



# LeanTech im Strassentunnel

## LeanTech dans le tunnel routier

## LeanTech in road tunnels

**HBI Haerter AG**  
**Rune Brandt**  
**Simon Frey**

**Boess Engineering AG**  
**Peter Siegenthaler**  
**Christian Siegenthaler**

**Basler & Hofmann AG**  
**Christian Eugster**

**Forschungsprojekt AGT 2016/005 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Tunnelforschung (AGT)**

**März 2022**

**1724**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten 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 les auteurs ayant obtenu l'appui de 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)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

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

The content of this report engages only the author(s) supported 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**

# LeanTech im Strassentunnel

**LeanTech dans le tunnel routier**

**LeanTech in road tunnels**

**HBI Haerter AG**  
**Rune Brandt**  
**Simon Frey**

**Boess Engineering AG**  
**Peter Siegenthaler**  
**Christian Siegenthaler**

**Basler & Hofmann AG**  
**Christian Eugster**

**Forschungsprojekt AGT 2016/005 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Tunnelforschung (AGT)**

**März 2022**

**1724**

# Impressum

## **Forschungsstelle und Projektteam**

### **Projektleitung**

Rune Brandt, HBI Haerter AG

### **Mitglieder**

Simon Frey, HBI Haerter AG

Peter Siegenthaler, Boess Engineering AG

Christian Siegenthaler, Boess Engineering AG

Christian Eugster, Basler & Hofmann AG

## **Begleitkommission**

### **Präsident**

Jean-Paul Schnetz

### **Mitglieder**

Francis Dousse

Georg Hiestand

Marcel Rogenmoser

Alex Scheiwiller

Urs Steinemann

## **Antragsteller**

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

## **Bezugsquelle**

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>9</b>
<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Forschungsvorhaben .....</b>
1.1	Ausgangslage.....
1.2	Zielsetzung .....
1.3	Angewandte Methodik.....
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung und Forschungsbedarf.....</b>
2.1	Stand der Forschung.....
2.2	Forschungsbedarf .....
<b>3</b>	<b>Beitrag von internationalen Experten .....</b>
3.1	Danksagung .....
3.2	Vorgehensweise.....
3.3	Übersicht der Rückmeldungen .....
3.4	Synthese der Rückmeldungen .....
3.4.1	Keine Anpassungen vertretbar.....
3.4.2	Anpassungsvorschläge zu einzelnen Anlagen oder Einrichtungen .....
3.4.3	Anpassungsvorschläge aufgrund Betrachtungen mehrerer Anlagen .....
3.4.4	Übergeordnete Vorschläge der internationalen Experten.....
<b>4</b>	<b>Systematische Aufarbeitung der Anforderungen.....</b>
<b>5</b>	<b>Selektion der Anforderungen mit Optimierungspotential .....</b>
5.1	Einleitung.....
5.2	Stufe 1: Einhaltung der Minimalvorgaben .....
5.3	Stufe 2: Komplexitäts- und/oder kostentreibend .....
5.4	Stufe 3: Erstbewertung.....
5.5	Stufe 4: Detailbewertung.....
5.6	Stufe 5: Auswahl für das LeanTech Vorhaben .....
<b>6</b>	<b>Detailanalyse ausgewählter Anforderungen mit Optimierungspotential .....</b>
6.1	Fachbereich 1 – Energieversorgung .....
6.1.1	Speisung durch zwei unabhängige, lokale Netze .....
6.1.2	Gleichzeitigkeitsfaktor 1 .....
6.1.3	Batterien der USV-Anlage .....
6.2	Fachbereich 2 – Beleuchtung .....
6.2.1	Brandnotbeleuchtung (BNL).....
6.2.2	Auslegung der Beleuchtung (Alterungs- und Unterhaltsfaktor) .....
6.2.3	Material für Befestigung / Halterungen .....
6.3	Fachbereich 3 – Lüftung .....
6.3.1	Temperaturbeständigkeit Abluftventilatoren .....
6.3.2	Maximaler Druckdifferenz zwischen Abluftkanal und Fahrraum.....
6.3.3	Passive Anti-Rezirkulationsmassnahmen an den Portalen .....
6.3.4	Lüftungstechnische Trennung zweier Tunnel .....
6.3.5	Örtliche Trennung der Ventilatorstationen bei der SiSto-Lüftung .....
6.3.6	Schleusen und Lüftungsanlagen in Fluchtstollen.....
6.4	Fachbereich 4 – Signalisation .....

6.4.1	Lokalsteuerung: Vorortbedienung.....	53
6.4.2	Blinker, Ampel / Fahrstreifenlichtsignal FLS / Wechselsignal LED.....	55
6.4.3	Fachhandbuch - Mittelstreifenüberfahrtsystem MÜLS.....	56
6.5	Fachbereich 5 - Überwachungsanlagen.....	58
6.5.1	Branddetektion in Strassentunnel.....	58
6.5.2	Videoanlagen – Bildauswertung.....	62
6.6	Fachbereich 6 - Kommunikation & Leittechnik.....	64
6.6.1	Anlagesteuerungen.....	64
6.7	Fachbereich 7 – Kabelanlagen.....	66
6.8	Fachbereich 8 – Nebeneinrichtungen.....	67
6.8.1	Raumlüftungskonzept, Allgemeine Vorgaben.....	67
<b>7</b>	<b>Weitere Anforderungen mit Optimierungspotential.....</b>	<b>69</b>
7.1	Fachbereich 3 – Lüftung.....	69
7.1.1	Anordnung der Abluftventilatoren und Zugang zu den Lüftungszentralen.....	69
7.1.2	Zuführung von Zuluft.....	70
7.1.3	Lüftung der Strassentunnel: Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung.....	71
7.1.4	Weitere Anforderungen mit Optimierungspotential.....	75
7.2	Fachbereich 4 - Signalisation.....	76
7.3	Fachbereich 5 - Überwachungsanlagen.....	76
7.3.1	Systemvereinfachungen als Anpassungsmotivation.....	76
7.3.2	Längere Wartungsintervalle als Anpassungsmotivation.....	77
7.3.3	Anforderungen, welche teilweise durch andere Systeme abgedeckt sind.....	77
7.3.4	Anforderung als Kleinspannung (DC) zu optimieren.....	77
7.4	Fachbereich 6 - Kommunikation & Leittechnik.....	78
7.4.1	Vorschlag zu Untersuchung der Einführung von SLASS Lautsprechersysteme.....	78
7.4.2	Vorschlag zu LeanTech-Projekt aus Sicht des Betreibers.....	79
7.4.3	Auflistung Anforderungen mit Optimierung Potential.....	79
7.5	Übergeordnete Optimierungsansätze.....	83
7.5.1	Rückblick auf dem Prozess zur Formulierung der Optimierungs-vorschläge.....	83
7.5.2	Tunnelklassen.....	83
7.5.3	Vorschlag zu weiteren LeanTech Optimierungsvorhaben.....	83
	<b>Glossar.....</b>	<b>85</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>87</b>
	<b>Projektabschluss.....</b>	<b>93</b>

## Zusammenfassung

Aufgrund der historischen Entwicklung und des Wunsches, dem Verkehrsteilnehmer eine möglichst sichere Infrastruktur zur Verfügung zu stellen, ergeben sich in Strassentunneln nach heutiger Praxis komplexe und kostenintensive Anlagen (Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen).

Das Ziel des Forschungsprojektes ist es, für Strassentunnel sowohl die Anlagenkosten als auch die Betriebskosten (Kosten seitens der Gebietseinheiten für Unterhalt und Betrieb) durch die Verschlinkung der Vorgaben zu reduzieren, ohne dabei entscheidende Einbussen bei der Sicherheit, der Verfügbarkeit und der Instandhaltung hinnehmen zu müssen.

Die aktuell geltenden Anforderungen an die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) in Strassentunneln werden in diesem Forschungsprojekt in einem systematischen Prozess kritisch hinterfragt. In Sinne von LeanTech stellt sich die Frage, ob und wie Anforderungen optimiert werden können, ohne dabei die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer bzw. die Verfügbarkeit der Infrastruktur zu reduzieren.

Um die Umsetzbarkeit der Ergebnisse zu erleichtern, wurden die Anforderungen in einem Bottom-up-Verfahren aufgearbeitet und analysiert. Dabei wurden alle Anforderungen der ASTRA Richtlinien, Fachhandbücher und Dokumentationen sowie aufgrund Normen bearbeitet. Insgesamt wurden 2182 Anforderungen identifiziert, welche optimiert werden könnten, ohne dabei die Einhaltung der Minimalvorgaben betreffend Tunnelsicherheit [1] [2] zu tangieren (Kapitel 4).

Ein mehrstufiges Verfahren wurde angewandt, um die Anforderungen mit grösstem potenziellem Nutzen, der grössten Komplexitätsreduktion beziehungsweise der grössten Kosteneinsparungen zu ermitteln (Kapitel 5). Dabei wurde festgestellt, dass das Optimierungspotential von 2113 Anforderungen derart gering war, dass sie in diesem Forschungsprojekt nicht vertieft untersucht wurden.

In einem parallelen Prozess wurden 38 internationale Experten darum gebeten, folgende Frage zu beantworten (Kapitel 3):

*«Welche Anforderungen an die elektromechanische Ausrüstung in Strassentunneln sollten in welcher Art angepasst werden, um die Kosten (bzw. Komplexität) zu reduzieren, ohne dadurch reelle negative Einflüsse auf die Sicherheit, Verfügbarkeit und Instandhaltung in Kauf nehmen zu müssen?»*

Aus diesem zwei Prozessen wurden gesamthaft 41 Anforderungen entweder einzeln oder in Zusammenhang mit anderen vertieft untersucht (Kapitel 6). Daraus ergaben sich 9 konkrete Anpassungsvorschläge mit grosser Auswirkung im Sinne von LeanTech, welche einfach und zeitnah umgesetzt werden können. Zudem entstanden 12 Handlungsempfehlungen für vertiefte Untersuchungen.

Weitere 28 Anforderungen mit Optimierungspotential wurden einer übergeordneten Analyse unterzogen (Kapitel 7). Zudem wurden Gedanken zu weiterführenden Analysen aufgrund grundsätzlich fachbereichsübergreifende Gesamtbetrachtungen angestellt.

Diese Anpassungsvorschläge und Handlungsempfehlungen ermöglichen es, Einsparungen in den Bereichen Investition, Betrieb und Instandhaltung zu erreichen, ohne eine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus oder der Verfügbarkeit der Infrastrukturanlage zu verursachen.



## Résumé

Les évolutions historiques et la volonté de mettre à disposition des usagers des tunnels routiers, une infrastructure aussi sûre que possible engendrent, selon les usages et coutumes actuels, des installations (équipements d'exploitation et de sécurité) complexes et coûteuses.

L'objectif du projet de recherche est de réduire les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation (coûts de maintenance et d'exploitation de la part des unités territoriales) des installations dans les tunnels routiers sans toutefois compromettre la sécurité, la disponibilité et la maintenabilité.

Les exigences actuellement en vigueur pour les équipements d'exploitation et de sécurité (EES) dans les tunnels routiers sont examinées de manière critique dans le cadre d'un processus systématique. Dans l'esprit de LeanTech (technique épurée), la question se pose de savoir si et comment les exigences peuvent être optimisées sans pour autant réduire la sécurité des usagers de la route ou la disponibilité de l'infrastructure.

Afin de faciliter la mise en œuvre des résultats, les exigences ont été analysées dans le cadre d'une procédure ascendante. Toutes les exigences des directives, des manuels techniques et des documentations de l'OFROU ainsi que les exigences provenant des normes ont été traitées. Au total, 2182 exigences ont été identifiées, qui pourraient être optimisées sans pour autant affecter le respect des exigences minimales en matière de sécurité dans les tunnels [1] [2] (chapitre 4).

Une procédure à plusieurs niveaux a été appliquée pour déterminer les exigences présentant le plus grand avantage potentiel, la plus grande réduction de complexité ou les plus grandes économies de coûts (chapitre 5). Il a été constaté que le potentiel d'optimisation de 2113 exigences était si faible qu'elles n'ont pas été examinées en profondeur dans le cadre de ce projet de recherche.

Dans le cadre d'un processus parallèle, 38 experts internationaux ont été invités à répondre à la question suivante (chapitre 3) :

*«Quelles sont les exigences relatives aux équipements électromécaniques dans les tunnels routiers qui devraient être adaptées et de quelle manière, afin de réduire les coûts (ou la complexité) sans pour autant avoir un impact négatif réel sur la sécurité, la disponibilité et la maintenance?»*

A partir de ces deux processus, 41 exigences ont été examinées de manière approfondie, soit individuellement, soit en relation avec d'autres exigences (chapitre 6). Ils en sont ressorties 9 propositions d'adaptation concrètes ayant un impact important dans le sens de LeanTech et pouvant être mises en œuvre facilement et rapidement. En outre, 12 recommandations d'action ont été formulées en vue d'une étude approfondie.

28 autres exigences présentant un potentiel d'optimisation ont été soumises à une analyse globale (chapitre 7). Cependant, suite à des réflexions fondamentales et multi-domaines, des analyses approfondies sont recommandées.

Ces propositions d'adaptation et ces recommandations d'action permettent de réaliser des économies dans les domaines de l'investissement, de l'exploitation et de la maintenance, sans entraîner de réduction déterminante du niveau de sécurité ou de la disponibilité de l'infrastructure.



## Summary

Due to historical development and the desire to provide road users with the safest possible infrastructure, today's practice results in complex and cost-intensive installations (electromechanical equipment) in road tunnels.

The aim of the research project is to reduce both the system costs and the operating costs (costs on the part of the operators for maintenance and operation) for road tunnels by streamlining the specifications without having to reduce significantly aspects relating to safety, availability and maintenance.

The currently applicable requirements for the operating and safety equipment (called "BSA" in Switzerland) in road tunnels are being critically examined in this research project in a systematic process. In terms of LeanTech, the question is whether and how requirements can be optimised without reducing the safety of road users or the availability of the infrastructure.

In order to facilitate the feasibility of the results, the requirements were processed and analysed in a bottom-up procedure. All requirements of the FEDRO guidelines, technical manuals and documentation as well as standards were processed. A total of 2182 requirements were identified that could be optimised without affecting compliance with the minimum requirements for tunnel safety [1] [2] (Chapter 4).

A multi-stage procedure was used to identify the requirements with the greatest potential benefit, the greatest reduction in complexity and the greatest cost savings (chapter 5). It was found that the optimisation potential of 2113 requirements was so small that they were not investigated in depth in this research project.

In a parallel process, 38 international experts were asked to answer the following question (chapter 3):

*"Which requirements for electromechanical equipment in road tunnels should be adapted in which way in order to reduce costs (or complexity) without having to accept real negative influences on safety, availability and maintenance?"*

From these two processes, a total of 41 requirements were examined in depth, either individually or in connection with others (Chapter 6). This resulted in 9 concrete adaptation proposals with a major impact in terms of LeanTech, which can be implemented easily and promptly. In addition, 12 recommendations for action were made for more in-depth investigations.

A further 28 requirements with optimisation potential were subjected to a higher-level analysis (chapter 7). In addition, thoughts on further analyses were made on the basis of basically interdisciplinary overall considerations.

These adaptation proposals and recommendations for action make it possible to achieve savings in the areas of investment, operation and maintenance without causing a significant reduction in the safety level or availability of the infrastructure facility.



# 1 Forschungsvorhaben

## 1.1 Ausgangslage

Aufgrund der historischen Entwicklung und des Wunsches, dem Verkehrsteilnehmer eine möglichst sichere Infrastruktur zur Verfügung zu stellen, ergeben sich in Strassentunneln nach heutiger Praxis komplexe und kostenintensive Anlagen (Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen).

Der stetig steigende Kostendruck (Investition, Instandhaltung und Ersatz) und der sich wandelnde sozio-juristisch-wirtschaftliche Kontext lassen es heute zu, die bestehenden Anforderungen an die Strassentunnelausrüstung sowie die gängige Praxis in der Planung und Umsetzung kritisch zu hinterfragen. Dabei sollen die Erfahrungen aus dem Betrieb und aufgrund von Ereignissen berücksichtigt werden.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel des Forschungsprojektes ist es, für Strassentunnel sowohl die Anlagenkosten als auch die Betriebskosten (Kosten seitens der Gebietseinheiten für Unterhalt und Betrieb) durch die Verschlinkung der Vorgaben zu reduzieren, ohne dabei entscheidende Einbussen bei der Sicherheit, der Verfügbarkeit und der Instandhaltung hinnehmen zu müssen.

In der Einladung zur „Anfertigung eines Forschungsgesuchs“ präsentierte die Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)<sup>1</sup> eine Aufgabenbeschreibung zu dieser Ausgangslage und gab folgende vier Teilaufgaben vor:

- Punkt 1: Erfassen und Vorstellen des Bezugssystems
- Punkt 2: Analyse und Beurteilung des Bezugssystems
- Punkt 3: Empfehlungen und Umsetzungsstrategien zur Verbesserung des Bezugssystems aufzeigen, wobei die europaweit üblichen Standards zu berücksichtigen sind
- Punkt 4: BSA-spezifische Verbesserungsvorschläge ausarbeiten und deren Umsetzbarkeit aufzeigen

Im Folgenden wird der Begriff «Anforderungen» als Synonym für das Bezugssystem und für sämtliche Anforderungen aus Richtlinien, Normen und Gesetzen etc. verwendet.

Eine der Schwierigkeiten der Umsetzung des Projektziels besteht darin, das Ausrüstungsniveau zu reduzieren, ohne den falschen Eindruck zu erwecken, die Sicherheit würde in Mitleidenschaft gezogen werden. Dies gilt sowohl gegenüber den Verkehrsteilnehmern (Öffentlichkeit) als auch gegenüber den Entscheidungsträgern innerhalb des ASTRA und der Gebietseinheiten (z.B. StreMa, SiBe).

## 1.3 Angewandte Methodik

Die Vorgaben des Aufgabenbeschriebs wurden in den folgenden vier Schritten bearbeitet:

1. Systematische Aufarbeitung der Anforderungen (Kapitel 4)
2. Selektion der Anforderungen mit Optimierungspotential (Kapitel 5)
3. Detailanalyse ausgewählter Anforderungen mit Optimierungspotential (Kapitel 6)
4. Beurteilung restlicher Anforderungen mit Optimierungspotential (Kapitel 7)

<sup>1</sup> Die Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT) wurde per Januar 2020 zu Gunsten der Arbeitsgruppe Brücken, Geotechnik und Tunnel der Forschung im Strassenwesen des UVEK aufgelöst.

Das Vorgehen ist praxis- und gegenwartsorientiert. Es wurde bewusst darauf verzichtet, eine avancierte Modellierung des Zusammenspiels aus Anforderungen, technischen Umsetzungsvarianten und Ergebnissen betreffend Sicherheit, Verfügbarkeit und Instandhaltung inklusive aller Abhängigkeiten zu erstellen. Eine solche Modellierung wäre zwar grundsätzlich möglich, die Forschungsstelle hielt aber einen solchen Ansatz als nicht ausreichend zielführend. Dies insbesondere aufgrund fehlender Berechnungsmodelle und entsprechend hohem Aufwand, um diese zu erarbeiten und zu validieren. Der hohe Abstraktionsgrad solche Modelle lässt unter Umständen keinen direkten Rückschluss auf die einzelnen Anforderungen zu. Stattdessen wurde auf Einschätzungen von Experten zurückgegriffen.

Parallel zur systematischen Analyse und Bearbeitung der Anforderungen wurden die Meinungen 38 internationaler Experten zum Thema eingeholt (Kapitel 3). Damit konnte die Thematik LeanTech durch eine internationale Sichtweise erweitert und bereichert werden.

## 2 Stand der Forschung und Forschungsbedarf

### 2.1 Stand der Forschung

Die Anforderungen an die Sicherheit von Strassentunneln sind gut erforscht. Diverse Abhandlungen setzen sich mit den massgeblichen Themen wie z.B. Brand ([98] , [99] , [100] , Beleuchtung [101] und Intervention bei Bränden in Strassentunneln [102] auseinander.

Eine übergeordnete Analyse der massgebenden Faktoren für die Sicherheit im Brandfall ist z.B. in [93] beschrieben.

Innerhalb des nordischen Forschungsprojektes NordFoU «Rettung in Strassentunneln» wurden weitreichende Untersuchungen zur Sicherheit und Rettung in Tunneln durchgeführt. Über drei Teilprojekte DP1 [95] , DP2 [96] und DP3 [94] wurde das Zusammenspiel zwischen Verkehrsteilnehmern, Einsatzkräften und technischer Ausrüstung untersucht und die Erkenntnisse auf Richtungs- und Gegenverkehrstunnel angewandt. Dabei resultierten Erkenntnisse zu den psychologischen Faktoren während der Selbstrettung, priorisierte Handlungsempfehlungen zur erforderlichen Ausrüstung sowie Erkenntnisse darüber, welche Anlagen (Ausrüstungen) von sekundärer Bedeutung sind (z.B. Nottelefone, Feuerlöscher, Adaptations- und Durchfahrtsbeleuchtung).

Die Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Risiken in Strassentunnel ASTRA 89005 [92] sowie deren Umsetzung (Richtlinie) ASTRA 19004 [17] bieten insbesondere für Umbauprojekte die Möglichkeit, Abweichungen von den Anforderungen der Richtlinien (inkl. Kapitalisierung der Konsequenzen) abzuschätzen.

### 2.2 Forschungsbedarf

Die aktuell gültigen Normen, ASTRA Richtlinien und Fachhandbücher, welche zur Planung der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung anzuwenden sind, sind einerseits durch Forschungsergebnisse und andererseits durch Brandereignisse grosser Tragweite getrieben. Der Wunsch nach Sicherheit fällt dabei stark ins Gewicht und treibt Komplexität und Kosten der Anlagen in die Höhe.

Aus Sicht der Arbeitsgruppe Tunnelforschung ist der Zeitpunkt gekommen, um die Anforderungen an die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung der Tunnel kritisch zu überprüfen und gegebenenfalls zu überarbeiten. Dadurch können die Anlagen auf das strikt Nötige reduziert werden und wenig wirksame Anlagen sowie nicht sinnvolle oder unzureichend durchdachte Redundanzen abgebaut werden.

Die aktuellen Richtlinien und Vorgaben regeln die Anforderungen an einzelnen Anlagen und Komponenten. Diese können und sollen hinterfragt werden (z.B. redundante Einspeisung oder optische Leiteinrichtung versus Brandnotbeleuchtung). Das Zusammenspiel der einzelnen Anlagen und die übergeordneten Zusammenhänge mehrerer Anlagen ist dabei ebenfalls zu berücksichtigen. Diesbezüglich haben zum Beispiel sowohl die Notausgänge wie auch die Fahrraumlüftung einen direkten Einfluss auf die Selbstrettung im Brandfall – zwischen den diesbezüglichen Anforderungen besteht zurzeit aber keine direkte Abhängigkeit. Abweichungen von Kernanforderungen der Richtlinien müssen jedoch in einem Kosten-Nutzung-Kontext mittels einer risiko-technischen Betrachtung beurteilt werden [17] , [92] .

Durch das kritische Hinterfragen der Sinnhaftigkeit, des Nutzens und der Aktualität der gültigen Anforderungen scheint es möglich, deutliche Einsparungen auf Stufe Investition, Betrieb und Instandhaltung zu machen, ohne eine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus oder der Verfügbarkeit der Anlage zu verursachen.

Die grundsätzlichen Fragen zur Selektion und Evaluation der Möglichkeiten zur Vereinfachung der Ausrüstung von Tunneln lauten wie folgt:

- Welche Funktionen sind in welchem Umfang zu erfüllen?
- Wie effizient werden die Anforderungen durch die Anlagen umgesetzt?
- Welche gegenseitige Beeinflussung gibt es zwischen den einzelnen Funktionen respektive den zugehörigen Anlagen?
- Welche Redundanzen sind notwendig und wie sind diese umgesetzt?
- Welches ist der mögliche/akzeptable Spielraum für Vereinfachungen?
- Welche Konsequenzen (Vor- und Nachteile auf Stufe Sicherheit, Verfügbarkeit, Instandhaltung und Kosten) erzeugen die Vereinfachungen?
- Wie können die Vereinfachungen umgesetzt werden?

Prinzipiell zielen die Fragestellungen auf neu zu erstellende Anlagen ab. Es besteht aber auch Potential für Vereinfachungen bei vorausschauender Ersatzplanung (z.B. einheitliches, offenes Kommunikationssystem).

Es bietet sich an, die Planungsphilosophie bzw. den Ausrüstungsstandard mit internationalen Standards (Richtlinien, Planungshandbücher etc.) sowie internationalen Forschungsergebnissen zu vergleichen und zu überprüfen und so die erforderliche Minimalausrüstung abzuleiten. Dadurch kann ebenfalls mehr Klarheit entstehen, wo Redundanzen notwendig beziehungsweise zweckmässig sind. Zudem sollen die Einschätzungen von Optimierungspotential internationaler Experten eingeholt und im Projekt verwertet werden.

## 3 Beitrag von internationalen Experten

### 3.1 Danksagung

Die Forschungsstelle LeanTeam ist dankbar, dass folgende internationale Experten sich bereiterklärt haben, ihre persönliche Meinung zum Thema LeanTech im Strassentunnel zu äussern:

Eleftheria Aini, Dominique Anselme, Kristian Appel, Wolfgang Baltzer, Harald Buvik, Nigel Casey, Gary Clark, Alexandre Debs, Ignacio Del Rey, Enrico Ferro, Salvatore Giua, Daniel Hahne, Norris Harvey, Hubert Heis, Jørgen Holst, Rudolf Hörhan, Norbert Kaboth, Arthur Kabuya, Ingo Kaundinya, Thomas Kratz, René List, Ulf Lundström, Ronald Mante, Jean-Claude Martin, Maria Marton, Henric Modig, Martin Oberkofler, Pierre-François Jaillet, Günter Rattei, Pierre Schmitz, Christof Sistenich, Arild Petter Søvik, Conrad Stacey, Marc Tesson, Alberto Turi, Thomas van Zalingen, Alexander Wierer, Sonja Wiesholzer.

### 3.2 Vorgehensweise

Den internationalen Experten wurden per E-Mail, Telefon oder in Direktbegegnungen sinngemäss folgende Frage gestellt:

*«Welche Anforderungen an die elektromechanische Ausrüstung in Strassentunneln sollten in welcher Art angepasst werden, um die Kosten (bzw. Komplexität) zu reduzieren, ohne dadurch reelle negative Einflüsse auf die Sicherheit, Verfügbarkeit und Instandhaltung in Kauf nehmen zu müssen?»*

Um eine Vielfalt von Rückmeldungen zu ermöglichen, wurde absichtlich eine offene Frage gestellt. Ein Bezug auf die Gegebenheiten in der Schweiz wurde nicht gefordert. Der geografische Wirkungsbereich jedes Experten ist der Forschungsstelle bekannt und somit auch die natürliche Ausgangslage bzw. Referenzrahmen des Experten.

Diese Frage wurde zu Beginn des Projektes gestellt (siehe Kapitel 5). Die Rückmeldungen waren demzufolge nützlich für die Ausarbeitung der Detailanalyse der Anforderungen mit Optimierungspotential (siehe Kapitel 6).

### 3.3 Übersicht der Rückmeldungen

Insgesamt wurden 38 internationale Experten angefragt, wobei die erhaltenen Rückmeldungen die Erwartungen überstiegen. Die Rückmeldungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 23 konkrete Anpassungsvorschläge zu einzelnen Anlagen oder Einrichtungen
- 12 konkrete Anpassungsvorschläge aufgrund Betrachtungen mehrerer Anlagen
- 3 übergeordnete Anpassungsvorschläge

Darüber hinaus wurde ebenfalls die Meinung geäussert, dass keine Anpassungen der geltenden Anforderungen möglich bzw. zweckmässig sind.

### 3.4 Synthese der Rückmeldungen

#### 3.4.1 Keine Anpassungen vertretbar

Einzelne internationale Experten sind der Ansicht, dass die einschlägigen Normen und Richtlinien bereits eine Optimierung der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung beinhalten und dass keine Abstriche vertretbar sind.

### 3.4.2 Anpassungsvorschläge zu einzelnen Anlagen oder Einrichtungen

Folgende konkrete Anpassungen von Einzelanlagen wurden vorgeschlagen:

1. Notruftelefone<sup>2</sup>:
  - a. im Fahrraum abschaffen oder lediglich in den Pannenbuchten und stattdessen die Funktionalität des Mobilfunks sicherstellen.
  - b. Notruftelefone sollen in Querschlägen und weiteren Fluchteinrichtungen belassen werden.
  - c. Anstatt Nottelphone könnte man ein Informationsschild mit der Notfall-Telefonnummer vorsehen (wie auf der offenen Strecke).
  - d. *«Notrufeinrichtungen werden gem. unserer Statistik immer noch genützt. Sobald e-Call Systeme im Auto standardmässig verwendet werden, könnte man versuchen, die Notrufeinrichtungen ggf. in einem grösseren Abstand oder nur mehr in Querschlägen zu realisieren.»*
2. Anforderungen zur Materialqualität müssen hinterfragt werden. Ist Edelstahl hoher Güte immer erforderlich? Kontaktkorrosion ist aber zu vermeiden (wird in Abschnitt 0 behandelt).
3. Sind die Kosten für Werkleitungskanäle gerechtfertigt (Kosten/Nutzen)?<sup>3</sup>
4. Abluftventilatoren: Ist die Temperaturanforderung 400 °C/120min gerechtfertigt? Bei einem Grossbrand wurden Temperaturen von lediglich 60 °C gemessen (wird in Abschnitt 6.3.1 behandelt).
5. Abschaffen von Querschlagsbelüftung sowie der Forderung von Überdruck über den Querschlag; der Nutzen, den Rauchübertritt zu unterbinden, ist lediglich von theoretischer Natur.<sup>5</sup>
6. Reduktion der Anforderung zur Entwässerung von derzeit 100 l/s über 200 m; da kaum ein Fahrzeug derart viel Flüssigkeit verlieren kann. Gefahrguttransporte haben spezielle Tanks, um dies zu vermeiden.<sup>3</sup>
7. Strömungsmessgeräte (wird in Abschnitt 7.1.3 behandelt)
  - a. Die Anzahl kann reduziert werden.
  - b. Der Mehrwert der Plausibilisierung von Längsströmungsmessgeräten durch Installierung mehrerer Geräte an einem Ort leuchtet nicht ein.
8. Müssen CO-Messstellen wirklich vorgesehen werden?<sup>4</sup>
9. Keine Branddetektion in Zentralen (z.B. Elektroverteilstationen), wo sich normalerweise niemand aufhält.<sup>5</sup>
10. Die Anforderungen an den baulichen Brandschutz scheinen zu hoch zu sein und sollen hinterfragt werden.<sup>3</sup>
11. Reduktion gewisser technischer Anforderungen im Lastenheft, um die Anzahl Anbieter zu erhöhen und Monopolsituationen zu vermeiden insbesondere für:
  - a. Verkehrszeichen
  - b. Beleuchtung (wird im Abschnitt 0 behandelt)
  - c. Führungsbeleuchtung
12. Reduktion der Anforderungen an der Überwachung von Leistungsschaltern, sodass für weniger kritische Geräte nur Fehler und nicht Fehler und Position überwacht werden.<sup>6</sup>
13. Erlauben, dass Lokalsteuerungen pro Funktion gruppiert werden und nicht pro Ventilator vorgesehen werden müssen.<sup>7</sup>
14. Touch-Panels für Lokalsteuerungen weglassen, da ein Zugriff inzwischen auf anderem Weg u.a. mittels Wartungs-PC durchgeführt werden kann (wird in Abschnitt 6.4.1 behandelt).
15. Anzahl Niveaus des Leitsystems optimieren (reduzieren).<sup>7</sup>

<sup>2</sup> Wird in den ASTRA Weisungen [1] sowie in der EU-Richtlinie [2] gefordert

<sup>3</sup> Diese Anregung liegt ausserhalb des Untersuchungsperimeters dieses Vorhabens

<sup>4</sup> CO-Messungen sind in der Schweiz nur dann gefordert, wenn CO als Schadstoff den Frischluftbedarf massgeblich bestimmt.

<sup>5</sup> Wird in der Schweiz nicht gefordert

<sup>6</sup> Wird in der Schweiz nur bedingt gefordert, vgl. z.B. [23]

<sup>7</sup> Im Abschnitt 7.4 aufgenommen

16. Lockern der Vorschriften zur Anlagenkennzeichnung: Gegenwärtig führt eine geringfügige Änderung (z.B. das Verschieben eines Geräts um einige Meter) zu einer umfassenden Überarbeitung der Dokumentation.<sup>3</sup>
17. LED-Beleuchtung anwenden (wird implizit in Abschnitt 0 behandelt).
18. Auch beim Ausfall und wartungsbedingter Ausserbetriebnahme gewisser Anlagen soll die Tunnellüftungsanlage mindestens folgende Kapazität sicherstellen (wird in Abschnitt 7.1.3 behandelt):
  - a. 50 % der nominellen Lüftungskapazität.
  - b. Kapazität zur Beherrschung einer Brandleistung von 30 MW (auch wenn der Dimensionierungsbrand höher ist (50, 100, 200 MW).
19. Abgesehen von Anlagen zur Tunnelspernung müssen verkehrstechnische Anlagen nicht redundant ausgeführt werden, da sie im eigentlichen Sinn keine sicherheitstechnischen Einrichtungen sind.<sup>7</sup>
20. Die Energieversorgung sollte bei Tunneln ab 400 m Länge redundant ausgeführt sein, d.h. entweder mittels zwei separater Einspeisungen oder mittels einer Ringleitung. Im Rahmen der weiteren Einführung erneuerbarer Energien gewinnt die Frage der Netzstabilität wieder an Bedeutung, da sich die Anzahl und die Dauer von Unterbrüchen vergrößert hat. Von daher ist zu überlegen, doch wieder grundsätzlich Notstromanlagen vorzuhalten, um auch einen Teil der Lüftungsanlagen versorgen zu können, bzw. die USV-Anlagen auf eine Kapazität von zwei Stunden auszulegen, wobei auf den Betrieb der Lüftungsanlagen verzichtet wird. (Diese Fragestellung wird in Abschnitt 6.1.1 behandelt).
21. Nutzen von bewährten Systemen und Technologien.<sup>3</sup>
22. Verzicht auf Videobildauswertung (wird in Abschnitt 6.5.2 behandelt).
23. Übererfüllungen der Richtlinien z.B. mittels AKUT («acoustic tunnel monitoring») ist nicht sinnvoll.<sup>5</sup>

### 3.4.3 Anpassungsvorschläge aufgrund Betrachtungen mehrerer Anlagen

Mittels einer Betrachtung mehrere Anlagen bzw. Einrichtungen wurden von den internationalen Experten folgende LeanTech-Optimierungen vorgeschlagen:

1. Auf die Multiplikation der Anlagen zur Brand- bzw. Rauchererkennung soll verzichtet werden und nicht stets alle folgenden installieren: Thermische Linienmelder, automatische Videobildauswertung, Rauchmelder und Sichttrübemessgeräte (wird in den Abschnitten 6.5.1 und 6.5.2 behandelt).
2. Es reicht aus, dass ein Brand mittels thermischen Linienmelder, Notruftelefone bzw. Mobilfunk gemeldet wird. Auf manuelle Brandmeldeeinrichtungen, wie z.B. Brandmeldetaster<sup>5</sup>, kann verzichtet werden.
3. „Sensorfusion“. Nicht jede Sensorfamilie (z.B. Brandmeldekabel, Sichttrübemessung, Videokamera) soll separat ausgewertet werden. Diese sollen gewissermassen „fusioniert“ werden und dadurch die Anzahl an Fehlalarmen reduziert und gleichzeitig die Sicherheit/Zuverlässigkeit der Alarme insgesamt erhöht werden (wird in den Abschnitten 6.5.1 und 6.5.2 behandelt).
4. Beim Nutzen von fest installierten Brandbekämpfungsanlagen (FFFS) könnten folgende Anforderungen reduziert werden
  - a. Dimensionierungsbrand für die Tunnellüftungsanlage (wird in Abschnitt 7.1.3 behandelt).
  - b. Anforderungen an den baulichen Brandschutz<sup>3</sup>.
5. Mit baulichen Optimierungen<sup>3</sup> können die Anforderungen an die Installationen reduziert werden:
  - a. Aufgrund optimaler geografischer Orientierung kann die Anforderung an Beleuchtung reduziert werden. Blenden von der Sonne ist auch zu beachten.
  - b. Mit Längsneigung ohne Tiefpunkt im Tunnel kann auf Pumpen für die Entwässerung verzichtet werden.
  - c. Mit kürzeren Tunneln werden die Anforderungen an die Tunnellüftung reduziert.
6. Lediglich Längslüftung vorsehen, sofern die Stauhäufigkeit gering ist. Mittels verkehrstechnischer Massnahmen (aktive Bewirtschaftung) durch Rotlicht und

- Absperrschranken soll Stau im Tunnel vermieden werden. (Diese Fragestellung wird in Abschnitt 7.1.3 behandelt).
7. Anstatt Einsprechmöglichkeit in Radio (FM / DAB) sollen Lautsprechersysteme (Typ SLASS<sup>8</sup>) verwendet werden (wird in Abschnitt 7.4.1 behandelt).
  8. Auf die in der RABT 2016/EABT 2019 [106] vorgesehenen Grossflächennotruftaster kann verzichtet werden; da sie kein Gegensprechen ermöglichen. Das Erkennen einer notwendigen Hilfeleistung erfolgt besser über Video bzw. Auswertung des Verkehrsflusses<sup>5</sup>.
  9. Die optische Leiteinrichtung erfüllt auch die Aufgabe der Orientierungsbeleuchtung (Brandnotleuchten). Auf diese kann demzufolge verzichtet werden. (Diese Fragestellung wird in Abschnitt 6.2.1 behandelt).
  10. Zur Verkehrsdatenerfassung soll man sich auf zwei Systeme beschränken. Einerseits die Videodetektion<sup>5</sup> und als zweites System entweder Induktionsschleifen, Radar- oder Laserdetektoren.
  11. Anstatt Feuerlöscher<sup>2</sup> sollen Schlauchhaspeln vorgesehen werden, so dass die Tunnelbenutzer damit selbst Brände bekämpfen können.
  12. Ein Regelbereich der Längsströmung in einem Richtungsverkehrstunnel von 0.5 m/s scheint unnötig. Genüge ein Regelbereich von 2 – 4 m/s nicht? (wird in Abschnitt 7.1.3 behandelt)

### 3.4.4 Übergeordnete Vorschläge der internationalen Experten

LeanTech-Optimierungen wurden aufgrund folgender Hauptüberlegungen angeregt:

1. Nach dem Motto: «weniger ist mehr»: Wurde allgemein eine Reduktion der Komplexität und damit der Kosten vorgeschlagen, was zur Erhöhung der Zuverlässigkeit bei gleichzeitiger Reduktion der Anzahl Fehlalarme führt und daher die Sicherheit eher erhöht. Komplexe Systeme benötigen auch aufwendige Wartung und regelmässige Überprüfung der Funktionalität. Es wäre besser, mehr Personal in der Betriebsführung zu haben und dafür auf gewisse technische Anlagen zu verzichten (wird in Abschnitt 7.4.2 behandelt).
2. Kosten-Nutzenanalyse in einer gesamtgesellschaftlichen Betrachtungsweise ist zu erstellen, um die Kosteneffizienz der Risikominimierung zu optimieren. Wahrscheinlich wäre es vorteilhafter, die Sicherheit auf dem allgemeinen Strassennetz zu verbessern, anstatt in Tunneltechnik zu investieren.<sup>3</sup>
3. Die Anlagen sollen nachhaltig<sup>9</sup> unter Berücksichtigung von RAMS-Analysen<sup>10</sup> (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit) geplant werden (wird in Abschnitt 7.5.3 behandelt).
  - a. Die Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der einzelnen Tunnelsysteme / Ausrüstungsteile, insbesondere wenn sie für die Sicherheit von wesentlicher Bedeutung sind, trägt dazu bei, den Tunnel für die Benutzer offen zu halten. Unabhängig davon, ob es sich um einen städtischen Tunnel handelt oder nicht, sind die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Auswirkungen einer noch so kurzen Tunnelsperre offensichtlich.
  - b. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wäre die Frage zu beantworten, welche Systeme die meisten Störungen hervorrufen. Diese sollten durch zuverlässigere Systeme ersetzt werden. (Diese Fragestellung wird in Kapitel 7.4.2 behandelt).
  - c. Man müsste grösseren Wert auf den baulichen Brandschutz bzw. auf automatische Löschsysteeme legen, da die Sanierung oft sehr langwierig ist und die Kosten nur zu einem sehr kleinen Teil durch die Versicherungen getragen werden.<sup>3</sup>

<sup>8</sup> Synchronised Longitudinal Announcement Speaker System

<sup>9</sup> Siehe rapport technique de l'AIPCR 2017R02FR: «Exploitation des tunnels routiers: premiers pas vers une approche durable»

<sup>10</sup> Siehe PIARC technical report 2019R05EN "Introduction to the RAMS concept for road tunnel operations" - PIARC 2019

## 4 Systematische Aufarbeitung der Anforderungen

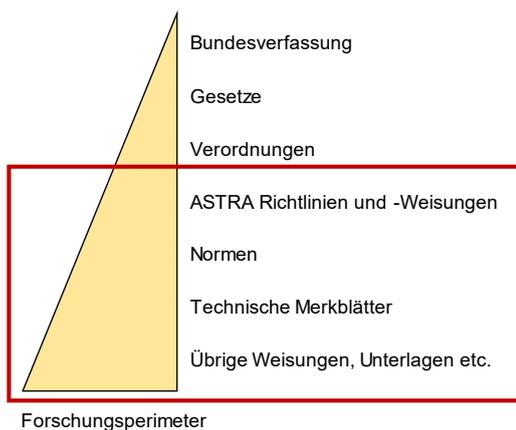
Für die Erarbeitung der Anforderungen sind grundsätzlich zwei Herangehensweisen möglich: Top-down und Bottom-up. Beim Top-down Ansatz wird von einem hohen Abstraktionsgrad respektive einer globalen Betrachtung ausgegangen. Schritt für Schritt wird das Problem zunehmend konkretisiert. Ein Gesamtproblem wird in Teilprobleme aufgeteilt, welche dann u.U. in weitere Teilprobleme aufgeteilt werden. Beim Bottom-up Ansatz werden zunächst abgegrenzte, detaillierte Teilprobleme gelöst. Mit deren Hilfe werden anschliessend die darüber liegenden, nächst grösseren Problemen angegangen usw. bis zum Schluss das Gesamtproblem geklärt werden kann.

Die Interviews mit den internationalen Experten, welche in Kapitel 3 dokumentiert sind, können als eine Top-down Vorgehensweise betrachtet werden.

Aufgrund des bestehenden Kontexts wurde für die Erarbeitung der Anforderungen ein Bottom-up Ansatz gewählt, welcher auf den bestehenden, aktuell geltenden, Anforderungen aufbaut.

Dazu wurde die vom ASTRA festgelegte Rangordnung der Richtlinien, Normen, etc. verwendet. Diese Rangordnung sowie der berücksichtigte Projektperimeter sind in Abb. 1 dargestellt. Anforderungen von höherer Priorität als ASTRA-Richtlinien (z.B. die ASTRA Weisungen) wurden a priori als unumstösslich betrachtet, da diese ausserhalb des Beeinflussungsgebiets der Forschungstätigkeit liegt. Die ASTRA Weisung [1] in welcher die minimalen Sicherheitsanforderungen an Tunneln im Nationalstrassennetz festgelegt sind, wurde ebenfalls vom Projektperimeter ausgeschlossen. Das bedeutet implizit, dass die Anforderungen gemäss EU-Richtlinie [2] einzuhalten sind.

Der, am bestehenden Regelwerk orientierte, Bottom-up Ansatz wurde als vorteilhaft erachtet, da der Forschungsperimeter klar abgegrenzt ist, die Anforderungen klar strukturiert sowie priorisiert sind und da sich die Analyse und allfällige Optimierungen direkt auf bestehende Anforderungen beziehen.



**Abb. 1** Hierarchie der Anforderungen und Forschungsperimeter

Die Anforderungen aus [1] und [2] wurden zum Projektbeginn analysiert, um den Spielraum abzuschätzen, welcher betreffend Anpassungen der hiesigen Vorgaben bestand. Dieser Spielraum ist aber grundsätzlich gross, da die entsprechenden Vorgaben sehr allgemein verfasst sind und häufig mögliche Ausnahmen beinhalten. Im Anschluss an diese Analyse wurden in erster Linie folgende Dokumente berücksichtigt:

- ASTRA Richtlinien BSA (z.B. ASTRA 13001 [3] bis 13040 [13] )
- SN / SIA Normen (z.B. SIA 197 [20] , 197/2 [19] )
- Reine SN Normen (z.B. SN 640551 [91] )
- ASTRA Merkblätter (z.B. ASTRA Fachhandbuch BSA 23001, [22] bis [90] )
- ASTRA Dokumentationen (z.B. ASTRA 86053 [104] )

Die abschliessende Liste der zu berücksichtigenden Quellen (Normen, Richtlinien etc.) wurde im Rahmen des Projektstarts mit der Begleitkommission abgeglichen.

Die Anforderungen an die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung wurden nach den Fachbereichen gemäss AKS-CH [8] gegliedert und mit der Quelle (z.B. ASTRA 13015 [9] ) referenziert. Dies erlaubte es in den späteren Arbeitsschritten, den Anpassungsbedarf einfacher zu identifizieren.

Anforderungen, welche keinem Fachbereich zugeordnet waren, wurden dem Pseudofachbereich «Übergeordnet» zugeteilt. Somit wurden die Anforderungen aufgrund folgender Fachbereiche analysiert:

- 0 – Übergeordnet
- 1 – Energieversorgung
- 2 – Beleuchtung
- 3 – Lüftung
- 4 – Signalisation
- 5 – Überwachungsanlagen
- 6 – Kommunikation & Leittechnik
- 7 – Kabel
- 8 – Nebeneinrichtungen

Ein exemplarischer Auszug des Ergebnisses des ersten Arbeitsschritts ist in Tab. 1 dargestellt.

**Tab. 1** Beispielhafte Zusammenstellung der Vorgaben

Anlage	Anforderung (Abgekürzt)	Quelle
1 – Energieversorgung	Speisung von zwei unabhängigen Netzen	SIA 197/2 [19]
1 – Energieversorgung	Unterteilung in anlagenspezifische Netze	23001-11130 [24]
2 – Beleuchtung	Brandnotbeleuchtung	SIA 197/2 [19]
2 – Beleuchtung	Optische Leiteinrichtung	ASTRA 13015 [9]
3 – Lüftung	Redundanz Strahlventilatoren: min. Schub bei Ausfall	ASTRA 13001 [3]
3 – Lüftung	Minimale Anzahl Abluftventilatoren	ASTRA 13001 [3]
3 – Lüftung	Ersatz Strahlventilator innerhalb 6 Monaten	ASTRA 86053 [104]
6 – Kommunikation und Leittechnik	Redundanz Steuerungen (Abschnittsrechner, Anlagensteuerung, Lokalsteuerung), Anbindung Breitbandkommunikationsnetzwerk, Reflexe Typ 1/2	ASTRA 13031 [12]

Die systematische Analyse ergab für das Projekt LeanTech relevante Anforderungen in

- 18 ASTRA Weisungen und Richtlinien
- 5 Normen
- 69 technischen Merkblättern (ASTRA Fachhandbücher)

In diesen Dokumenten (siehe Literaturverzeichnis) wurden insgesamt 2182 Anforderungen identifiziert, welche den Minimalanforderungen entsprechen und daher in der Datenbank für die weitere Bearbeitung erfasst wurden.

## 5 Selektion der Anforderungen mit Optimierungspotential

### 5.1 Einleitung

Die Analyse der Anforderungen dient dazu, diejenigen Vorgaben zu identifizieren, welche nicht aufgrund der heutigen Rahmenbedingungen respektive dem heutigen Stand der Technik oder absehbarer technischer Entwicklungen teilweise oder sogar vollständig überholt sind. Daraus resultierten die optimierungswürdigen Anforderungen, welche im nächsten Bearbeitungsschritt (siehe Kapitel 6) vertiefter analysiert werden.

Gemäss Kapitel 4 wurden in den Quellen (Normen, Richtlinien, etc.) insgesamt 2182 Anforderungen identifiziert. Diese Anforderungen könnten grundsätzlich angepasst werden, ohne die Minimalanforderungen UVEK zu verletzen.

Aufgrund der grossen Anzahl von Anforderungen wurde es als zwingend erachtet, die Selektion der Anforderungen mit Optimierungspotential mehrstufig durchzuführen. Dies ist in den Abschnitten 5.2 - 5.6 erläutert. Die Auswahlstufen des Triageverfahrens sind in Tab. 2 ersichtlich.

Schlussendlich wurden 41 Anforderungen definiert, die im Rahmen dieses LeanTech-Projektes einer Detailanalyse (Kapitel 6) unterzogen wurden. Zudem wurden 28 weitere Anforderungen mit Optimierungspotential bestimmt, die in Kapitel 7 bewertet wurden. Wobei gesagt werden muss, dass die Detailanalyse (Kapitel 6) im Vergleich zur Bewertung (Kapitel 7) ausführlicher ist.

**Tab. 2** Übersicht des Triageverfahrens betreffend optimierungswürdige Anforderungen

Auswahlstufe	Anzahl	Fachbereich								
		0 - Übergeordnet	1 - Energieversorgung	2 - Beleuchtung	3 - Lüftung	4 - Signalisation	5 - Überwachungsanlagen	6 - Kommunikation & Leittechnik	7 - Kabel	8 - Nebeneinrichtungen
Stufe 1: Einhaltung der Minimalvorgaben	2182	7	183	254	519	291	179	333	222	194
Stufe 2: Komplexitäts-/Kostentreibend	366	4	17	42	262	10	14	8	0	9
Stufe 3: Erstbewertung	265	3	7	26	190	10	14	8	0	7
Stufe 4: Detailbewertung	102	0	4	10	55	10	14	8	0	1
Stufe 5: Auswahl für Detailanalyse (Kapitel 6)	41	0	4	10	14	5	6	1	0	1
Weitere Anforderung zur Beurteilung (Kapitel 7)	28	0	0	0	17	1	6	4	0	0

Die Analyse umfasste die Untersuchung des Einflusses, der Effizienz sowie der Zusammenhang respektive gegenseitige Beeinflussung der Anforderungen innerhalb der drei Kernbereiche *Sicherheit*, *Verfügbarkeit* und *Instandhaltung*. Somit werden implizit die Belange des Betriebs berücksichtigt.

Der Aspekt *Zuverlässigkeit*, wie er z.B. im Kontext von RAMS Analysen zusätzlich betrachtet wird, ist nicht Teil der Analyse. Gemäss unserem aktuellen Kenntnisstand ist die Anzahl der Anforderungen an die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung, welche auf unzureichender Zuverlässigkeit von Komponenten / Anlagenteilen beruht, sehr beschränkt. Die Zuverlässigkeit respektive die Konsequenzen im Falle eines Ausfalls sind im Allgemeinen über die geforderte Verfügbarkeit der Infrastruktur abgedeckt.

## 5.2 Stufe 1: Einhaltung der Minimalvorgaben

Ziel der Analyse von Stufe 1 war es, die Vollständigkeit des Anforderungskatalogs gegenüber den minimal einzuhaltenden Anforderungen zu prüfen. Dadurch wurde sichergestellt, dass die vom UVEK geforderten minimalen Vorgaben Teil des Anforderungskatalogs waren und als solche gekennzeichnet wurden.

2182 Anforderungen wurden identifiziert, welche grundsätzlich angepasst werden könnten, ohne die Vorgaben UVEK zu verletzen. Die Anforderungen, welche nicht angepasst werden konnten, wurden nicht erfasst.

## 5.3 Stufe 2: Komplexitäts- und/oder kostentreibend

In der zweiten Stufe wurden die Anforderungen auf ihre kosten- und komplexitätstreibende Wirkung analysiert. Dies erlaubte es, diejenigen Anforderungen zu identifizieren, welche einen grossen Einfluss auf die Anlagenkosten haben respektive diejenigen, welche nur geringe Kosten nach sich ziehen.

Unter dem Kriterium komplexitätstreibend wird dabei folgendes vereint:

- Einfluss auf Stufe Systemwahl
- Einfluss auf Stufe Ausrüstungsstandard
- Eindeutiger, massgeblicher Einfluss auf die (Teil-)Anlagenkosten
- Einfluss auf bauliche Infrastruktur

Die Anforderungen wurden in folgende drei Kategorien zugeordnet:

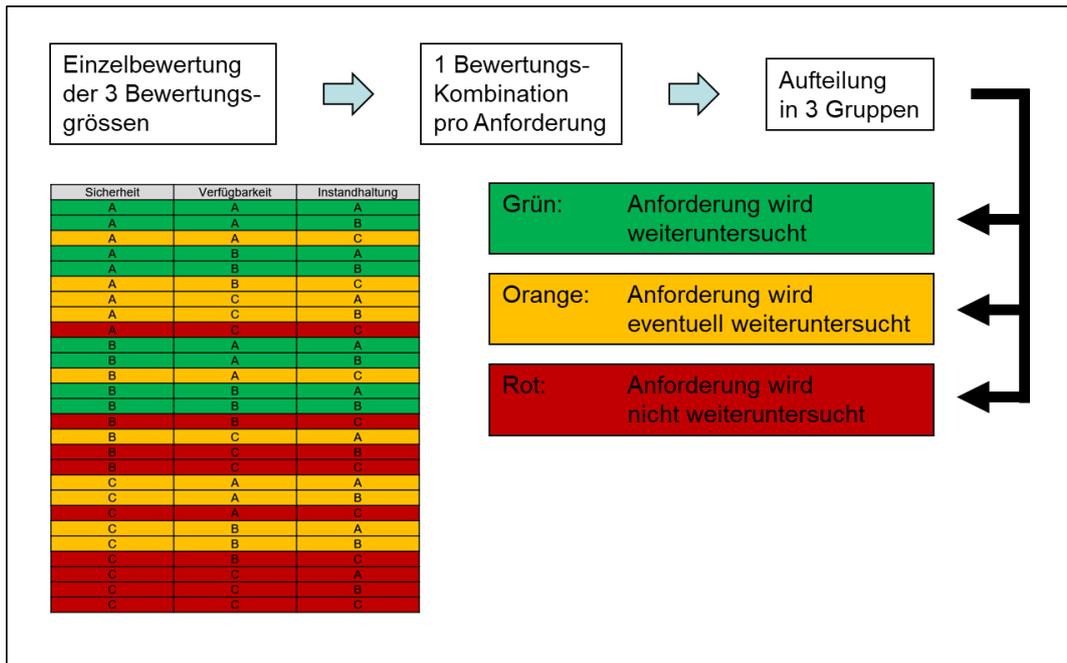
- Kategorie 1: Anforderungen von untergeordnetem Einfluss auf die Kosten und die Komplexität der Anlagen
- Kategorie 2: Anforderungen, welche durch die Forschungsstelle nicht eindeutig eingeordnet werden konnten
- Kategorie 3: Anforderungen, welche stark kosten- oder/und komplexitätstreibend sind

Anforderungen, welche zwar kosten- und komplexitätstreibend sind, aber gleichzeitig projektspezifisch angepasst werden können sind der Kategorie 1 zugeteilt. Dies, weil sie aufgrund der Spezifität nicht allgemein behandelt werden können respektive problemlos angepasst werden können.

Ebenfalls wurden in diesem Schritt diejenigen Anforderungen identifiziert, welche direkt oder indirekt zu Redundanzen führen könnten. Diese wurden der Kategorie 3 zugeteilt.

Die Anforderungen in Kategorie 1 sind im Sinne von LeanTech nicht unmittelbar interessant und wurden daher nicht weiter analysiert. Für die Anforderungen der Kategorie 2 und 3 wurde das Kriterium *komplexitätstreibend* genauer betrachtet.





**Abb. 2** Gesamtbeurteilung (Stufe 2) aufgrund der Bewertung der Einzelkriterien

Im Sinne von LeanTech wurden alle Anforderungen der Kategorien Grün und Orange weiterbetrachtet. Zusammengefasst ergab die Erstbewertung, dass von den 366 komplexitäts- und/oder kostentreibenden Anforderungen deren 265 in Kapitel 5.5 weiterzuverfolgen sind.

Die Betrachtungsweise, die Beurteilungskriterien sowie Benotung der oben erwähnten Bereiche *Sicherheit*, *Verfügbarkeit* und *Instandhaltung* im Zusammenhang mit LeanTech wird im Folgenden beschrieben.

Sicherheit: Einzig die Sicherheit des Verkehrsteilnehmers (Tunnelbenutzer) während des regulären Tunnelbetriebs oder während eines Ereignisses (Unfall, Brand etc.) wurde betrachtet. Dies hat zur Folge, dass insbesondere die Sicherheit des Betriebspersonals oder der Einsatzkräfte nicht betrachtet wurde. Technische Ereignisse (z.B. Wartung, Störung, Komponenten-/Anlagenausfall) galten nicht als Ereignisse. Als Beurteilungskriterium wurde die Veränderung im Bereich Sicherheit definiert, wenn die Anforderung reduziert oder komplett weggelassen würde. Führt dies zu einer höheren Sicherheit für den Tunnelbenutzer, ergibt sich die Benotung A. Bei einer unveränderten oder reduzierten Sicherheit ergibt sich die Bewertung B respektive C.

Verfügbarkeit: Die «Nicht-Verfügbarkeit» eines Aggregats, einer Teilanlage, einer Anlage oder der gesamten BSA aufgrund eines geplanten oder ungeplanten Ereignisses führt zu einer Reduktion des Betriebs-/Sicherheitsniveaus und damit zwingend zu einer reduzierten Verfügbarkeit der Infrastruktur. Entsprechend wird zur Bewertung der Verfügbarkeit des Verkehrsweges der Einfluss auf die Sicherheit des Tunnelbenutzers im Falle eines geplanten oder ungeplanten Ausfalls betrachtet. Es wurde nicht betrachtet, wie die «Nicht-Verfügbarkeit» bewältigt wird (flankierende, risikomindernde Massnahmen). Ebenso wurde die Reduktion nicht weiter quantifiziert. Die Dokumentation ASTRA 86053 [104] wurde hierfür als Referenzdokument verwendet. Als Beurteilungskriterium diente einerseits die Sicherheit (siehe Definition Sicherheit oben) bei geplanter sowie ungeplanter «Nicht-Verfügbarkeit» einer (Teil-)Anlage, welche mit der untersuchten Anforderung in Zusammenhang steht. Andererseits wurde auch betrachtet, inwiefern sich die Sicherheit bei der «Nicht-Verfügbarkeit» der (Teil-)Anlage bei einer reduzierten oder gänzlich ohne die entsprechende Anforderung verhält. Eine Benotung A wurde bei einer höheren Verfügbarkeit des Verkehrsweges (Sicherheit), die Benotung B ein unveränderter und C bei reduzierter Verfügbarkeit erzielt.

Instandhaltung: Betrachtet wurde der planmässige betriebliche Unterhalt und die geplante Erneuerung von Teil-/Anlagen (UPlaNS). Bewertet wurde die Veränderung des Aufwands in Zeit und Kosten für die Instandhaltung. Als Beurteilungskriterium wurde die Veränderung im Bereich betrieblicher Unterhalt / Erneuerung der Anlage definiert, wenn die Anforderung reduziert respektive weggelassen würde. Lässt sich damit der Aufwand reduzieren, so führt das zur Benotung A. Bei unverändertem oder erhöhtem Aufwand wird die Bewertung B oder C erteilt.

## 5.5 Stufe 4: Detailbewertung

Die resultierenden 265 Anforderungen der Erstbewertung wurden einerseits Expertenbeurteilungen unterzogen und andererseits wurde das Sparpotential pro Bauwerk durch Anpassung der Anforderung ermittelt:

- A. Weniger als CHF 10'000.–
- B. CHF 10'000.– bis CHF 100'000.–
- C. Mehr als CHF 100'000.–

Mit dieser Information konnten die aussichtsreichsten Anforderungen hinsichtlich Optimierungspotential auserkoren werden.

Zudem wurde für die noch zu analysierenden Anforderungen beurteilt, ob die Anforderung abhängig von

- Tunnellänge und/oder
- Verkehr

sein sollte bzw. könnte.

Die Detailbewertung ergab 101 optimierungswürdige Anforderungen.

## 5.6 Stufe 5: Auswahl für das LeanTech Vorhaben

Für die finale Auswahl wurden die Ergebnisse der Methodik sowie auch Fach-, Expertenmeinungen sowie die Anregungen und Vorschläge der internationalen Experten berücksichtigt.

Aufgrund einer Gesamtbeurteilung wurden somit 41 zu optimierende Anforderungen ermittelt, welche anschliessend in der Detailanalyse untersucht wurden (siehe Kapitel 6).

Die weiteren 28 Anforderungen, welche grosses Optimierungspotential aufweisen, aber nicht in Rahmen dieses Projektes vertieft untersucht werden konnten, sind in Kapitel 7 aufgelistet und beurteilt.



## 6 Detailanalyse ausgewählter Anforderungen mit Optimierungspotential

Mittels der systematischen Analyse (siehe Kapitel 5) wurden diejenigen Anforderungen mit dem grösstem Optimierungspotential ermittelt, um diese gezielt einer vertieften Analyse zu unterziehen. Nachfolgend ist das Vorgehen dieser Detailanalyse beschrieben und in den darauffolgenden Unterkapiteln auf die jeweiligen Anforderungen angewandt.

Die vertiefte Analyse ist wie folgt gegliedert:

- Einleitung
- Anforderung(en)
- Beurteilung im Sinne von LeanTech

Die Ergebnisse der Analysen führten entweder zu:

- **einem Anpassungsvorschlag** konkreter Natur und/oder
- **einer Handlungsempfehlung für vertiefte Untersuchungen** oder
- keiner Anpassung der Anforderung im Sinne von LeanTech möglich

Die Forschungsstelle konnte auch in dieser Phase bei der Beurteilung der Verbesserungsvorschläge vom breiten Erfahrungsschatz der Mitglieder der Begleitkommission profitieren, welche in konstruktiver Art die Analysen kritisch hinterfragten und wertvolle Hinweise gaben.

### 6.1 Fachbereich 1 – Energieversorgung

#### 6.1.1 Speisung durch zwei unabhängige, lokale Netze

##### Einleitung

Das Risiko, dass die Energieversorgung eines Strassentunnels ausfällt, soll möglichst klein sein.

##### Anforderung

- *SIA 197/2, Projektierung Tunnel – Strassentunnel [29]:*
  - *Abschnitt 9.8.1: Der Tunnel soll von zwei unabhängigen, lokalen Netzen gespeist werden. Zusätzlich ist eine unterbrechungsfreie Notstromversorgung (USV-Anlage) vorzusehen.*
- *ASTRA 13001, Lüftung der Strassentunnel [3]:*
  - *Abschnitt 9.4: Die Axialventilatoren, die Strahlventilatoren sowie die Ventilatoren zur Druckbelüftung der Fluchtwege müssen von zwei unabhängigen Netzen versorgt werden. Ein Betrieb über USV ist nicht praktikabel.*
- *ASTRA 13002, Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln [4]:*
  - *Abschnitt 3.3.1: Alle Ventilatoren zur Lüftung von Sicherheitsstollen und Querverbindungen müssen wie die Fahrraumlüftung über zwei elektrische Einspeisungen versorgt werden.*
  - *Abschnitt 4.3.1: Alle Ventilatoren zur Lüftung von direkt nach aussen führenden Fluchtstollen müssen wie die Fahrraumlüftung über zwei elektrische Einspeisungen versorgt werden.*
  - *Abschnitt 5.3.1: Alle Ventilatoren zur Lüftung von Querverbindungen müssen wie die Fahrraumlüftung über zwei elektrische Einspeisungen versorgt werden*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 3** Auszug Anforderungskatalog FB 1: Speisung durch zwei unabhängige, lokale Netze

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
B	B	A	Anpassung möglich	Anpassung möglich	C (>100 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von Lean Tech

Bei einem Ausfall eines der beiden Versorgungsnetze eines Tunnels kann die Energieversorgung über die Einspeisung aus dem zweiten unabhängigen Netz sichergestellt werden.

Für gewisse Bauwerke ist eine Speisung durch zwei unabhängige Stromnetze nur mit sehr grossem Aufwand möglich (Tunnel in abgelegenen Gebiet oder aber auch Stadttunnel). Zudem sind Netzausfälle in der heutigen Zeit eher eine Seltenheit geworden: Aktuell ist die häufigste Ursache von Netzunterbrüchen Wartungsarbeiten; Störungsbedingte Netzausfälle, welche nicht vorhergesehen beziehungsweise sofort kompensiert werden können, sind selten. Unterbrüche werden vom Energielieferanten / Netzbetreiber in der Regel innert weniger als 60 Min behoben. Die Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Ausfalls der beiden, unabhängigen Netze ist sehr gering. Die USV-Anlage kann einen Netzausfall nicht vollumfänglich kompensieren; diese versorgt nur Teile gewisser BSA-Anlagen wie die Steuerungen, die Signalisation und die Notbeleuchtung.

Die Speisung über zwei unabhängige lokale Netze ist in vielen Fällen eine gerechtfertigte Anforderung. Insbesondere, wenn es sich um lange Tunnel mit einer mechanischen Lüftung des Fahrraums handelt. Bei kurzen Tunneln mit einem tiefen Ausrüstungsgrad stellt sich jedoch die Frage der Notwendigkeit von zwei unabhängigen Einspeisungen. Gerade in Fällen, bei denen nicht bereits zwei lokale Netze vorhanden sind, ist die Umsetzung dieser Anforderung häufig mit erhöhten Kosten verbunden.

Würde ein Strassentunnel nur noch über ein Versorgungsnetz gespeist, hätte dies vorwiegend Auswirkungen auf die Verfügbarkeit. Die Auswirkungen sind jedoch sehr stark davon abhängig, welche Länge und welchen Ausrüstungsgrad ein Tunnel hat. Für eine netzweite kohärente Umsetzung (Vereinheitlichung der durchzuführenden Betrachtungen) kann es vorteilhaft sein, eine Form der Tunnelklassifizierung einzuführen, welche klar definiert, unter welchen Voraussetzungen zwei unabhängige, lokale Einspeisungen zwingend sind respektive wann davon abgewichen werden kann.

Einfluss auf die Sicherheit: Wird ein Strassentunnel nur über ein Netz mit Energie versorgt, hat dies nicht unmittelbar einen Einfluss auf die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer. Beim Ausfall dieses Netzes werden gewisse einzelnen Teilanlagen der BSA durch die USV-Anlage weiter versorgt. Anlagen wie z.B. die Lüftung werden nicht von der USV-Anlage versorgt und funktionieren daher nicht. Dies führt zu einer Beeinträchtigung der Sicherheit und erfordert flankierende Massnahmen, sofern der Tunnel weiterbetrieben werden soll. Eine Versorgung aller BSA-Anlagen durch die USV ist nicht zweckmässig.

Einfluss auf die Verfügbarkeit: Wird ein Strassentunnel nur über ein Netz gespeist, wird die Verfügbarkeit reduziert. Eine Ausnahme bilden dabei Tunnel, welche in solchen Fällen auch ohne BSA-Anlagen betrieben werden könnten. Dabei ist in erster Linie zu entscheiden, ob es im Fahrraum oder für die Fluchtwege eine Lüftung hat. Auch die Beleuchtungssituation ist entsprechend zu beurteilen. Allenfalls wäre ein Weiterbetrieb auch nur mit zusätzlichen Massnahmen (manuelles Aufstellen von Signalen zur Geschwindigkeitsbegrenzung, Überwachung durch Personal vor Ort usw.) möglich.

Ein Punkt, welcher ebenfalls in Betracht zu ziehen ist, sind Wartungsarbeiten am Versorgungsnetz wie auch an den Einspeisungen. Diese können zu Versorgungsunterbrüchen führen, falls die Einspeisung nicht redundant ausgeführt ist.

Einfluss auf die Instandhaltung: Wird ein Strassentunnel nur über ein Netz gespeist, hat dies keinen grossen Einfluss auf die Instandhaltung. Die Einsparungen bei der Instandhaltung aufgrund von nur einem Netzanschluss fallen nach unserem Erachten nicht gross ins Gewicht. Zusätzliche Probleme, welche durch das Wegfallen der Redundanz entstehen können, schlagen sich direkt auf die Verfügbarkeit nieder.

**Tab. 4 Zusammenfassende Beurteilung**

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus	Verkraftbare Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung

Die entsprechenden Anforderungen in Österreich (RVS 09.02.22) [105] sind differenzierter als in der Schweiz und ergeben mehr projektbezogenes Optimierungspotential, siehe Abb. 3.

## TUNNEL

Seite 16

## TUNNELAUSRÜSTUNG

RVS 09.02.22

### 9.1.1 Versorgung aus dem Elektrizitäts-Netz

Die Energieversorgung eines Tunnels ist an die gegebenen Netzverhältnisse des Netzbetreibers unter Berücksichtigung der Gefährdungsklasse anzupassen.

Eine zweiseitige Anspeisung hat über jede Anspeisung die gesamte Energieversorgung der BuS sicherzustellen, wobei die beiden Anspeisungen aus zwei Umspannwerken erfolgen sollen. Ist dies aus wirtschaftlichen Überlegungen nicht zweckmässig, haben die beiden Anspeisungen mindestens von zwei Abgängen aus einem Umspannwerk zu erfolgen. Bei einer einfachen Versorgung aus dem Netz hat eine allenfalls erforderliche zweite Anspeisung durch ein Stromerzeugungsaggregat zu erfolgen.

Bei Ausfall einer Anspeisung ist sicherzustellen, dass der gesamte Tunnel in möglichst kurzer Zeit (Minutenbereich) wieder voll versorgt werden kann. Verfügt der Tunnel über eine eigene Mittelspannungskabelanlage, ist bei Unterbrechung eines Kabelabschnittes sicherzustellen, dass der gesamte Tunnel kurzfristig voll versorgt werden kann.

**Abb. 3 Anforderungen an die Stromversorgung in Österreich gemäss RVS 09.02.22 [105]**  
BuS ist synonym zu BSA.

## Anpassungsvorschlag

Aufgrund der aufgeführten Beurteilung wird folgende Änderung vorgeschlagen:

- Für Tunnel, welche über eine Fahrraumlüftung und/oder eine Fluchtweglüftung verfügen, ist eine zweiseitige Einspeisung vorzusehen.
  - Im Normalfall soll die Einspeisung aus zwei unabhängigen, lokalen Netzen erfolgen.
  - Ist dies aus wirtschaftlichen Überlegungen nicht zweckmässig, haben die beiden Einspeisungen mindestens von zwei Abgängen aus einem Netz zu erfolgen.
- Für alle anderen Tunnel ist die Speisung ab einem einzelnen Netz zulässig, sofern nachfolgende Bedingungen erfüllt sind:
  - Aufgrund von Sicherheitsüberlegungen ist es zulässig, diesen trotz des kompletten Ausfalls der Stromversorgung (Normalnetz und USV-Anlage) weiter zu betreiben (ohne oder mittels flankierender Massnahmen wie Geschwindigkeitsreduktion, Personal vor Ort etc.).
  - Bei geplanten Unterbrüchen der Stromversorgung (z.B. bei Wartungsarbeiten am Netz) kann die Speisung des Tunnels gewährleistet werden.

## 6.1.2 Gleichzeitigkeitsfaktor 1

### Einleitung

Damit im Ereignisfall in einem Strassentunnel für sämtliche Verbraucher genügend Energie zur Verfügung steht, sind die Verbraucherleistungen mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 1 zu erfassen. Dieser Wert wird für die Auslegung der Mittelspannungsanlagen verwendet und dient gleichzeitig auch für die Ermittlung des notwendigen Leistungsbezuges über die Einspeisepunkte. Somit besteht zu jeder Zeit die Möglichkeit, alle Verbraucher gleichzeitig zu betreiben.

### Anforderung

- TM 23 001-11130, *Mittelspannung (1 kV bis 20 kV) [24]* :
  - Abschnitt 2.3.2: *Die Verbraucherleistungen sind mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 1 zu erfassen.*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obige Anforderung auf.

**Tab. 5** Auszug Anforderungskatalog FB 1: Gleichzeitigkeitsfaktor 1

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
B	B	A	Anpassung möglich	Anpassung möglich	C (>100 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Bei Strassentunneln handelt es sich um komplexe technische Systeme. In den seltensten Fällen kommt es daher vor, dass es in einem Bauwerk einen Betriebszustand gibt, bei welchem alle Verbraucher gleichzeitig auf ihrer Nennleistung betrieben werden. Dies gilt insbesondere für die Lüftung im Fahrraum, welche zu den grössten Leistungsverbrauchern gehört. Gerade bei Tunneln mit mehreren Röhren werden die Ventilatoren meistens nicht in allen Röhren gleichzeitig mit voller Leistung eingesetzt. Hinzu kommen Redundanzen, die eingebaut werden, sodass der Tunnel bei einem Ausfall von einzelnen Anlagen noch weiterhin betrieben werden kann. Gestaffelte Einschaltungen sind zwar zweckmässig, um Spitzen zu vermeiden, dienen aber nicht der gesamthaften Senkung der Verbraucherleistung.

Wird davon ausgegangen, dass alle Anlagen gleichzeitig in Betrieb sind, werden die MS-Anlagen wie auch der Netzanschluss überdimensioniert.

Anstelle der Umsetzung dieser Anforderung wird in vielen Projekten eine Analyse des effektiv zu erwartenden Verbrauchs gemacht. Dabei ist entscheidend, dass anhand der möglichen Betriebszustände eruiert wird, in welchem Zustand der höchste Energieverbrauch auftritt. Dieser wird dann häufig als Worst Case Szenario (WCS) bezeichnet. Konkret kann zum Beispiel davon ausgegangen werden, dass in einem zweiröhren Tunnel nicht gleichzeitig in beiden Röhren ein Brand auftritt. Das bedeutet, dass effektiv im WCS nur gut die Hälfte der Lüftungsleistung des Gesamtbauwerks benötigt wird.

### Einflüsse auf Sicherheit, Verfügbarkeit und Instandhaltung:

Eine Auslegung des Leistungsbedarfs anhand eines WCS hat weder auf die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer noch auf die Verfügbarkeit des Tunnels eine Auswirkung, sofern sowohl die Betriebszustände wie auch die Verbraucherwerte korrekt ermittelt werden. Wenn es jedoch gelingt, die effektiv benötigte Leistung möglichst korrekt zu ermitteln, können sowohl bei der Beschaffung wie auch bei der Instandhaltung Kosten gespart werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der ebenfalls berücksichtigt werden sollte, ist die Verwendung der effektiven Leistung pro Verbraucher. Häufig wird für die Betrachtung die Nennleistung einer Anlage eingesetzt. Viele Anlagen werden aber durch die Hersteller so dimensioniert, dass diese im Einsatz auf einem tieferen Leistungsniveau betrieben werden (60 % - 80 %). Im technischen Merkblatt ist nicht vermerkt, was mit der Verbraucherleistung genau gemeint ist.

**Tab. 6 Zusammenfassende Beurteilung**

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus	Keine massgebliche Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung

### Anpassungsvorschlag

Die Auslegung der Mittelspannungsanlage kann entweder unter Berücksichtigung eines Gleichzeitigkeitsfaktors von 1 erfolgen (wie bisher) oder mittels Betrachtung der Verbraucherleistungen von Worst Case Szenarien (WCS).

## 6.1.3 Batterien der USV-Anlage

### Einleitung

Tunnel mit einer Länge von mehr als 300 m sind mit einer USV-Anlage auszurüsten. Die USV-Anlage muss über einen Energiespeicher verfügen, der die Energieversorgung mit einer Autonomiezeit (Überbrückungszeit bei Netzausfall) von 60 Minuten jederzeit sicherstellt. Der Speicher wird mittels einer Batterieeinheit realisiert, wobei typischerweise entweder so genannte OPzS-Batterien (Ortsfeste Panzerplattenbatterie mit geschlossenem Gehäuse und flüssigem Elektrolyten) oder OPzV-Batterien (Ortsfeste Panzerplattenbatterie mit verschlossenem Gehäuse und gelförmigem Elektrolyten oder Elektrolyt in getränkten Glasmatten) eingesetzt werden.

Die OPzS Batterie verbindet hohe Leistungsfähigkeit mit robuster Bauweise. OPzS Batterien bieten in ihrem Aufbau als Zelle mit positiven Röhrenplatten eine extrem hohe Zyklenlebensdauer. Der Elektrolytverlust kann durch Nachfüllen von destilliertem Wasser ausgeglichen werden.

Die OPzV Batterien kombinieren die Vorteile der Rekombinationstechnologie (d.h. praktisch keine Wartung aufgrund der sehr niedrigen Gasemissionen) sowie die Vorteile der herkömmlichen geschlossenen Batterien mit positiven Röhrenplatten (d.h. eine lange Lebensdauer und ausgezeichnete Zyklenfestigkeit). Anstelle eines flüssigen Elektrolyten verfügen diese über einen gelförmigen Elektrolyten. Ein Ausgleich des Elektrolytverlust ist jedoch nicht möglich.

### Anforderungen

- TM 23 001-11160, *Notstrom USV- und Batterieanlage [27]* :
  - Abschnitt 1.3: *Die Lebensdauer der Komponenten (USV-Anlage und Batterien) muss mindestens 15 Jahre betragen bei Einhaltung der Raumtemperaturen gemäss Technischem Merkblatt «Heizung, Lüftung und Klima Zentralen».*
  - Abschnitt 2.2.2: *Es sind entweder wartungsarme und qualitativ hochwertige Batterien (geschlossene Bleisäurebatterien Typ OPzS mit rückzündungshemmenden Keramiktrichterstopfen inkl. Deckel) einzusetzen, welche sich speziell für stationäre Anlagen eignen oder wartungsfreie Batterien vom Typ OPzV mit einer Nutzungsdauer von 18-20 Jahren. Die Wahl muss auf der Basis der Life Cycle Costs (LCC) erfolgen.*

Für Batterien des Typs OPzS wird die EUROBAT-Klassifizierung «very long life» vorgegeben, womit eine Lebensdauer von mehr als 12 aber womöglich nicht 15 Jahre erwartet werden kann.

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 7** Auszug Anforderungskatalog FB 1: Batterien (Lebensdauer)

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
B	B	C	Keine Anpassung möglich	Anpassung möglich	B (10 - 100 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Für einen grossen Teil der BSA-Anlagen, welche für die Energie- und Notstromversorgung benötigt werden, muss die Lebensdauer der eingesetzten Komponenten mindestens 15 Jahre betragen. Somit kann nach 15 Jahren ein gemeinsamer Ersatz sämtlicher Anlagen vorgesehen werden. Entsprechend ist gefordert, dass die Lebensdauer für Batterien ebenfalls 15 Jahre beträgt.

Diese Anforderung wird von so genannten wartungsfreien OPzV Batterien erreicht bzw. sogar übertroffen. Zudem bringen diese Batterien wenig bis keine Wartung mit sich. OPzS Batterien erreichen womöglich die geforderte Lebensdauer nicht und müssten im entsprechenden Zeitraum mindestens einmal ersetzt werden. In der Anschaffung sind OPzV Batterien im Vergleich zu OPzS Batterien ca. 30 % - 40 % teurer. Unabhängig davon, ob so genannte wartungsfreie (OPzV) oder wartungsarme (OPzS) Batterien eingesetzt werden, ist der Wartungsaufwand respektive die Wartungskosten in etwa identisch.

Aufgrund des problemlosen Ersatzes von wartungsarmen Batterien am Ende ihrer Lebensdauer, ohne Anpassung von weiteren Systemen, entsteht auf die Lebensdauer bezogen wirtschaftlich kein Nachteil, da sich die Investitionskosten längerfristig die Waage halten.

#### Einflüsse auf Sicherheit, Verfügbarkeit und Instandhaltung:

Die Anforderung an die Batterietechnologie hat weder einen Einfluss auf die Sicherheit im Tunnel noch auf die Verfügbarkeit. Betreffend Instandhaltung und Wartung resultiert ebenfalls auch keine Veränderung, da OPzS Batterien nur unwesentlich mehr Wartung benötigen als OPzV Batterien. Über die Lebensdauer der USV-Anlage sind OPzS Batterien jedoch früher zu ersetzen.

**Tab. 8** Zusammenfassende Beurteilung

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus durch eine angepasste Anforderung	Keine massgebliche Reduktion der Verfügbarkeit durch eine angepasste Anforderung	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine angepasste Anforderung

## Anpassungsvorschlag

Anstatt:

- *Die Lebensdauer der Komponenten (USV-Anlage und Batterien) muss mindestens 15 Jahre betragen bei Einhaltung der Raumtemperaturen gemäss Technischem «Merkblatt Heizung, Lüftung und Klima Zentralen».*

wird für das Technische Merkblatt TM23 001-11160 [27] , Abschnitt 1.3 wird der nachfolgende Text vorgeschlagen:

- *Die Lebensdauer der Komponenten (USV-Anlage exklusiv Batterien) muss bei Einhaltung der Raumtemperaturen gemäss Technischem Merkblatt «Heizung, Lüftung und Klima Zentralen» mindestens 15 Jahre betragen.*

## Handlungsempfehlung

Für die Auslegung einer USV-Anlage ist es wesentlich, die USV-berechtigten Verbraucher und deren Autonomiezeiten gemäss den effektiv zu erwartenden Leistungen (anstatt Nennleistungen) und dem projektspezifischen Bedarf zu ermitteln.

## 6.2 Fachbereich 2 – Beleuchtung

### 6.2.1 Brandnotbeleuchtung (BNL)

#### Einleitung

Die Brandnotbeleuchtung ist eine Einrichtung bestehend aus punktuellen Lichtquellen über dem Bankett. Sie wird in Tunnel ab einer Länge von 300 m an der Seitenwand angebracht, in welcher sich die Notausgänge befinden. Gibt es auf beiden Seiten des Tunnels Notausgänge, ist auch die Brandnotbeleuchtung auf beiden Seiten auszuführen. Die Brandnotbeleuchtung hat als Funktion im Ereignisfall und somit auch bei starker Rauchentwicklung (respektive schlechten Sichtverhältnissen) sicherzustellen, dass eine ausreichende visuelle Wahrnehmung der Fluchtwege aus dem Verkehrsraum gegeben ist.

#### Anforderungen

- SIA 197/2, Projektierung Tunnel – Strassentunnel [29]:
  - Abschnitt 9.3.2.1: *Die Brandnotbeleuchtung dient im Brandfall zur Orientierung. Sie ist an die USV-Anlage anzuschliessen.*
  - Abschnitt 9.3.2.2: *Die Brandnotleuchten sind auf Seite der Ausgänge zu den Fluchtwegen im Abstand von 50 m anzuordnen.*
  - Abschnitt 9.3.2.3: *Sind keine oder ausnahmsweise beidseitig Ausgänge zu den Fluchtwegen vorhanden, so sind die Brandnotleuchten beidseitig anzuordnen.*
  - Abschnitt 9.3.2.4: *Die Installationshöhe der Leuchten über Bankett beträgt 0.50 m*
- ASTRA 13015, *Beleuchtungsanlagen* [9]:
  - Abschnitt 3.3: *Sind keine Notausgänge vorhanden oder gibt es ausnahmsweise Notausgänge auf beiden Seiten der Fahrbahn, so befinden sich die Lichtquellen auf beiden Seiten des Tunnels oder der Galerie.*
  - Abschnitt 5.4.1:
    - *Alle 50 m ist ein Element der Brandnotbeleuchtung auf der Seite der Notausgänge vorgesehen. Falls keine Notausgänge vorhanden sind oder sie sich auf beiden Seiten der Fahrbahn befinden, wird die Brandnotbeleuchtung auf beiden Seiten der Fahrbahn installiert.*
    - *Die Leuchten der Brandnotbeleuchtung werden in einer Höhe von ca. 0.5 m über dem Bankett angebracht.*
    - *Tunnel und Galerien mit einer Länge von weniger als 300 m werden nicht mit einer Brandnotbeleuchtung ausgestattet.*

- Falls die optische Leiteinrichtung [Red. OLE] eine ausreichende Sichtbarkeit des Fluchtwegs ermöglicht und das gleiche Sicherheitsniveau garantiert, kann von der Installation einer Brandnotbeleuchtung abgesehen werden.

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 9** Auszug Anforderungskatalog FB 2: Brandnotbeleuchtung

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
B	B	A	Anpassung möglich	Anpassung möglich	C (>100 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Brandnotbeleuchtung wurden gefordert, bevor die OLE eingeführt wurden. Eine grundsätzliche Abwägung, ob beide Einrichtungen erforderlich und zweckmässig sind, ist bis jetzt nicht erfolgt, auch wenn das Fachhandbuch dies so supponiert.

Gemäss den Anforderungen wird jeder Tunnel, der mit einer Brandnotbeleuchtung (BNL) ausgestattet ist, auch über eine optische Leiteinrichtung (OLE) verfügen. Die OLE befindet sich direkt auf der Bankettkante und sollte auch im Fall von starker Rauchentwicklung, gleich wie die BNL sichtbar sein. Die Abstände zwischen den Lichtpunkten der OLE sind geringer als die Abstände der Lichtpunkte der BNL.

Betreffend Funktion werden die BNL an der Seite der Fluchtwege angeordnet und die OLE ist definitionsgemäss an beiden Seiten des Fahrraum an den jeweiligen Bankettkanten angebracht.

Im Ereignisfall wird im Tunnel die BNL eingeschaltet. Zusätzlich wird die Durchfahrtsbeleuchtung (DB) und die OLE auf 100 % Leistung hochgefahren. Ebenfalls werden bei den Fluchttüren im Fahrraum noch Blitzlichter eingeschaltet.

Dies führt dazu, dass besonders in kurzen Tunneln mit hellem Wandanstrich und guten Lichtverhältnissen die BNL kaum wahrzunehmen sind. Die OLE sowie die Blitzlichter können ebenso wie die BNL als Orientierungshilfe zum Erkennen der Fluchtwege dienen. Aufgrund des geringeren Abstands der Leuchtpunkte der OLE gegenüber dem Abstand der BNL wird diese Funktion u.U. sogar besser erfüllt. Erfahrungen von Brandversuchen haben gezeigt, dass die OLE sehr gute Orientierungshilfe bietet und dass die BNL nur über einer sehr kleinen Distanz sichtbar ist, siehe Abb. 4 .



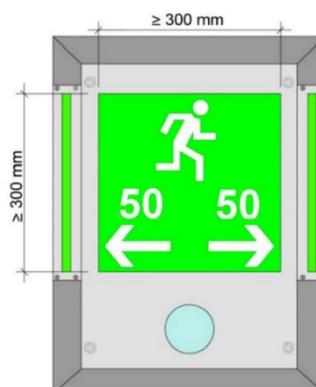
**Abb. 4** Foto eines Brandversuchs. Die OLE ist gut sichtbar (links), eine Brandnotbeleuchtung ist vorhanden, aber nicht sichtbar. Beide waren eingeschaltet.

Gemäss Fachhandbuch gilt:

*Falls die optische Leiteinrichtung eine ausreichende Sichtbarkeit des Fluchtwegs ermöglicht und das gleiche Sicherheitsniveau garantiert, kann von der Installation einer Brandnotbeleuchtung abgesehen werden.*

Aufgrund der Tatsache, dass die obigen Kriterien (ausreichende Sichtbarkeit des Fluchtwegs und gleiches Sicherheitsniveau) nicht ausreichend quantifiziert sind, wird in der Praxis meist davon abgesehen auf die BNL zu verzichten.

Sowohl in Österreich [107] wie auch in Deutschland [106] ist eine OLE sowie eine BNL vorhanden. Im Gegensatz zur Schweiz handelt es sich bei der BNL um eine permanent aktivierte Fluchtwegkennzeichnung (siehe Abb. 5). In Deutschland werden diese alle 25 m und in Österreich (so genannte Fluchtwegorientierungsleuchten) alle 50 m angeordnet.



**Abb. 5** Schematische Darstellung der Kombination aus hinterleuchteter Fluchtwegkennzeichnung und Orientierungsbeleuchtung (BNL)

Wird konsequent auf die BNL verzichtet, hätte dies folgende Einflüsse:

#### Einfluss auf die Sicherheit:

Im Normalbetrieb hat der Verzicht auf die BNL keinen Einfluss auf die Sicherheit. Im Ereignisfall müsste bei Verzicht sichergestellt werden, dass die Sichtbarkeit der OLE gegenüber der Sichtbarkeit der BNL gleichwertig ist.

Hierbei gilt es zu beachten, dass die OLE auf beiden Seiten des Tunnels vorhanden ist. Somit ist nicht sichergestellt, dass der Verkehrsteilnehmer entlang der OLE zu einem Notausgang findet. Durch ausreichend intensive Blitzleuchten direkt bei den Notausgängen kann diesem Umstand aber Rechnung getragen werden. Wird davon ausgegangen, dass die BNL von der anderen Fahrbahnseite sichtbar ist, dann gilt dies sicherlich auch für Blitzleuchten der Notausgänge.

#### Einfluss auf Verfügbarkeit und Instandhaltung

Für eine allfälligen Ersatz der BNL durch die OLE muss die Verfügbarkeit der OLE derjenigen der BNL angeglichen werden. Dies gilt insbesondere für gemeinsam erschlossene Leuchten der OLE. Werden die einzelnen Lichtpunkte betrachtet, könnte es sich aber herausstellen, dass die Verfügbarkeit der OLE zur Kennzeichnung der Fluchtwege höher ist als die Verfügbarkeit der BNL. Die Abstände der Lichtpunkte der OLE betragen 12.5 m (Einfahrts- und Übergangszonen)<sup>11</sup> bzw. 25 m. Im Vergleich dazu sind die BNL alle 50 m angeordnet.

Eine allfällige Erhöhung des Instandhaltungsaufwandes sowie der Investitionskosten der OLE im Falle eines Verzichts auf die BNL muss evaluiert werden.

**Tab. 10 Zusammenfassende Beurteilung**

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Womöglich geringfügige Reduktion des Sicherheitsniveaus	Kein signifikanter Einfluss auf die Verfügbarkeit des Verkehrswegs	Positive Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung

### Handlungsempfehlung

Die vorderhand verlockende Idee, die BNL durch die OLE zu ersetzen, ist in einem Forschungsprojekt zu untersuchen. Es soll quantifiziert werden, unter welchen Umständen die BNL durch die OLE ersetzt werden kann bzw. welche Anforderungen (Sichtbarkeit d.h. Lichtstärke und Abstrahlrichtung sowie Verfügbarkeit) zu diesem Zweck an die OLE gestellt werden müssen. Im selben Forschungsprojekt kann die allgemeine Signalisation untersucht werden (z.B. Einsatz von hinterleuchteten Fluchtwegkennzeichnungen, welche wie in anderen Ländern z.B. alle 25 m angeordnet werden).

<sup>11</sup> Ab einer Tunnellänge von 300 m; ansonsten 12.5 m über den gesamten Tunnel

## 6.2.2 Auslegung der Beleuchtung (Alterungs- und Unterhaltsfaktor)

### Einleitung

Der Wartungsfaktor in den Lichtberechnungen hat die Aufgabe, den Lichtstromrückgang (LLMF) und die Verschmutzung (LMF) einer Leuchte im Laufe ihrer Nutzung zu kompensieren. Somit kann sichergestellt werden, dass der Wartungsfaktor (SN 640 551-1) möglichst lange nicht unterschritten wird. Der Wartungsfaktor setzt sich aus verschiedenen Faktoren zusammen.

Im Aussenbereich kann mit folgender Formel gerechnet werden:

$$MF = LLMF \times LMF \times LSF$$

MF	= Maintenance Factor (Wartungsfaktor)
LLMF	= Lamp Lumen Maintenance Factor (Lampenlichtstromwartungsfaktor)
LSF	= Lamp Survival Factor (Lampenüberlebensfaktor)
LMF	= Luminaire Maintenance Factor (Leuchtenwartungsfaktor)

Wobei in einem Tunnel der Wert für den LSF auf 1 gesetzt werden kann.

### Anforderungen

- ASTRA 13015, *Beleuchtungsanlagen* [18]:
  - Abschnitt 5.1.3:
    - *Alterungsfaktor: Für den Alterungsfaktor ist 0.8 zu verwenden, ausser bei Kompensation der Alterung in Leuchten*
    - *Unterhaltsfaktor: Für den Unterhaltsfaktor ist 0.8 zu verwenden als maximaler Verschlechterungsfaktor.*
- TM 23 001-11205, *Lichttechnische Vorgaben* [29]:
  - Abschnitt 2.1: *Alterungsfaktor: Für den Alterungsfaktor sind 0.7 - 0.8 zu verwenden.*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 11** Auszug Anforderungskatalog FB 2: Beleuchtung (Alterungs- und Unterhaltsfaktoren)

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
B	B	B	Anpassung möglich	Anpassung möglich	C (>100 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Entscheidend für die Bestimmung des Wartungsfaktors (MF) ist der Lampenlichtstromwartungsfaktor, welcher mit dem Alterungsfaktor aus der ASTRA Richtlinie 13015 [9] gleichgesetzt werden kann.

Der Alterungsfaktor ist abhängig von der eingesetzten Leuchte. Dieser ist häufig wesentlich höher als der vorgegebene Wert von 0.8. Durch die Vorgabe des Wertes entstehen zwei wesentliche Nachteile:

- Die Berechnungen werden schlechter als die Realität. Dies führt zu einer Überdimensionierung der Beleuchtung.
- Durch die Vorgabe des Alterungsfaktors wird in gewisser Weise der Anreiz für die Lieferanten reduziert, möglichst effiziente Leuchten zu produzieren.

Der Alterungsfaktor respektive die Lebensdauer bei den LED-Leuchten wird über den Lichtstromrückgang (Lx) und (By) definiert. Dabei gibt der Lichtwert (Lx) den Prozentwert des Lichtstromes zum Neuwert an und der By-Wert den Prozentwert der Leuchten, die

diesen Lichtwert nach der definierten Zeitdauer unterschreiten dürfen. Entscheidend dabei ist, dass hier jeweils gleichwertige Angaben miteinander verglichen werden.

Der Unterhaltsfaktor wird durch die Umgebungsbedingungen definiert. Eine Vorgabe des Wertes ist daher erforderlich und legitim. Es ist jedoch zu untersuchen, ob ein Wert von 0.80 nicht eher zu pessimistisch ist und dieser allenfalls erhöht werden könnte. Bereits eine Erhöhung auf den Wert 0.85 würde helfen Energie und Kosten zu sparen.

In der österreichischen Richtlinie RVS 09.02.41 [107] wird ein Planungsfaktor definiert, was aber denselben Zweck haben dürfte. Dieser Planungsfaktor berechnet sich aus dem Betriebsfaktor und dem Systemfaktor. Der Betriebsfaktor dient zur Berücksichtigung der Lampenlebensdauer und der Reinigungsintervalle des Bauwerks und ist mit 0.7 anzunehmen. Der Systemfaktor hat den Einfluss des Spannungsabfalls auf den Lichtstrom zu berücksichtigen (am schlimmsten Ort im Bauwerk) und ist abhängig von der Lampenart und der Betriebsspannung. Als Planungsfaktor wird für LED-Beleuchtungen 0.67 angegeben. Demgegenüber steht der in der Schweiz zu verwendende Wartungsfaktor von 0.64 (0.8 x 0.8).

#### Einfluss auf die Sicherheit und die Verfügbarkeit:

Durch eine Anpassung der Werte entsteht grundsätzlich keine Verschlechterung der Sicherheit oder die Verfügbarkeit für den Verkehrsteilnehmer.

#### Einfluss auf die Instandhaltung:

Eine Änderung hat einen positiven Einfluss auf die Instandhaltung. Werden die Lichtberechnungen besser und liegen näher an der Realität, werden keine unnötigen Leuchten installiert.

**Tab. 12 Zusammenfassende Beurteilung**

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus	Keine massgebliche Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung

### **Handlungsempfehlung**

Kurzfristig soll untersucht werden, ob der Unterhaltsfaktor vom 0.80 auf z.B. 0.85 erhöht werden kann.

Auf längerer Sicht sollte eine andere Vorgehensweise ausgearbeitet werden, so dass Anreize geschaffen werden, bessere d.h. wartungsärmere, effizientere und langlebigere Produkte einzusetzen als bei den Minimalanforderungen gegeben. Idealerweise ist der Alterungsfaktor somit nicht in der Richtlinie vorgegeben, sondern basiert auf dem spezifischen Produkt. Vielmehr bräuchte es eine Vorgabe bezüglich der minimalen Nutzungsdauer der Beleuchtungsanlage und deren Effizienz. Anhand dieser könnte der Unternehmer produktspezifisch angeben, wie gross der Alterungsfaktor in dieser Zeit ist.

Zur konkreten Umsetzung einer solchen Änderung sind jedoch auch die vertrags-technischen Aspekte einer derartigen Änderung zu analysieren.

## 6.2.3 Material für Befestigung / Halterungen

### Einleitung

Im Umfeld der Nationalstrassen werden die eingesetzten Materialien teilweise äusserst stark beansprucht und sind der Witterung wie auch korrosiven z.B. salzhaltigen Flüssigkeiten ausgesetzt.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, werden sämtliche Bereiche (WLK, Zentralen Fahrraum usw.) einer Klimazone zugeordnet (TM 23001 – 12210 [90] ). Je nach Zone gelten andere Ansprüche an den Schutz vor Korrosion respektive die Materialwahl.

### Anforderungen

- TM 23 001-12120, *Werkstoffwahl und Korrosionsschutz [89]* :
  - Abschnitt 1.1: *Halterung leichte Ausführung: Halterung für Kameras, Signalisation, Leuchtkörper, Kabelkanäle, usw.*
- TM 23 001-12210, *Zonen / Klimatische Bedingungen [90]* :
  - Abschnitt 2.2: *Fahrbahnbereich Tunnel – Korrosivitätskategorie C5*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 13** Auszug Anforderungskatalog FB 2: Materialvorgaben Befestigungen

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
B	B	B	Anpassung möglich	Anpassung möglich	C (>100 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Im TM 23001 – 12120 [89] werden sämtlichen Komponenten je nach Anwendungsbereich (Halterung, Befestigung oder Gehäuse) unterschiedliche Anforderungen an die Materialien zugewiesen. Dabei ist zu beachten, dass das TM die Bezeichnungen gemäss SIA 179 Ausgabe 2014 verwendet, wohingegen die aktuelle Ausgabe der Norm eine andere Nummerierung verwendet.

Das zu verwendende Material für die **Halterung** der Beleuchtung ist gemäss dem TM 23001-12120 «Werkstoffwahl und Korrosionsschutz» [89] auszuwählen.

Parameter für die Bestimmung der Anforderungen:

- Korrosivitätskategorie: C5, Fahrbahn Tunnel (TM 23001 – 12210 [90] )
- Halterung: Halterung leichte Ausführung

Daraus ergeben sich die Anforderungen an die **Halterung** der Beleuchtung, falls diese aus hochlegiertem Stahl hergestellt werden:

<b>System 300.03: Hoch legierter Stahl, Gruppe III</b>	
Materialkategorie:	Gruppe III gemäss SIA 179
Spezifische Anforderungen:	4.20 Bearbeitung und Oberflächenbehandlung hoch legierter Stähle
Mögliche Materialien:	Auswahl: 1.4439, 1.4539, 1.4462 (und 1.4571 aus wirtschaftlichen und herstellungstechnischen Gründen)
Bemerkungen:	Keine Beschichtung der Verbindungselemente erforderlich Bei Auflageflächen auf Beschichtungssystemen sind grosse Unterlegescheiben (Typ 3D nach DIN 9021) zu verwenden.

**Abb. 6** Auszug von TM 23001 – 12120 [89]

Das zu verwendende Material für die **Befestigung** der Beleuchtung ist auch gemäss dem TM 23001-12120 «Werkstoffwahl und Korrosionsschutz» [89] auszuwählen.

Parameter für die Bestimmung der Anforderungen:

- Korrosivitätskategorie C5, Fahrbahn Tunnel (TM 23001 – 12210 [90] )
- Befestigung mineralische Werkstoffe/Metall und Metall/Metall

Daraus ergeben sich die Anforderungen an die **Befestigung** der Beleuchtung, falls diese aus hochlegiertem Stahl hergestellt werden:

System 300.04: Hoch legierter Stahl, Gruppe IV		
Materialkategorie:	Gruppe IV	gemäss SIA 179
Spezifische Anforderungen:	4.20 Bearbeitung und Oberflächenbehandlung hoch legierter Stähle	
Mögliche Materialien:	Bsp. 1.4529, 1.4547, 1.4565	
Bemerkungen:	Keine Beschichtung der Verbindungselemente erforderlich Bei Auflageflächen auf Beschichtungssystemen sind grosse Unterlegescheiben (Typ 3D nach DIN 9021) zu verwenden.	

**Abb. 7** Auszug von TM 23001 – 12120 [89]

Aus Sicht der Forschungsstelle könnte für die Halterung der Beleuchtung auch ein hoch legierter Stahl aus der Gruppe II verwendet werden. Beispielsweise die Werkstoffe 1.4401 oder 1.4404 anstatt der vorgeschriebenen, höherwertigen Edelstähle.

#### Beschrieb 1.4404:

In Gegenwart von schwach chloridhaltiger Medien wird häufig der Werkstoff 1.4404 (V4A) eingesetzt. Er besitzt im Gegensatz zum 1.4301/07 (V2A) durch seinen Anteil von 2 % Molybdän eine erhöhte Beständigkeit gegen Chloride und stark anorganischen Säuren. Typische Einsatzgebiete sind unter anderem alle Bereiche, die öfter mit Salzwasser in Berührung kommen, wie z. B. Beschläge im Schiffbau. Zudem wird er für Kaminauskleidungen, Komponenten in Hallenbädern (nicht Solebäder) sowie viele weitere Anwendungen in der allg. Industrie sowie in der chemischen Industrie eingesetzt.

Stähle der Kategorie III sind einzusetzen bei lokal aggressiven Bedingungen bedingt z.B. durch die Aufkonzentration von Chloriden auf Befestigungselementen. Gegenüber von Edelstählen der Kategorie II (z.B. 1.4404) weisen Sie ein geringeres Risiko von Spaltkorrosion auf. Edelstahl 1.4439 weist hierzu einen Molybdän-Anteil zwischen 4 % bis 5 % auf.

In Deutschland gilt gemäss dem Regelwerk ZTV-ING [109] die Anforderungsklasse II für «sämtlich für die Kraftübertragung erforderlichen Teile von Aufhängekonstruktionen einschliesslich der Befestigungselemente». In Anforderungsklasse II muss die Wirksumme mindestens 40 betragen und der Mo-Gehalte mindestens 6 % sein, siehe Abb. 8 .

#### ZTV-ING Teil 5 Tunnelbau Abschnitt 4 Betriebstechnische Ausstattung

**Tabelle 5.4.2:** Mindestanforderungen an nicht rostende Stähle

Anforderungs- klasse	Wirksumme <sup>1)</sup>	Widerstandsklasse (gemäß Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z 30.3-6)
I	≥ 25	III / mittel
II	≥ 40 Mo-Gehalt ≥ 6 %	IV / stark
<sup>1)</sup> Wirksumme = Cr-Gehalt (%) + 3,3 x Mo-Gehalt (%) + 30 x N-Gehalt (%) Bei der Berechnung der Wirksumme werden die Mittelwerte angesetzt.		

**Abb. 8** Mindestanforderungen an Korrosionsschutz gemäss ZTV-ING [109]

Diese Anforderungen werden einzig von Edelstählen der höchsten Kategorie erreicht, also typischerweise vom Edelstahl 1.4529 und geht somit deutlich über die in der Schweiz geltenden Anforderungen hinaus.

In Österreich werden die hier vorgeschlagenen, niedrigeren Materialqualitäten gutgeheissen z.B. Edelstahl 1.4404, siehe Abb. 9 .

#### 10.4 Materialien

Für Geräte und Anlagenteile im Tunnelfahrraum sind tunlichst gleichwertige Materialien zu verwenden.

Sofern verschiedene Metalle miteinander verbunden werden, ist durch geeignete Maßnahmen eine chemische Reaktion (elektrolytische Korrosion) zu verhindern.

##### 10.4.1 Edelstahl

Als Werkstoff sind im Regelfall Edelstähle, welche der aggressiven Tunnelatmosphäre ausgesetzt werden können, zu verwenden. Als solche gelten hochlegierte, säurebeständige, austenitische Cr-Ni-Mo Edelstähle mit einem Legierungsanteil von mindestens 2 % Molybdän (nachfolgend V4A genannt). Für Stahlkonstruktionen sind Edelstähle mit den Werkstoffnummern 1.4404, 1.4571 zu verwenden.

Für Befestigungen im Tunnelfahrraum an das Tunnelbauwerk gemäß Punkt 10.6.1 ist der Werkstoff der Nummer 1.4529 (nachfolgend V6A genannt) gemäß EN 10027-2 zu verwenden.

Sollten Edelstähle mit anderen Werkstoffnummern eingesetzt werden, so haben diese mindestens die chemischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften der zitierten Werkstoffe zu erfüllen.

##### 10.4.2 Aluminium

Ausschließlich Legierungen mit einem Cu-Gehalt von höchstens 0,1 % gemäß ÖNORM EN 573-3, Tabellen 4 und 5, sind einzusetzen. Bei der Verbindung mit anderen Materialien sind Maßnahmen gegen Kontaktkorrosion vorzusehen.

Aluminiumteile im Tunnelfahrraum sind mit Korrosionsschutz gemäß DIN 4113-1, Punkt 10, zu versehen.

#### **Abb. 9 Anforderungen an die Materialqualität gemäss RVS 09.02.22 [105] (Österreich)**

In unseren Nachbarländern werden sowohl höhere (Deutschland) wie auch niedrigere (Österreich) Anforderungen an den Korrosionsschutz gestellt. Im Schiffsbau gelten ähnliche Anforderung wie in Österreich. Es bietet sich somit an, die Anforderungen bezüglich des Korrosionsschutzes zu hinterfragen.

Ein gewichtiges Argument für leicht reduzierte Anforderungen an die Materialwahl sind die typischen Nutzungsdauer der Anlagen sowie die angewandten Renovationsstrategien. In sehr vielen Fällen werden deswegen bestehende Komponenten beim Ersatz durch eine Neuanlage nicht weiterverwendet. Die Nutzungsdauer geht somit in der Regel nicht über die Zeitdauer zwischen zwei BSA-Sanierungen hinaus (ca. 20 Jahre). Die Materialien sind somit nur so zu wählen, dass in diesem Zeitraum keine inakzeptable Schädigung aufgrund von Korrosion auftritt – Korrosionsspuren wie z.B. Flugrost ist aber zu akzeptieren.

#### Auswirkung auf die Sicherheit:

Die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer wird durch eine Reduktion der Anforderungen an die Materialien nicht verschlechtert. Die vorgegebenen Materialien müssen weiterhin über die geforderte Lebensdauer ihre volle Funktion ausüben können.

#### Auswirkung auf die Verfügbarkeit und die Instandhaltung:

Durch eine Anpassung entstehen weder Einflüsse auf die Verfügbarkeit noch auf die Instandhaltung.

**Tab. 14 Zusammenfassende Beurteilung**

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus	Keine massgebliche Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung

## Handlungsempfehlung

Das Forschungsprojekt AGT 2014/004 mit dem Titel *Materialwahl und Korrosionsschutz für korrosionsgefährdete BSA Komponenten in Strassentunnel* befasst sich mit dem Thema. Der Forschungsbericht ist (Stand Herbst 2021) noch nicht publiziert. Dieses Forschungsprojekt hat zum Ziel die Auswahl von Werkstoffen hinsichtlich Kosten und Nutzen zu optimieren.

Entsprechend wird empfohlen, die Anforderungen an die Materialwahl und den Korrosionsschutz (TM 23001-12120 [89] ) auf Basis dieser Forschungsergebnisse anzupassen.

## 6.3 Fachbereich 3 – Lüftung

### 6.3.1 Temperaturbeständigkeit Abluftventilatoren

#### Einleitung

Bei einem Brandereignis führt die Wärmefreisetzung zu einer Erwärmung der Luft. Diese heisse Luft (Rauchgase) wird bei Systemen mit mechanischer Rauchabsaugung durch den Abluftventilator aus dem Tunnelfahrraum abgesaugt, was die Personensicherheit im Tunnel verbessert (Selbstrettung), den Einsatz der Blaulichtorganisationen vereinfacht (Fremdrettung, Brandbekämpfung) sowie das Bauwerk und die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung schützt.

#### Anforderung

- ASTRA 13001, *Lüftung der Strassentunnel [3]* :
  - Abschnitt 8.3.1: *Die Funktion der Ventilatoren für die Absaugung von Brandgasen ist für eine Temperatur von 250°C während 120 Minuten zu gewährleisten. Falls der kürzeste Strömungsweg zwischen erster Abluftklappe und Abluftventilator weniger als 50 m beträgt, muss die Funktion der Absaugung für eine Temperatur von 400°C während 120 Minuten gewährleistet sein. Es ist dabei sicherzustellen, dass auch die Funktion der übrigen Installationen (z.B. im Ventilatorraum) bei der entstehenden Wärmebelastung gewährleistet bleibt.*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 15** Auszug Anforderungskatalog FB 3: Temperaturbeständigkeit Abluftventilatoren

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
C	C	B	Keine Anpassung möglich	Anpassung möglich	B (10 - 100 kCHF)

#### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Gemäss dem Kenntnisstand der Forschungsstelle geht die Anforderung auf die Realbrandversuche "Ofenegg", "Zwenberg" und "Heslach" in den Jahren 1963 bis 1986 zurück. Bei diesen Versuchen wurde für Realbrandbedingungen die Temperatur im Fahrraum und bei den Abluftventilatoren gemessen. Dabei sind Werte zwischen 90 °C und 220 °C erfasst worden. Dementsprechend liegt es nahe, die Temperaturbeständigkeit bei 250 °C / 2h anzusetzen. Im Gegensatz zu heutigen Lüftungssystemen mit einer Absaugleistung von mindestens 150 m<sup>3</sup>/s über eine Länge von 300 m (Tunnel mit Richtungsverkehr mit geringer Stauhäufigkeit, freier Tunnelquerschnitt ca. 50 m<sup>2</sup>) oder mehr wurden

bei den damaligen Versuchen die Rauchgase verteilt (das heisst über eine deutlich grössere Länge) und mit deutlich kleinerem Volumenstrom (typischerweise 80 oder 110 m<sup>3</sup>/s pro Kilometer) abgesaugt. Somit basieren die Versuchsergebnisse auf einer anderen (schlechteren) Ausgangslage und für die heute üblichen Lüftungsanlagen sind tiefere Temperaturen zu erwarten.

Anhand einer einfachen Energiebilanz kann die mittlere Temperaturerhöhung der Rauchgase im Abluftkanal direkt nach der Absaugstelle abgeschätzt werden. Dabei wird berücksichtigt, dass 67 % der Brandlast als Wärme in die Luft gelangt und der restliche Teil (33 %) als Strahlungswärme direkt an die Tunnelwände abgegeben wird. Je nach Brandleistung ergeben sich die folgenden Temperaturerhöhungen der Abluft:

**Tab. 16** Abschätzung Temperaturerhöhung durch Brand bei Rauchabsaugung

Brandlast [MW]	Temperaturerhöhung Luft [K] bei einer Abluftmenge von 150 [m <sup>3</sup> /s]
30	110
50	184
100	368

Für einen 30 MW Brand (Auslegungsfall gemäss Richtlinie 13001 [3] ) liegen die Temperaturen der Abluft somit bei ca. 125 °C. Im Fall eines 50 MW Brandes liegen die Temperaturen bei ca. 200 °C. Diese Temperaturen sind teilweise deutlich niedriger als die aktuell geltende Anforderung, weshalb die Anpassung der Anforderung sinnvoll erscheint.

Die obigen Abschätzungen berücksichtigen keine Wärmeabgabe an den Beton entlang des Abluftkanals. Würde diese zusätzliche Wärmeabfuhr berücksichtigt, so wären die Lufttemperaturen nochmals geringer. Es gibt aber auch Situationen, in welchen die Temperaturen höher ausfallen könnten. Dies beispielsweise, falls die Abluftmenge reduziert ist (aufgrund der nicht Verfügbarkeit eines Ventilators), bei zweiseitiger Absaugung in Kombination mit ungünstigen Verhältnissen (Position Brandort, Zuströmung) oder bei komplettem Versagen der Regelung der Zuströmung im Fahrraum. Mittels einer projektspezifischer Szenarienanalyse lassen sich jedoch die zu erwartenden Temperaturen an den Abluftventilatoren bestimmen, was ermöglicht, den spezifischen Umständen Rechnung zu tragen.

Nebst den theoretischen Betrachtungen sind konkrete Erfahrungen aus der Praxis zu berücksichtigen. So wurde anlässlich der Experteninterviews (Forschungsbericht Kapitel 3) angegeben, dass beim Brandereignis eines Schwerlasttransporters (siehe nachfolgendes Bild), die Temperatur an den Abluftventilatoren nie höher als 60 °C lag. Die Ventilatoren befanden sich etwa 1 km von der Absaugstelle entfernt. Es fehlen jedoch die detaillierten Informationen zur effektiven Brandlast und der Abluftmenge, um diesen Wert quantitativ in einen Kontext mit den Gegebenheiten auf dem schweizerischen Nationalstrassennetz zu setzen. Qualitativ kann gesagt werden, dass die Abluftmengen im besagten Land eher tiefer sind als in der Schweiz. Nichtsdestotrotz bestätigt die Praxis, dass die Temperaturen (deutlich) tiefer liegen als in den Anforderungen vorgegeben.



**Abb. 10** Situation im Tunnel nach Brand eines Schwerlasttransporters

Der komplette Verzicht auf eine Temperaturbeständigkeit erscheint trotz der Rückmeldung aus den Experteninterviews als nicht angemessen. Die damit verbundenen Risiken sind im Vergleich zu den finanziellen Vorteilen zu gross. Im Sinne der Standardisierung soll versucht werden, sich an heute geltenden Normen anzulehnen. Gemäss Norm EN 13501-4 gelten folgende Standardklassen für die Temperaturfestigkeit von Entrauchungsanlagen:

**Tab. 17** Standardklassen gemäss EN 13501-4

Klasse	Prüftemperatur [°C]	Zeitdauer [Min]
F200	200	120
F300	300	60
F400	400	90 / 120
F600	600	60
F842 <sup>12</sup>	$345 \log_{10}(8 t + 1) + 20$	30 (+30)

Die Motivation, die Anforderungen anzupassen, zielt jedoch nicht lediglich darauf hin, die internationale Motorklassierung zu verwenden. Bei höheren Temperaturanforderungen wird die Konstruktion entsprechend mit Spielraum versehen, was wiederum zu schlechterer Effizienz führt.

In Deutschland [106] herrschen die gleichen Temperaturanforderungen wie in der Schweiz; diese müssen jedoch lediglich während 90 Minuten eingehalten werden. In Österreich ist die Forderung in RVS 09.02.31 [110] : «Sind Ventilatoren, deren Zusatzeinrichtungen und Verkabelung für den Betrieb im Rauchgas (Brandfall) vorgesehen, ist bei der Temperatur von 400°C über einen Zeitraum von 120 min ihre Funktionsfähigkeit sicherzustellen ...».

<sup>12</sup> Der Verlauf der Prüftemperatur ist durch die angegebene Formel festgelegt wobei die Zeit in Minuten einfließt. Die Dauer von 30 Minuten gilt ab Erreichen der Temperatur von 842°C, welche ca. 30 Minuten entspricht.

In Frankreich [112] ist die allgemeine Temperaturanforderung 200 °C während 120 Minuten jedoch mit der Anforderung, dies auf 400 °C zu erhöhen, falls die Gefahr besteht, dass die 200 °C überschritten werden können. Cetu [111] beschreibt eine Methode zur Abschätzung der Temperaturen beim Ventilator. Die Berechnung zeigt, dass für einen 30 MW Brand und mit einer Absaugmenge von 150 m<sup>3</sup>/s, es sichergestellt ist, dass die Temperaturen der Rauchgase beim Ventilator nicht 200 °C übersteigen («... *on peut donc être certain que la température des gaz ne dépasse pas 200 °C au niveau des ventilateurs*»). Im Falle eines 200 MW Brandes können jedoch Temperaturen der Rauchgase höher als 400 °C entstehen; aus praktischen Überlegungen [111] wird die maximale Temperaturfestigkeit der Entrauchungsventilatoren jedoch auf 400 °C festgelegt.

Die minimale Klassifizierung gemäss Norm ist somit eine Temperaturbeanspruchung von 200 °C während 2 Stunden (F200). Diese minimale Klasse erlaubt es nichtsdestotrotz, Brände in der Grössenordnung von 50 MW abzudecken. Die Reduktion der Temperaturbeständigkeit von 250 °C/2h auf 200 °C/2h hat somit nur untergeordneten Einfluss auf die Sicherheit: Auch bei reduzierter Anforderung würde die Funktionsfähigkeit der Anlage für die gängigen Brandleistungen nicht massgeblich beeinträchtigt werden. Die Verfügbarkeit der Anlage sowie die Instandhaltung werden nicht negativ beeinflusst. Gegebenenfalls ergibt sich sogar eine marginale Verbesserung in diesen Bereichen, da sich die Vorgaben einem internationalen Standard angleichen und somit z.B. die Ersatzteilverfügbarkeit verbessert wird.

**Tab. 18 Zusammenfassende Beurteilung**

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus.	Keine Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung.	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung.

### Anpassungsvorschlag

In Anlehnung an die oben durchgeführten Abschätzungen und die Standardklassen gemäss Norm wird vorgeschlagen, dass standardmässig eine Temperaturbeständigkeit für Abluftventilatoren von 200 °C / 2h (F200) einzuhalten ist.

Im Rahmen der Detailplanung soll mittels vereinfachter Betrachtungen (z.B. Abschätzung der Temperaturerhöhung der Abluft je nach Szenario) überprüft werden, ob diese Anforderung hinreichend ist oder nicht und entsprechend zu verschärfen sei. Die Vorgaben an die Szenarien (Brandleistung, Reduktion der Abluftmenge aufgrund nicht Verfügbarkeit des Ventilators etc.) sind in der Richtlinie 13001 [3] festzulegen, um einen konsistenten Planungs- und Anlagenstandard zu erreichen.

## 6.3.2 Maximaler Druckdifferenz zwischen Abluftkanal und Fahrraum

### Einleitung

Die maximal zulässige Druckdifferenz zwischen Abluftkanal und Tunnelfahrraum ist für die Auslegung der Abluftventilatoren, für den Querschnitt des Abluftkanals sowie für die Zwischendecke von Bedeutung.

### Anforderung

- ASTRA 13001, *Lüftung der Strassentunnel [3]* :
  - Abschnitt 7.2.4: *Bei der Bestimmung des Kanalquerschnittes sind die lufttechnischen Anforderungen (Druckbedarf des Abluftventilators, Beanspruchung des Kanals, Gleichmässigkeit der Absaugmenge über die geöffneten Abluftklappen) einzubeziehen. Bei neuen Anlagen darf die Druckdifferenz zwischen Fahrraum und Kanal 2'500 Pa nicht überschreiten.*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 19** Auszug Anforderungskatalog FB 3: Maximale Druckdifferenz 2'500 Pa

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
B	B	B	Anpassung möglich	Anpassung möglich	C (>100 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Diese Anforderung hat keinen unmittelbaren Einfluss auf die Sicherheit und zielt einerseits darauf ab, die Bauwerksleckage in Grenzen zu halten und andererseits, dass die elektrische Leistung von Abluftventilatoren beschränkt bleibt. Insbesondere bei langen Tunneln bzw. Tunnel mit grossem Fahrraumquerschnitt kann diese Anforderung massgebend sein für den Querschnitt des Abluftkanals und / oder die Anzahl Lüftungszentralen. Da fugenlose Zwischendecken inzwischen weit verbreitet sind, hat sich die Leckagemenge stark reduziert. Solche Zwischendecken weisen auch im Laufe der Nutzungsdauer tiefe Leckagewerte auf. Somit kann die die maximale Druckdifferenz ohne weitreichende negative Auswirkungen erhöht werden, um so im baulichen Bereich deutliche Einsparungen zu erzielen (Reduktion des Profils). Eine Erhöhung der maximalen Druckdifferenz ist nur soweit zulässig, dass keine neuen statischen Anforderungen an das Bauwerk entstehen. Die Anforderungen an die minimale Höhe des Abluftkanals gemäss SIA 197/2 [19] ist in jedem Fall einzuhalten.

**Tab. 20** Zusammenfassende Beurteilung

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine Reduktion des Sicherheitsniveaus.	Keine Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung.	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung.

### Anpassungsvorschlag

In Anlehnung an die Hintergründe dieser Anforderung soll die maximale Druckdifferenz zwischen Fahrraum und Kanal für Neuanlagen auf 3'500 Pa erhöht werden.

Die Anforderungen gemäss SIA 197/2 hinsichtlich Kanalhöhe sowie die Statik der Zwischendecke sind zu berücksichtigen.

### 6.3.3 Passive Anti-Rezirkulationsmassnahmen an den Portalen

#### Einleitung

Bei zweiröhrigen Tunneln bestimmen die Lage und die Anordnung der Portale die lokalen aerodynamischen Verhältnisse. Durch den im Tunnel fahrenden Verkehr entsteht über den so genannten Kolbeneffekt eine Strömung, welche am Einfahrtsportal die Luft in der unmittelbaren Umgebung ansaugt. Am Ausfahrtsportal treten die Schadstoffe lokal aus und werden von den Fahrzeugen in Fahrrichtung verschleppt. Überlagern sich die Einflusszonen der Einfahrt und der Ausfahrt, so findet ein Kurzschluss zwischen den beiden Portalen statt und Schadstoffe respektive im Ereignisfall Rauch rezirkulieren.

Im Brandfall können insbesondere in den ersten Minuten eines Ereignisses Rauchgase von der direkt vom Ereignis betroffenen Röhre in die Nachbarröhre rezirkulieren. Dies führt dazu, dass insbesondere während der Selbstrettungsphase die Nebenröhre nicht als (vollwertiger) Fluchtweg zur Verfügung steht. Bevor Lüftungstechnische Massnahmen gegen die Rezirkulation im Brandfall Wirkung zeigen, dauert es aufgrund der grossen Luftmassen oft Minuten.

Anhand von Modellmessungen ([123] - [128] ) und Messungen in einem Tunnel in Stockholm [129] konnte nachgewiesen werden, dass ein solcher Strömungskurzschluss vorhanden sein kann und dass dies unter Umständen zu einem stark erhöhten Lüftungsbedarf im Normalbetrieb führen kann. Die Portalgeometrie (Abstand in Längs- und Querrichtung) und die Umgebung (z.B. Troglage) respektive Trennwände haben einen grossen Einfluss auf die Rezirkulation.

#### Anforderung

- ASTRA 13001, *Lüftung der Strassentunnel [3]* :
  - Abschnitt 7.2.6: *Die Rezirkulation von Rauch und Schadstoffen von einer Tunnelröhre in eine andere und zwischen Abluftbauwerken und Aussenluftfassungen bzw. Portalen ist durch geeignete bauliche Massnahmen zu vermeiden. Bei Tunneln mit zwei parallelen Röhren genügt es in der Regel, zu diesem Zweck eine 100 m lange Ausströmzone vor dem Portal von einer 30 m langen Einströmzone durch eine Wand mit der Höhe des Fahrtraums oder durch einen Versatz der Portale zu trennen. Mit Portallagen in Einschnitten oder mit hohen Lärmschutzwänden sind die Dimensionen zu vergrössern.*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 21** Auszug Anforderungskatalog FB 3: Rezirkulation

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
C	B	B	Evtl. Anpassung möglich	Anpassung möglich	C (>100 kCHF)

#### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Passive Massnahmen, um den Rauchkurzschluss an den Tunnelportalen zu minimieren, sind grundsätzlich sinnvoll. Jedoch kann das Erstellen von Trennwänden an den Tunnelportalen unter Umständen kostenintensiv sein. Die jetzige Formulierung der Anforderung kann optimiert werden, indem z.B. der seitliche Abstand zwischen den Tunnelröhren sowie auch der Höhenversatz berücksichtigt werden.

**Tab. 22 Zusammenfassende Beurteilung**

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine Reduktion des Sicherheitsniveaus.	Keine Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung.	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung.

### Anpassungsvorschlag

Die aktuelle Anforderung soll wie folgt angepasst werden:

Die Rezirkulation von Rauch und Schadstoffen von einer Tunnelröhre in eine andere und zwischen Abluftbauwerken und Aussenluftfassungen bzw. Portalen ist durch geeignete bauliche Massnahmen zu vermeiden. Dabei ist die Kurzschlussrate auf dasselbe Mass zu reduzieren, wie für die Situation ohne jeglichen Portalversatz mit einer Trennwand von 30 m Länge und Höhe entsprechend dem Tunnelfahrraum.

### Handlungsempfehlung

Zusätzlich zum Anpassungsvorschlag soll mittels eines Forschungsprojekts untersucht werden, ob die pauschal festgelegte «100 m lange Ausströmzone» reduziert werden kann bzw. verlängert werden soll.

## 6.3.4 Lüftungstechnische Trennung zweier Tunnel

### Einleitung

Analog zum Kurzschluss zwischen zwei benachbarten Tunnelröhren (siehe Kapitel 6.3.3) kann auch ein Kurzschluss zwischen zwei sich folgenden Tunneln bestehen sowie zwischen einer Rauchausslassöffnung und einem Portal (respektive einer Luftfassung).

### Anforderungen

ASTRA 13001, *Lüftung der Strassentunnel* [3] :

- Abschnitt 7.2.6:
  - *Damit zwei sich folgende Tunnel lüftungstechnisch unabhängig voneinander betrachtet werden können, muss der Abstand zwischen den Portalen mindestens 100 m bei Querung eines Tales, 200 m bei Führung der Strasse in einem tiefen Einschnitt zwischen den Tunneln und 250 m bei einer einseitigen Galerie betragen.*
  - *Bei der Positionierung einer Rauchausslassöffnung sind die Orographie und die örtlichen meteorologischen Verhältnisse sowie die Hinweise in SIA 197/2 [19], zu berücksichtigen. Als Richtwert für den Mindestabstand von Rauchausslassöffnung zu Portal gelten 50 m.*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 23 Auszug Anforderungskatalog FB 3: Strömungskurzschluss**

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
C	B	B	Evtl. Anpassung möglich	Anpassung möglich	C (>100 kCHF)

## Beurteilung im Sinne von LeanTech

Die Konsequenzen einer lüftungstechnischen Abhängigkeit sind nicht klar formuliert, wodurch aufwändige Lösungen generiert werden können. Der Abstand zwischen der Rauchauslassöffnung und dem Tunnelportal hat an sich keinen direkten Einfluss auf die Sicherheit im Brandfall. Es geht aber darum zu vermeiden, dass Rauch die Fluchtwege beeinträchtigen.

**Tab. 24 Zusammenfassende Beurteilung**

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine Reduktion des Sicherheitsniveaus.	Keine Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung.	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung.

### Handlungsempfehlung

Angesichts dessen, dass die Anforderung (siehe oben) sehr hohe Kosten verursachen kann, wird empfohlen, die einzuhaltenen Abstände mittels eines Forschungsprojektes vertieft zu untersuchen und die Ergebnisse in die Richtlinie einzupflegen.

## 6.3.5 Örtliche Trennung der Ventilatorstationen bei der SiSto-Lüftung

### Einleitung

Die Belüftung von Sicherheitsstollen hat durch zwei örtlich getrennte Ventilatorstationen zu erfolgen. Je nach Anzahl der Ventilatoren pro Station hat die Redundanz zwischen den Stationen 80 % oder 100 % zu betragen.

### Anforderung

- ASTRA 13002, *Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln* [4] :
  - Abschnitt 3.3.1 d):
    - *Getrennte Ventilatorstationen: Bei Sicherheitsstollen muss die Lüftung über zwei örtlich getrennte Ventilatorstationen erfolgen.*
    - *Wenn die Ventilatorstationen mit je 2 Ventilatoren ausgerüstet werden, müssen die Anforderungen a) und b) [Red. Auslegekriterien] bezüglich mittlerer Durchströmgeschwindigkeit beim Ausfall eines einzelnen Ventilators zu 100%, beim Ausfall einer gesamten Ventilatorstation (z.B. durch den Ausfall der elektrischen Versorgung oder nach dem Ansprechen der Rauchdetektion in der entsprechenden Luftfassung) zu 80% erfüllt bleiben.*
    - *Wenn die Ventilatorstationen mit je 1 Ventilator ausgerüstet werden, müssen die Anforderungen a) und b) bezüglich mittlerer Durchströmgeschwindigkeit beim Ausfall eines Ventilators (= Ventilatorstation) zu 100% erfüllt bleiben.*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 25 Auszug Anforderungskatalog FB 3: Redundanz**

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
B	C	B	Anpassung nicht möglich	Anpassung möglich	C (>100 kCHF)

## Beurteilung im Sinne von LeanTech

Der Vorteil von zwei unabhängigen Lüftungsstationen ist die Verfügbarkeit der SiSto-Lüftung bei Verrauchung der Luftansaugung. Falls die Lüftungsstation ausreichend weit von den Portalen oder von Rausauslassöffnungen entfernt ist, ist dieses Risiko aber minimal. Die notwendige Redundanz bei einem Komponentenausfall kann auch innerhalb einer einzelnen Lüftungsstation erreicht werden.

**Tab. 26 Zusammenfassende Beurteilung**

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine Reduktion des Sicherheitsniveaus.	Keine Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung.	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung.

## Handlungsempfehlung

Die Formulierung in ASTRA 13002 [4] ist umzuschreiben, sodass eine redundante Ausführung der SiSto-Lüftung ohne Forderung mehrerer Ventilatorstationen erreicht werden kann.

## 6.3.6 Schleusen und Lüftungsanlagen in Fluchtstollen

### Einleitung

Für die Selbstrettung im Ereignisfall ist es von grösster Wichtigkeit, dass sichergestellt wird, dass Fluchtstollen einwandfrei funktionieren und rauchfrei bleiben.

### Anforderung

- ASTRA 13002, *Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln [4]* :
  - Abschnitt 3.1: *Dazu ist bei allen Ausgängen des Sicherheitsstollens ins Freie eine Schleuse erforderlich*
  - Abschnitt 4.1: *Wenn ein nach aussen führender Fluchtstollen länger als 30 m ist oder wenn die Höhendifferenz zwischen Ausgang und Notausgangstür mehr als +3 m beträgt, ist eine mechanische Lüftung erforderlich. Dazu ist pro Fluchtstollen eine Schleuse erforderlich, welche aussen angeordnet wird.*
  - Abschnitt 4.2.1: *Wenn in einem direkt nach aussen führenden Fluchtstollen eine mechanische Lüftung erforderlich ist, muss diese im Normalbetrieb bei geschlossener Schleuse und geschlossener Notausgangstür dauernd einen Überdruck vom Fluchtstollen gegenüber dem Fahrraum von mindestens 50 Pa gewährleisten.*
  - Abschnitt 5.1 3: *Sonderfall: In Sonderfällen (z.B. aufgrund der Länge und Neigung der Querverbindungen) kann eine mechanische Lüftung der Querverbindungen erforderlich sein, so dass bei allen Notausgangstüren ein Überdruck zum Fahrraum herrscht. In diesem Fall sind immer zwei Notausgangstüren pro Querverbindung erforderlich. Als Richtwert gilt, dass Situationen mit einer Höhendifferenz über die gesamte Länge der Querverbindung von mehr als 3 m als Sonderfall einzustufen sind.*
  - Abschnitt 5.2.2: *Wenn Querverbindungen zwischen Tunnelröhren in Sonderfällen mechanisch belüftet werden, muss die Lüftung dauernd in Betrieb sein*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 27 Auszug Anforderungskatalog FB 3: Redundanz**

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
C	B	B	Evtl. Anpassung möglich	Anpassung möglich	C (>100 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Das Konzept mit und ohne Schleuse kann grundsätzlich hinterfragt werden. Eine Überdruckhaltung ist auch ohne Schleuse möglich. Zudem stellt sich die Frage, ob eine Lüftung stets erforderlich ist.

### Handlungsempfehlung

Es wird vorgeschlagen, in einem Fachgremium ausserhalb dieses Projektes die Ausgestaltung von Schleusen und Lüftungsanlagen von Fluchtstollen zu bearbeiten. Dabei ist insbesondere zu klären, ob die Anforderung die Funktion (Rauchfreihaltung) beschreiben soll, statt der technischen Lösung. Die aktuell vorgeschriebene technische Lösung (aktuelle Anforderung) kann als mögliche Lösungen beibehalten werden.

## 6.4 Fachbereich 4 – Signalisation

### 6.4.1 Lokalsteuerung: Vorortbedienung

#### Einleitung

Normalerweise stehen Lokalsteuerungen für die direkte Bedienung der Signale auf der Strecke. Die Vorortbedienung bedingt die Installationen von Bedienpanel und Schalter auf den jeweiligen Lokalsteuerungen. Sämtliche Signale sind hierbei auch via die Anlagesteuerung der Signalisierung bedienbar.

#### Anforderungen

- TM 23 001-11412, *Lokalsteuerung [51]* :
  - Abschnitt 2.1.1:
    - *Lokalsteuerung nur in Zentralen.*
    - *Lokalsteuerung verteilt in Zentralen und Querverbindungen.*
    - *Lokalsteuerung in QSK (Die Tunnelvorzonen gehören gemäss RiLi 15003 Verkehrsmanagement in der Schweiz (VM-CH) zum Tunnel)*
  - Abschnitt 2.2.2: *In der Betriebsart Lokal können alle angeschlossenen Signale über die Vorort-Bedienung geschaltet werden.*



**Abb. 11** Möglicher Ausbau einer Lokalsteuerung inkl. Möglichkeit zur Vorortbedienung

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 28** Auszug Anforderungskatalog FB 4: Lokalsteuerung

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
B	B	A	Anpassung möglich	Anpassung möglich	B (10 – 100 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

In der heutigen Zeit ist ein Zugriff auf die Anlagensteuerung der Signalisation ohne weiteres möglich; entweder über den direkten Zugang zum BKN (Breitbandkommunikationsnetz) anhand Netzwerkanschluss oder mittels gesicherter Drahtlosverbindung (VPN). Basierend auf dieser Annahme sind keine Vorortbedienungen mehr notwendig. Auch besteht dank der vollständigen Verfügbarkeit von Mobilfunk stets die Möglichkeit Betriebs- und/oder Verkehrsleitzentralen telefonisch zu kontaktieren und Schaltungen durchführen zu lassen.

Auch wenn in der Vergangenheit Tunnelsperrungen oder Warnungen mittels Vorortsteuerung durch Einsatzkräfte ausgelöst werden konnten, so setzt dies eine solide Anlagenkenntnis voraus, was aufgrund der stetig zunehmenden Diversität der Aufgaben der Einsatzkräfte heute respektive in Zukunft weniger der Fall ist als früher. Im Gegenzug ist die Erreichbarkeit einer Verkehrsleitzentrale (Einsatzleitzentrale) gegenüber früher deutlich grösser, ebenfalls ist die Verfügbarkeit der entsprechenden Anlagen gestiegen. Beim Ausfall des übergeordneten Leitsystems beziehungsweise des entsprechenden Abschnittrechners ist jedoch kein Fernzugriff möglich; Um in solchen Fällen nichtsdestotrotz den Tunnel für den Verkehr zu sperren, ist eine minimale Vorortbedienung (Portalrot) aber ausreichend.

Mit der Reduktion der Vorortbedienungen können Kosten in Betrieb und Unterhalt eingespart werden, ohne die Sicherheit und Verfügbarkeit zu beeinträchtigen.

**Tab. 29 Zusammenfassende Beurteilung**

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus.	Keine Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung.	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung.

### Anpassungsvorschlag

Alle Lokalsteuerungen werden ohne umfassende Bedienmöglichkeit (lokales Bedienpanel oder Vorortschalter) ausgeführt. Schaltungen können durch die Betriebs- und / oder Verkehrsleitzentrale durchgeführt werden oder mittels Service-Laptop bzw. Web-Benutzeroberfläche. Eine minimale Vorortsteuerung zur Tunnelsperre muss vorgesehen werden.

## 6.4.2 Blinker, Ampel / Fahrstreifenlichtsignal FLS / Wechselsignal LED

### Einleitung

In Tunneln wird eine Vielzahl unterschiedlicher Signale, wie etwa Fahrstreifen- und Wechselsignale, Blinker und Ampeln, eingesetzt. In diesem Kapitel werden die Anforderung an die Lebensdauer der Optiken analysiert.

### Anforderungen

- TM 23 001-11430, *Blinker, Ampel [53]* :
  - Abschnitt 2.2.1: *Die Lebensdauer der LED muss min. 60'000 Std. betragen.*
- TM 23 001-11432, *Fahrstreifenlichtsignal FLS [54]* :
  - Abschnitt 2.1.1:
    - *Gemäss EN 12966*
    - *Die Lebensdauer der LED muss mindestens 60'000 Std. betragen.*
- TM 23 001-11433, *Wechselsignal – LED-Signal [55]* :
  - Abschnitt 2.1.1
    - *Gemäss EN 12966*
    - *Die Lebensdauer der LED muss min. 60'000 Std. betragen.*

Die Anforderungen an die Optik:

Gemäss EN 12966

Lichttechnische Parameter für die optische Qualität	Typ K	Typ M
Farbe der Signalbilder	C2	C2
Leuchtdichte cd/m <sup>2</sup>	L1	L3
Leuchtdichteverhältnis	R1	R2
Betrachtungswinkel des ausgesendeten Lichts	B3	B3

- Die Optik des Fahrstreifenlichtsignals ist in Leuchtdiodentechnik (LED) auszuführen.
- Die Lebensdauer der LED muss mindestens 60'000 Std. betragen.
- Es müssen Massnahmen ergriffen werden, um das Phantomlicht, insbesondere beim FLS Typ M, auf ein Minimum zu reduzieren.
- Die optische Schnittstelle muss so gestaltet werden, dass die Parameter nach 3 Jahren Betriebsdauer noch 80% der geforderten optischen Werte aufweisen.

### Abb. 12 Anforderungen an die Optik

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 30** Auszug Anforderungskatalog FB 4: Optik

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
B	B	B	Anpassung möglich	Anpassung möglich	A (< 10 kCHF)

Auf dem Markt sind in der Zwischenzeit Optiken gleicher Qualität mit einer Lebensdauer von mindestens 80'000 Stunden verfügbar.

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Die heute auf dem Markt erhältlichen LED-Einsätze liefern nach 3 Jahren immer noch 80 % der optischen Werte gemäss EN 12966.

**Tab. 31** Zusammenfassende Beurteilung

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus.	Keine Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung.	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung.

### Anpassungsvorschlag

Anstatt 60'000 Betriebsstunden soll als minimale Lebensdauer für LED-Einsätze in Signalen 80'000 Betriebsstunden gefordert werden.

## 6.4.3 Fachhandbuch - Mittelstreifenüberfahrtsystem MÜLS

### Einleitung

Mit dem Mittelstreifenüberfahrtsystem (MÜLS) kann der Verkehr auf eine oder mehrere Fahrspuren umgeleitet werden. Die Steuerung des MÜLS erfolgt normalerweise über das Leitsystem (lokale Bedienstelle oder Weboberfläche) oder via Lokalsteuerung am Fahrbahnrand.

### Anforderungen

- TM 23 001-11474 Mittelstreifenüberfahrtsystem MÜLS [60] :
  - Abschnitt 1.4.3. *Bauform Vollautomatisch. Das Anheben und Schwenken der Leitschranken erfolgt wie bei der halbautomatischen Bauform. Die Bedienung erfolgt grundsätzlich von Fern über das Leitsystem. Eine Bedienung in einer Steuerkabine ausserhalb der Fahrbahn muss auch möglich sein. Diese Bauform ist für das rasche Einrichten der Überfahrt innert 30 Minuten und bei einem Ausrüstungsgrad HOCH (gemäss Richtlinie 15003) einzusetzen.*

Die automatisch gestellten MÜLS werden heutzutage oft über die lokale Bedienstelle oder über die Weboberfläche auf der Anlagesteuerung Signalisation von der Polizei bedient (Diese Bauform ist für das rasche Einrichten der Überfahrt innert 30 Minuten und bei einem Ausrüstungsgrad, hoch gemäss Richtlinie 15003 [14] , einzusetzen). Die Lokalsteuerung am Fahrbahnrand wird selten benutzt.



**Abb. 13** Beispiel einer Mittelstreifenüberfahrt

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 32** Auszug Anforderungskatalog FB 4: Mittelstreifenüberfahrtsystem MÜLS

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Forschungsstelle	Kostenpotential
B	B	B	Anpassung möglich	Anpassung möglich	A (< 10 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Der Aufbau eines Gegenverkehrszustandes mit einem MÜLS bedingt normalerweise das Stellen eines bestimmten Betriebszustands, welcher über einen sequenziellen Ablauf aufgebaut wird. Aus diesem Grund könnte die aufwendig implementierte Bedienstelle vor Ort neben der Fahrbahn entfallen werden.

Die Auslösung des entsprechenden BZ erfolgt auf der Anlagesteuerung Signalisierung, normalerweise von der Einsatzzentrale der Polizei aus. Aus Sicherheitsgründen ist nichtsdestotrotz die Polizei vor Ort anwesend, um die teilweisen ROT/ ROT Phasen zu überwachen. Die Bedienung findet aber auch in dem Fall nicht vor Ort statt.

Seitens des Betriebs besteht jedoch der Anspruch, für die Wartungs- und Unterhaltsarbeiten zwingend die Vorortbedienung zu verwenden. So müssen zum Beispiel unter Verkehr exakte Positionen angefahren werden können, was nur mittels einer Vorortbedienung sicher möglich ist. Es wird zudem als wichtig erachtet, das MÜLS verstellen zu können, auch wenn keine Möglichkeit zum Fernzugriff (Übergeordnetes Leitsystem) besteht.

### Handlungsempfehlung

Aufgrund der Praxiserfahrung und in Hinblick auf das begrenzte Einsparpotential wird vorgeschlagen, keine Änderungen an der Anforderung vorzunehmen. Eine einfache Vorortbedienung muss vorhanden sein.

## 6.5 Fachbereich 5 - Überwachungsanlagen

### 6.5.1 Branddetektion in Strassentunnel

#### Einleitung

Standardgemäss kommen zur Ereignisdetektion in heutigen Tunnels linienförmige Wärmemelder sowie Rauchmelder zum Einsatz.

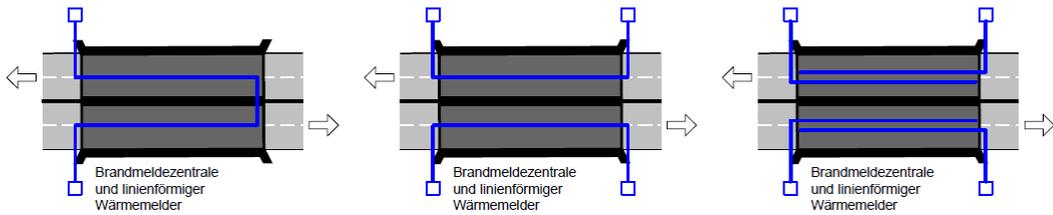
Hinsichtlich Branddetektion sind die beiden Systeme teilweise redundant (gleicher Verwendungszweck), detektieren aber mittels unterschiedlicher Grössen (Temperatur, Rauch). Die Redundanz innerhalb der Systeme steigt, sofern die Rauchmelder zusätzlich über eine Temperaturmessung verfügen (Standard / optional bei den aktuell auf dem Markt erhältlichen Produkten).

In der Vergangenheit hat es sich bewährt, bei bestimmten Projekten kürzere Abstände zwischen den Rauchmeldern zu verwenden, um dadurch die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Detektion zu erhöhen. Typischerweise werden dann die Rauchmelder im Abstand von 50 m statt 100 m oder mehr positioniert.

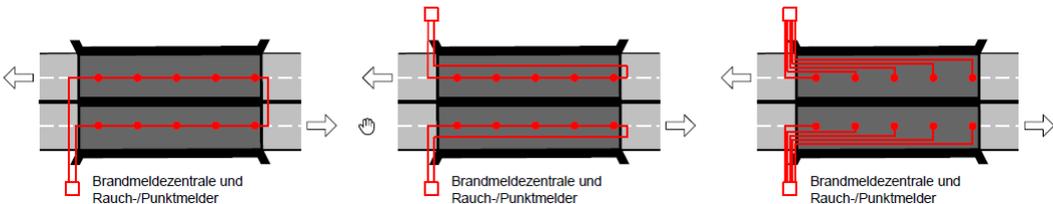
#### Anforderungen

- ASTRA 13004, *Branddetektion in Strassentunneln* [5] :
  - Abschnitt 3.1.5: *Das automatische System muss den Ort eines Brandes bzw. der Rauchentwicklung im Abstand von 100 bis 300 m je nach dem Tunneltyp feststellen können.*
  - Anhang II.1 *Distanz zwischen den Rauchmeldern:*
    - *Anforderung an Tunnel mit Rauchabsaugung durch Lüftungsklappen*
      - *Bei jeder Klappe ist ein Rauchmelder anzubringen.*
    - *Anforderung für Tunnel ohne Rauchabsaugung, Typ GV und RV 2*
      - *(GV: Gegenverkehr, RV 2: Richtungsverkehr mit grosse Stauhäufigkeit)*
      - *Die empfohlene Distanz zwischen Rauchmeldern beträgt 100 m.*
    - *Anforderung für Tunnel ohne Rauchabsaugung, Typ RV 1*
      - *(RV 1: Richtungsverkehr mit geringe Stauhäufigkeit)*
    - *Die empfohlene Distanz zwischen Rauchmeldern beträgt 100 bis 300 m, abhängig von anlagespezifischen Grössen wie der Längsneigung der betreffenden Tunnelröhre.*
- TM 23 001-11510, *Brandmeldeanlage Tunnel* [62] :
  - Abschnitt 2.1.1: *Die Sensoren der BMA im Fahrraum bestehen aus folgenden Sensortypen und dienen zur Brand- und Rauchdetektion:*
    - *Branddetektion (Brandmeldekabel): Linienförmiger Wärmemelder*
    - *Rauchdetektion (Rauchmelder): Optischer Rauchmelder*
  - Abschnitt 2.2.2: *Die Lokalsteuerung meldet dem übergeordneten System die detektierten Brände oder Rauchquellen.*
    - *Überwachung aller angeschlossenen BMA-Komponenten. Technische Alarme und Störungen werden unmittelbar dem übergeordneten System gemeldet*

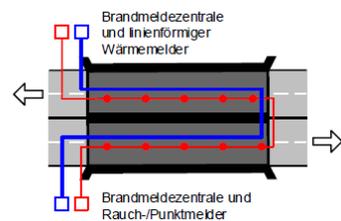
Gemäss ASTRA Richtlinie 13004 Branddetektion in Strassentunneln [5] und 23001-11510 - Fachhandbuch - Brandmeldeanlage Tunnel [62] wird die Branddetektion heute über 2 Teilsysteme realisiert (siehe Abb. 14 , Abb. 15 und Abb. 16 ): der linienförmige Wärmemelder und Rauchmelder. Beiden Teilsysteme werden über die Anlagesteuerung Brandmeldeanlage-Tunnel (BMA-T) gesteuert.



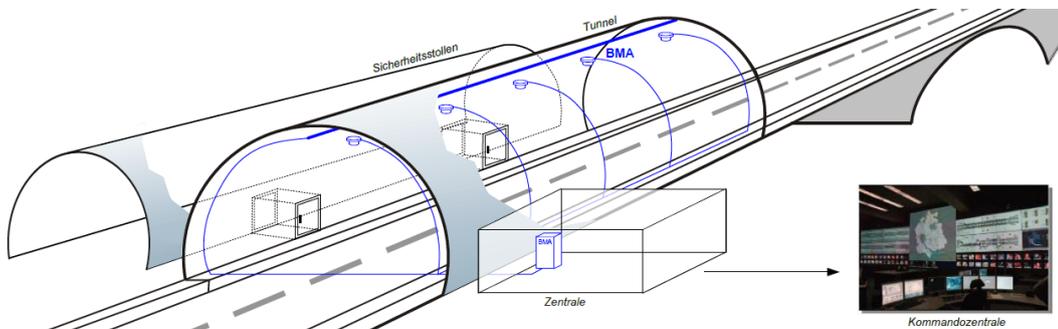
**Abb. 14** Mögliche Lösungen zur Branddetektion mit linienförmigem Wärmemelder (Tunnel-/Projektabhängig)



**Abb. 15** Mögliche Lösungen zur Branddetektion mit Rauchmelder (Tunnel-/Projektabhängig)



**Abb. 16** Mögliche Lösung zur Branddetektion mit Kombination von Rauch- und linienförmigem Wärmemelder (Tunnel-/Projektabhängig)



**Abb. 17** Brandmeldeanlage Prinzipschema

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 33** Auszug Anforderungskatalog FB 5: Branddetektion und Brandmeldeanlage in Strassentunnel

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Forschungsstelle	Kostenpotential
B	B	A	Anpassung möglich	Anpassung möglich	B (10 - 100 kCHF)

## Beurteilung im Sinne von LeanTech

Mit der aktuellen technischen Lösung aus Rauchmeldern als Einzelsensoren mit integrierter Temperaturmessung und linearem Wärmemelder kann in Erwägung gezogen werden auf das lineare Kabel zu verzichten. Das dazu erforderliche Raster der Rauchmelder müsste aber zwingend neu (dichter) festgelegt werden.

Das Detektionssystem für den Brand könnte zudem als Messsystem betrachtet werden anstatt wie bisher als Anlage. Damit müsste keine eigene Anlagesteuerung aufgebaut werden, sondern das Messsystem könnte direkt, z.B. in der Anlagensteuerung Lüftung integriert werden. Mit dem Verzicht auf ein Teilsystem und eine eigene Anlagesteuerung BMA-T können wesentliche Unterhalts- und Betriebskosten eingespart werden.

Für Deutschland schreibt EABT [106] linienhafte Wärmemeldesystem (d.h. lineare Brandmeldekabel) und deren Minimalanforderungen vor: *«Die automatischen Brandmelder im Tunnel müssen einen Brand mit einer Brandleistung von 5 MW bei einer Strömungsgeschwindigkeit in Längsrichtung von 4 m/s in einem Gegen- und 6 m/s in einem Richtungsverkehrstunnel innerhalb einer Minute nach Zündung auf 50 m genau detektieren.»* Zudem wird gefordert, dass Sichttrübungsmessgeräte zur Branddetektion (Voralarmierung) herangezogen werden. Sichttrübungsmessungen sind mindestens alle 300 m angeordnet, deren Abstand kann jedoch auf 150 m z.B. mit dem Einsatz von Rauchdetektoren verkürzt werden.

In Österreich [105] sind lediglich Brandmeldekabel verlangt; aber die Tunnel auf den Autobahnen sind konstant überwacht und Brände werden demzufolge öfters zuerst von den Operatoren detektiert. Die Anforderungen an die Branddetektion sind in Abb. 18 ersichtlich.

Gemäss Cetu (2015) [131] orientiert sich die Branddetektion in Frankreich wie folgt an den Anforderungen der EU-Direktive 2004/54/EG [2] :

- A. 2.14.1. *«In allen Tunneln, die über eine Leitstelle verfügen, ist ein Videoüberwachungssystem und ein System zur automatischen Erkennung von Verkehrsstörungen (z. B. stehen gebliebene Fahrzeuge) und/oder von Bränden zu installieren.»*
  - In der Praxis erfolgt die Branddetektion normalerweise aufgrund Rauchdetektion mittels der Videoüberwachungsanlagen [131]
  - In diesem Fall gelten folgende typische Anforderungen betreffend Rauchererkennung
    - i. Detektionsrate >95%
    - ii. Max 0.05 Fehlalarme pro Kamera pro Tag
    - iii. <10 s Detektionszeit
- B. 2.14.2. *«In allen Tunneln, die über keine Leitstelle verfügen, sind automatische Brandmeldesysteme zu installieren, wenn der Betrieb mechanischer Rauchabzugslüftungen anders als der Automatikbetrieb zur Abgasablüftung erfolgt.»*
  - In der Praxis erfolgt die Branddetektion normalerweise mittels linienförmigen Wärmekabel
  - Allgemein gültige Detailanforderungen schienen nicht vorzuliegen

Tabelle 7: Maximale Branddetektionszeit

LUFTLÄNGS- GESCHWINDIGKEIT [m/s]	BRANDETEKTION [s]		BRANDLAST
	VOR- ALARM	ALARM	
< 3	60	90	2 x 1 m <sup>2</sup> mit je 10 l Spirituspool-Feuer (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH) Nominelle Brandleistung: ca. 1,5 MW
≥ 3	120	150	2 x 1 m <sup>2</sup> Dieselpool-Feuer mit je 10 l Diesel- und je 5 Liter Benzinkraftstoff Nominelle Brandleistung: ca. 3,5 MW

**Abb. 18** Anforderungen an Brandmeldekabel gemäss RVS 09.02.22 [105]

### Handlungsempfehlung

Anhand einer separaten, gezielten Untersuchung soll untersucht werden, ob der thermische Linienmelder für gewisse Tunnel (z.B. Tunnel von kurzer Länge, geringem Gefährdungspotential) durch Rauchmelder mit integrierter Temperaturmessung ersetzt werden können. Dabei ist insbesondere die Detektionszeit und die Verfügbarkeit / Instandhaltung von solchen Lösungen zu klären. In dem Zusammenhang kann zusätzlich geklärt werden, ob und wann die Brandmeldeanlage Tunnel (BMA-T) eine eigenständige Anlage darstellt beziehungsweise, ob / wann die Funktion z.B. der Diversanlage zugeordnet werden kann.

## 6.5.2 Videoanlagen – Bildauswertung

### Einleitung

Im Tunnel wird die Verkehrsstrecke lückenlos per Videoanlage überwacht. Mit den heutigen Videoanlagen werden nebst der aktuellen Übertragung der Verkehrssituation auch automatische Auswertungen von Ereignissen angestrebt.

### Anforderungen

- ASTRA 13005, Videoanlagen [6]:
  - Abschnitt 3: Die Videoanlagen bestehen aus: *Bilderfassung (Videokameras und Video-Encoder), Bildspeichersystem (BSS), Bildauswertungssystem (BAS), Video Management System (VMS), Software Decoding Server und Anzeigesysteme*
  - Abschnitt 7.1.1: *Als Ereignis gilt ein bestimmtes Vorkommnis im Nationalstrassenverkehr, welches die Verkehrssicherheit und das Verkehrsmanagement beeinflusst. Folgende Ereignisse werden vom Bildauswertungssystem automatisch erkannt:*
    - *Stehendes Fahrzeug*
    - *Stau: stehende Kolonne, d.h.  $v_{fz} < 10$  km/h.*
    - *Zähflüssiger Verkehr: langsam fahrende Fahrzeuge, d.h.  $10$  km/h  $< v_{fz} < 50$  km/h.*
    - *Falschfahrer: Fahrzeug entgegen der vorgesehenen Fahrtrichtung.*
    - *Gegenstand auf der Fahrbahn.*
    - *Nischenbelegung (Tunnel): stehendes Fahrzeug.*
    - *Pannestreifenbelegung: stehendes Fahrzeug, Gegenstand auf dem Pannestreifen.*
    - *Rauch/Brand: Rauch oder Brand im Tunnel.*

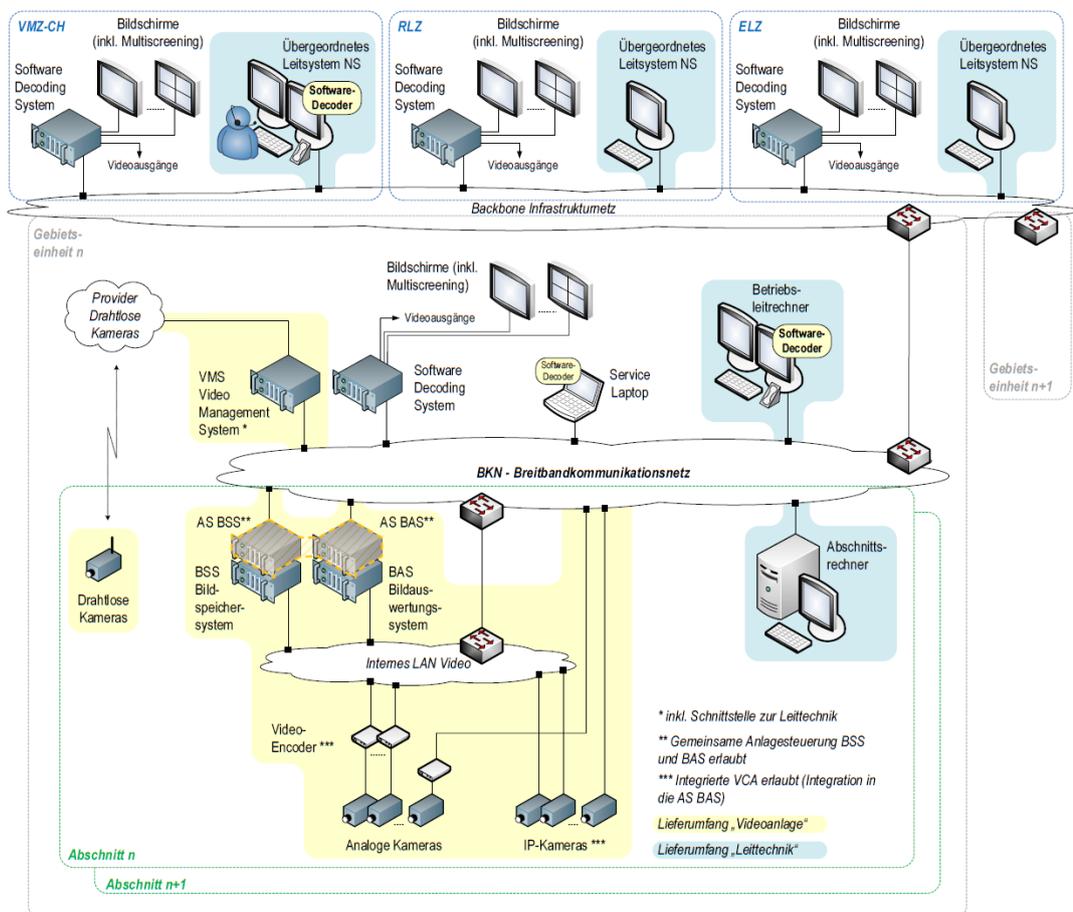


Abb. 19 Struktur der Videoanlagen

		Kameratyp			
		Typ 1	Typ 2 <sup>11</sup>	Typ 3	Typ 4
Ort	Tunnel	X			
	Offene Strecke		X	X	X
Ereignis	Stehendes Fahrzeug	X	X		
	Stau	⊗	X		
	Zähflüssiger Verkehr	⊗	X		
	Falschfahrer	X	X		
	Gegenstand auf der Fahrbahn	⊗	X		
	Nischenbelegung (Tunnel)	X			
	Pannestreifenbelegung	X	X		
Rauch/Brand	⊗				

**Abb. 20** Zuordnung „Kameratyp – Ereignisdetektion“. Die mit einem roten Kreis angezeigten Funktionen sollen in der Zukunft nicht mittels automatischer Videoerkennung erfasst werden

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 34** Auszug Anforderungskatalog FB 5: Videoanlagen - Bildauswertung

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Forschungsstelle	Kostenpotential
B	B	A	Anpassung möglich	Anpassung möglich	B (10 - 100 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Die definierten Ereignisse werden zum Teil nicht mit der erforderlichen Qualität detektiert und verursachen daher Fehler im automatischen Betrieb.

Die automatische Bildauswertung der Videoanlage soll sich auf Ereignisse beschränken, welche sie mit einer hohen Zuverlässigkeit der Detektion erfassen kann. Das System wird dadurch einfacher und zuverlässiger und kann für automatische Sperrungen bzw. Betriebszustände genutzt werden.

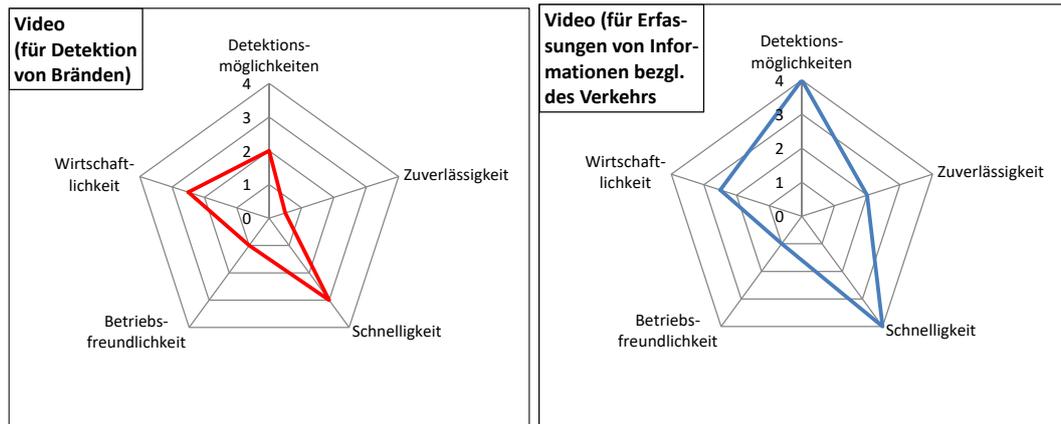
Die weiteren Ereignisse, Stau und zähflüssiger Verkehr, werden über die Verkehrserfassung mit Schlaufen/Radar im Bereich Signalisierung detektiert und innerhalb der Anlagesteuerung Signalisierung direkt verwendet.

Rauch und Brand werden nur durch die Branddetektion bzw. Luftqualitätsmessung in der entsprechenden Anlagesteuerung generiert.

Die Betriebs- und Unterhaltskosten werden reduziert, inkl. die zu verarbeitende Datenmenge, ohne die Sicherheit und Verfügbarkeit zu beeinträchtigen.

Für das Grossprojekt E4 Förbifart Stockholm (Schweden) wurden unterschiedliche Detektionsmethoden untersucht. Es wurde entschieden, dass Rauchdetektion mittels Rauchdetektoren erfolgen soll und dass Stauererkennung mit Radar zu erfassen sei.

HBI analysierte für ASFINAG unterschiedliche Detektionsmethoden [113] und stellte fest, dass die Zuverlässigkeit der Videoerkennung von Rauch sowie für die Erfassung von Verkehrsinformation nicht besonders hoch sei, siehe Abb. 21 .



**Abb. 21** Videosysteme für die Branddetektion (oben) und die Erfassung von Informationen bezüglich des Verkehrs (unten) ASFINAG/HBI [113].

**Tab. 35** Zusammenfassende Beurteilung

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus.	Keine Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung.	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung.

### Anpassungsvorschlag

Die automatische Videoerkennung soll lediglich folgende Ereignisse erfassen: Stehendes Fahrzeug, Falschfahrer, Nischen- sowie Pannestreifenbelegung.

## 6.6 Fachbereich 6 - Kommunikation & Leittechnik

### 6.6.1 Anlagesteuerungen

#### Einleitung

Aktuell sind für sämtliche Fachbereiche eigene Anlagesteuerungen/Lokalsteuerungen vorgesehen, mit Ausnahme von kleineren Objekten.

#### Anforderungen

- TM 23 001-11620, *Gliederung Leittechnik* [68]:
  - Abschnitt 5.1: Für folgende Anlagen und Teilanlagen ist, sofern sie im entsprechenden Objekt vorhanden sind, eine Anlagesteuerung (AS) vorzusehen:
    - Energieversorgung (E)
    - Beleuchtung (B)
    - Lüftung (L)
    - Signalisation (S)
    - Brandmeldeanlage Tunnel (BMT)
    - Videoanlage (VTV)
    - Diversanlage (DI)
    - Notruftelefon (NT)
    - Sicherheitsstollen (SIS)

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 36** Auszug Anforderungskatalog FB 6: Kommunikation und Leittechnik

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Forschungsstelle	Kostenpotential
B	B	A	Anpassung möglich	Anpassung möglich	B (10 - 100 kCHF)

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Die heutigen Rechnersysteme sind sehr leistungsfähig, ebenfalls mit genügend Speicheradressierung. Es können somit mehrere Fachbereiche mit ähnlichen Anforderungen auf gemeinsame Anlagesteuerungen zusammengefasst werden. Damit kann die Anzahl der Rechner reduziert werden mit ebenfalls positiver Auswirkung zum Abschnittsrechner.

Die Anlagesteuerungen können unterteilt werden in primäre Steuerungen, welche direkt für den Betrieb der Fahrbahn benötigt werden, und solche für Nebeneinrichtungen bzw. Hintergrundinfrastruktur.

Zu den Primären einzelnen Anlagesteuerungen gehören:

- AS Lüftung
- AS Signalisation
- AS BMA-T
- AS VTV
- AS NTA

Die restlichen Anlagesteuerungen betreffen die Anlagen:

- Energieversorgung (E)
- Beleuchtung (B)
- Diversanlage (DI)
- Sicherheitsstollen (SIS)

Diese gehören zu den sekundären Systemen und werden auf die Anlagesteuerung NEB (Nebeneinrichtungen) aufgeschaltet.

Unmittelbar scheint diese Reduktion der Anzahl Anlagesteuerungen vorteilhaft. Nachteile können sich aber beim Ersatz von einzelnen sekundären Systemen ergeben. Zudem entsteht ein Klumpenrisiko, falls die Anlagesteuerung NEB nicht zur Verfügung steht. Für den Unterhalt und den Betrieb ist es ebenfalls vorteilhafter, stets dieselben Anlagen wiederzufinden, statt individuelle Umsetzungen. Die genauen Konsequenzen dieser möglichen Anpassung lassen sich somit nicht eindeutig ermitteln. Aufgrund des verhältnismässig moderaten Kostensparpotentials wird somit auf eine Weiterverfolgung verzichtet.

### Handlungsempfehlung: keine Anpassung

Es wird empfohlen, die Anforderung ohne Änderungen beizubehalten.

## **6.7 Fachbereich 7 – Kabelanlagen**

Im Fachbereich 7 bieten sich nach Meinung der Forschungsstelle keine Anpassungen an den gestellten Anforderungen an.

## 6.8 Fachbereich 8 – Nebeneinrichtungen

### 6.8.1 Raumlüftungskonzept, Allgemeine Vorgaben

#### Einleitung

In vielen Räumen der Tunnelzentralen und Elektroräumen entlang der Nationalstrasse sind hochsensible technische Anlagen untergebracht. Damit die einwandfreie Funktion dieser Anlagen gewährleistet werden kann, dürfen in diesen Räumen gewisse Temperaturen nicht überschritten respektive unterschritten werden.

Auch für das Wartungs- und Unterhaltspersonal sollten in den Räumen annehmbare Temperaturen herrschen, damit diese ihre Tätigkeiten verrichten können.

#### Anforderungen

- TM 23 001-11820: *Heizung, Lüftung und Klima Zentralen [83]* :
    - *Abschnitt 2.1.1:* Das Raumlüftungskonzept muss einen energieeffizienten Betrieb sicherstellen. Betreffend Luftwechselraten sind die Vorgaben SIA 180 „Wärme und Feuchteschutz im Hochbau“ (red. [21] ) zu beachten. Als Raumlüftung ist eine Überdrucklüftung mit Umluft mit regulierbarem Aussenluftanteil für technische Räume vorzusehen. Folgende Räume sind einzubeziehen:
      - MS – Schaltanlage min. 12°C / max. 32°C
      - NS- und Steuerungsräume min. 12°C / max. 32°C
      - USV – Raum min. 12°C / max. 32°C
      - Batterieraum Sollwert 20°C (min. 15°C / max. 25°C)
- Der minimale Wert ist der Planungswert für die Dimensionierung der Heizung.  
Der maximale Wert ist der Planungswert für die Dimensionierung der Kühlung.*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 37** Auszug Anforderungskatalog FB 8: Raumlüftungskonzepte

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
A	A	A	Anpassung möglich	Anpassung möglich	B (10 - 100 kWh)

#### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Gemäss der Erfahrung der Forschungsstelle gibt es viele Technikräume, die im Sommer zu stark gekühlt sind und im Winter zu fest geheizt werden. Dadurch werden Unmengen an Energie verschwendet.

Nebst dem Energieverbrauch ist auch die Arbeit in Räumen nicht angenehm, wenn die Raumtemperaturen massiv von den Aussentemperaturen abweichen.

Um den Energieverbrauch zu minimieren, wäre es sinnvoll, zusätzlich zum Temperaturbereich, Steuerungsgrenzwerte einzuführen, ab denen geheizt respektive gekühlt werden darf. Die Regelung der Anlagen aufgrund eines Setpoint entspricht der Stand der Technik. Es sollte in Erwägung gezogen werden, separate Setpoints zu verwenden für die Situation, wenn keine Personen sich in den Räumen aufhalten.

Beispielsweise darf erst geheizt werden, sobald die Raumtemperatur unter 15 °C fällt.

Überdimensionierte Anlagen müssen in weniger effizienten Teillast betrieben werden. Daher soll Überdimensionierung vermieden werden. Die Dimensionierung der Anlagen soll

daher der effektiv zu erwarteten Wärmelasten inklusive minimaler Reserven für Worst-Case Situationen und nicht Nennlasten erfolgen.

Bei der Planung sollen auch baulichen Massnahmen mit einbezogen werden (z.B. Erdregister zur Konditionierung der Frischluft). Zudem kann Überschusswärme z.B. von Rechnerräumen dazu verwendet werden, andere Räume zu heizen.

Einfluss Auf die Sicherheit und die Verfügbarkeit:

Dies hat weder Einfluss auf die Sicherheit noch auf die Verfügbarkeit, da sämtliche Anlagen im vorgegebenen Temperaturbereich funktionieren müssen. Dieses wird durch die Änderung nicht tangiert.

Einfluss auf die Instandhaltung:

Auf die Instandhaltung hat diese Änderung keinen Einfluss.

**Tab. 38 Zusammenfassende Beurteilung**

Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung
Keine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus.	Keine Reduktion der Verfügbarkeit durch eine reduzierte Anforderung.	Keine negative Beeinflussung der Instandhaltung durch eine reduzierte Anforderung.

### Anpassungsvorschlag

Kurzfristig sind im TM 23001-11820 zusätzlich zu den Temperaturbereichen für die Dimensionierung ebenfalls Steuerungsvorgaben vorzugeben (z.B. Heizen nur falls  $T < 15\text{ °C}$  bzw. Kühlen nur falls  $T > 32\text{ °C}$ ). Dabei ist zu beachten, dass die Grenzwerte u.U. raumspezifisch festzulegen sind (Reduktion der Lebensdauer von Komponenten aufgrund erhöhter Temperaturen).

Mittelfristig ist das Thema umfassend anzugehen und ein entsprechender Standard zu schaffen (z.B. Richtlinie). Betrachtet werden sollen hierbei insbesondere auch energieeffiziente Konzepte (Erdregister zur Konditionierung der Luft) sowie Auslegungskriterien wie z.B. die Differenzierung zwischen Nennlasten sowie effektiv zu erwartenden Lasten inklusive Betrachtungen zur Gleichzeitigkeit und der thermischen Trägheit.

## 7 Weitere Anforderungen mit Optimierungspotential

Die Anforderungen mit Optimierungspotential, welche keiner Detailanalyse (siehe Kapitel 6) unterzogen wurden, werden in diesem Kapitel in unterschiedlicher Untersuchungstiefe behandelt. Dabei steht im Vordergrund, dass alle Anforderungen mit Optimierungspotential entweder in Kapitel 6 oder 7 dokumentiert sind.

### 7.1 Fachbereich 3 – Lüftung

#### 7.1.1 Anordnung der Abluftventilatoren und Zugang zu den Lüftungszentralen

##### Einleitung

Bezüglich der Anordnung von Abluftventilatoren wie auch dem Zugang zu den Lüftungszentralen existieren Vorgaben, welche jedoch gewissen Interpretationsspielraum ermöglichen.

##### Anforderung

- TM 23001-11340, *Abluftsystem [46]* :
  - Abschnitt 2.1.3:
    - *Die Anordnung der Abluftventilatoren soll nach Möglichkeit nicht über der Fahrbahn erfolgen und die Lüftungszentralen sollen direkt von aussen zugänglich sein, ohne den Verkehrsraum des Tunnels zu nutzen.*
    - *Die zulässigen Bauwerksbelastungen und die Eigenfrequenz des Bauwerks sind zu beachten. Als ungünstigster Belastungsfall ist von einem Schaufelverlust und der daraus resultierenden Unwucht auszugehen.*

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Selektionsverfahrens gemäss Kapitel 5 für die obigen Anforderungen auf.

**Tab. 39** Auszug Anforderungskatalog FB 3: Einbau Allgemein

Ergebnis Bewertung			Ergebnis Beurteilung		
Sicherheit	Verfügbarkeit	Instandhaltung	Methodik	Fachmeinung	Kostenpotential
B	B	B	Anpassung möglich	Anpassung möglich	C (>100 kCHF)

##### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Die Anforderung, die Abluftventilatoren soll nach Möglichkeit nicht über der Fahrbahn anzuordnen, kann in Frage gestellt werden. Zudem stellt sich die Frage, ob es immer zweckmässig ist zu fordern, dass die Lüftungszentralen direkt von aussen zugänglich sein sollen, ohne den Verkehrsraum des Tunnels zu nutzen.

Die Anordnung der Abluftventilatoren über der Fahrbahn kann es erlauben, die Grösse der Zentralen zu reduzieren und auf aufwändige Schächte zu verzichten. Eine Anordnung der Abluftventilatoren über die Fahrbahn hat im Weiteren den Vorteil, dass die Abluftventilatoren einfach ein- und ausgebracht werden können. Ein Ereignis (Brand) direkt unterhalb der Ventilatoren darf jedoch nicht zu einer möglichen Beeinträchtigung der Funktion der Ventilatoren führen.

Lüftungszentralen, welche direkt von aussen zugänglich sind, ist grundsätzlich sehr zweckmässig. Die Anforderung präzisiert jedoch nicht, welche Art der Zugänglichkeit sichergestellt werden muss (Betriebspersonal / Material etc.). Der Zugang für Personen ist in jedem Fall sicherzustellen. Die Notwendigkeit der Zugänge von aussen für Materiallieferungen kann projektspezifisch hinterfragt werden.

### Handlungsempfehlung

Die genauen Nutzungsanforderungen sollen ermittelt werden, sodass erörtert werden kann, ob diese Anforderungen präziser formuliert werden können. Die Definition der Zugänglichkeit soll deutlicher formuliert werden: zu Fuss, mittels Personenwagen, mit Lastwagen und Direktverlad usw. In Rahmen eines Gesamtwartungskonzeptes soll beurteilt werden, wie Material geliefert und abgeführt werden kann.

Unter Berücksichtigung der Wartungssituation inklusive Anlagenersatz könnte eine Anordnung der Abluftventilatoren direkt über der Fahrbahn sich als vorteilhaft erweisen, falls sie gegen die Einwirkung eines Brandes im Fahrraum entsprechend geschützt sind.

## 7.1.2 Zuführung von Zuluft

### Einleitung

Bei einem Lüftungssystem mit Zuluft ist die Höhe über Fahrbahn der Einblasstellen vorgegeben.

### Anforderungen

- ASTRA 13001, *Lüftung der Strassentunnel [3]* :
  - Abschnitt 3.4.3:
    - *Wenn Zuluft erforderlich ist, muss die Zuluft längenverteilt auf Strassenniveau eingeblasen werden.*
    - *Das früher verwendete System der Halbquer-/Querlüftung mit Umsteuerung der Zuluft- zu Abluftventilatoren ist nicht mehr zulässig, weil die Absaugkapazität sehr rasch verfügbar sein muss und weil längenverteilte Zuluft immer auf Strassenniveau eingeblasen werden muss.*
  - Abschnitt 7.1.8: *In einem Tunnel mit längenverteilter Zuluft muss diese etwa 50 cm über der Fahrbahn eingeblasen werden. Ein Einblasen durch Deckenöffnungen ist nicht zulässig.*

### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Diese Anforderung stammt aus der Zeit, wo Abluft (bzw. Rauchabsaugung) verteilt über einen grossen Teil der Tunnellänge abgesaugt wurde. In diesem Fall ist es offensichtlich, dass die Effizienz der Rauchabsaugung aufgrund einer geringen Distanz zur Zuluft-einblasung (z.B. beides direkt durch die Zwischendecke) beeinträchtigt würde. Traditionell wurde im Brandfall die Zuluft weiterbetrieben. In modernen Tunneln ist verteilte Zuluft eine aussergewöhnliche Anlage; Im Brandfall wird dies zudem kaum verwendet. In Österreich wird Zuluft direkt vom Zuluftkanal typischerweise durch Deckenöffnungen in den Fahrraum eingeblasen.

Gewisse neuere Planungen bringt die Zuluft punktuell im Fahrraum ein. Somit kann zudem über die damit verbundenen Impulse die Längsströmung beeinflusst werden. Die Forderung, die Zuluft längenverteilt einzubringen, entspricht daher nicht dem Regelfall.

### Handlungsempfehlung

Es sollte überlegt werden, die Anforderung auf ihre Funktion zu reduzieren: *«In einem Tunnel mit Einsatz der verteilten Zuluft im Ereignisfall und verteilter Rauchabsaugung hat die Zuluft etwa 50 cm über der Fahrbahn eingeblasen zu werden. Ansonsten ist das Einblasen durch Deckenöffnungen zulässig»*. Eine Aktualisierung der Vorgaben zu

Lüftungssysteme mit Zuluft sollte erfolgen, sodass die punktuelle Zuluft mit oder ohne Impuls betrieben werden kann. Diesbezüglich kann auf Ausführungen im Forschungsprojekt VSS 1310 (bzw. ASTRA 2007/002 [114] ) «*Beeinflussung der Luftströmung im Strassentunnel im Brandfall*» zurückgegriffen werden.

### 7.1.3 Lüftung der Strassentunnel: Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung

#### Einleitung

Die Richtlinie ASTRA 13001 [3] «*Lüftung der Strassentunnel*» mit dem Untertitel «Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung» beinhaltet viele wertvolle Angaben und Anweisungen. Sie hat massgebend dazu beigetragen, dass die Tunnellüftung gemäss eindeutigen Vorgaben vereinheitlicht wurde.

#### Beurteilung im Sinne von LeanTech

Sehr viele Projekte wurden aufgrund der Richtlinie ASTRA 13001 [3] umgesetzt. In der Zwischenzeit ist die Richtlinie ASTRA 19004 [17] und Methodik ASTRA 89005 [92] betreffend Risikoanalysen entstanden. Mit diesem Hintergrund wird vorgeschlagen, die Richtlinie ASTRA 13001 [3] zu aktualisieren. Die Erwägungen sind wie folgt gegliedert:

- Systemwahl
- Dimensionierung
- Ausstattung

#### Systemwahl

##### *Situation*

Die Wahl des Lüftungssystems hat grosse Folgekosten. Es stehen folgende Lüftungssysteme zur Verfügung:

1. *System der natürlichen Lüftung* (d.h. keine mechanische Lüftung)
2. *Mechanische Lüftungssysteme ohne Absaugung im Ereignisfall* (z.B. mechanische Längslüftung mit Stahlventilatoren)
3. *Mechanische Lüftungssysteme mit Absaugung im Ereignisfall* (z.B. gezielte Rauchabsaugung mittels Abluftklappen in einer Zwischendecke).

Das Lüftungssystem wird mittels einer vereinfachten Risikobetrachtung unter Einbezug folgenden Faktoren festgelegt:

- Verkehrsart:
  - RV 1: Richtungsverkehr mit geringer Stauhäufigkeit
  - RV 2: Richtungsverkehr mit grosser Stauhäufigkeit
  - GV: Gegenverkehr
- Verkehrsmenge (insbesondere durchschnittlicher tägliche Verkehr (DTV) und Lastwagenanteil)
- Tunnellänge und Längsneigung

Dabei sind u.a. folgende Anforderungen gemäss ASTRA 13001, Lüftung der Strassentunnel [4] zu berücksichtigen, welche hinterfragt werden können:

- Abschnitt 7.1.1: *Stockender Verkehr oder Stau ist nur einzubeziehen, falls regelmässig, d.h. während mehr als 50 Stunden pro Jahr, mit diesen Zuständen gerechnet werden muss.*
- Abschnitt 7.2.3.2: *Der Bestimmung der Staulänge vor dem Ereignisort ist der MSV zugrunde zu legen.*

- Abschnitt 7.2.3.2: *Darüber hinaus ist bei Tunneln mit Richtungsverkehr und grosser Stauhäufigkeit (RV 2) von einer Staulänge von mindestens 3/4 der Tunnellänge auszugehen*

Im Falle von Gegenverkehr sowie bei Stau in Richtungsverkehr muss die Längsgeschwindigkeit beim Brand geregelt werden, sodass sich eine niedrige Strömungsgeschwindigkeit einstellt und damit günstigste Bedingungen für Selbstrettung entstehen. Diese Anforderung ist grundsätzlich korrekt, lässt sich aber nicht in allen Tunneln realisieren. Insbesondere bei steilen, kürzeren Tunneln stellt dies eine Schwierigkeit dar; da nicht ausreichend schnell reagiert werden kann und weil es schwierig ist sowohl Strömungsmessgeräte wie auch Strahlventilatoren an geeigneten Standorten im Tunnel unterzubringen.

Bei einer allfälligen Überarbeitung sollte womöglich auch folgende Anforderung der Richtlinie ASTRA 13001 [3] optimiert werden:

- Abschnitt 7.2.4.3: Der Beginn des Abluftkanals darf nicht weiter als 300 m vom Portal entfernt sein.

#### *Systemwahl - möglicher alternativer Ansatz*

Mit der Richtlinie (ASTRA 19004 [17] ) und der zugehörigen Methodik (ASTRA 89005) [92] liegt eine klare Vorgehensweise zur Durchführung der Risikoanalyse vor. Dies beinhaltet auch Einflussfaktoren wie Abstände zwischen Notausgängen sowie Ein- und Ausfahrten im Tunnel. Bei der Entwicklung des Lüftungsmodells wurden jedoch Vereinfachungen getroffen, welche für die Beurteilung von existierenden Tunneln zulässig sind, aber möglicherweise nicht immer für die Wahl des Lüftungssystems eines Neubauprojektes herangezogen werden können. Daher soll das Lüftungsmodell der Risikoanalyse verfeinert werden. Dabei soll weiterhin die Unterscheidung mit und ohne Regelung der Längsgeschwindigkeit vorhanden sein.

Die Wahl des Lüftungssystems soll unter Berücksichtigung der Abstände der Notausgänge mittels Szenarioanalysen aufgrund in der Richtlinie vordefinierten Parameter getroffen werden, welche sowohl die Verkehrsszenarien wie auch den Brandverlauf inklusive Schadstoffproduktion und Branddetektion abdeckt. Die Branddetektion und die daraus folgende Tunnelsperre soll auch festgelegt und in der Gesamtplanung der BSA-Anlagen sichergestellt werden. Für den Fall, dass Verkehrsteilnehmer sich im Rauch befinden, sollen Fluchtwegberechnungen mit fest definierten Rahmenbedingungen (Anzahl Personen pro Fahrzeug, Fluchtgeschwindigkeit aufgrund der Schadstoffe (Dosis) und Temperatur) durchgeführt werden. Szenarien mit suboptimaler bzw. sogar ohne Nutzung der Notausgänge sollen dabei ebenfalls in Betracht gezogen werden. Für Tunnel ohne Verzweigungen können und sollen solche Berechnung in einem deterministischen Verfahren mit ein-dimensionalen Berechnungswerkzeugen erfolgen und somit sicherstellen, dass die Ergebnisse unabhängig vom Projektverfasser zu gleichen Ergebnissen führen. Nur bei Bauwerken mit Verzweigungen und grösseren Tunnelquerschnitten, welche z.B. lokal bei Ein- und Ausfahrten vorkommen können, beziehungsweise Tunnel mit sehr grossen Längsneigungen sind drei-dimensionale Berechnungen zweckmässig.

## **Dimensionierung**

### *Bemessungsbrand*

Für den Ereignisfall muss die Tunnellüftung für einen Kaltbrand (0 MW) sowie einen 30 MW Brand ausgelegt werden. Es stellt sich die Frage, ob die maximale Brandleistung erhöht werden soll. In Österreich muss unter gewissen Umständen 50 MW angenommen werden. In Deutschland [106] wird die Leistung des Bemessungsbrands sowie die entsprechende Rauchgasmenge aufgrund der Anzahl Lastwagenkilometer pro Tag und Tunnelröhre auf 30, 50 oder 100 MW festgelegt. Bei 100 MW besteht die Möglichkeit

mittels einer Risikoanalyse doch einen niedrigeren Bemessungsbrand anzusetzen. In Frankreich sind sogar (bei hohem Gefahrgutanteil) Brandlasten bis 200 MW abzudecken.

Für die Dimensionierung soll jedoch nicht nur die maximale Brandleistung betrachtet und festgelegt werden, sondern auch der Brandverlauf. Damit lässt sich sicherstellen, dass die freigesetzte Energiemenge sich im realistischen Rahmen verhält, [95] , [96] und [120] .

Kann mit ausreichender Wahrscheinlichkeit eine grössere Brandleistung als der Bemessungsbrand entstehen, sollten die Konsequenzen mittels einer Sensibilitätsanalyse ermittelt werden. Für die Erstellung der Sicherheitsdokumentation in Frankreich [115] muss unabhängig von der Brandleistung des Dimensionierungsbrandes, die Auswirkungen eines 200 MW Brandes analysiert werden.

Aufgrund Analysen verschiedener Projekte in Schweden lässt sich eine Faustregel für die Wirkung einer ortsfesten Brandbekämpfungsanlage (Nebel- oder «Deluge»-Anlage) aufstellen, welche jedoch zu prüfen ist. Die Faustregel lautet: Falls der Tunnel mit einer korrekt dimensionierten ortsfesten Brandbekämpfungsanlage ausgestattet ist und diese zeitgerecht (z.B. maximum 3 Minuten nachdem die Brandleistung 5 MW erreicht hat) aktiviert wird, kann die maximale Brandleistung um 50 % reduziert werden [117] siehe auch PIARC (2016) [121] .

#### *Dimensionierungsströmungsgeschwindigkeiten für die Ereignislüftung*

ASTRA 13001 [3] gibt Längsströmungen im Fahrraum vor, welche im Ereignisfall zu erreichen sind. Beim fließenden Richtungsverkehr muss eine Längsgeschwindigkeit von 3 m/s erreicht werden. In einem typischen zweispurigen Strassentunnel wäre jedoch eine Längsgeschwindigkeit von typischerweise 2.2 m/s ausreichend, um zu vermeiden, dass sich die Rauchgasse gegen der Strömungsrichtung ausbreiten. Es lässt sich vermuten, dass der geforderte höhere Wert absichtlich vorgeschrieben ist, um u.a. Dimensionierungsmarge für die Regelung zu haben.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob die von Beyer et al [116] vorgeschlagene kritische Geschwindigkeit von 3 m/s auch bei höheren Brandlasten ausreichend ist. Die Bestimmung der kritischen Geschwindigkeit beschäftigen seit längerem die australischen Behörden sowie der Richtlinie-Ausschuss NFPA 502 [118] . Falls die Lüftungsanlage ausreichend schnell aktiviert wird, sodass eine Marge zur kritischen Geschwindigkeit von kleinerer Bedeutung ist, mag es somit sein, dass die 3 m/s als Dimensionierungswert auch bei höheren maximale Brandlasten als 30 MW ausreichen würde.

#### *Weitere Vorgaben zur Dimensionierung*

In der Richtlinie ASTRA 13001 [3] wird die Dimensionierung nicht mit einem pauschalen Sicherheitsfaktor versehen. Demzufolge müssen die Dimensionierungsvorgaben sicherstellen, dass ein realistischer aber naturgemäss seltener Dimensionierungsfall abgedeckt ist. Für die meisten Angaben ist dies der Fall, aber in gewissen Bereichen scheint Nachholbedarf gegeben zu sein:

- Lediglich der Jahresmittelwert des Staudruckes durch den Wind wird vorgeschrieben. Andere Richtlinie sehen 95 %- bzw. 98 %-Perzentile vor.
- Zurzeit werden nur die zwei Fahrzeugkategorien Personenwagen und Lastwagen betrachtet. Andere Richtlinien (z.B. PIARC (2019) [119] ) haben mittlerweile diese zwei Kategorien um leichte Nutzfahrzeuge ergänzt, was insbesondere für die Berechnung des Strömungswiderstandes bei der Dimensionierung im Brandfall von Bedeutung sein könnte.
- Der angegebene Reibungskoeffizient  $\lambda = 0.015$  scheint aufgrund der Erhöhung der Einbauten überholt zu sein und sollte wahrscheinlich durch  $\lambda = 0.020$  ersetzt werden.
- Zudem könnten womöglich folgende Anforderungen in ASTRA 13001 [3] optimiert werden:
  - Abschnitt 7.1.4: *Zur Berücksichtigung instationärer Effekte wird für die Dimensionierung die minimale Frischluftmenge  $Q_{FL,min}$  in Abhängigkeit des Fahrraumquerschnitts  $A_{Tunnel}$  gefordert.*

- $Q_{FL,min} = A_{Tunnel} \cdot 1.5 \text{ m/s}$  [m<sup>3</sup>/s] Gl. 7.7
- Zudem soll eine Längslüftung so ausgelegt werden, dass eine Luftwechselzeit von 20 Minuten erreicht werden kann.
- Abschnitt 7.2.4.1: Die Anforderungen gelten auch bei der Sanierung bestehender Tunnel. Höchste Priorität haben die Absaugmenge am Brandort pro 200 m, die Kontrollierbarkeit der Längsströmung sowie die Erfüllung der Anforderungen bez. Ausfall eines Abluftventilators.
- Abschnitt 7.2.4.2: Für Tunnel mit Richtungsverkehr und geringer Stauhäufigkeit (RV 1) genügt in aller Regel ein Zuschlag von  $1/10 \times Q_{ABL,min}$ , währenddem für Tunnel mit Richtungsverkehr und grosser Stauhäufigkeit (RV 2) und für Tunnel mit Gegenverkehr (GV) ein Zuschlag von  $1/3 \times Q_{ABL,min}$  erforderlich ist.
- Abschnitt 7.2.4.2: Für den Sonderfall der Auslegung der Abluftventilatoren auf 400°C, sind diese auf die Luftmenge von  $1.3 \times Q_{Ventilator}$  auszulegen.
- Abschnitt 7.6: In den Betriebsräumen sind die vorgegebenen Arbeitsplatzbedingungen bezüglich Luftqualität, Lufttemperatur und Luftfeuchte zu gewährleisten sowie die Einrichtungen vor Verschmutzung und unzulässigen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten zu schützen. Zu diesem Zweck ist in der Regel eine eigene Lüftungstechnische Anlage, die einen Überdruck gegenüber dem Fahrraum erzeugt, erforderlich.

## Ausstattung

Brandt (2021) [122] schlägt vor, dass die Lüftungsanlage stets den Anforderungen der Dimensionierung gerecht werden muss. Demzufolge ist ausreichend Anlagenredundanz zu installieren, sodass dies auch bei Ausfällen von Einzelkomponenten möglich ist. Ist dies nicht der Fall, muss der Betrieb des Tunnels angepasst werden, sodass das erforderliche Sicherheitsniveau erreicht wird. Diesbezüglich ist einen Abgleich mit der Dokumentation ASTRA 86053 «Minimale Anforderungen an den Betrieb – Strassentunnel» [104] erforderlich; da die Auswirkung der dort festgehaltenen Festlegungen nicht in den anderen Richtlinien berücksichtigt worden ist. Es scheint, dass alle Richtlinien mit ASTRA 86053 abgestimmt werden müssen bzw. ASTRA 86053 aufgrund eventueller Anpassungen anderer Richtlinien revidiert werden soll.

Zudem scheinen die folgenden Anforderungen der Richtlinie ASTRA 13001 [3] Optimierungspotential zu haben:

1. Abschnitt 7.2.4.3: Für die Festlegung der Klappenfläche ist von einer vertikalen Geschwindigkeitskomponente in der Klappe von 15 m/s bezogen auf Umgebungstemperatur als Mittel über alle im Bereich des Ereignisses geöffneten Klappen auszugehen.
2. Abschnitt 8.3.2: Die Funktion der Strahlventilatoren ist für eine Temperatur von 250°C während 120 Minuten zu gewährleisten. (siehe Abschnitt 6.3.1).

## Handlungsempfehlungen

- Es wird vorgeschlagen, das Lüftungsmodell gemäss der Methodik der Risikoanalyse (ASTRA 89005 [92]) neu aufzustellen, sodass dies für die Wahl des Lüftungssystems zur Anwendung kommt. Alle in ASTRA 89005 betrachtete Lüftungssysteme sollen im verfeinerten Modell vorkommen.
- Die Systemwahl soll mittels Szenarioanalysen aufgrund fester Kriterien (siehe Abschnitt Systemwahl - Verbesserungsvorschlag oben) bestätigt werden.
- Die Maximalleistung des Bemessungsbrandes soll überarbeitet werden und nicht stets 30 MW betragen. Dabei soll festgehalten werden, ob die maximale Brandleistung lediglich in einer Sensitivitätsanalyse einfließen soll; oder direkt für die Dimensionierung verwendet werden.

- Gewisse Dimensionierungskriterien u.a. Bemessungsbrand, Dimensionierungsströmungsgeschwindigkeit, Winddruck, Fahrzeugwiderstand, Tunnelreibungskoeffizient sollen vertieft analysiert und gegebenenfalls neu festgelegt werden.
- Es wird vorgeschlagen, dass die Dimensionierung den minimalen Betriebsbedingungen entspricht, was bedeutet, dass entweder Anlagenredundanz vorzusehen ist oder eine zusätzliche Dimensionierung für einen festgelegten, reduzierten Betrieb vorgenommen werden muss. Die Ausstattung muss mit den Festlegungen in ASTRA 86053 «*Minimale Anforderungen an den Betrieb – Strassentunnel*» im Einklang gebracht werden bzw. neue konkretere Anforderungen für die Tunnellüftung entwickelt werden.

## 7.1.4 Weitere Anforderungen mit Optimierungspotential

### Einleitung

Folgende Anforderungen, welche im Rahmen dieses Projektes nicht vertiefter analysiert werden konnten, wurden auch als optimierungswürdig eingestuft:

### Anforderungen

- TM 23 001-11315, *Funktionen der Lüftungssteuerung [41]* :
  - Abschnitt 2.5.1: *Die Lüftungsanlage ist abschnittsweise und röhrengetrennt aufzubauen.*
    - Ein gleichzeitiges Ereignis in beiden Tunnelröhren ist unwahrscheinlich. Die Röhrentrennung ist jedoch insbesondere für eine Generalsanierung der Bauwerke sinnvoll, sodass stets eine Tunnelröhre zur Verfügung steht. Die Notwendigkeit einer strikten Röhrentrennung soll anhand einer Kosten/Nutzen Betrachtung festgelegt werden.
- TM 23 001-11318, *Verfügbarkeit [42]* :
  - Abschnitt 2.3:
  - Lokalsteuerung Abluftventilator
    - *Jeder Abluftventilator hat eine Lokalsteuerung.*
      - Es wäre denkbar sich mit einer Lokalsteuerung pro Zentrale pro Röhre zu begnügen. Deren Verfügbarkeit hat jedoch der Funktion der Abluftventilatoren Rechnung zu tragen.
  - Lokalsteuerung Strahlventilator
    - *Jede Strahlventilatorgruppe hat eine Lokalsteuerung.*
      - Es wäre denkbar sich an deren Stromversorgung zu orientieren und die gleiche Lokalsteuerung für alle Strahlventilatoren einer Tunnelröhre, welche von der gleichen Elektrozentrale gespeist wird, zu verwenden. Die Verfügbarkeit dieser Lokalsteuerung hat im Gegenzug an die Relevanz der Strahlventilatoren im Ereignisfall angepasst zu sein.
- TM 23 001-11340, *Abluftsystem [46]* :
  - Abschnitt 2.1.2: *Ein Abluftventilator verfügt mindestens über folgende Überwachungseinrichtungen:*
    - *Luftmenge*
    - *Förderdruck*
    - *Laufschaufelwinkel (bei Ventilatoren mit im Lauf verstellbaren Laufschaufeln)*
    - *Drehzahl*
    - *Drehrichtungsüberwachung*
    - *Abrissüberwachung*
    - *Schwingungsüberwachung Ventilatorgehäuse*
    - *Temperaturüberwachung Lager*
    - *Temperaturüberwachung der Ständerwicklungen für jede Phase (1 x PT100 Betrieb und 1 x PT100 Reserve)*
    - *Anschlussmöglichkeit eines Stossimpulsmessgerätes von aussen, festmontierter Aufnehmer pro Lager*

- Für einfache bzw. wenig sicherheitsrelevante Anlagen könnten reduzierte Anforderungen an die Überwachungseinrichtungen in Erwägung gezogen werden.

## 7.2 Fachbereich 4 - Signalisation

Folgende Anforderungen, welche im Rahmen dieses Projektes nicht vertiefter analysiert werden konnten, wurden auch als optimierungswürdig eingestuft:

**Anpassungen folgender Anforderungen können zur Vereinfachung der Hardware und Systemstruktur führen:**

- TM 23 001-11412, Lokalsteuerung [62] :
  - Abschnitt 2.1.2: *Auf offener Strecke sind die folgenden Installations-Varianten möglich, abhängig vom Ausrüstungsgrad der offenen Strecke gemäss RiLi 15003 Verkehrsmanagement in der Schweiz (VM-CH):*
    - *Bei Ausrüstungsgrad MINIMAL oder NIEDRIG:*
      - 1.) *Lokalsteuerung in grosser Betonkabine oder in Elektrostützpunkt für mehrere Querschnitte / nicht Fahrbahn getrennt.*
      - *Bei Ausrüstungsgrad MITTEL oder HOCH*
        - 2.) *Lokalsteuerung in Kabine für ein bis mehrere Querschnitte / Fahrbahn getrennt.*
        - 3.) *Lokalsteuerung in Strecken-Modulkabine für einen Querschnitt / Fahrbahn getrennt.*
    - *Zusätzlich gilt:*
      - *Die Lokalsteuerung und die Signale sind an dem Normalnetz angeschlossen.*
      - *Das Normalnetz und die LWL-Erschliessung sind bei kleinen Distanzen sternförmig auszuführen.*
      - *Signale sind an die Notstromversorgung anzuschliessen, wenn bei deren Ausfall eine unzulässige Signalisation entsteht, zum Beispiel in Vorzonen bei Fahrstreifenlichtsignalen im Gegenverkehr.*

## 7.3 Fachbereich 5 - Überwachungsanlagen

Folgende Anforderungen, welche im Rahmen dieses Projektes nicht vertiefter analysiert werden konnten, wurden auch als optimierungswürdig eingestuft:

### 7.3.1 Systemvereinfachungen als Anpassungsmotivation

- TM 23 001-11510, Brandmeldeanlage Tunnel [62] :
  - Abschnitt 2.1.2:
    - *Allgemeine Sensorspezifikationen:*
      - *Die ausgewählte Technologie muss Stand der Technik sein:*
      - *Die Sensoren bzw. Sensorgruppen können unterdrückt/abgeschaltet werden ohne Einfluss auf die Systemfunktion.*
      - *Die verschiedenen Parameter der Sensoren werden projektspezifisch programmiert.*
      - *Der Ausfall oder die Verschmutzung (fehlerhafte Werte) eines Sensors muss von der Brandmeldezentrale erkannt und als Störung übermittelt werden.*
    - *Betriebliche Anforderungen:*
      - *Sensoren mit einem Wartungsintervall < 1 Jahr sind nicht zulässig.*
      - *Die nötigen regelmässigen Prüfungen & Kalibrierungen der Sensoren müssen durch den Lieferanten bei der Offertstellung dargelegt werden.*

- *Betriebliche Unterbrüche müssen innert 72 Stunden behoben werden. Bei längeren Unterbrüchen sind besondere Vorkehrungen zu treffen.*
- *Es ist auf einfache Montage/Demontage der Geräte im Tunnel zu achten. Bei Störungen/Beschädigungen muss ein einfaches Ersetzen gewährleistet sein.*
- *Die erforderlichen Unterhaltsarbeiten werden ausschliesslich während den ordentlichen Tunnelreinigungen ausgeführt.*
- **Abschnitt 2.1.3: Linienförmiger Wärmemelder:**
  - *Bei der Montage des linienförmigen Wärmemelders ist sicherzustellen, dass er durch Fahrzeuge nicht heruntergerissen werden kann und bei Ereignissen dürfen keine Kabelteile herunterhängen. Bei exponierten Stellen sind verstärkte Kabel einzusetzen.*
  - *Im Falle eines Kabeldefekts muss die Messung auf beiden Seiten weiter funktionieren.*
- **TM 23 001-11590, PUN Freigabe System [62] :**
  - **Abschnitt 4.1:**
    - *Für eine lückenlose Abdeckung des Pannenstreifens müssen die Kameras im Abstand von ca. 250-300m entlang des Pannenstreifens montiert werden.*
    - *Die Erschütterungen z.B. durch vorbeifahrende Lastwagen sind bei Signalbrücken zu gross. Deshalb sind sie als Montagepunkt für Kameras mit Detektion nicht geeignet*
    - *Für die Stabilität der Masten für PUN-Kameras mit Detektion, gilt folgende Vorgabe: Die sekantielle\* Verdrehung am Mastzopf muss kleiner als 0,02° bei einer Windgeschwindigkeit von 100km/h liegen (d.h.: Der Mast darf sich bei einer Windgeschwindigkeit von 100km/h maximal um 0.02° verdrehen).*

### 7.3.2 Längere Wartungsintervalle als Anpassungsmotivation

- **ASTRA 13004, Branddetektion in Strassentunneln [5] :**
  - **Abschnitt 3.2.6. Die Geräte im Tunnel müssen einfach und ohne Spezialwerkzeuge ersetzt werden können (SIA 197/2). Eine Wartung der Sensoren und Geräte der Detektionseinrichtung sollte höchstens 1 Mal pro Jahr erforderlich sein.**

### 7.3.3 Anforderungen, welche teilweise durch andere Systeme abgedeckt sind

- **ASTRA 13005, Videoanlagen [6] :**
  - **Abschnitt 7.2.2: Das Bildauswertungssystem erlaubt die Erfassung folgender Messwerte innerhalb des Abschnittes:**
    - *Zeit der Durchfahrt [hh:mm:ss];*
    - *Geschwindigkeit [km/h];*
    - *Fahrzeugart (PW-ähnliche Fahrzeuge, LKW-ähnliche Fahrzeuge).*
  - Das Bildauswertungssystem erlaubt die Erfassung folgender Messdaten (Aggregation der Messwerte) innerhalb des Abschnittes:*
    - *Verkehrsstärke [Fz/h];*
    - *Verkehrsdichte [Fz/km].*

### 7.3.4 Anforderung als Kleinspannung (DC) zu optimieren

- **ASTRA 13005, Videoanlagen [6] :** Die Einspeisung der Kameras in den Tunneln erfolgt vor Ort übers Notnetz 230 VAC. Die Einspeisung der Kameras auf offenen Strecken erfolgt vor Ort übers Normalnetz 230 VAC.

## 7.4 Fachbereich 6 - Kommunikation & Leittechnik

Gewisse Anforderungen beziehungsweise Anregungen konnten im Rahmen dieses Projektes nicht vertieft analysiert werden und werden demzufolge in diesem Abschnitt in einer übergeordneten Art beschrieben.

### 7.4.1 Vorschlag zu Untersuchung der Einführung von SLASS Lautsprechersysteme

#### Einleitung

Verhaltensstudien und Erfahrung von realen Tunnelbränden [94] haben gezeigt, dass viele Verkehrsteilnehmer das Gefahrenpotential unterschätzen und sich kaum oder nur zögerlich in Richtung der Notausgänge bewegen. Erschwerend kommt hinzu, dass oft nur die Tunnelportale als Notausgänge wahrgenommen werden. Die Wirkung der Selbstrettung muss somit in Frage gestellt werden.

Radiomitteilungen zielen darauf hin, auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer einzuwirken, aber einerseits werden sie womöglich nicht gehört und andererseits wirken sie oft wie allgemeine Empfehlungen.

Eine Direktansprache ist die effizienteste Art das Verhalten zu beeinflussen. In Deutschland sind deshalb seit Jahren Lautsprechersysteme in Tunnel im Einsatz sowie auch in Pannengebieten und bei den Vorportalen in Österreich.

Die Verständlichkeit der Durchsagen mittels konventioneller Lautsprecher ist jedoch derart schlecht, dass deren Wirkung teilweise darauf reduziert wird, dass der Verkehrsteilnehmer wahrnimmt, dass etwas im Gange ist.

#### Beurteilung der SLASS Lautsprechersysteme

In Deutschland wird seit Jahren auf dem Lautsprechersystem mit der Funktionalität SLASS gesetzt, siehe [94], [96] und [97]. Dabei werden die einzelnen Lautsprecher so gesteuert, dass weder Hallen- noch Echoeffekte entstehen. Ein Mitglied der Forschungsstelle hat die Anlage im Elbtunnel 2014 begutachtet ([94]-[97]) und kam zum Schluss, dass auch unter Verkehr und im Fahrzeug mit geschlossenen Fenstern volle Verständlichkeit gegeben war.



Abb. 22 SLASS Lautsprecher im Elbtunnel (2014)

Die Erfahrungen waren derart gut, dass die Behörden in Hamburg überlegten, auf die Einsprache über Radio ganz zu verzichten.

## Handlungsempfehlung

Es soll überlegt werden, SLASS-Lautsprechersystem in der Schweiz einzuführen, sodass die Warte den Verkehrsteilnehmer direkt bzw. mittels Textkonserven ansprechen können. Damit kann das Ausmass von Ereignissen reduziert werden.

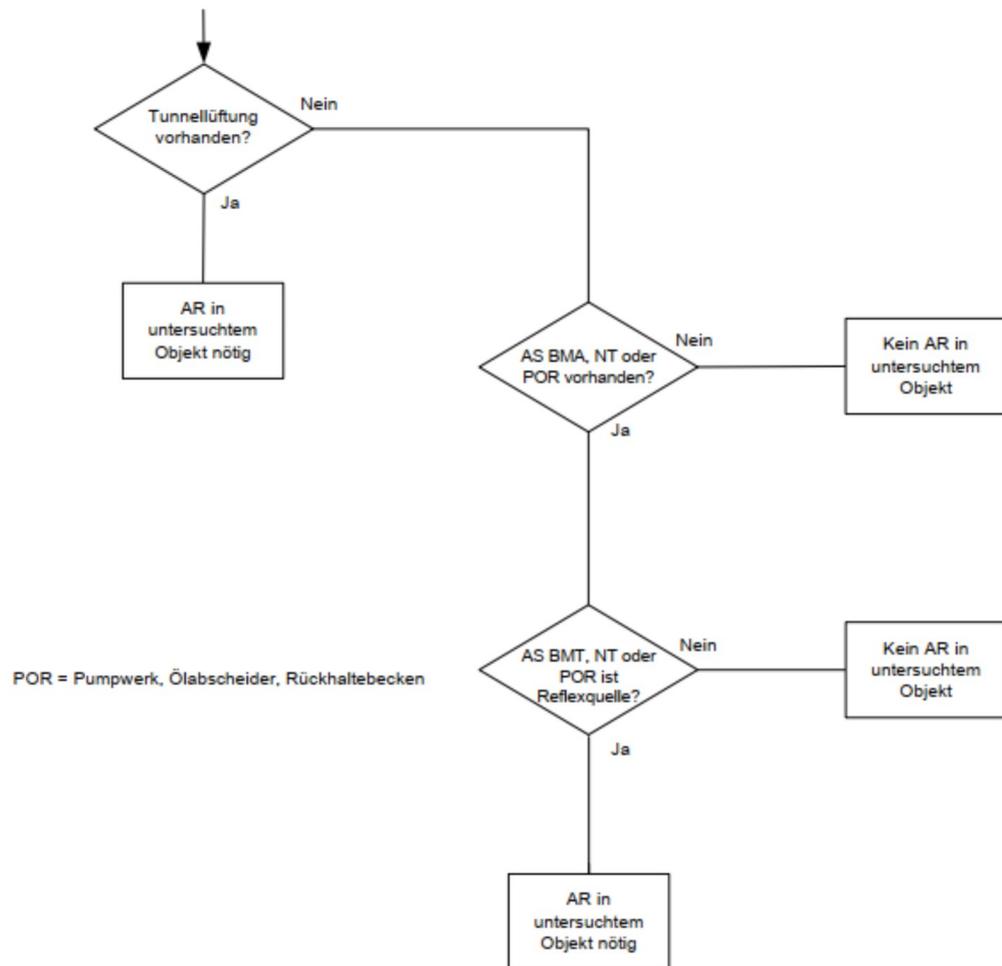
### 7.4.2 Vorschlag zu LeanTech-Projekt aus Sicht des Betreibers

Es bietet sich an, den Bereich Leittechnik (FB6) aus Sicht des Betreibers (Operator und Unterhaltspersonal) zu analysieren. In dieser weiterführenden Arbeit soll somit die ASTRA Dokumentation 86052 (Betriebskonzept Strassentunnel», Leitfaden Operative Sicherheit Betrieb) [130] verwertet werden. Dabei müssen konkrete Handlungsempfehlungen zu Fragestellungen wie Fehlalarme, minimale Betriebsbedingungen für den vollen und reduzierten Betrieb ausgearbeitet werden. Dabei soll eine automatische Auswertung erfolgen, sodass bekannt wird, welche Systeme die meisten Störungen hervorrufen, sodass diese durch zuverlässigere Systeme ersetzt werden können. Es soll auch in Erwägung gezogen werden, mehr Personal in der Betriebsführung zu haben und dafür auf gewisse technische Anlagen zu verzichten.

### 7.4.3 Auflistung Anforderungen mit Optimierung Potential

**Anpassungen folgender Anforderungen können zur Systemvereinfachungen führen:**

- Anregung internationaler Experten:
  - 13 Erlauben, dass Lokalsteuerungen pro Funktion gruppiert werden und nicht pro Ventilator vorgesehen werden müssen.
  - 15 Anzahl Niveaus des Leitsystems optimieren (reduzieren).<sup>7</sup>
  - 19 Abgesehen von Anlagen zur Tunnelsperrung müssen verkehrstechnische Anlagen nicht redundant ausgeführt werden, da sie im eigentlichen Sinn keine sicherheitstechnischen Einrichtungen sind.<sup>7</sup>
- ASTRA 13031, Systemarchitektur Leit- und Steuersysteme der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen [4] :
  - Abschnitt 3.8.6: Anlagenüberwachung und -steuerung:
    - Die Fachapplikationen können die Anlagen via AR oder regionale Elemente über definierte Datenpunktschnittstellen steuern sowie Informationen und Zustände abrufen. Die Steuerungslogik der Anlagen ist auf den Anlagensteuerungen implementiert.
    - Direkte Eingriffe in die Anlagen können aus der Management-Ebene über die Bedienoberfläche des Abschnittsrechners vorgenommen werden.
    - Die Management-Ebene legt beim Start fest, welche der bereitgestellten Meldungen (Störungen, Alarmer, etc.) sie benötigt. Die Transportschicht garantiert anschliessend laufend ihre Auslieferung.
    - Die im Rahmen der Anlagen- und Abschnittsrechnerüberwachung anfallenden Meldungen (Störungen, Alarmer, Messwerte usw.) werden von der Management-Ebene geeignet aufbereitet und dem Benutzer rollengerecht angezeigt. Ebenso stellt die Management-Ebene geeignete Funktionen zur Weiterverarbeitung der Meldungen zur Verfügung (Quittierung, Archivierung, usw.).
  - Abschnitt 5.3.2: Die Ausrüstung eines Tunnels entscheidet darüber, ob dieser Tunnel mit einem Abschnittsrechner ausgerüstet wird. Es gilt folgender Prozess (siehe Abb. 23), wenn im Rahmen einer Sanierung die BSA eines Tunnels verändert (zu- oder abgebaut) wird:



**Abb. 24** Prozessdiagramm: *Entscheid Notwendigkeit AR.* [4]

- TM 23 001-11620, *Gliederung Leittechnik* [62] :
  - Abschnitt 4.2: *In der Regel ist der Abschnittsrechner redundant auszuführen, insbesondere wenn es sich um ein Objekt mit hohem DTV handelt, oder Tunnelreflexe über den AR vorhanden sind.*
  - Abschnitt 5.2.
    - *Energieversorgung:*
      - *Die AS überwacht und steuert alle Teilanlagen der Energieversorgung eines Tunnels.*
      - *In kleinen Objekten kann die Energieversorgung durch die AS Diversanlage überwacht und gesteuert werden.*
    - *Beleuchtung:*
      - *Die AS überwacht und steuert alle Teilanlagen der Beleuchtung eines Tunnels.*
      - *In kleinen Objekten kann die Beleuchtung durch die AS Diversanlage überwacht und gesteuert werden.*
    - *Lüftung:*
      - *Die AS überwacht und steuert alle Teilanlagen der Lüftung für den Fahrraum eines Tunnels*
    - *Signalisation:*
      - *Die AS überwacht und steuert alle Teilanlagen der Signalisation inkl. des Mittelstreifenüberfahrtsystems.*
      - *In kleinen Objekten und wenn keine Verkehrsmanagementfunktionen vorhanden sind, kann die Signalisation durch die AS Diversanlage überwacht und gesteuert werden.*

- *Brandmeldeanlage Tunnel:*
  - *Die AS überwacht das Brandmeldekabel und die Rauchmelder eines Tunnels.*
  - *In kleinen Objekten ohne Lüftung kann die Brandmeldeanlage Tunnel durch die AS Diversanlage überwacht und gesteuert werden.*
- *Videoanlage (VTV):*
  - *Bei Tunnelobjekten können mehrere Abschnitte durch die gleiche AS überwacht werden. Es muss aber gewährleistet sein, dass die Tunnelreflexe innerhalb des Abschnittes übermittelt werden können.*
  - *Bei Tunnelobjekten werden die Ereignisdetektion und die Bildspeicherung von der AS Videoanlage überwacht und gesteuert. Die AS kann in der Ereignisdetektion oder in der Bildspeicherung untergebracht sein.*
  - *Auf der offenen Strecke ist eine AS nur notwendig, wenn der entsprechende Streckenabschnitt mit einer temporären Pannestreifenumnutzung (PUN) ausgerüstet ist. In diesem Fall sind die Ereignisdetektion und die Bildspeicherung Bestandteil der AS Videoanlage.*
- *TM 23 001-11622, Applikationen der Steuer- und Leittechnik [62] , Abschnitt 2.2:*
  - *Betriebsleitebene (4):*
    - *Kein Betriebsarten-Wahlschalter*
    - *Entsprechend den Bedienberechtigungen aufgrund des Benutzer(gruppen)-spezifischen Logins können die Betriebszustände (Szenarien) frei gewählt werden.*
  - *Prozessleitebene (3):*
    - *Keine Stellung „Wartung“*
    - *Die Stellung „Lokal“ wirkt auf den ganzen Einflussbereich des Abschnittrechners.*
    - *In der Stellung „Lokal“*
      - *können, entsprechend den Bedienberechtigungen aufgrund des Benutzer(gruppen)-spezifischen Logins, die Betriebszustände (Szenarien) frei gewählt werden.*
      - *ist eine Bedienung über die Betriebsleitreechner nicht mehr möglich.*
      - *laufen die Tunnelreflexe nach wie vor weitgehend direkt und ohne Benutzereingriffe ab.*
    - *Die aktuellen Betriebsdaten werden unabhängig von der gewählten Betriebsart immer hochgemeldet.*
  - *Steuerebene (2 / 1):*
    - *Die Stellungen „Lokal“ und „Wartung“ wirken nur auf diese Anlage oder Teilanlage, aber auf den ganzen Einflussbereich des betroffenen Rechners.*
    - *In der Stellung „Lokal“*
      - *können, entsprechend den Bedienberechtigungen aufgrund des Benutzer(gruppen)-spezifischen Logins, die Betriebszustände (Szenarien) frei gewählt werden.*
      - *ist eine Bedienung über die höheren Ebenen (Betriebsleitreechner, Abschnittsrechner und Anlagesteuerung (im Fall Lokalbetrieb einer Lokalsteuerung) nicht mehr möglich.*
      - *laufen die Tunnelreflexe, die von dieser Anlage- oder Lokalsteuerung ausgehen oder in dieser Anlage- oder Lokalsteuerung wirken, nicht mehr oder nicht mehr vollständig (im Fall Lokalbetrieb einer Lokalsteuerung) ab.*
      - *werden die aktuellen Betriebsdaten immer hochgemeldet.*

- *In der Stellung „Wartung“*
  - *können, entsprechend den Bedienberechtigungen aufgrund des Benutzer(gruppen)-spezifischen Logins, sämtliche Aktoren grundsätzlich frei bedient werden.*
  - *ist eine Bedienung über die höheren Ebenen (Betriebsleitreechner, Abschnittsrechner und Anlagesteuerung (im Fall Lokalbetrieb einer Lokalsteuerung) nicht mehr möglich.*
  - *wirken nur noch die Verriegelungen, die zur Verhinderung von Gefahren für Personen, Sachen und Umwelt zwingend notwendig sind.*
  - *werden die aktuellen Betriebsdaten nicht mehr hochgemeldet.*
- *Unabhängig von der Betriebsart können zur Gewährleistung der wesentlichsten Anlagefunktionen bei Ausfällen von Rechnern oder Kommunikationskomponenten, die nicht durch die vorhandenen Redundanzen aufgefangen werden, Aktoren oder Aktorgruppen mittels Noteingriffsmöglichkeiten geschaltet werden. Diese Noteingriffsmöglichkeiten basieren auf Schaltern und nicht auf Rechnern.*
- *Feldebene (0):*
  - *Keine Unterscheidung von Betriebsarten*
  - *Die zur Verhinderung von Gefahren für Personen, Sachen und Umwelt vorhandenen mechanischen oder elektromechanischen Verriegelungen wirken immer.*
  - *Lokal bedienbare Aktoren (z.B. Frequenzumformer) dürfen grundsätzlich nur in Notfällen oder in der Betriebsart „Wartung“ vor Ort betätigt werden.*

## 7.5 Übergeordnete Optimierungsansätze

### 7.5.1 Rückblick auf dem Prozess zur Formulierung der Optimierungsvorschläge

Im Sinne der Umsetzbarkeit wurde absichtlich jede Detailanforderung analysiert, um auf Optimierungspotential zu schliessen. In gewissen Bereichen (z.B. Energieversorgung) wurde eine übergeordnete Philosophie vorangetrieben oder mehrere Systeme betrachtet (z.B. Branddetektion und Videoanlagen).

### 7.5.2 Tunnelklassen

Die Anforderungen mit Optimierungspotential wurden daraufhin untersucht, ob sie abhängig von Tunnellänge und/oder Verkehrsaufkommen sind. Bei der Detailanalyse wurde jedoch festgestellt, dass diese Parameter bereits ausreichend berücksichtigt waren. Es stellt sich trotzdem die Frage, ob es sich lohnen würde, Tunnelklassen mit unterschiedlichen Ausrüstungsbedarf zu definieren, wie es z.B. in Österreich und Norwegen bekannt ist. Als zusätzlicher Parameter soll dabei die erforderliche Verfügbarkeit der Infrastruktur im vollen und reduzierten Betrieb zu Grunde gelegt werden, siehe Abschnitt 7.5.3 unten.

### 7.5.3 Vorschlag zu weiteren LeanTech Optimierungsvorhaben

Mit dem gewählten Bottom-up-Ansatz wird auf Detailanforderungen fokussiert. Es bietet sich jetzt an, die hier vielen dargestellten Optimierungsmöglichkeiten in einem Top-down-Verfahren vertieft zu betrachten.

Grundsätzlich soll die Verfügbarkeit der Infrastruktur im Vordergrund stehen. Dazu sollten projektspezifisch Zielwerte festgelegt werden, so dass Infrastrukturen und somit auch deren Anlagen nachhaltig unter Berücksichtigung von RAMS-Analysen (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit) geplant werden können.

In einer solchen Analyse könnte zudem eine Kosten-Nutzenanalyse in einer gesamtgesellschaftlichen Betrachtungsweise angestellt werden, um die Kosteneffizienz der Risikominimierung zu optimieren. Womöglich wäre es vorteilhafter, die Sicherheit auf dem allgemeinen Strassennetz zu verbessern, anstatt in Tunneltechnik zu investieren.

Folgende Anregung der internationalen Experten soll Rechnung getragen werden: *Die Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der einzelnen Tunnelsysteme / Ausrüstungsteile, insbesondere wenn sie für die Sicherheit von wesentlicher Bedeutung sind, trägt dazu bei, den Tunnel für die Benutzer offen zu halten. Unabhängig davon, ob es sich um einen städtischen Tunnel handelt oder nicht, sind die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Auswirkungen einer noch so kurzen Tunnelsperre offensichtlich.*



## Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
AGT	Arbeitsgruppe Tunnelforschung <sup>1</sup>
AKS-CH	Anlagenkennzeichnungssystem Schweiz
AKUT	<i>acoustic tunnel monitoring</i>
AS	Anlagesteuerung
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (Österreich)
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAS	Bildauswertungssystem
BKN	Breitbandkommunikationsnetz
BMA	Brandmeldeanlage
BMA-T/BMT	Brandmeldeanlage Tunnel
BNL	Brandnotbeleuchtung
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA)
BSS	Bildspeichersystem
BZ	Betriebszustand (BZ) Bezeichnet den Signalisationszustand; beziehungsweise die Anzeigen auf mehreren zusammengehörenden Aktoren.
CO	Kohlenstoffmonoxid
DTV	Durchschnittlicher tägliche Verkehr
FLS	Fahrstreifenlichtsignal
GV	Gegenverkehr
LLMF	Lamp Lumen Maintenance Factor (Lampenlichtstromwartungsfaktor)
LMF	Luminaire Maintenance Factor (Leuchtenwartungsfaktor)
LSF	Lamp Survival Factor (Lampenüberlebensfaktor)
LWL	Lichtwellenleiter
MF	Maintenance Factor (Wartungsfaktor)
MÜLS	Mittelstreifenüberfahrtheitsystem
OLE	Optische Leiteinrichtung
OPzS	Ortsfeste Panzerplattenbatterie mit geschlossenem Gehäuse und flüssigem Elektrolyt
OPzV	Ortsfeste Panzerplattenbatterie mit geschlossenem Gehäuse und gelförmigem Elektrolyt oder Elektrolyt in getränkten Glasmatten
PUN	(temporäre) Pannestreifenumnutzung
QSK	Querschnittsteuerkasten
RAMS	Reliability (Zuverlässigkeit), Availability (Verfügbarkeit), Maintainability (Instandhaltbarkeit), Safety (Sicherheit)
RiLi	Richtlinie
RV	Richtungsverkehr
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (gelten in Österreich)
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SiBe	Sicherheitsbeauftragte
SiSto	Sicherheitsstollen

SLASS	<i>Synchronised Longitudinal Announcement Speaker System</i>
SN	Schweizer Norm (SN)
StrMa	Streckenmanager
TM	Technisches Merkblatt
ÜLS	Übergeordnetes Leitsystem
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
UVEK	Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VM-CH	Verkehrsmanagement in der Schweiz (VM-CH)
VMS	Video Management System
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
VTV	Videoanlage
WCS	Worst Case Szenario
WLK/WELK	Werkleitungskanal

# Literaturverzeichnis

## Bundesgesetze

---

## Verordnungen

---

## Bundesbeschlüsse

---

### Weisungen und Richtlinien des ASTRA

- [1] Bundesamt für Strassen ASTRA (2010), „**Sicherheitsanforderungen an Tunnel im Nationalstrassennetz**“, Weisungen ASTRA: 74001
- [2] Richtlinie 2004/54/EG betreffend der minimalen Sicherheitsanforderungen an Tunnel des Trans-Europäischen Strassennetzes, April 2004
- [3] Bundesamt für Strassen ASTRA (2008), „**Lüftung der Strassentunnel - Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung**“, Richtlinie ASTRA 13001, V2.03, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [4] Bundesamt für Strassen ASTRA (2008), „**Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln**“, Richtlinie ASTRA 13002, V1.06, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [5] Bundesamt für Strassen ASTRA (2007), „**Branddetektion in Strassentunneln**“, Richtlinie ASTRA 13004, V2.10, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [6] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012), „**Videoanlagen**“, Richtlinie ASTRA 13005, V2.10, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [7] Bundesamt für Strassen ASTRA (2009), „**Türen und Tore in Strassentunneln**“, Richtlinie ASTRA 13011, V1.05, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [8] Bundesamt für Strassen ASTRA (2014), „**AKS-CH**“, Richtlinie ASTRA 13013, V2.53, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [9] Bundesamt für Strassen ASTRA (2017), „**Beleuchtungsanlagen**“, Richtlinie ASTRA 13015, V1.11, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [10] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Kabelanlagen der Nationalstrassen**“, Richtlinie ASTRA 13022, V1.10, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [11] Bundesamt für Strassen ASTRA (2016), „**IT-Sicherheit Leit- und Steuersysteme der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen**“, Richtlinie ASTRA 13030, V1.20, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [12] Bundesamt für Strassen ASTRA (2016), „**Systemarchitektur Leit- und Steuersysteme der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen**“, Richtlinie ASTRA 13031, V1.70, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [13] Bundesamt für Strassen ASTRA (2017), „**IP-Netz BSA**“, Richtlinie ASTRA 13040, V1.00, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [14] Bundesamt für Strassen ASTRA (2016), „**Verkehrsmanagement auf Nationalstrassen (Kopfrichtlinie VM-NS)**“, Richtlinie ASTRA 15003, V2.01, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [15] Bundesamt für Strassen ASTRA (1999), „**Richtlinie Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen**“.
- [16] Bundesamt für Strassen ASTRA (2007), „**Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Tunneln**“, Richtlinie ASTRA 13010, V2.00b (Entwurf 26-09-2007).
- [17] Bundesamt für Strassen ASTRA (2014), „**Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen**“, Richtlinie ASTRA 19004, V1.10.
- [18] Bundesamt für Strassen ASTRA (2021), „**Steuerung der Lüftung**“, Richtlinie ASTRA 13003, V0.50 (Entwurf 2021-04-27).

### Normen

- [19] SN 505 197/2 Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), „**Projektierung Tunnel - Strassentunnel**“, Norm SIA 197/2. (Bemerkung März 2022: SIA 197/2 wird zurzeit überarbeitet)
- [20] SN 505 197 Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), „**Projektierung Tunnel - Grundlagen**“, Norm SIA 197.
- [21] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, „**Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau**“, Norm SIA 180.

### Fachhandbuch des ASTRA

- [22] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Energieversorgung**“, Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11100, V1.30.
- [23] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Leittechnik Energieversorgung**“, Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11110, V1.20.

- 
- [24] Bundesamt für Strassen ASTRA (2017), „**Mittelspannung (1 kV bis 20 kV)**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11130, V1.10.*
- 
- [25] Bundesamt für Strassen ASTRA (2015), „**Niederspannung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11140, V1.20.*
- 
- [26] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Kleinspannung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11150, V1.00.*
- 
- [27] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Notstrom**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11160, V1.30.*
- 
- [28] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Beleuchtung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11200, V1.10.*
- 
- [29] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Lichttechnische Vorgaben**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-111205, V1.10 (mittlerweile durch ASTRA Richtlinie 13015 ersetzt worden).*
- 
- [30] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Leittechnik Beleuchtungsanlage**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-111210, V1.20 (mittlerweile durch ASTRA Richtlinie 13015 ersetzt worden).*
- 
- [31] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Sensorik**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-111215, V1.20 (mittlerweile durch ASTRA Richtlinie 13015 ersetzt worden).*
- 
- [32] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Durchfahrtsbeleuchtung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-111220, V2.10 (mittlerweile durch ASTRA Richtlinie 13015 ersetzt worden).*
- 
- [33] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Adaptionsbeleuchtung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-111230, V2.10 (mittlerweile durch ASTRA Richtlinie 13015 ersetzt worden).*
- 
- [34] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Brandnotbeleuchtung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-111240, V2.10 (mittlerweile durch ASTRA Richtlinie 13015 ersetzt worden).*
- 
- [35] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Optische Leiteinrichtung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-111245, V1.30 (mittlerweile durch ASTRA Richtlinie 13015 ersetzt worden).*
- 
- [36] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Fluchtwegbeleuchtung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-111250, V2.20 (mittlerweile durch ASTRA Richtlinie 13015 ersetzt worden).*
- 
- [37] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Strassenbeleuchtung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-111260, V2.20.*
- 
- [38] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Verkabelung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11280, V1.00. (mittlerweile ersatzlos gelöscht)*
- 
- [39] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Lüftung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11300, V1.20.*
- 
- [40] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Leittechnik Lüftungsanlage**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11310, V1.20.*
- 
- [41] Bundesamt für Strassen ASTRA (2015), „**Funktionen der Lüftungssteuerung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11315, V2.00.*
- 
- [42] Bundesamt für Strassen ASTRA (2015), „**Verfügbarkeit**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11318, V2.00.*
- 
- [43] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Datenaustausch Lüftungs- / Brandmeldeanlage**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11319, V2.00.*
- 
- [44] Bundesamt für Strassen ASTRA (2015), „**Sensorik**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11320, V2.00.*
- 
- [45] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Längslüftung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11330, V1.10.*
-

- 
- [46] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011), „**Abluftsystem**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11340, V1.00.*
- 
- [47] Bundesamt für Strassen ASTRA (2009), „**Abluftklappen in der Zwischendecke**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11342, V1.00.*
- 
- [48] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**SISTO-Lüftung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11350, V1.10.*
- 
- [49] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Signalisation**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11400, V1.10.*
- 
- [50] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Leittechnik Signalisationsanlagen**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11410, V1.20.*
- 
- [51] Bundesamt für Strassen ASTRA (2015), „**Lokalsteuerung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11412, V1.10.*
- 
- [52] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Statische Signale**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11420, V1.10.*
- 
- [53] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Blinker, Ampel**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11430, V1.10.*
- 
- [54] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Fahrstreifenlichtsignal FLS**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11432, V1.20.*
- 
- [55] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Wechselsignal LED-Signal**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11433, V1.10.*
- 
- [56] Bundesamt für Strassen ASTRA (2016), „**Wechselsignal Prismenwechselsignal**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11434, V1.20.*
- 
- [57] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Verkehrszähler mit Induktionsschleifen**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11450, V1.30.*
- 
- [58] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Verkehrszähler mit Laserscanner**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11452, V1.00.*
- 
- [59] Bundesamt für Strassen ASTRA (2009), „**Unterflurbeleuchtung UFF**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11470, V1.00.*
- 
- [60] Bundesamt für Strassen ASTRA (2017), „**Mittelstreifenüberfahrleitsystem MÜLS**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11474, V2.00.*
- 
- [61] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Überwachungsanlagen**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11500, V1.01.*
- 
- [62] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Brandmeldeanlage Tunnel**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11510, V2.10.*
- 
- [63] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Diversanlage**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11530, V1.10.*
- 
- [64] Bundesamt für Strassen ASTRA (2017), „**PUN Freigabe System**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11590, V1.00.*
- 
- [65] Bundesamt für Strassen ASTRA (2017), „**PUN Systemarchitektur**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11591, V1.00.*
- 
- [66] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Kommunikation & Leittechnik**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11600, V1.10.*
- 
- [67] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Netzwerke**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11610, V1.20. (mittlerweile durch ASTRA Richtlinie 13040 ersetzt worden).*
- 
- [68] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Gliederung Leittechnik**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11620, V2.00.*
- 
- [69] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Applikation der Steuer- und Leittechnik**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11622, V1.00.*
-

- 
- [70] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Rechner der Steuer- und Leittechnik**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11624, V1.01.*
- 
- [71] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Notruftelefon**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11650, V1.30.*
- 
- [72] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Kabelanlage**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11700, V1.00.*
- 
- [73] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Erdungsanlage und Blitzschutz**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11710, V2.10.*
- 
- [74] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Erdungsanlage auf offener Strecke**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11711, V2.00.*
- 
- [75] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012), „**Erdungsanlage in Tunnel**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11712, V2.00.*
- 
- [76] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Erdungsanlage in Zentralen**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11713, V2.00.*
- 
- [77] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**LWL Lichtwellenleiter**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11720, V1.00. (mittlerweile durch ASTRA Richtlinie 13022 ersetzt worden).*
- 
- [78] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Universelle Kommunikationsverkabelung**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11730, V1.00.*
- 
- [79] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**NT-Kabelanlage**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11740, V1.20.*
- 
- [80] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Rangierverteiler RV**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11745, V1.00. (mittlerweile ersatzlos gelöscht)*
- 
- [81] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Kabeltrasse**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11760, V1.00. (mittlerweile ersatzlos gelöscht)*
- 
- [82] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Elektrische Hausinstallationen**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11810, V1.10.*
- 
- [83] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Heizung, Lüftung und Klima Zentralen**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11820, V1.20.*
- 
- [84] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Brandmeldeanlagen Gebäude**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11830, V1.20.*
- 
- [85] Bundesamt für Strassen ASTRA (2010), „**Krananlagen & Hebezeug**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11840, V1.00.*
- 
- [86] Bundesamt für Strassen ASTRA (2016), „**Barrierenanlage**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11860, V1.10.*
- 
- [87] Bundesamt für Strassen ASTRA (2017), „**Doppelboden**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11870, V1.10.*
- 
- [88] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011), „**Videoüberwachungsanlage Verkehr**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-11520, V0.99.*
- 
- [89] Bundesamt für Strassen ASTRA (2015), „**Werkstoffwahl und Korrosionsschutz**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-12120, V2.00.*
- 
- [90] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Zonen / Klimatische Bedingungen**“, *Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-12210, V2.10.*
- 
- Dokumentation**
- 
- [91] SN 640551 (2012): „**Öffentliche Beleuchtung in Strassentunneln, Galerien und Unterführungen – Teil 1 bis Teil 3**“.
- 
- [92] Bundesamt für Strassen ASTRA (2014), „**Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Risiken in Tunneln**“, ASTRA Dokumentation 89005 V1.10
- 
- [93] Rune Brandt, „**On the Four Elements of Tunnel Safety: Fire, Air, Water and Earth**“; 7th International Conference 'Tunnel safety and Ventilation', 2014, Graz
- 
- [94] Niels Peter Høj, Rune Brandt, „**NordFou „Evakuering i vegtunneler**“ Forskningsrapport DP3, 2015

- [95] Rune Brandt, Niels Peter Høj, Kristian Appel, Marieke Martens, «**NordFou „Evakuering i vegtunneler»**, Forskningsrapprt DP1, 2013
- [96] Niels Peter Høj, Rune Brandt, Kristian Appel, Marieke Martens, «**NordFou: „Evakuering i vegtunneler»**, Forskningsrapport DP2, 2014
- [97] Niels Peter Høj, Rune Brandt, Kristian Appel, Marieke Martens, «**Nordisk forskningsprojekter om Evakuering i vej-tunneler; Slutrapport NordFou projekt „Evakuering i vegtunneler”**”; NVF Tunnel-seminar, København 20/5/2015
- [98] Forschungsprojekt SOLIT – Safety Of Life In Tunnels, «**Untersuchung von Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln»**
- [99] Forschungsprojekt UPTUN, «**Cost-effective, Sustainable and Innovative Upgrading Methods for Fire Safety in Existing Tunnels»**
- [100] Studiengesellschaft Stahlanwendung E.V., «**Fire Protection in Traffic Tunnels»**, 1996
- [101] Bundesamt für Strassen, «**Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung»**, August 2012
- [102] Bundesamt für Strassen (ASTRA), «**Intervention bei Bränden in Strassentunneln»**, Januar 2005
- [103] Bundesamt für Strassen ASTRA, «**Materialwahl und Korrosionsschutz für korrosionsgefährdete BSA-Komponenten in Strassentunneln»**, nicht abgeschlossen
- [104] Bundesamt für Strassen ASTRA (2013), «**Minimale Anforderungen an den Betrieb»**, ASTRA Dokumentation V1.10
- [105] RVS 09.02.22, Tunnelausrüstung, «**Betrieb und Sicherheit»**, Ausgabe 1. Juni 2012
- [106] EABT-80/100, «**Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßen-tunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h»**, Ausgabe 2019
- [107] RVS 09.02.41, «**Tunnelausrüstung, Beleuchtung»**, Ausgabe 1. Februar 2014
- [108] PLaPB800.562.100 BEL, Technische Richtlinie, «**Technische Planungshandbuch der ASFINAG»**, Version 3.01, 01.02.2018
- [109] ZTV-ING, «**teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 4, Betriebstechnische Ausstattung»**, Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1056, Stand: 12/07
- [110] RVS 09.02.31, «**Tunnelausrüstung, Belüftung, Grundlagen»**, Ausgabe 1. Juni 2014
- [111] CETU, «**Ventilation, dossier pilote des tunnels»**, équipement, section 4.1, ISBN 2-11-084740-9, novembre 2003
- [112] «**Instruction Technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnel routiers (conception et exploitation)»**, Annexe N°2 à la circulaire interministérielle n°2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national
- [113] HBI (2014), «**Zusammenstellung der Detektionssysteme für Ereignis- und Branderkennung (Vertraulich)»**, HBI Bericht 14-003-001 für ASFINAG, 2014-06-26
- [114] ASTRA 2007/002, «**Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall»**, P. Pospisil, L. Ilg, A. Di Miele, N. Krasnobajew, A. Jordan, S. Frey, R. Brandt, VSS 1310, September 2010
- [115] CETU, «**Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers, Fascicule 4, les études spécifiques des dangers (ESD)»**, Septembre 2003, CETU Centre d'Études des Tunnel, ISRN EQ-CETU-03-04-FR
- [116] Michael Bayer, Conrad Stacey, Arnold Dix, «**Critical Velocity and Tunnel Smoke Control Part Two, Filling the NFPA 502 void»**, Australian Tunnelling Society (2021), <https://www.ats.org.au/2021/05/03/critical-velocity-and-tunnel-smoke-control-part-two/>
- [117] Private (vertrauliche) «**Kommunikation zwischen unabhängige Forschungsanstalten und Rune Brandt»** anlässlich der Sicherheitsprüfung von Tunneln betreffend die Wirkung von ortsfesten Brandbekämpfungsanlagen
- [118] Private (vertrauliche) «**Kommunikation 2020-2021 mit verschiedenen Mitgliedern des NFPA 502 Ausschusses»**
- [119] PIARC (2019), Road tunnels, «**vehicle emissions and air demand for ventilation»**, Technical Committee D, Road tunnels, ISBN 978-2-84060-500-3
- [120] PIARC (2017), «**Design fire characteristics for road tunnels»**, Technical Committee 3.3, road tunnel operations, World Road Association, ISBN 978-2-84060-471-6
- [121] PIARC (2016), «**Fixed fire-fighting systems in road tunnel: current practices and recommendations»**, Technical Committee C3.3 Road tunnel operations of the World Road Association, ISBN 978-2-84060-375-5
- [122] Brandt (2021), «**Proposed best practice for the engineering of smoke-management systems in tunnels and other underground facilities»**; 9th International Symposium on Tunnel Safety & Security, Key-note paper, ISTSS 2020 (Kommentar: Symposium aufgrund Coronavirus vertagt vom 2020)
- [123] Jürgen Wendeler (1967, «**Untersuchung des Kurzschluss-Luftstromes bei der Längsbelüftung von Strassentunneln»**, Voigh "Forschung und Konstruktion", Heft 17, Aufsatz 4, Mai 1967

- 
- [124] Bernard Anet (1967), Schweizerische Bauzeitung, 85. Jahrgang, Heft 28, 13. Juli 1967
- 
- [125] HBI (1980), «**Strömungskurzschluss zwischen Tunnelportalen**», H. Baumann und E. Graf, SHB/HBI 76-13-03, März 1980
- 
- [126] HBI (1979a), «**Air recirculation between tunnel portals**», H.O. Baumann, SHB/HBI, 3rd international Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, March 1979
- 
- [127] HBI (1979b), «**Tunnellüftungssysteme mit geringer Abluftimmissionen**», Dr. A. Haerter (SHB/HB), Vortrag STUVA Tagung 1979
- 
- [128] Koopmans, J.F.W., 2005. «**Air pollution short circuit effects of road traffic tunnel portals**». Third International Symposium on Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales, & 14th IUAPPA Regional Conference, Istanbul, 2005
- 
- [129] SLB-Analys (2013), «**Mynningsutsläppens inverkan på halterna inne i vägtunnlar**», Christer Johansson, Michael Norman, Sanna Silvergren, SLB-analys, Miljöförvaltningen, Stockholm, Rapport framtagen på uppdrag av Trafikverket, Utkast september 2013
- 
- [130] Bundesamt für Strassen ASTRA (2016), «**Betriebskonzept Strassentunnel**», **Leitpfaden Operative Sicherheit Betrieb**, ASTRA Dokumentation 86052 V1.00
- 
- [131] CETU (2015), «**Détection Automatique d'Incidents par Analyse d'Images en Tunnel**», Les documents d'information, Mai 2015
-

# 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

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 2022-03-21

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: AGT 2016/005

Projekttitel: LeanTech im Strassentunnel

Enddatum: 2022-03-31

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Aufgrund der historischen Entwicklung und des Wunsches, dem Verkehrsteilnehmer eine möglichst sichere Infrastruktur zur Verfügung zu stellen, ergeben sich in Strassentunneln nach heutiger Praxis komplexe und kostenintensive Anlagen (Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen).

Das Ziel des Forschungsprojektes ist es, für Strassentunnel sowohl die Anlagenkosten als auch die Betriebskosten (Kosten seitens der Gebietseinheiten für Unterhalt und Betrieb) durch die Verschlankeung der Vorgaben zu reduzieren, ohne dabei entscheidende Einbußen bei der Sicherheit, der Verfügbarkeit und der Instandhaltung hinnehmen zu müssen.

Die aktuell geltenden Anforderungen an die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) in Strassentunneln werden in diesem Forschungsprojekt in einem systematischen Prozess kritisch hinterfragt. In Sinne von LeanTech stellt sich die Frage, ob und wie Anforderungen optimiert werden können, ohne dabei die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer bzw. die Verfügbarkeit der Infrastruktur zu reduzieren.

Um die Umsetzbarkeit der Ergebnisse zu erleichtern, wurden die Anforderungen in einem Bottom-up-Verfahren aufgearbeitet und analysiert. Dabei wurden alle Anforderungen der ASTRA Richtlinien, Fachhandbücher und Dokumentationen sowie aufgrund Normen bearbeitet. Insgesamt wurden 2182 Anforderungen identifiziert, welche optimiert werden könnten, ohne dabei die Einhaltung der Minimalvorgaben betreffend Tunnelsicherheit zu tangieren.

Ein mehrstufiges Verfahren wurde angewandt, um die Anforderungen mit grösstem potenziellem Nutzen, der grössten Komplexitätsreduktion beziehungsweise der grössten Kosteneinsparungen zu ermitteln. Dabei wurde festgestellt, dass das Optimierungspotential von 2113 Anforderungen derart gering war, dass sie in diesem Forschungsprojekt nicht vertieft untersucht wurden.

In einem parallelen Prozess wurden 38 internationale Experten darum gebeten, folgende Frage zu beantworten: «Welche Anforderungen an die elektromechanische Ausrüstung in Strassentunneln sollten in welcher Art angepasst werden, um die Kosten (bzw. Komplexität) zu reduzieren, ohne dadurch reelle negative Einflüsse auf die Sicherheit, Verfügbarkeit und Instandhaltung in Kauf nehmen zu müssen?»

Aus diesem zwei Prozessen wurden gesamthaft 41 Anforderungen entweder einzeln oder in Zusammenhang mit anderen vertieft untersucht. Daraus ergaben sich 9 konkrete Anpassungsvorschläge mit grosser Auswirkung im Sinne von LeanTech, welche einfach und zeitnah umgesetzt werden können. Zudem entstanden 12 Handlungsempfehlungen für vertiefte Untersuchungen.

Weitere 28 Anforderungen mit Optimierungspotential wurden einer übergeordneten Analyse unterzogen. Zudem wurden Gedanken zu weiterführenden Analysen aufgrund grundsätzlich fachbereichsübergreifende Gesamtbetrachtungen angestellt.

Diese Anpassungsvorschläge und Handlungsempfehlungen ermöglichen es, Einsparungen in den Bereichen Investition, Betrieb und Instandhaltung zu erreichen, ohne eine massgebliche Reduktion des Sicherheitsniveaus oder der Verfügbarkeit der Infrastrukturanlage zu verursachen.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

#### Zielerreichung:

Ziel des Forschungsprojekts war, die aktuell geltenden, spezifischen Vorgaben an die (elektromechanische) Tunnelausrüstung zu vereinfachen und dadurch die Anlagenkosten (Investition, Instandhaltung und Ersatz) zu reduzieren indem die aktuell geltenden Anforderungen kritisch hinterfragt wurden. Dabei war es essentiell, eine Anpassung zu erzielen ohne entscheidende Einbussen in Bezug auf Sicherheit, Verfügbarkeit und Instandhaltung.

Das Forschungsprojekt ergab 9 konkrete Anpassungsvorschläge mit grosser Auswirkung im Sinne von LeanTech, welche einfach und zeitnah umgesetzt werden können. Zudem entstanden 12 Handlungsempfehlungen für vertiefte Untersuchungen. Weitere 28 Anforderungen mit Optimierungspotential wurden einer übergeordneten Analyse unterzogen. Zudem wurden Gedanken zu weiterführenden Analysen aufgrund grundsätzlich fachbereichsübergreifende Gesamtbetrachtungen angestellt.

Die Ziele wurden somit vollumfänglich erreicht.

#### Folgerungen und Empfehlungen:

Die Umsetzung der 9 konkreten Anpassungsvorschläge können zeitnah initialisiert werden. Zudem können die 12 Handlungsempfehlungen vertiefte untersucht werden.

Mit dem gewählten Bottom-up-Ansatz wurde auf Detailanforderungen fokussiert. Es bietet sich jetzt an, die hier vielen dargestellten Optimierungsmöglichkeiten in einem Top-down-Verfahren vertieft zu betrachten.

Grundsätzlich soll die Verfügbarkeit der Infrastruktur im Vordergrund stehen. Dazu sollten projektspezifisch Zielwerte festgelegt werden, so dass Infrastrukturen und somit auch deren Anlagen nachhaltig unter Berücksichtigung von RAMS-Analysen (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit) geplant werden können.

In einer solchen Analyse könnte zudem eine Kosten-Nutzenanalyse in einer gesamtgesellschaftlichen Betrachtungsweise angestellt werden, um die Kosteneffizienz der Risikominimierung zu optimieren. Womöglich wäre es vorteilhafter, die Sicherheit auf dem allgemeinen Strassennetz zu verbessern, anstatt in Tunneltechnik zu investieren.

Folgende Anregung der internationalen Experten soll Rechnung getragen werden: Die Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der einzelnen Tunnelsysteme / Ausrüstungsteile, insbesondere wenn sie für die Sicherheit von wesentlicher Bedeutung sind, trägt dazu bei, den Tunnel für die Benutzer offen zu halten. Unabhängig davon, ob es sich um einen städtischen Tunnel handelt oder nicht, sind die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Auswirkungen einer noch so kurzen Tunnel Sperre offensichtlich.

#### Publikationen:

Zurzeit wird ins Auge gefasst die Forschungsergebnisse in folgenden Publikationen bzw. anlässlich folgender Konferenzen zu veröffentlichen:

VSS Strasse und Verkehr: Schweizer Fachzeitschrift zu Forschung, Normenwerk und Durchführung für Planung, Bau und Betrieb von Verkehrsinfrastrukturen

Tunnel: Offizielles Organ der STUVA. Internationale technische und praxisnahe Fachzeitschrift für unterirdisches Bauen

ISTSS 2023: 10th International Symposium on Tunnel Safety and Security, 26-28 April 2023, Stavanger (NO)

STUVA Konferenz 2023: 8-10 November 2023, München (DE)

TSV 2024: International Conference on Tunnel Safety and Ventilation, Graz (AT)

#### Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Brandt

Vorname: Rune

Amt, Firma, Institut: HBI Haerter AG

#### Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Le président a souhaité dès le début de la recherche, une participation active des membres de la commission. Lors des réunions et échanges, la pratique a démontré que chaque membre a été actif pour assurer une recherche de qualité. La "Forschungstelle" a toujours démontré un esprit ouvert à toute proposition de la commission.

En partant de 2182 exigences, documentées dans le cadre de la recherche, il a été possible d'identifier leurs impacts sur la sécurité des usagers, sur la disponibilité des installations et sur leur maintenabilité si elles étaient réduites.

En synthèse: une identification de 9 mesures concrètes et 12 thèmes à analyser en détail.

Les résultats de la recherches sont utilisables pour rendre plus «Lean-Tech» des installations de sécurité et d'exploitation. L'objectif est atteint.

Umsetzung:

Le président, employé de l'office fédéral des routes, a établi la liste des recommandations identifiées dans la recherche. Les recommandations seront analysées et les influences concrètes sur les standards EES définies.

La liste sera transmise au responsable des standards EES à l'OFROU.

weitergehender Forschungsbedarf:

La recherche de synergie entre l'éclairage du chemin de fuite et le balisage optique (sur le trottoir) tout en maintenant la sécurité attendue ainsi que quelques thèmes liés à la ventilation sont proposés comme thèmes de recherche.

Einfluss auf Normenwerk:

Folgende wichtigsten Normen/Richtlinien/Technische Merkblätter sind von den konkreten Anpassungsvorschläge betroffen: SIA 197/2; ASTRA Richtlinien: 13001,13002, 13005; ASTRA TM 23001: 11130,11160, 11412, 11430, 11432, 11433, 11820. Weitere Normenwerke können von der Umsetzung der Empfehlungen betroffen werden

**Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:**

Name: Schnetz

Vorname: Jean-Paul

Amt, Firma, Institut: Office fédéral des routes OFROU, Digital Services, Transformation numérique et innovation

**Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:**

Schnetz Jean-  
Paul ZBDUAN

Signature numérique de  
Schnetz Jean-Paul ZBDUAN  
Date: 2022.03.21 14:17:29  
+01'00'