druckgradienten ∇p ist. Der Proportionalitätsfaktor dieser Beziehung, der k_f-Wert (Durchlässigkeitsbeiwert), ist ein Kennwert für das poröse Medium und das durchströmende Fluid. Der Druckgradient ∇p ist definiert als der Quotient der Druckdifferenz an zwei Punkten a und b entlang der Fliessstrecke und dem Abstand L der beiden Punkte voneinander.

$$Q = -k_f \cdot A \cdot \nabla p = -\frac{\kappa}{\mu} \cdot A \cdot \frac{(P_b - P_a)}{L} \quad \text{Gl. 3}$$

Verallgemeinert gilt:

$$q = -k_f \cdot \nabla p = -\frac{\kappa}{\mu} \cdot \nabla p \quad \text{Gl. 4}$$

wobei:

Q	Volumenstrom durch das poröse Medium [m ³ /s]	μ	dynamische Viskosität des strömenden Fluids [Pa s]
q	Filtergeschwindigkeit, flächenbezogener Durchfluss [m/s]	∇p	Druckgradient [Pa/m]
A	durchströmte Fläche [m ²]	P _a	statischer Druck an der Stelle a [Pa]
k _f	Durchlässigkeitsbeiwert [m ³ s/kg]	P _b	statischer Druck an der Stelle b [Pa]
κ	Permeabilität [m ²], ein vom durchströmenden Medium unabhängiger Kennwert für die Durchlässigkeit	L	Fliessstrecke zwischen a und b [m]

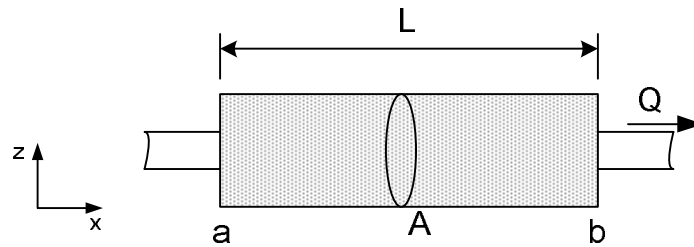


Abbildung 12: Skizze zu Gesetz von Darcy

Die Filtergeschwindigkeit q ist ein flächenbezogener Durchfluss, der die Einheit einer Geschwindigkeit aufweist. Das Minus-Vorzeichen bringt zum Ausdruck, dass die Strömung in Richtung fallendem Druck erfolgt.

Die Filtergeschwindigkeit q ist nicht zu verwechseln mit der Transportgeschwindigkeit v_T , die aus dem Quotienten der Filtergeschwindigkeit und der durchflusswirksamen Fläche, ausgedrückt durch die Porosität ϕ , des durchströmten Mediums gebildet wird.

Wird nun angenommen, dass der Abluftkanal (Zwischendecke und restlicher Umfang des Kanals) ein feinporiges poröses Medium ist, durch das die Leckageströme nur laminar fließen können, kann das Gesetz von Darcy auf den Abluftkanal eines Tunnels angewendet werden: Unter der Annahme, dass der gesamte Umfang U eines Abschnitts Δx eines Abluftkanals AK an der flächenbezogenen Leckage q von Luft aus dem Fahrraum beteiligt ist, besteht zwischen dem Zuwachs der Durchflussmenge im Abluftkanal ΔQ_{AK} und der flächenbezogenen Leckage q der Zusammenhang gemäss Gl. 5.

$$\Delta Q_{AK} = U \cdot \Delta x \cdot q \quad \text{Gl. 5}$$

Zwischen dem Fahrraum und dem Abluftkanal herrscht eine Druckdifferenz Δp . Die Leckageluft strömt durch die Wand des Abluftkanals über eine Fließstrecke der unbekannt Länge d_c durch ein poröses Medium der unbekannt Permeabilität κ . Gemäss dem Gesetz von Darcy besteht somit der funktionale Zusammenhang zwischen dem Zuwachs der Durchflussmenge im Abluftkanal ΔQ_{AK} und der Druckdifferenz gemäss Gl. 6.

$$\Delta Q_{AK} = U \cdot \Delta x \cdot q = U \cdot \Delta x \cdot \frac{\kappa}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{d_c} \quad \text{Gl. 6}$$

Das Vorzeichen wurde zur Vereinfachung fallen gelassen. Es herrscht stets ein Unterdruck im Abluftkanal. Mit dem Zusammenhang $\Delta Q_{AK} = A \cdot \Delta u$ wird Gl. 6 zu Gl. 7.

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{U}{A} \cdot \frac{\kappa}{d_c} \cdot \frac{\Delta p}{\mu} \quad \text{Gl. 7}$$

Diese Anwendung des Gesetzes von Darcy auf die Leckage in Abluftkanälen beruht auf zwei Annahmen:

1. Die Leckageströmung ist laminar.
2. Es gibt keine Wechselwirkung zwischen der Luft und der Struktur des Abluftkanals (z.B. keine elastischen Verformungen von Klappenflügeln unter dem Einfluss der Druckdifferenz).

Mit Grenzwertübergang und Einführung einer dimensionsbehafteten Kennzahl, die im Folgenden effektive Leckagelänge genannt werden soll (vgl. Gl. 8), wird Gl. 7 zu Gl. 9.

$$f_L^* = \frac{\kappa}{d_c} \quad \text{Gl. 8}$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{U}{A} \cdot f_L^* \cdot \left(\frac{\Delta p}{\mu} \right) \quad \text{Gl. 9}$$

Gl. 9 ist formal ähnlich zu ihrer Entsprechung im Kap. 3.1.1. Der soeben definierte Parameter f_L^* stellt eine Tiefe der am Leckagestrom beteiligten Wandschicht dar und hat hier eine ähnliche Bedeutung wie seine Entsprechung in Gl. 2: Da die Permeabilität κ eine vom durchströmenden Fluid unabhängige Kennzahl eines porösen Mediums ist, stellt die effektive Leckagelänge eine geometrische Kennzahl der Leckageeigenschaften des Abluftkanals dar.

Da die Physik der Hauptströmung im Abluftkanal sich nicht geändert hat, wird hier wieder Gl. 1 zu deren Beschreibung herbeigezogen. Die vollständige laminare Beschreibung ist gegeben gemäss Gl. 10 und Gl. 11.

$$\frac{d(\Delta p)}{dx} = \lambda \cdot \frac{1}{D_{hyd}} \cdot \frac{\rho}{2} u^2 \quad \text{Gl. 10}$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{U}{A} \cdot f_L^* \cdot \left(\frac{\Delta p}{\mu} \right) \quad \text{Gl. 11}$$

A:	Fläche Abluftkanal [m ²]	u:	Geschwindigkeit Abluft [m/s]
U:	Umfang Abluftkanal [m]	f _L [*] :	laminare effektive Leckagelänge [m]
D _{hyd} :	hyd. Durchmesser Abluftkanal [m]		$f_L^* = \frac{\kappa}{d_c}$
λ:	Reibungskoeffizient [-]	κ:	Permeabilität der Wand des Abluftkanals [m ²]
Δp:	Unterdruck Abluftkanal [Pa]	d _c :	charakteristische Dimension der Wand des Abluftkanals, typischerweise die Dicke der Zwischendecke [m]
ζ:	Verlustkoeffizient [-]		
x:	Koordinate längs des Abluftkanals [m]		
ρ:	Luftdichte [kg/m ³]		
μ:	dynamische Viskosität der Luft [Pa s]		

Die bekannten Parameter in Gl. 3 und Gl. 4 sind die Geometrievariablen (A, U und D_{hyd}) und die aus den Messungen pro Messstelle ermittelten Daten, nämlich Dichte (ρ, μ), Unterdruck (Δp) und Strömungsgeschwindigkeit (u = Q/A). Die unbekannt Parameter sind der Reibungskoeffizient und die effektive Leckagelänge f_L^{*}. Diese Parameter werden aus den Messdaten ermittelt. Der genaue Rechnungsgang zur Ermittlung der Einzelwerte der laminaren effektiven Leckagelänge f_L^{*} ist einschliesslich Fehlerrechnung im Anhang I.1 enthalten.

3.2 Konzept der Auswertung

Die Auswertung der Messdaten der Leckagemessungen verfolgt drei Ziele:

1. Plausibilisierung und Filterung der Messdaten
2. Auswahl eines der beiden zur Verfügung stehenden Modelle aus Kap. 3.1
3. Definition von Richtwerten für die Abnahme und die Dimensionierung

Die Auswertung erfolgt für beide Modelle zuerst parallel und in mehreren Stufen: pro Messstrecke, pro Tunnel und pro Tunneltyp.

Der Einfachheit halber wird in der weiteren Betrachtung die effektive Leckagefläche als Leckagefläche und die effektive Leckagelänge als Leckagelänge bezeichnet.

3.3 Plausibilitätsprüfung und Filterung

Der erste Schritt in der Auswertung ist die Plausibilitätsprüfung der tunnelspezifischen Messdaten aus der Messkampagne in zwei Etappen. In der ersten Etappe werden die Rohdaten je Messung und entlang aller Messstellen nach folgenden Kriterien untersucht:

- Differenzdruck in Funktion vom Weg
- Massen- bzw. Volumenstrom in Funktion vom Weg
- Differenzdruck in Funktion vom Volumenstrom

Der Weg ist stets von den offenen Klappen zu den Ventilatoren definiert. Somit wird erwartet, dass Differenzdruck und Volumenstrom entlang der Strecke ständig ansteigen. Ferner sind für jede Messung die Anzahl offener Klappen und die Betriebsstufe des Ventilators bekannt. Somit kann der Druck- und Volumenstromverlauf der Messungen gegeneinander geprüft werden. Sind die Messungen nicht plausibel, werden sie in einem ersten Schritt der Prüfstelle zur Nachprüfung und allenfalls zur Korrektur retourniert. Können keine Unstimmigkeiten gefunden werden, wird die Messung aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

3.3.1 Plausibilitätsprüfung 1. Etappe

Abbildung 13 zeigt ein Beispiel der Plausibilitätsprüfung der ersten Etappe. Der Volumenstrom und Druck steigen wie erwartet an. Bei der Prüfung der Verläufe fällt aber auf, dass der Druckverlauf der Messung 5 nicht plausibel ist: Die Messung 5 wurde mit der gleichen Ventilatorstufe gefahren wie die Messung 2, aber es sind 3 statt 4 Klappen im Abluftkanal offen. Folglich sollte der Druckverlauf höher sein als bei Messung 2 (erfüllt) und der Volumenstrom niedriger als bei Messung 2 (nicht erfüllt). Eine Erklärung für dieses Verhalten ist nicht vorhanden. Daher wird die Messung 5 verworfen.

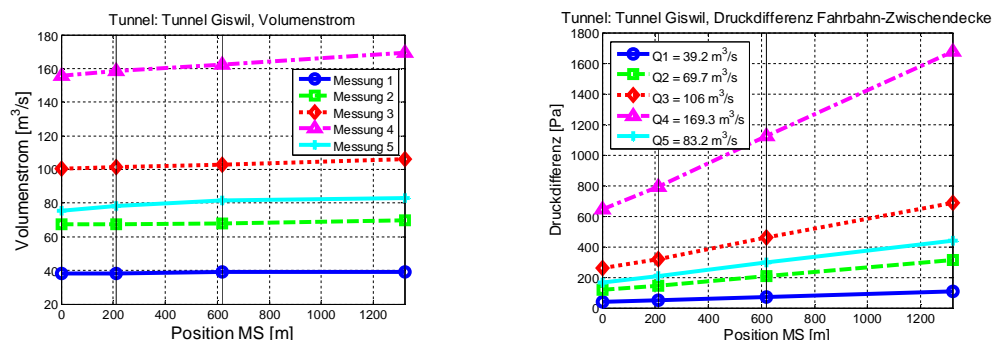


Abbildung 13: Plausibilitätsprüfung der ersten Etappe am Beispiel des Tunnels Giswil.

Danach folgt die zweite Etappe der Plausibilitätsprüfung mit folgenden bearbeiteten Daten (vgl. Anhang I.1):

- spezifische Leckage in Funktion des Wegs
- spezifische Leckage in Funktion der mittleren Druckdifferenz
- Leckagefläche in Funktion des Wegs
- Leckagelänge in Funktion des Wegs

Die spezifische Leckage muss modellbedingt stets positiv sein. Sowohl das quadratische wie das lineare Modell beruhen auf der Annahme, dass keine (mechanische) Wechselwirkung zwischen der Leckageluft und dem Kanal stattfindet. Da die Messstrecken unterschiedlich beschaffen sein können, sollten die Leckagewerte beider Modelle auf Grund der oben erwähnten Annahme zumindest auf einer Messstrecke wenig streuen. Treffen diese Kriterien – positive spezifische Leckage und streckenweise geringe Streuung der Leckagegrößen – nicht ein, wird zuerst nach einer physikalischen Erklärung gesucht (z.B. offenes Mannloch, unterschiedliche Qualität der Zwischendecke, ...). Wird eine Erklärung gefunden oder erbringen die oben dargelegten Massnahmen (Rücksprache mit der Prüfstelle) keine Besserung, wird die Messstrecke für diese Messung aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Dies betrifft vor allem stark streuende Messstrecken. Schliesslich wird anhand der spezifischen Leckage gegen den Druck geprüft, ob ein Trend in den Daten erkennbar ist, der dem einen oder anderen Modell aus Kap. 3.1 entspricht.

3.3.2 Plausibilitätsprüfung 2. Etappe

Abbildung 14 zeigt ein Beispiel der Plausibilitätsprüfung der zweiten Etappe. Dargestellt sind die spezifische Leckage und Leckagefläche in Funktion der Messstrecke vor der Filterung. Die Messung 5 zeigt einen gänzlich anderen Trend als die anderen Messungen und reist aus. Dies bestätigt die Beobachtung in Abbildung 13. Auf der Messstrecke 2 gibt es bei Messung 1 negative Leckageraten. Zudem kommt bei Messstelle 1 ein anderes Konzentrationsmessgerät zum Einsatz. Die Messung 5 und die Messstrecke 1 werden aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

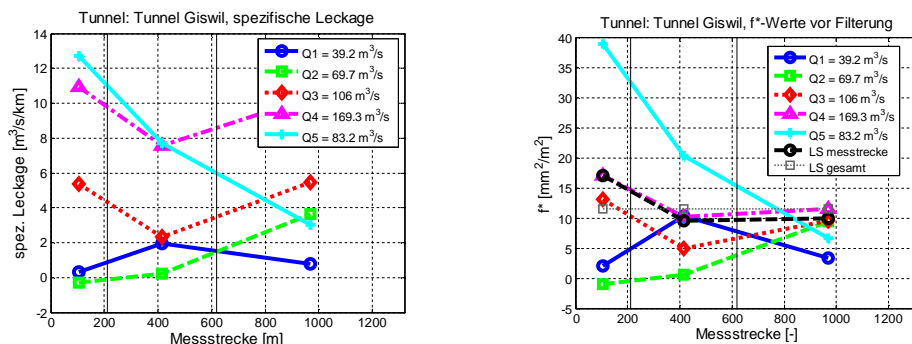


Abbildung 14: Plausibilitätsprüfung der zweiten Etappe am Beispiel des Tunnels Giswil. Dargestellt sind von links nach rechts: spezifische Leckagefläche gegen Messstrecke und Leckagefläche gegen Messstrecke.

Diese Auswertung ergibt einen gefilterten Datensatz, der zur weiteren Auswertung herangezogen wird. Welche Daten aus der Auswertung ausgeschlossen wurden, ist im Anhang II dokumentiert.

3.4 Tunnelspezifische Auswertung

Der zweite Schritt in der Auswertung ist eine tunnelspezifische Betrachtung. Dabei werden die gefilterten Messdaten tunnelspezifisch nach den gleichen Kriterien wie in Kap. 3.3 (zweite Etappe) ausgewertet.

Diese Abbildungen sind aus Platzgründen nur als Beispiele in den vorliegenden Bericht aufgenommen worden (vgl. Abbildung 17). Eine Zusammenfassung dieser Auswertung ist in Abbildung 15 und Abbildung 16 für beide Modelle für alle Tunnel dargestellt.

In Abbildung 17 sind für die Tunnel San Bernardino, Stägjitschuggen und Islisberg – Röhre Zürich die Leckagefläche, die Leckagelänge in Funktion der Messstrecke und die spezifische Leckage in Funktion der Druckdifferenz dargestellt. Diese Plots veranschaulichen, wie unterschiedlich die Messergebnisse von Tunnel zu Tunnel ausfallen können: Während die Messungen der Tunnel San Bernardino und Islisberg klare erkennbare Trends zeigen, verlaufen Messwerte des Tunnels Stägjitschuggen chaotisch. Die Plots der spezifischen Leckagen enthalten zudem noch einen Versuch von Kurvenanpassung, jeweils mit den quadratischen und linearen Ansätzen gemäss Kap. 3.1: Während der Tunnel San Bernardino einen klaren quadratischen Trend und der Tunnel Islisberg einen klaren linearen Trend zeigen, ist im Tunnel Stägjitschuggen keine klare Aussage möglich. Dieser fehlende Trend ist auch die Regel in den vorliegenden Daten. San Bernardino und Islisberg bilden hier die Ausnahme.

In Abbildung 15 und Abbildung 16 sind für jeden Tunnel die Leckagefläche und die Leckagelänge jeder Messstrecke und Messung sowie ein Referenzwert dargestellt. Der Referenzwert wird als streckengemittelter Mittelwert errechnet. Die Reihenfolge der Tunnel ist chronologisch.

Aus den vorhandenen Leckageflächen wird pro Tunnel eine mittlere Leckagefläche mit zugehöriger Standardabweichung bestimmt. Diese Werte sind in Tabelle 4 tabellarisch dargestellt.

Tunnel	Effektive Leckagefläche [mm ² /m ²]		Stichproben-grösse	Tunneltyp	Tunnel	Effektive Leckagefläche [mm ² /m ²]		Stichproben-grösse	Tunneltyp
	\bar{f}_T^*	SDT				\bar{f}_T^*	SDT		
Flimsenstein – Ost	9.1	3.8	6	A	Stägjitschuggen	19.4	8.0	18	A
Flimsenstein – West	7.5	0.4	3	A	Uetliberg – Basel, Ost-Ast	11.7	4.9	14	A
San Bernardino - Süd	39.5	12.6	8	B	Uetliberg – Chur, Ost-Ast	13.6	5.9	17	A
San Bernardino - Mitte	28.9	5.9	10	B	Kirchenwald – Nord	12.9	2.8	9	A
Giswil	7.7	4.8	8	A	Aescher – Basel, 2. Mess.	15.1	6.1	4	A
Raimeux – Süd	21.7	5.1	8	A	Aescher – Chur, 2. Mess.	21.1	6.0	4	A
Raimeux – Nord	11.5	1.3	4	A	Islisberg – Luzern	5.2	1.5	8	A
Leissigen – West	27.6	14.3	10	B	Islisberg – Zürich	7.2	2.4	12	A
Leissigen – Ost	27.0	1.9	4	B	Typ A	11.5	7.0	127	A
Aescher - Basel	9.5	4.9	6	A	Typ B	31.5	14.9	32	B
Aescher - Chur	12.4	4.2	6	A					

Tabelle 4: Effektive Leckageflächen mit Standardabweichungen und Stichproben-grösse (chronologische Reihenfolge, quadratischer Ansatz)

Aus dieser Betrachtung der Daten lässt sich folgendes Fazit ziehen:

- Die Leckagefläche für Tunnel vom Typ A liegt zwischen 5 und 25 [mm²/m²].
- Die Leckagefläche für Tunnel vom Typ B liegt zwischen 25 und 40 [mm²/m²].

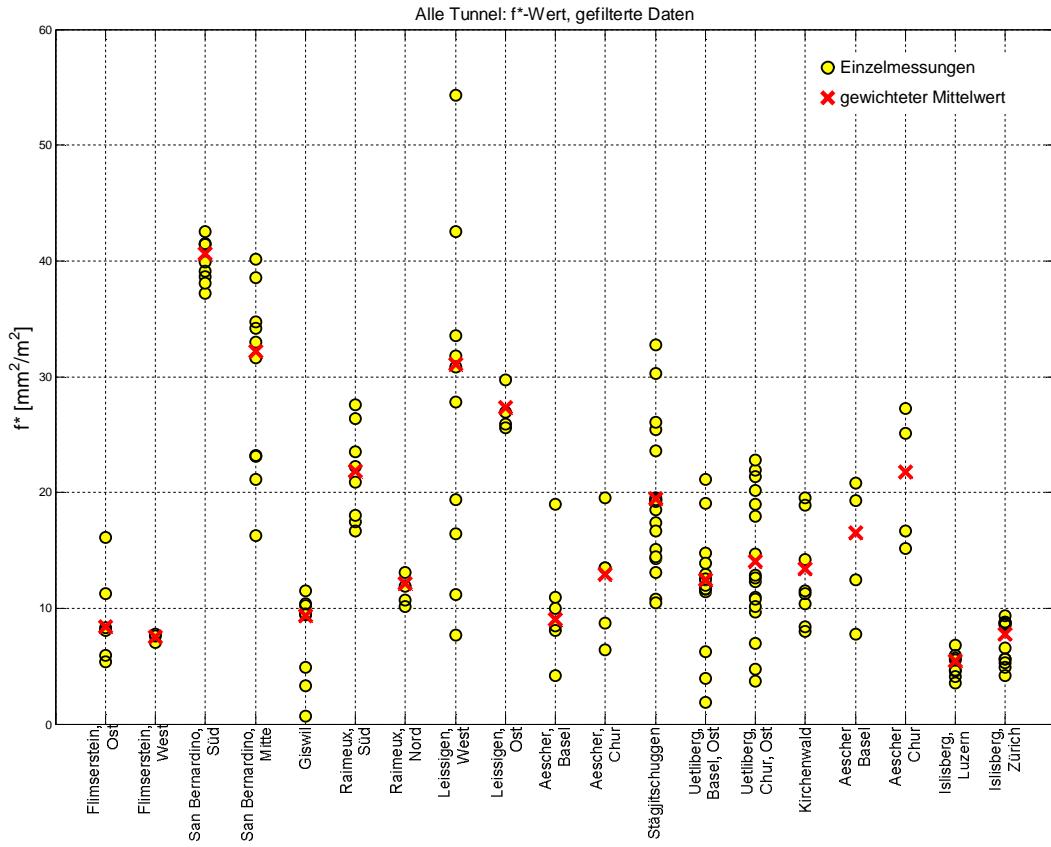


Abbildung 15: Tunnelspezifische Auswertung der Leckagefläche für alle Tunnel

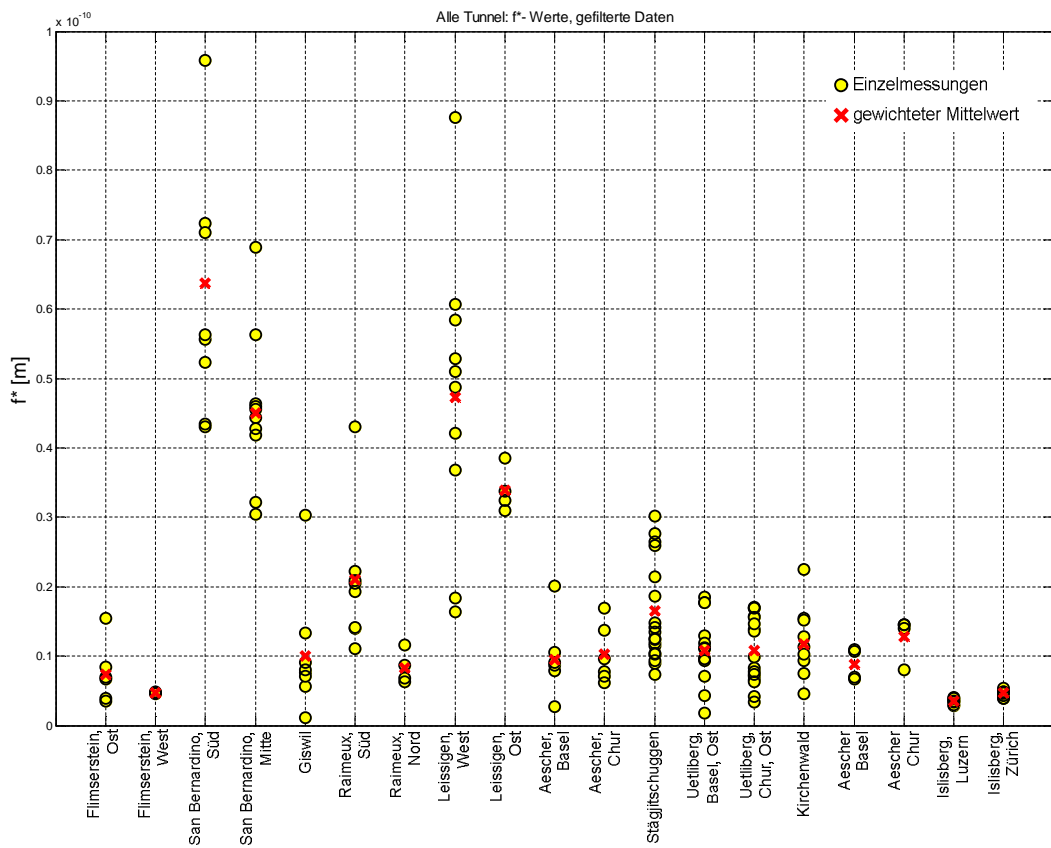


Abbildung 16: Tunnelspezifische Auswertung der Leckagelänge für alle Tunnel

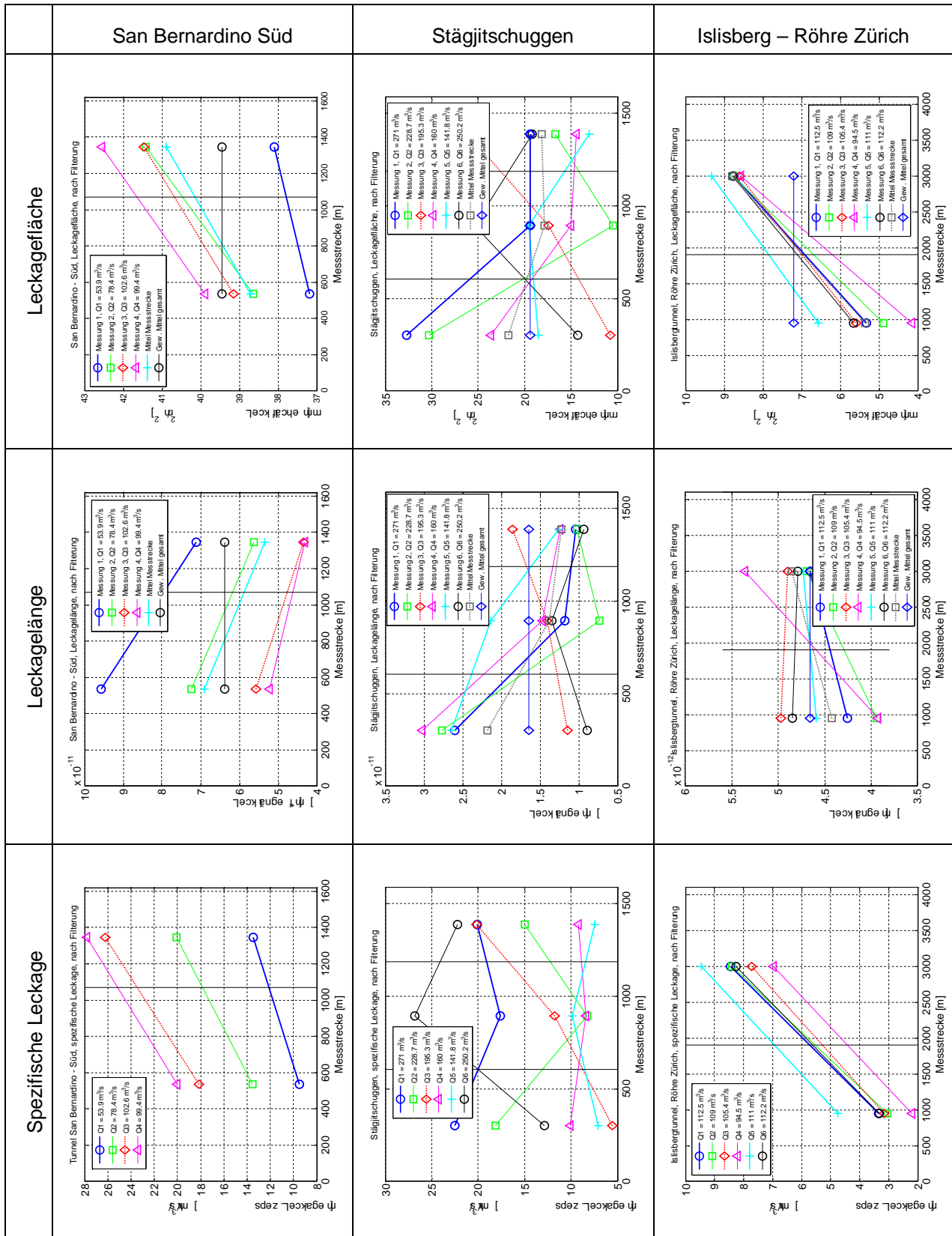


Abbildung 17: Tunnelspezifische Auswertung der Leckage

Insgesamt können aus der tunnelspezifischen Auswertung folgende Beobachtungen gemacht werden:

- Normalerweise steigt die spezifische Leckage mit steigendem Unterdruck an. In wenigen Fällen wurde auch das Gegenteil beobachtet (z.B. Tunnel Stägjitschuggen).
- Bei den meisten Tunneln streuen die Leckageflächen und -längen relativ stark. Die Streuung ist zum Teil auch bei vergleichbarem Unterdruck und/oder auf gleicher Messstrecke vorhanden. Dies betrifft insbesondere die Tunnel Aescher Röhre Basel und Chur (1. Messung), Flimserstein Ost, Giswil, Leissigen West, Stägjitschuggen und Aescher Röhre Basel und Chur (2. Messung).
- Bei wenigen Tunneln ist eine klare Abstufung der Leckagefläche zwischen den Messstrecken zu beobachten. Dies betrifft die Tunnel Islisberg Röhre ZH und LU, Kirchenwald und San Bernardino Süd und Mitte.
- Tendenziell streuen die Leckagefläche und -länge stärker bei kürzeren Messstrecken und kleineren Differenzdrücken.
- Bei den Leckagemessungen im toten Ast streuen die Leckagefläche und -länge sehr wenig. Dies betrifft die Tunnel Flimserstein West, Leissigen Ost, Raimeux Nord.
- Bei den Leckagemessungen in Tunneln mit totem Ast liegen die Leckagefläche und -länge des toten Asts stets tiefer als die für den aktiven Ast ermittelten, trotz grundsätzlich gleicher Kanalqualität.
- Bei einigen Tunneln steigt die Leckage ungefähr proportional zu $\Delta p^{0.5}$ (turbulent) an, bei anderen proportional zu Δp (laminar), und bei weiteren ist kein funktionaler Zusammenhang zu erkennen. Eine Bewertung der beiden Ansätze ist anhand der tunnelspezifischen Auswertung nicht möglich.

Diese Beobachtungen sind im Wesentlichen durch folgende 3 Aspekte erklärbar:

- **Messunsicherheit / Fehlerwachstum:** Die Messunsicherheit der Volumstrommessung wirkt sich bei der Bestimmung der Leckagemenge sehr stark aus (vgl. Kap. 3.7) und führt dazu, dass die Unsicherheit rasch die Grössenordnung der Leckage erreicht.
- **Unterschiedliche Qualität der Zwischendecke:** Die Unterschiede zwischen den Messstrecken lassen sich teilweise durch die unterschiedliche Qualität der Zwischendecke erklären. Dies ist im Tunnel San Bernardino nachweisbar. Die Zwischendeckenqualität kann aber nicht alle Abweichungen erklären.
- **Materialdeformationen:** Die verwendeten Modelle berücksichtigen keine Wechselwirkung der Tunnelstruktur mit der Strömung. Die Beobachtungen in situ weisen dennoch darauf hin, dass diese eine wichtigere Rolle einnehmen könnten.

3.5 Globale Auswertung

Der dritte Schritt in der Auswertung ist eine globale Betrachtung. Ziel dabei ist, für den Anwender brauchbare und in einem Vertrauensintervall begrenzte Werte für die Quantifizierung der Leckage bereitzustellen. Damit verbunden ist die Auswahl des geeigneten Ansatzes. Um dies zu erreichen, wird die globale Auswertung parallel für den quadratischen und den linearen Ansatz durchgeführt.

3.5.1 Darstellung der Einzelwerte

Abbildung 18 zeigt eine gesamthafte Betrachtung der spezifischen Leckage in Funktion vom Unterdruck im Abluftkanal. Zwei Punkte fallen auf:

1. Die spezifischen Leckagewerte der Tunnel vom Typ A und B bilden zwei klar getrennte Gruppen. Diese Tatsache bestätigt die vorgeschlagene Einteilung der Tunnel in die entsprechenden zwei Klassen.
2. Die spezifischen Leckagewerte je Tunneltyp streuen sehr stark. Diese Tatsache bestätigt die Beobachtungen aus Kap. 3.4.

Diese wie auch die Abbildungen aus dem Kap. 3.4 zeigen eindeutig, dass anhand von einzelnen Messungen weder ein Richtwert noch eine repräsentative Angabe über die Dichtigkeit des Abluftkanals abgeleitet werden kann.

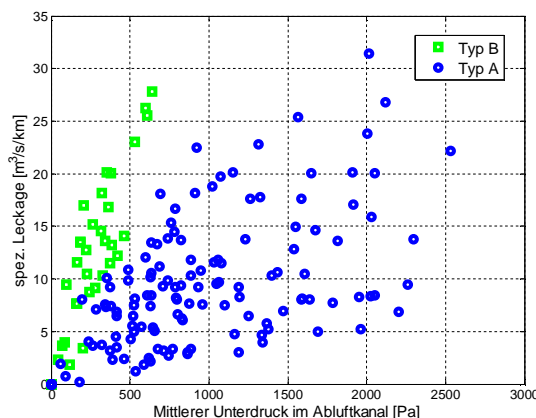


Abbildung 18: Spezifische Leckage in Funktion der Druckdifferenz je Messstrecke für alle Tunnel der Typen A und B

3.5.2 Darstellung der Mittelwerte

Gemäss dem Ansatz aus Kap. 3.1.1 ist die Leckagefläche ein konstanter, druckunabhängiger Parameter, der nur durch die Beschaffenheit des Abluftkanals festgelegt wird. Falls dieser Ansatz stimmt, sollte sich dies im Mittelwert der Daten zeigen. Um diese Annahme zu verifizieren, werden die Daten je Tunneltyp A und B als Gesamtheit betrachtet. Dabei weist der Typ A 127 und der Typ B 32 Datenpunkte auf. Die Daten je Typ werden in Druckklassen von 200 Pa Breite und in Schritte von 100 Pa vom kleinsten zum grössten gemessenen Druck aufgeteilt und klassenweise streckengemittelt. Somit überlappt sich jede Druckklasse mit der vorhergehenden und der folgenden. Die vorhandenen Differenzdrücke liegen zwischen 0 Pa und 2500 Pa. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Abbildung 19 für die spezifische Leckage, die Leckagefläche und die effektive Leckagelänge dargestellt. Die spezifische Leckage betreffend fallen folgende Punkte auf:

1. Die spezifische Leckage zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Druckdifferenz bei beiden Tunneltypen.
2. Bei Tunneltyp A nimmt die Zunahme der spezifischen Leckage mit steigendem Druck ab. Diese Beobachtung deckt sich mit dem quadratischen Ansatz aus Kap. 3.1.1, der eine Wurzelabhängigkeit vom Differenzdruck vorhersagt.
3. Bei Tunneltyp B ist die Zunahme der spezifischen Leckage mit steigendem Unterdruck relativ konstant. Diese Beobachtung deckt sich mit dem linearen Ansatz aus Kap. 3.1.1, der eine lineare Abhängigkeit vom Differenzdruck vorhersagt.
4. Bei Tunneltyp A nimmt die Streuung mit steigendem Druck zu. Diese Beobachtung geht einher mit der Verkleinerung der Stichprobengrösse ab der 1600 Pa-Klasse (Ausnahme bei 2000 Pa).

Die Leckagefläche der Tunnel des Typs A verhält sich sehr konstant über die Druckklassen: Die Werte liegen, einige Ausreisser ausgenommen, zwischen $10 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ und $15 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ über den ganzen Messbereich. Bei Tunneln vom Typ B ist diese Druckunabhängigkeit nicht gegeben. Die Leckagefläche wächst mit der Druckdifferenz an, wenn auch deutlich weniger stark als die spezifische Leckage.

Der Verlauf der Leckagelänge zeigt ein anderes Bild. Die Druckunabhängigkeit ist deutlich weniger ausgeprägt als bei der Leckagefläche. Bei beiden Tunneltypen sinkt die Leckagelänge tendenziell von niedrigen zu hohen Druckklassen ab. Beim Typ A nimmt die Druckabhängigkeit mit steigendem Druck jedoch ab. Allgemein ist die Streuung über die Druckklassen auffällig klein.

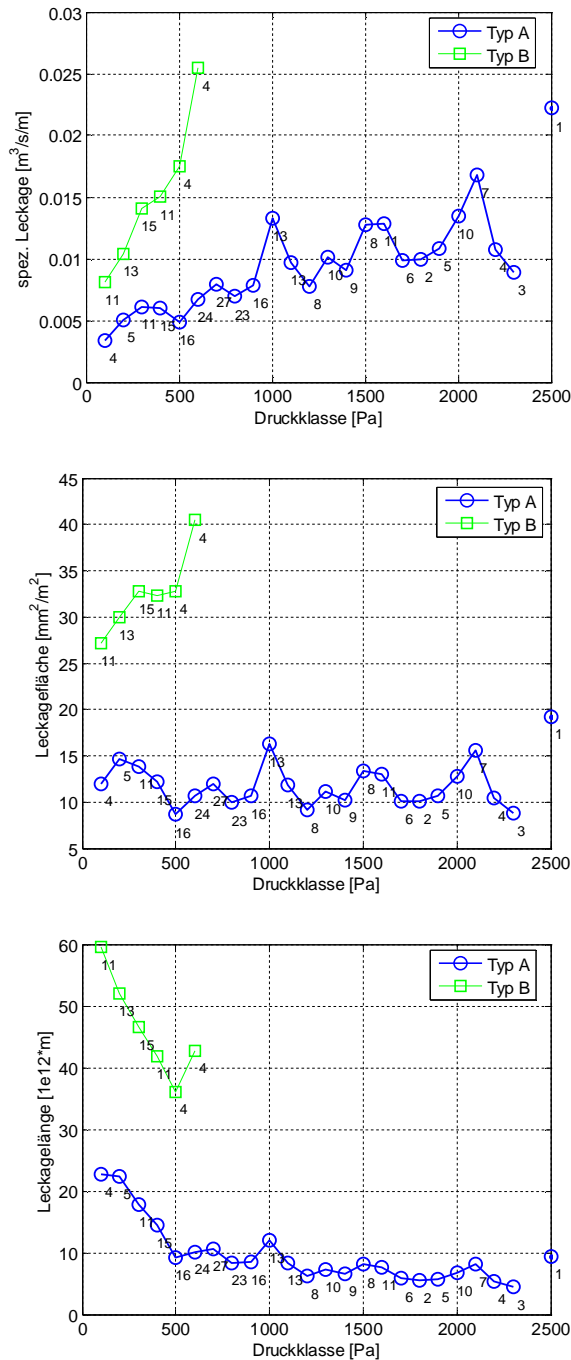


Abbildung 19: Spezifische Leckage, Leckagefläche und Leckagelänge gegen die mittlere Druckdifferenz je Messstrecke für alle Tunnel. Die Zahlen unter den Graphen sind die Anzahl Datenpunkte pro Klasse und Tunneltyp.

Ein Histogramm der Leckagefläche und Leckagelänge ist in Abbildung 20 dargestellt. Darin ist ersichtlich, dass die Leckagefläche für Tunnel vom Typ A stärker gebündelt ist als diejenige des Typs B. Es wird im Folgenden angenommen, dass die Daten normal verteilt sind. Dies trifft zumindest für das Histogramm der Tunnel vom Typ A ungefähr zu.

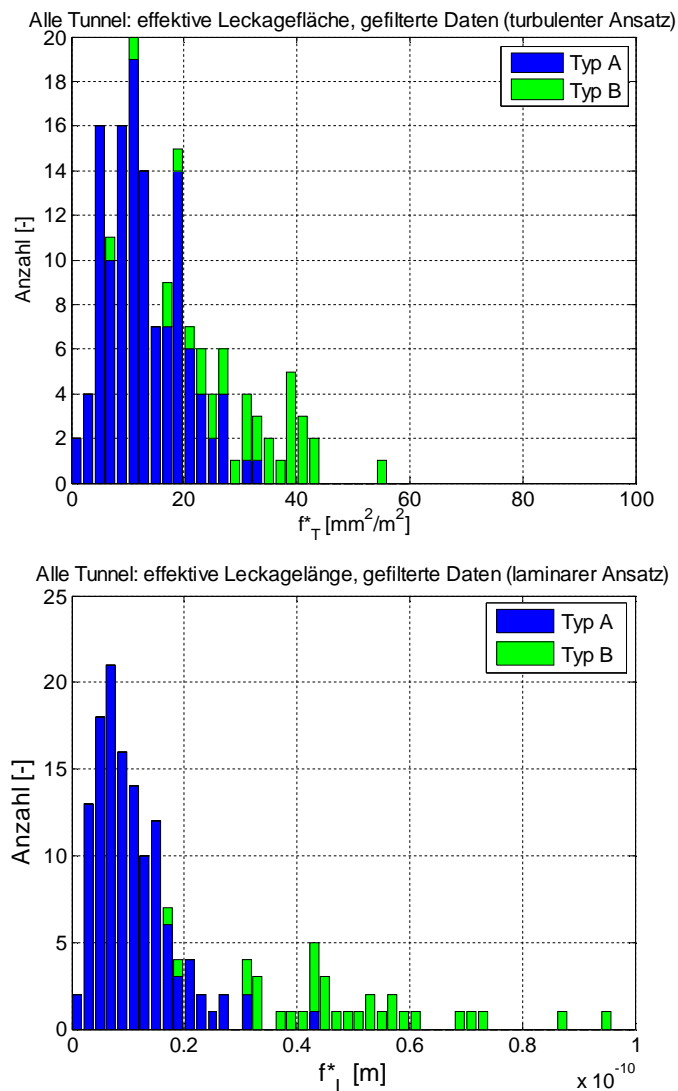


Abbildung 20: Histogramm der effektiven Leckageflächen und Leckagelängen der Tunnel der Typen A und B. Die Breite der Klassen beträgt $2 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ bzw. $0.02 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

3.5.3 Beurteilung und Wahl des Ansatzes

Die tunnelspezifische wie auch die globale Auswertung zeigen, dass der perfekte Ansatz weder der quadratische noch der lineare und auch nicht eine Kombination der beiden ist. Eine eindeutige, allgemeingültige Gesetzmässigkeit konnte nicht gefunden werden.

Auch wenn die Physik der Leckageströmung nicht vollständig verstanden wird und sich keine eindeutige Gesetzmässigkeit erkennen lässt, wird am quadratischen Ansatz festgehalten, wohl wissend, dass es sich dabei um einen Kompromiss handelt. Diese Entscheidung beruht auf folgenden Argumenten:

- Die Druckunabhängigkeit des quadratischen Ansatzes ist für beide Tunneltypen deutlich besser als beim linearen Ansatz, insbesondere bei typischen Unterdrücken im Abluftkanal von $< 2500 \text{ Pa}$.
- Der quadratische Ansatz ist praxiserprobt und in verschiedenen Regelwerken bereits in ähnlicher Art beschrieben.

- Die Kenngrösse beim quadratischen Ansatz ist eine verständliche und in der Praxis einfach zu verwendende dimensionslose Grösse. Der lineare Ansatz basiert hingegen auf einer dimensionsbehafteten und schwierig zu verstehenden Kenngrösse.

Trotz den erwähnten Unsicherheiten darf davon ausgegangen werden, dass der quadratische Ansatz für die Quantifizierung der Leckagen bei gängigen Tunneln gut geeignet ist und ausreichend genaue Ergebnisse liefert. In Ausnahmefällen, wie z.B. bei sehr grossen Unterdrücken im Abluftkanal, kann es sinnvoll sein, auf den linearen oder einen kombinierten Ansatz umzuschwenken.

3.6 Quantifizieren der Leckagefläche f^*

Der gewählte quadratische Ansatz beschreibt die physikalischen Zusammenhänge der Leckage. Das bestimmende Mass für die Dichtheit des Kanals ist dabei die Leckagefläche f^* . Anhand der vorgängig durchgeführten Auswertung kann die Leckagefläche quantifiziert werden. Tabelle 5 zeigt die statistische Auswertung der Messresultate für die beiden Tunneltypen.

Tunneltyp	Stichprobengrösse	Mittelwert \bar{f}_T^*	STD σ
A	127	11.5	7.0
B	32	31.5	14.9

Tabelle 5: Stichprobengrösse Mittelwert und Standardabweichung STD der Leckagefläche.

3.6.1 Richtwerte für Tunnel vom Typ A

Tunnel von diesem Typ wurden nach der gleichen Richtlinie [1] erstellt und weisen ähnliche Bauweise und Ausrüstung auf. Dies und die ähnlichen Ergebnisse der Auswertung legen den Schritt zur Verallgemeinerung der Messergebnisse auf weitere Tunnel des Typs A nahe.

Die Leckagefläche bei diesem Tunneltyp liegt im Mittel bei $11.5 \text{ mm}^2/\text{m}^2$. Dieser Wert kann heute mit vertretbarem Aufwand erreicht werden. Entsprechend liegt es nahe, eine Dichtheit (resp. eine Leckagefläche) in dieser Grössenordnung zu fordern (vgl. dazu Kap. 8.1.1). Tunnelspezifische Gegebenheiten sind dabei zu berücksichtigen. Bei unkritischen Kanalgeometrien (kurzer und grosser Abluftkanal) ist z.B. eine geringere Dichtheit durchaus vertretbar und durch die Kosteneinsparungen seitens der Abdichtung auch sinnvoll.

Der Dimensionierungswert für die Auslegung soll eine mögliche Zunahme der Leckage wegen Alterung und eine zusätzliche Reserve berücksichtigen. Eine Leckagefläche f^* zwischen 12 bis $16 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ wird als sinnvoll erachtet (vgl. dazu Kap. 8.1.2). In jedem Fall muss der Dimensionierungswert mit den vorgängig beschriebenen Abnahmewerten korrespondieren.

3.6.2 Richtwerte für Tunnel vom Typ B

Bei Tunneln von diesem Typ entspricht das Lüftungssystem entweder 1) nicht dem ursprünglichen oder 2) nicht mehr den heutigen Anforderungen. Der Tunnel San Bernardino z.B. wurde von einer verteilten Absaugung auf eine konzentrierte Absaugung umgerüstet (Fall 1). Der Tunnel Leissigen hingegen wurde direkt mit einer konzentrierten Absaugung ausgerüstet, die aber nicht mehr der aktuellen Richtlinie entspricht (Fall 2).

Die Angabe eines Richtwertes für diese Tunneltypen ist deutlich schwierig und mit grösseren Unsicherheiten verbunden als beim Typ A. Die Gründe sind folgende:

- Die Art und Weise, wie die Abdichtung bei der Sanierung ausgeführt wurde, hat einen entscheidenden Einfluss auf die Leckage. Nachweislich ist die Abdichtung bei den gemessenen Tunneln inhomogen und allgemein schlecht.
- Der Umfang der Messreihe ist für diesen Tunneltyp gering.

Für Tunnel mit einer schlechten Abdichtung⁷ kann als Dimensionierungswert von einer Leckagefläche von 30 bis 35 mm²/m² ausgegangen werden. Diese Tunnel werden in der Folge im Bericht als Typ B2 bezeichnet.

Für Tunnel mit einer guten Abdichtung⁸ darf von einer deutlich geringeren Leckage ausgegangen werden. Die Messreihe umfasste keinen Tunnel dieses Typs. Aus qualitativen Überlegungen resultiert aber ein Dimensionierungswert für die Leckagefläche von 20 mm²/m² bis 30 mm²/m². Diese Tunnel werden in der Folge im Bericht als Typ B1 bezeichnet.

Weil es sich bei den Tunneln vom Typ B1 und B2 um bestehende Anlagen handelt, ist das Definieren von Abnahmewerten für diese Tunneltypen nicht in jedem Fall möglich und sinnvoll.

Der Umfang der Messreihe für Tunnel vom Typ B ist relativ gering. Mit weiteren Messdaten könnten die Zuverlässigkeit und die Präzision dieser Richtwerte erhöht werden.

3.7 Messunsicherheit / Fehlerfortpflanzung

Im Kap. 3.4 wurde die Messunsicherheit als Hauptgrund für die zum Teil grosse Streuung der Messresultate genannt. Ziel dieses Kapitels ist, diese Problematik etwas zu beleuchten.

Die Leckage liegt der Differenz des Volumenstroms am Ein- und Austritt der Messstrecke zugrunde. Der Fehler auf den Messdaten pflanzt sich in der Auswertung fort und wächst in ungünstigen Fällen stark an. Gemäss der Fehlerrechnung in Anhang I.1.2 und I.1.4 nimmt der maximale relative Fehler ungefähr proportional zum Messfehler auf dem Volumenstrom und umgekehrt proportional zur Leckagemenge zu ($\delta(\Delta Q)/\Delta Q \sim 2 \cdot \delta Q / \Delta Q$). Die Messfehler der Dichte- und Differenzdruckmessung haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Leckagebestimmung.

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen als Beispiele, wie sich die Messunsicherheit auf die Bestimmung der Leckage auswirken kann.

Beim Tunnel Stägjitschuggen ist die Situation hinsichtlich der Fehlerfortpflanzung sehr ungünstig, weil die Abluftmenge verhältnismässig gross und die Leckage wegen der kurzen Messstrecke klein ist. Die errechnete Leckage ist in diesem Fall deutlich kleiner ($\Delta Q = 9 \text{ m}^3/\text{s}$) als die Messunsicherheit ($\delta(\Delta Q) = \pm 13 \text{ m}^3/\text{s}$). Diese Erkenntnis deckt sich gut mit der grossen Streuung der Leckagewerte (vgl. Abbildung 21 rechts).

Beim Tunnel Islisberg hingegen zeigt sich eine ganz andere, günstigere Situation. Weil die Luftmenge klein und die Leckage wegen der langen Messstrecke gross ist, spielt die Messunsicherheit nur eine untergeordnete Rolle, und die Leckage ist in diesem Fall deutlich grösser als die Messunsicherheit. Wiederum deckt sich dies mit der geringen Streuung der Leckagewerte (vgl. Abbildung 22 rechts).

⁷ Tunnel, die ohne besondere Rücksicht auf die Leckagen gebaut resp. umgebaut wurden und bei welchen die undichten Stellen von blossen Auge erkennbar sind.

⁸ Tunnel, bei denen die üblichen Abdichtungsmassnahmen getroffen wurden und bei welchen keine undichten Stellen von blossen Auge erkennbar sind.

Bei einem toten Ast⁹ wird die Leckage mit einer Messung direkt erfasst. Die Berechnungen der spezifischen Leckage und der Leckagefläche beruhen dann nicht mehr auf einer Differenz. Die Diskussion um die Problematik der Fehlerfortpflanzung ist für diesen Fall nicht mehr gültig. Das erklärt auch die ausnahmslos schwache Streuung der Leckagen dieser Äste (vgl. Abbildung 15, Flims West, Raimeux Nord und Leissigen Ost). Hinweis nächstes Kapitel -> Messaufbau

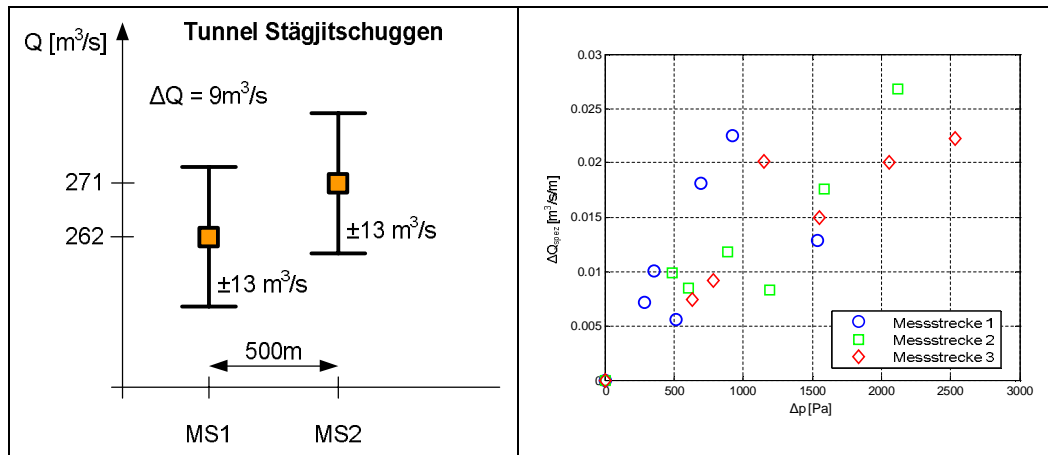


Abbildung 21: Tunnel Stägjitschuggen: ungünstige Situation hinsichtlich Fehlerfortpflanzung

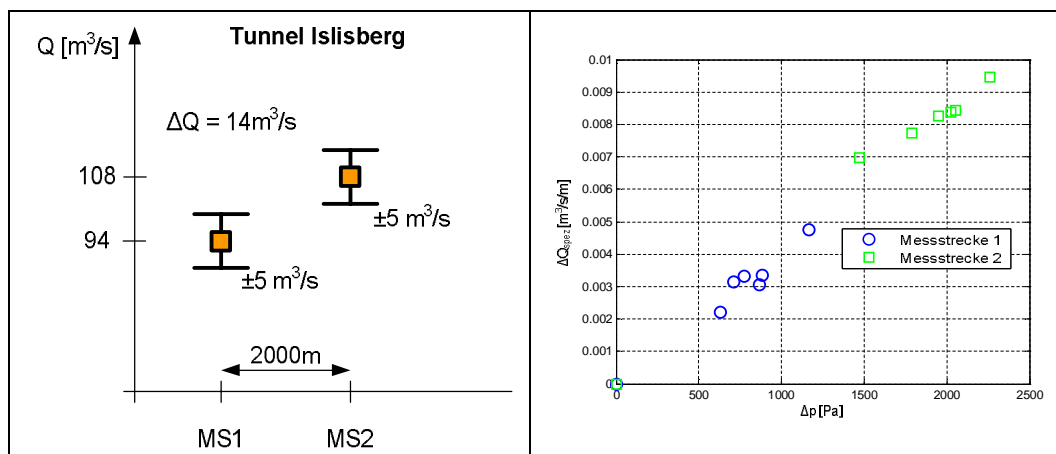


Abbildung 22: Tunnel Islisberg: günstige Situation hinsichtlich Fehlerfortpflanzung

Die geführte Diskussion zeigt deutlich, dass es von grosser Wichtigkeit ist, die Messunsicherheit bei der Durchführung und Auswertung von Leckagemessungen zu berücksichtigen.

Bei der Durchführung lässt sich die Messunsicherheit durch ein geschicktes Messkonzept reduzieren (vgl. dazu auch Kap. 3.8). Bei der Auswertung geht es primär darum, die Aspekte der Fehlerfortpflanzung einzubeziehen, d.h. die Fehlergrenzen zu bestimmen und die Resultate der Leckagemessung unter diesem Aspekt zu beurteilen.

⁹ Ein Kanalabschnitt, bei dem keine Klappen geöffnet sind, z.B. bei Kanälen mit einer Zentrale in der Mitte (T-Anordnung). Beim Absaugen aus dem aktiven Ast entstehen im toten Ast Leckagen.

Zur Messdurchführung können folgende Empfehlungen formuliert werden:

- **Genauigkeit der Messmethode:** Die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messmethode ist für die Qualität der Leckagebestimmung entscheidend. Die Messunsicherheiten (95% Vertrauensintervall) sollten 5% nicht übersteigen. Dieser Wert ist bei korrekter Durchführung mit gängigen Messmethoden (z.B. Tracergas-, Netzmessung) erreichbar.
- **Länge der Messstrecke:** Zur Reduktion der Messunsicherheit sind die einzelnen Messstrecken so lang wie möglich zu wählen. Je kleiner die erwarteten Leckagen, desto länger die Messstrecken. Die unterste Grenze liegt etwa bei 1000 m (Ziel: $\delta(\Delta Q) < \Delta Q$). Je länger die Messstrecke desto genauer und repräsentativer (bezogen auf den gesamten Abluftkanal) sind die Resultate. Andererseits ist bei langen Messstrecken die örtliche Zuordnung der Leckage kaum mehr möglich.
- **Verhältnis $Q/\Delta p$:** Je kleiner das Verhältnis Abluftvolumenstrom zum Unterdruck ($Q/\Delta p$), desto genauer die Messung. Dieses Verhältnis kann beeinflusst werden, wenn die Anzahl der geöffneten Abluftklappen reduziert wird (bei gleichbleibendem oder höherem Unterdruck im Kanal).

3.8 Durchführung von Leckagemessungen mit erhöhter Genauigkeit

Aus der Erkenntnis der im vorgängigen Kapitel geführten Diskussion lassen sich Varianten für die Leckagemessung ableiten, die eine erhöhte Messgenauigkeit versprechen. Im Vordergrund stehen drei Varianten, die in der Folge kurz beschrieben werden und als Anregung für zukünftige Messungen dienen können. Der Ansatz ist bei allen drei Varianten der gleiche. Die Messstrecke wird so gewählt, dass mit einem Messquerschnitt direkt die Leckagemenge gemessen werden kann und so auf die problematische Differenzbildung verzichtet werden kann.

In den Skizzen ist die Tracergasmethode dargestellt. Die Ansätze gelten aber gleichermaßen für geschwindigkeitsbasierte Methoden, wie z.B. die Netzmessung.

Variante 1) Messung bei komplett geschlossenen Abluftklappen

Die Abluftventilatoren werden bei geschlossenen Abluftklappen in Betrieb genommen (vgl. Abbildung 23). Die Leckage kann über den ganzen oder einen Teil des Abluftkanals bei niedrigen und hohen Unterdrücken bestimmt werden. Der Unterdruck im Abluftkanal ist praktisch konstant. Inwiefern diese Variante im einzelnen Fall praktikabel ist oder nicht und welche Betriebspunkte effektiv angefahren werden können hängen stark von den Leckagen und den installierten Ventilatoren ab. Besonders geeignet ist diese Variante bei Ventilatoren mit Schaufelverstellung.

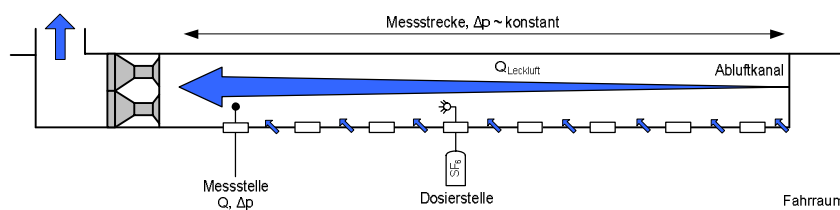


Abbildung 23: Variante 1

Variante 2) Messung im Toten Ast

Im einen Ast sind die Abluftklappen geöffnet, im andern Ast (toter Ast) sind sie geschlossen. Die Abluftventilatoren werden wie vorgesehen (Brandprogramm) betrieben. Die Leckage kann je über die Länge eines Abschnittes bei niedrigen und hohen Unterdrücken bestimmt werden. Der Unterdruck im Toten Ast ist praktisch konstant. Diese Variante ist nur bei entsprechender Anordnung der Lüftungszentrale möglich, in diesem Fall aber der Variante 1 vorzuziehen.

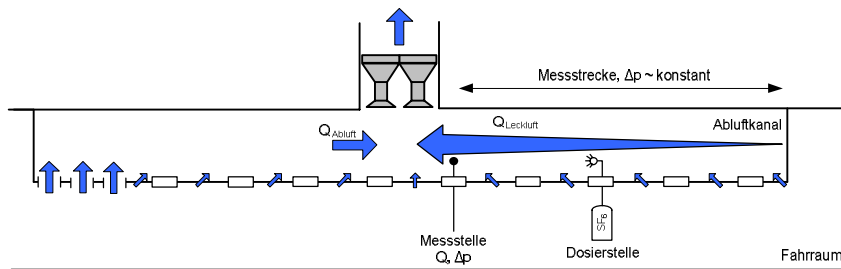


Abbildung 24: Variante 2

Variante 3) Messung mit geöffneten Abluftklappen nahe dem Ventilator

Die ersten 1 – 2 Abluftklappen ab dem Abluftventilator werden geöffnet und der Abluftventilator wie vorgesehen (Brandprogramm) in Betrieb genommen (vgl. Abbildung 25). Die Leckage kann über den Bereich mit geschlossenen Abluftklappen bestimmt werden, jedoch nur bei relativ geringem Unterdruck (bis max. 750 Pa). Im Bereich der geschlossenen Abluftklappen ist der Unterdruck praktisch konstant. Diese Variante ist bei allen Abluftkanal- und Ventilatorarten praktikabel.

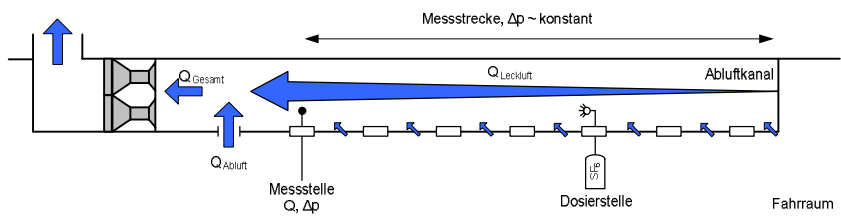


Abbildung 25: Variante 3

4 Methode für die praxisbezogene Anwendung

Eine praxisorientierte Methode für die Dimensionierung der Lüftung unter Berücksichtigung der Leckagen wurde entwickelt. Die Methode orientiert sich an dem in [17] beschriebenen Ansatz und berücksichtigt die Erkenntnis aus den durchgeführten Leckagemessungen. Mit dieser Methode können folgende Grössen für Abluftkanäle ohne Zulufteile¹⁰ direkt und einfach berechnet werden:

- Volumenstromverhältnis (ω) zwischen Kanalansatz und -ende
- statischer Unterdruck am Ende des Abluftkanals (p_1)

Anhand dieser Grössen und dem Druckverlust in der Lüftungszentrale lassen sich die Betriebspunkte und die Leistung des Ventilators einfach abschätzen.

Es wird der quadratische Ansatz verwendet. Die entsprechenden Grundgleichungen sind im Kap. 3.1.1 aufgeführt. Gl. 1 beschreibt die Änderung des statischen Unterdrucks und Gl. 2 die Änderung des Volumenstroms pro Längeneinheit dx . Die beiden Gleichungen sind voneinander abhängig.

Eine explizite Lösung des Differentialgleichungssystems nach den gesuchten Grössen Q_1 und p_1 ist nicht möglich.

Es lässt sich aber eine implizite Lösung finden, die das dimensionslose Mengenverhältnis (ω) zwischen dem Kanalansatz und -ende beschreibt. Für den statischen Unterdruck (p) kann eine explizite Lösung, in Funktion von ω , gefunden werden. Die Herleitung der erwähnten Gleichungen findet sich in [17].

Die implizite Gleichung für das dimensionslose Mengenverhältnis ω ist für die Anwendung in der Praxis wenig geeignet. Dienlicher ist eine graphische Lösung, bei der das Mengenverhältnis ω in Abhängigkeit von Parametern direkt abgelesen werden kann.

In Abbildung 26 und Abbildung 27 sind die Lösungen graphisch als Diagramme für das dimensionslose Mengenverhältnis ω (Gl. 12) mit den dimensionslosen Parametern K (Gl. 13) und \bar{t} (Gl. 15) dargestellt. Gl. 14 beschreibt den dimensionslosen Druck am Kanalansatz.

$$\omega = \frac{Q_0}{Q_1} \quad \text{Gl. 12}$$

$$K = 8 \cdot \lambda \cdot f^{*2} \cdot \left(\frac{L \cdot U}{4 \cdot A_{AK}} \right)^3 \quad \text{oder} \quad K = 8 \cdot \lambda \cdot f^{*2} \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^3 \quad \text{Gl. 13}$$

$$\Pi_0 = \frac{\Delta p_{stat0}}{\rho \cdot u_{AK0}^2} = 1 + \frac{\zeta_{ALK} \cdot A_{AK}^2}{A_{ALK}^2} \quad \text{Gl. 14}$$

$$\bar{t} = 2 \cdot \sqrt{\Pi_0} \left(\frac{f^*}{\lambda} \right)^{1/3} \quad \text{Gl. 15}$$

¹⁰ Zur überschlagsmässigen Berechnung kann die Methode auch für kombinierte Zu- und Abluftkanäle verwendet werden, der wirksame Unterdruck und die f^* -Werte sind aber entsprechend anzupassen, anderenfalls werden die Leckagen unterschätzt.

ω : dimensionsloses Mengenverhältnis [-]	A_{ALK} : Bruttoklappenfläche aller geöffneten Abluftklappen [m ²]
K : Parameter 1 [-]	ζ_{ALK} : Druckverlustbeiwert Abluftklappe [-], vgl. dazu Kap. 5.2
\bar{t} : Parameter 2 [-]	p_{stat} : statischer Unterdruck [Pa]
Π_0 : dimensionsloser Druck	
Q : Volumenstrom	Indizes
λ : Wandreibungsfaktor [-]	0: Kanalansfang
f^* : effektive Leckagefläche [-]	1: Kanalende
L : Länge des Abluftkanals [m]	AK: Abluftkanal
D : hyd. Durchmesser Abluftkanal [m]	ALK: Abluftklappe
U : Umfang Abluftkanal [m]	
A_{AK} : Querschnittsfläche des Abluftkanals [m ²]	

Die Eckwerte für den K-Wert liegen bei 0.001 und 1 (¹¹). In aller Regel liegen die Werte aber im Bereich 0.01 bis 0.1. Die Eckwerte für den \bar{t} -Wert liegen bei 0.1 und 2 (¹²). In aller Regel liegen die Werte aber im Bereich 0.2 bis 0.6.

Bei der Abbildung 26 wurde der typische Parameterbereich für K und \bar{t} berücksichtigt, während bei Abbildung 27 ein erweiterter Parameterbereich (Eckwerte) angesetzt wurde.

Fehlen Angaben über die effektiven Leckagefläche, können diese mithilfe der Tabelle 6 und/oder Abbildung 28 abgeschätzt werden. Bei Tunneln vom Typ B1 und B2 kann es unter Umständen sinnvoll sein, mit einer Messung die effektive Leckagefläche zu ermitteln.

Tunnel Typ	A	B1	B2
Abdichtung	gut	gut	schlecht
f^* [mm ² /m ²]	12 – 16	20 – 30	30 – 35

Tabelle 6: Richtwerte für f^*

Nach der Bestimmung des dimensionslosen Mengenverhältnisses (ω) kann anhand der Gl. 16 der Druckverlust im Abluftkanal resp. der statische Unterdruck (p_{stat1}) am Ende des Abluftkanals berechnet werden.

$$p_{stat1} = \frac{\rho \cdot u_{AK0}^2}{2} \left(\frac{\lambda}{8 \cdot f^*} (\omega^3 - 1) + \Pi_0^{3/2} \right)^{2/3} \quad \text{Gl. 16}$$

Ein Berechnungsbeispiel ist im Anhang II dargestellt.

¹¹ Kleine K-Werte ergeben sich bei Kanälen mit geringen Druckverlusten und geringen Leckagen, grosse K-Werte im umgekehrten Fall.

¹² Kleine \bar{t} -Werte ergeben sich bei Kanälen mit kleinem π_0 , geringen Leckage und grossem λ , grosse \bar{t} -Werte im umgekehrten Fall.

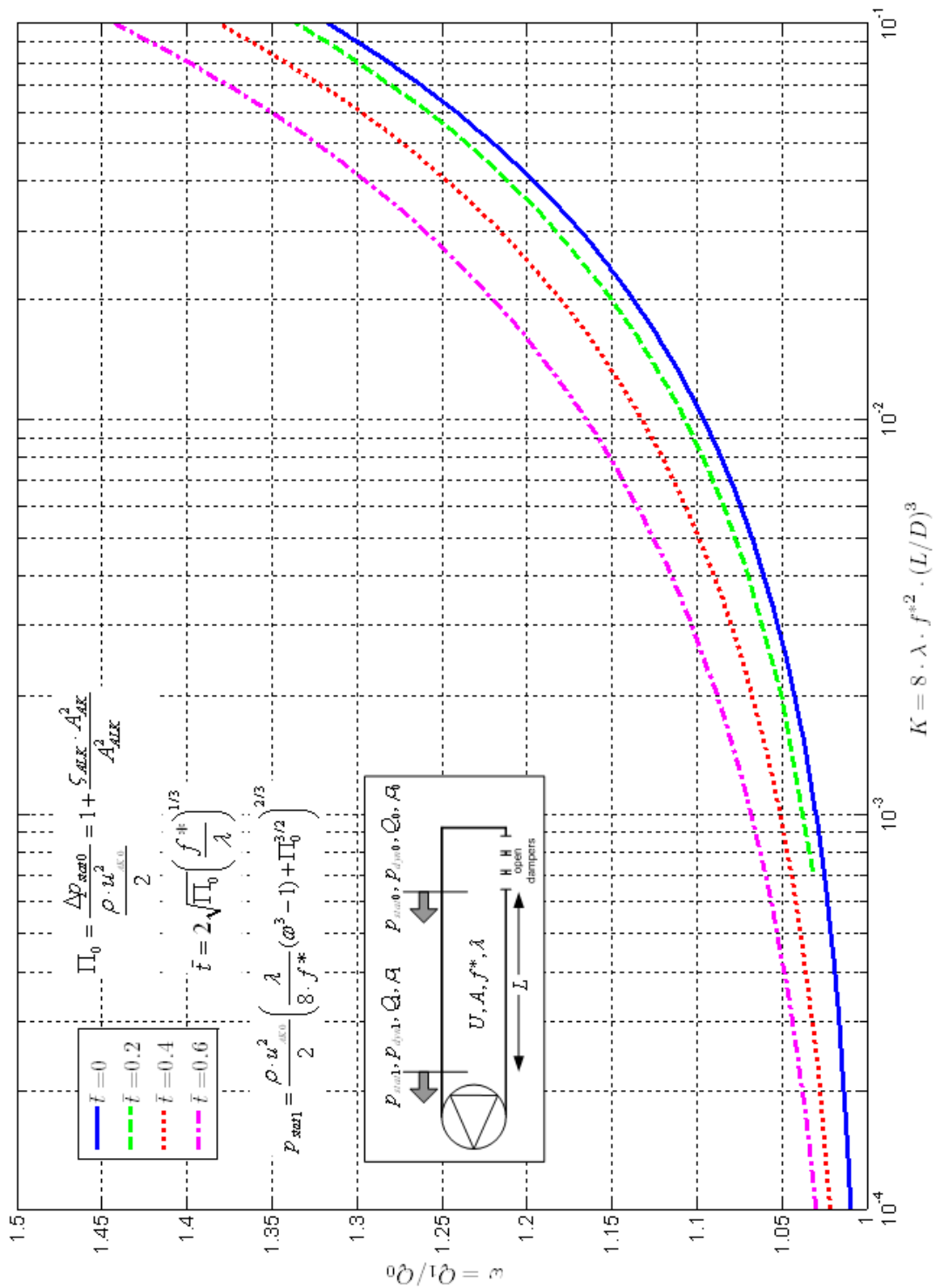


Abbildung 26: Diagramm zur Abschätzung der Abluftleckage (typischer Parameterbereich)

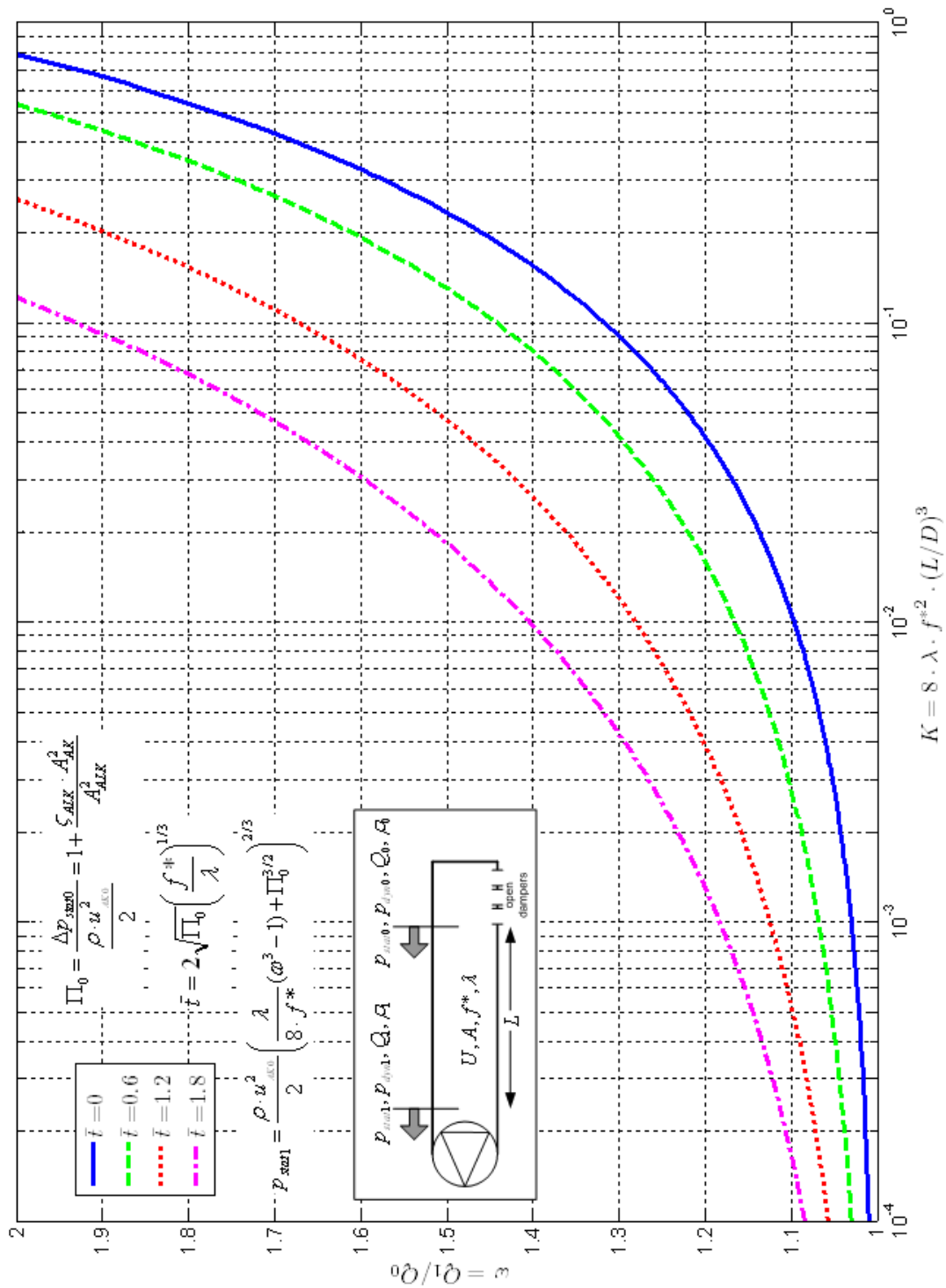


Abbildung 27: Diagramm zur Abschätzung der Abluftleckage (erweiterter Parameterbereich)

Abbildung 28 zeigt f^* -Grenzkurven für maximale Leckagen von 10%, 20% und 30% (entspricht einem ω von 1,1, 1,2 und 1,3) vom Abluftvolumenstrom in Funktion von typischen K' -Werten (Gl. 17) und \bar{t} -Werten. Achtung: K' ist eine Mass für den Druckverlust im Abluftkanal und nicht mit K (Mass für die Leckage) zu verwechseln.

$$K' = 8 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^3 \tag{Gl. 17}$$

Weil der \bar{t} -Wert von f^* abhängig ist, muss er abgeschätzt oder iterativ bestimmt werden. Der Graph zeigt:

- Leckagen im Bereich von 10% sind nur bei neuen Kanälen ($f^* = 10 - 20 \text{ mm}^2/\text{m}^2$) mit kleinen K' -Werten ($K' < 5 \times 10^7$) erreichbar.
- Für kleine K' -Werte ($K' < 5 \times 10^7$) liegen die Leckagen auch bei relativ undichten Kanälen ($f^* > 20 \text{ mm}^2/\text{m}^2$) unter 20% vom Abluftvolumenstrom.
- Bei grossen K' -Werten ($K' > 10^8$) sind Leckagen unter 20% nicht mehr erreichbar, weil extrem dichte Kanäle erforderlich wären ($f^* < 10 \text{ mm}^2/\text{m}^2$).

Daraus lassen sich die folgenden zwei wichtigen Schlüsse ziehen:

- Bei Kanälen mit kleinem K' -Wert sind aufwendige Massnahmen zur Abdichtung nicht in jedem Fall notwendig, respektive grössere Leckageflächen durchaus zulässig.
- Kanäle mit K' -Werten $> 10^8$ sind hinsichtlich der Leckagen problematisch und sollten wenn möglich vermieden werden. Die maximale Absauglänge¹³ liegt somit etwa bei 2000 – 2500 m.

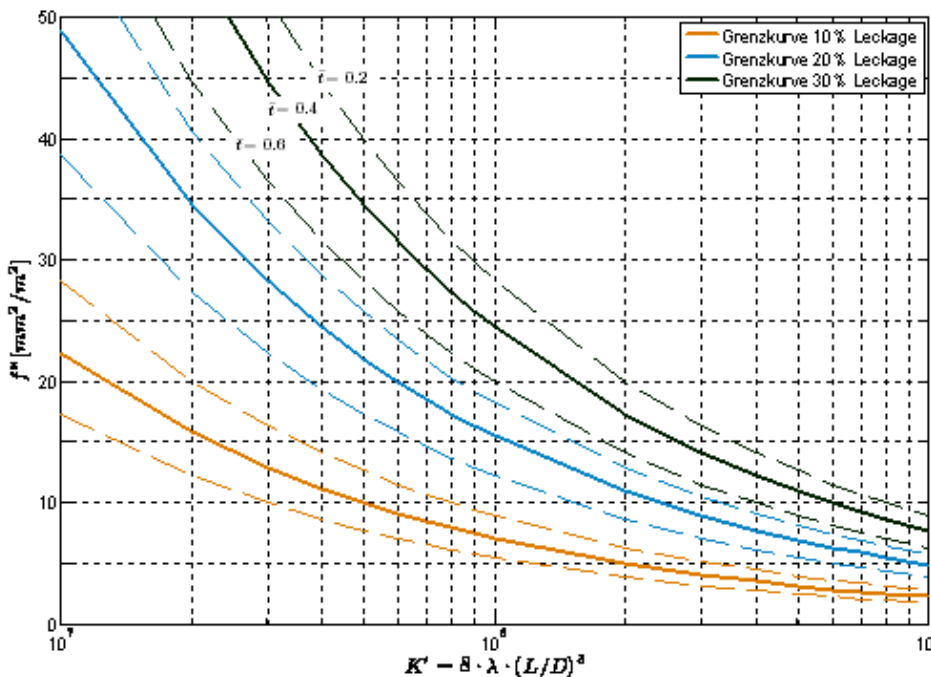


Abbildung 28: Grenzkurven zur Abschätzung der erforderlichen Dichtigkeit resp. der zulässigen Leckagefläche bei definierter Leckagemenge

¹³ Distanz vom Absaugort bis zum Ende des Abluftkanals. Bei Abluftkanälen mit einseitiger Absaugung Typ L entspricht die Absauglänge ca. der Abluftkanallänge, bei zweiseitiger Absaugung Typ U ca. der halben Abluftkanallänge.

5 Weitere Erkenntnisse aus den Messungen

5.1 Druckverlust im Abluftkanal

Eine massgebende Grösse bei der Auslegung von Lüftungsanlagen ist der Druckverlust im Abluftkanal. Die Berechnung erfolgt nach Gl. 18. Dieser Druckverlust setzt sich aus verschiedenen Einzeldruckverlusten zusammen. Die wichtigsten sind Wandreibung (ζ_W), Einbauten (ζ_E), Aufweitungen (ζ_Q) oder Umlenkungen (ζ_U).

$$\Delta p_{AK} = \zeta_G \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} = (\zeta_W + \zeta_E + \zeta_Q + \zeta_U + \dots) \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad \text{Gl. 18}$$

Am stärksten am Druckverlust beteiligt sind die Wandreibungseffekte. Der zu erwartende Druckverlustbeiwert aufgrund der Wandreibungseffekten lässt sich nach Gl. 19 berechnen. Der Rohrreibungskoeffizient λ ist eine dimensionslose Grösse und eine Funktion der Reynoldszahl (Re) und der relativen Wandrauigkeit (k_s). Typische Werte für die Reynoldszahl¹⁴ in Abluftkanälen liegen im Bereich von $1 \cdot 10^6$ bis $5 \cdot 10^6$ und für die relative Wandrauigkeit¹⁵ im Bereich von $3 \cdot 10^{-4}$ – $6 \cdot 10^{-4}$. Aus dem Moody-Diagramm lassen sich die entsprechenden λ -Werte ablesen. Auch wenn sie noch im sogenannten *Übergangsbereich* liegen, sind die λ -Werte praktisch nur noch von k_s abhängig. Die entsprechenden Rohrreibungskoeffizienten liegen im Bereich von 0.014 bis 0.017.

$$\zeta_W = \lambda \frac{L}{D_{hyd}} \quad \text{Gl. 19}$$

Aussagen über die Druckverluste lassen sich andererseits auch aus den Messresultaten ableiten. In den nächsten Kapiteln werden die Messresultate nach folgenden Aspekten ausgewertet:

- Definition des Reibungskoeffizienten λ_{AK} gemäss Gl. 20. Im Gegensatz zu λ umfasst der λ_{AK} alle am Druckverlust beteiligten Einflüsse.
- Abschätzen des Anteils der Wandreibung am Gesamtdruckverlust.
- Abschätzen des Anteils der Klappenantriebskästen am Gesamtdruckverlust. Dazu werden die Druckverluste über die Klappenantriebskästen theoretisch ermittelt.
- Verifikation der theoretisch errechneten Wandreibungskoeffizienten λ .

$$\lambda_{AK} \frac{L}{D_{hyd}} = \zeta_G = (\zeta_W + \zeta_E + \zeta_Q + \zeta_U + \dots) \quad \text{Gl. 20}$$

5.1.1 Berechnung des Reibungskoeffizienten λ_{AK} aus den Messresultaten

Die λ_{AK} -Werte lassen sich durch Einsetzen der Messwerte in Gl. 18 und Gl. 20 für jeden Tunnel und Abschnitt berechnen. Für v und ρ wird jeweils der Mittelwert zwischen den Messstellen eingesetzt.

¹⁴ $Re = v \cdot D_{hyd} \cdot \rho / \eta$, typische Werte sind: $v = 10$ bis 20 m/s, $D_{hyd} = 2$ bis 3 m, $\rho = 1$ bis 1.2 kg/m³, $\eta = 18 \cdot 10^{-6}$ Pa s

¹⁵ $k_s = k / D_{hyd}$; typische Werte sind für k : Ortbeton mit Stahlschalung = 0.1 bis 0.4 mm, Ortbeton mit Holzschalung 0.1 bis 3 mm, unverkleideter Beton (z.B. ZD abluftseitig) = 3 bis 5 mm, Spritzbeton = 5 bis 10 mm, typische Werte für $D_{hyd} = 2$ bis 3 m

Hinsichtlich der Druckverluste wurden die Abluftkanäle in zwei Klassen, nämlich Regel- und Spezialkanal, eingeteilt. Regelkanäle entsprechen einem heute gängigen Abluftkanal, der nur die üblichen Einbauten (Abluftklappen inkl. Antriebe und Beleuchtung) und Aufweitungen (z.B. Ausstellnischen) aufweist. Spezialkanäle sind z.B. Kanäle mit Hängestangen oder grosser Anzahl an zusätzlichen Einbauten.

Die λ_{AK} -Werte für alle untersuchten Tunnel mit den entsprechenden Randbedingungen sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tunnel	Reibungskoeffizient		Klassierung (R = Regelkanal, S = Spezialkanal)	Anströmhäuben	Kabeltrasse	Bemerkungen
	$\bar{\lambda}_{AK}$	SDT				
Flimsenstein – Ost	0.015	0.001	R	nein	ja	kaum weitere Einbauten
San Bernardino – Süd	0.028	0.003	S	nein	ja	viele weitere Einbauten
San Bernardino – Mitte	0.024	0.001	S	nein	ja	viele weitere Einbauten
Giswil	0.017	0.001	R	nein	nein	kaum weitere Einbauten
Raimeux – Süd	0.017	0.002	S	nein	ja	kaum weitere Einbauten, AK sind quer eingebaut
Leissigen – West	0.018	0.003	S	nein	ja	keine Klappenantriebe im Kanal
Aescher – Basel	0.017	0.003	S	ja	nein	Hängestangen alle 2 m
Aescher – Chur	0.014	0.003	R	ja	nein	Verkabelung ALK im AK
Stägjitschuggen	0.014	0.003	R	ja	nein	kaum weitere Einbauten
Uetliberg – Basel	0.013	0.003	R	nein	nein	kaum weitere Einbauten
Uetliberg – Chur	0.015	0.004	R	nein	nein	kaum weitere Einbauten
Kirchenwald – Nord	0.017	0.002	R	ja	nein	Rohr von Raumlüftung im AK, Umlenkungen
Aescher – Basel	0.017	<0.001	S	ja	nein	Hängestangen alle 2 m (2. Messung)
Aescher – Chur	0.013	0.001	R	ja	nein	kaum weitere Einbauten (2. Messung)
Islisberg – Luzern	0.016	0.001	R	nein	nein	kaum weitere Einbauten
Islisberg – Zürich	0.017	0.001	R	nein	nein	kaum weitere Einbauten

Tabelle 7: Mittelwerte und Standardabweichungen für den Reibungskoeffizienten λ_{AK}

Abbildung 29 zeigt die Verteilung der λ_{AK} -Werte je Abschnitt und Messung als Histogramm. Für Regelkanäle streuen die Werte zwischen 0.01 und 0.02. Die Streuung je Kanal ist gering. Der Mittelwert liegt bei 0.017. Der Vergleich mit den theoretisch berechneten Reibungskoeffizienten (0.014 bis 0.017) lässt darauf schliessen, dass a) der Druckverlust für Regelkanäle von den Wandreibungseffekten dominiert ist und b) die Wandrauigkeit allgemein relativ gering (< 1 mm) ist.

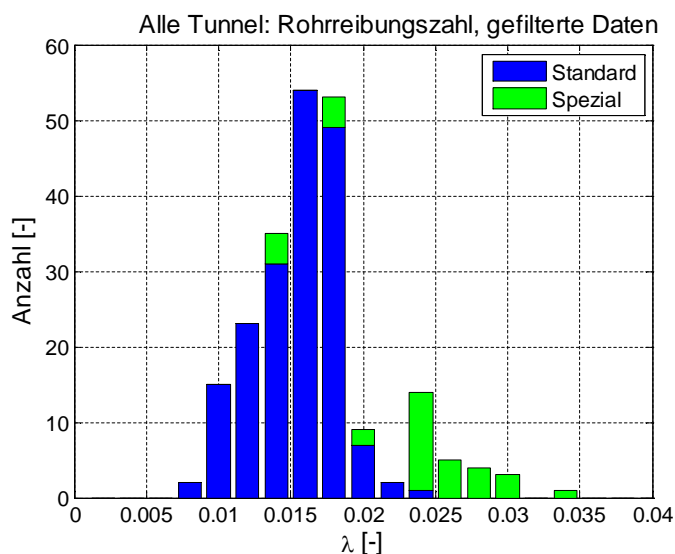


Abbildung 29: Histogramm aller berechneten Reibungskoeffizienten λ_{AK} differenziert nach Tunneltyp

5.2 Druckverlust über offene Abluftklappen

Beim Einströmen der Luft in den Abluftkanal im Bereich der offenen Abluftklappen ergibt sich ein Druckverlust. Dieser Druckverlust setzt sich aus vielen, im Einzelnen schwierig zu quantifizierenden Einzeldruckverlusten zusammen.

Es drängt sich auf, die Messdaten der Leckagemessung hinsichtlich der oben erwähnten Problematik auszuwerten. Es zeigt sich, dass bei der Betrachtung des Absaugbereichs als eine Art *Black Box* ein einfacher und zuverlässiger Ansatz gefunden werden kann, um den Druckverlust über den Absaugbereich zu quantifizieren.

5.2.1 Ansatz

Der Absaugbereich mit den offenen Abluftklappen wird als *Black Box* betrachtet (vgl. Abbildung 31). Die Grenzen der *Black Box* sind a) bei den Abluftklappen fahrtraumseitig und b) nach der letzten geöffneten Abluftklappe (abströmseitig). Gesucht wird ein Verlustbeiwert (Totaldruckverlust) dieser *Black Box*, der die Druckverluste möglichst gut und allgemein gültig repräsentiert.

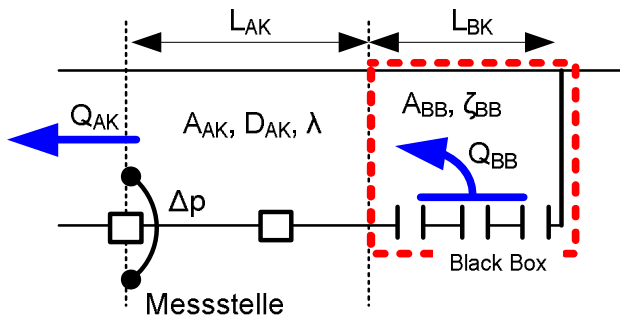


Abbildung 31: Situation und Nomenklatur des Bereichs mit offenen Abluftklappen

Die Messwerte werden gemäss Gl. 21 ausgewertet. Um den Totaldruckverlust zu berechnen, muss der gemessene statische Unterdruck bei der Messstelle um den dynamischen Druckanteil und den Strömungsverlust über der Kanallänge L_{AK} reduziert werden.

Einflüsse wie die Anordnung der Abluftklappen (z.B. Anzahl und Abstand der offenen Klappen), Art der Absaugung (einseitig oder beidseitig) und optimale Referenzfläche (A_{BB}) gilt es zu diskutieren.

$$\underbrace{\Delta p}_{\text{gemessener stat. Unterdruck im AK}} - \underbrace{\rho \frac{Q_{AK}^2}{2 \cdot A_{AK}^2}}_{\text{dynamischer Anteil}} \underbrace{\left(1 + \lambda \cdot \frac{L_{AK}}{D_{AK}}\right)}_{\text{tot. Druckverlust über } L_{AK}} = \underbrace{\zeta_{BB}}_{\text{gesuchter Wert}} \underbrace{\rho \cdot \frac{Q_{BB}^2}{2 \cdot A_{BB}^2}}_{\text{tot. Druckverlust Black Box}} \quad \text{Gl. 21}$$

Δp :	stat. Unterdruck [Pa] -> pos. Wert	L_{AK} :	Kanallänge [m]
Q_{AK} :	Volumenstrom im AK [m^3/s]	D_{AK} :	hyd. Durchmesser AK [m]
Q_{BB} :	Volumenstrom durch Black Box [m^3/s]	λ :	Reibungszahl [-]
A_{AK} :	Fläche AK [m^2]	ρ :	Dichte Luft [kg/m^3]
A_{BB} :	Referenzfläche Black Box [m^2]	ζ_{BB} :	Verlustbeiwert [-]

5.2.2 Auswertung der Messergebnisse

Total wurden 83 Messungen in die Auswertung aufgenommen. Diese wurden in drei Klassen eingeteilt:

- Klasse 1: einseitige Absaugung, Absaugbereich punktuell über einer Länge von < 50 m (Punktabsaugung), total 30 Messungen
- Klasse 2: einseitige Absaugung, Absaugbereich verteilt über einer Länge von 50 bis 300 m, total 23 Messungen
- Klasse 3: beidseitige Absaugung, Absaugbereich verteilt über einer Länge von 50 m bis 300 m, total 30 Messungen

In Abbildung 32 sind die Verlustbeiwerte (ζ_{BB}) getrennt nach Klassen in Funktion der Anzahl offener Abluftklappen dargestellt. Zusätzlich wurde eine alle Klassen umfassende Fit-Funktion bestimmt. Die Referenzfläche zur Berechnung von ζ_{BB} beträgt jeweils die gesamte Bruttoklappenfläche¹⁶ aller offenen Abluftklappen. Es lassen sich daraus folgende Schlüsse ziehen:

- Die Streuung ist relativ gross (ζ_{BB} -Werte liegen zwischen 1 und 5).
- Klarer Trend zu grösseren ζ_{BB} -Werten bei steigender Anzahl offener Abluftklappen. Dies ist im Prinzip eine Bestätigung der Tatsache, dass bei mehreren geöffneten Abluftklappen die Aufteilung der Strömung ungleichmässig ist.
- Die Art der Absaugung (Klasse 1, 2 oder 3) hat auf die ζ_{BB} -Werte keinen spürbaren Einfluss.

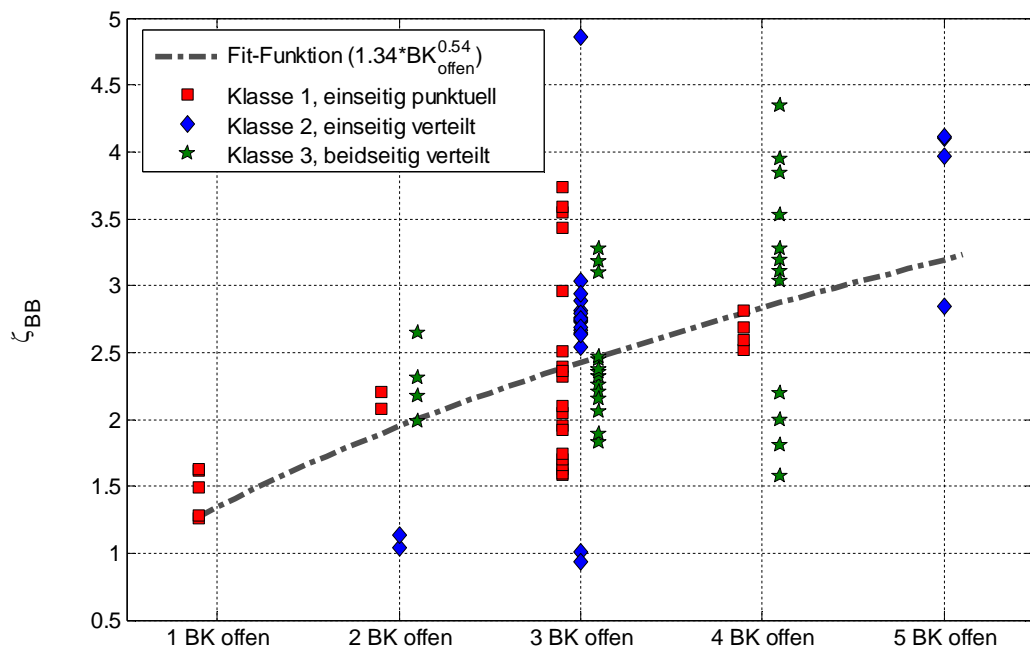


Abbildung 32: Integraler Verlustbeiwert über den Bereich der offenen Klappen ζ_{BB} in Funktion der offenen Abluftklappen je Klasse, A_{BB} = Fläche aller offenen Abluftklappen

¹⁶ Gesamte Fläche innerhalb des Klappenrahmens

5.2.3 Erkenntnis

Die Druckverluste über dem Absaugbereich lassen sich mit dem vorgeschlagenen Ansatz erfassen. Des besseren Verständnisses halber wird der ζ_{BB} -Wert in der weiteren Betrachtung ζ_{ALK} genannt. Die ζ_{ALK} -Werte mit den zugehörigen Standardabweichungen für die entsprechende Anzahl offener Abluftklappen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Während die ζ_{ALK} -Werte für 2, 3 und 4 offene Abluftklappen auf einer relativ grossen Anzahl von Messungen basieren, ist dies für die Fälle mit 1 und 5 Abluftklappen nicht der Fall. Bei den ausgewerteten Messungen handelt es sich immer um Situationen mit gebräuchlichen Lamellenklappen, die in AK-Richtung hintereinander angeordnet sind. Der Einfluss bei anderen Situationen wurde nicht untersucht.

Offene Abluftklappen	1	2	3	4	5
ζ_{BB}	1.5	2.0	2.5	2.9	3.8
Std.	0.2	0.6	0.7	0.8	0.6

Tabelle 8: ζ_{ALK} bezogen auf die gesamte Bruttoklappenfläche aller offenen Abluftklappen

5.3 Fiktive Leckagen

Die massgebende Grösse bei Messungen zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit des Abluftsystems ist der Volumenstrom (Garantiewert). Auch die Leckage wird in der Regel in dieser Art quantifiziert.

Die Leckage (Q_{leck}) wird üblicherweise definiert durch die Differenz der Volumenströme von zwei in Strömungsrichtung verschobenen Messquerschnitten (M1 und M2, wobei M2 stromabwärts positioniert ist). Aufgrund von Dichteänderungen kann sich aber eine fiktive Leckage ergeben, ohne dass sich die Luftmenge zwischen M1 und M2 ändert.

Die Dichte der Luft ist neben der Gaskonstante vom Druck und der Temperatur der Luft abhängig. Beide Parameter können sich zwischen zwei Messstellen ändern. Bei einem Δp von 2000 Pa und einem ΔT von 5 K ergibt sich ein $\Delta \rho$ von ca. 4%. D.h., bei einem Volumenstrom an der Absaugstelle von 200 m³/s würde die fiktive Leckage 8 m³/s betragen.

Zentral ist, dass bei der Messung und Beurteilung von Leckagen mit Massenströmen gerechnet wird. Weil die Messung meist indirekt über eine Geschwindigkeits- oder Konzentrationsmessung erfolgt, ist es wichtig, dass neben dieser Messgrösse auch der Absolutdruck und die Lufttemperatur an jeder Messstelle bestimmt werden.

5.4 Resultate aus den Punktmessungen

Die Resultate der einzelnen Punktmessungen sind im Anhang II den jeweiligen Messprotokollen unter *Bemerkungen* zu entnehmen. Die Werte aus den Punktmessungen wurden den Werten aus der Tracergasmessung gegenübergestellt und daraus wurde die Abweichung berechnet (vgl. Abbildung 33).

Auch wenn die Messreihe mit den Punktmessungen nicht sehr umfangreich ist, können einige Schlüsse gezogen und Tendenzen angegeben werden:

- Die beiden Messverfahren weichen bis zu $\pm 10\%$ voneinander ab.
- Die Abhängigkeit von Einbauten ist ausgeprägt und zeigt sich besonders gut bei der Messung Aescher Basel. Die Hängestangen führen offensichtlich zu einer Einschnürung der Strömung (Abweichung $+15\% - 20\%$).
- Die Messunsicherheit ist gross. Die beiden parallelen Einzelmessungen Raimeux weichen bei gleichem Wandabstand bis zu $10 \text{ m}^3/\text{s}$ voneinander ab. Diese Feststellung deckt sich gut mit der Erkenntnis aus [6].
- Für die Bestimmung von Leckagen ist eine Punktmessung nicht geeignet.

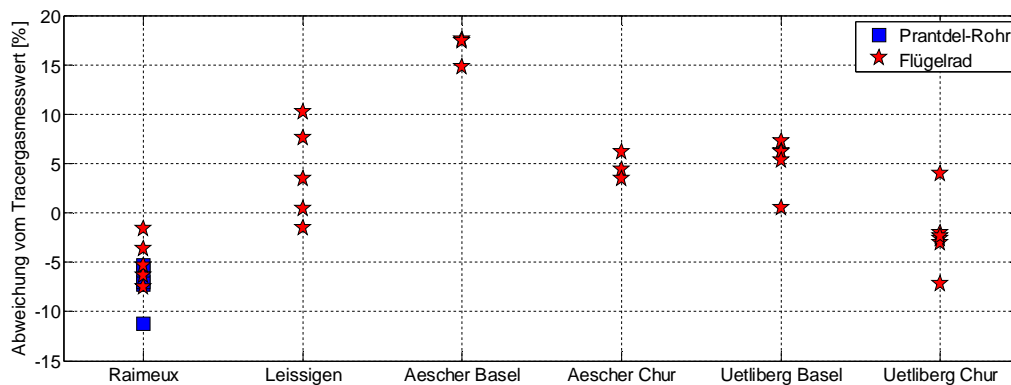


Abbildung 33: Abweichung der Punktmessung von der Tracergasmessung

6 Konstruktive Aspekte

Im Endeffekt ist entscheidend, wie gross die Leckagen gesamthaft sind, und weniger, woher sie im Einzelnen stammen. Während der Planung und Realisierung von Tunnelanlagen kann es aber durchaus hilfreich sein, die einzelnen Problemstellen hinsichtlich Leckagen zu kennen.

6.1 Ursache, Einteilung und Herkunft von Leckagen

Die Ursachen für Leckagen sind immer undichte Stellen im Abluftkanal. Je nachdem, wo sich diese undichten Stellen befinden, werden üblicherweise die Leckagen in Klappen- und Bauleckagen unterteilt.

Die Klappenleckagen umfassen einzig die Leckagen innerhalb des Klappenrahmens.

Alle anderen undichten Stellen werden den Bauleckagen zugeschrieben. Die kritischen Stellen dabei sind:

- die Schnittstelle zwischen dem Klappenrahmen und der Zwischendecke;
- die Querfugen zwischen den Zwischendeckenelementen und zwischen den Innenringen;
- die Längsfugen zwischen der Zwischendecke und dem Auflager;
- Kabeldurchführungen, Zustiege (Mannlöcher, Türen, Deckel etc.) und Entwässerungsöffnungen;
- Betonrisse.

Grundsätzlich gilt: „Je dichter der Abluftkanal, desto besser“. Trotzdem ist es nicht immer erforderlich und sinnvoll, den Kanal mit grösstmöglichem Aufwand abzudichten. In den meisten Fällen stellen einige wenige Undichtheiten kaum ein Problem dar. Die Massnahmen bezüglich Abdichtung gilt es spezifisch auf jeden Tunnel abzustimmen.

6.2 Abluftklappen

Neben den baulich bedingten Leckagen spielen auch die Leckagen durch die geschlossenen Abluftklappen eine entscheidende Rolle. Die Leckagen durch geschlossene Abluftklappen sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Einige wichtige Aspekte werden in der Folge kurz diskutiert.

6.2.1 Form der Klappenblätter

Es wird zwischen symmetrischen und asymmetrischen Klappenblättern unterschieden.

Symmetrische Klappenblätter weisen bessere Dichtheitswerte bei hohen Drücken auf, verharren aber im kraftlosen Zustand (z.B. Wellenbruch, Stromausfall) nicht in offener Stellung.

Bei den asymmetrischen Klappenblättern bleibt die offene Stellung der Klappenblätter auch im kraftlosen Zustand erhalten. Nachteilig ist aber, dass die Asymmetrie dem Anpressdruck im geschlossen Zustand und somit der Dichtheit der Klappen entgegenwirkt¹⁷.

¹⁷ Aus zahlreichen Messungen an verschiedenen Klappen konnte festgestellt werden, dass die Asymmetrie bei geringeren Betriebsdrücken sogar einen leichten Dichtungsvorteil (höhere Dichtheit) gegenüber symmetrischen Lamellen hat (Quelle Sirocco). Dies wird darauf zurückgeführt, dass sich die ungleichen Lamellenschenkel (der kürzere etwas fester als der längere) besser aneinander anfügen bzw. anpassen.

Wegen der verharrenden Eigenschaft in offener Stellung kommen als Abluftklappen in Strassentunneln hauptsächlich asymmetrische Klappenblätter zum Einsatz.

6.2.2 Länge der Klappenblätter

Je länger die einzelnen Lamellen sind, desto schlechter dichten sie gegeneinander ab, da die Vorspannung der Klappenblätter nicht über die ganze Länge konstant aufgebaut werden kann. Ab einer Lamellenlänge von 2 m wird empfohlen, einen Mittelsteg vorzusehen. Bei den heute üblichen Klappenflächen von 4 m² bis 6 m² ist ein Mittelsteg in der Regel sinnvoll.

6.2.3 Einbau

Der Einbau der Klappe erfolgt entweder a) mit oder b) ohne Montagerahmen. Im Fall a) wird der Klappenkörper mittels Pratzen direkt auf die Zwischendecke befestigt (vgl. dazu Abbildung 34, links). Im Fall b) wird ein separater Montagerahmen entweder wie im Fall a) mit Pratzen befestigt oder direkt einbetoniert¹⁸. Der Klappenkörper kann nachträglich in den Montagerahmen eingebaut werden.

Aus Sicht Leckage sind keine wesentlichen Unterschiede zu erwarten.

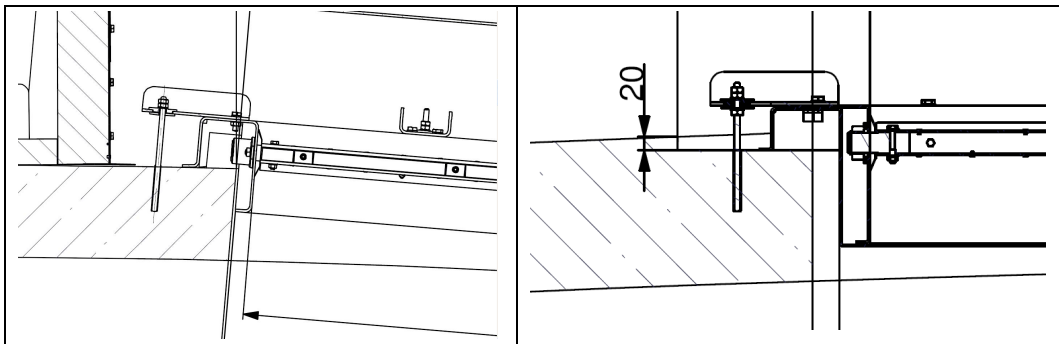


Abbildung 34: Links: Klappe ohne Montagerahmen und Befestigung mit Pratzen, rechts: Klappe mit Montagerahmen und Befestigung mit Pratzen (Quelle: Sirocco)

6.2.4 Auflagefläche

Bei der Montage mit Pratzen wird entweder a) auf eine vorbereitete, ebene Betonoberfläche oder b) auf eine rohe, gewölbte Betonoberfläche montiert.

Bei einer vorbereiteten, ebenen Betonoberfläche kann der Klappen- resp. Montagerahmen plan auf die Auflagefläche montiert werden. Kleine Unebenheiten bis max. 5 mm sind zulässig und werden mit hitzebeständigem Silikon abgedichtet. Dichtleisten sind nicht erforderlich.

Bei der Montage auf die rohe, gewölbte Betonoberfläche liegt der Rahmen nicht oder nur teilweise auf. Die Spalten werden mit Dichtleisten und hitzebeständigem Silikon abgedichtet.

Aus Sicht Leckage bietet die Montage auf eine vorbereitete, ebene Betonoberfläche leichte Vorteile.

¹⁸ In der Schweiz wurde diese Methode bei Gliederklappen noch nie realisiert.

6.2.5 Leckagen

Für die Beurteilung der Leckagen von Abluftklappen wurden Daten aus Abnahmemessungen von 11 verschiedenen Gliederklappen verwendet. Neben den Klappen aus der Messkampagne wurden noch die Klappen vom Gotschna-, Flüelen- und Gubristunnel mit aufgenommen. Alle Klappen haben asymmetrische Lamellenblätter und bis auf eine sind alle Klappen mit einem Mittelsteg ausgerüstet.

In Abbildung 35 sind die Messdaten graphisch dargestellt. Die Klappen wurden aufgrund des Baujahrs in zwei Gruppen eingeteilt (Generation 1: Baujahr vor 2004, Generation 2: Baujahr nach 2004). Zusätzlich sind die Richtwerte aus der Schweizer [1] und der österreichischen [2] Richtlinie aufgeführt. Die Angabe aus [1] ist als Dimensionierungsrichtwert zu verstehen und beinhaltet eine Sicherheit infolge Alterung. Die Angaben aus [2] gelten als Höchst- resp. Abnahmewerte für neue Klappen. Es lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Mit steigendem Druck nehmen die Leckagen für alle Abluftklappen zu.
- Die Leckagen der Abluftklappen haben sich in den letzten Jahren deutlich verringert.
- Für Drücke bis 2500 Pa liegen die Leckagewerte der Abnahmemessungen für Klappen der Generation 1 um den Faktor 2 – 3 tiefer als gemäss [1].
- Der funktionale Zusammenhang, $q_{\text{leck}} \sim \Delta p^{0.5}$, wie er in [1] gegeben ist, kann nicht bestätigt werden. Die Leckage nimmt mit zunehmendem Unterdruck ca. linear zu ($q_{\text{leck}} \sim \Delta p^{1.2}$). Grund dafür ist eine Zunahme der Leckagefläche mit steigendem Unterdruck (Deformation).
- Für Drücke bis 2500 Pa stimmen die Leckagewerte gut mit den Angaben aus [2] überein.

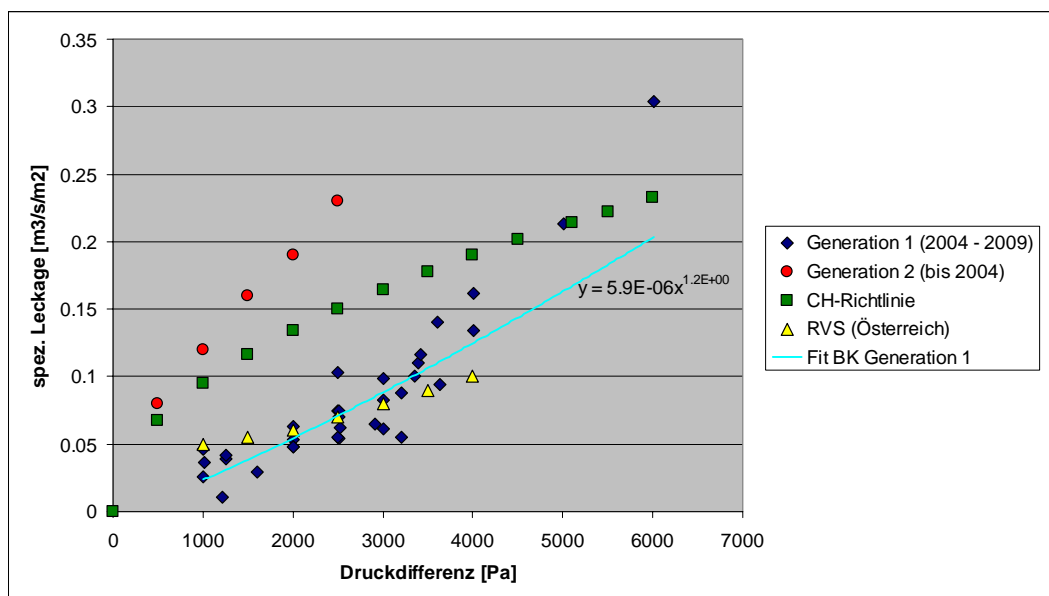


Abbildung 35: Spezifische Leckagen von Gliederklappen in Funktion der Druckdifferenz

6.2.6 Alterung

Ob und wie viel die Leckage aufgrund der Alterung der Klappe zunimmt, konnte im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht beantwortet werden. Untersuchungen, die sich dieser Fragestellung annehmen, konnten nicht gefunden werden.

Überlegungen grundsätzlicher Art und Abklärungen beim Hersteller lassen folgende Vermutungen zu:

- Die Leckagen innerhalb des Klappenkörpers erhöhen sich bei gut gewarteten und eingestellten Klappen kaum. Alterungsanfällige Gummi- oder Silikondichtungen sind nicht vorhanden.
- Bei stark verschmutzten Klappen ist mit einer erhöhten Leckage zu rechnen. Grund dafür ist aber primär eine schlechte Wartung und weniger die Alterung.
- Es ist zu erwarten, dass die Leckagen zwischen Klappe und Beton wegen der Alterung der Dichtelemente geringfügig zunehmen können.

6.3 Zwischendecke

6.3.1 Abdichtung der Quer- und Längsfugen

Querfugen befinden sich in der Regel alle 10 m bis 15 m bei den Stössen der Zwischendeckenelemente. In der Regel werden die Querfugen abgedichtet. Die Abdichtung kann auf verschiedene Arten erfolgen, die hinsichtlich Leckagen etwa gleichwertig sind, richtige Produktwahl und korrekte Verarbeitung vorausgesetzt.

Die gängigste Variante zur Abdichtung der Querfugen sind Dichtungsbänder, die abluftkanalseitig aufgeklebt werden (vgl. Abbildung 36, links). Weil sich die Dichtungsbänder auf der Unterdruckseite befinden, werden sie *falsch* belastet. Im ungünstigsten Fall kann dies zum Wegreissen führen (Abbildung 36, rechts).

Eine Alternative stellt das einbetonierte Fugenband gemäss Abbildung 37 dar (z.B. Islisbergtunnel). Die Belastung der Dichtungsbänder ist günstiger als bei der oben erwähnten Variante. Als Negativpunkt werden die begrenzten Möglichkeiten für Kontrolle und Wartung der Dichtungsbänder erachtet. Diese Variante ist noch relativ neu, entsprechend gibt es noch keine Langzeiterfahrung.

Eine andere Strategie stellt die Möglichkeit dar, die Zwischendecke über weite Strecken fugenlos zu betonieren (z.B. Chienbergtunnel, die ZD ist über 1.4 km ohne Querfuge).



Abbildung 36: Abdichtung der Querfugen mit Dichtungsbändern; links: intaktes Dichtungsband, rechts: gelöstes Dichtungsband (Montagefehler)

Eine ausreichende Abdichtung der Längsfugen wird häufig direkt durch entsprechende Konstruktion des Deckenauftrags erreicht (Abbildung 37, rechts). Bei Bedarf können die Längsfugen nachträglich mit Dichtungsbändern abgedichtet werden.

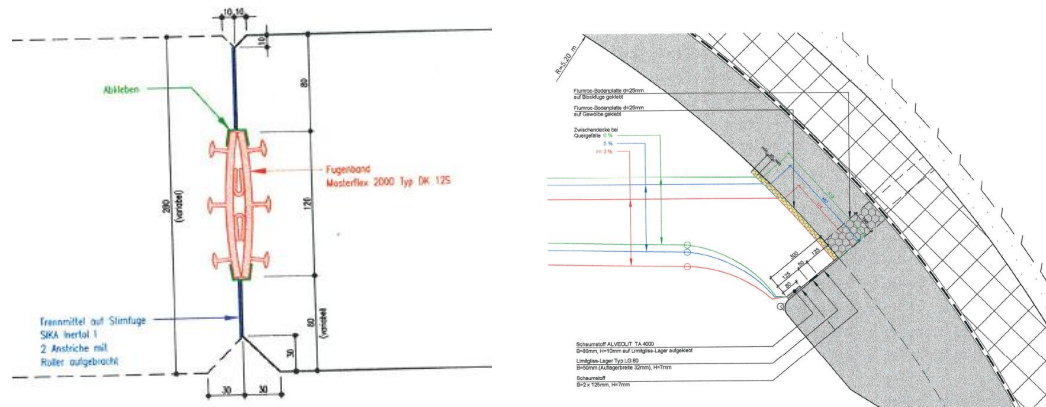


Abbildung 37: links: einbetoniertes Fugenband (Schnitt längs der ZD), rechts: Zwischendeckenaufleger ohne nachträgliche Abdichtung der Längsfuge

6.3.2 Entwässerung

Üblicherweise sind in der Zwischendecke Entwässerungsöffnungen vorhanden (vgl. Abbildung 38). Die Abstände betragen typischerweise 50 m bis 1000 m, die Durchmesser 30 mm bis 60 mm. Die Leckage pro Öffnung ist verhältnismässig gering. Bei einer grösseren Anzahl summieren sich die Leckagen aber zu einer nicht vernachlässigbaren Menge.

Die Anzahl und die Dimension der Entwässerungsöffnungen sollten minimiert und wenn möglich verschlossen werden (vgl. Abbildung 38, rechts).



Abbildung 38: Entwässerungsöffnungen in der Zwischendecke

6.4 Kabeldurchführungen

Um die Verkabelung der Installationen im Abluftkanal (Abluftklappen, Beleuchtung, Sensoren etc.) zu bewerkstelligen, sind Kabeldurchführungen unvermeidbar und stellen bei korrekter Ausführung hinsichtlich Leckagen keine Probleme dar. Sind sie aber schlecht ausgeführt, können sie zu beträchtlichen Leckagen führen.

Abbildung 39, links, zeigt eine Aussparung bei einem Rundschlag. Die Brandabschottung wurde durch den Unterdruck im Abluftkanal weggerissen. Durch das offene Rohr wird Fremdluft vom Fahrraum und/oder dem Werkleitungskanal angesaugt. Das Wegreissen der Brandabschottung kann auf einfache Weise durch die Montage von einem Blech über der Brandabschottung verhindert werden.

Die Abbildung 39, rechts, und Abbildung 40 zeigen unverschlossene Kabeldurchführungen. Um Leckagen zu vermeiden, sind diese Öffnungen zweckmässig zu verschliessen.



Abbildung 39: links: Aussparung bei Rundschlag mit weggerissener Brandabschottung; rechts: Unverschlossene Kabeldurchführung in den Abluftkanal



Abbildung 40: Nachträglich erstellte und unverschlossene Kabeldurchführungen

6.5 Zugänge

Die Abluftkanäle sind in der Regel von den Zentralen und in regelmässigen Abständen vom Tunnel oder von Querverbindungen her zugänglich. Die aerodynamische Trennung erfolgt in der Regel mit einer Tür (Aufstieg via Treppenhaus) oder einem Deckel (Aufstieg von einer Ausstellnische).

Um grössere Leckagen zu vermeiden, sind diese Türen und Deckel auf die entsprechenden Druckdifferenzen zu dimensionieren. Abbildung 41 zeigt zwei Deckel, der linke in massiver, der rechte in schwacher Ausführung. Bei letzterem konnte beim Betrieb der Lüftung ($\Delta P = 2500 \text{ Pa}$) eine deutliche Durchbiegung mit entsprechenden Leckagen festgestellt werden.



Abbildung 41: Beispiele von Zustiegen vom Fahrraum in den Abluftkanal via Mannlöcher, links in massiver, rechts in schwacher Ausführung

7 Analyse der aktuellen Richtlinien und Normen

7.1 Schweizer Richtlinien und Normen

In der SIA Norm [32] und der ASTRA-Richtlinie [1] sind Anforderungen definiert, die im Rahmen dieser Forschungsarbeit relevant sind.

Aus baulicher Sicht ist die SIA Norm massgebend. Bezüglich Undichtheiten ist folgende Anforderung definiert:

- Kap. 8.3.4: „Die Zwischendecke ist dicht (abgedichtete Fugen) zu gestalten“.

Aus lüftungstechnischer Sicht ist die ASTRA-Richtlinie massgebend. Es werden folgende Anforderungen und Richtwerte definiert:

- Kap. 7.2.4.2: „Bei der Dimensionierung der Abluftventilatoren ist die Undichtheit der geschlossenen Abluftklappen und der Kanäle einzubeziehen“.
- Kap. 7.2.4.3: „Bei neuen Anlagen darf die Druckdifferenz zwischen Fahrraum und Kanal 2500 Pa nicht überschreiten“.
- Anhang 7: Dimensionierungswerte für Klappenleckage¹⁹ (vgl. Gl. 22) und Bauleckage²⁰ (vgl. Gl. 23) .

$$q_{Leck,Bau} = \frac{3}{10'000} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad \text{Gl. 22}$$

$$q_{Leck,Klappen} = \frac{3}{1000} \sqrt{\Delta p} \quad \text{Gl. 23}$$

$q_{Leck,Bau}$: Leckagemenge Bauwerk [$m^3/s/m$] (gemäss [1])

$q_{Leck,Klappen}$: Leckagemenge Abluftklappen [$m^3/s/m^2$] (gemäss [1])

Δp : lokaler Unterdruck im Abluftkanal zum Fahrraum [Pa]

7.2 Europäische Richtlinien und Normen

Wie die ASTRA-Richtlinie [1] (wird in der Folge als ASTRA-RL bezeichnet) fordern auch die österreichische RVS [2] (wird in der Folge als RVS bezeichnet), die deutsche RABT [3] und die französische Richtlinie Dossier Pilot [4] die Berücksichtigung der Leckagen in Abluftkanälen bei der Dimensionierung der Lüftungsanlage. Während es sich in [3] und [4] um den Hinweis handelt, dass die Leckagen berücksichtigt werden müssen, sind in der RVS konkrete Vorgaben für die Dimensionierung und Abnahme definiert.

7.2.1 Österreichische Richtlinie RVS 09.02.31

In der RVS sind Abnahme- und Dimensionierungswerte für Bau- und Klappenleckagen sowie auch Vorgaben, wie die entsprechenden Tests durchzuführen sind, definiert.

Abnahme- resp. Garantiewerte

Bei der Abnahmeprüfung darf die Leckagemenge des gesamten Abluftkanals (ohne Le-

¹⁹ Die Klappenleckage umfasst gemäss [1] die Leckagen der geschlossenen Abluftklappe innerhalb des Klappenrahmens. Es wird darauf hingewiesen, dass die Richtwerte eine gewisse Alterung berücksichtigen.

²⁰ Die Bauleckage enthält gemäss [1] alle übrigen Leckageströme einschliesslich der Undichtheit zwischen Klappenrahmen und Bauwerk.

ckagen der Abluftklappen) $5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$ nicht überschreiten.

Die maximal zulässigen Leckagen der Abluftklappen sind in Abbildung 35 dargestellt und sind ungefähr linear zwischen $0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ bei 1000 Pa und $0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ bei 4000 Pa verteilt. Die Leckageanforderungen bei hohen Drücken ($> 2500 \text{ Pa}$) sind als sehr streng zu bezeichnen.

Dimensionierungswerte

Für die Dimensionierung sind die Abnahmewerte (Bau- und Klappenleckagen) mit einem Faktor 2 zu berücksichtigen.

Weitere Anforderungen

Des Weiteren ist bei Neuanlagen der max. Unterdruck im Abluftkanal auf 3000 Pa begrenzt und die Abluftkanallänge soll in der Regel 2500 m nicht übersteigen.

Während die ASTRA-RL eine gleichbleibende Undichtheit (geometrisch gesehen, z.B. als Leckagefläche) definiert, definiert die RVS, abgesehen von den Klappen, eine gleichbleibende Leckagemenge.

7.2.2 Deutsche Richtlinie RABT

In der RABT ist lediglich definiert, dass die Leckage des Abluftkanals einschliesslich der geschlossenen Klappen mit berücksichtigt werden muss. Konkrete Werte sind nicht gegeben.

7.2.3 Französische Richtlinie

Die französische Richtlinie Dossier Pilot schreibt vor, dass Leckagen ab Kanallängen von mehr als 800 m in der Grössenordnung von 5 bis 10% vom Abluftvolumenstrom berücksichtigt werden müssen. Des Weiteren ist die Abluftkanallänge auf 3000 m begrenzt.

7.3 Diskussion / Beurteilung

Die Richtwerte aus der ASTRA-RL für Klappen- und Bauleckagen sollen mit den Erkenntnissen aus der Forschungsarbeit und den Angaben aus der österreichischen RVS [2] verglichen und beurteilt werden. Es werden folgende Aspekte untersucht:

- **Gesamtleckage (Gl. 22 + Gl. 23):** Dieser Wert wird direkt mit den Werten aus dem Forschungsprojekt und den Angaben aus RVS verglichen.
- **Klappenleckage (Gl. 23):** Der Wert wird mit den Abnahmemessungen von Abluftklappen und den Angaben aus RVS verglichen. Des Weiteren wird der Anteil der Klappenleckage an der Gesamtleckage beurteilt.

7.3.1 Gesamtleckage

Zur Beurteilung der Gesamtleckage wird die Leckagemenge gemäss ASTRA-RL und RVS in eine spezifische Leckage und eine Leckagefläche f^* umgerechnet und mit den entsprechenden Werten aus dem Forschungsprojekt verglichen.

Für die Umrechnung wurden folgende Randbedingungen festgelegt:

- Für die Leckage gemäss RVS wurde der um den Faktor 2 erhöhte Abnahmewert (Dimensionierungswert) angesetzt.
- Für die aus dem Forschungsprojekt ermittelte Leckage wurde der vorgeschlagenen Dimensionierungswerte angesetzt: Tunnel Typ A = $14 \text{ mm}^2/\text{m}^2$, Typ B1 = $25 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ und Typ B2 = $32.5 \text{ mm}^2/\text{m}^2$.
- Es werden Druckdifferenzen zwischen 500 – 3000 Pa berücksichtigt.

- Als Eckwerte für die Klappenfläche pro Laufmeter Kanal ($A_{ALKpL} = A_{ALK} / L_{ALK-ALK}$) wurden 0.04 m und 0.06 m angesetzt²¹.
- Als Eckwerte für den Kanalumfang U_{AK} wurden 16 m und 21 m angesetzt.
- Als Referenzwert für die Luftdichte ρ wurden 1.15 kg/m^3 angesetzt.

Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen die spezifische Gesamtleckage in Funktion der Druckdifferenz der Ergebnisse des Forschungsprojekts, der ASTRA-RL und der RVS für zwei Kanalgeometrien. Folgendes kann festgestellt werden:

- Die aus dem Forschungsprojekt ermittelten Werte für Tunnel vom Typ A liegen generell am tiefsten. Ausnahme: RVS bei hohen Drücken und grossen Kanälen.
- Für Tunnel vom Typ A liegen die Ergebnisse des Forschungsprojekts ca. 15 bis 35% tiefer als der Richtwert der ASTRA-RL. In beiden Ansätzen ist eine gewisse Zunahme der Leckage mit dem Alter berücksichtigt. Für grosse Abluftkanäle weichen die Richtwerte aus dem Forschungsprojekt und der ASTRA-RL wenig voneinander ab.
- Für Tunnel vom Typ B1 liegen die Ergebnisse²² des Forschungsprojekts ca. 20 % bis 50% höher als der Richtwert der ASTRA-RL.
- Für Tunnel vom Typ B2 liegen die Ergebnisse des Forschungsprojekts bis zu 100% über dem Richtwert der ASTRA-RL.
- Die Leckagewerte der RVS sind im gängigen Unterdruckbereich (500 Pa bis 1500 Pa) gut mit den Werten der ASTRA-RL vergleichbar, bei höheren Drücken aber deutlich tiefer.
- Die Leckagewerte der RVS sind im Gegensatz zu den anderen Werten kaum abhängig vom Unterdruck im Abluftkanal.

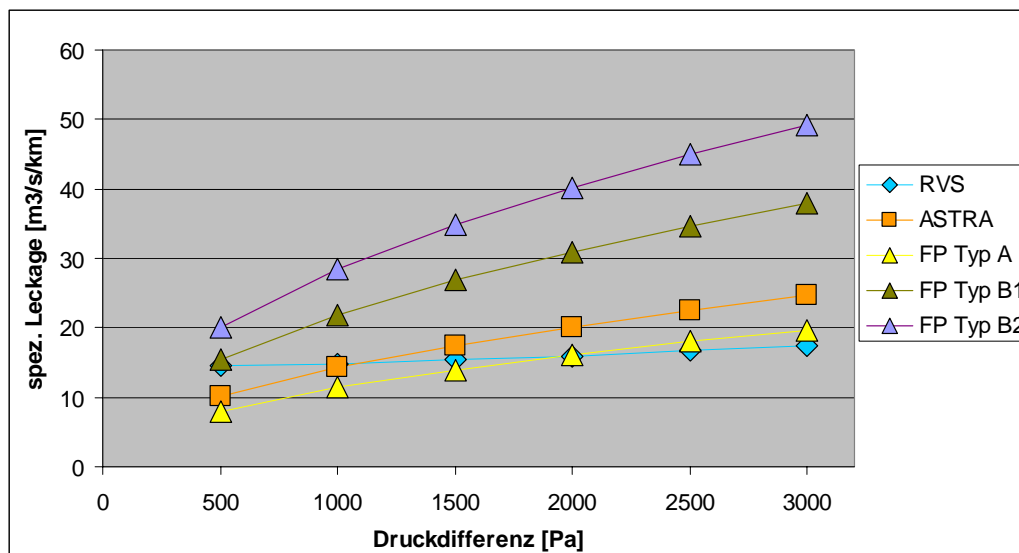


Abbildung 42: Spezifische Gesamtleckage für einen „grossen“ Abluftkanal mit $A_{ALKpL} = 0.05 \text{ m}$ (Klappenfläche pro Laufmeter), $U_{AK} = 21 \text{ m}$

²¹ typische Klappenflächen liegen zwischen 4 bis 6 m². Der Abstand zwischen den Klappen ist in [1] mit 100 m vorgegeben.

²² Für Tunnel vom Typ B2 sind keine Messwerte vorhanden. Die Leckage wurde indirekt aus den Messwerten der Tunneltypen A und B2 ermittelt.

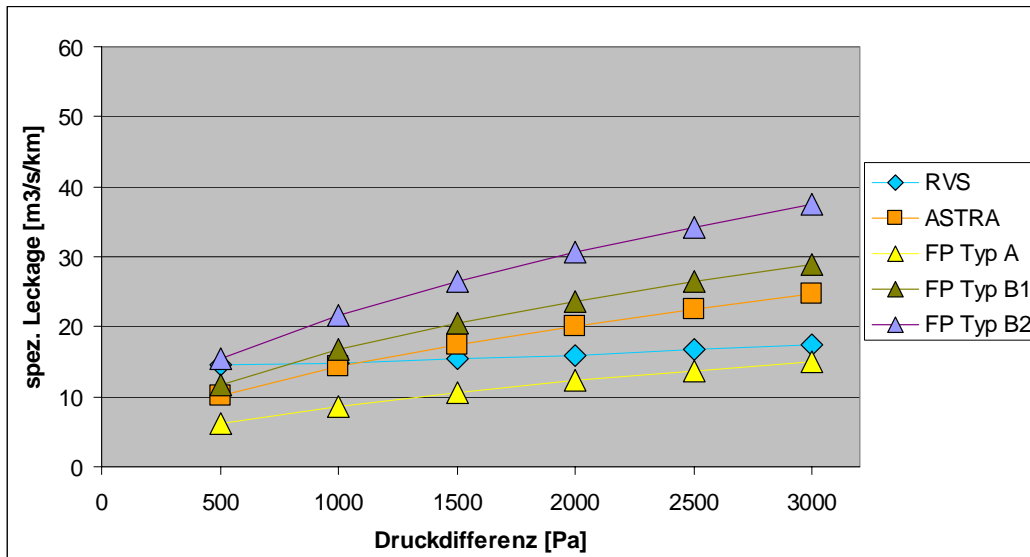


Abbildung 43: Spezifische Gesamtleckage für einen „kleinen“ Abluftkanal mit $A_{ALK\phi L} = 0.05 \text{ m}$ (Klappenfläche pro Laufmeter), $U_{AK} = 16 \text{ m}$

Abbildung 44 zeigt die Leckagefläche f^* für die Ergebnisse des Forschungsprojekts, der ASTRA-RL und der RVS. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie in Abbildung 42 und Abbildung 43, mit der Ausnahme der Werte gemäss RVS. Weil die Anforderung der Leckagen in der RVS praktisch unabhängig vom Unterdruck definiert ist, variiert der entsprechende f^* -Wert stark mit dem Unterdruck, insbesondere bei kleinen Unterdrücken.

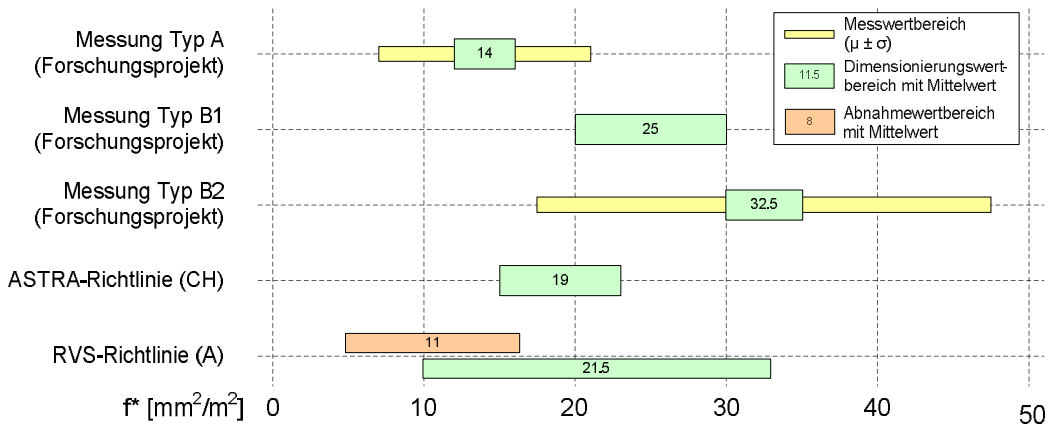


Abbildung 44: Leckagefläche f^* im Vergleich

7.3.2 Klappenleckage

Abbildung 45 zeigt einen Vergleich der Klappenleckagen bei verschiedenen Druckdifferenzen zwischen dem Richtwert aus der ASTRA-RL und einem repräsentativen Wert aus Abnahmemessungen. Die Leckagen aus den Abnahmemessungen liegen deutlich tiefer als der Richtwert aus der ASTRA-RL. Bei typischen Druckdifferenzen von $< 2500 \text{ Pa}$ sind die Leckagen um den Faktor 2 bis 6 geringer.

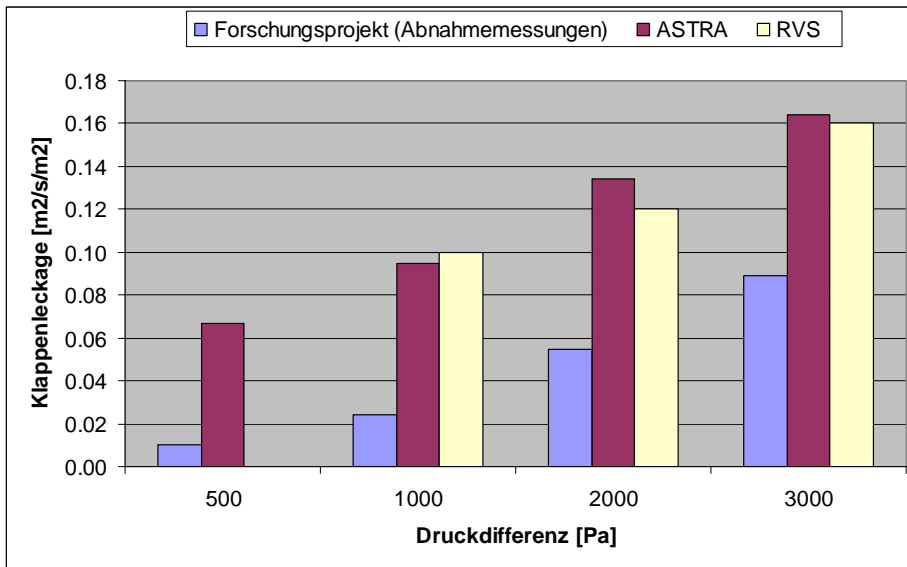


Abbildung 45: Klappenleckagen: Abnahmemessungen im Vergleich mit den Dimensionierungswerten der ASTRA-Richtlinie und RVS

Anhand der Richtwerte aus [1] errechnet sich ein Anteil der Klappenleckage an der Gesamtleckage von ca. 25% und 35%. Dieser Anteil ist nur abhängig von der Klappenfläche. Zum Vergleich wurde der Anteil der Klappenleckage an der Gesamtleckage basierend auf den Messdaten aus dem Forschungsprojekt berechnet (vgl. Abbildung 46). Es zeigt sich, dass der Anteil der Klappenleckage gemäss der ASTRA-RL sehr hoch ist, insbesondere bei den typischen Unterdrücken im Abluftkanal von ≤ 2500 Pa.

Auch wenn die Leckagemengen aus den Abnahmemessungen unter optimalen Bedingungen²³ ermittelt werden, darf davon ausgegangen werden, dass die Klappenleckagen deutlich geringer sind als in [1] angegeben. Aus heutiger Sicht liegt der Anteil der Klappenleckage an der Gesamtleckage zwischen 5% bis 20%, typischerweise aber etwa bei 10%.

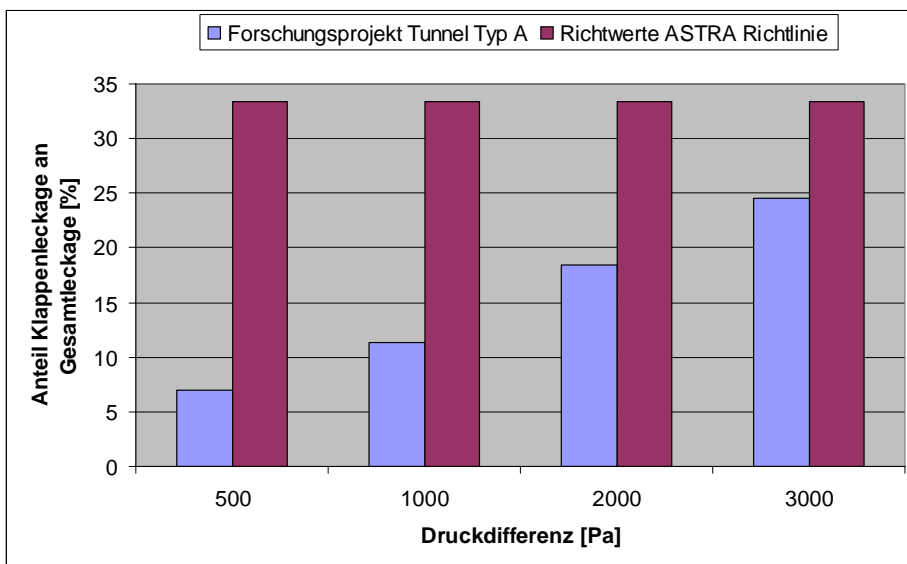


Abbildung 46: Differenz der Klappenleckage gemäss Richtlinie im Verhältnis zu Abnahmemessungen ($U_{AK}=18$ m, $f^* = 14$ mm²/m²)

²³ Neue Klappen, optimale Einbausituation, keine Verschmutzung, keine Alterung

8 Vorschlag für weiteres Vorgehen

Aus den umfangreichen Diskussionen der vorherigen Kapitel gehen verschiedene Erkenntnisse und Empfehlungen, aber auch noch offene Fragen hervor. Inwiefern die Erkenntnisse und Empfehlungen in geeigneten Regelwerken umgesetzt und die offenen Fragen geklärt werden, muss durch das ASTRA entschieden werden.

Bei einer Umsetzung und/oder Fortführung dieser Forschungsarbeit sollten folgende Aspekte im Vordergrund stehen:

- Definition von Abnahmewerten für die Dichtheit der Abluftkanäle und Abluftklappen.
- Nachführen und gegebenenfalls Spezifizieren von Dimensionierungswerten für die Dichtheit der Abluftkanäle und Abluftklappen.
- Definition von Vorgaben für die Durchführung von Messungen von Abluftvolumenstrom und Leckage.
- Durchführen und Auswerten von weiteren Leckagemessungen zur Untersuchung der Alterung und zur Überprüfung der vorgeschlagenen Messkonzepte mit erhöhter Genauigkeit.

8.1.1 Definition von Abnahmewerten für die Dichtheit

Heute gibt es keine verbindlichen Vorgaben hinsichtlich der Dichtheit von Abluftkanälen und Abluftklappen. Aus folgenden Gründen wird es als sinnvoll erachtet, für neue Tunnel (Typ A) entsprechende Abnahmewerte zu definieren:

- Klare und messbare Vorgaben können in den Ausschreibungen Bau und Abluftklappen definiert werden. Die Verantwortlichkeiten sind klar zugewiesen. Sanktionierung bei Nichterreichung ist möglich.
- Die Abnahmewerte stellen eine verlässliche Grundlage für Dimensionierung der Lüftungsanlage dar.
- Die Abnahmewerte können als Entscheidungsgrundlage für die Art der Abdichtung verwendet werden.
- Die Abnahmewerte sind einheitlich für alle Tunnel.

Die Dichtheit von Tunneln vom Typ B ist sehr unterschiedlich und nur bedingt beeinflussbar. Entsprechend schwierig ist es, ein Abnahmewert zu definieren. Spezifische Leckagen grösser als $23 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$, resp. Leckageflächen grösser als $25 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ sind aber grundsätzlich problematisch und sollten mit entsprechenden Massnahmen verhindert werden. In jedem Fall muss die korrekte Funktion der Lüftungsanlage im Vordergrund stehen, was das Lüftungskonzept beeinflussen kann (z.B. Anzahl der Lüftungszentralen).

Zwecks Verantwortlichkeit müssen die Gesamt- und Klappenleckagen differenziert betrachtet werden. Beide Werte lassen sich gut messtechnisch erfassen.

Bei Abluftklappen ist schon heute die Regel, Abnahmewerte für Leckagen zu definieren und bei der Werkabnahme entsprechende Messungen durchzuführen. Würde ein Abnahmewert für die Gesamtleckage definiert, müsste dieser konsequenterweise auch messtechnisch überprüft werden.

Als Abnahmewert für die Dichtheit kann die spezifische Leckage (ΔQ_{spez}) oder die spezifische Leckagefläche (f^*) herangezogen werden. Die Abnahmewerte sollten in etwa der Dichtheit der heute gängigen Abluftkanäle und Abluftklappen entsprechen. Entsprechende Werte sind in Tabelle 9 dargestellt.

Bei der Gesamtleckage ist die spezifische Leckage auf die Länge normiert, bei der Klappenleckage auf die Klappenfläche.

	spezifische Leckage (ΔQ_{spez})	Leckagefläche (f^*)
Gesamtleckage Typ A	$10 \pm 2.0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$	$11.5 \pm 1.5 \text{ mm}^2/\text{m}^2$
Abluftklappen	$0.085 \pm 0.015 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ bei 2500 Pa	$1300 \pm 300 \text{ mm}^2/\text{m}^2$

Tabelle 9: Abnahmewerte für Gesamt- und Abluftklappenleckagen

8.1.2 Definition von Dimensionierungswerten für die Dichtheit

Richtwerte für die Dimensionierung der Bau- und Klappenleckage sind in der ASTRA-RL enthalten. Diese Richtwerte gelten allgemein für neue und sanierte Anlagen (Typ A und B).

Es wird empfohlen, die Dimensionierungswerte der ASTRA-RL nachzuführen und zu spezifizieren. Der in der ASTRA-RL definierte Richtwert entspricht einer Leckagefläche von 15 bis 23 mm^2/m^2 . Dieser Wert stellt ein Kompromiss dar, der für Tunnels vom Typ A grosse Reserven beinhaltet und andererseits für Tunnels vom Typ B die Leckage unterschätzt. Weil sich die Dichtheit der Abluftkanäle der Typen A und B nachweislich stark unterscheiden, drängen sich spezifische Dimensionierungswerte für die verschiedenen Tunneltypen auf.

Werden die in Tabelle 9 erwähnten Abnahmewerte verwendet, so kann zudem auf eine separate Betrachtung der Klappen- und Bauleckagen verzichtet werden, und es können die in Tabelle 10 angegebenen Gesamtleckagen als Dimensionierungswerte eingesetzt werden.

Die Abnahme- und Dimensionierungswerte müssen aufeinander abgestimmt sein.

	spezifische Leckage (ΔQ_{spez})	Leckagefläche (f^*)
Typ A	$13 \pm 2.0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$	$14 \pm 2.0 \text{ mm}^2/\text{m}^2$
Typ B1	$23 \pm 5.0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$	$25 \pm 5.0 \text{ mm}^2/\text{m}^2$
Typ B2	$30 \pm 2.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$	$32.5 \pm 2.5 \text{ mm}^2/\text{m}^2$

Tabelle 10: Dimensionierungswerte für die Gesamtleckage

8.1.3 Definition von Vorgaben für die Durchführung von Abluftvolumenstrom- und Leckagemessung

Für die Durchführung von Abluftvolumenstrom- und Leckagemessungen sind keine verbindlichen Vorgaben vorhanden. Dies führt dazu, dass die Volumenströme und Leckagen auf unterschiedlichste Art und Weise ermittelt werden. Wie diese Arbeit zeigt, eignen sich aber nicht alle Messmethoden gleichermaßen und bei der Durchführung und Auswertung der Daten müssen gewisse Grundsätze eingehalten werden.

Für eine fundierte Abnahmemessung wird empfohlen, dass Vorgaben für die Durchführung der Messungen definiert werden. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn Abnahmewerte definiert und bei Nichteinhaltung Sanktionen verhängt werden.

Die Vorgaben können sich auf folgende Aspekte beziehen:

- **Erforderliche Messungen:** Welche Grössen müssen ermittelt werden (z.B. Massenstrom, Temperatur, Differenz- und Absolutdruck) und wie gross ist die jeweilige zulässige Messunsicherheit.
- **Messmethode:** Welche Messmethoden können verwendet werden und wie gross sind die jeweiligen zu berücksichtigenden Messunsicherheiten.
- **Messaufbau/-ablauf:** Vorbereitungsmassnahmen, Anzahl, Ort und Distanz der Sensoren, minimale Anzahl der Messungen, Berücksichtigung von Randbedingungen etc.
- **Fehlerrechnung:** Vorgaben für die Durchführung der Fehlerrechnung.

8.1.4 Durchführen und Auswerten von weiteren Leckagemessungen

Es ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren eine Vielzahl von Leckagemessungen in neuen und in sanierten Tunnelanlagen durchgeführt werden. Grundsätzlich ist es möglich, diese Daten, analog zu denen im Rahmen dieses Forschungsprojektes gewonnenen, auszuwerten. Dadurch können der Umfang der Messreihe erhöht und damit verbunden die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Richtwerte verbessert werden. Voraussetzung, dass die in Zukunft gewonnenen Messdaten in die Auswertung des Forschungsprojektes einfließen können, ist, dass sie in vergleichbarer Art und Weise erhoben werden.

Die Vorschläge zur Verbesserung der Genauigkeit der Messungen gemäss Kap. 3.8 sollten überprüft und bei einem positiven Ergebnis bei zukünftigen Messungen berücksichtigt werden.

Von grossem Wert wäre auch eine Wiederholung von bereits durchgeführten Messungen. Damit könnte eine bessere fundierte Aussage über Tunnel vom Typ B1 gemacht werden.

Es wird empfohlen, die zukünftigen Leckagemessungen vergleichbar zum Forschungsprojekt durchzuführen und die heutige Messreihe mit den Ergebnissen zu ergänzen und auszuwerten.

9 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die durchgeführte Forschungsarbeit brachte wichtige Erkenntnisse zur Quantifizierung von Abluftkanalleckagen. Weitere Aspekte wurden untersucht, die indirekt mit Abluftkanalleckagen im Zusammenhang stehen, aber auch darüber hinaus von Interesse sind. Die wichtigsten Erkenntnisse und Empfehlungen sind folgende:

Messung Abluftvolumenstrom/Leckagemenge

Die Messungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes hatten zum Ziel, die Leckagen in verschiedenen Abluftkanälen zu bestimmen, um daraus Richtwerte für die Dimensionierung abzuleiten.

Bei Abnahmemessungen von Lüftungsanlagen spielen Leckagemessungen dagegen eine sekundäre Rolle und haben eher informativen Charakter. Entscheidend in der Praxis ist letztlich, dass die erforderliche Abluftmenge erreicht wird. Dazu ist eine Volumstrommessung bei den geöffneten Klappen ausreichend. Bei Nichterreichen der Abluftmenge oder zur Bestimmung der Dichtheit von Abluftkanälen bei bestehenden Tunnels kann eine Leckagemessung aber dennoch notwendig sein.

Messunsicherheit

Für eine zuverlässige Bestimmung der Abluftkanalleckage ist eine genaue Volumstrommessung entscheidend. Bei den grossen Abluftmengen und den relativ kleinen Leckagen wächst der relative Fehler auf der Leckage rasch an ($\delta(\Delta Q)/\Delta Q \sim 2 \cdot \delta Q / \Delta Q$). Der Fehler auf der Leckage kann folgendermassen reduziert werden:

- Bei der Verwendung eines genauen Messverfahrens. Bei guten Messverfahren wird eine Messunsicherheiten von ca. 5% erreicht.
- Reduktion der Abluftmenge bei gleichbleibender oder erhöhter Leckage. Dies kann erreicht werden, wenn für die Leckagemessung zusätzliche Abluftklappen geschlossen werden.
- Messung im komplett geschlossenen Abluftkanal. Dies kann erreicht werden, wenn im toten Ast (nur Leckage) gemessen wird. Bei dieser Variante wird direkt die gesuchte Grösse (Leckage) gemessen, d.h. die Leckagemenge wird nicht mit einer Differenzbildung mit entsprechendem Fehlerwachstum ermittelt.

Bei der Messung der Abluftmenge (z.B. bei Abnahmemessungen), ist die Situation mit dem letztgenannten Punkt vergleichbar, weil auch in diesem Fall direkt die gesuchte Grösse (Abluftmenge) gemessen wird.

Messverfahren

Für die Messung der Leckagen hat sich die Tracergasmethode gut bewährt. Weil die Tracergasmethode relativ sensibel und wenig fehlertolerant ist, empfehlen wir eine Plausibilisierung der Messergebnisse (z.B. mit einer Punktmessung oder der Volumstrommessung am Ventilator).

Als alternative Messmethode beurteilen wir die Netzmessung als zweckmässig. Die Punktmessung hat sich wegen der grossen Messunsicherheit für die Leckagemessungen als ungeeignet erwiesen.

Durchführung der Messung

Für die Leckagemessung eines Abluftkanals mit der Tracergasmethode (inkl. Auf- und Abbau, Messung bei mehreren Betriebspunkten) sind 12 h bis 20 h erforderlich. Die Schlauchführung vom Abluftkanal auf Fahrbahnniveau stellt die Hauptschwierigkeit dar. Am besten bewährt hat sich die Variante via geöffnete und mit Holzbrettern nachträglich verschlossenen Abluftklappen.

Messresultate

Die Rohdaten der Messkampagne sind 159 Daten-Tripels (Δp , Q , ρ). Sie sind nicht direkt geeignet zur Beurteilung der Leckagen, sie zeigen aber interessante Trends:

- Bei den meisten Abluftkanälen variieren die Leckagen relativ stark.
- Bei einigen Abluftkanälen ist die Leckage ungefähr proportional zu $\Delta p^{0.5}$, bei anderen Abluftkanälen ungefähr proportional zu Δp .
- In den meisten Fällen steigt die Leckage mit steigendem Unterdruck im Abluftkanal an, in einigen Fällen wurde aber auch das Gegenteil beobachtet.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Hauptgründe dafür die Messunsicherheit, die Inhomogenität der Abluftkanäle und Materialdeformationen darstellen. Die wichtigsten Erkenntnisse daraus sind folgende:

- Einzelmessungen und Messungen über kurze Teilabschnitte sind nicht repräsentativ. Für eine repräsentative Leckagemessung sollen mehrere Messungen über möglichst lange Teilabschnitte durchgeführt werden.
- Die Ergebnisse von Leckagemessungen sind unscharfe Werte und als Grössenordnungen zu verwenden.

Für die weitere Auswertung müssen die Daten plausibilisiert und gefiltert werden. Diese

Quantifizierung der Leckagemenge

Zur Quantifizierung der Leckage wurde eine praxisorientierte Methode entwickelt und der gefilterten Datensatz berücksichtigt. Die Undichtheit des Abluftkanals wird dabei als effektive Leckagefläche f^* beschrieben und die Leckageströmung wird als turbulent betrachtet, d.h. die Leckage ist proportional zu $\Delta p^{0.5}$. Dieser Ansatz hat sich für ähnliche Anwendungen bewährt, ist einfach in der Anwendung und stellt für die typischen Fälle den besten Kompromiss dar.

Es ist zweckmässig, die Tunnel hinsichtlich der Leckage drei verschiedenen Typen zuzuordnen.

- Typ A: Neue Tunnel, die direkt mit einem System zur konzentrierten Rauchabsaugung ausgerüstet werden. Der Abluftkanal ist mit zweckmässigen Methoden komplett abgedichtet. Als Richtwert für die Dimensionierung wird eine Leckagefläche f^* von $14 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ empfohlen.
- Typ B1: Sanierte Tunnel mit nachträglich installiertem System zur konzentrierten Rauchabsaugung. Der Abluftkanal wird mit zweckmässigen Methoden komplett abgedichtet. Als Richtwert für die Dimensionierung wird eine Leckagefläche f^* von $25 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ empfohlen.
- Typ B2: Sanierte Tunnel mit nachträglich installiertem System zur konzentrierten Rauchabsaugung. Der Abluftkanal wird nicht oder nur unvollständig abgedichtet. Als Richtwert für die Dimensionierung wird eine Leckagefläche f^* von $32 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ empfohlen. Bei diesem Tunneltyp lässt sich die Dichtheit des Abluftkanals im Voraus messtechnisch bestimmen. Inwiefern die Funktion von heutigen Lüftungssystemen bei Leckagen in der erwähnten Grössenordnung überhaupt gewährleistet werden kann, muss im Einzelnen geprüft werden. Allgemein gilt es Leckagen in der erwähnten Grössenordnung mit geeigneten Massnahmen zu reduzieren.

Der Umfang der Messreihe für die Tunneltypen B1 und B2 ist noch gering. Mit weiteren Messdaten könnte die Zuverlässigkeit und Präzision dieser Richtwerte erhöht werden.

Druckverlust über offene Abluftklappen

Der Totaldruckverlust über eine oder mehrere offene Abluftklappen wurde analysiert und quantifiziert. Bei drei offenen Abluftklappen beträgt der ζ -Wert 2.5 (bezogen auf die Summe der Bruttoklappenfläche aller geöffneten Abluftklappen).

Fiktive Leckagen

Die Leckage ist definiert durch die Differenz der Volumenströme von zwei in Strömungsrichtung verschobenen Messquerschnitten. Aufgrund von Dichteänderungen kann sich aber eine fiktive Leckage ergeben, ohne dass sich die Luftmenge zwischen den Messquerschnitten ändert.

Zentral ist, dass bei der Messung und Beurteilung von Leckagen mit Massenströmen gerechnet wird. Weil die Messung meist indirekt über eine Geschwindigkeits- oder Konzentrationsmessung erfolgt, ist es wichtig, dass neben dieser Messgrösse auch der Absolutdruck und die Lufttemperatur an jeder Messstelle bestimmt werden.

Druckverlust im Abluftkanal

Die Reibungskoeffizienten für gängige Abluftkanäle liegen bei $0.017^{\pm 0.005}$. Der Anteil der Klappenantriebe ohne Anströmhaube wird auf max. 10% bis 20% vom Gesamtdruckverlust geschätzt. Die Druckverluste bei Klappenantrieben mit Anströmhauben sind deutlich geringer.

Leckage von Abluftklappen

Der Anteil der Klappenleckage von der Gesamtleckage ist mit 10% relativ gering. Die Leckage nimmt mit zunehmendem Unterdruck etwa linear zu (Materialdeformation).

Der Dimensionierungswert aus der ASTRA-RL liegt um den Faktor 2 bis 6 höher als die Resultate aus Abnahmemessungen und der funktionale Zusammenhang $\Delta q \sim \Delta p^{0.5}$ kann nicht bestätigt werden.

Zwischendecke/Abluftkanal

Für Bauleckagen sind primär undichte Quer- und Längsfugen, Entwässerungsöffnungen, Kabeldurchführungen, Zugänge und Auflagen der Abluftklappen massgebend. Mit Ausnahme der Quer- und Längsfugen können die erwähnten Leckagen meist konstruktiv mit geringem Aufwand verhindert werden.

Das Abdichten der Quer- und Längsfugen ist aufwendig und mit entsprechend hohen Kosten verbunden. Zudem ist es nicht in jedem Fall erforderlich. Bei unkritischen Tunneln (d.h. kleinem K-Wert gemäss Gl. 13) empfiehlt sich, die Entscheidung, ob abgedichtet wird oder nicht, auf Basis einer Leckagemessung zu machen.

Anhänge

I	Berechnungen.....	72
I.1	Leckageberechnungen	72
I.2	Rohrreibungszahl.....	76
I.3	Druckverlust über Klappenantriebe	76
II	Berechnungsbeispiel.....	78
III	Messprotokolle.....	79

I Berechnungen

I.1 Leckageberechnungen

I.1.1 Effektive Leckagefläche (quadratischer, turbulenter Ansatz)

Die Ausgangswerte der Berechnung pro Tunnel und pro Messstelle i sind die folgenden Messwerte:

ρ_i [kg/m³] Dichte der Luft im Abluftkanal

Q_i [m³/s] Volumenstrom im Abluftkanal (aus Konzentrationsmessung errechnet)

Δp_i [Pa] Druckdifferenz über die Zwischendecke

Die Auswertung erfolgt messstreckenweise. Eine Messstrecke j erstreckt sich in der Regel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messstellen und hat die Länge ΔL_j . Zuerst wird pro Messstrecke eine Leckage errechnet. Da sich die Dichte entlang dem Abluftkanal ändert, wird eine mit den Dichten gemittelte Leckage über die Messstrecke bzw. spezifische Leckage entlang der Messstrecke ermittelt (Massenerhaltung):

$$\Delta Q_j = \frac{(\rho Q)_{i+1} - (\rho Q)_i}{0.5 \cdot (\rho_i + \rho_{i+1})} \quad \text{Gl. 24}$$

$$\Delta q_j = \frac{\Delta Q_j}{\Delta L_j} \quad \text{Gl. 25}$$

Diese Rechenweise ist exakt unter der Annahme, dass die Leckagerate uniform entlang der Messstrecke verteilt ist.

Die Gl. 1 aus Kap. 3.1 wird nun umgeschrieben auf die Messstrecke zur Berechnung der effektiven Leckageflächen aus den Messdaten, in Differential- und Integralform:

$$\frac{d\dot{m}}{dx} = \frac{d(\rho Au)}{dx} = \frac{d(\rho Q)}{dx} = U \cdot f_T^* \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} \quad \text{Gl. 26}$$

$$\Delta \dot{m}_j = ((\rho Q)_{i+1} - (\rho Q)_i) = U \cdot f_T^* \cdot \int_i^{i+1} \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} \cdot dx \quad \text{Gl. 27}$$

In der Integralform wird angenommen, dass der Kanalumfang, die Querschnittsfläche und die effektive Leckagefläche entlang der Messstrecke konstant bleiben. Zur Auswertung des Integrals auf der rechten Seite wird angenommen, dass die Dichte und der Differenzdruck sich linear entlang der Messstrecke $[0, \Delta L_j]$ verändern:

$$(2 \cdot \rho(x) \cdot \Delta p(x)) = \frac{(2 \cdot \rho \cdot \Delta p)_{i+1} - (2 \cdot \rho \cdot \Delta p)_i}{\Delta L_j} \cdot x + (2 \cdot \rho \cdot \Delta p)_i \quad \text{Gl. 28}$$

Die Auswertung des Integrals mit dem soeben beschriebenen linearen Ansatz ergibt:

$$\int_i^{i+1} \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} \cdot dx = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Delta L_j \cdot \left[(2 \cdot \rho \cdot \Delta p)_{i+1}^{3/2} - (2 \cdot \rho \cdot \Delta p)_i^{3/2} \right]}{(2 \cdot \rho \cdot \Delta p)_{i+1} - (2 \cdot \rho \cdot \Delta p)_i} \quad \text{Gl. 29}$$

In der Auswertung wurde die exakte Lösung des Integrals ersetzt durch die Wurzel des Mittelwerts der Drücke am Anfang und Ende einer Messstrecke:

$$\int_i^{i+1} \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} \cdot dx \approx \Delta L_j \cdot \sqrt{(\rho \cdot \Delta p)_{i+1} + (\rho \cdot \Delta p)_i} \quad \text{Gl. 30}$$

Diese Näherung entspricht bis zu hohen Gradienten der Druckdifferenz entlang des Abluftkanals der exakten Lösung mit einer Genauigkeit von wenigen Prozent. Mit dieser Näherung wird die Bestimmungsgleichung für f_T^* :

$$\frac{((\rho Q)_{i+1} - (\rho Q)_i)}{\Delta L_j} = U \cdot f_T^* \cdot \sqrt{(\rho \cdot \Delta p)_{i+1} + (\rho \cdot \Delta p)_i} \quad \text{Gl. 31}$$

Diese Gleichung bildet mit der Gl. 25 die Grundlage zur Auswertung der Messdaten. Für jede Messstrecke j und Messung k kann die zugehörige effektive Leckagefläche direkt ermittelt werden:

$$(f_T^*)_{j,k} = \left(\frac{((\rho Q)_{i+1} - (\rho Q)_i)}{U \cdot \Delta L_j \cdot \sqrt{(\rho \cdot \Delta p)_{i+1} + (\rho \cdot \Delta p)_i}} \right)_k \quad \text{Gl. 32}$$

Die effektive Leckagefläche einer Messstrecke j oder gar eines ganzen Tunnelabschnitts wird aus den einzelnen berücksichtigten Messungen k mit der Methode der streckengewichteten Mittelwerte berechnet:

$$f_T^* = \frac{\sum_k (\Delta L \cdot f_L^*)_k}{\sum_k \Delta L_k} \quad \text{Gl. 33}$$

Auf diese Weise wird berücksichtigt, dass eine lange Messstrecke aussagekräftigere Werte liefert als eine kurze. Zur Berechnung der Standardabweichung wird eine neue Zufallsvariable geschaffen, deren arithmetischer Mittelwert genau dem streckengewichteten Mittelwert entspricht:

$$y_k = \frac{n \cdot (\Delta L \cdot f_L^*)_k}{\sum_j \Delta L_j} \quad \text{mit} \quad j = 1 \dots n \quad \text{Gl. 34}$$

Deren Standardabweichung entspricht dann der Standardabweichung der streckengewichteten f_L^* -Werte.

I.1.2 Fehlerrechnung zu quadratischem Ansatz

Die Fehler auf den Dichte-, Druck- und Volumenstromwerten sind durch die Messkampagnen bedingt (vgl. Messprotokolle Anhang II). Die Messfehler der Position der Messstellen und der Geometrie des Abluftkanals sind nicht berücksichtigt. Im Folgenden werden Messunsicherheiten stets mit δ bezeichnet, um sie von errechneten und gemessenen Differenzen Δ unterscheiden zu können. Der maximale relative Fehler auf der spezifischen Leckage berechnet sich zu:

$$\frac{\delta(\Delta Q_j)}{\Delta Q_j} = \frac{|\delta\rho \cdot Q|_i + |\rho \cdot \delta Q|_i + |\delta\rho \cdot Q|_{i+1} + |\rho \cdot \delta Q|_{i+1}}{|(\rho Q)_{i+1} - (\rho Q)_i|} + \frac{|\Delta\rho_i| + |\Delta\rho_{i+1}|}{|\rho_{i+1} + \rho_i|} \quad \text{Gl. 35}$$

Daraus wird ersichtlich, dass der Fehler auf der spezifischen Leckage mit sinkender Leckage zunimmt. Der Einfluss der Unsicherheit auf die Dichte ist sekundär.

Der maximale relative Fehler auf den Einzelwerten der effektiven Leckageflächen gemäss Gl. 35 ergibt sich zu:

$$\left(\frac{\delta f_T^*}{f_T^*} \right)_{j,k} = \frac{|\delta\rho \cdot Q|_i + |\rho \cdot \delta Q|_i + |\delta\rho \cdot Q|_{i+1} + |\rho \cdot \delta Q|_{i+1}}{|(\rho Q)_{i+1} - (\rho Q)_i|} + \frac{1}{2} \cdot \frac{|\delta\rho \cdot \Delta p|_i + |\rho \cdot \delta(\Delta p)|_i + |\delta\rho \cdot \Delta p|_{i+1} + |\rho \cdot \delta(\Delta p)|_{i+1}}{|(\rho \Delta p)_{i+1} + (\rho \Delta p)_i|} \quad \text{Gl. 36}$$

Daraus wird ersichtlich, dass der Fehler auf der effektiven Leckagefläche wiederum mit sinkender Leckage zunimmt und der Fehler auf der Druckmessung weniger ins Gewicht fällt als der Fehler auf der Volumenstrommessung.

I.1.3 Effektive Leckagelänge (linearer, laminarer Ansatz)

Für die folgende Betrachtung gelten einleitend die Gleichungen Gl. 24 und Gl. 25 aus I.1.1.

Die Gl. 11 aus Kap. 3.1 wird nun umgeschrieben auf die Messstrecke zur Berechnung der effektiven Leckageflächen aus den Messdaten, in Differential- und Integralform:

$$\frac{d\dot{m}}{dx} = \frac{d(\rho Au)}{dx} = \frac{d(\rho Q)}{dx} = U \cdot f_L^* \cdot \left(\frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \right) \quad \text{Gl. 37}$$

$$\Delta\dot{m}_j = ((\rho Q)_{i+1} - (\rho Q)_i) = U \cdot f_L^* \cdot \int_i^{i+1} \frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \cdot dx \quad \text{Gl. 38}$$

In der Integralform wird angenommen, dass der Kanalumfang, die Querschnittsfläche und die effektive Leckagefläche entlang der Messstrecke konstant bleiben. Zur Auswertung des Integrals auf der rechten Seite wird angenommen, dass die Dichte, der Differenzdruck und die Viskosität sich linear entlang der Messstrecke $[0, \Delta L_j]$ verändern:

$$\left(\frac{\rho(x) \cdot \Delta p(x)}{\mu(x)} \right) = \frac{\left(\frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \right)_{i+1} - \left(\frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \right)_i}{\Delta L_j} \cdot x + \left(\frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \right)_i \quad \text{Gl. 39}$$

Die Auswertung des Integrals mit dem soeben beschriebenen linearen Ansatz ergibt:

$$\int_i^{i+1} \frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \cdot dx = \frac{1}{2} \Delta L_j \left(\left(\frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \right)_{i+1} + \left(\frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \right)_i \right) \quad \text{Gl. 40}$$

Somit wird die Bestimmungsgleichung für f_L^* :

$$\frac{((\rho Q)_{i+1} - (\rho Q)_i)}{\Delta L_j} = U \cdot f_L^* \cdot \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \right)_{i+1} + \left(\frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \right)_i \right) \quad \text{Gl. 41}$$

Diese Gleichung bildet mit der Gl. 25 die Grundlage zur Auswertung der Messdaten. Für jede Messstrecke j und Messung k kann die zugehörige effektive Leckagefläche direkt ermittelt werden:

$$(f_L^*)_{j,k} = \left(\frac{((\rho Q)_{i+1} - (\rho Q)_i)}{U \cdot \Delta L_j \cdot \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \right)_{i+1} + \left(\frac{\rho \cdot \Delta p}{\mu} \right)_i \right)} \right)_k \quad \text{Gl. 42}$$

Die effektive Leckagefläche einer Messstrecke j oder gar eines ganzen Tunnelabschnitts wird aus den einzelnen berücksichtigten Messungen k mit der Methode der streckengewichteten Mittelwerte berechnet:

$$f_T^* = \frac{\sum_k (\Delta L \cdot f_L^*)_k}{\sum_k \Delta L_k} \quad \text{Gl. 43}$$

Auf diese Weise wird berücksichtigt, dass eine lange Messstrecke aussagekräftigere Werte liefert als eine kurze. Zur Berechnung der Standardabweichung wird eine neue Zufallsvariable geschaffen, deren arithmetischer Mittelwert genau dem streckengewichteten Mittelwert entspricht:

$$y_k = \frac{n \cdot (\Delta L \cdot f_L^*)_k}{\sum_j \Delta L_j} \quad \text{mit} \quad j = 1 \dots n \quad \text{Gl. 44}$$

Deren Standardabweichung entspricht dann der Standardabweichung der streckengewichteten f_L^* -Werte.

I.1.4 Fehlerrechnung zu linearem Ansatz

Der maximale relative Fehler auf der spezifischen Leckage wurde bereits in I.1.2 abgehandelt. Der maximale relative Fehler auf den Einzelwerten der effektiven Leckagelänge gemäss Gl. 11 beträgt:

$$\left(\frac{\delta f_T^*}{f_T^*} \right)_{j,k} = \frac{|\delta\rho \cdot Q|_i + |\rho \cdot \delta Q|_i + |\delta\rho \cdot Q|_{i+1} + |\rho \cdot \delta Q|_{i+1}}{|(\rho Q)_{i+1} - (\rho Q)_i|} + \frac{\left| \frac{\delta\rho\Delta p}{\mu} \right|_i + \left| \frac{\rho\delta(\Delta p)}{\mu} \right|_i + \left| \frac{\rho\Delta p}{\mu^2} \Delta\mu \right|_i + \left| \frac{\delta\rho\Delta p}{\mu} \right|_{i+1} + \left| \frac{\rho\delta(\Delta p)}{\mu} \right|_{i+1} + \left| \frac{\rho\Delta p}{\mu^2} \Delta\mu \right|_{i+1}}{\left| \left(\frac{\rho\Delta p}{\mu} \right)_{i+1} + \left(\frac{\rho\Delta p}{\mu} \right)_i \right|} \quad \text{Gl. 45}$$

Daraus wird ersichtlich, dass der Fehler auf der effektiven Leckagefläche wiederum mit sinkender Leckage zunimmt und der Fehler auf der Druckmessung weniger ins Gewicht fällt als der Fehler auf der Volumenstrommessung.

I.2 Rohrreibungszahl

I.2.1 Dimensionslose Darstellung der Daten

Dimensionsloser Volumenstrom, mit der Reynoldszahl:

$$\text{Re}_D = \frac{\rho_i \cdot u_i \cdot D}{\mu} = \frac{(\rho Q)_i}{4 \cdot U_i \cdot \mu} \quad \text{Gl. 46}$$

Mittlere dynamische Viskosität: $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5}$ [Pa.s]

Dimensionsloser Druck: Normiert mit dem dynamischen Druck an Ort und Stelle:

$$\Pi_i = \frac{\Delta p_i}{\frac{1}{2} \cdot \rho_i \cdot u_i^2} = \frac{2 \cdot \Delta p_i \cdot A_i^2}{\rho_i \cdot Q_i^2} \quad \text{Gl. 47}$$

I.3 Druckverlust über Klappenantriebe

Der Klappenantrieb kann als einseitig befestigter, kantiger Block betrachtet werden. In „Pressure losses caused by obstructions in ducts and pipes“ [31] ist ein entsprechender Ansatz beschrieben.

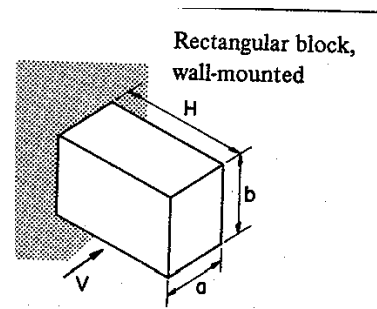
Der Druckverlust kann gemäss Gl. 48 berechnet werden. Der Ansatz basiert auf dem Widerstandskoeffizienten C_{Df} für einen entsprechenden Körper in freier Atmosphäre. Die Kanalwände begrenzen den Raum für die Umströmung des Körpers und führen zu einem höheren Wert als bei der Umströmung in freier Atmosphäre. Dieser Effekt wird anhand von Korrekturfaktoren erfasst.

Der Ansatz ist gültig für $\text{Re}_f > 10^3$, $m^*S/A < 0.5$, $0.75 < a/b < 2.5$, $1 < H/b < 3$, $H_{\text{Antrieb}} \ll H_{\text{Kanal}}$. Diese Anforderungen sind bei allen untersuchten Fällen eingehalten.

Für die Tunnel mit Klappen ohne Anströmhauben wurden die Druckverluste über die Klappenantriebe mit dem oben erwähnten Ansatz berechnet (vgl. Tabelle 11).

$$\Delta p = 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot k \cdot \frac{S}{A_{AK}} \cdot \beta \cdot C_{Df} \quad \text{Gl. 48}$$

- Δp : tot. Druckverlust über Antrieb [Pa]
- A_{AK} : Fläche des AK ausserhalb des Antriebs [m²]
- H: Höhe Antrieb [m]
- b: Breite Antrieb [m]
- a: Länge Antrieb [m]
- S: Front-Fläche Antrieb: H*b [m²]
- S/A_{AK}: Versperrungsmass: S/A_{AK}
- Q_{AK}: Volumenstrom im AK [m³/s]
- v: Geschwindigkeit im AK: Q_{AK} / A_{AK} [m/s]
- k: Strömungsprofil-Korrekturfaktor: 1.2 für ausgebildete Strömung [-]
- β : Versperrungs-Korrekturfaktor: $\beta = 1/(1-mS/A)$
- m: Wirbel-Expansionsfaktor: 2.84 – 2.07(S/A – 0.1)
- C_{Df}: Widerstandskoeffizient in freier Atmosphäre:
0.91 + 0.023*H/b + (0.045 + 0.01*H/b)*(3-a/b)²
- ρ : Dichte Luft [kg/m³]



Der Widerstandskoeffizient des Klappenantriebs lässt sich direkt aus der Gl. 48 ableiten. Er ist grundsätzlich von Geometrieverhältnissen S/A, H/b und a/b abhängig. Für typische Tunnel zeigt sich jedoch, dass praktisch nur das Versperrungsmass S/A massgebend ist. Für gängige Klappenantriebe in Abluftkanälen kann der Widerstandskoeffizient ζ_{ALK} mit $\zeta_{ALK} * A/S = 1.6$ abgeschätzt werden.

Die Resultate zeigen, dass das Verhältnis des Druckverlustes über die Klappenantriebe zum Gesamtdruckverlust zwischen 10% und 20% beträgt. Klar erkennbar ist die Abhängigkeit vom Versperrungsmass (S/A) und dem Gesamtdruckverlust im Kanal.

Bei Klappenantrieben mit An- und Abströmhauben kann von deutlich geringeren Druckverlusten ausgegangen werden, weil bei den entsprechenden Re_f-Werten das Ablösegebiet deutlich reduziert ist (gemäss [31] wird von einem „quasi Streamline flow“ gesprochen).

Tunnel	Messung Nr.	Geometriedaten						Messdaten			Berechnungen			
		H [m]	a [m]	b [m]	D _{hyd} [m]	A [m ²]	$\Delta L_{ALK-ALK}$ [m]	ρ [kg/m ³]	Q [m ³ /s]	Δp_{rel} Messung [Pa/m]	Δp über Antrieb [Pa]	Δp_{rel} über Antrieb [Pa/m] pro $\Delta L_{ALK-ALK}$	Anteil Δp_{rel} über Antrieb an Δp_{rel} Messung [%]	$\zeta * A/S$ (S = H*b)
San Bernardino	2.2	1.40	0.90	0.75	2.30	11.0	96	1.0	72.8	0.24	4.0	0.04	17	1.9
	2.3							1.0	95.2	0.40	6.8	0.07	18	
	3.4							1.0	77.2	0.26	4.5	0.05	18	
Giswil	4.2	0.80	0.83	0.50	2.45	11.2	75	1.17	69	0.15	1.1	0.01	10	1.4
	4.4							1.16	166	0.79	6.5	0.08	11	
Uetliberg	10.1	0.74	0.70	0.90	3.12	16.7	100	1.17	193	0.28	5.1	0.05	18	1.6
	10.4							1.17	165	0.21	3.7	0.04	17	
Islisberg	15.1	0.74	0.70	0.90	2.12	8.5	100	1.13	90.5	0.47	9.5	0.09	20	1.9
	15.3							1.13	78.1	0.39	7.0	0.07	18	

Tabelle 11: Berechnete Druckverluste der Klappenantriebe an einigen Beispielen

Die Re_f-Zahlen der untersuchten Fällen liegen deutlich über der Anforderung von Re_f > 1*10³ in der Grössenordnung 1*10⁶ – 2*10⁶. Gemäss [31] wird der Druckverlust bei Re_f > 1*10⁵ tendenziell überschätzt. Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die in der Folge erwähnten Werte etwas zu hoch liegen.

II Berechnungsbeispiel

Der Druck und Volumenstrom am Ende des Abluftkanals sowie der Betriebspunkt und die Leistung des Abluftventilators sollen berechnet werden. Es handelt sich um einen Tunnel/Abluftkanal mit einer Lüftungszentrale auf der einen Seite. Auf der anderen Seite sind drei Abluftklappen geöffnet.

Die Randbedingungen sind folgende:

Abluftmenge (Q_0):	150 m ³ /s (durch die offenen Abluftklappen)
Luftdichte (ρ):	1.2 kg/m ³
Anzahl offene Abluftklappen:	3
Summe Bruttoklappenfläche A_{ALK} :	12 m ² (3 Klappen à 4 m ²)
Verlustkoeffizient Abluftklappen (ζ_{ALK}):	2.5 (gemäss Kap. 5.2)
Fläche Abluftkanal (A_{AK}):	12 m ²
Hyd. Durchmesser Abluftkanal (D_{AK}):	2 m
Umfang Abluftkanal (U_{AK}):	24 m ($4 \cdot A_{AK}/D_{hyd}$)
Reibungskoeffizient (λ):	0.017
Effektive Leckagefläche (f^*):	15 mm ² /m ² (= $15 \cdot 10^{-6}$ m ² /m ²)
Länge Abluftkanal (L):	2000 m

K berechnet sich gemäss Gl. 13:

$$K = 8 \cdot \lambda \cdot f^{*2} \cdot \left(\frac{L \cdot U}{4 \cdot A_{AK}} \right)^3 = 8 \cdot 0.017 \cdot \left(\frac{15}{10^6} \right)^2 \cdot \left(\frac{2000 \cdot 24}{4 \cdot 12} \right)^3 = 0.031$$

Π_0 berechnet sich gemäss Gl. 14:

$$\Pi_0 = \frac{\Delta p_{stat0}}{\rho \cdot u_{AK0}^2} = 1 + \frac{\zeta_{ALK} \cdot A_{AK}^2}{A_{ALK}^2} = 1 + \frac{2.5 \cdot 12^2}{12^2} = 3.5$$

Mit Π_0 berechnet sich \bar{t} gemäss Gl. 15:

$$\bar{t} = 2 \cdot \sqrt{\Pi_0} \left(\frac{f^*}{\lambda} \right)^{1/3} = 2 \cdot \sqrt{3.5} \left(\frac{15 \cdot 10^{-6}}{0.017} \right)^{1/3} = 0.36$$

Mit $K = 0.031$ und $\bar{t} = 0.36$ lässt sich aus Abbildung 26 ein dimensionsloses Massenverhältnis ω von 1.2 ablesen. Gl. 12 umgeformt ergibt den Volumenstrom am Ende des Abluftkanals.

$$Q_1 = \omega \cdot Q_2 = 1.2 \cdot 150 = 180 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Der Druckverlust über dem Abluftkanal resp. der Unterdruck am Ende des Abluftkanals berechnet sich gemäss Gl. 16:

$$p_{stat1} = \frac{\rho \cdot u_{AK0}^2}{2} \left(\frac{\lambda}{8 \cdot f^*} (\omega^3 - 1) + \Pi_0^{3/2} \right)^{2/3} = \frac{\rho \cdot Q_0^2}{2 \cdot A_{AK}^2} \left(\frac{0.017}{8 \cdot 15 \cdot 10^{-6}} (\omega^3 - 1) + 3.5^{3/2} \right)^{2/3} = 2150 \text{ Pa}$$

III Messprotokolle

Erläuterungen zum Messprotokoll

1 – Kopfzeile

Wichtige Grunddaten zur Messung

Nr.	Nr. der Messung in chronologischer Reihenfolge.
Tunnel	Name des Tunnels, in dem die Messung durchgeführt wurde.
Röhre	Röhre, in der die Messung durchgeführt wurde.
Abschnitt	Abschnitt der Röhre, in der die Messung durchgeführt wurde (z.B. bei Tunneln mit LZ in der Mitte).
Datum	Datum, an dem die Messung durchgeführt wurde.
Messbericht	Name des definitiven Messberichtes vom Messinstitut.

2 – Angaben zum Objekt

Wichtige Angaben zur Messung

Alter / Typ	Alter des Tunnels bei der Messung inkl. Angaben zu baulichen Massnahmen, die im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt entscheidend sind. Angabe zum Typ (Typ A oder B) gemäss Kap. 2.1.
Anzahl / Pos. LZ	Anzahl und Positionierung (L, T oder U gemäss Tabelle 1) der Lüftungszentrale.
Länge Tunnel	Gesamte Länge der Tunnelröhre, in der die Messung durchgeführt wurde (Portal zu Portal).
Länge AK	Länge des Abluftkanals, in dem die Messung durchgeführt wurde (gesamtes aerodynamisch verbundenes Kanalsystem).
Querschnitt AK	Querschnittsfläche des Abluftkanals (bei variablen Querschnitten Angabe der jeweiligen Querschnitte mit den entsprechenden Längen).
D _{hyd} AK	Hydraulischer Durchmesser des Abluftkanals (bei variablen Durchmessern Angabe der jeweiligen Durchmesser mit den entsprechenden Längen).
Anzahl ALK	Gesamte Anzahl Abluftklappen im Abluftkanal, in dem die Messung durchgeführt wurde (über die Länge AK).
Distanz ALK zu ALK	Distanz der Abluftklappen. Vermerk bei unterschiedlichen Distanzen, z.B. bei Punktabsaugung.
Hersteller, Typ	Hersteller und Typ der Abluftklappen.
Bruttofläche ALK	Gesamte Fläche innerhalb des Klappenrahmens (nur der die Lamellen umhüllende Teil)
Abdichtung AK	Angaben bezüglich bauseitiger Abdichtung (insbesondere Quer- und Längsfugen). Wenn möglich mit Angaben zu Produkten, Konstruktion etc.
Allg. Bemerkungen	Weitere im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt wichtige Angaben (z.B. Mannlöcher, Entwässerungen, Kabeldurchführungen etc.)

3 – Messprogramm

Beschreibung des Messprogramms

Messung Nr.	Bezeichnung der Messung: Erste Zahl entspricht der Nr. der Messung aus „1 – Header“, zweite Zahl ist eine Laufnummer.
ALK offen	Benennung der geöffneten Abluftklappen (Anzahl und Position/Bezeichnung).
Abluftventilatoren	Beschreibung, wie die Abluftventilatoren bei den einzelnen Messungen betrieben wurden (mit Angabe zu Stufe, Schaufelwinkel oder Drehzahl).
Bemerkungen	Weitere Angaben zu den einzelnen Messungen.

4 – Resultate

Beschreibung des Messprogramms

Messung Nr.	Bezeichnung der Messung: Erste Zahl entspricht der Nr. der Messung aus „1 – Header“, zweite Zahl ist eine Laufnummer.
M1, M2, M3 & M4	Angabe der Messwerte bei den einzelnen Messstellen (M1 = Messstelle 1). Die Messwerte sind Luftdichte, statischer Unterdruck im Abluftkanal gegenüber der Fahrbahn und Volumenstrom.

5 – Bemerkungen

Weitere, übergeordnete Angaben zu der Messung.

1 – Header

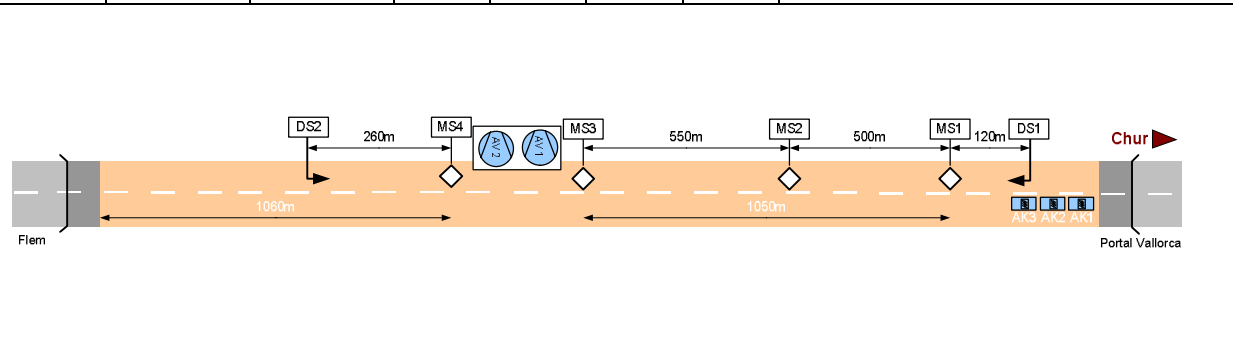
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
1	Flimserstein	-	Ost	22.08.07	HP-07640

2 – Angaben zum Objekt

Alter	Neubau	Eröffnung
Anzahl / Pos. LZ	1 / „T“	90°-Umlenkung von AK zur LZ
Länge Tunnel	2922 m	
Länge AK	2300 m	
Querschnitt AK	11.45 m ²	
D _{hyd} AK	2.4 m	
Anzahl ALK	26 St.	
Distanz ALK zu ALK	100 m	Punktabsaugung Seite Vallorca, 3 ALK auf 20 m
Hersteller, Typ	Sirocco	
Bruttofläche ALK	4.93 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: Combiflex, Längsfugen: unbekannt, visuelle Beurteilung: gut	
Allg. Bemerkungen	Mannlöcher für Zugang in den AK bei den Ausstellnischen in schwacher Ausführung. Je ein Mannloch auf der Messstrecke MS1-MS2 und MS4.	

3 – Messprogramm

Messung Nr.	ALK offen		Abluftventilatoren				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
1.1	3	1,2 & 3	100%	100%	-	-	
1.2	3	1,2 & 3	80%	80%	-	-	
1.3	3	1,2 & 3	100%	100%			Testmessung zur Verifikation von Nr. 1.1



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
1.1	1.08	562	189.5	1.08	1'096	203.8	1.07	1'642	208.5	1.07	1'639	8.5
1.2	1.09	429	163.3	1.08	840	177.8	1.07	1'256	184.2	1.07	1'254	6.9
1.3	1.09	568	185.8	1.08	1'104	203.7	1.07	1'652	208.1	1.07	1'593	8.6

5 – Bemerkungen

- MS1 mit NDIR, MS2 – MS4 mit IR-PAS
- nachträgliche Korrektur der Messergebnisse
- nicht verwendbare Messungen: keine

1 – Header

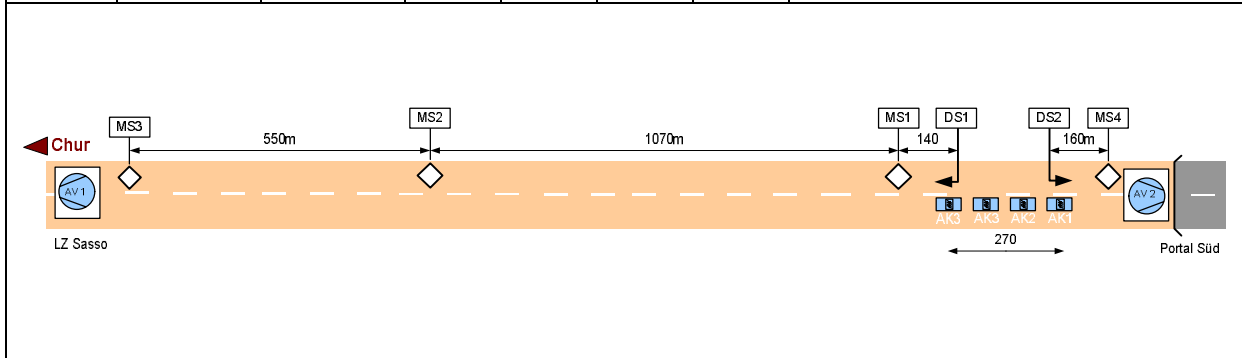
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
2	San Bernardino	-	Süd	09.10.07	HP-07641

2 – Angaben zum Objekt

Alter	40-jährig	Eröffnung 1967, Sanierung 1991 – 2006
Anzahl / Pos. LZ	2 / „U“	je Abschnitt
Länge Tunnel	6600 m	gesamte Tunnellänge
Länge AK	2200 m	Abschnitt Süd – Sasso
Querschnitt AK	11 m ²	
D _{hyd} AK	2.37 m	
Anzahl ALK	ca. 17St.	im Abschnitt Süd
Distanz ALK zu ALK	96 m	
Hersteller, Typ	Sirocco, 2030 x 2385 mm	asymmetrisch, mit Mittelsteg, ohne Anströmhaube
Bruttofläche ALK	4.84 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: Combiflex, Längsfugen: unbekannt, visuelle Beurteilung: sehr schlecht (sehr viele offene Kabeldurchführungen, schlecht verschlossene Lüftungsschlitze etc.)	
Allg. Bemerkungen	Tunnel besteht aus 3 getrennten Abluftkanälen (Süd, Mitte Nord). Im AK sind viele Einbauten vorhanden.	

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Stufe)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
2.1	4	1,2, 3 & 4	2	1	-	-	S1
2.2	4	1,2, 3 & 4	3	2	-	-	S2
2.3	4	1,2 & 3	4	4	-	-	S3
2.4	1	1	4	-	-	-	S4, DS1 ausser Betrieb



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	P [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
2.1	1.00	43	36.1	1.00	153	46.4	1.00	222	53.9	1.01	60	45.8
2.2	1.00	84	52.4	1.00	287	67.2	1.00	420	78.4	1.01	103	62.8
2.3	1.00	159	68.0	1.00	487	87.8	0.99	709	102.6	1.02	385	124.3
2.4	1.00	225	62.1	1.00	533	84.1	1.00	747	99.4			

5 – Bemerkungen

<ul style="list-style-type: none"> ▪ MS1 mit NDIR, MS2 – MS4 mit IR-PAS ▪ nachträgliche Korrektur der Messergebnisse ▪ nicht verwendbare Messungen: keine
--

1 – Header

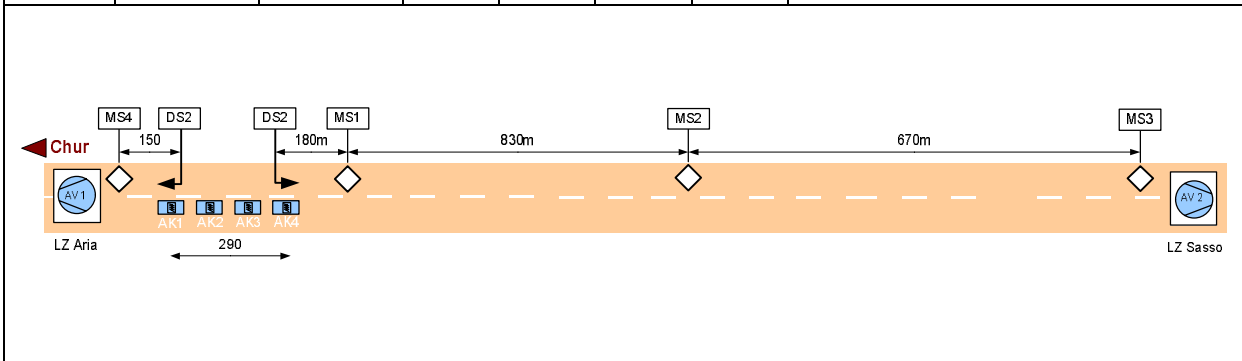
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
3	San Bernardino	-	Mitte	10.10.07	HP-07641

2 – Angaben zum Objekt

Alter	40-jährig	Eröffnung 1967, Sanierung 1991 – 2006
Anzahl / Pos. LZ	2 / „U“	je Abschnitt
Länge Tunnel	6600m	gesamte Tunnellänge
Länge AK	2200m	Abschnitt Sasso – Aria
Querschnitt AK	11 m ²	
D _{hyd} AK	2.37 m	
Anzahl ALK	ca. 17 St.	im Abschnitt Süd
Distanz ALK zu ALK	96 m	
Hersteller, Typ	Sirocco, 2030 x 2385 mm	asymmetrisch, mit Mittelsteg
Bruttofläche ALK	4.84 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: Combiflex, Längsfugen: unbekannt, visuelle Beurteilung: sehr schlecht, aber etwas besser als der Abschnitt Süd (sehr viele offene Kabeldurchführungen, schlecht verschlossene Lüftungsschlitze etc.)	
Allg. Bemerkungen	Tunnel besteht aus 3 getrennten Abluftkanälen (Süd, Mitte Nord). Im AK sind viele Einbauten vorhanden.	

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Stufe)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
3.1	4	1,2, 3 & 4	1	2	-	-	M1
3.2	4	1,2, 3 & 4	2	3	-	-	M2
3.3	4	1,2 & 3	4	4	-	-	M3
3.4	1	1	-	4	-	-	M4, DS1 ausser Betrieb
3.5	1	1	-	3	-	-	M5



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
3.1	1.00	48	44.6	1.00	128	48.1	1.00	205	55.9	1.01	82	56.5
3.2	1.00	90	61.2	1.00	239	67.9	0.99	395	77.8	1.01	129	70.6
3.3	1.00	162	78.4	0.99	393	86.4	0.99	663	102.1	1.01	426	129.1
3.4	1.00	266	72.1	0.99	482	82.2	0.99	731	82.2			
3.5	1.00	159	53.4	1.00	290	64.4	0.99	435	75.8			

5 – Bemerkungen

- MS1 mit NDIR, MS2 – MS4 mit IR-PAS
- nachträgliche Korrektur der Messergebnisse
- nicht verwendbare Messungen: keine

1 - Header

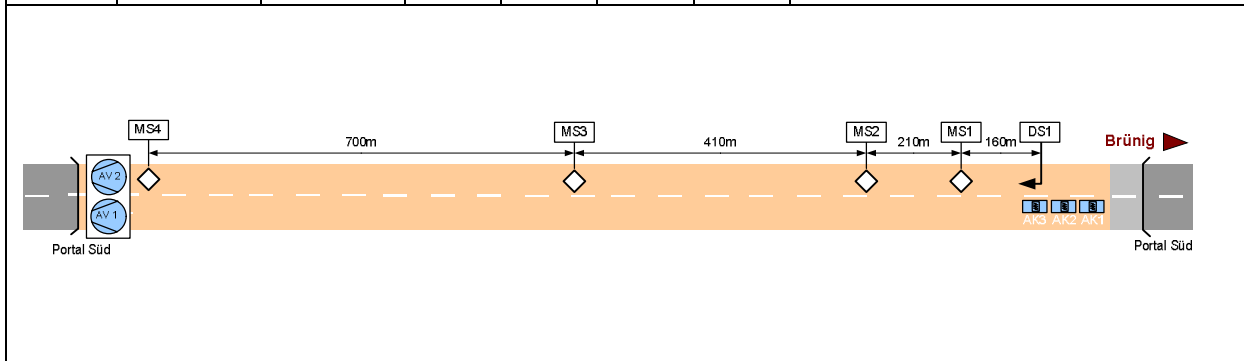
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
4	Giswil	-	-	16.01.08	HP-08663

2 - Angaben zum Objekt

Alter	3-jährig	Eröffnung 2004
Anzahl / Pos. LZ	1, „L“	
Länge Tunnel	2066 m	
Länge AK	1565 m	
Querschnitt AK	11.2 m ²	
D _{hyd} AK	2.45 m	
Anzahl ALK	ca. 28 St.	im Abschnitt Süd
Distanz ALK zu ALK	75 m	
Hersteller, Typ	Sirocco, 1584 x 1511 mm	asymmetrisch, ohne Mittelsteg
Bruttofläche ALK	2.39 m ²	
Abdichtung AK	Quer- und Längsfugen: Dichtungsband, Fabrikat unbekannt, visuelle Beurteilung: sehr gut (optisch keine Leckagen sichtbar)	
Allg. Bemerkungen		

3 - Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Stufe)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
4.1	4	1,2 & 3	25%	25%			
4.2	4	1,2 & 3	50%	50%			
4.3	4	1,2 & 3	75%	75%			
4.4	1	1,2 & 3	100%	100%			
4.5	1	1 & 2	50%	50%			



4 - Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
4.1	(1.17)	(40)	(38.2)	1.17	51	38.3	1.17	73	39.1	1.18	110	39.2
4.2	(1.17)	(117)	(67.6)	1.17	146	67.6	1.17	210	67.8	1.18	315	69.7
4.3	(1.17)	(263)	(100.3)	1.17	321	101.6	1.17	461	102.9	1.17	688	106.0
4.4	(1.17)	(646)	(155.6)	1.17	790	158.3	1.16	1123	162.5	1.16	1675	169.3
4.5	(1.17)	(168)	(75.6)	(1.17)	(207)	(78.4)	(1.17)	(295)	(81.7)	(1.18)	(438)	(83.2)

() -> ignorierte Messungen

5 - Bemerkungen

- MS1 mit NDIR, MS2 – MS4 mit IR-PAS
- nachträgliche Korrektur der Messergebnisse
- Nicht verwendbare Messungen: Messstrecke MS1-MS2 bei Messung 5

1 – Header

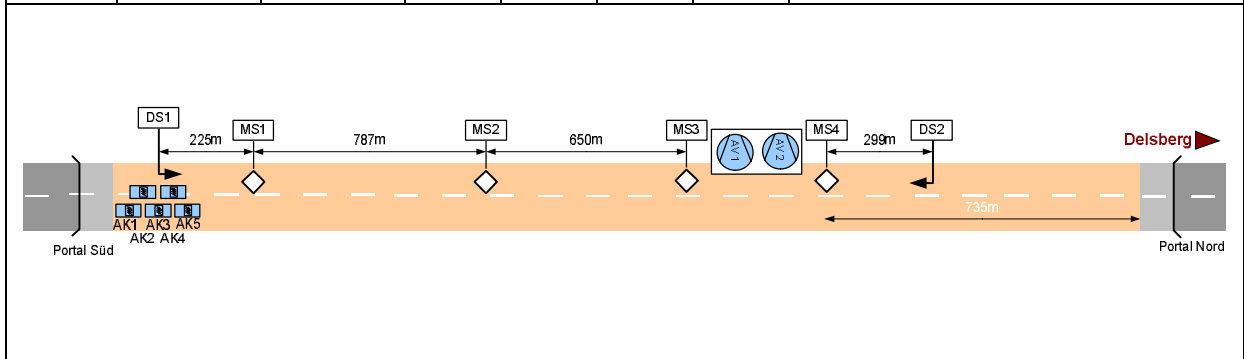
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
5	Raimeux	-	-	20.02.08	HP-08663

2 – Angaben zum Objekt

Alter	<1 Jahr	Eröffnung 2004
Anzahl / Pos. LZ	1, „T“	
Länge Tunnel	3211 m	
Länge AK	2658 m	
Querschnitt AK	9.91 m ²	
D _{hyd} AK	2.36 m	
Anzahl ALK	ca. 57 St.	im Abschnitt Süd
Distanz ALK zu ALK	50 m	
Hersteller, Typ	Sirocco, TRD 1217 x 2000 mm	asymmetrisch, ohne Mittelsteg
Bruttofläche ALK	2.13 m ²	
Abdichtung AK	Längsfugen: kein Dichtungsband kanalseitig, Querfugen: keine vorhanden (Decke ist durchbetoniert), visuelle Beurteilung: gut	
Allg. Bemerkungen	alle 50 m Entwässerungsbohrungen (φ = 30 mm)	

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Stufe)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
5.1	5	1 – 5	40%	40%			
5.2	5	1 – 5	100%	100%			
5.3	5	1 – 5	80%	80%			
5.4	5	1 – 5	60%	60%			



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
5.1	1.19	113	66.8	1.18	280	73.8	1.18	412	78.7	1.18	413	3.3
5.2	1.19	615	145.2	1.17	1'536	163.5	1.16	2287	178.2	1.16	2299	10.1
5.3	1.19	434	121.8	1.17	1043	131.4	1.17	1602	144.0	1.17	1609	7.7
5.4	1.19	217	86.7	1.18	541	93.6	1.18	799	102.6	1.18	804	4.9

5 – Bemerkungen

- alle MS mit IR-PAS
- Nicht verwendbare Messungen: keine
- Einige Meter südlich von der MS3 wurde eine Punktmessung mit je einem Prandtl-Rohr (PR) und einem Flügelrad (FR) durchgeführt. Die Resultate sind folgende:

Messung Nr. 5.1 (PR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 69.9 m ³ /s	Messung Nr. 5.1 (FR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 72.8 m ³ /s
Messung Nr. 5.2a (PR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 165.3 m ³ /s	Messung Nr. 5.2a (FR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 175.3 m ³ /s
Messung Nr. 5.2b (PR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 165.8 m ³ /s	Messung Nr. 5.2b (FR, $y = 0.119 \cdot h$): 166.9 m ³ /s
Messung Nr. 5.3 (PR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 135.6 m ³ /s	Messung Nr. 5.3 (FR, $y = 0.119 \cdot h$): 138.8 m ³ /s
Messung Nr. 5.4 (PR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 97.2 m ³ /s	Messung Nr. 5.4 (FR, $y = 0.119 \cdot h$): 97.2 m ³ /s

1 – Header

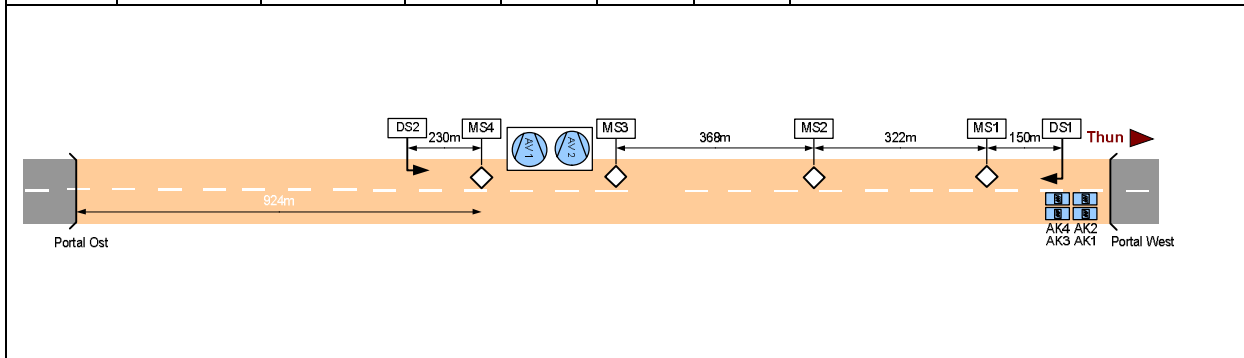
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
6	Leissigen	-	-	24.04.08	HP-08689

2 – Angaben zum Objekt

Alter	14 Jahr	Eröffnung 1994
Anzahl / Pos. LZ	1, „T“	
Länge Tunnel	2200 m	
Länge AK	2200 m	
Querschnitt AK	9.45 m ²	
D _{hyd} AK	2.34 m	
Anzahl ALK	ca. 42 St.	Paarweise Anordnung
Distanz ALK zu ALK	46 m	
Hersteller, Typ	unbekannt, ca. 1900 x 1300 mm	Schwenklappen
Bruttofläche ALK	2.5 m ²	
Abdichtung AK	Längs- und Querfugen: Abdichtung vorhanden, Produkt unbekannt, visuelle Beurteilung: Kanal gut, Klappen schlecht	
Allg. Bemerkungen	Abluftkanal ist von der Konstruktion und Ausrüstung her nicht mit heutigen Kanälen vergleichbar	

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Drehzahl in 1/min)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV 2	AV 3	AV 4	
6.1	4	1 – 4	400	400			
6.2	4	1 – 4	750	750			
6.3	4	1 – 4	700	700			
6.4	4	1 - 4	600	600			
6.5	4	1 – 4	500	500			



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
6.1	1.18	33	36.6	1.17	52	37.8	1.16	94	39.5	1.16	94	41.2
6.2	1.18	162	82.1	1.17	296	87.0	1.16	469	93.1	1.15	464	13.5
6.3	1.18	147	79.3	1.17	266	86.9	1.16	423	93.1	1.15	422	11.7
6.4	1.18	113	69.6	1.17	205	73.3	1.16	328	80.0	1.16	327	9.9
6.5	1.18	85	59.6	1.17	152	60.8	1.16	246	62.6	1.16	244	8.4

5 – Bemerkungen

- alle MS mit IR-PAS
- Bei Messung Nr. 6.1 war ALK bei DS 2 offen
- Nicht verwendbare Messungen: Messstrecke DS2-MS4 der Messung 1
- Punktmessung mit Flügelradanemometer einige Meter westlich von MS3

1 – Header

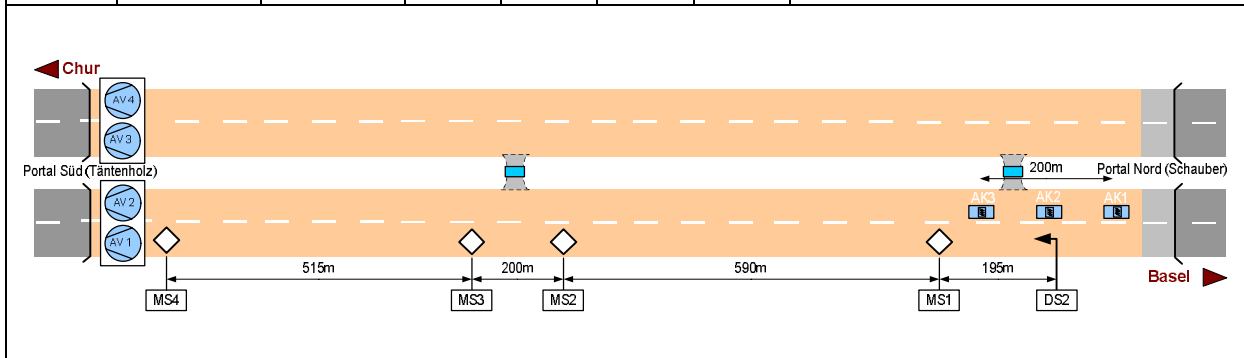
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
7	Aescher	Basel	-	17.06.08	HP-08717

2 – Angaben zum Objekt

Alter	neu	Eröffnung 2008
Anzahl / Pos. LZ	1, „L“	LZ beim Südportal
Länge Tunnel	2142 m	
Länge AK	1719 m	
Querschnitt AK	10.15 m ²	
D _{hyd} AK	2.06 m	
Anzahl ALK	17 St.	
Distanz ALK zu ALK	100 m	
Hersteller, Typ	Sirocco, TRD 2400 x 2188 mm	asymmetrisch, mit Mittelsteg
Bruttofläche ALK	5.25 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: PROOFMATE®FD Fugenbänder, Längsfugen: Produkt unbekannt, visuelle Beurteilung: schlecht (Dichtungsbänder und Brandabschottungen wurden weggerissen)	
Allg. Bemerkungen	Im Abluftkanal sind über der gesamten Länge zwei Reihen Hängestangen montiert	

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Stufe)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
7.1	3	1, 2 & 3	50%	50%			
7.2	3	1, 2 & 3	75%	75%			
7.3	3	1, 2 & 3	100%	100%			



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
7.1	1.16	186	89.9	1.15	456	92.6	1.15	525	95.0	1.14	863	108.4
7.2	1.15	305	118.0	1.15	742	121.7	1.14	857	123.7	1.13	1'417	141.5
7.3	1.15	513	152.2	1.14	1'241	158.1	1.14	1439	159.3	1.12	2'444	189.6

5 – Bemerkungen

- alle MS mit IR-PAS
- Nicht verwendbare Messungen: Messstrecke MS3-MS4 für alle Messungen
- Probleme mit Brandabschottungen und Dichtungsbändern
- Einige Meter nördlich von der MS4 wurde eine Punktmessung mit einem Flügelrad (FR) durchgeführt. Die Resultate sind folgende:
 - Messung Nr. 7.1 (FR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 127 m³/s
 - Messung Nr. 7.2 (FR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 163 m³/s
 - Messung Nr. 7.3 (FR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 223 m³/s

1 – Header

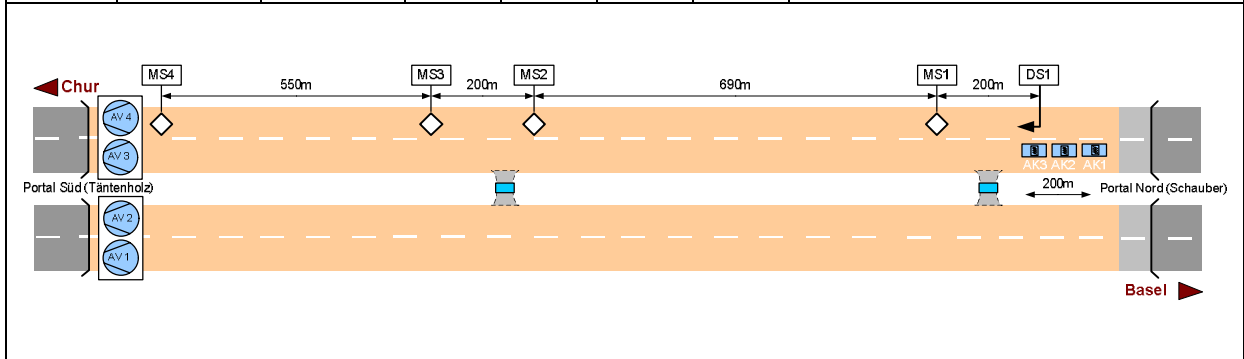
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
8	Aescher 1	Chur	-	17.06.08	HP-08717

2 – Angaben zum Objekt

Alter	neu	Eröffnung 2008
Anzahl / Pos. LZ	1, „L“	LZ beim Südportal
Länge Tunnel	2175 m	
Länge AK	1774 m	
Querschnitt AK	10.15 m ²	
D _{hyd} AK	2.06 m	
Anzahl ALK	19 St.	
Distanz ALK zu ALK	100 m	Punktabsaugung Seite Nord (3 ALK auf 20 m)
Hersteller, Typ	Sirocco, TRD 2400 x 2188 mm	asymmetrisch, mit Mittelsteg
Bruttofläche ALK	5.25 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: PROOFMATE®FD Fugenbänder, Längsfugen: unbekannt, visuelle Beurteilung: schlecht (Dichtungsbänder und Brandabschottungen wurden weggerissen)	
Allg. Bemerkungen		

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Stufe)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
8.1	3	1, 2 & 3	50%	50%			
8.2	3	1, 2 & 3	75%	75%			
8.3	3	1, 2 & 3	100%	100%			



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
8.1	1.15	236	98.8	1.15	508	101.3	1.15	634	106.2	1.14	841	114.2
8.2	1.15	389	126.6	1.14	677	133.3	1.14	812	141.4	1.14	1'386	146.3
8.3	1.15	671	165.3	1.14	1'489	175.2	1.13	1'653	188.3	1.12	2'405	198.7

5 – Bemerkungen

- alle MS mit IR-PAS
- Nicht verwendbare Messungen: Messstrecke MS2-MS3 für alle Messungen
- Probleme mit Brandabschottungen und Dichtungsbändern
- Einige Meter nördlich von der MS4 wurde eine Punktmessung mit einem Flügelrad (FR) durchgeführt. Die Resultate sind folgende:
 - Messung Nr. 8.1 (FR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 119 m³/s
 - Messung Nr. 8.2 (FR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 155 m³/s
 - Messung Nr. 8.3 (FR, $y = 0.119 \cdot D_{hyd}$): 206 m³/s

1 – Header

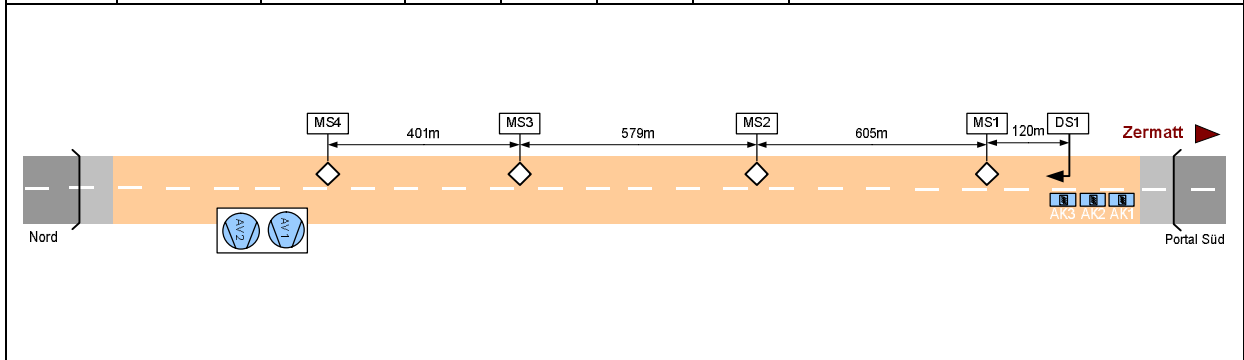
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
9	Stägjitschuggen	-	-	23.09.08	HP-08734

2 – Angaben zum Objekt

Alter	neu	Eröffnung 11.2008
Anzahl / Pos. LZ	1 / „T“	2 Schenkel (Schenkel Nord: 80 m und Schenkel Süd 1785 m)
Länge Tunnel	2302 m	
Länge AK	1938 m	
Querschnitt AK	12.42 m ²	
D _{hyd} AK	2.96 m	
Anzahl ALK	24 St.	
Distanz ALK zu ALK	100 m	Punktabsaugung Seite Nord und Süd (3 ALK auf 20m)
Hersteller, Typ	Sirocco, TRD 2970 x 2020 mm	asymmetrisch, mit Mittelsteg, ALK mit Anströmhaube
Bruttofläche ALK	6.0 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: PROOFMATE®FD Fugenbänder, Längsfugen: PROOFMATE®FD Fugenbänder, visuelle Beurteilung: gut	
Allg. Bemerkungen	Männlöcher für den Aufstieg in den Abluftkanal bei den Ausstellnischen (2x zwischen MS1/M2 und 1x zwischen MS2/MS3)	

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Stufe)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
9.1	3	1 – 3	100%	100%			
9.2	3	1 – 3	87.5%	87.5%			
9.3	3	1 – 3	75%	75%			
9.4	3	1 – 3	62.5%	62.5%			
9.5	3	1 – 3	50%	50%			
9.6	1	3	100%	100%			



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
9.1	1.10	542	232.8	1.09	1'299	250.6	1.08	1'874	262.7	1.08	2'234	271.0
9.2	1.11	408	202.7	1.09	982	216.7	1.08	1'409	222.7	1.08	1'692	228.7
9.3	1.10	303	174.6	1.09	731	179.9	1.09	1'046	187.4	1.09	1'255	195.3
9.4	1.10	208	144.0	1.09	500	151.3	1.09	715	156.6	1.09	856	160.0
9.5	1.10	166	128.6	1.09	406	133.5	1.09	573	139.2	1.09	686	141.8
9.6	1.08	1'208	215.5	1.07	1'866	224.9	1.07	2'368	241.3	1.07	2'694	250.2

5 – Bemerkungen

<ul style="list-style-type: none"> ▪ alle MS mit IR-PAS ▪ Nicht verwendbare Messungen: keine
--

1 – Header

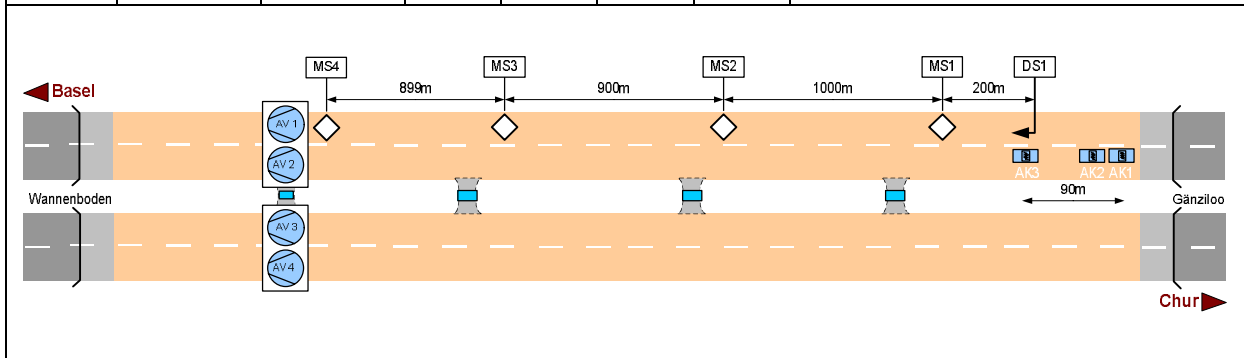
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
10	Uetliberg	Basel	Ost	22.10.08	HP-08735

2 – Angaben zum Objekt

Alter	neu	Eröffnung 04.2009
Anzahl / Pos. LZ	1, „T“	
Länge Tunnel	4439 m	
Länge AK	3096 m	Abschnitt Ost
Querschnitt AK	16.7 / 12.0 m ²	mehrheitlich grosser QS, auf ca. 300 m kleiner QS
D _{hyd} AK	3.12 / 2.43	analog QS
Anzahl ALK		
Distanz ALK zu ALK	100 m	am Ende des AK 2 ALK auf 20 m
Hersteller, Typ	Sirocco, TRD 2400 x 2188 mm	asymmetrisch, mit Mittelsteg, ALK ohne Anströmhaube
Bruttofläche ALK	5.25 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: Combiflex, Längsfugen: keine Dichtungsbänder kanalseitig, visuelle Beurteilung: gut	
Allg. Bemerkungen		

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Grad)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
10.1	3	1 – 3	-18°	-18°			
10.2	3	1 – 3	-20°	-20°			
10.3	3	1 – 3	-23°	-23°			
10.4	3	1 – 3	-26°	-26°			
10.5	3	1 – 3	-18°	-18°			zw. MS1/MS4 3 Verbindungsklappen offen



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
10.1	1.17	395	191	1.16	675	196	1.15	970	205	1.14	1'495	219
10.2	1.18	342	178	1.16	581	183	1.15	835	193	1.14	1'285	205
10.3	1.18	307	167	1.16	519	173	1.15	748	182	1.15	1'148	193
10.4	1.18	256	151	1.17	432	161	1.16	623	169	1.15	953	185
10.5	1.18	307	162.9	1.17	521	171.9	1.16	749	185.7	1.15	1'340	226

5 – Bemerkungen

- alle MS mit IR-PAS
- Nicht verwendbare Messungen: Messstrecke MS3 – MS4 für Messungen 5

1 – Header

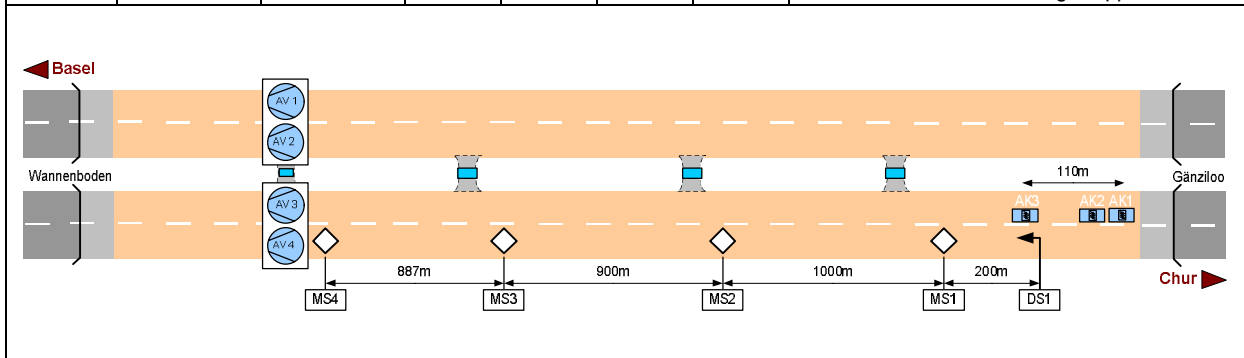
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
11	Uetliberg	Chur	Ost	23.10.08	HP-08735

2 – Angaben zum Objekt

Alter	neu	Eröffnung 04.2009
Anzahl / Pos. LZ	1, „T“	
Länge Tunnel	4499 m	
Länge AK	3110 m	Abschnitt Ost
Querschnitt AK	16.7 / 12.0 m ²	mehrheitlich grosser QS, auf ca. 900 m kleiner QS
D _{hyd} AK	3.12 / 2.43	analog QS
Anzahl ALK		
Distanz ALK zu ALK	100 m	am Ende des AK 2 ALK auf 20 m
Hersteller, Typ	Sirocco, TRD 2400 x 2188 mm	asymmetrisch, mit Mittelsteg, ALK ohne Anströmhaube
Bruttofläche ALK	5.25 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: Combiflex, Längsfugen: keine Dichtungsbänder kanalseitig, visuelle Beurteilung: gut	
Allg. Bemerkungen		

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Grad Schaufelwinkel)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
11.1	3	1 – 3	-	-	-18°	-18°	
11.2	3	1 – 3			-24°	-24°	
11.3	3	1 – 3			-27°	-27°	
11.4	3	1 – 3			-14°	-14°	
11.5	3	1 – 3			-20°	-20°	
11.6		1 – 3			-14°	-14°	zw. MS1/MS4 3 Verbindungsklappen offen



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
11.1	1.20	458	170.8	1.17	892	177.3	1.16	1'153	196	1.15	1'720	207
11.2	1.20	339	146.6	1.18	666	154.0	1.17	855	169.3	1.16	1'274	179.1
11.3	1.20	280	132.0	1.18	554	141.5	1.17	710	152.0	1.16	1'057	162.1
11.4	1.20	528	182.4	1.17	1'033	200.6	1.16	1'341	211	1.15	2'006	226
11.5	1.20	417	161.9	1.18	817	167.3	1.16	1'053	177.2	1.15	1'574	199
11.6	1.20	407	160.7	1.18	794	175.7	1.16	1'025	193.8	1.15	1'780	234

5 – Bemerkungen

- alle MS mit IR-PAS
- Nicht verwendbare Messungen: Messstrecke MS3 – MS4 für Messungen 6

1 – Header

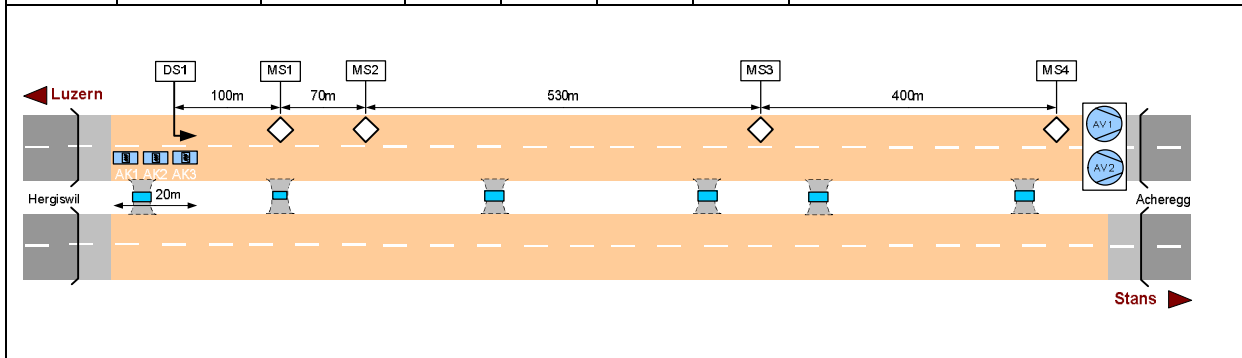
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
12	Kirchenwald	Nord	-	03.12.08	HP-08753

2 – Angaben zum Objekt

Alter	neu	18. Dezember 2008
Anzahl / Pos. LZ	1, „L“	
Länge Tunnel	1530 m	
Länge AK	1185 m	
Querschnitt AK	13 m ²	in einigen Bereichen grösser (Verzweigung)
D _{hyd} AK	2.69 m	
Anzahl ALK	16	
Distanz ALK zu ALK	100 m	am Ende des AK 3 ALK auf 20 m
Hersteller, Typ	Sirocco, TRD 2040 x 2592 mm	asymmetrisch, ohne Mittelsteg und ohne Einbaurahmen
Bruttofläche ALK	5.29 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: Dichtungsbänder vorhanden, Längsfugen: keine Dichtungsbänder kanalseitig, visuelle Beurteilung: gut	
Allg. Bemerkungen	Querverbindungen zu der Nachbarröhre	

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Stufe)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
11.1	3	1 – 3	100%	100%	-	-	alle VK zu
11.2	3	1 – 3	90%	90%	-	-	alle VK zu
11.3	3	1 – 3	80%	80%	-	-	alle VK zu
11.4	3	1 – 3	100%	0%	-	-	alle VK zu
11.5	1	1	100%	100%	-	-	alle VK zu



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
11.1	1.18	446	203.7	1.18	515	210.9	1.16	1'073	218	1.16	1'447	225.0
11.2	1.18	366	184.6	1.18	421	192.5	1.17	879	197.5	1.16	1'187	204.0
11.3	1.19	292	164.5	1.18	336	170.4	1.17	701	175.6	1.17	948	181.7
11.4	1.19	133	108.2	1.19	152	112.9	1.17	320	116.1	1.17	429	120.1
11.5	1.17	1'287	182.4	1.17	1'348	187.5	1.16	1'820	193.9	1.15	2'150	213.0

5 – Bemerkungen

- alle MS mit IR-PAS
- Nicht verwendbare Messungen: Messstrecke MS1 – MS2 bei allen Messungen und Messstrecke MS3 – MS4 bei Messung 5

1 - Header

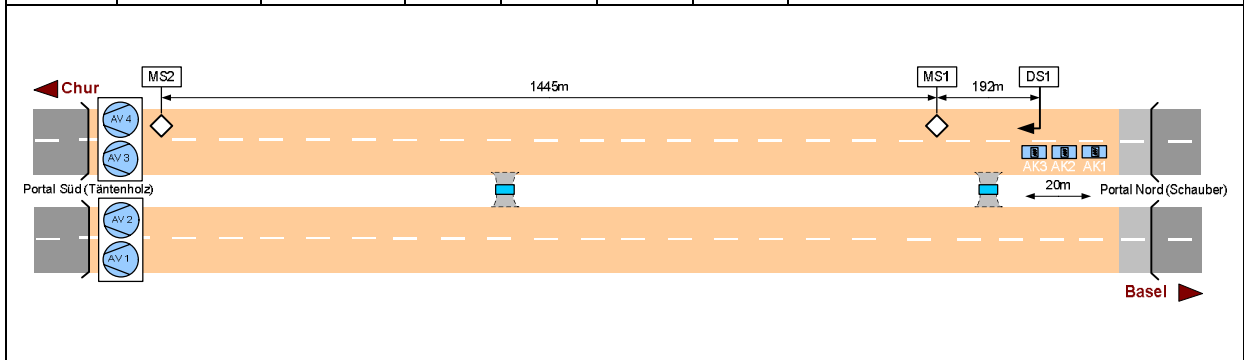
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
13	Aescher	Chur	-	17.03.09	HP-09782

2 - Angaben zum Objekt

Alter	neu	Eröffnung 2008
Anzahl / Pos. LZ	1 / „L“	
Länge Tunnel	2175 m	
Länge AK	1774 m	
Querschnitt AK	10.15 m ²	
D _{hyd} AK	2.06 m	
Anzahl ALK	19 St.	
Distanz ALK zu ALK	100 m	Punktabsaugung Seite Nord (3 ALK auf 20 m)
Hersteller, Typ	Sirocco, TRD 2400 x 2188 mm	asymmetrisch, mit Mittelsteg
Bruttofläche ALK	5.25 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: Combiflex, Längsfugen: unbekannt, visuelle Beurteilung: mittelmässig	
Allg. Bemerkungen		

3 - Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Grad Schaufelwinkel)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
13.1	3	1, 2 & 3			-18°	-18°	
13.2	3	1, 2 & 3			-18°		„Redundanzfall“
13.3	2	2 & 3			-18°	-18°	
13.4	2	2 & 3			-23°	-23°	



4 - Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
13.1	1.19	870	183	1.16	2'958	212.4						
13.2	1.19	316	107.1	1.18	1'056	124.2						
13.3	1.18	996	180.2	1.16	3'029	230.0						
13.4	1.19	775	160.5	1.17	2'352	200.3						

5 - Bemerkungen

- alle MS mit IR-PAS
- Nicht verwendbare Messungen: keine
- Wiederholung der Messung nach Abdichtung vom 17.06.2008

1 - Header

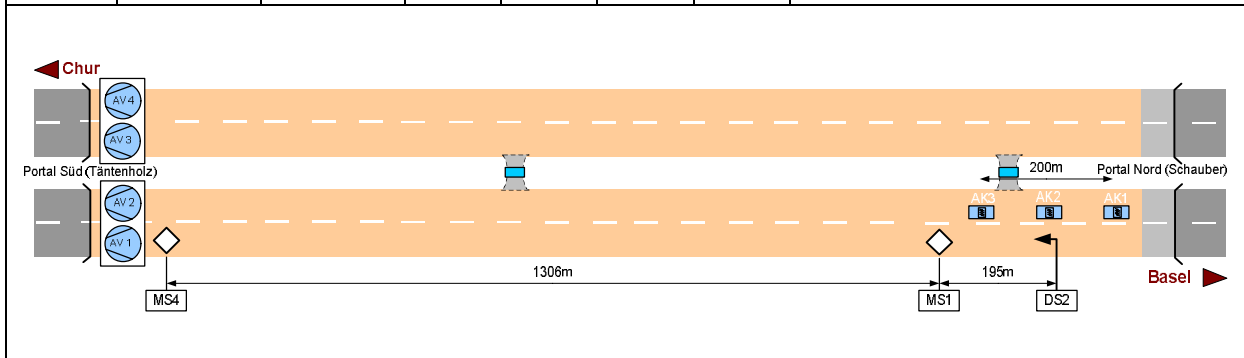
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
14	Aescher 2	Basel	-	17.03.09	HP-09782

2 - Angaben zum Objekt

Alter	neu	Eröffnung 2008
Anzahl / Pos. LZ	1 / „L“	
Länge Tunnel	2142 m	
Länge AK	1719 m	
Querschnitt AK	10.15 m ²	
D _{hyd} AK	2.06 m	
Anzahl ALK	17 St.	
Distanz ALK zu ALK	100 m	
Hersteller, Typ	Sirocco, TRD 2400 x 2188 mm	asymmetrisch, mit Mittelsteg und Mannloch
Bruttofläche ALK	5.25 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: Combiflex, Längsfugen: unbekannt, visuelle Beurteilung: mittelmässig	
Allg. Bemerkungen	Im Abluftkanal sind über der gesamten Länge zwei Reihen Hängestangen montiert	

3 - Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren (Grad Schaufelwinkel)				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
14.1	3	1, 2 & 3	-20	-20	-	-	
14.2	3	1, 2 & 3	-20	AB	-	-	
14.3	2	1, 2	-20	-20	-	-	
14.4	2	1, 2	-24	-24			



4 - Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
14.1	1.19	666	187.1	1.16	2'967	210.3						
14.2	1.20	242	112.9	1.18	1'067	120.9						
14.3	1.19	901	172.7	1.16	3'105	209.1						
14.4	1.19	747	155.8	1.19	2'551	185.8						

5 - Bemerkungen

- alle MS mit IR-PAS
- Nicht verwendbare Messungen: keine
- Wiederholung der Messung nach Abdichtung vom 17.06.2008

1 – Header

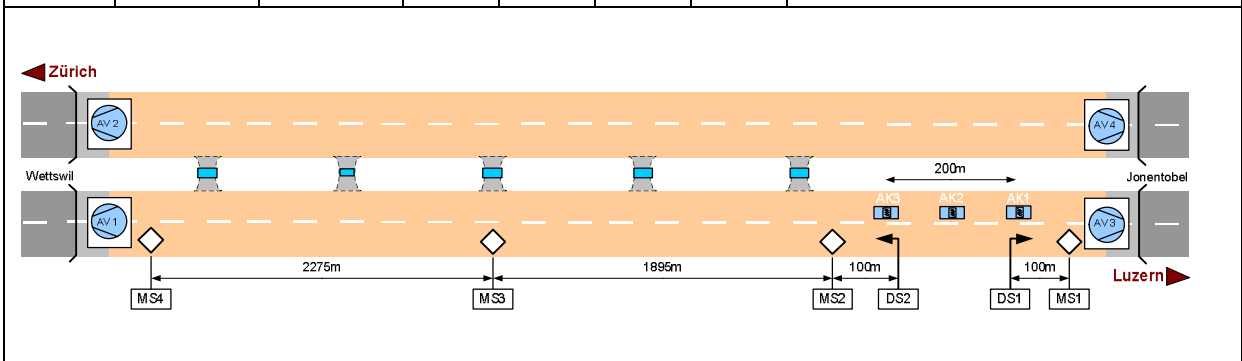
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
15	Islisberg	LU	-	24.08.09	HP-09827

2 – Angaben zum Objekt

Alter	Neubau	Eröffnung
Pos. Lüftungszentralen	2 / „U“	90°-Umlenkung von AK zur LZ
Länge Tunnel	4950 m	
Länge AK	4635 m	
Querschnitt AK	7.72 m ² , 8.46 m ² , 7.95 m ²	von Nord nach Süd für 175 m, 3670 m, 790 m
D _{hyd} AK	1.99 m, 2.12 m, 2.03 m	von Nord nach Süd für 175 m, 3670 m, 790 m
Anzahl ALK	49 St.	Zuzüglich 7 Verbindungsklappen zwischen den AK (je eine direkt vor dem AV)
Distanz ALK zu ALK	100 m	Punktabsaugung Seite Wettswil, 3 ALK auf 20 m
Hersteller, Typ	Sirocco, TRD 2210 x 1905 mm	
Bruttofläche ALK	4.21 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: einbetoniertes Fugenband (Masterflex 2000 Typ DK 12S, vgl. Abb.), Längsfugen: Linienlager zwischen auf Auflagefläche (Limitgliss-Lager Typ LG80), Entwässerungsröhre in den WLK sind abgedichtet, visuelle Beurteilung: sehr gut	
Allg. Bemerkungen	AK Röhre ZH und LU sind alle ca. 900 m verbunden (aerodynamische Trennung durch Klappe)	

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
15.1	3	1, 2 & 3	100%	-	100%	-	
15.2	3	1, 2 & 3	90%	-	90%	-	
15.3	3	1, 2 & 3	80%	-	80%	-	
15.4	2	1 & 3	100%	-	100%	-	Redundanzfall ALK



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
15.1	1.11	764	129.6	1.14	424	87	1.13	1'308	94	1.10	2'619	108.3
15.2	1.11	631	115.4	1.14	360	80.7	1.13	1'132	86.2	1.11	2'254	99.7
15.3	1.12	477	99.6	1.14	280	68.3	1.13	893	72.1	1.11	1'778	84.1
15.4	1.11	1134	126.1	1.13	787	81.6	1.12	1'586	87.9	1.10	2'821	105.8

5 – Bemerkungen

- alle MS mit IR-PAS
- Nicht verwendbare Messungen: keine
- Verbindungsklappen waren bei allen Messungen geschlossen.

1 – Header

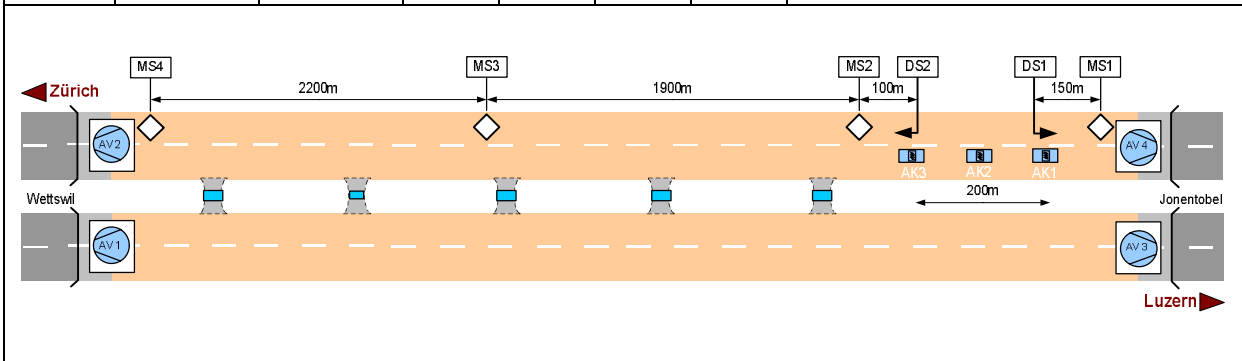
Nr.	Tunnel	Röhre	Abschnitt	Datum	Messbericht
16	Islisberg	ZH	-	26.08.09	HP-09827

2 – Angaben zum Objekt

Alter	Neubau	Eröffnung
Pos. Lüftungszentralen	2 / „U“	90°- Umlenkung von AK zur LZ
Länge Tunnel	4950 m	
Länge AK	4635 m	
Querschnitt AK	7.72 m ² , 8.46 m ² , 7.95 m ²	von Nord nach Süd für 175 m, 3670 m, 790 m
D _{hyd} AK	1.99 m, 2.12 m, 2.03 m	von Nord nach Süd für 175 m, 3670 m, 790 m
Anzahl ALK	49 St.	Zuzüglich 7 Verbindungsklappen zwischen den AK (je eine direkt vor dem AV)
Distanz ALK zu ALK	100 m	Punktabsaugung Seite Wettswil, 3 ALK auf 20 m
Hersteller, Typ	Sirocco, TRD 2210 x 1905 mm	
Bruttofläche ALK	4.21 m ²	
Abdichtung AK	Querfugen: einbetoniertes Fugenband (Masterflex 2000 Typ DK 12S, vgl. Abb.), Längsfugen: Linienlager zwischen auf Auflagefläche (Limitgliss-Lager Typ LG80), Entwässerungsröhre in den WLK sind abgedichtet, visuelle Beurteilung: sehr gut	
Allg. Bemerkungen	AK Röhre ZH und LU sind alle ca. 900 m verbunden (aerod. Trennung durch Klappe)	

3 – Messprogramm

Messung Nr.	AK offen		Abluftventilatoren				Bemerkungen
	Anzahl	Bez.	AV 1	AV2	AV3	AV4	
16.1	3	1,2 & 3	-	100%	100%	-	Verbindungsklappe Jonentobel offen, ZH_5
16.2	3	1,2 & 3	-	100%	-	100%	ZH_1
16.3	3	1,2 & 3	-	90%	-	90%	ZH_2
16.4	3	1,2 & 3	-	80%	-	80%	ZH_3
16.5	2	1 & 3	-	100%	-	100%	ZH_4, Redundanzfall ALK
16.6	3	1, 2 & 3	-	100%	-	-	ZH_6, Redundanzfall AV



4 – Resultate

Messung Nr.	MS1			MS2			MS3			MS4		
	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	Δp [Pa]	Q [m ³ /s]
16.1	1.14	584	116.5	1.14	451	84.4	1.13	1'318	91.3	1.11	2'790	112.5
16.2	1.14	566	114.1	1.14	441	81.7	1.14	1'294	88.0	1.11	2'760	109.0
16.3	1.14	458	101.9	1.14	381	79.7	1.14	1'147	86.2	1.11	2'425	105.4
16.4	1.14	336	86.0	1.14	307	73.1	1.14	949	77.4	1.12	1'997	94.5
16.5	1.13	874	112.9	1.14	774	78.4	1.13	1'556	87.8	1.10	2'967	111.0
16.6	-	-	-	1.14	335	85.2	1.13	1'210	91.6	1.11	2'692	112.2

5 – Bemerkungen

- alle MS mit IR-PAS
- Nicht verwendbare Messungen: gesamte Messung 16.1
- Verbindungsklappen waren, ausser bei Messung 16.1, geschlossen.

Literaturverzeichnis

[1]	ASTRA-Richtlinie 13 001, „ <i>Lüftung der Strassentunnel – Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung</i> “, Ausgabe 2008 V2.00
[2]	Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, RVS 09.02.31, „ <i>Projektierungsrichtlinien Lüftungsanlagen</i> “, Version August 2008
[3]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, „ <i>Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln</i> “, RABT, Ausgabe 2006
[4]	CETU, „ <i>Dossier pilote des tunnels équipements, section 4.1, Ventilation</i> “, November 2003
[5]	Karl Pucher, „ <i>Pressure losses due to the leakage in the air ducts – A safety problem for tunnel users?</i> “, 3 th Conference “Tunnel Safety and Ventilation”, Mai 2006, Graz
[6]	M. Bettelini, „ <i>Measuring leakages in road tunnels</i> “, 4 th Conference “Tunnel Safety and Ventilation”, 2008, Graz
[7]	Projektbeschrieb, „ASTRA2007/004_OBF“, http://www.aramis.admin.ch
[8]	B. Frei, „ <i>Bestimmung von Abluft-Volumenströmen und -Leckagen in Strassentunnels mittels Tracergas-Methode</i> “, 2008, VDI-Tagung
[9]	Bruno Eck, „ <i>Technische Strömungslehre</i> “, Siebente Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1966, (S. 428)
[10]	Aichelen, „ <i>Der geometrische Ort für die mittlere Geschwindigkeit bei turbulenter Strömung in glatten und in rauhen Rohren</i> “, Z. Naturforsch. Bd. 2 (1947) S. 108
[11]	J. Nikuradse, Göttingen: „ <i>Untersuchung über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen</i> “, VDI-Heft 281, VDI-Verlag, Berlin 1926
[12]	VDI 2040, „ <i>Berechnungsgrundlagen für die Durchflussmessung mit Drosselgeräten</i> “, September 1996
[13]	VDI 2041, „ <i>Durchflussmessung mit Drosselgeräten; Blenden und Düsen für besondere Anwendungen</i> “, April 1991
[14]	ASFiNAG, PLaPB – „ <i>Lüftung - Technische Spezifikation</i> “, Version 1.0, 16. April 2009
[15]	Alex Haerter, „ <i>Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Lüftungsanlagen von Strassentunneln</i> “, Dissertation der ETH, Zürich, 1961
[16]	SIA 196, „ <i>Baulüftung von Untertagbauten</i> “, Dez. 1982
[17]	ETHZ, Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau, „ <i>Lüftung im Untertagbau</i> “, Mitteilung Nr. 39, Mai 1978
[18]	HSLU T&A, Prüfstelle HLK, „ <i>Tunnel Flimsenstein</i> “, Prüfbericht Nr.: HP-07640, 29.10.2007
[19]	HSLU T&A, Prüfstelle HLK, „ <i>Tunnel San Bernardino</i> “, Prüfbericht Nr.: HP-07641, 29.10.2007
[20]	HSLU T&A, Prüfstelle HLK, „ <i>Tunnel Giswil</i> “, Prüfbericht Nr.: HP-08663, 25.01.2008
[21]	HSLU T&A, Prüfstelle HLK, „ <i>Tunnel de Raimeux</i> “, Prüfbericht Nr.: HP-08675, 06.03.2008
[22]	HSLU T&A, Prüfstelle HLK, „ <i>Tunnel Leissigen</i> “, Prüfbericht Nr.: HP-08689, 08.05.2008
[23]	HSLU T&A, Prüfstelle HLK, „ <i>Aeschertunnel</i> “, Prüfbericht Nr.: HP-08717, 08.07.2008
[24]	HSLU T&A, Prüfstelle HLK, „ <i>Tunnel Stägjitschuggen</i> “, Prüfbericht Nr.: HP-08734, 16.10.2008
[25]	HSLU T&A, Prüfstelle HLK, „ <i>Uetlibergtunnel</i> “, Prüfbericht Nr.: HP-08735, 04.11.2008
[26]	HSLU T&A, Prüfstelle HLK, „ <i>Tunnel Kirchenwald</i> “, Prüfbericht Nr.: HP-08753, 16.12.2008
[27]	HSLU T&A, Prüfstelle HLK, „ <i>Aeschertunnel</i> “, Prüfbericht Nr.: HP-09782, 03.04.2009
[28]	HSLU T&A, Prüfstelle HLK, „ <i>Islisbergtunnel</i> “, Prüfbericht Nr.: HP-09827, 16.09.2009
[29]	VDI 2640 Blatt 1, „ <i>Netzmessungen in Strömungsquerschnitten</i> “, Allgemeine Richtlinien und mathematische Grundlagen, 1993-06
[30]	Lothar Papula, „ <i>Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler</i> “, Band 3, 4. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2001
[31]	ESDU 81021, „ <i>Pressure losses caused by obstructions in ducts and pipes</i> “, Juli 1981
[32]	SIA 197, „ <i>Projektierung Tunnel, Strassentunnel</i> “, Oktober 2004

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
AK	Abluftkanal
ALK	Abluftklappe
ZD	Zwischendecke
MS	Messstelle
DS	Dosierstelle
LZ	Lüftungszentrale

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

ARAMIS SBT

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 27. Oktober 2010

Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA 2007/004

Projekttitel: Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Absaugung

Enddatum: Oktober 2010

Projektleiter

Name: Buchmann Vorname: Reto

Amt, Firma, Institut: Pöyry Infra AG

Strasse, Nr.: Hardturmstrasse 161

PLZ: 8037 Email: reto.buchmann@poyry.com

Ort: Zürich Telefon: 044 / 355 55 55, 076 / 356 22 90

Kanton, Land: Zürich, Schweiz Fax: 044 / 355 55 56

Texte:

Zusammenfassung der
Projektresultate:

Die durchgeführte Forschungsarbeit brachte wesentliche Erkenntnisse zur Quantifizierung von Abluftkanalleckagen. Die wichtigsten Erkenntnisse und Resultate sind folgende:

- Gesamthaft wurden 16 Leckagemessungen durchgeführt, die als Grundlagen für die Quantifizierung der Leckagen dienen. Die eingesetzte Tracergasmessmethode ist relativ aufwändig und sensibel, hat sich aber gesamthaft gut bewährt.
- Eine praxisorientierte Methode zur Bestimmung des Volumenstrom - und Unterdruckverlaufes im Abluftkanal wurde entwickelt. Die Dichtheit des Kanals wird dabei als dimensionslose Grösse f^* beschrieben.
- Die Dichtheit der Abluftkanäle ist stark davon abhängig, ob die Tunnels direkt mit einer konzentrierten Rauchabsaugung ausgerüstet wurde (Typ A) oder ob es sich um eine Nachrüstung handelt (Typ B). Für Kanäle vom Typ A liegen die f^* -Werte im Bereich von $14 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ und für Typ B um $25 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ bei guter Abdichtung und $35 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ bei schlechter Abdichtung.
- Weitere, im Zusammenhang mit Leckage stehende Aspekte wurden untersucht (Druckverlust im Abluftkanal, Druckverlust über Klappenantriebe, Druckverlust beim Durchströmen von Abluftklappen, Methoden von Kanalabdichtungen, etc.).



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

	<ul style="list-style-type: none"> - Die ermittelten Leckagewerte wurden mit den Vorgaben aus in- und ausländischen Richtlinien verglichen. Es zeigt sich z.B., dass der derzeitige Dimensionierungswert für Abluftventilatoren in der Schweizer Richtlinie Lüftung der Strassentunnel einen Kompromiss darstellt mit deutlichen Reserven für neue und dichte Anlagen vom Typ A und mit hohen Anforderungen für ältere Anlagen vom Typ B. - Der Anteil der Klappenleckagen an der Gesamtleckage ist mit ca. 10 % relativ gering.
Zielerreichung:	Die Projektziele der Forschungsarbeit wurden erreicht. Darüber hinaus wurden einige Aspekte untersucht, die in einem indirekten Zusammenhang mit der Leckageproblematik stehen, nicht aber explizit als Forschungsziel ausgewiesen wurden.
Folgerungen und Empfehlungen:	<p>Leckagemessungen werden insbesondere dann erforderlich, wenn der Abluftstrom an der Absaugstelle nicht erreicht werden kann.</p> <p>Die heute gängige Anforderung an die Dichtheit der Abluftklappen ist ausreichend und soll nicht weiter verschärft werden.</p> <p>Die Leckagen im Abluftkanal reduziert die Effizienz der Absaugung und verfälscht die Längsströmung im Fahrraum. Folglich sind die Leckagen soweit möglich und sinnvoll mit baulichen Massnahmen zu vermindern und die restliche Leckage bei der Auslegung der Anlage zu berücksichtigen. Zur Bestimmung der Leckagen kann die im Forschungsprojekt beschriebene Methode verwendet werden.</p> <p>Je nach Anordnung und Situation können die Messunsicherheiten bei Leckagemessungen so gross werden, dass eine Quantifizierung der Leckage nicht mehr sinnvoll ist. In diesen Fällen sind die im Forschungsprojekt beschriebenen Massnahmen zur Minderung der Messunsicherheiten zu ergreifen. Bei der Auswertung müssen die Messunsicherheiten, die Inhomogenitäten des Abluftkanals und die Wirkung des Unterdrucks auf die Struktur des Abluftkanals als wesentliche Aspekte berücksichtigt werden.</p> <p>Bei einer Umsetzung dieser Forschungsarbeit wird im Weiteren empfohlen, folgende Aspekte zu berücksichtigen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erwägen der Einführung differenzierter Dimensionierungswerte für Anlagen vom Typ A und vom Typ B in der Richtlinie Lüftung der Strassentunnel. - Nachführen und gegebenenfalls Spezifizieren von Dimensionierungswerten für die Dichtheit der Abluftkanäle und Abluftklappen. - Erwägen der Festlegung von Abnahmewerten für die Dichtheit der Abluftkanäle und der Abluftklappen. - Definition von Vorgaben für die Durchführung von Messungen von Abluftvolumenstrom an der Absaugstelle und Leckage. <p>Bei einer Fortführung dieser Forschungsarbeit wird zudem empfohlen, Folgendes zu berücksichtigen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Durchführen und Auswerten von weiteren Leckagemessungen zur Überprüfung der vorgeschlagenen Messkonzepte mit erhöhter Genauigkeit und zur Untersuchung der Alterung .
Publikationen:	<p>„Quantification of the leakages into exhaust ducts in road tunnels based on in-situ measurements“, 4th Tunnel Safety and Ventilation Symposium, Graz, 21-23 April 2008</p> <p>„Quantification of the leakages into exhaust ducts in road tunnels with concentrated exhaust systems“, International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, 17. – 19. March 2010</p> <p>„Leakages in Exhaust Ducts of Transverse Ventilated Road Tunnels“, 5th Tunnel Safety and Ventilation Symposium, Graz, 03. – 04. May 2010</p>

Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:

Der Bericht zum Forschungsprojekt beschreibt die sehr ausführliche praktische und theoretische Arbeit. Er dokumentiert sehr gut die Untersuchungen, die auch verschiedene, nicht im Forschungsauftrag enthaltene Randgebiete abdecken, die ebenfalls im gesprochenen Kostenrahmen durchgeführt wurden.

Die im Forschungsantrag formulierten Ziele wurden vollständig erreicht.

Eine wesentliche Erkenntnis ruft nach einem Messprozedere, das vielversprechend ist (Messung bei kleinem Volumenstrom). Diese Erkenntnis wurde nach Abschluss der Messungen erlangt.

Umsetzung:

Es werden Vorschläge für differenziertere Dimensionierungswerte, verbindliche Vorgaben an den Bau und für Messmethoden gemacht. Die Umsetzung ist Sache des ASTRA.

Weitergehender
Forschungsbedarf:

Die Arbeit beschreibt die Problematik Leckage von Abluftkanälen über Zwischendecken umfassend.

- Weiterer Forschungsbedarf besteht bezüglich des Modells zur Beschreibung der Leckageströme. Die tunnelspezifische Auswertung zeigt, dass keine klaren Trends zugunsten des quadratischen bzw. linearen Ansatzes erkennbar sind. Der vielfach in Regelwerken angetroffene quadratische Ansatz ist zwar praxiserprobt und enthält einfache und verständliche Kenngrößen, welche die Vorgabe sinnvoller Dimensionierungswerte erlauben, aber vom physikalischen Standpunkt her kann er nicht abschliessend bestätigt werden. Weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen würden ein verbessertes Verständnis der physikalischen Vorgänge bei Leckageströmungen vermitteln, im Hinblick auf eine verbesserte Modellierung der Leckage einschliesslich Identifikation relevanter Einflussparameter.
- Verbesserungen sind bei einer modifizierten Messprozedur und bei der Messeinrichtung möglich. In dieser Hinsicht sind ergänzende Messungen nach der Methode mit geringem Durchfluss und mittlerer Druckdifferenz sehr zu wünschen.
- Zu erwarten sind wesentliche Erkenntnisse aus den vorgeschlagenen Messungen zur zeitlichen Entwicklung der Leckage infolge der Alterung der Bauwerke.

Einfluss auf
Normenwerk:

Die Arbeit zeigt, dass kein unmittelbarer Handlungsbedarf betreffend die Vorgaben zu den Dimensionierungswerten in der ASTRA-Richtlinie Lüftung der Strassentunnel und in der Norm SIA 197/2 besteht. Die vorgeschlagenen Anpassungen wären allenfalls unter Einbezug anderer Aspekte (Kostenfolgen, Durchsetzbarkeit) mit dem ASTRA zu diskutieren.

Präsident Begleitkommission:

Name: Vorname:

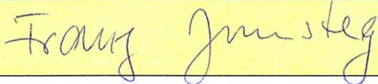
Amt, Firma, Institut:

Strasse, Nr.:

PLZ: Email:

Ort: Telefon:

Kanton, Land: Fax:

Unterschrift Präsident Begleitkommission:


Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II- Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1 <i>Footprint II- Langzeit Belag Performance und Umwelt Monitoring an der A1</i> <i>Footprint II- Long terme performance des chaussées et à la surveillance de l'environnement A1</i>	2010
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN <i>Affinité entre granulats et bitume, mise en application nationale de la EN</i> <i>Affinity between aggregate and bitumen, national implementation of the EN</i>	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen <i>Modèles de conduite sur autoroutes surchargées</i> <i>Speed patterns on congested highways</i>	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux <i>Bestimmung der Anwesenheit und Wirksamkeit von Haftmittel im Asphaltbeton</i> <i>Determination of the presence and efficiency of adhesion agent in asphalt concrete</i>	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinkörnungen am Haufwerk <i>Répétabilité et reproductibilité de la résistance à la compression des granulats en vrac</i> <i>Repeatability and Reproducibility of the compressive Strength on the Stack</i>	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden <i>Base de projet pour installations de feux de circulation et guide</i>	2010
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen <i>Adhérence sur les chaussées hivernales</i> <i>Skid resistance of winter road surfaces</i>	2010
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung <i>Speed on upgrades and downgrades; revision</i> <i>Les vitesses dans les rampes et les pentes; vérification</i>	2010
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts <i>Aspects juridiques d'un concept de sécurité basé sur les risques et l'efficience</i> <i>Legal aspects of a risk and efficiency based safety approach</i>	2009

1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen <i>Procédure de détermination du besoin d'entretien dans les réseaux routiers communaux</i> <i>Procedure for determining the maintenance requirements of municipal road networks</i>	2009
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben <i>Systematical impact assessment of small and medium transport projects</i> <i>Analyses des impacts systématiques pour projets de transport petits et moyens</i>	2009
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement <i>Application de couches intercalaires de géosynthétiques pour la gestion de l'entretien des chaussées</i> <i>Application of asphalt interlayers for road maintenance management</i>	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route <i>Perspektiven und Anwendungen der Navigationsmethoden für die Strassenverkehrstelematik und für das Strasseninformationssystem</i> <i>Perspectives and applications of the navigation systems for the intelligent transportation systems and for the road information system</i>	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien <i>RiskNow-Falling Rocks</i> <i>Outil intégré Excel pour le calcul de risques sur les galeries de protection contre les chutes de pierre</i> <i>RiskNow-Falling Rocks</i> <i>Excel-based tool for the risk analysis of rockfall protection galleries</i>	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern <i>Comportement d'adhérence des unités de précontrainte à torons</i> <i>Bond behaviour of strand tendons for post-tensioning</i>	2009
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton <i>Béton filtré ultra-performant pour augmenter l'efficacité de la maintenance des ouvrages d'art en béton armé</i> <i>Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete for increasing efficiency of the maintenance of reinforced concrete road structures</i>	2010

1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle <i>Développement d'une centrale de cogénération à base d'huile végétale avec propre moulin à huile</i> <i>Development of a vegetable oil block heat and power plant with own oil mill</i>	2010
1296	ASTRA 2007/008	Swis contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP) <i>Schweizer-Beitrag zum Russpartikel-Messprogramm für schwere Motorwagen (HD-PMP)</i> <i>Contribution de la Suisse au Programme de Mesure des Particules pour voitures automobiles lourdes (HD-PMP)</i>	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages? -(Performance-orientierte Methoden) <i>Relation between binder properties and damage characteristics of pavements ?</i> <i>(Performance orientated methods)</i>	2010
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen Schadensprozesse und Zustandsverläufe <i>Processus de dégradation et lois d'évolution</i> <i>Pavement damage processes and performance curves</i>	2008
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen <i>Génération de trafic par des installations de stationnement</i> <i>Trafic generation of parking facilities</i>	2009
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesyste (SGPS) <i>Système de prévision de chaussées glissantes</i> <i>Forecasting Expert System for Road Slipperiness</i>	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum-Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung <i>Espace de rues sans obstacles-</i> <i>Exigences des personnes avec handicap</i> <i>Obstacle free traffic areas-</i> <i>Demands of people with disabilities</i>	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen <i>Modernisation des feux de signalisation</i> <i>Modernisation of traffic control systems</i>	2010