



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**

# **Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln – Initialprojekt**

**Gestion constructive de la maintenance en tunnel creusé –  
Projet initial**

**Maintenance management of mined tunnel – Initial project**

**Lombardi AG**  
**Benoît Stempf, dipl. Ing. ETH**  
**Michaela Dell'Antonio, dipl. Ing., MAS ETH MTEC**

**Forschungsprojekt AGT 2014/001 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Tunnelforschung (AGT)**

**November 2016**

**1579**

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**

# **Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln – Initialprojekt**

**Gestion constructive de la maintenance en tunnel creusé –  
Projet initial**

**Maintenance management of mined tunnel – Initial project**

**Lombardi AG**  
**Benoît Stempfel, dipl. Ing. ETH**  
**Michaela Dell'Antonio, dipl. Ing., MAS ETH MTEC**

**Forschungsprojekt AGT 2014/001 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Tunnelforschung (AGT)**

# Impressum

## **Forschungsstelle und Projektteam**

### **Projektleitung**

Benoît Stempfél, Lombardi AG, Fribourg

### **Mitglieder**

Michaela Dell'Antonio, Lombardi AG, Minusio

Andrea Mordasini, Lombardi AG, Minusio

## **Begleitkommission**

### **Präsident**

Urs Welte, Amstein & Walthert AG, Zürich

### **Mitglieder**

Luc Darbellay, Tunnel du Grand St-Bernard SA, Bourg-St-Pierre

Christian Gammeter, ASTRA Ittigen

Rade Hajdin, IMC GmbH, Zürich

Alain Jeanneret ASTRA, Ittigen

Josef Kaufmann, EBP AG, Zürich

Urs Vollmer, ASTRA Filiale 3 Zofingen

## **Antragsteller**

Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

## **Bezugsquelle**

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>9</b>
<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Ausgangssituation und Grundlagen</b> .....	<b>13</b>
1.1 Einleitung.....	13
1.2 Forschungsziel .....	13
1.3 Aufbau und Ablauf des Initialprojekts.....	13
<b>2 Literaturrecherche</b> .....	<b>15</b>
2.1 Literaturübersicht: Stand der Forschung und Diskussion .....	16
2.1.1 Erhaltungsprozess .....	16
2.1.2 Inventar und Schadensprozesse.....	18
2.1.3 Inspektion und Überwachung.....	19
2.1.4 Entscheidungsprozesse .....	21
2.1.5 Erhaltungsmassnahmen und Kostenmodell .....	22
2.1.6 Umsetzungskonzept, EDV-Tools .....	24
2.1.7 Die nationalen und internationalen Normen zum Thema .....	25
2.2 Literaturübersicht: Stand der Forschung BSA .....	25
2.3 Wissenslücken .....	26
<b>3 Systemdefinition und Systemabgrenzung für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln</b> .....	<b>31</b>
3.1 Systemaufbau und Systemdefinition.....	31
3.1.1 Positionierung im Erhaltungsmanagement .....	33
3.1.2 Systemabgrenzung zu relevanten Teilsystemen .....	35
3.2 Ziele des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln .....	35
3.3 Fachprozesse im Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln .....	36
<b>4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen</b> .....	<b>39</b>
4.1 Vorschlag für Einzelprojekte des Forschungspakets „Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln“ .....	39
4.2 Leistungsbeschreibung der Gesamtprojektleitung.....	39
4.2.1 Positionierung und Aufgaben der Gesamtprojektleitung .....	39
4.2.2 Leistungsphasen und Leistungen der Gesamtprojektleitung .....	41
4.3 Einzelprojekt Beschreibung.....	42
4.3.1 Einzelprojekt 1: Zustand (Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln) .....	42
4.3.2 Einzelprojekt 2: Diagnostik (Überwachungs- und Inspektionsmethoden) .....	44
4.3.3 Einzelprojekt 3: Massnahmen (Festlegung der Erhaltungsmassnahmen) .....	47
4.3.4 Einzelprojekt 4: Entscheidungen (Entwicklung eines Entscheidungsmodells mit/ohne Schnittstelle zum Teilsystem BSA) .....	49
4.3.5 Einzelprojekt 5: Kosten (Kostenmodell für die Erhaltung von bergmännischen Tunneln) .....	53
4.3.6 Einzelprojekt 6: Umsetzung (Praktische Umsetzung, Aufbau einer Tunneldatenbank-Skizze durch einen Prototyp) .....	56
4.4 Schnittstellen zwischen den Einzelprojekten .....	58
4.5 Zeit- und Kostenplan der Realisierung der Einzelprojekte.....	61
4.5.1 Zeitplan der Realisierung der Einzelprojekte .....	61
4.5.2 Kostenplan der Realisierung der Einzelprojekte .....	62
<b>Glossar</b> .....	<b>63</b>
<b>Normen</b> .....	<b>65</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>67</b>

<b>Projektabschluss .....</b>	<b>73</b>
<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen .....</b>	<b>77</b>

## Zusammenfassung

### **Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln – Initialprojekt**

Die vorliegende Studie zum Thema Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln und tunnelähnlichen Objekten wie Tagbautunneln, Galerien, Einhausungen, etc. stützt auf eine umfassende Bestandsaufnahme der bis heute vorhandenen sowohl schweizerischen als auch länderübergreifenden Literatur und den bisherigen Erkenntnissen aus der Praxis. Für die Analyse der bestehenden Literatur wurden die Aspekte Erhaltungsprozess, Inventar, Schadensprozesse, Inspektionsmethoden, Entscheidungsprozess und Erhaltungsmassnahmen im Einzelnen untersucht und die entsprechenden Literaturquellen aufgeführt und kommentiert.

Betreffend Erhaltungsprozess konnte festgestellt werden, dass der Tunnel nicht als Teilsystem, sondern als Teil der gesamten Kunstbauten bewertet ist und daher die Anforderungen an die Erhaltung des Tunnels nicht gebührend berücksichtigt sind. In der Schweiz ist die Erhaltung von bergmännischen Tunneln bisher eher projektbezogen und nicht standardisiert behandelt.

In Bezug auf das Inventar und die Schadensprozesse kann ausgesagt werden, dass zwar zahlreiche Studien zu konkreten Schadensprozessen ausgeführt wurden, jedoch eine systematische Betrachtung der Einflussfaktoren, deren Verlauf sowie deren Kombinationen auf die Schadensentwicklung fehlt. Ausserdem ist in keiner der untersuchten Literaturquellen eine Typisierung der relevanten Schadensprozesse und deren Langzeitentwicklung vorzufinden.

Zur Thematik Inspektionsmethoden ist hervorzuheben, dass Bahnunternehmungen in den letzten Jahren eine konstruktive Analyse gestartet haben, um die Inspektionsprozesse zu vereinfachen und teilweise zu automatisieren. Bei Strassentunneln ist die Problematik zwar ähnlich, es fehlen jedoch bis heute Vergleiche und eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Methoden. Die Literatur zeigt zudem, dass gewisse Untersuchungsmethoden sowie messtechnische Überwachungen ein grosses Verbesserungspotential für den Inspektionsprozess darstellen.

Zu den Themen Risikomanagement, Bewertungsmethodik und Prognosemodell, welche zur Entscheidungsfindung beitragen, gibt es deutlich mehr Literatur im Zusammenhang mit Strassen- bzw. Kunstbauten-Erhaltungsmanagement, als für Tunnelbauten. Mögliche Prognosemodelle für bergmännische Tunnel sind auf ihre Umsetzbarkeit und Integration in die Entscheidungsfindung zu evaluieren.

Im Hinblick auf die Erhaltungsmassnahmen ergibt sich aus der Analyse der bestehenden Literatur, die Notwendigkeit, diese in Abhängigkeit ihrer Wirkung, ihrer Kosten und ihres Ausführungsaufwandes zu systematisieren und zu katalogisieren. Eine Gliederung der Erhaltungsmassnahmen und deren langfristigen Auswirkung ist sowohl für präventive als auch für korrektive Massnahmen von Nutzen.

Die ausführliche Literaturrecherche, welche diesem Initialprojekt zu Grunde liegt, hat es erlaubt, die Grundlagen zu erarbeiten, die für die Definition des Erhaltungsmanagementprozesses erforderlich sind und auf dessen Basis die Ausschreibung der folgenden Einzelprojekte erfolgt.

- EP1 Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln: Beschreibung und Systematisierung der Schadensprozesse, ihrer Einflussfaktoren und Auswirkungen auf das Langzeitverhalten der Tunnel auf der Basis von Befunden aus Inspektionen, Beobachtungen und Kontrollmessungen.
- EP2 Überwachungs- und Inspektionsmethoden: Identifikation der Methoden und der notwendigen Werkzeuge zur Festlegung der Schadensprozesse sowie Optimierung der Inspektionen und Integration der Risikoanalyse in das Inspektionsprogramm.

- EP3 Analyse, Festlegung und Katalogisierung der Erhaltungsmaßnahmen im Hinblick auf eine langfristige, effiziente Erhaltungsplanung der verschiedenen Schadensprozesse, ihrer Kosten und ihrer Umsetzung.
- EP4 Entwicklung eines geeigneten Entscheidungsmodells mit Integration von Befunden, Schadensprozessen und Erhaltungsmaßnahmen, mit/ohne Berücksichtigung der Schnittstelle des Teilsystems BSA.
- EP5 Entwicklung eines Kostenmodells als Entscheidungsgrundlage für die Auslösung der erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen für bergmännische Tunnel.
- EP6 Praktische Umsetzung der aus den fünf EP entwickelten Methoden mit Hilfe der Daten der bereits bestehenden Tunneldatenbanken. Entwurf eines Datenmodells und Prüfung anhand eines einfachen Prototyps.

Die Gesamtprojektleitung, welche die spezifischen Projekte begleiten wird, gewährleistet den geordneten Projektablauf sowie die Koordination zwischen den Einzelprojekten.

## Résumé

### Gestion constructive de la maintenance en tunnel creusé – Projet initial

Le projet couvre le thème de la gestion constructive de la maintenance des tunnels creusés et des objets similaires aux tunnels que sont, par exemple, les tranchées couvertes, les galeries, les voûtages, etc. En se basant sur un travail conséquent de recherche dans la littérature suisse et internationale ainsi que sur les retours d'expérience de la pratique il a été possible de catégoriser et de commenter les aspects des processus de gestion que sont l'inventaire et le diagnostic des ouvrages, les processus de détérioration, les méthodes d'inspection, les mesures d'entretien, les processus d'aide à la décision et la gestion constructive de la maintenance.

Concernant la gestion constructive de la maintenance il faut constater actuellement que le tunnel n'est pas noté comme système à part entière mais est bien intégré dans le système global de gestion des ouvrages d'art. De ce fait les exigences en maintenance de tunnel ne sont pas couvertes. Même en Suisse il faut constater que la maintenance des tunnels creusés est plus axée projet et n'est pas traitée d'une manière standard.

Les éléments à disposition pour la détermination de l'état de l'ouvrage sont bien documentés dans la littérature, mais sans aucune considération systématique sur les facteurs qui influent sur les processus de dégradation et leurs combinaisons. D'autre part la littérature actuelle ne présente pas une standardisation des processus de dégradation importants et de leur comportement à long terme.

Sur le sujet des méthodes d'inspection, les entreprises de chemin de fer européennes ont procédé ces dernières années à des analyses de fond conduisant à la simplification voir à une automatisation partielle des processus d'inspection. Bien que ces processus soient très similaires pour les tunnels routiers, il manque aujourd'hui une comparaison et une évaluation détaillée de la rentabilité des différentes méthodes. Il apparaît également que la détermination du diagnostic des ouvrages et les méthodes d'inspection et d'observation présentent un fort potentiel d'amélioration et d'optimisation, en particulier l'intégration de la gestion des risques dans le processus d'inspection qui n'est pas encore appliquée pour les tunnels creusés.

Les processus d'aide à la décision dont les recherches, principalement en relation avec les infrastructures routières et les ouvrages d'art, sont peu ou pas applicables dans le contexte de gestion constructive de la maintenance des tunnels. Des modèles de pronostics existants doivent être évalués eu égard à leur application et leur intégration dans le processus d'aide à la décision.

En dressant la synthèse des connaissances actuelles sur les mesures d'entretien, il y a lieu de combler les lacunes identifiées en les systématisant et en les cataloguant en fonction de leur efficacité, de leur coût et de leur mise en œuvre. Une structuration des mesures d'entretien eu égard à leur efficacité à long termes sert aussi bien à la maintenance préventive que corrective.

L'important travail de recherche effectué dans la littérature pour ce projet initial a permis de poser les bases nécessaires à la définition du processus de la gestion constructive de la maintenance des tunnels creusés et à produire les objectifs et les conditions cadres des projets spécifiques suivants :

- **Projet spécifique 1:** Sur la base des constats effectués lors des inspections et des observations ainsi que des catalogues de dégâts existants, description et systématisation des processus de dégradation avec leurs déclencheurs et interaction avec le comportement à long terme des tunnels.

- **Projet spécifique 2** : Identification des méthodes d'observation et d'inspection ainsi que des instruments nécessaires à la détermination des processus de dégradation. Optimisation des inspections et intégration de l'analyse de risque dans les programmes d'inspection.
- **Projet spécifique 3** : Analyser, déterminer et cataloguer les mesures d'entretien sous l'angle de leur efficacité à long terme pour les différents processus de dégradation, leur coût et leur mise en œuvre.
- **Projet spécifique 4** : Développement d'un modèle d'aide à la décision praticable pour l'intégration transversale des constats, des processus de dégradation et des mesures d'entretien dans le but d'assister la planification de l'entretien sur la base de méthode d'évaluation et d'analyse de risque, avec ou sans interface avec le système partiel EES.
- **Projet spécifique 5** : Développement d'un modèle de coût comme base de décision pour la gestion constructive de la maintenance des tunnels creusés. Ce projet consiste à déterminer, structurer et compiler les valeurs référentielles de coût pour comparaison inter-ouvrage et leur usage courant dans la gestion.
- **Projet spécifique 6** : Mise en pratique concrète des méthodes développées dans les 5 projets spécifiques précédents à l'aide de modèles de données. Structure esquissée d'une base de données et vérification du fonctionnement à l'aide d'un prototype simple et compréhensible.

Le bon déroulement et la coordination inter-projet est assurée par une direction général de projet qui accompagnera chaque projet spécifique.

## Summary

### Maintenance management of mined tunnel – Initial project

The present study on the maintenance management of mined tunnels and tunnel like structures, such as cut-and-cover tunnel, galleries, protection structures, etc. is based on a comprehensive inventory of both, the available Swiss and transnational literature, as well as the current state of practical findings.

For the analysis of the existing literature, aspects related to the maintenance process, inventory, deterioration process, inspection methods, decision-making processes as well as conservation measures were considered on an individual basis. The corresponding literature references were given and commented.

Regarding the maintenance process, it turned out that the tunnel is actually not evaluated as a subsystem, but as part of engineering structures as a whole, so that in consequence the requirements for the tunnel preservation are not taken duly into account. Also in Switzerland the maintenance of mined tunnels has been treated rather project-oriented and is not standardized.

With respect to the inventory and deterioration process, numerous studies on specific such processes have been performed, but a systematic consideration of the influencing factors, the progress as well as the combination of the deterioration development is missing. Furthermore, in none of the analysed reference sources any typification of relevant deterioration processes together with their long-term development is given.

Concerning inspection methods, it is noted that over the last years companies have initiated a constructive analysis, with the aim to simplify and partly automating the inspection process. Road tunnels present similar problems. Corresponding comparisons and an efficiency evaluation of the single methods are however still pending. Literature additionally shows that certain test methods as well as technical monitoring present a high potential for improvement of the inspection process.

On subjects like risk management, assessment methodology and forecast models, which are contributing to the decision making, there exists clearly more literature in the context of the maintenance management of roads and other engineering structures, than for tunnel constructions. Possible forecast models for mined tunnels are to be evaluated with respect to their practicability and integration in the decision making process.

Regarding the maintenance measures, the literature research shows the necessity to systemize and categorize these depending on their effect, costs as well as their implementation expenses/intensity. A structure of the conservation measures and their long term effects is of use for both, preventive as well as for corrective measures.

The thorough literature review, on which this initial project is based, has allowed to elaborate fundamentals which are required for the process of maintenance management, and on which basis the invitation to tender for the following individual projects is made.

- EP1 Deterioration processes and long term behavior of tunnels: Description and systemizing of deterioration processes, their influence factors and effects on the long-term behavior of tunnel based on findings from inspections, observations and control measurements.
- EP2 Monitoring and inspection methods: Identification of methods and required tools to determine the deterioration processes as well as optimization of the inspection and integration of the risk analysis in the inspection program.
- EP3 Analysis, determination and cataloging of the maintenance measures with respect to a long-term, efficient maintenance planning of the different deterioration processes, their costs and their implementation.

- EP4 Development of an adequate decision model, including integration of findings, deterioration processes and maintenance measures, with/without taking the interface of the subsystem operation and security equipment (BSA) into account.
- EP5 Development of a cost model as decision making tool for the initiation of the required maintenance measures for mined tunnels.
- EP6 Practical implementation of the methods developed in the five individual projects using the data of the already existing tunnel database. Design of a data model and its assessment by means of a simple prototype.

The overall project management accompanying the specific projects, ensures the structured project plan, as well as the coordination between the single projects.

# 1 Ausgangssituation und Grundlagen

## 1.1 Einleitung

Das Ziel der Erhaltungsplanung von Strassenanlagen ist optimale Entscheidungen zur Auslösung von Erhaltungsmaßnahmen zu treffen, welche den Fortbestand von betroffenen Kunstbauten sicherstellen. Diese Entscheidungen trifft man anhand der Überwachungs- und Überprüfungsergebnisse, welche während des Lebenszyklus einer Kunstbaute gesammelt werden.

Zum Thema Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen wurden bereits umfassende Forschungsarbeiten durchgeführt. Zum einen wurden Konzepte erarbeitet, welche die Strassenverkehrsanlagen als Gesamtsystem berücksichtigen und zum andern Konzepte, die sich auf Teilsysteme, insbesondere auf die Erhaltung des Trassees (offene Fahrbahn), der Brücken und der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) beziehen. Während für die Kunstbauten und das Trassee bereits fortgeschrittene Modelle für die langfristige Erhaltungsplanung bestehen, befindet sich das Erhaltungsmanagement von Tunneln, auch im Hinblick auf eine künftige Integration dieses Teilbereiches in ein übergeordnetes systematisches Erhaltungsmanagement, noch in einem Anfangsstadium [57], [58].

## 1.2 Forschungsziel

Das Ziel dieses Initialprojektes ist es, eine methodische Struktur für die langfristige objektbezogene Erhaltungsplanung von bergmännischen Tunneln, unter der Berücksichtigung einer zukünftigen Integration in das übergeordnete Erhaltungsmanagement auf Gesamtsystemebene zu definieren. Diese Methodik kann sinngemäss auch für tunnelähnlichen Objekte wie Tagbautunnel, Galerien und Einhausungen verwendet werden.

Ausgehend von einer umfassenden Bestandsaufnahme der bis heute vorhandenen länderübergreifenden Literatur sowie der bisherigen Erkenntnisse aus der Praxis, wird einerseits das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln in seiner Thematik abgegrenzt und andererseits werden die Wissenslücken aufgezeigt, welche zur Festlegung der Inhalte und Ziele der einzelnen Forschungsprojekte führen.

Im Rahmen des Initialprojektes werden die Grundlagen erarbeitet, welche für die Definition des Erhaltungsmanagementprozesses erforderlich sind und auf dessen Basis die Ausschreibung der Einzelprojekte, auch in Anbetracht ihrer Abhängigkeiten, vorbereitet werden.

## 1.3 Aufbau und Ablauf des Initialprojekts

Das vorliegende Initialprojekt unterteilt sich grundsätzlich nach drei Hauptthemen, die aufeinander aufbauen. Zunächst wird die umfangreiche Literaturrecherche zum Thema Erhaltungsmanagement dokumentiert (Kapitel 2), wobei die Aufteilung der vorhandenen Literatur auf der Basis der einzelnen Unterthemen (Inventar, Schadens- und Überwachungsprozesse, Massnahmen) des Erhaltungsmanagements erfolgt. Nach der ausführlichen Literaturanalyse schliesst das Kapitel mit der Identifizierung der Wissenslücken ab, welche den Ansatzpunkt für die in Kapitel 4 vorgestellten Einzelprojekte liefert.

Kapitel 3 setzt sich mit der Definition und der Abgrenzung des Erhaltungsmanagementprozesses, bezogen auf das Teilsystem Tunnel, auseinander. In diesem Kapitel sind sämtliche Fachprozesse erläutert, die den Tunnel als abgegrenztes Teilsystem kennzeichnen.

Kapitel 4 beschreibt die sechs vorgeschlagenen Einzelprojekte, die sich aus den Erkenntnissen der Literaturstudie resp. der dadurch erkannten Wissenslücken und der praktischen Erfahrungen ergeben. Jedes Einzelprojekt bezieht sich auf bestimmte Teil-

prozesse, für welche es notwendig ist, weiterführende Grundlagen zu erarbeiten, damit das Ziel, eine langfristige Erhaltungsplanung zu ermöglichen, erreicht werden kann.

## 2 Literaturrecherche

In diesem Kapitel wird der derzeitige Stand der Forschung und der Praxis im Bereich des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln sowohl in der Schweiz als auch im Ausland dargestellt. Die Aspekte der Analyse der bestehenden Literatur und im Allgemeinen auch das Erhaltungsmanagement der restlichen Teilsysteme Trasse und Kunstbauten kennzeichnen, sind folgende:

- Erhaltungsprozess
- Inventar
- Schadenprozesse
- Inspektionsmethoden
- Entscheidungsprozess
- Erhaltungsmaßnahmen

Mit der Literaturrecherche sucht man eine Antwort um folgende Frage zu beantworten: Welche Grundlagen sind für das Erhaltungsmanagement des Teilsystems Tunnel erforderlich?

Einleitend kann erwähnt werden, dass sich die Tätigkeiten des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln und von tunnelähnlichen Objekten im Vergleich zum klassischen Erhaltungsmanagement von Kunstbauten hinsichtlich der viel grösseren Komplexität und Anzahl von Parametern, welche berücksichtigt werden müssen, unterscheiden. Die Unterschiede sind nicht nur auf die Eigenheiten der Betriebsphase, sondern bereits auf die Bauphase des Tunnels zurück zu führen. Diese Parameter gelten auch für alle anderen geotechnischen Konstruktionen und sind:

- Lage und Umgebung
  - Baugrund, Geologie, Topographie
  - Hydrogeologische und geotechnische Eigenschaften
  - Geographische Lage
- Bauphase des Tunnels
  - Ausführungsmethode und Qualität der Bauausführung
  - Material (Wahl, Eigenschaften)
- Betriebsphase des Tunnels
  - Verkehrsbelastung
  - Chemische Belastung
  - Klimatische Bedingungen

Die folgend fett markierten Prozesse und Aspekte des Erhaltungsmanagements geben eine Auslegung zur Gliederung der Literaturrecherche an.

Der Prozess der **Inventarisierung** bildet die Grundlage einer konsistenten Datenbasis durch die Definition von Bewertungs- und Planungsobjekten. Ohne eine konsistente Datenbasis, welche auch in eventuell vorhandenen **EDV-Tools** umgesetzt werden muss, ist eine effiziente Planung des **Erhaltungsprozesses** nur schwer möglich.

Bewertungsobjekte sind definierte Einheiten, deren Zustand erfasst und bewertet wird. Diese sind relevant für den **Überwachungsprozess**, welcher eine umfangreiche und gründliche **Zustandserfassung** sowie dessen Bewertung umfasst (Anforderungen, Schadensbilder bzw. Befund/Schadenprozesse/Entwicklung, Erhebungsmethoden und Vorgehen).

Planungsobjekte sind definierte Einheiten, für die Erhaltungsmaßnahmen geplant werden. Diese sind relevant für die Erhaltungsplanung. Um die Erhaltungsplanung vorzunehmen, müssen **Massnahmen** und ein entsprechendes **Kostenmodell** definiert werden.

**Risikoaspekte** in den **Entscheidungsprozessen** des Erhaltungsmanagements gewinnen insbesondere im Zusammenhang mit der Sicherheit immer mehr an Bedeutung. Diese können erst in Erwägung gezogen werden, wenn sie in den einzelnen Prozessen Inventarisierung, Überwachung und Erhaltungsplanung Berücksichtigung finden.

Es zeigt sich generell eine Vielzahl von Veröffentlichungen, welche sehr detailliert konkrete Fragestellungen behandeln. Eine zu grosse Detaillierung ist jedoch für einen langfristigen Entscheidungsprozess über den Lebenszyklus nicht zielführend.

Die Analyse und Bewertung der bestehenden Literatur stellt dennoch eine wertvolle Grundlage für die notwendige Systematisierung und die Entwicklung eines Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln für die Schweiz dar.

## 2.1 Literaturübersicht: Stand der Forschung und Diskussion

Die ausführlich analysierten Beiträge der schweizerischen und ausländischen Forschungs- und Literaturquellen im Bereich von Tunneln sind auf der Basis der o.g. relevanten Aspekte beschrieben. Als Referenz gilt der in Abbildung 8 auf Seite 32 dargestellte Erhaltungsmanagementprozess.

### 2.1.1 Erhaltungsprozess

Im Allgemeinen kann ausgesagt werden, dass nur sehr wenige Literaturbeiträge den eigentlichen Erhaltungsprozess beschreiben. Einzig die Dissertation von Federica Sandrone (Dissertation [56] und [68]) liefert wertvolle Grundlagen, insbesondere im Hinblick auf die Schadensmechanismen. Weiter ist der Erhaltungsprozess aufgeführt und es besteht ein erster Entwurf einer schweizerischen Tunneldatenbank. Lösungsansätze für die Analyse der Datenmenge und eine Methode für eine Langzeitverhaltensanalyse bei Tunneln sind beschrieben.

Die Dissertation konzentriert sich vor allem auf die Tunnelverkleidung und gibt wertvolle Hinweise über das Langzeitverhalten des Gewölbes im Zusammenhang mit chemischem Wasserangriff und dem Gebirgsleichgewichtszustand.

Um die Tätigkeiten der Erhaltung an Kunstbauten in der Schweiz zu planen, werden seit einigen Jahren die Informationen der Kunstbauten strukturiert und fliessen als Substanz-, Inspektions- und Erhaltungsdaten in die Kunstbautendatenbank KUBA.

Diese Daten werden für die Planung und die Lenkung der Überwachung und der Erhaltungsmassnahmen verwendet. Die Literatur um KUBA [65], [66], und [85] enthält verschiedene Grundlageninformationen über Schadensprozesse, Schadensausmass, Massnahmen, probabilistische Schadensentwicklung und Erhaltungskosten.

Themen im Zusammenhang mit dem Erhaltungsmanagement von Tunneln wurden auf unterschiedliche Weise und vor allem mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden behandelt. Die nachfolgend erwähnten Dokumente sind als Ergänzung zur schweizerischen Forschung zu betrachten.

Das Dokument der Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES) [23] „Méthodologie d'aide à la gestion patrimoniale d'un parc d'ouvrages souterrains“ liefert eine erste Skizze über Erhaltungsprozesse. Es handelt sich um eine Zusammenfassung der heutigen Praxis im Bereich Erhaltungsmanagement von Untertagebauten. Dieser Beitrag liefert jedoch nur übergeordnete Konzepte zu sämtlichen Tunnelbauwerkstypen (Strassen, Bahn, U-Bahn, Wasserstollen, usw.) und schildert den Stand der Praxis in Bezug auf Erhaltungsprozess, Zustandserfassung, Zustandsbewertung, Risikomethodik und Erhaltungsstrategie. Es sind ausserdem Datenbanken beschrieben und Beispiele von umgesetzten Erhaltungsmassnahmen für Strassentunnel, Bahntunnel (SNCF), U-Bahn (RATP), Stollen von Wasserkraftwerken, Abwassertunnel (SIAAP) aufgeführt.

In ähnlicher Art wurden in den letzten Jahren, speziell in Deutschland, Konzepte und Methoden über Baumanagementsysteme durch die Forschungsreihen „Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstrassennetz“ [30], [31] und [37] entwickelt. Diese Beiträge bilden die Grundlage für ein umfassendes Bauwerks-Management-System (BMS), mit dem der Bauwerksbestand auf Objekt- und Netzebene umfassend erfasst und bewertet werden kann. Die besonderen Randbedingungen hinsichtlich des Bauwerksbestands und der gesetzlich vorgegebenen Verwaltungsstruktur wurden als wesentliche Voraussetzungen berücksichtigt. Diese Konzepte sind vorwiegend für Kunstbauten gedacht, schliessen aber zum Teil auch Tunnel mit ein.

Es muss noch untersucht werden, ob die Literatur um KUBA in der Schweiz nicht schon zum grössten Teil diese Konzepte und Methoden zur Erhaltungsplanung abdeckt.

Die Facharbeit „Maintenance, management, life-cycle design and performance of structures and infrastructures: a brief review – von Dan M. Frangopol“ [112] stellt keinen Erhaltungsprozess dar, sondern eine Zusammenfassung von Fachartikeln über das Thema Erhaltungsmanagement, welche zwischen 2005 und 2011 publiziert wurden. In diesem Dokument sind interessante Beiträge im Bereich Verfallmechanismen (Korrosion, Ermüdung), Tragwerksmonitoring, Life-cycle analysis, Life-cycle Erhaltung und Sanierungsstrategie und Tragwerkperformanceindikatoren vorhanden, auch wenn es sich hauptsächlich mit Kunstbauten und weniger mit Tunnel befasst.

Ein weiterer Beitrag „Tunnel Asset Management (TAM) Program Application for High Risk Structural Components“ [119] beschreibt das Entwicklungskonzept und den Umsetzungsplan für die Tunnelerhaltungsplanung und fokussiert auf die Inspektion von Tragwerksteilen mit hohem Risiko mithilfe neuer Inspektionstechnologien wie z.B. Smart Sensor-Technologie und drahtloses Kommunikationsnetz um Variationen von Spannungen, Temperatur, Risse, Korrosion, Deformation oder Neigungen festzustellen. In den USA sind noch weitere Beiträge zu diesem Thema zu erwähnen, vgl. [116], [118] und [120].

Spezifisch für Bahntunnel liegen einige Forschungsprojekte über Grundkonzepte für die Management-Methodik im Bereich Tunnelerhaltung vor. Diesbezüglich sind die Beiträge der EU [15], [53] und Japan [47] aufzuführen.

In anderen Ländern wie beispielsweise in China ist dieses Thema ebenfalls hochaktuell [9], [40].

Ein generelles Konzept wurde in der Schweiz für das Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen [74], [57] und [58] erstellt, in dem wertvolle Hinweise zu den Teilsystemen Trasse und Kunstbauten enthalten sind. Dieses Forschungsprojekt kann als Ausgangslage für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln dienen.

*Erkenntnisse:*

- *Keine der genannten Quellen beschreibt einen globalen Ansatz des Erhaltungsmanagementprozesses von bergmännischen Tunneln resp. eine übergreifende Integration der einzelnen Unterprozesse.*
- *Im Hinblick auf den Erhaltungsprozess wird der Tunnel nicht als Teilsystem, sondern als Teil der gesamten Kunstbauten bewertet. Dies führt dazu, dass die Anforderungen an die Erhaltung des Tunnels nicht gebührend berücksichtigt sind.*
- *Bisher wurde auch in der Schweiz die Erhaltung von bergmännischen Tunneln eher projektbezogen und nicht standardisiert behandelt.*
- *Im Anschluss an die Dissertation von F. Sandrone fand, ausser der Ergänzung von KUBA-Prozessen, keine Weiterentwicklung in diesem Bereich statt.*
- *Das Forschungsprojekt „Erhaltungsmanagement der Strassenverkehrsanlagen, Generelle Fachkonzepte“ bietet einen wertvollen Ansatzpunkt für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln.*

## 2.1.2 Inventar und Schadensprozesse

**Informationsparameter** (wie zu Beginn des Kapitels 2 erwähnt) der Bau- sowie der Nutzungsphase, welche die Erhaltung beeinflussen können, sind im Allgemeinen wenig untersucht. Eine Ausnahme bildet die Dissertation von F. Sandrone [56], welche einerseits eine zum Teil detaillierte Beschreibung des Einflusses von Baugrund und Geologie auf den Innenring aufzeigt und andererseits wird der Einfluss von aggressivem Wasser (**chemische Belastung**) vor allem mit Sulfat-Anteil auf den Innenringbeton, u.a. Verfallsablauf und Langzeitverhalten, ziemlich ausführlich behandelt. In der gleichen Arbeit wurden auch wirksame Massnahmen zur Behebung der durch diese Einflüsse verursachten Schäden aufgelistet. (vgl. [6], [55], [61], [70]). Zusätzlich sind Forschungen zum Langzeitverhalten von Innenring/Abdichtung unter Einfluss von **Sickerwasser** [4], [17], [28], [45], [67], [75], [106] und [120] oder Druckwasser [43] vorhanden. Es gibt hingegen wenig interessante Beiträge bezüglich anderer Einflussparameter, welche das Langzeitverhalten des Innenringbetons beeinflussen (siehe Abb. 1). Die Baugrundinteraktion (**Änderung des Belastungszustands**) ist für spezielle Untergrundarten beschrieben [1], [33]. Der Einfluss von **aggressiver Atmosphäre** wurden in Bezug auf Tunnel in [3] beschrieben. Diese Thematik wurde sonst nur für Hochbauten untersucht, z.B. in [41] und [103]. Darüber hinaus wurde der Einfluss von **Waschwasser** in [49] und [50] untersucht.

In der Schweiz erfolgte eine Untersuchung von Einflussfaktoren hinsichtlich Frost und Tausalz im Rahmen der Dissertation von D. Conciatori an der ETHL „Effet du microclimat sur l'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton armé“ [78].

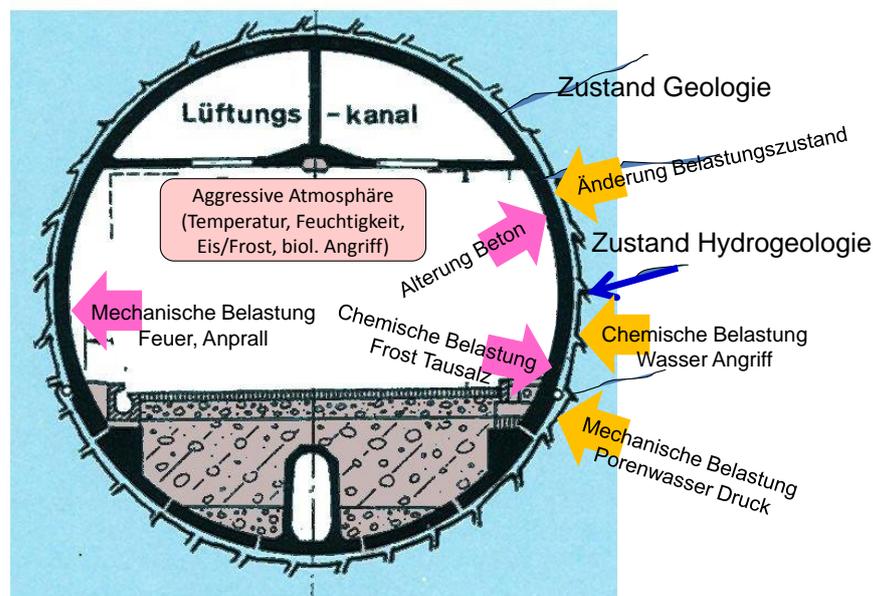


Abb. 1: Höchstes Verfallpotenzial Innenring nach Sandrone [56]

**Inventarisierungs- und Überwachungsprozesse** sind oft gemeinsam behandelt, wie z.B. in Frankreich, wo man sich auf einige Dokumente stützen kann, die vor allem durch die AFTES und das CETU (Centre d'études des tunnels) publiziert wurden.

„Les méthodes de diagnostic pour les tunnels revêtus“ [26] herausgegeben durch AFTES im Jahr 1995, enthält eine sorgfältige Auflistung der Untersuchungsmethoden, ihrer Anwendungsmöglichkeit und ihrer erwarteten Ergebnisse.

Zwei weitere Publikationen vom CETU, „Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers - du désordre à l'analyse, de l'analyse à la cotation“ [20] und „Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, fascicule 40“ [22], herausgegeben in den Jahren 2011 und 2012, legen die Diagnosemethodik fest und behandeln bergmännische Tunnel sowie deren Sicherheitseinrichtungen, insbesondere die Konsequenzen der Gebirgseinwirkung. Diese Dokumente enthalten für verschiedene Bauweisen eine detaillierte Beschreibung der Schäden und der möglichen

Schadensursachen, der Untersuchungen bis zur Diagnostik mit ausführlichen Details zu den drei Haupteinflussfaktoren Umgebung (Gebirge, Gebirgswasser, physische Umgebung, klimatische Bedingungen, Seismik, etc.), Ausführung (Ausbruch, Sicherung, Verkleidung, Wasserhaltung) und Betrieb. Ausführliche Informationen zur Überwachung und zu den Untersuchungsmethoden sind ebenfalls Bestandteil dieser Dokumente.

Diese Publikationen dienen als Grundlage für die Systematisierung der Schadensprozesse und ihrer Aufdeckung durch Überwachung und Inspektionsmethoden. Ergänzend dazu sind die durch die AFTES im Jahr 2005 publizierten Kataloge der möglichen Schäden an verkleideten [15] und nicht verkleideten Tunneln [17], welche eine sehr detaillierte Beschreibung (visuelle Prüfung, Diagnose Methodik, Parametererfassung, Folgeschäden, Schadensursachen, Schadensprozess, Risiko, Massnahmen für eine vollständige Instandsetzung oder Verlangsamung der Schadensprozesse) und eine ausführliche Erläuterung der destruktiven und nicht destruktiven Untersuchungsmethoden beinhalten. Weitere Schadenskataloge („Catalogue des désordres“) sind in [20] und [29] zu finden.

Diese Kataloge ([15], [17], [20] und [29]) sowie zusätzlich [65] und [66], liefern eine gute Ausgangslage für einen Vergleich mit der in der Schweiz vorhandenen Literatur (vor allem KUBA in der Version 5.0 – siehe Glossar).

*Erkenntnisse:*

- *Im Themenbereich Inventar und Schadensprozesse existieren viele Studien über konkrete einzelne Schadensprozesse und deren spezifischen Verlauf.*
- *Es fehlt jedoch eine systematische Betrachtung der Einflussfaktoren und deren Kombinationen auf die Schadensentwicklung.*
- *Keine der analysierten Literaturquellen stellt einen umfassenden Überblick über Schadensprozesse dar, insbesondere fehlen Informationen zu einer möglichen Typisierung der relevanten Schadensprozesse und deren Langzeitentwicklung, welche für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen wesentlich sind.*
- *Gleichzeitig fehlen Informationen, welche Auswirkungen diese Schadensprozessstypen auf das ganze Tunnelbauwerk sowie spezifisch für jedes Bauwerksteil (Inventar) haben.*
- *Weiter sind die monetären Folgen von Schadensprozessen resp. Erhaltungsmaßnahmen (Risikobetrachtungen) nicht ausreichend berücksichtigt.*

### 2.1.3 Inspektion und Überwachung

**Inspektionsprozesse und Methoden** sind für Bahntunnel in verschiedenen Ländern sachlich dokumentiert und können gleichzeitig auch für Strassentunnel mitberücksichtigt werden. In Frankreich haben Société nationale des chemins de fer français SNCF [107] und Régie autonome des transports parisiens RATP [25] vor allem durch Inspektion und Diagnose Erfahrung gesammelt und die daraus folgenden Ergebnisse systematisiert. Wesentlich sind auch die oben erwähnten Richtlinien [20], [22] und [26]. Dasselbe gilt für einige englischsprachige Länder. Hier sind insbesondere [45], „Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual“ [110] sowie „Tunnel operations, maintenance, inspection and evaluation (tomie) manual“ [120] und [119] in den USA zu erwähnen. Zudem behandeln die deutschen Normen das Thema Inspektion [35] und [36].

Durch die Inspektionen eines Bauwerks und die Beurteilung des Bauwerkzustands ist es möglich, die Schäden zu quantifizieren und die Unsicherheiten hinsichtlich der weiteren Zustandsentwicklung zu reduzieren. Die Industrie entgegnet seit einigen Jahren diesen Unsicherheiten mittels sogenannten **risikobasierte Inspektionen (RBI)**. Damit lässt sich der Nutzen einer Inspektions- und Unterhaltsstrategie beurteilen. Im Bauwesen, vor allem im Brückenbau und Metallbau, kommen solche Methoden zunehmend zum Einsatz ([59], [73] und [118]). Die Tunnel sind durch Einflussfaktoren und Grössen mit vielen Unsicherheiten verbunden und mit sehr hohem Inspektionsaufwand belastet. Die risikobasierte Inspektionsplanung (RBI) ermöglicht es, den Einfluss von Inspektionen auf das Risiko zu

quantifizieren und damit gesamthaft kostenoptimale Erhaltungsstrategien zu identifizieren.

Betreiber der Bahntunnel haben sich in den letzten Jahren stark an **Bilderkennungs- methoden** orientiert, um die Inspektionsaufnahmen zu vereinfachen. Diese Thematik umfasst nicht nur die Bildaufnahme und deren Bearbeitung, sondern auch die Systematisierung und Automatisierung der Interpretation [51], [105]. In den deutschsprachigen Ländern, u.a. in der Schweiz, sind ebenfalls konkrete Fallbeispiele dokumentiert [60], [76].

Ist die Beurteilung des Bauwerkszustandes aufgrund des angetroffenen Schadensbildes nicht abschliessend möglich, so ist eine objektbezogene Schadensanalyse unter Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren zu veranlassen. **Zerstörungsfreie Inspektions- methoden** für Tunnelverkleidungen wurden in den letzten Jahren ausführlich untersucht und entwickelt. ITA konnte mit dem Dokument [19] und anschliessend mit der Bilanz des Standes der Technik Ende der neunziger Jahre [52] zeigen, dass viel über solche Methoden mit spezieller Anwendung für Tunnelbauwerke geforscht wurde. Methoden, wie elektrische und magnetische Verfahren, optische Verfahren, thermische Verfahren, akustische Verfahren, Ultraschall-Verfahren, dynamische Verfahren, Mikrowelle, Radar, Durchstrahlungsprüfung, chemische Prüfverfahren usw., sind detaillierter in den Dokumenten [32], [37], [111] und [120] zu finden. Weiter ist noch ein interessanter Artikel zum Projekt ANR MéDiTOSS [24] der RATP zu erwähnen, in dem die Kombinationen von verschiedenen Methoden zur Anwendung kommen.

Es wurden zum Beispiel Untersuchungsmethoden für den Verfallsprozess Leckage im zweischaligen Verkleidungssystem in direktem Zusammenhang mit dem Thema Tunnelerhaltung [69] in der Schweiz geforscht. Dabei wurde die Aussagekraft der Thermographie mittels tragbaren Wärmebildkameras für die Ortung von Leckstellen in zweischaligen Tunnelabdichtungen untersucht. Das Hauptziel der Untersuchungen war die möglichst präzise Ortung von Leckstellen in den Abdichtungsmembranen.

Weitere Forschungsarbeiten behandeln spezifische Probleme der Vortriebsphase. Diese können im Zusammenhang mit dem Langzeitverhalten der angrenzenden Gebirge hilfreich sein, wie zum Beispiel die Forschung im Bereich Vorauserkundung von wasserführenden Zonen oder Karst [98], [99] und [100].

Spezifische **Überwachungsmethoden mit Sensoren** sind nicht nur für Kunstbauten interessant, sie wurden auch in verschiedenen Tunneln mit Erfolg getestet. Einer der letzten Beiträge, im Jahr 2014 publiziert, liefert eine sehr gute Bestandaufnahme: „Sensing solutions for assessing and monitoring tunnels“ [2]. Weitere Beiträge beziehen sich sowohl auf Brücken als auch auf Tunnel (Erfahrung in Bahntunnel „Monitoring System of Railway Tunnels with Wireless Sensor Network“ [44]). Weitere zu erwähnende Beiträge sind [32] (Mikrowellensystem für die zerstörungsfreie in-situ Feuchtemessung in Bauwerken sowie faseroptische Sensoren für die Bauwerksüberwachung), [102] (Smart Sensor-Technologie und drahtloses Kommunikationsnetz), [109] (Anwendung von Sensoren aber vorwiegend für die Sicherheitseinrichtungen), [117] (Einleitung über die Anwendung von faseroptischen Sensoren für die Bauwerksüberwachung mittels einem spezifischen Konzept: Structural Health Monitoring (SHM) und [120] (z.B. Laserstrahllinie von optischen Detektoren für Rissbeobachtung).

*Erkenntnisse:*

- *Sollte die Beurteilung des Bauwerkszustandes aufgrund des angetroffenen Schadensbildes nicht abschliessend möglich sein, so ist eine objektbezogene Schadensanalyse unter Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren zu veranlassen.*
- *Tunnelinspektionen sind mit hohen Kosten verbunden, stellen aber trotzdem nicht immer ausreichende Informationen für eine zukünftige Erhaltungsplanung zur Verfügung. Der Grund dafür ist hauptsächlich auf mangelnde Grundlagen zurückzuführen.*
- *Bahnunternehmungen haben in den letzten Jahren eine konstruktive Analyse*

*gestartet um die Inspektionsprozesse zu vereinfachen und teilweise zu automatisieren. Bei Strassentunneln ist die Problematik zwar ähnlich, es fehlen jedoch bis heute Vergleiche und eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Methoden.*

- *Die Literatur zeigt, dass mithilfe von Untersuchungsmethoden sowie messtechnischer Überwachung ein grosses Verbesserungspotential vorhanden ist. Diese sind zu analysieren und in die Inspektionsverfahren zu integrieren.*
- *Das Risikomanagement ist sehr selten Bestandteil des Inspektionsprozesses, hier sind Risikomanagementprozesse aus anderen Disziplinen in Betracht zu ziehen, damit die Effizienz der Inspektionsprozesse der Tunnelbauwerke gesteigert werden kann.*

## 2.1.4 Entscheidungsprozesse

Wie einleitend im Kapitel 2 erwähnt, können Risikoaspekte in den Entscheidungsprozessen erst in Erwägung gezogen werden, wenn sie in den einzelnen Prozessen Inventarisierung, Überwachung und Erhaltungsplanung Berücksichtigung finden.

Es ist diverse Literatur zur Typisierung der **Schadensbilder** und der **Verfallsprozesse** im Bereich von Tunnelbauwerken und Kunstbauten vorhanden. Schadensbilder und Verfallserscheinungen infolge Korrosion von Betonstahl [61], Betonalterung (zeitabhängige Änderung der Materialeigenschaften) [7], [55], [77], [81], Schäden von Abdichtungssystemen, [43], [67], [69], [71] und [75] und das Verhalten des quellfähigen Felsen vor allem im Gipskeuper [101] behandelt. F. Sandrone beschreibt in ihrer Dissertation [56] vorwiegend das zeitliche Verhalten der Verkleidung (ausgehend von der Inbetriebnahme bis hin über die gesamte Lebensdauer) und die dazu gehörenden Angriffsfaktoren, Verfallsprozesse und alters- und abnutzungsbedingten Materialentwicklungen. Das Thema „Versinterungsprobleme bei Bauwerksentwässerungen und Tunneldrainagesystemen“ [62] wurde vor allem im Rahmen von Dissertationen an der ETH untersucht, ist aber auch in [88] zu finden. Spezifische Schäden und deren Entwicklung bei Kunstbauten und Tunneln, [6], [27], [45], [61] (Schadensmechanismen der Betonkorrosion in Tunnelbauwerken), [77], [78], [103] wurden in zahlreichen Forschungsprojekten über Stahlkorrosion im Beton erforscht und liefern gewisse Ansätze, welche jedoch für das Teilsystem Tunnel zu überprüfen sind. Eine Auflistung von potenziellen Schäden zeigt der „Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers du désordre vers le diagnostic [20] fiches de désordres“. Hinweise über die Schadensursachen und die Verfallsprozesse, jedoch ohne fachliche Begründung sind im Dokument „Origines, causes possibles, facteurs aggravants,“ „Conséquences, évolutions possibles“ zu finden [<http://www.outils-cetu.fr/didactu/tunnel/viedelouvrage/vietun/Dsordres,risquesetdiagnostic.html>].

Zu den Themen **Risikomanagement**, **Bewertungsmethodik** und **Prognosemodell** gibt es deutlich mehr Literatur im Zusammenhang mit Strassen- bzw. Kunstbauten-Erhaltungsmanagement, (vgl. [34], [57], [82], [113], [116] und [118]) als für Tunnelbauten. Diese sind zum Teil auch für Tunnelbauwerke umsetzbar. Einen wichtigen Beitrag stellt das Dokument „Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructure“ 11th International conference on structural safety and reliability“ [108] mit aktuellen Forschungsinformationen dar. Zum Thema Risikoanalyse der Tunnel im Zusammenhang mit der Optimierung der Erhaltungsmassnahmen (life-cycle cost) und der Erstellung von effizienten Investitionsprogrammen über die Lebensdauer der Tunnel wurde in den letzten Jahren in verschiedenen Ländern geforscht [10], [40], [47], [104], [107]. Auch in Bauprojekten haben sich probabilistische Modelle für die Voraussage von Risiken in der Tunnelausführung durchgesetzt (vgl. [4], [14]).

Die in der o.g. Literatur beschriebene Methodik der Risikobetrachtungen bezieht sich zum grossen Teil auf ein einziges Ereignis und ist daher nicht direkt umsetzbar. Für das Erhaltungsmanagement von Tunneln ist zwingend eine vergleichende Risikobetrachtung anzuwenden und eine Systemgrenze zu setzen.

Infolge von schweren Grossereignissen in Strassentunnel in den Jahren 1999 und 2001 wurde in der Schweiz und allgemein auf europäischer Ebene viel unternommen, um die Sicherheit der Benutzer zu evaluieren und gegebenenfalls zu verbessern. Dem Thema „Tunnelerhaltung“ wurde hingegen wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Veröffentlichungen von AIPCR und aus Frankreich konzentrieren sich hauptsächlich auf den allgemeinen Tunnelbetrieb und die dazugehörige Sicherheit [124] bis [135]. In Nordamerika wird vorwiegend zu den Themen Tunnelsicherheit und Verkehrsmanagement und seit 2004 vermehrt zur Vorbeugung von Terroranschlägen geforscht [136]. In diesem Zusammenhang sind noch [8], [12], [13], [42] und [48] zu erwähnen. Sehr spezifisch und mehr im Bereich der Sicherheit infolge Naturgefahren wurde eine Richtlinie durch das ASTRA [82] publiziert.

Mit dem Ziel eine einheitliche **Bewertungsmethodik** zu schaffen, wurden in der Schweiz, zwei Forschungsprojekte durchgeführt. Zunächst das Forschungsprojekt „Erhaltungsmanagement - Gesamtbewertung- Substanz- und Gebrauchswert“ [84] und kürzlich wurde das Forschungsprojekt „Gesamtbewertung von Kunstbauten“ [86] beendet. Dieses letzte Dokument stellt eine zum Teil objektive Methodik dar (für ausgebildete Fachingenieure) und berücksichtigt zusätzlich zu den Typen des Schadens auch dessen Schweregrad sowie das Ausmass, welche die Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit beeinflussen. Diese Vorgehensweise bildet einen guten Ansatz zur Weiterentwicklung einer neuen Bewertungsmethodik für bergmännische Tunnel. Ähnliche Vorgehensweisen sind auch im Ausland zu finden, wie in den Dokumenten [15], [20], [74], [106] und [114] festgehalten wurde.

*Erkenntnisse:*

- *Die Dissertation von F. Sandrone gibt die Richtung an, wie das Erhaltungsmanagement von Tunneln umgesetzt werden sollte. Die Informationen, welche man beim Bau gesammelt hat, sollen in einem Prognosemodell berücksichtigt werden. Diese Informationen können als Initialzustand betrachtet werden. Während der Nutzung gibt es weitere Einflüsse (Verkehr) oder Veränderungen der Baugrundeigenschaften, welche bei einer Zustandsprognose zu berücksichtigen sind. Es ist klar, dass sowohl Initialzustand mit seiner Informationsfülle als auch der Zeitzustand mit weitaus wenigen Informationen bei der Zustandsprognose zu berücksichtigen sind.*
- *Leider sind nicht alle Bauelemente der Tunnelbauwerke umfassend behandelt (z.B. Tunnel mit Tübbing). Hinweise im Zusammenhang mit den Schadensbildern und Verfallsprozessen (u.a. Betonverwitterung/Alterung) sind demnach nicht ausreichend, um ein Entscheidungsmodell für die Erhaltungsplanung aufzubauen. Weiter sind die vorhandenen Beiträge nicht mit Lebenszykluskosten verbunden und können die Entscheidungsprozesse daher nicht unterstützen.*
- *Die oben erwähnten Einflussfaktoren spielen eine wesentliche Rolle in den Verfallsprozessen; ein sachlicher Zusammenhang mit den Entscheidungsprozessen ist jedoch bis jetzt nicht resp. nur sehr oberflächlich berücksichtigt.*
- *In Zusammenhang mit der Risikomethodik und den Risikobetrachtungen sind theoretische Modelle vorhanden. Die Erfahrung aus bestehenden Projekten bestätigt, dass die Erhaltungsplanung stark mit nicht verfolgbaren Schadensprozessen verknüpft ist. Mögliche Prognosemodelle für bergmännische Tunnel sind auf ihre Umsetzbarkeit und Integration in die Entscheidungsfindung zu evaluieren.*

## 2.1.5 Erhaltungsmassnahmen und Kostenmodell

Über **Massnahmenkataloge und Kostenermittlung** gibt es wenige Projekte, die den Tunnel direkt betreffen (vgl. [59], [88] und [62]). Massnahmen für Flächeninstandsetzungen wurden ausschliesslich für Kunstbauten behandelt (Reparaturmörtel [70], Beton [91], Oberflächenschutz [90], [93], [94], [96], oder Instandsetzung von Galerien [95] oder Brücken [92]). Das Handbuch „Highway and Rail Transit Tunnel Maintenance and Rehabilita-

tion Manual 2004“ [121] behandelt sowohl Strassen- als auch Bahntunnel, liefert dennoch keine Zusatzinformationen im Vergleich zur schweizerischen Literatur. In den letzten Jahren ist die Anzahl an Erhaltungsprojekten für bergmännische Tunnel stark gestiegen. Diese bilden ein ausreichendes Mengengerüst um Kostenkennwerte zu erhalten. Neben einer sicherlich grossen Datenmenge, besteht die Hauptproblematik darin, die zur Verfügung stehenden Kostendaten so zu strukturieren, dass sie für die Erhaltungsplanung verwendbar werden.

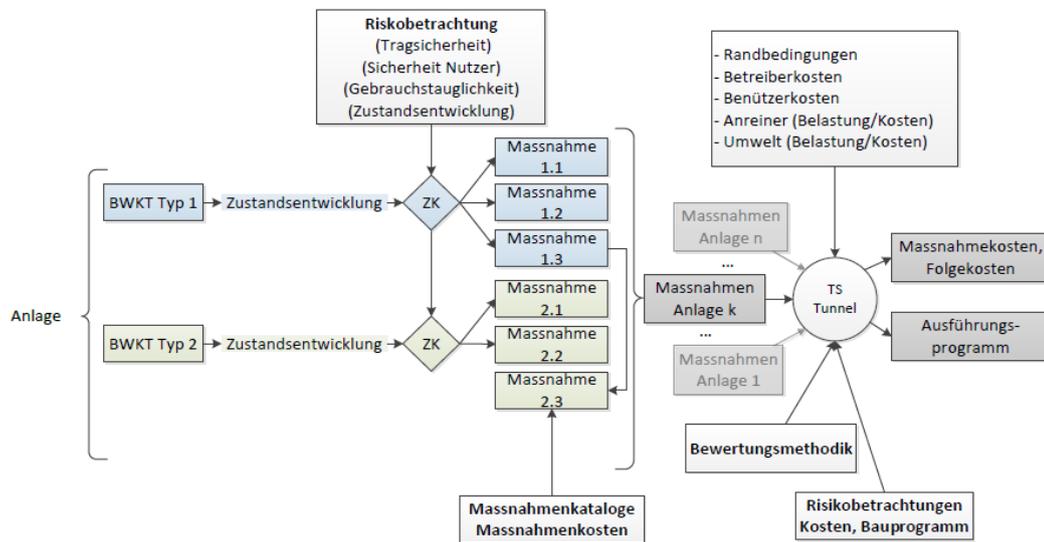


Abb. 2: Beispiel möglicher Massnahmen für die Bauwerkteile Ringbeton und Zwischendecke

Für das Teilsystem Tunnel sind im Hinblick auf die mittelfristige und langfristige Planung, **Kostenangaben** erforderlich, damit die Ermittlung der optimalen Erhaltungsvariante (Unterhaltsmassnahmen rechtzeitig einleiten resp. zu einem Zeitpunkt, an welchem die Eintrittswahrscheinlichkeit von nachteiligen Konsequenzen für die Allgemeinheit vernachlässigbar klein ist), sowohl für das Teilsystem als auch für das Gesamtsystem möglich ist. Je nach Unterhaltsstrategie ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse, die miteinander verglichen werden können. Der Ermittlung von Unterhaltsmassnahmen sowie der Berechnung des Finanzbedarfs liegt in der Regel ein Optimierungsverfahren zu Grunde. Seit einigen Jahren werden in der Schweiz vermehrt Wirtschaftlichkeitsüberlegungen gemacht, sowohl für die Verkehrsanlagen (VSS-Normen [83]) als auch für Kunstbauten („Kostenmodell für das Erhaltungsmanagement von Kunstbauten“ [87]). Für die Kostenermittlung ist das Tool KUBA-MS (KUBA-Managementsystem [83], vgl.

im Einsatz.

Verschiedene andere Vorgehensweisen geben gute Ansatzpunkte. Einige Konzepte beschreiben ein probabilistisches Vorgehen, welches für die Tunnelinstandhaltung einen guten Ausgangspunkt darstellt. Ein Beispiel davon ist „Probabilistic risk assessment of highway tunnels“ [13], und [40]. Weitere Kostenmodelle wurden Ende der neunziger Jahre durch die AIPCR vorgestellt [105]. Einige dieser Forschungsarbeiten zeigen Kostenoptimierungskonzepte auf, welche in EDV-Tools umgesetzt wurden [53]. In den Forschungsberichten [113], [114], [115], [116], [121] und [122] sind Methoden für die Optimierungsanalyse der Massnahmen (life-cycle cost) und für effiziente Investitionsprogramme über die Lebensdauer der Tunnel (Worth method, Analyse method) beschrieben. Sehr oft schildern diese Artikel das Optimierungspotential in Betriebskosten [9], [40], [104], [113], [115], [119], [120].

Für Fahrbahnen ist die Kostenermittlung im Dokument „Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen“ [58] und in anderen Forschungsprojekten im Zu-

sammenhang mit Fahrbahn- und Kunstbautenerhaltung, [57] und [58], sowie in den damit verbundenen Einzelprojekten thematisiert. Auch in Deutschland ist das Thema dokumentiert, beispielsweise für Strassenbrücken [37].

Im Hinblick auf die Massnahmen der präventiven Erhaltung, ist das Bauwerk Tunnel oftmals nicht vollständig behandelt. Beispielsweise sind im Umfang der Massnahmen sekundäre Tragwerke (z.B. Zwischendecke und dessen Abstützung oder Aufhängungen) nicht berücksichtigt. Andererseits sind **Reparaturmassnahmen** für die wichtigsten Schäden sehr detailliert abgehandelt. Der Beitrag der ITA Working Group on Maintenance and Repair of Underground Structures „Maintenance and Repair - Study of methode for repair of tunnel lining“ [28] stellt eine sehr gute Grundlage für eine Katalogisierung der Massnahmen der Tunnelgewölbe dar. Weitere Untersuchungen, welche Erhaltungsmassnahmen für die Bauwerksteile Gewölbebeton betreffen, sind in den Berichten [11], [21], [27], [39], [46], [97] zu finden. Massnahmen für die Abdichtung sind in den Dokumenten [17], [38], [71] und [106] thematisiert, während allgemeine Massnahmen für die wesentlichen Bauwerksteile in den Berichten [27], [28], [39], [52], [53] und [121] vorhanden sind. Massnahmen im Bereich der Tübbingbauweise wurden zum Teil in den fernöstlichen Ländern erforscht. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Konstruktionsmethodik und die gestellten Anforderungen nicht mit denjenigen in Europa vergleichbar sind [5].

*Erkenntnisse:*

- *Auf Basis der Definition von unterschiedlichen Erhaltungsmassnahmen (siehe Abb.2) ist es möglich einen standardisierten baulichen Massnahmenkatalog zu erstellen.*
- *Die Erhaltungsmassnahmen sind in Abhängigkeit ihrer Wirkung, ihrer Kosten und ihres Ausführungsaufwandes zu systematisieren und katalogisieren.*
- *Diese Systematisierung gilt sowohl für präventive als auch für korrektive Massnahmen.*
- *Aufgrund der Komplexität der anwendbaren Massnahmen, sind diese mit Bezug auf Zustand, Kosten und Nutzen auf ihre langfristigen Auswirkungen zu entwickeln. Unsicherheit und Variabilität in der Ausführung sind im Rahmen der Risikobewertungen zu berücksichtigen.*

## 2.1.6 Umsetzungskonzept, EDV-Tools

Die praktische Umsetzung beginnt mit dem Aufbau einer **Tunneldatenbank** und ist fast überall zu finden. In allen Ländern wurden zumindest Konzepte entwickelt, zum Teil auch spezifische Tools im Zusammenhang mit Inspektionsbefunden und Inspektionsberichten. Zu überprüfen ist, ob der Detaillierungsgrad mit KUBA vergleichbar ist. Schon F. Sandrone [56] hat eine mögliche Ergänzung aufgezeigt, um die zu erfassenden Daten und die räumliche Analyse in der Erhaltungsplanung zu optimieren [72]. In der ausländischen Literatur sind einige Konzepte und deren Umsetzung in EDV-Tools kurz beschrieben. Alle diese Tools bieten Funktionalitäten für die Inspektion und die Verwaltung von Bauwerken an, dennoch sind sehr wenige spezifisch für Tunnelbauwerke ausgerichtet [18], [23], [24], [29], [107]. Kein Tool zeigt einen direkten Zusammenhang zwischen den Grunddaten und dem effektiven Zustand auf.

*Erkenntnisse:*

- *KUBA bietet eine gute Ausgangslage um ein Erhaltungsmanagement-Tool aufzubauen. Zusätzliche Ergänzungen liefert die von F. Sandrone aufgebaute Tunneldatenbank (TDB).*
- *Weitere analysierte Konzepte und Tools weisen Lücken auf und sind deshalb in der bestehenden Form als Grundlage für ein Erhaltungsmanagement-Tool nicht verwendbar.*
- *Die Erhaltungsplanung ist mit einem sehr grossen Datenbedarf verbunden, welche nur durch ein oder mehrere Softwaretools zu handhaben ist.*

### 2.1.7 Die nationalen und internationalen Normen zum Thema

In diesem Forschungsgebiet gibt es wenige **Normen und Richtlinien**. In der Schweiz findet man vor allem Normen für den Neubau (SIA-Norm 197 und 198) und die Erhaltungsplanung resp. Projektierung an bestehenden Einzelobjekten (SIA-Norm 260, 269 und 469). Das Bundesamt für Strassen ASTRA regelt die Erhaltung von Tunneln durch die in der Einleitung genannten Richtlinien [63], [64]. Die Sicherheitsanforderungen für den Betrieb sind in der Weisung 74001 „Sicherheitsanforderungen an Tunnel im Nationalstrassennetz“ und „Operative Sicherheit Betrieb - Vorgaben für die Tunnel und die offene Strecke“ beschrieben.

In Quellen aus Frankreich, Deutschland und Österreich sind wenige Hinweise auf ein Erhaltungsmanagement von Tunnel vorhanden. Der Fokus liegt vorwiegend auf Inspektionen und Bestandsaufnahmen sowie Betrieb und Instandsetzung der Tunnel.

## 2.2 Literaturübersicht: Stand der Forschung BSA

Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) leisten einen wesentlichen Beitrag zur Verkehrssicherheit, insbesondere im Ereignisfall. Im Erhaltungsprozess, bilden die BSA ein Teilsystem, das stark mit dem Teilsystem Tunnel zusammenhängt.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen im Vergleich mit den Teilsystemen Kunstbauten, Trassebau und Tunnel weniger homogen sind. In der Regel sind die Ausrüstungen stark gegliedert und geographisch weitgehend verteilt. Die typische Lebensdauer eines Grossteils der BSA ist gegenüber anderen Teilsystemen in der Regel kürzer. Die Zielsetzungen des Erhaltungsmanagements für BSA sind aber ähnlich wie für bergmännische Tunnel.

Um die Aufgaben der jeweiligen Betreiber zu definieren (baulicher und betrieblicher Unterhalt) wurde eine Absichtserklärung durch das ASTRA publiziert (Absichtserklärung EMS-CH – ASTRA 83 002 – 2007).

Weiter wurde im Auftrag des ASTRA ein Fachkonzept über ein Management System für Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen der Schweizer Nationalstrassen (EMS-CH) erstellt. Dieses Fachkonzept beschreibt im Detail die Erhaltungsprozesse für die BSA-Anlagen mit dem Ziel die Vereinheitlichung des betrieblichen Unterhalts der BSA, gestützt durch eine zentrale Informationsplattform, zu realisieren (siehe Abb.3).

Im Ausland sind die BSA zum Teil in die Überwachungs- und Unterhaltprozesse der bergmännischen Tunnel integriert. In Frankreich gibt der „Fascicule 40“ vom CETU [22] die nötige Instruktion, um die Inspektionen der BSA durchzuführen. Bewertungsverfahren sind nicht behandelt [20]. In den USA behandelt das „Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual“ [111] auch die wesentlichen BSA Elemente der Lüftung, Beleuchtung und anderer sicherheitsrelevanten Anlagen zur Feuerbekämpfung, jedoch nur im Hinblick auf die Inspektion.

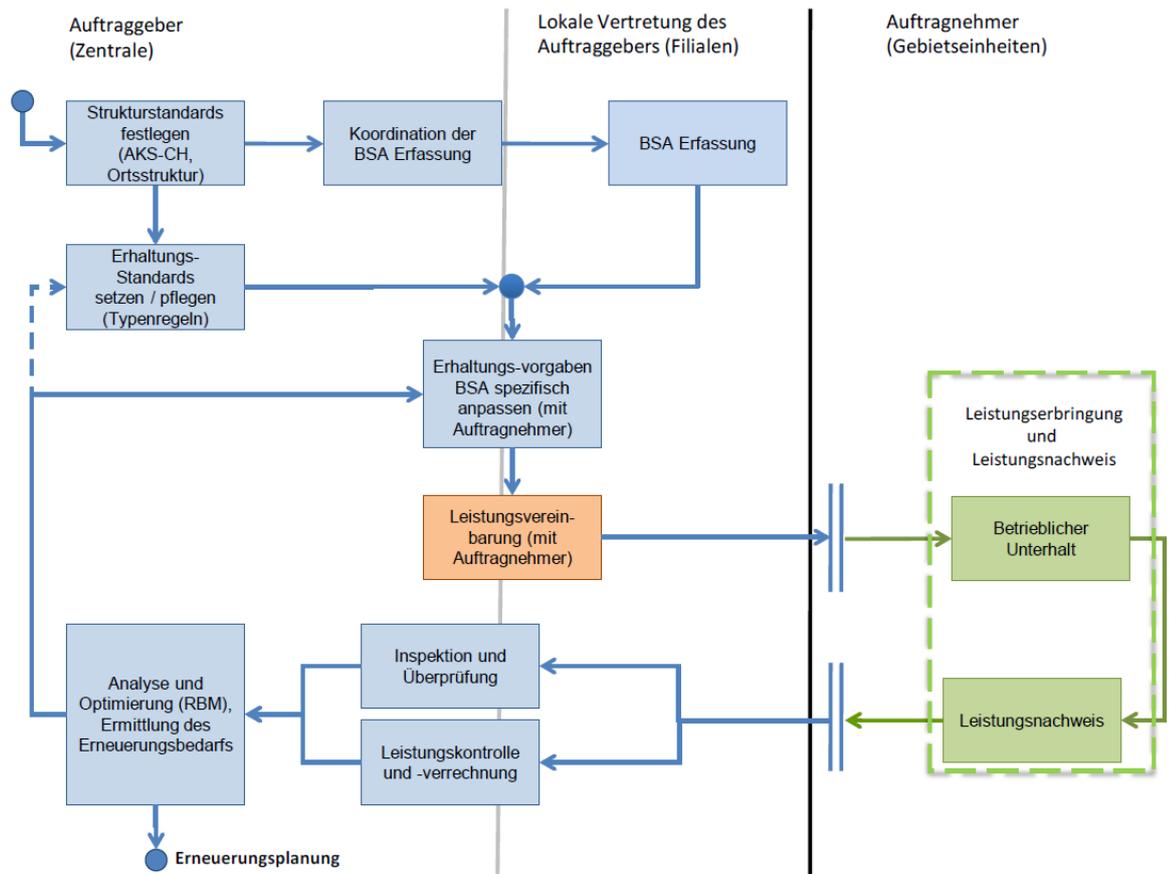


Abb. 3: Erhaltungszyklus EMS-CH

## 2.3 Wissenslücken

Ein Tunnelbauwerk setzt sich prinzipiell aus vier verschiedenen Anlageteilen zusammen: dem Gewölbesystem, den Nebenräumen, der Fahrbahn und der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen. Die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen sind nicht Bestandteil dieses Forschungspaketes. Das Gewölbesystem enthält die Tragelemente und die Abdichtungssysteme, die Fahrbahn umfasst das gesamte Entwässerungssystem, die Bankette mit Kabelrohrblock, die Foundationsschicht und den Belag. Im Rahmen der Massnahmenstudie spielt die Innengeometrie (Lichtraum, Fahrbahnbreite, Bankettbreite) eine wesentliche Rolle und muss daher in der Erhaltungsplanung zwingend berücksichtigt werden.

F. Sandrone beschreibt in ihrer Dissertation hauptsächlich das zeitliche Verhalten der Verkleidung (ausgehend von der Inbetriebnahme bis hin über die gesamte Lebensdauer) und die dazu gehörenden Angriffsfaktoren, Verfallsprozesse und alters- und abnutzungsbedingten Materialentwicklungen. Sie gibt somit die Richtung an, die das Erhaltungsmanagement einschlagen sollte. Auf der Basis der Ausgangslage (Gebirge, Baukonzept, Ausführungsdetail, Ausführungsmethode und Baumaterialien) und der Nutzung (Umwelt) müssen die potentiellen Probleme im Voraus erkannt und für die Erhaltungsplanung des Gesamtsystems bewertet werden.

Wie in der nationalen und internationalen Literaturanalyse aufgezeigt, bestehen im Bereich von bergmännischen Tunneln der Strasseninfrastruktur wichtige und detaillierte Studien, Richtlinien und Berichte. Dies ist in der nachfolgenden Graphik (Abb. 4) dargestellt, wobei die Mehrheit dieser Fachliteratur die Themen Überwachung, Zustandsbewertung und Massnahmen betrifft.

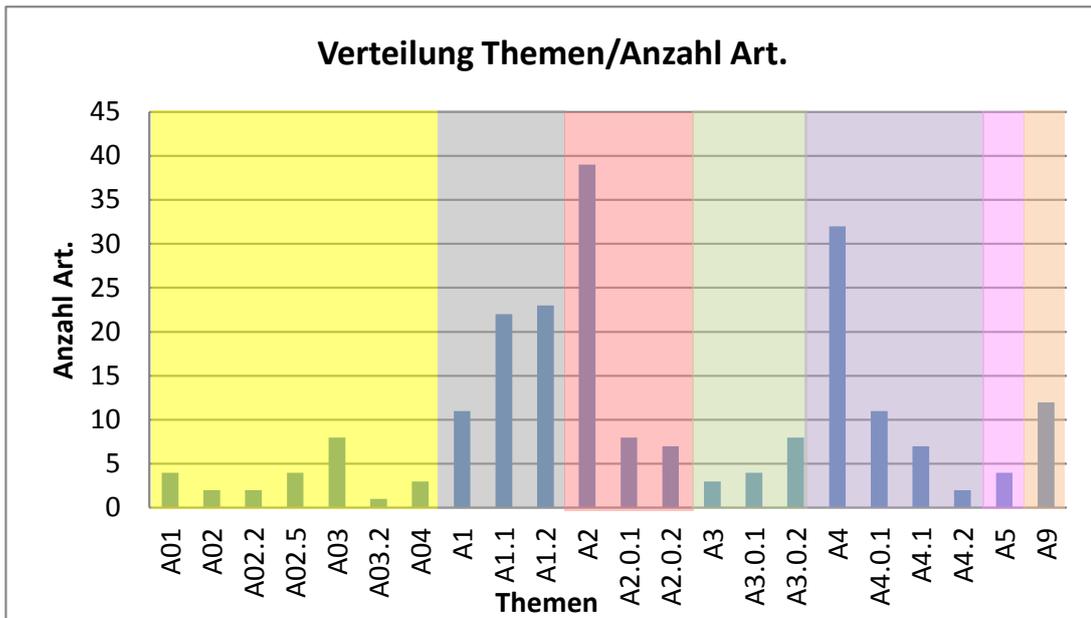


Abb. 4: Literatursynthese nach Themen gegenüber Anzahl Artikel

A0	Bauwerksgrundlage
A01	Gebirgseigenschaften
A02	Bauwerkstypologie
A02.2	Ausführungsmethode
A02.5	Innenringverkleidung
A03	Einflussfaktor Betrieb
A03.2	Verkehr
A04	Kosten
A1	Überwachungsplanung
A1.1	Allgemeine Überwachung
A1.2	Inspektion, Beobachtung
A2	Zustandsbewertung /-prognose
A2.0.1	Zustandsverlauf, Verfallgesetz
A2.0.2	Probabilistische Zustandsentwicklung
A3	Überprüfung
A3.0.1	Untersuchungsmethode
A3.0.2	Langzeitverhalten, Material
A4	Massnahmen, Massnahmenkatalog
A4.0.1	Risikobetrachtung
A4.1	Finanzbedarf
A4.2	Ausführungsprogramm
A5	Übergeordnetes Erhaltungsmanagement des Gesamtsystems
A9	Datenbank Konzept und Tools

Dennoch fehlen grundlegende Erkenntnisse für einen langfristigen und systematischen Planungsprozess für die Erhaltung von bergmännischen Tunneln.

In der schweizerischen Praxis erfolgt bis heute die Erhaltung von bergmännischen Tunneln projektbezogen und noch nicht standardisiert. Es existieren Grundlagen in Bezug auf die Gliederung von Tunneln. Diese muss jedoch konkretisiert und zu anderen Teilsystemen der Strasseninfrastruktur abgegrenzt werden. Auch die internationale Literatur zeigt wenig über angewandte Praxis für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln. Es fehlt somit eine Basis, um den Prozess des Erhaltungsmanagements im Teilsystem Tunnel selbst sowie die Zusammenhänge und Schnittstellen zu den anderen Teilsystemen bzw. dem Gesamtsystem der Strasseninfrastruktur aufzuzeigen und zu definieren.

Wie in diesem Kapitel beschrieben, gibt es in der Schweiz und auch international umfassende Literatur zum Erhaltungsmanagement der Strasseninfrastruktur und deren Teilsysteme. Dabei bilden einerseits standardisierte Prozessschritte und andererseits notwendige Datengrundlagen die Basis für jedes Teilsystem. Bei einem Übertrag auf das Teilsystem bergmännische Tunnel lassen sich weitere Wissenslücken identifizieren. Diese werfen folgende Forschungsfragen auf:

- Welche spezifischen Schäden können mit relevanten Schadensprozessen verknüpft werden?
- Welche Inspektionsmethoden existieren im Bereich der bergmännischen Tunnel und wie zuverlässig sind sie in Bezug auf die Offenlegung von Schadensprozessen?
- Welche Auswirkungen haben Erhaltungsmassnahmen auf bergmännische Tunnel und beteiligte Anspruchsgruppen?
- Wie sieht der Prozess der Entscheidungsfindung im Bereich der Erhaltung von bergmännischen Tunneln aus?

### **Schadensprozesse**

Die Literatur enthält viele Studien über konkrete einzelne Schadensprozesse und deren Verlauf. Es fehlt jedoch ein umfassender Überblick und die Typisierung von relevanten Schadensprozessen und deren Langzeitentwicklung, welche für die Planung von Erhaltungsmassnahmen wesentlich sind. Gleichzeitig fehlen Informationen, welche Auswirkungen diese Schadensprozessstypen auf ein Bauwerk haben. Dabei stellt sich neben einer Auflistung von typischen Schadensbefunden einerseits die Frage nach der Entwicklung des Zustands und andererseits sind die monetären Folgen von festgestellten oder prognostizierten Schäden für die Risikobewertung erforderlich.

### **Inspektionsmethoden**

Eine weitere Wissenslücke besteht bei den Inspektionsmethoden, wovon es in der Praxis zahlreiche gibt. Diese werden zum Teil auch ausführlich beschrieben. Grundsätzlich fehlen jedoch Vergleiche und die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Methoden. Zudem ist bisher die Integration des Risikomanagements in den Prozess der Überwachung und der damit verbundenen Anforderungen an die vorhandenen Inspektionsmethoden nicht vorhanden. Dabei sind diese Methoden in Bezug auf ihre Aussagekraft zum betrachteten Schadensprozess zu bewerten und in Relation mit deren Kosten und der durch den Schadensprozess entstandenen Konsequenzen zu setzen. Zusätzlich fehlt eine integrierte Darstellung der Informationen aller Bauwerkparameter (Bau und Nutzung) und der Befunde. Dies ist im Hinblick auf die Thematik risikobasierte Überwachungsprogramme von Bedeutung und wird bei steigenden Kosten der Inspektionsmethoden an Relevanz gewinnen.

### **Erhaltungsmassnahmen**

Zahlreiche Veröffentlichungen bezüglich der Erhaltung von Tunneln beschreiben konkrete Tunnelprojekte und die dabei tatsächlich ausgeführten Erhaltungsmassnahmen. Für

das Erhaltungsmanagement und der damit verbundenen Lebenszykluskostenanalyse mit Nutzen- und Kosten-Anteilen fehlen generalisierte Typen von Erhaltungsmaßnahmen und notwendige Informationen in Bezug auf ihre langfristigen Auswirkungen auf Zustand, Kosten und Nutzer. In diesem Zusammenhang ist auch eine Risikobewertung von Erhaltungsmaßnahmen für bergmännische Tunnel zu entwickeln.

### **Entscheidungsfindung**

Bisher fehlen Entscheidungsmodelle für die Erhaltungsplanung und zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses und der damit verbundenen Bewertungsmethodik. Diese sollten neben anderen Lebenszykluskostenanalysen auch Nutzen- und Kostenanalysen beinhalten und Risikobewertungen in die Entscheidungsfindung integrieren. Schwierig erscheint auch die Unterscheidung zwischen rein baulichen Elementen und den Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen. Hier fehlt bisher eine klare Abgrenzung für die Entscheidungsfindung.



## 3 Systemdefinition und Systemabgrenzung für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln

### 3.1 Systemaufbau und Systemdefinition

Der Gegenstand des vorliegenden Initialprojektes sind die bergmännischen Tunnel. Der bergmännische Tunnel zeichnet sich in erster Linie dadurch aus, dass er in geschlossener Bauweise (Untertagebau) erstellt wird, während bei geringer Überdeckung vorwiegend die offene Bauweise (Tagbautunnel) angewendet wird.

Auch wenn in diesem Forschungsprojekt der Fokus auf die bergmännischen Tunnel gerichtet ist, werden im Hinblick auf das Erhaltungsmanagement und folglich auf die Massnahmenplanung bestimmte Bauelemente sowohl des Tagbautunnels, als auch von Galerien, Einhausungen, Wildtierquerungen, etc. einbezogen.

Das Teilsystems Tunnel fordert, infolge seiner Komplexität, die auf seine speziellen Gegebenheiten zurückzuführen ist (z.B.: keine direkten Ausweichmöglichkeiten, unumgängliche Linienführung während der Ausführung von Erhaltungsmassnahmen), eine methodische Strukturierung und eine eindeutige Abgrenzung zu den restlichen Kunstbauten. Im Falle von Verfallsprozessen mit schwerwiegenden Folgen, kann ein Tunnel nicht, ohne gravierende Kostenauswirkungen und massive Beeinträchtigungen, abgebrochen oder ersetzt werden. Weiter ist in diesem Fall zu berücksichtigen, dass im Gegensatz zur Ausführung von Erhaltungsmassnahmen auf offener Strecke, das Gesamtsicherheitskonzept des Tunnelbetriebs während der Instandsetzungsphasen bauliche Anpassungen erfordert und daher nicht zu unterschätzende Auswirkungen auf Betrieb, Verkehrsnutzer, Anrainer und Umwelt hat. Die baulichen Erhaltungsmassnahmen hängen massgeblich von den vorhandenen Mängeln und Schäden ab, welche sowohl zu Einschränkungen der Gebrauchstauglichkeit und Verfügbarkeit des Tunnels als auch zu Problemen der Verkehrssicherheit führen. Zudem müssen bei der Realisierung von Erhaltungsmassnahmen im Tunnel unter Verkehr immer auch die Randbedingungen wie z.B. Verkehrsführung, Nachtarbeit, verwendbare Zeitfenster, Klimaverhältnisse, etc. berücksichtigt werden.

Voraussetzung für eine langfristige, objektbezogene Erhaltungsplanung von Tunneln ist die strukturierte Erfassung aller Grundlagendaten eines Tunnelbauwerks. Dazu sind einerseits die Informationen aus der Bauphase (Bauwerksgrundlagen/Inventar) und andererseits die Erfassung des Ist-Zustandes von Bedeutung, welcher auf den Befunden der laufenden oder periodischen Überwachungen beruht.

Für die Erfassung und die Bewertung des Ist-Zustandes wird der Tunnel in separate Bauelemente unterteilt, die einzeln beurteilt werden. Die wesentlichen Anlageteile des bergmännischen Tunnels sind das Tunnelgewölbe, die Fahrbahn (aus baulicher Sicht), die Nebenbauwerke (z.B. die Zwischendecke) und die BSA (Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen), wobei letztere nicht Bestandteil dieses Forschungsprojektes sind und nur im Zusammenhang mit der Systemgrenze innerhalb der Tunnelanlage berücksichtigt werden.

Im Hinblick auf die Erfassung der Daten, wurde mit der Fachapplikation KUBA 5.0 bereits ein erster grosser Schritt in Richtung Systematisierung der relevanten Tunneldaten gemacht. Die in KUBA vorhandene Gliederung der Bauwerksdaten wird im Initialprojekt und in den sich daraus ergebenden Einzelprojekten übernommen. In der Datenbank KUBA sind sämtliche Daten betr. Inventar (Abb. 5) und Inspektionsergebnisse enthalten, jedoch keine Informationen zum weitergehenden Überwachungs- und Erhaltungsprozess. Die für die Erhaltungsplanung erforderlichen Substanzdaten, insbesondere die Eigenschaften der einzelnen Tunnelelemente sind in der nachstehenden Abbildung ersichtlich.

EIGENSCHAFTEN	TUNNEL- EIGENSCHAFTEN	FAUNA	ORTUNG	DOKUMENTE	INVENTAR- OBJEKT
		Weitere Informationen			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Generische Daten</li> <li>▪ Längsgefälle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quergefälle</li> <li>▪ Querverbindungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sicherheitsstollen</li> <li>▪ ...</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nummer</li> <li>▪ Name</li> <li>▪ Typ</li> <li>▪ Bauart</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Funktion</li> <li>▪ Baumaterial</li> <li>▪ Objektnutzung</li> <li>▪ Lüftungssystem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Werkmängel</li> <li>▪ Ausbaufestlegung</li> <li>▪ Abnahmedatum</li> <li>▪ Abnahmebeschrieb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Datum Schlussprüfung</li> <li>▪ Jahr der IBN</li> <li>▪ Baujahr</li> <li>▪ Gesteinsbeschreibung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kosten [CHF]</li> <li>▪ ...</li> </ul>	

Abb. 5: Gliederung Substanzdaten / Inventar gem. KUBA 5.0

Damit ein effizientes Konzept für die Erhaltungsplanung erarbeitet werden kann, reicht es nicht aus, die vorhandenen Schäden zu katalogisieren, sondern es müssen auch die Schadensprozesse des Tunnelbauwerks erkannt und kategorisiert werden. Die Schäden, die infolge der Schadensprozesse, entstehen, welche wiederum eine enge Abhängigkeit von den Baugrundeigenschaften und den Betriebsfaktoren aufweisen, sind i.d.R. messbar und daher bewertbar. Aus Sicht der Erhaltungsplanung interessiert darum einerseits die frühzeitige Erkennung von vorhandenen Schäden und andererseits die Geschwindigkeit, mit der sich die entsprechenden Schadensprozesse entwickeln. Dies kann nur mithilfe regelmässiger Überwachung und durch die Untersuchung der Schadensbefunde festgestellt werden.

In der nachstehenden Tabelle, als Auszug aus [56], sind beispielhaft einige Schäden und deren Ursachen dargestellt. Grundsätzlich muss eine Systematisierung der Schäden und dazugehöriger Schadensprozesse erfolgen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass eine einfache Zuordnung einer Ursache zum Schadensprozess keine ausreichende Aussagekraft hat. Oftmals spielen mehrere Faktoren eine Rolle und beeinflussen in der Summe einen Schadensprozess. Dies muss in geeigneter Form aufgearbeitet und verbessert werden.

Process	Type	Pathology	Model	Influence Factor(s)	Observed disorder	Where
Ageing	Physical, (Mechanical)	Creep & Relaxation	Deformation increase	Time, Humidity, Temperature, Stress	Deformations, Cracks	Crown, Walls
			Stiffness reduction	Material quality	Surface skin micro-cracks	Walls
Weathering	Chemical	Calcium Leaching	Porosity increase, Strength reduction,	Water circulation, Waterproofing system, Ground water chemical composition, Rock mass chemical composition, Atmosphere chemical composition,	Concretions, Weathered surfaces	Crown, Ventilation slab, Joints
			Thickness decrease	Ventilation system, Length, Traffic, Temperature, Relative humidity, Degree of saturation, De-icing salts quantity, Lining material	Reinforced concrete corrosion, Oxidation, Cracks, Scaling	Footway, Gutter, Wall foundations, Walls up to 1.5 m high, Portals
Other Actions	Mechanical, (Physical)	Ice, Frost	Thickness decrease, Strength reduction	Temperature, Water incomes, Humidity	Weathered surfaces, Cracks, Scaling	Portals, Crown
			Accidents (car collision)	Traffic	Damaged surfaces, Cracks, Scaling	Gutter, Footway, Walls up to 1.5 m high
		Fires		Temperature, Lining porosity	Spalling, Scaling	General

Abb. 6: Schadensprozesse / Schäden (Auszug aus Dissertation F. Sandrone [56])

Auf die Schadensprozesse, deren Ursachen und das Langzeitverhalten des betroffenen Bauwerkteils wird im EP1 (Langzeitverhalten und Schadensprozesse) ausführlich eingegangen, wobei das Ziel ist, einen Schadenskatalog zu erstellen und die Schadensmerkmale mit den Schadensprozessen zu verknüpfen. Für dieses Forschungsprojekt ist sowohl das praxisorientierte Fundament, wobei hier auf die bestehende Datenbank KUBA 5.0 zurückgegriffen werden kann, als auch die Erfahrung mit den bisher bekannten Schadensprozessen (siehe auch Kapitel 2.1.2) von Bedeutung.

### 3.1.1 Positionierung im Erhaltungsmanagement

Das Erhaltungsmanagement des Teilsystems Tunnel gliedert sich in das übergeordnete Erhaltungsmanagement eines Strassenabschnitts ein, welches alle weiteren Teilsysteme der Strassenverkehrsanlage – Fahrbahn, restliche Kunstbauten, Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen - miteinbezieht. Es umfasst alle Tätigkeiten, die erforderlich sind, da-

mit das Bauwerk die Anforderungen an Funktionalität, Leistungsfähigkeit, Verkehrssicherheit, Verträglichkeit und Dauerhaftigkeit im Rahmen der normalen Nutzung erfüllt. Die langfristige Erhaltungsplanung des Gesamtsystems setzt zudem voraus, dass die Optimierung bereits auf der Bauwerksebene, d.h. innerhalb eines jeden Teilsystems durchgeführt wird.

Die nachstehende Graphik stellt die wesentlichen Schritte des Erhaltungsmanagementprozesses dar. Der Erhaltungsablauf beginnt mit der Überwachung, die dazu dient den Zustand des Tunnels und dessen Funktionstüchtigkeit zu erfassen und zu bewerten. Die Beurteilung des Tunnels und seiner baulich konstruktiven Elemente erfolgt anhand der Befunde resp. Schäden, die sich aus der Überwachung ergeben. Das Ziel der Überwachung ist es, allfällige Schadensmechanismen frühzeitig zu erkennen, eine Prognose für das Tragwerksverhalten zu erstellen und entsprechende Massnahmen zu planen und diese bei Bedarf einzuleiten. Schadensprozesse, welchen nicht rechtzeitig entgegen gewirkt wird, führen zu einer Herabsetzung der Sicherheit und der Verfügbarkeit des Tunnels. Die aus der Zustandserfassung errungenen Informationen dienen dazu, Grundlagen für weitere Entscheidungen bereitzustellen. Klare Entscheidungen im Hinblick auf die Umsetzung von Erhaltungsmaßnahmen sind nur möglich, wenn die notwendigen Entscheidungsgrundlagen umfassend vorhanden sind. Die abschliessende Phase des Erhaltungsmanagementprozesses umfasst die Projektgenerierung resp. Massnahmenplanung. Bei schwerwiegenden Schäden am Tunnelbauwerk, z.B. infolge von speziellen Ereignissen, welche die Sicherheitsanforderungen und die Verfügbarkeit beeinträchtigen können, werden i.d.R. Sofortmassnahmen ausgelöst. Dieses Szenario ist jedoch nicht Gegenstand dieses Forschungsprojektes. Der Fokus richtet sich hier auf die Optimierung der langfristigen Erhaltungsplanung.

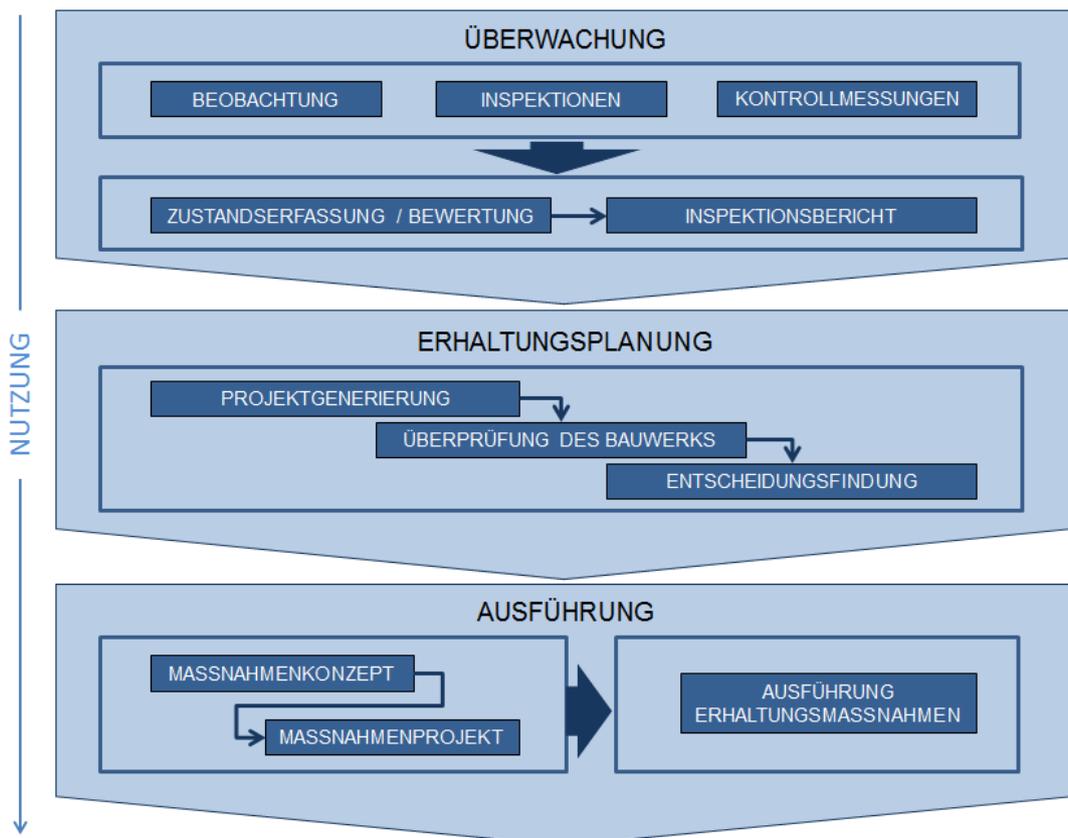


Abb. 7: Teilprozesse des Erhaltungsmanagements

Der aktuelle Stand des Erhaltungsmanagements zeigt, dass bis vor Kurzem jede Baustelle, in welcher Erhaltungsmaßnahmen ausgeführt wurden, vorwiegend als Einzelobjekt betrachtet wurde und nur geringe und unwesentlichen Rückflussdaten zur Verfügung standen. Konkrete Rückflussdaten, insbesondere in Bezug auf den Einsatz von finanziel-

len Mitteln sind entscheidend für die Schaffung von Entscheidungsgrundlagen und für die weitere Planung von optimalen Massnahmen. Nachdem der Erhaltungsbedarf am Nationalstrassennetz in den letzten Jahren deutlich gestiegen ist, hat der Bund bereits einige Richtlinien veröffentlicht, in denen eine übergeordnete Unterhaltsplanung bezüglich Projektierung und Ausführung von Erhaltungsmaßnahmen vorgegeben ist. Von Vorteil wäre in diesem Zusammenhang, über eine, auch nur grob definierte Kostenstruktur zu verfügen, die als Entscheidungsgrundlage für die Auslösung der erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen angewendet werden könnte. Die Strukturierung der Kosten sollte so weit erfolgen, dass ein Vergleich zwischen den Kosten derselben oder ähnlichen Bauelementen machbar ist.

### 3.1.2 Systemabgrenzung zu relevanten Teilsystemen

Wie einleitend erwähnt, werden die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen in diesem Initialprojekt nicht schwerpunktmässig behandelt. Wesentlicher Grund dafür ist der unterschiedliche Lebenszyklus zwischen baulichen und elektromechanischen Anlagen innerhalb des Teilsystems Tunnel.

Der Instandsetzungs- und Erneuerungsbedarf der BSA (insbesondere des Lüftungssystems/ Brandschutzes und der Leittechnik) im Tunnelbereich ist in erster Linie auf die neuen Erkenntnisse, vor allem in Bezug auf die Thematik der Emissionen, der Abführung der Rauchgase und auf die Veränderungen der Fahrzeuge, die durch die Tunnel fahren, zurück zu führen. Ferner fand in den letzten Jahren allgemein ein Umdenken in der Bewertung der Risiken statt und es wurden zahlreiche Risikoanalysen zu diesen Problematiken ausgeführt. Ein weiterer Grund kann auch darin gesehen werden, dass seit den grossen Tunnelereignissen um die Jahrtausendwende die gesetzlichen und normativen Anforderungen an die technische Tunnelausrüstung erheblich verschärft worden sind, um das allgemeine Sicherheitsniveau in den Tunneln zu erhöhen und die Betriebs- und Sicherheitsanlagen dem Stand der Technik anzupassen. Da die Nutzungsdauer der Betriebs- und Sicherheitsanlagen vorwiegend von der Alterung, der Technikentwicklung mit relativ kurzen Produktzyklen und entsprechend zeitlich begrenzter Ersatzteilversorgung bzw. Software-Supportzeiträumen abhängt, ist sie viel kürzer einzustufen als diejenige der baulichen Konstruktionen. Dies hat bisher dazu geführt, dass die Koppelung von Erhaltungsmaßnahmen der baulichen Elemente und Instandsetzungsmaßnahmen der BSA im Tunnel relativ schwer durchführbar war. Da jedoch zur Sicherstellung der Ziele sowohl die baulichen als auch die betrieblichen Erhaltungsmaßnahmen notwendig sind und deren Ausführung auch aufgrund beschränkter Finanzmittel frühzeitig geplant werden muss, ist es sinnvoll diese Tätigkeiten nicht voneinander losgelöst, sondern in ihrer Gesamtheit zu betrachten. Dies kann nur erfolgen, wenn eine koordinierte Planung der Erhaltungsmaßnahmen frühzeitig in die Wege geleitet wird, was wiederum voraussetzt, dass eine laufende Überwachung des Bauwerks sowie dessen Betriebs- und Sicherheitsanlagen stattfindet [137].

Das über alle drei Teilsysteme Kunstbauten, Fahrbahn und BSA übergreifende Erhaltungsmanagement verlangt eine klare Grundlagenerarbeitung und eine abgestimmte Entscheidungsfindung, auf dessen Basis zeitlich und örtlich koordinierte Massnahmenpakete über einen definierten Strassenabschnitt geplant und realisiert werden können.

## 3.2 Ziele des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln

Grundsätzlich ist das Ziel des Erhaltungsmanagements der Strasseninfrastruktur die Sicherstellung eines den gesellschaftlichen Erwartungen entsprechenden Dienstleistungsniveaus. Dies setzt voraus, dass die Bedürfnisse von Strassenbetreiber, Strassenutzer, Anrainer und Umwelt Berücksichtigung finden. Es sind damit auf der vorhandenen Strasseninfrastruktur die maximale Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit zu minimalen Kosten anzustreben und dabei die geforderte Sicherheit und Verträglichkeit einzuhalten.

Daraus leiten sich für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel als ein Teilsystem der Strasseninfrastruktur folgende konkretisierte Ziele ab:

- Gewährleistung eines dauerhaft guten Zustands zur Sicherstellung von Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Verträglichkeit bis zu einem akzeptierten Restrisiko eines Störereignisses
- dafür erforderliche Erhaltungsmassnahmen sollen langfristig die Verfügbarkeit so wenig wie möglich beeinflussen und eine hohe Kosteneffizienz aufweisen

Unter der Berücksichtigung dieser Zielsetzungen liefert das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln langfristige, tunnelobjektbezogene Entscheidungsoptionen für Erhaltungsmassnahmen, welche in einem übergeordneten Erhaltungsprozess mit den Entscheidungsoptionen aus anderen Teilsystemen zu Erhaltungsprojekten zusammengeführt werden. Dies ist ein Optimierungsproblem, welches ohne ausreichende Informationen bzw. Inventardaten aus den Teilsystemen, wie unter anderem Ausführungszeitpunkt, Kosten und Folgekosten von notwendigen Erhaltungsmassnahmen bzw. jeweilig ermittelten Arbeitsprogrammen mit dazugehörigen Finanzbedarfsprognosen, nicht gelöst werden kann.

### 3.3 Fachprozesse im Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln

Die Fachprozesse, die das Erhaltungsmanagement des Tunnels als abgegrenztes Teilsystem eines übergeordneten Strassenabschnittes kennzeichnen, sind in der Abbildung Abb. 8 dargestellt und nachfolgend kurz beschrieben.

Der Erhaltungsmanagementprozess, lässt sich über die gesamte Nutzungsdauer eines Tunnels, in drei grosse Teilprozesse gliedern: Überwachung, Erhaltungsplanung und Ausführung der Erhaltungsmassnahmen.

Der Überwachungsprozess beginnt mit der eigentlichen Überwachungsplanung, wobei aufgrund von diversen Faktoren, u.a. baulichen Tunneleigenschaften, Nutzungsart, Funktionstauglichkeit und Instandsetzungsbedarf des Tunnels, sowohl Inspektionen als auch Kontrollmessungen vorgesehen werden.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Überwachungsplanung ist zunächst eine zuverlässige Kenntnis des Bauwerks und dessen Ist-Zustand. Die Angaben zum Inventar sind heute grösstenteils in der Datenbank KUBA zusammengefasst, während die Informationen des Ist-Zustandes aus der Überwachung eines Tunnels abgeleitet werden können. Die Überwachungsplanung ist insbesondere für das Teilsystem Tunnel von Bedeutung, da die Tunnelinspektionen mit einem sehr grossen Kostenaufwand verbunden sind. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Untersuchungsmethoden, die erforderlichen Werkzeuge und Messsysteme effizient zu planen. Dieser Aspekt ist bei den restlichen Kunstbauten, z.B. bei Brücken weniger dringlich, hier ist hauptsächlich die Ressourcenplanung d.h. Anzahl der Inspektoren entscheidend.

Die Überwachungsplanung beinhaltet einerseits die Hauptinspektion, welche im Fünfjahresabstand durchgeführt wird und deren Befunde bezüglich Bauwerkszustandes sowie Empfehlungen für das weitere Vorgehen in einem Inspektionsbericht zusammengefasst werden. Andererseits sieht die Überwachungsplanung vor, je nach Bauwerkszustand ein gezieltes Monitoring, Kontrollmessungen und bei Bedarf auch Zwischeninspektionen durchzuführen. Die periodische Überwachung stellt den Ist-Zustand zu dem jeweiligen Zeitpunkt dar und erlaubt es, Befunde zu analysieren und Veränderungen gegenüber vorhergehenden Inspektionen zu beurteilen. Aus diesen Informationen ist es in der Regel möglich, eine Prognose über das zu erwartende Verhalten des Tragwerks zu stellen. Die Früherkennung von Schäden und die Aufdeckung von potentiellen Schadensprozessen ermöglicht eine geeignete Massnahmenplanung und Massnahmenumsetzung, bevor es zur Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit und zu grösseren wirtschaftlichen Schäden kommt.

Ausserhalb der periodischen Überwachung werden die Sonderinspektionen im Falle von aussergewöhnlichen Ereignissen angeordnet. Die Beobachtungen erfolgen rein zufällig und beschränken sich auf die sichtbaren Bereiche, die beim Befahren des Tunnels aus dem Fahrzeug bemerkbar sind. Bei Feststellung von gravierenden Schäden oder einer erheblichen Beeinträchtigung des Tragverhaltens oder der Verkehrssicherheit wird grundsätzlich eine weitere Überprüfung veranlasst. Die Überprüfung hat zum Ziel die Sicherheit und die Verfügbarkeit des Tunnels hinsichtlich seiner aktuellen und zukünftigen Nutzung zu bewerten. Eine Überprüfung kann auch im Falle von ungenügenden Resultaten oder Unsicherheiten aus der Überwachung oder wenn Schadensursachen nicht eindeutig aus den Inspektionsberichten hervorgehen, ausgelöst werden.

Auf den Überwachungsprozess, der dazu dient, den Ist-Zustand des Tunnels resp. der Tunnelbauelemente zu erfassen und zu beurteilen, folgt die Analyse, auf deren Basis die Entscheidungen zur Massnahmenplanung getroffen werden.

Die Erhaltung der Tunnel umfasst sämtliche Massnahmen und Vorkehrungen zur Überwachung und Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit und Betriebsbereitschaft des gesamten Tunnelbauwerks, welches Schadensprozessen ausgesetzt ist. Eine kontinuierliche und gezielte Überwachung der verschiedenen Tunnelbauteile ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Zustandserfassung und Zustandsbewertung und hat zum Ziel, genauere Erkenntnisse bezüglich möglicher Schadensursachen abzuleiten und eine anschliessende Planung der Erhaltungsmassnahmen zu ermöglichen. Die möglichen Erhaltungsmassnahmen werden in einen Massnahmenkatalog zusammengefasst und nach Bauteilgruppen resp. nach Schadensursachen unterteilt katalogisiert und auf ihre eventuelle Kombinationsfähigkeit in der Ausführung geprüft. Der Massnahmenkatalog ist insofern ein wichtiges Planungswerkzeug, als dass er einerseits die möglichen Massnahmen in Verbindung mit dessen Wirksamkeit definiert und andererseits auch dessen wirtschaftliche Bewertung ermöglicht.

Die Ausführung der Erhaltungsmassnahmen und die daraus folgenden Rücklaufdaten ordnen sich als letzte Prozesse der gesamten Erhaltungsmanagementkette ein. Sie stellen insofern strategisch wichtige Prozesse dar, als die Erhaltungsmassnahmen die langfristige Verfügbarkeit des Tunnels unter der Randbedingung begrenzter Finanzmittel sicherstellen müssen.

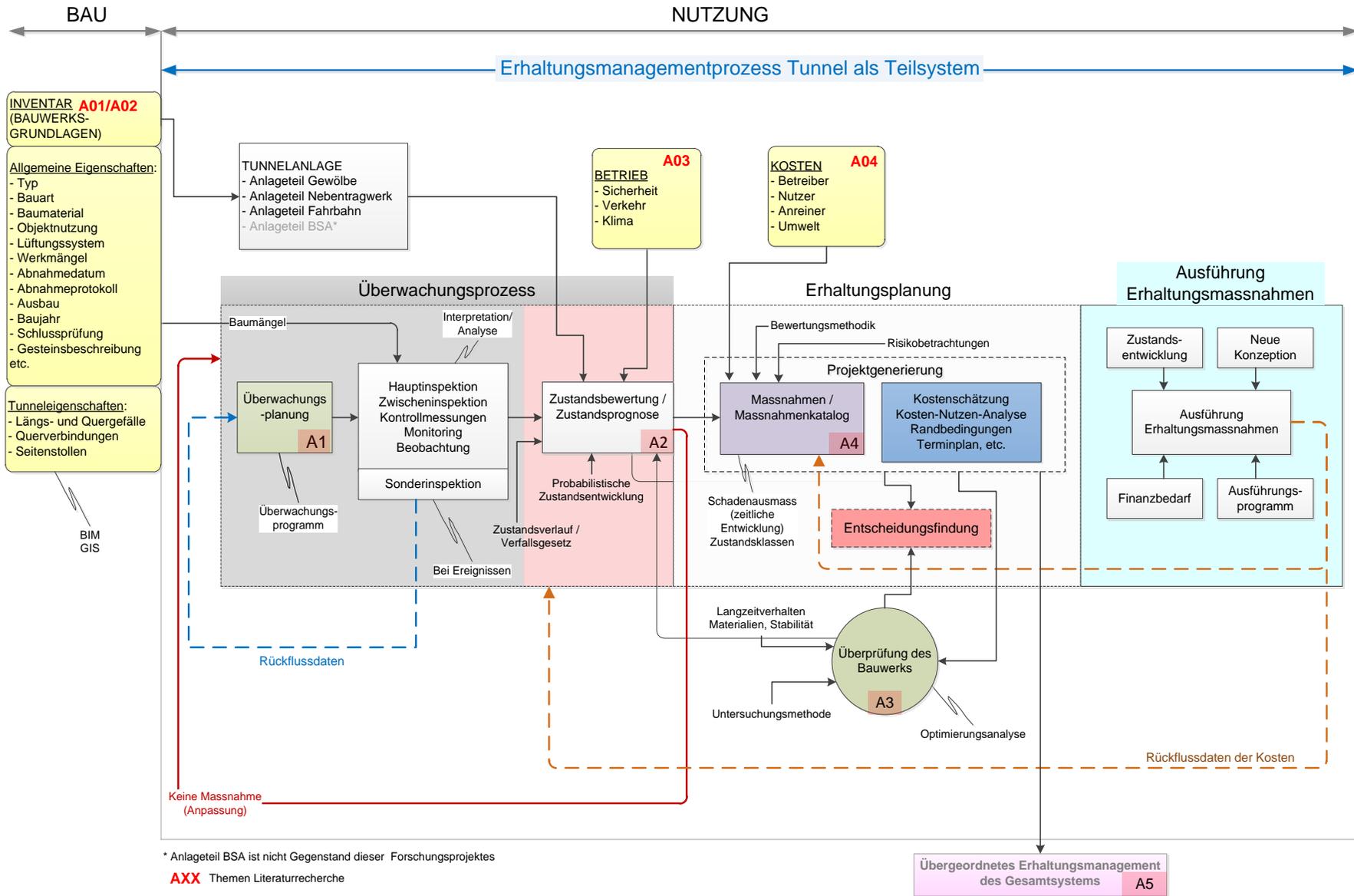


Abb. 8: Erhaltungsmanagementprozess

## 4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

### 4.1 Vorschlag für Einzelprojekte des Forschungspakets „Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln“

#### Überblick

Nach einer umfangreichen Literaturanalyse, der Identifizierung von vorhandenen Wissenslücken und der Erarbeitung der Grundlagen für ein Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln wird empfohlen, diese Wissenslücken durch die Bearbeitung weiterer Forschungsfelder in diesem Gebiet zu schliessen. Im Rahmen dieses Initialprojekts erfolgte einerseits die Systemdefinition für das Teilsystem bergmännische Tunnel mit dessen Abgrenzung und andererseits die Definition des Prozesses Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln sowie dessen Einbettung in den Gesamtprozess Erhaltungsmanagement der Strasseninfrastruktur.

Das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln besteht aus Teilprozessen (vgl. Abb. 7), für welche spezifische Grundlagen zu erarbeiten sind. Dafür werden im Folgenden einzeln abgegrenzte Einzelprojekte vorgeschlagen:

- Gesamtprojektleitung: Organisatorische Koordination des gesamten Forschungspaketes
- Einzelprojekt EP1: **Zustand** (Beschreibung der Schadensprozesse und des Langzeitverhaltens bei Tunneln)
- Einzelprojekt EP2: **Diagnostik** (Überwachungs- und Inspektionsmethoden)
- Einzelprojekt EP3: **Massnahmen** (Festlegung der Erhaltungsmassnahmen)
- Einzelprojekt EP4: **Entscheidungen** (Entwicklung eines Entscheidungsmodells mit/ohne Schnittstelle zum Teilsystem BSA)
- Einzelprojekt EP5: **Kosten** (Kostenmodell für die Erhaltung von bergmännischen Tunneln und Auswirkungen)
- Einzelprojekt EP6: **Umsetzung** (Praktische Umsetzung, Aufbau einer Tunneldatenbank-Skizze durch ein Prototyp)

Grundsätzlich stellen EP1, EP2, EP3, EP5 die Grundlagenbeschaffung dar. Das EP4 nutzt die Grundlagen für den Prozessaufbau und die Ergebnisse des gesamten Forschungspaketes werden im EP6 auf Realisierbarkeit getestet.

### 4.2 Leistungsbeschreibung der Gesamtprojektleitung

#### 4.2.1 Positionierung und Aufgaben der Gesamtprojektleitung

Für die organisatorische Koordination des gesamten Forschungspaketes und der zwingend notwendigen fachlich übergreifenden Einbettung der erarbeiteten Ergebnisse in das Erhaltungsmanagement von Strassen ist eine Gesamtprojektleitung als separates Dienstleistungsprojekt vorzusehen. Dies hat sich in den bisher durchgeführten Forschungspaketes nicht nur bewährt, sondern ist, nicht zuletzt aufgrund deren Ergebnisse, Grundkriterium zur Durchführung eines Forschungspaketes. Das folgende Organigramm (vgl. Abb. 9)

zeigt die Beziehungen im Forschungspaket «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln» auf.

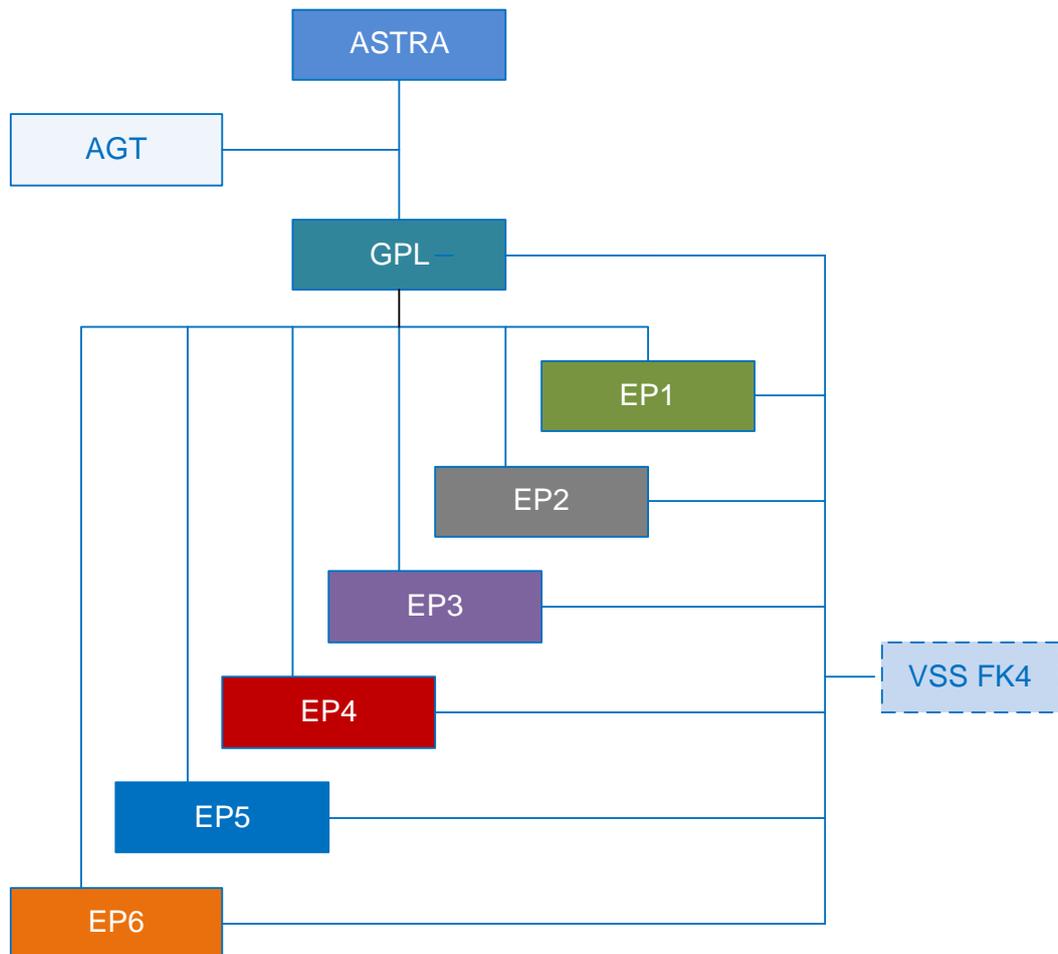


Abb. 9: Beziehungen Forschungspaket

Dabei untersteht das gesamte Forschungspaket inklusive Gesamtprojektleitung dem ASTRA und seiner Arbeitsgruppe AGT. Zusätzlichen Input sollten die Einzelprojekte und die Gesamtprojektleitung aus der Fachkommission VSS FK4 bekommen. Eventuell sollte eine Erweiterung der Begleitkommission durch Vertreter der VSS FK4 stattfinden.

Die Gesamtprojektleitung wird das Forschungspaket führen und koordinieren. Die Anforderungen an diese Gesamtprojektleitung werden im Folgenden genauer beschrieben.

### Ziel

Das Ziel der Gesamtprojektleitung ist grundsätzlich der erfolgreiche Abschluss des Forschungspaketes, wobei die Erfüllung der einzelnen Einzelprojekte (EP) der jeweiligen EP-Forschungsstellen obliegt. Die Gesamtprojektleitung soll durch eine fachliche Koordination einerseits die Berücksichtigung der in diesem Initialprojekt aufgezeigten Schnittstellen sowie das Erreichen der angestrebten Resultate sicherstellen. Andererseits muss die Gesamtprojektleitung, im Hinblick auf einen erfolgreichen Abschluss, für eine konsistente Einbettung der Ergebnisse in das Erhaltungsmanagement von Strassen sorgen. Die fachliche Bewertung der Forschungsergebnisse aus den Einzelprojekten erfolgt nicht durch die Gesamtprojektleitung, dies ist Aufgabe der jeweiligen vom ASTRA festgelegten Begleitkommission.

## Erwartetes Vorgehen und Resultate

Um dieses Projektziel zu erreichen sind folgende Eckpunkte im Voraus zu integrieren:

### *Führen der Ausschreibung der Einzelprojekte*

Unter Berücksichtigung der im Initialprojekt formulierten Kriterien für die Einzelprojekte sind die Ausschreibungsunterlagen für eine Veröffentlichung vorzubereiten. Dabei sind im Vorfeld die AGT und die VSS FK4 durch Orientierung bzw. Stellungnahme mit einzubeziehen. Eventuell anfallende Korrekturen und Ergänzungen sind einzuarbeiten. Anschliessend ist ein «Gut-zum-Druck» für die Veröffentlichung zu erstellen. Nach erfolgtem Auftrag durch die AGT und VSS FK4 ist die Ausschreibung in den zuständigen Veröffentlichungsmedien zu veranlassen.

### *Führen der Vergabe*

Nach erfolgter Ausschreibung und Submission sind die eingegangenen Angebote zu prüfen und für eine Evaluation vorzubereiten. Das heisst, es sind Entscheidungsgrundlagen vorzubereiten und in entsprechender Form auszuarbeiten. Die Evaluation wird durch die AGT und die VSS FK4 durchgeführt. Die Gesamtprojektleitung wird ebenfalls eine eigene Evaluation für jedes Einzelprojekt durchführen und dies sowohl in der AGT als auch in der VSS FK4 vorstellen und begründen. Entscheidungskompetenz über die Vergabe haben die AGT und die VSS FK4.

### *Koordination des Forschungspakets in der Einzelprojektausführung*

Während der gesamten Ausführung der Einzelprojekte ist durch Projektsitzungen sicherzustellen, dass jedes Einzelprojekt für sich auf dem Erfolgsweg ist und gleichzeitig die Schnittstellen zu den anderen Einzelprojekten gewährleistet sind. Dies bedeutet, dass die Einzelprojekte durch die Gesamtprojektleitung aktiv zu koordinieren sind. Darüber hinaus ist in regelmässigen Abständen (siehe Zeitplan Forschungspaket) die Begleitkommission zu orientieren. Dazu werden alle am Forschungspaket Beteiligten zu Begleitkommissionssitzungen einberufen. Die Begleitkommissionssitzungen sind durch die Gesamtprojektleitung zu organisieren, zu leiten und zu protokollieren. Zusätzlich dienen diese Sitzungen der Freigabe von notwendigen Geldbeträgen im Forschungspaket. Die erforderlichen Geldbeträge sind durch die Gesamtprojektleitung bei der Begleitkommission in Abhängigkeit vom Projektfortschritt während der Sitzung zu beantragen.

### *Prüfung der Schlussberichte und Ergebniszusammenfassung des Forschungspaketes*

Die Schlussberichte der Einzelprojekte sind zu prüfen und zur Beurteilung der zuständigen Kommissionen dem VSS (FK4) und der AGT freizugeben. Am Ende nach erfolgreichem Abschluss aller Einzelprojekte ist ein Synthesebericht nach SBT-Vorlage zu verfassen und den zuständigen Kommissionen der VSS (FK4) und des AGT vorzustellen. Eventuell anfallende Korrekturen und Ergänzungen sind einzuarbeiten. Anschliessend ist ein «Gut-zum-Druck» für die Veröffentlichung zu erstellen.

## Kreditrahmen

CHF 380'000.- (geschätzt)

## 4.2.2 Leistungsphasen und Leistungen der Gesamtprojektleitung

### 4.4 AUSSCHREIBUNG

- 4.41 Ausschreibung, Offertenvergleich, Vergabeantrag  
*Leistungen der Gesamtprojektleitung*
- Organisation
  - Ausschreibung
  - Offertenvergleich
  - Vergabeantrag

#### 4.5 REALISIERUNG

##### 4.52 Ausführung

###### *Leistungen der Gesamtprojektleitung*

- Organisation
- Leitung und Überwachung der Forschungsarbeiten
- Kostenkontrolle
- Termine
- Administration

##### 4.53 Ergebniszusammenstellung und Abschluss

###### *Leistungen der Gesamtprojektleitung*

- Prüfung und Freigeben der Schlussberichte
- Erstellung eines Syntheseberichts
- Schlussabrechnung
- Termine
- Administration

### 4.3 Einzelprojekt Beschreibung

#### 4.3.1 Einzelprojekt 1: Zustand (Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln)

##### **Forschungsziel**

Das übergeordnete Ziel ist es, die Befunde aus Inspektionen, Beobachtungen und Kontrollmessungen mit den dazugehörigen Schadensprozessen innerhalb eines Entscheidungsprozesses für eine langfristige Betrachtung zu verknüpfen.

Das Forschungsprojekt soll alle in Tunneln auftretenden Schadensprozesse und deren Auslöser systematisieren. Dabei ist es unerheblich, ob diese schrittweise oder plötzlich auftreten. Da einige Schadensprozesse von den umliegenden Böden (Schadensfaktoren) abhängig sind, muss man auch den Baugrund anhand der vorhandenen Klassifikationen (SIA, VSS) oder nach Einflussfaktoren auf einem tieferen Detaillierungsgrad typisieren. Der gesamte Ablauf von Schadensprozessen nach Material und Bauelement soll untersucht und deren direkte Konsequenzen kurzfristig und langfristig aufgezeigt werden. Ebenso müssen Auswirkungen dieser Typen von Schadensprozessen auf das Bauwerk resp. das Bauelement im Sinne von Gebrauchstauglichkeit und Sicherheit untersucht werden.

Bestimmte Grundlagen können aus der bereits vorhandenen Literatur entnommen und für das Teilsystem bergmännische Tunnel verwendet resp. überarbeitet werden. Dabei soll der Tunnelaufbau (Anordnung von Bauwerksteilen) und u.U. auch Erhaltungsmaßnahmen in Betracht gezogen werden.

Die angestrebten Ziele des Einzelprojekts sind nachfolgend aufgeführt.

- Ergänzung der bestehenden Schadenskataloge je Bauwerksteil und Bauwerksteiltyp nach der über KUBA definierten Befundstruktur.
- Identifizierung der verfolgbaren und nicht verfolgbaren Schadensprozesse. Die Unsicherheiten sind bei verfolgbaren Schadensprozessen viel geringer oder können sogar ganz ausgeschlossen werden.
- Systematisierung der Schadensprozesse der Tunnel und deren Auslöser.
- Verknüpfung vorhandener Schäden mit relevanten Schadensprozessen.
- Bestimmung der Verfallsgesetze für Schadensprozesse und Langzeitverhalten des Materials und des Bauwerksteils.
- Ermittlung der für die Erhaltung von Tunneln aus dem Neubau relevanten Informationen und Daten.
- Ermittlung und Typisierung der für die Erhaltung von Tunneln relevanten Einflussfaktoren.

- Ermittlung der Bauwerkstypologien und deren Abhängigkeit von Gebirgs- und Betriebsfaktoren.
- Verknüpfung dieser Informationen für Feldinspektionen und Monitoring.
- Ergänzung von weiteren Daten von anderen Bauwerken für die Definition der Verfallsgeschwindigkeit von Materialien und Elementen.
- Datenstruktur mit allen Einzelprojekten abgleichen.

### **Methodik, Vorgehen**

Für das vorliegende Einzelprojekt soll ein methodisches Vorgehen gewählt werden, dass die errungenen Erkenntnisse des abgeschlossenen Initialprojektes verwendet, die darin aufgeführten Schnittstellen zu den anderen Einzelprojekten beachtet und gleichzeitig die Hauptforschungsziele des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln berücksichtigt.

Im Rahmen dieses Projektes werden zurückgreifend auf den schweizerischen und internationalen Forschungsstand und auf die Erfahrungen aus den bereits ausgeführten Erhaltungsprojekten von bestehenden Tunneln alle Befundtypen und alle dazu gehörenden Schadensprozesse konsequent analysiert und aufgelistet. Dabei ist eine Koordination mit den restlichen Einzelprojekten erforderlich. Um die Menge an Information zu behandeln, ist es notwendig, sobald die Struktur definiert ist, die Daten innerhalb eines Datenmodells oder einer zentralisierten Datei zu verwalten und auszutauschen.

Zusammenfassend sind die folgenden methodischen Hinweise zu beachten:

- Befunde und Schadensprozesse in Zusammenhang mit Material und Bauwerksteile in einer Matrix erfassen.
- Auf der Basis dieser Matrix das Langzeitverhalten des Materials, des Bauwerksteils und der relevanten Schäden (Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit) definieren.
- Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den anderen Einzelprojekten und enge Zusammenarbeit mit dem EP2 Überwachungs- und Inspektionsmethoden.
- Datenmodell aufbauen um eine zielgerichtete Handhabung der Information sicherzustellen.

Input aus anderen Einzelprojekten:

- Methoden um alle mit Schadensprozessen verknüpften Befunde zu ermitteln (EP2).
- Identifikation von denjenigen Befunden, die im Hinblick auf Schadensprozesse nicht beurteilt werden können (EP2).
- Probabilistisches Modell (EP4).
- Bestehende Datenstruktur (Befunde, Schadenprozesse, Material) (EP6).

Output in andere Einzelprojekte:

- Befunde mit den dazugehörigen Schadensprozessen als Entscheidungsgrundlage zur Auswahl bzw. Evaluation einer Inspektionsmethode (EP2).
- Befunde mit den dazugehörigen Schadensprozessen innerhalb eines Entscheidungsprozesses für eine langfristige Betrachtung (EP4).
- Befunde mit den dazugehörigen Schadenprozessen zur Definition der dazugehörigen Erhaltungsmassnahmen (EP3).
- Aufbau eines Schadenskatalogs mit den dazugehörigen Schadensprozessen (EP6).

### **Erwartete Resultate**

Das ausgearbeitete Projekt soll einen umfassenden Überblick und die Typisierung der für die Planung von Erhaltungsmassnahmen relevanten Schadensprozessen sowie deren

Langzeitentwicklung liefern. Weiter sind relevante Informationen zu den Auswirkungen der Schadensprozesse für das Bauwerk bereitzustellen.

**Kreditrahmen**

CHF 280'000.- (geschätzt)

**Termine**

Voraussichtliche Projektdauer: 24 Monate

Dieses erste Forschungsprojekt ist der Auslöser der weiteren Einzelprojekte, daher müssen die Zwischentermine strikt eingehalten werden.

Arbeitsschritte Zeit (Quartale)	Zeit (Jahre)																			
	1				2				3				4				5			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
EP1 <b>Schädigungsprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln</b>																				
EP1 Auflistung Befunde und Schadensprozesse																				
EP1 Befunde und Schadensprozesse für eine langzeitliche Betrachtung																				
EP1 Schadenskatalog mit den dazu gehörigen Schadensprozessen																				

Legende:

- Input EP
- Meilensteine output
- Zeitdauer des Arbeitsschrittes

**4.3.2 Einzelprojekt 2: Diagnostik (Überwachungs- und Inspektionsmethoden)**

**Forschungsziel**

Dieses Projekt hat ein grosses Forschungspotential. Auch wenn für das Monitoring im Tunnel immer mehr moderne Überwachungsmethoden zur Verfügung stehen, geht es in diesem Projekt nicht um die Entwicklung oder Verfeinerung neuer Methoden, sondern um die kritische Analyse der bereits bestehenden Überwachungs- und Inspektionsmethoden. Damit ein aussagekräftiges Resultat erreicht werden kann, sind sämtliche bestehende Methoden (gute und weniger gute Methoden) zu untersuchen. Das Ergebnis dieses Projektes sollte in die Richtung gehen, dass eine „Good Practice“ vorgeschlagen wird.

Auf die Frage, welche Inspektionsmethoden im Bereich der bergmännischen Tunnel vorhanden sind und wie sie sich voneinander unterscheiden, ist eine klare Antwort zu geben. Heutzutage weisen aufwendige Tunnelinspektionen eine hohes Optimierungspotential auf. Durch die grosse Unsicherheit, die Vielfalt an Bauwerksteilen, die Betriebsrandbedingungen und die grosse Anzahl an Befunden ist es notwendig, die Tunnelinspektionen zu rationalisieren. Es fehlt eine Integration des Risikomanagements in den Prozess der Überwachung und der damit verbundenen Anforderungen an die vorhandenen Inspektionsmethoden. Das Forschungsprojekt muss auch die möglichen, neuen Methoden testen und evaluieren, damit eine praxisbezogene und risikobasierte Methodik für die Optimierung der Überwachungsprogramme von bergmännischen Tunneln erarbeitet werden kann.

Die Zustandsdarstellung ist in der vorhandenen Literatur nicht einheitlich beschrieben und hilft daher schlecht eine sachliche und objektive Analyse des effektiven Zustands zu erstellen und eine rationale Beurteilung der Unsicherheiten resp. Risikobetrachtungen vorzunehmen.

Dieses Forschungsprojekt sieht folgende Themen vor.

- Beschreibung der Überwachungsmethode (auch Monitoring bzw. laufende Überwachung).
- Welche Tools stehen zur Verfügung um Schadensprozesse zu erkennen?
- Abklärung hinsichtlich der Datenverfügbarkeit von Überwachungsmethoden und des Aufwands, diese Daten zu erheben.
- Beweis der Wirtschaftlichkeit und der Zuverlässigkeit der einzelnen Methoden im Zusammenhang mit den Instandsetzungsprojekten.
- Ergebnis strukturiert in eine Datei oder in einem auf Datenbank basierten Informationssystem einbringen.
- Optimierungspotential der Inspektionen, z.B. für die Zwischenräume des Innenrings.
- Gezieltes Inspektionsprogramm nach Risikobeurteilung des Verfallpotenzials der Bauelemente (risikobasierte Inspektionsprogramme).
- Darstellung des Bauwerkszustandes (Befund, Schadensentwicklung, Schadensrelevante Information aus dem Bau, Unsicherheiten, Grundlagen).
- Alle Kosten der jeweiligen Inspektionsmethoden (pro Einheit) klar ausweisen.
- Ist es nicht möglich relevante Schäden zu erkennen, müssen auch Risikoüberlegungen in den Überwachungsprozess einbezogen werden.
- Aufbau eines Verfahrens (Ermittlung von Informationen) zur verbesserten Erfassung von Schadensinformationen aus mikroklimatischen Bedingungen, Baudetails und Ausführung.
- Laufende Überwachung zur Sicherstellung der Lebensdauer der Bauwerke, die eine schlechte resp. keine Erstbeurteilung haben.
- Bei ZfP (zerstörungsfreie Prüfung) Entwicklungsprojekten müssen die Anforderungen an das Verfallsmodell und die Bemessungsgrundlage berücksichtigt werden.
- Alle Kosten der Methoden im Kostenmodell (EP5) quantifizieren.
- Datenstruktur mit allen Einzelprojekten abgleichen.

### **Methodik, Vorgehen**

Für das vorliegende Einzelprojekt ist ein methodisches Vorgehen zu wählen, das die erlangten Erkenntnisse des abgeschlossenen Initialprojektes verwendet, die darin aufgeführten Schnittstellen zu den anderen Einzelprojekten beachtet und gleichzeitig die Hauptforschungsziele des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln berücksichtigt.

Im Rahmen dieses Projektes werden zurückgreifend auf den schweizerischen und internationalen Forschungsstand und auf die Erfahrungen aus den bereits ausgeführten Erhaltungsprojekten von bestehenden Tunnel, alle Typen von Überwachungsmethoden (u.a. Monitoring) untersucht. Das Vorgehen soll den Aufbau einer Vergleichsmethodik vorsehen, welche es ermöglicht, die bestehenden Methoden zu evaluieren. Eine Koordination mit anderen Einzelprojekten ist notwendig. Um die grosse Menge an den künftigen Informationen zu behandeln, ist es notwendig ein Datenmodell aufzubauen.

Zusammenfassend sind die folgenden methodischen Hinweise zu beachten:

- Aufgrund der bestehenden Literaturliste, Bearbeitung der relevanten schweizerischen und internationalen Literatur für alle Befundtypen/ Schadensprozesse/ Überwachungs- und Inspektionsmethoden von Kunstbauten.
- Erarbeitung einer Vergleichsmethodik (Indikatoren wie Genauigkeit, Zuverlässigkeit) der vorhandenen und sich im Entwicklungsstand befindenden Überwachungsmethoden.
- Kritische Würdigung der Zuverlässigkeit einzelner Methoden um die Befunde und die dazu gehörigen Schadensprozesse zu kategorisieren.
- Kritische Würdigung der Zuverlässigkeit der vorhandenen Inspektionsmethoden und der Darstellung des Bauwerkzustands.
- Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den anderen Einzelprojekten und enge Zusammenarbeit mit dem EP1 Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln.

- Daten sammeln und strukturieren, um eine sachliche Handhabung der Informationen und Zuordnung der Überwachungsmethoden sicherzustellen.

Input aus anderen Einzelprojekten:

- Befunde und dazugehörige Schadensprozesse für optimierte Überwachungs- und Inspektionsmethoden (EP1).
- Kostenmodell für Überwachungs- und Inspektionsmethoden (EP5).

Output in andere Einzelprojekte:

- Methoden, um alle mit Schadensprozessen verknüpften Befunde zu detektieren (EP1).
- Kosten der Methoden quantifizieren (EP3, EP5).
- Matrix Schaden/Schadensprozess/Bauwerksteil/Inspektionsmethode (EP3, EP4).
- Verknüpfung von den Befunden, über den Schadensprozess mit den dazu gehörigen Überwachungsmethoden (EP3, EP4).

### **Erwartete Resultate**

Das ausgearbeitete Projekt soll einen umfassenden Überblick über die Überwachungsmethoden und deren Zuverlässigkeit bieten, um relevante Befunde/Schadensprozesse in Abhängigkeit der Bauwerksteile und deren Langzeitentwicklung zu detektieren. Ein, auf einer Datenbank basiertes Ergebnis, soll der Erhaltungsorganisation die Arbeit erleichtern in dem ein schneller und effizienter Zugriff auf die optimale Überwachungsmethode (Ergbniserfolg und die dazu nötigen Kosten) möglich ist.

Weiter sind Inspektionsverfahren vorzuschlagen, um ein optimales Überwachungsprogramm im Hinblick auf die Früherkennung von Schadensentwicklungen zu gewährleisten, damit die optimalen Erhaltungsmassnahmen rechtzeitig geplant werden können.

Das Forschungsprojekt soll ein oder mehrere Vorschläge graphischer Darstellung des Bauwerkszustands liefern. Es soll auf verschiedene Detaillierungsgrade eingehen und mit Integration der relevanten Informationen (Befunde, Schadensentwicklung, schadensrelevante Angaben aus dem Bau, Unsicherheiten, Grundlagen) eine objektive Beurteilung ermöglichen, damit ein optimales Überwachungsprogramm geplant werden kann. Alle Etappen, ausgehend vom detaillierten Bauwerkszustand bis hin zu einem konkreten Überwachungsprogramm sind zu entwickeln und darzustellen.

### **Kreditrahmen**

CHF 350'000.- (geschätzt)

Bemerkung: dieser Kreditrahmen deckt keinerlei neuartige Methode ab. Diese müssen als Zusatzkredit berücksichtigt werden.

### **Termine**

Voraussichtliche Projektdauer: 24 Monate

Dieses Forschungsprojekt ist Auslöser für weitere Einzelprojekte, daher müssen die Zwischentermine strikt eingehalten werden.

Arbeitsschritte Zeit (Quartale)	Zeit (Jahre)																			
	1				2				3				4				5			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>EP2 Überwachungs- und Inspektionsmethoden</b>																				
EP2 Detektionsmethoden um alle Schadensprozesse verknüpfbaren Befunde	▶ > EP1																			
EP2 Matrix Schaden/Schadensprozess/ Bauwerksteil/Inspektionsmethode	▶ > EP3, EP4																			
EP2 Kosten des Methoden	▶ > EP3, EP5																			
Verknüpfung vom Befund, über den EP2 Schadensprozess mit die dazu gehörigen Überwachungsmethoden	▶ > EP3, EP4																			

### 4.3.3 Einzelprojekt 3: Massnahmen (Festlegung der Erhaltungsmassnahmen)

#### Forschungsziel

Das Forschungsprojekt befasst sich mit der Systematisierung der Erhaltungsmassnahmen, welche in Abhängigkeit ihrer Wirkung, ihrer Kosten und ihres Ausführungsaufwandes zu katalogisieren sind.

Auf der Basis der Definition von unterschiedlichen Erhaltungsmassnahmen ist es möglich einen standardisierten baulichen Massnahmenkatalog zu erstellen. Diese Systematisierung gilt sowohl für präventive als auch für korrektive Massnahmen. Wichtig erscheint hier, dass dieses Forschungsprojekt eng mit den beiden vorhergehenden (EP1 und EP2) verknüpft ist. Die Erhaltungsmassnahmen weisen je nach Schadensgrad bzw. Gefährdungsgrad unterschiedliche Wirksamkeit auf. Die Wirksamkeit dieser Erhaltungsmassnahmen, d.h. in wie weit sie in der Lage sind, die Gefährdung bzw. die Schäden zu beseitigen, ist ebenfalls Gegenstand dieses Projektes. Neben einer Generalisierung der Typen von Erhaltungsmassnahmen fehlen noch notwendige Informationen in Bezug auf ihre langfristigen Auswirkungen auf Zustand, Kosten und Nutzer. Dieser Aspekt muss auch berücksichtigt werden, wobei die Kosten innerhalb des EP5 behandelt werden. Weiter sind den Erhaltungsmassnahmen eindeutig Ort, Zeit und Art zuzuordnen, um optimale Erhaltungsstrategien, Arbeitsprogramme und den Finanzbedarf zu ermitteln. Schliesslich können diese Massnahmen für alle Typen von Tunnel anwendbar sein. Für unterschiedliche Tunneltypen sind allenfalls spezifische Massnahmen vorzusehen.

Sehr oft werden Erhaltungsmassnahmen durch Erneuerungsmassnahmen ersetzt. Diese Besonderheit muss im Detail analysiert werden und nach Bauelement oder nach Bauelementgruppe in einem Katalog analog den Erhaltungsmassnahmen zugeordnet werden. Abbruch und Teilabbruch gehören auch zur Festlegung der Erhaltungsmassnahmen. Erhaltungsmassnahmen berücksichtigen auch die Materialwahl sowie die Ausführungsart (wie zum Beispiel Betonfertigteile oder Ortsbeton), dies muss als Bestandteil in das Konzept integriert werden, damit realistische Kosten bestimmt werden können (EP5). Eine reine Auflistung der Erhaltungsmassnahmen wird für eine effiziente Erhaltungsplanung nicht genügen. Die Massnahmen sollen nach ihrer Unsicherheit auch bewertet (Risikobewertung) und für bergmännische Tunnel gegliedert werden. Dies kann die Grundlage für das Entscheidungsmodell (EP4) darstellen. Erhaltungsmassnahmen für die übrigen Kunstbauten sind auch zu berücksichtigen, sofern sie in Tunneln auch angewendet werden können.

Inhaltlich sieht dieses Forschungsprojekt folgende Themen vor:

- Standardisierung der Erhaltungsmassnahmen (Erhaltungsmassnahmen, Erneuerungsmassnahmen, Abbruch oder Teilabbruch) nach Wirkung, Ausführungsaufwand

und Kosten. Welchen Bezug haben Erhaltungsmaßnahmen zu Schadensprozessen, Schadensgrad bzw. Gefährdungsgrad? Wie ist das Langzeitverhalten dieser Maßnahmen in Bezug auf Zustand, und Nutzer?

- Standardisierung nach Tunneltypen und Bauwerksteiltypen.
- Erstellung eines standardisierten baulichen Massnahmenkatalogs in Bezug auf das Bauelement oder die Bauelementgruppe.
- Monetäre und Wirksamkeitsfolgen (Ort, Zeit, Art) von Erhaltungsmaßnahmen für eine Integration von Risikobetrachtungen.
- Aufbau des Submissions- und Devisierungsprozesses auf Basis des standardisierten baulichen Massnahmenkatalogs.
- Berücksichtigung der Spezifität der Baustelleninstallationen bei der Tunnelanierung. Festlegung der Strukturierung und des baulichen Ablaufs.
- Datenstruktur mit allen Einzelprojekten abgleichen.

### Methodik, Vorgehen

Für das vorliegende Einzelprojekt ist ein methodisches Vorgehen zu wählen, das die erlangten Erkenntnisse des abgeschlossenen Initialprojektes verwendet, die darin aufgeführten Schnittstellen zu den anderen Einzelprojekten beachtet und gleichzeitig die Hauptforschungsziele des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln berücksichtigt.

Im Rahmen dieses Projektes werden zurückgreifend auf den schweizerischen und internationalen Forschungsstand und auf die Erfahrungen aus den bereits ausgeführten Erhaltungsprojekten von bestehenden Tunneln und übrigen Kunstbauten, die Erhaltungsmaßnahmen, ihre Wirksamkeit, ihre Kosten (und Folgekosten), und ihr Langzeitverhalten beurteilt. Das Vorgehen soll diese Massnahmen nach einer vorgegebenen (EP5 und EP6) Struktur aufbauen. Eine Koordination mit anderen Einzelprojekten (EP1, EP2, EP4, EP5, EP6) ist notwendig.

Zusammenfassend sind die folgenden methodischen Hinweise zu beachten:

- Aufgrund der bestehenden Literaturliste, Bearbeitung der relevanten schweizerischen und internationalen Literatur sowie aus den bereits ausgeführten Erhaltungsprojekten für alle Typen von Massnahmen, ihre Wirksamkeit, ihre Kosten (und Folgekosten) und Langzeitverhalten kritisch analysieren.
- Alle Bestandteile der Struktur mitberücksichtigen (Bauelement, Material, Bauwerkstypen, etc.) aus EP1, EP5, EP6.
- Datenbank aufbauen um den Massnahmenkatalog zuzuordnen.
- Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den anderen Einzelprojekten und enge Zusammenarbeit mit dem EP1, EP4, EP5, EP6.

Input aus anderen Einzelprojekten:

- Berücksichtigung der Befunde, den dazu gehörigen Schadenprozessen (EP1). Datenbank Struktur und Daten mitliefern.
- Berücksichtigung der Kosten der Untersuchungs- und Überwachungsmethoden (EP2).
- Matrix Schaden/Schadensprozess/Bauwerksteil/Inspektionsmethode (EP2).
- Vorgaben, Strukturen und Grundlagen für Risikomodelle für Erhaltungsmaßnahmenvergleich (EP4).
- Vorgaben, Strukturen und Grundlagen für Kostenmodell für die Erhaltungsmaßnahmen (EP5).
- Datenstruktur Schaden/Schadensprozess/Bauwerk (EP6).

Output in andere Einzelprojekte:

- Risikoreduktion der Erhaltungsmaßnahmen bez. Bauwerks- und Betriebssicherheit (EP4).
- Erhaltungsmaßnahmenkatalog um Kosten zu strukturieren (EP5).

- Erhaltungsmassnahmenkatalog für die praktische Umsetzung (EP6).

**Erwartete Resultate**

Das ausgearbeitete Projekt soll eine umfassende Auswahl von Massnahmen liefern, welche für die Planung und Kostenschätzung von Erhaltungsmassnahmen von Bedeutung sind. Diese Massnahmen sollen alle Typen von Schadensprozessen (nach der Entwicklung des Zustands) aufgeteilt nach Bauwerktypen sachlich berücksichtigen. Alle Unsicherheiten sind auf Basis einer Risikobewertungsmethodik zu beurteilen.

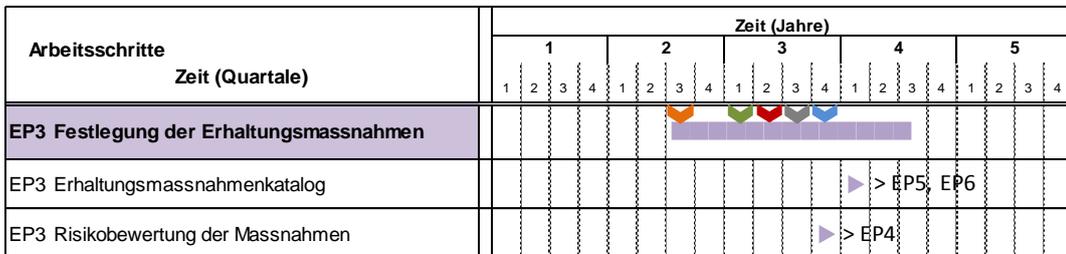
**Kreditrahmen**

CHF 280'000.- (geschätzt)

**Termine**

Voraussichtliche Projektdauer: 24 Monate

Dieses Forschungsprojekt ist der Auslöser von weiteren Einzelprojekte und muss die Zwischentermine strikt einhalten.



**4.3.4 Einzelprojekt 4: Entscheidungen (Entwicklung eines Entscheidungsmodells mit/ohne Schnittstelle zum Teilsystem BSA)**

**Forschungsziel**

Für den Entscheidungsprozess ist es wichtig, dass eine Verknüpfung zwischen Befunden, Schadensprozessen und Erhaltungsmassnahmen bis hin zur Entscheidungsfindung möglich ist.

Die Erfahrung aus bestehenden Projekten hat gezeigt, dass die Erhaltungsplanung stark mit nicht verfolgbaren Schäden oder Schadensprozessen verknüpft ist. So muss das Forschungsprojekt praktikable Entscheidungstheorien als Unterstützung der Erhaltungsplanung vorschlagen. Weiter sollen Bewertungsmethoden und Risikobetrachtungen als Entscheidungsgrundlage für die Umsetzung der vorgeschlagenen Massnahmen (EP3) und unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Bauwerks, entwickelt werden (siehe Abb. 10).

Das Forschungsprojekt muss sich u.a. mit folgenden Fragen befassen. Welche Kriterien werden für die Risikobewertung verwendet, worauf soll die Risikobetrachtung basieren und welches Risiko darf akzeptiert werden. Zusätzlich ist der Aspekt der Zuverlässigkeit, das heisst die (störfreie) Zeit bis zum Eintritt eines Störereignisses mit in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. Es ist zu betonen, dass das Entscheidungsmodell für Praktiker anwendbar sein muss und gezielt auf das einzelne Bauelement begrenzt wird. Es muss ausserdem die Frage beantwortet werden können, was passiert, wenn keine Massnahmen ergriffen werden. Als Ansatz für die Risikoanalyse kann beispielsweise der Kollaps des Bauelements und folglich die nicht Verfügbarkeit des Tunnels betrachtet werden, auch wenn das Eintreten eines gravierenden Schadens bei einem Bauelement, der zur Sperrung des Tunnels führen würde, eigentlich als sehr rar eingestuft werden kann.

Weiter muss das Entscheidungsmodell ausgehend von der Stufe Management durchgängig bis hin auf die Stufe Durchführung anwendbar sein. Erhaltungsmanagement-Projekte sind sehr komplex und weisen ein hohes Potenzial für Änderungen auf, sowohl während der Projektierung als auch während der Durchführung. Das Modell soll die entsprechende Flexibilität berücksichtigen und Variantenvergleiche anwenden.

Erhaltungsmassnahmen von Rohbau-Tunnelementen werden oft zusammen mit Erneuerungen der BSA durchgeführt. Wenn dies vorkommt, stellen die BSA als Sicherheitselemente eine zwingende Randbedingung dar, welche die minimalen Anforderungen an den Betrieb des Strassenabschnitts, (im Ereignisfall, bei Anlagestörung) abdecken müssen. Das Forschungsprojekt soll diese Integration analysieren und die Schnittstellen erkennen und im Modell berücksichtigen.

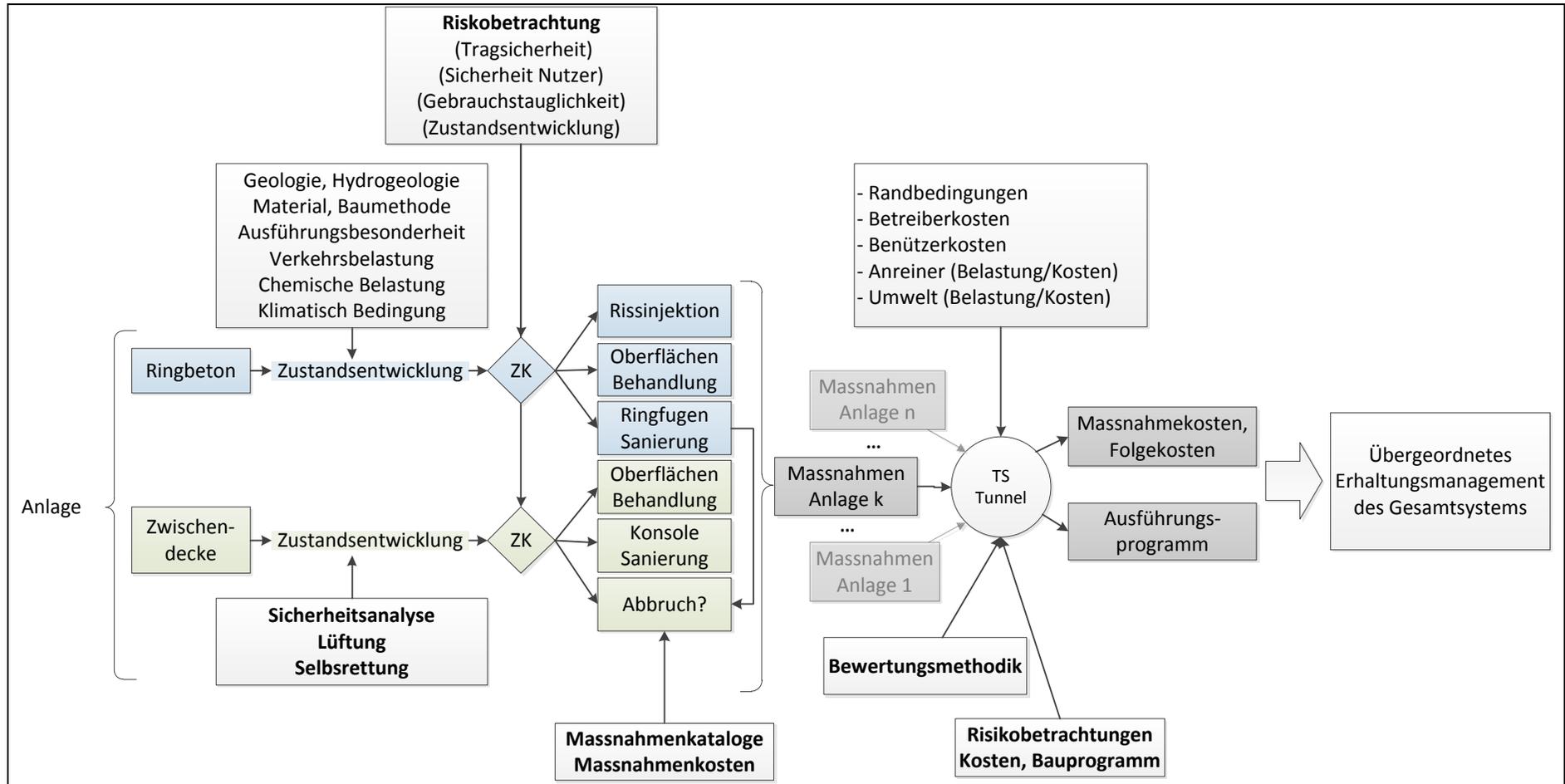


Abb. 10: Beispiel einer Erhaltungsplanungsmethodik

Der Inhalt dieses Forschungsprojektes ist nachfolgend beschrieben:

- Definition der Abgrenzung BAU/BSA in Bezug auf den Lebenszyklus.
- Entwicklung einer Methodik zur Risikobewertung in Zusammenarbeit mit den EP1 und EP2.
- Mitberücksichtigung der Bauwerksgrundlagen/Inventar sowie der verfolgbar und nicht verfolgbar Schadensprozesse.
- Aufstellung von praktikablen Entscheidungstheorien als Unterstützung der Erhaltungsplanung.
- Entwicklung einfacher Entscheidungsmodelle oder Prozesse, die für den Infrastrukturmanager anwendbar sind.
- Möglichkeit der kontinuierlichen Nachführung der Modelldaten mit neu erfassten Daten und Anwender-Feedback.
- Durchgängigkeit ausgehend von Stufe Planung bis zur Durchführung gewährleisten.
- Aus den monetären Folgen der Schadenprozesse die Integration in Risikobetrachtungen aufzeigen.
- Datenstruktur mit allen Einzelprojekten abgleichen.

### **Methodik, Vorgehen**

Für das vorliegende Einzelprojekt ist ein methodisches Vorgehen zu wählen, das die erlangten Erkenntnisse des abgeschlossenen Initialprojektes verwendet, die darin aufgeführten Schnittstellen zu den anderen Einzelprojekten beachtet und gleichzeitig die Hauptforschungsziele des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln berücksichtigt.

Im Rahmen dieses Projektes werden zurückgreifend auf den schweizerischen und internationalen Forschungsstand und auf die Erfahrungen aus den bereits ausgeführten Erhaltungsprojekten von bestehenden Tunnel, alle Typen von Überwachungsmethoden (u.a. Monitoring) beurteilt.

Das Vorgehen muss zuerst die Unsicherheiten aus den detektierbaren Befunden (EP2) und den zugeordneten Schadensprozessen (Bauwerkszustand und dessen Entwicklung) gemeinsam mit dem EP1 und weiter die Bewertungsmethodik und Risikobetrachtung aus den Massnahmen (EP4 und EP5) systematisieren.

Das Entscheidungsmodell muss schliesslich in EP6 durch ein Fallbeispiel über repräsentative Projekte geprüft werden, um das Resultat, die Flexibilität und die Anwendbarkeit zu bestätigen.

Zusammenfassend sind die folgenden methodischen Hinweise zu beachten:

- Aufgrund der bestehenden Literaturliste, Bearbeitung der relevanten schweizerischen und internationalen Literatur sowie aus den bereits ausgeführten Erhaltungsprojekten von bestehenden Tunneln Entscheidungsfindung, Bewertungsmethodik und Risikomodelle definieren.
- Ausarbeiten von umsetzbaren Bewertungs- und Risikobetrachtungsmodellen als Entscheidungsgrundlage für die Erhaltungsplanung.
- Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den anderen Einzelprojekten und enge Zusammenarbeit mit dem EP1, EP2 und EP3.

Input aus anderen Einzelprojekten:

- Befunde und dazu gehörige Schadensprozesse innerhalb eines Entscheidungsprozesses für eine langfristige Betrachtung (EP1).
- Matrix mit Befunden / Schadensprozessen / Material und Bauwerksteilen (EP2)
- Risikobewertung der Massnahmen (EP3).
- Gesamtkostenmodell (EP5).

Output in andere Einzelprojekte:

- Entscheidungsmodell und das dazu benötigte Datenmodell (EP6).
- Risikomodell für Massnahmenvergleich (EP3).
- Probabilistisches Modell (EP1).

**Erwartete Resultate**

Das ausgearbeitete Projekt soll ein anwendbares Entscheidungsmodell mit Schnittstellen zur BSA-Erhaltung, ausgehend von der Stufe Management bis hin zur Durchführung bereitstellen.

Das Modell wird unter EP6 durch einen Prototyp überprüft und bestätigt.

**Kreditrahmen**

CHF 250'000.- (geschätzt)

**Termine**

Voraussichtliche Projektdauer: 30 Monate

Arbeitsschritte Zeit (Quartale)	Zeit (Jahre)																			
	1				2				3				4				5			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
EP4 Entwicklung eines Entscheidungsmodells mit/ohne Schnittstelle zum Teilsystem BSA																				
EP4 Risikomodell																				
EP4 Entscheidungsmodell und den dazu benötigte Datenstruktur																				
EP4 Probabilistisches Modell																				

**4.3.5 Einzelprojekt 5: Kosten (Kostenmodell für die Erhaltung von bergmännischen Tunneln)**

**Forschungsziel**

Das Forschungsprojekt hat zum Ziel, die Kosten sowohl der Überwachungs- und Inspektionsmethoden als auch der Erhaltungsmassnahmen (EP2, EP3, EP4) zu definieren und systematisieren. Dies gilt sowohl für präventive als auch für korrektive Erhaltungsmassnahmen.

Im Wesentlichen soll ein, auch grob definiertes Kostenmodell entwickelt werden, das als Entscheidungsgrundlage für die Auslösung der erforderlichen Erhaltungsmassnahmen angewendet werden kann. Es muss vor allem bestimmt werden, wie die Kosten gesammelt werden, wie sie zu Kostenansätzen resp. Kostenkennwerten verdichtet werden, um anschliessend in der Erhaltungsplanung benutzt zu werden.

Die Strukturierung der Kosten sollte so weit erfolgen, dass ein Vergleich zwischen den Kosten derselben oder ähnlichen Bauelementen resp. Bauelementgruppen machbar ist. Der Detaillierungsgrad sollte aber nicht zu tief sein. Ein Beispiel für einen annehmbaren Detaillierungsgrad der Kostenstruktur könnten die Sanierungskosten pro Laufmeter eines Querschlags sein.

Bis vor Kurzem wurde jede Baustelle, in welcher Erhaltungsmassnahmen ausgeführt werden, eher als Einzelobjekt betrachtet, dadurch waren kaum Rückmeldungen (REX) möglich. Eines der Hauptziele dieses Forschungsprojektes ist es, eine einheitliche Kos-

tenstruktur festzulegen, welche für jede Erhaltungsbaustelle anwendbar und austauschbar ist, so dass, nach Baustellenabschluss systematisch Rückmeldungen erfolgen und diese in einer zentralisierten Datenbank bearbeitet und ausgetauscht werden können.

Die Informationen zur Kostenstruktur einzelner Bauelemente sind wesentlich für die Erhaltungsplanung und die Kostenschätzung der Planung für den Bauherrn und weniger für die Ausschreibung.

Zu diesem Projekt gibt es wenig allgemein zugängliche Grundlagen. Inhaltlich ist es, wie folgt, abgegrenzt:

- Abbildung des Gesamtsystems um die Verteilung zwischen den Einzelsystemen zu erkennen.
- Alle Kosten auflisten (z.B. Mehrkosten für Nacht- und Wochenendarbeit), abschätzen und z.B. in eine Systemmatrix integrieren.
- Einheitliche Methode für die Kostenschätzung (Struktur der Kosten) und deren Aktualisierung prüfen.
- Alle Arten von Projekten, Tunnelanlagen und Tunnelgrößen mitberücksichtigen.
- Alle kostenbeeinflussenden Parameter, pro Bauelement oder Bauelementgruppe (z.B. Teil- oder Vollsperrung) mitberücksichtigen.
- Automatisierung der Kostenverfolgung.
- Kontinuierliche Nachführung von neuen Daten in das vorhandene Kostenmodell und Anwenderfeedback zum Kostenmodell anhand eines Fallbeispiels überprüfen (Fallstudie mit einem Erhaltungsprojekt).
- Aus der Struktur von typischen Befunden, die nötigen Angaben zu den monetären Folgen der Schadenprozesse liefern.
- Datenstruktur mit allen Einzelprojekten abgleichen.

### **Methodik, Vorgehen**

Für das vorliegende Einzelprojekt ist ein methodisches Vorgehen zu wählen, das die erlangten Erkenntnisse des abgeschlossenen Initialprojektes verwendet, die darin aufgeführten Schnittstellen zu den anderen Einzelprojekten beachtet und gleichzeitig die Hauptforschungsziele des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln berücksichtigt.

Im Rahmen dieses Projektes werden zurückgreifend auf den schweizerischen und internationalen Forschungsstand und auf die Erfahrungen aus den bereits ausgeführten Erhaltungsprojekten von bestehenden Tunnel, alle bestehenden Typen von Kostenstrukturen beurteilt.

Das Kostenmodell soll auch die Überwachungs- und Überprüfungskosten enthalten und dabei in enger Zusammenarbeit mit dem EP1 und EP2 bearbeitet werden. Für die effektiven Projektkosten soll die Forschungsstelle alle anwendbare Kostenmodelle (CRB, BIM, und weitere) analysieren und ihre Anwendbarkeit im Bereich des Erhaltungsmanagements prüfen.

Zusammenfassend sind die folgenden methodischen Hinweise zu beachten:

- Aktuellen Stand der Kostenerfassung und -strukturierung im Erhaltungsmanagement analysieren.
- Alle relevanten Kosten der Erhaltungsmassnahmen (EP4) in einem Kostenmodell definieren.
- Auflisten alle kostenbeeinflussenden Parameter für alle Bauwerksteile und Erhaltungsmassnahmen.
- Das Kostenmodell muss den Bauwerkskatalog, die Erhaltungsmassnahmen und die Bauwerksarten mitberücksichtigen.
- Konsistenzprüfung des Kostenmodells für Überwachungs- und Inspektionsmethoden (EP2), Erhaltungsmassnahmen (EP4) mit ihren objektbezogenen Auswirkungen auf alle Anspruchsgruppen.

- Kompatibilität des Kostenmodells zur anwendbaren Ausschreibungssoftware und die dazu erhaltene Rückmeldungsqualität.

Input aus anderen Einzelprojekten:

- Überwachungs- und Inspektionskosten (EP2).
- Erhaltungsmassnahmenkatalog (EP3).
- Bauwerkstruktur (Bausubstanz) (EP6).

Output in andere Einzelprojekte:

- Kostenmodell für Überwachungs- und Inspektionsmethoden (EP2).
- Kostenmodell für die Erhaltungsmassnahmen (EP3).
- Kostenmodell für das Entscheidungsmodell – Gesamtkostenmodell (EP4).
- Kostenmodell für die praktische Umsetzung in eine Datenbank – Gesamtkostenmodell (EP6).

**Erwartete Resultate**

Im Projekt soll das Kostenmodell Objekt- bzw. Bauelement spezifisch und nicht nach Leistung ausgearbeitet werden. Dieses Kostenmodell soll nach einem statistischen Vorgehen aufgebaut werden mit dem Ziel die Kostenkennwerte der Instandsetzung zu definieren (z.B. CHF/lm).

Dieses Kostenmodell soll sich auf die SIA Phase 3 einschränken, da eine grössere Detailtreue nicht notwendig ist. Weiter kann als Resultat dieses Projektes ein Kostenkatalog für gewisse Massnahmen auf Basis definierter Kennwerte erwartet werden. Ein wesentlicher Punkt in Bezug auf die Kostenkennwerte ist, dass sich diese auf die Endkosten eines Projektes und nicht auf die offerierten Kosten beziehen sollen.

**Kreditrahmen**

CHF 220'000.- (geschätzt)

**Termine**

Voraussichtliche Projektdauer: 24 Monate

Arbeitsschritte Zeit (Quartale)	Zeit (Jahre)																			
	1				2				3				4				5			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>EP5 Kostenmodell für die Erhaltung von bergmännischen Tunneln und Auswirkungen</b>									▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼				
EP5 Kostenmodell													▶	▶	▶	▶				
EP5 Gesamtkostenmodell, Kostenkennwerte																	▶	▶	▶	▶

### 4.3.6 Einzelprojekt 6: Umsetzung (Praktische Umsetzung, Aufbau einer Tunneldatenbank-Skizze durch einen Prototyp)

#### Forschungsziel

In diesem Forschungsprojekt werden zuerst die Voraussetzungen für die Umsetzung der erarbeiteten Methodik in der Praxis beschrieben. Im Vordergrund steht die Abklärung hinsichtlich der Datenverfügbarkeit und des Aufwands diese Daten zu erheben.

Daraus folgt ein erstes Ziel des Forschungsprojektes und zwar, dass alle Ergebnisse, die aus den Forschungsprojekten EP1 bis EP5 hervorgehen, mit den Daten der bereits bestehenden Tunneldatenbanken verglichen werden. Anschliessend und auf der Grundlage dieser Überprüfung erfolgt die Umsetzung des Entscheidungsmodells für ein effizientes Erhaltungsmanagement von Tunneln.

Die Unterstützung durch ein Informatiksystem soll untersucht werden und ein Datenmodell soll grob entworfen werden. Die Verifizierung des Konzeptes (Proof of concept) muss anschliessend durch einen Prototyp erfolgen.

Dieses Forschungsprojekt sieht folgende Themen vor.

- Bestehende Tunneldatenbank (Prozesse und Daten) im Anschluss an die Ergebnisse aus den EP1 bis EP5 prüfen.
- Ergänzung des Datenmodells und der verschiedenen Prozesse der Datenerfassung und des Datenzugriffs für eine effiziente Erhaltungsplanung.
- Grobkonzeptaufbau eines Erhaltungsmanagement-Tool.
- Entwicklung eines Prototyps
- Verifizierung des Konzepts durch die Einspeisung der Daten in die Datenbank
- Integration mit anderen Teilsystemen prüfen.

#### Methodik, Vorgehen

Für das vorliegende Einzelprojekt soll ein methodisches Vorgehen gewählt werden, das die gewonnenen Erkenntnisse des abgeschlossenen Initialprojektes verwendet, die darin aufgeführten Schnittstellen zu den anderen Einzelprojekten berücksichtigt und gleichzeitig die Hauptforschungsziele des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln berücksichtigt.

Um eine praktische Umsetzung der Erhaltungsplanung von Tunnel zu gewährleisten, muss im Rahmen dieses Projektes auf die von F. Sandrone aufgebaute Tunneldatenbank (TDB) und auf die bestehende Methodik aus der Datenbank KUBA, sofern diese die benötigten Informationen liefern kann, zurückgegriffen werden.

Um eine vollständige Datenbank zu erstellen, sind neben den bergmännischen Tunneln, auch Tagbautunnel, Einhausungen, Wildtierquerungen, etc. zu berücksichtigen.

Zusammenfassend sind folgende methodische Hinweise zu beachten:

- Aufgrund der bestehende Literaturliste, Bearbeitung der relevanten Input-Daten für ein Datenkonzept mit Berücksichtigung der vorhandenen Datenbanken (TDB, KUBA).
- Konzeptionelle Hinweise der ausländischen EM-Konzepte mit den Resultaten aus anderen Forschungsprojekten und den bestehenden Tunneldatenbanken vergleichen.

Input aus anderen Einzelprojekten:

- Schadenskatalog mit den dazu gehörigen Schadensprozessen um das Datenbankmodell zu ergänzen. Datenbank-Struktur und Daten mitliefern. (EP1).
- Erhaltungsmassnahmenkatalog für die praktische Umsetzung (EP3).

- Entscheidungsmodell und die dazu benötigte Datenstruktur (EP4).
- Gesamtkostenmodell für die praktische Umsetzung (EP5).

Output in andere Einzelprojekte:

- Bauwerkstruktur (Bausubstanz) (EP5).
- Befund, Schadenprozesse, Material und Bauelement-Struktur (EP1, EP3).

**Erwartete Resultate**

Das ausgearbeitete Projekt stellt die praktische Umsetzung und den Aufbau eines Unterstützungswerkzeugs für den gesamten Erhaltungsmanagementprozess von bergmännischen Tunneln dar. Es soll diese drei Haupttätigkeiten berücksichtigen:

- Überwachung (inkl. Überprüfung).
- Erhaltungsplanung resp. die Ermittlung der optimalen Erhaltungsstrategie.
- Begleitung der Projektierung und Ausführung von konkreten Erhaltungsmaßnahmen (Instandsetzung, Instandhaltung) und die Erfassung von Eckdaten zu ausgeführten Erhaltungsmaßnahmen.

Das Datenmodell ist anhand eines Prototyps mit erfassten Daten zu verifizieren.

**Kreditrahmen**

CHF 320'000.- (geschätzt)

**Termine**

Voraussichtliche Projektdauer: 46 Monate

Arbeitsschritte Zeit (Quartale)	Zeit (Jahre)																			
	1				2				3				4				5			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
EP6 Praktische Umsetzung, Aufbau einer Tunneldatenbank-Skizze					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
EP6 Befund, Schadenprozesse, Material und Bauelement Struktur									▶											

## 4.4 Schnittstellen zwischen den Einzelprojekten

Die genannten Einzelprojekte haben untereinander Schnittstellen. Diese werden im Rahmen eines Forschungspakets koordiniert. Die Sicherstellung der Schnittstellen erfolgt durch die betroffenen Einzelprojekte. Die vorhandenen Schnittstellen sind in der Schnittstellenmatrix (vgl. Abb. 11) dargestellt, darauf folgend kurz erläutert und schematisch in der Abbildung 12 aufgezeigt.

	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5	EP6
EP1		- Inspektionsmethoden - nicht beurteilbare Befunde		- Probabilistisches Modell		- Datenstruktur Schaden/Schadenprozess/Bauwerk
EP2	- Schadenkatalog/ Schadensprozesse				- Kostenmodell für Inspektionsmethoden	
EP3	- Schadenkatalog/ Schadensprozesse	- Kosten der Inspektionsmethoden - Matrix/Verknüpfung Schaden/Schadenprozess/Bauwerksteile/ Inspektionsmethoden		- Risikomodell für Erhaltungsmaßnahmen-vergleich	- Kostenmodell für Erhaltungsmaßnahmen	- Datenstruktur Schaden/Schadenprozess/Bauwerk
EP4	- Schadenkatalog/ Schadensprozesse	- Matrix/Verknüpfung Schaden/ Schadenprozess/ Bauwerksteile/ Inspektionsmethoden	- Risikobewertung der Erhaltungsmaßnahmen		- Gesamtkostenmodell, Kostenkennwerte	
EP5		- Inspektionsmethoden - Kosten Inspektionsmethoden	- Katalog Erhaltungsmaßnahmen			- Bauwerksstruktur
EP6	- Schadenkatalog/ Schadensprozesse		- Katalog Erhaltungsmaßnahmen	- Entscheidungsmodell	- Gesamtkostenmodell für die praktische Umsetzung	

Abb. 11: Schnittstellenmatrix

### ① Beziehungen zwischen EP1 und EP2, EP3, EP4, EP6

Ein Schlüsselprojekt stellt das EP1 «Beschreibung der Schadensprozesse und des Langzeitverhaltens» dar. Dieses Projekt verknüpft vorhandene Befunde mit relevanten Schadensprozessen und erlaubt Aussagen über das Langzeitverhalten von Tunneln. Ein Schlüsselprojekt ist es deshalb, weil einerseits Befunde, welche sich auch detektieren (EP2) lassen, und andererseits Erhaltungsmaßnahmen (EP3), welche einen Einfluss auf die Zustandsentwicklung haben, damit korrespondieren müssen. Grundsätzlich muss es möglich sein, die Befunde mit den dazugehörigen Schadensprozessen innerhalb eines Entscheidungsprozesses für eine Langzeitbetrachtung (EP4) zu beurteilen und daraus

Schlussfolgerungen, in Form von Szenarien von geplanten Erhaltungsmassnahmen, für die Erhaltungsplanung zu ziehen.

② Beziehungen zwischen EP2 und EP3, EP4, EP5

Das EP2 «Analyse der Überwachungs- und Inspektionsmethoden» muss sicherstellen, dass die durch einen Schadensprozess verursachten Schäden (EP1) detektierbar sind. Dafür sind im Rahmen der Überwachung Methoden zu definieren. Ist es nicht möglich relevante Schäden zu erkennen, müssen auch Risikoüberlegungen in den Überwachungsprozess einbezogen werden. Alle Kosten der Methoden sind im Kostenmodell (EP5) zu quantifizieren. Für den Entscheidungsprozess (EP4) ist es wichtig, dass eine Verknüpfung vom Befund, über den Schadensprozess, die Erhaltungsmassnahme bis hin zur Entscheidungsfindung möglich ist. Dies ist für klassische Überwachungsmethoden als auch für risikobasierte Ansätze zu garantieren.

③ Beziehungen zwischen EP3 und EP4, EP5, EP6

Das EP3 legt einen Satz von typisierten Erhaltungsmassnahmen für das Entscheidungsmodell fest. Dabei muss die Auswirkung der Erhaltungsmassnahmen auf den Befund und den Schadensprozess (EP1) eindeutig definiert sein. Im Kostenmodell (EP5) sind alle relevanten Kosten der Erhaltungsmassnahmen zu definieren. Das Entscheidungsmodell (EP4) muss in der Lage sein, Erhaltungsmassnahmen eindeutig in Ort, Zeit und Art zuzuordnen, um optimale Erhaltungsstrategien, Arbeitsprogramme und Finanzbedarf zu ermitteln.

④ Beziehungen zwischen EP4 und EP1, EP3, EP6

Im Entscheidungsmodell EP4 werden alle Grundlagen aus den Einzelprojekten 1,2,4 und 5 verknüpft. Dabei sind auch Risikoüberlegungen die für jedes Einzelprojekt erfolgt sind, mit einzubeziehen. Dies setzt voraus, dass die Grundlagen konsistent miteinander verknüpfbar sind.

⑤ Beziehungen zwischen EP5 und EP2, EP3, EP4, EP6

Das Kostenmodell (EP5) muss für Überwachungs- und Inspektionsmethoden (EP2) und Erhaltungsmassnahmen (EP3) in seinen objektbezogenen Auswirkungen auf alle Anspruchsgruppen konsistent sein. Nur so wird ein transparenter Entscheidungsprozess im Modell (EP4) abgebildet.

⑥ Beziehungen zwischen EP6 und EP1, EP3, EP5

Um die praktische Umsetzung der erarbeiteten Methodik in ein Datenmodell zu übertragen, müssen alle Einzelprojekte ihre Grundlagendaten in einer einheitlichen Struktur liefern. Dafür ist es erforderlich, ab einem gewissen Zeitpunkt, die Struktur und das Datenformat vorzuschreiben.

Anschliessend erfolgt die Umsetzung des Entscheidungsmodells für ein effizientes Erhaltungsmanagement von Tunneln gestützt auf den Daten aus den Forschungsprojekten EP1 bis EP5.

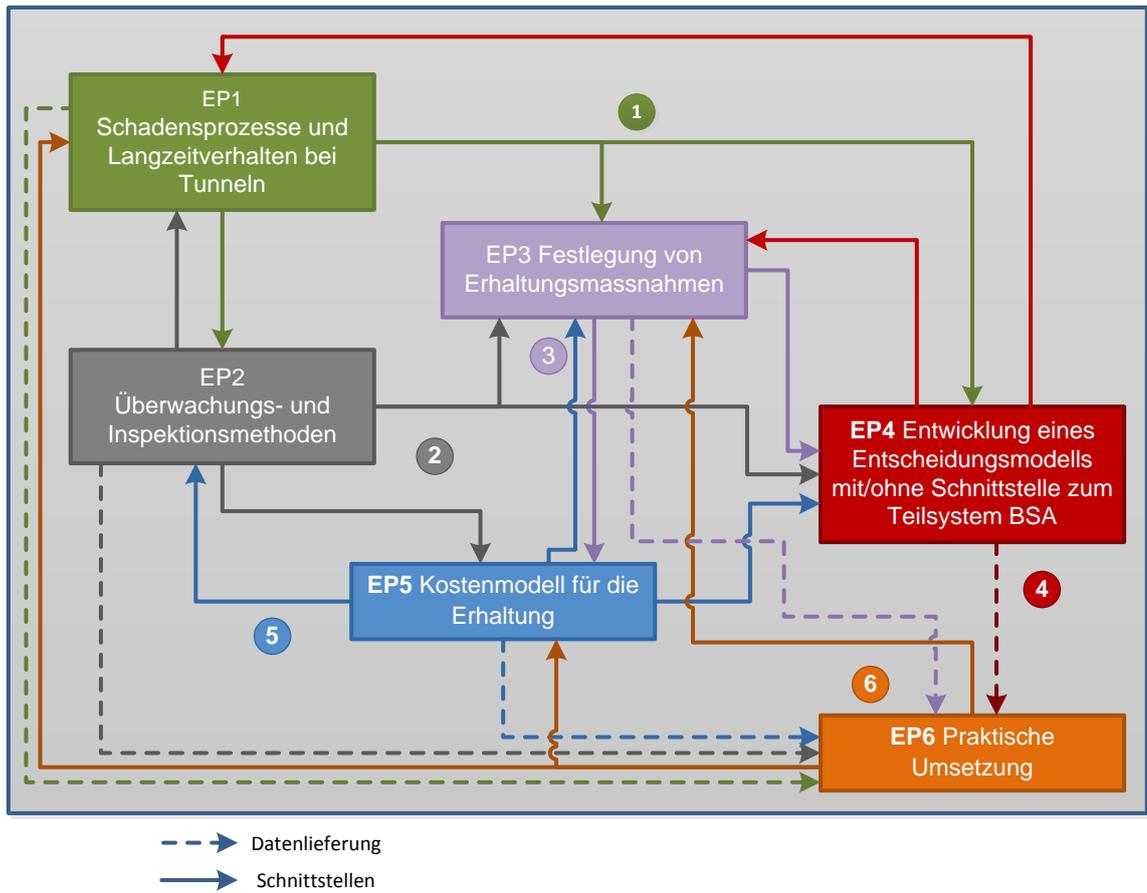


Abb. 12: Schnittstellen zwischen den Einzelprojekten

## 4.5 Zeit- und Kostenplan der Realisierung der Einzelprojekte

### 4.5.1 Zeitplan der Realisierung der Einzelprojekte

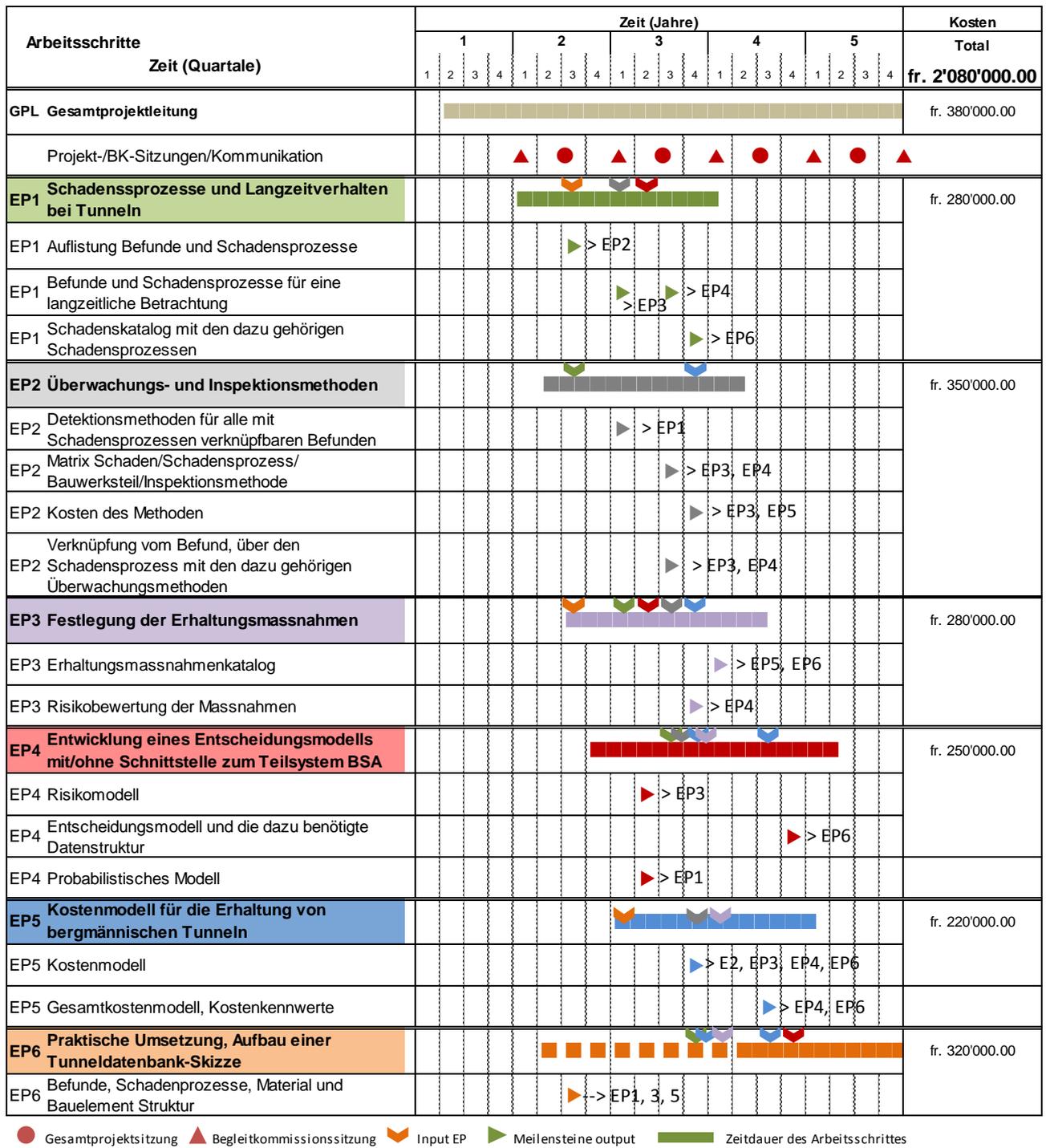


Abb. 13: Zeitplan des gesamten Projektes

### 4.5.2 Kostenplan der Realisierung der Einzelprojekte

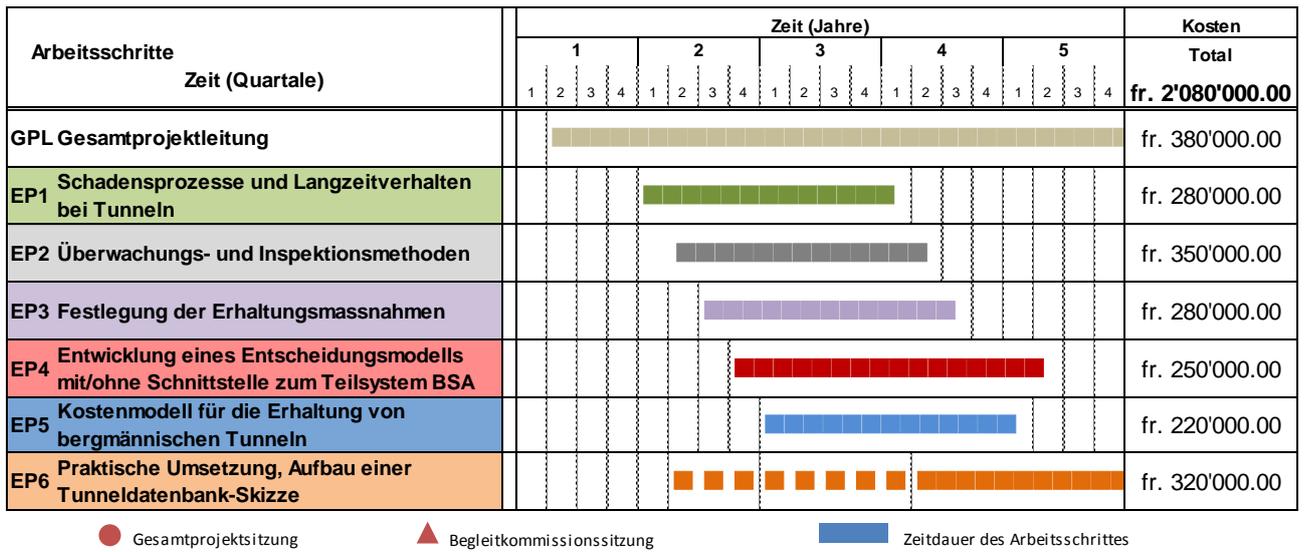


Abb. 14: Kostenplan der Realisierung der Einzelprojekte

## Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
AFTES	Association française des tunnels et de l'espace souterrain
AGT	Arbeitsgruppe Tunnelforschung
AIPCR	Association internationale permanente des Congrès de la Route ou association mondiale de la route
BSA EES	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) <i>équipements d'exploitation et de sécurité (EES)</i>
CETU	Centre d'étude des tunnels - France
EMS	Equipment Management System (EMS)
EMS-CH	Management System für Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen der Schweizer Nationalstrassen (EMS-CH).
FK4	Fachkommission 4 - «Bau- & Geotechnik» des VSS – Bau und Geotechnik, Strassen-erhaltung, Baumanagement
ITA AITES	International tunneling and underground space association <i>Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain</i>
KUBA KUBA-DB	KUBA-DB (Kunstabautendatenbank) ist ein Instrument zur Erfassung, Bearbeitung und Auswertung von Substanz-, Zustands- und Erhaltungsdaten von Kunstbauten und Tunnel im Strassennetz (Brücken, bergmännische Tunnel, usw.).
KUBA-MS	KUBA-MS ist in KUBA integriert und unterstützt die Planung der Erhaltungsmassnahmen von Kunstbauten. Nach gegebener Unterhaltstrategie, und aufgrund mathematischer Modelle werden Unterhaltsmassnahmen und Finanzbedarf auf Projektebene und auch auf Netzebene, das heisst für eine mittelfristige und eine langfristige Planung, ermittelt.
KUBA 5.0	KUBA Version 5.0 integriert die Funktionen für bergmännische Tunnel mit grundlegenden Änderungen bei der Strukturierung der Bauwerke. Es bietet die Möglichkeit komplexe Bauwerke mit einer grossen Anzahl an Hierarchieebenen darzustellen. Eigenschaften, welche entlang einer Achse konstant sind, können mittels Eigenschaftsreihen erfasst werden.
MISTRA	Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr (MISTRA). MISTRA ist ein integratives, modular aufgebautes Informationssystem.
RATP	Régie autonome des transports parisiens
SN	Schweizer Norm (SN)
SNCF	Société nationale des chemins de fer français
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
ZK	Zustandsklasse



## Normen

SN 640 900a (2004) Erhaltungsmanagement (EM) – Grundnorm, 1. Februar 2004

SN 640 904 (2003) Erhaltungsmanagement (EM) - Gesamtbewertung von Fahrbahnen, Kunstbauten und technischen Ausrüstungen: Substanz- und Gebrauchswerte, 1. August 2003

SN 640 908 (1999) Erhaltungsmanagement Bewertung von Strassenabschnitten im Netz – Funktionelle Bewertung, November 1999

SIA-Norm 197 (2004) Projektierung Tunnel – Grundlagen, 1. Oktober 2004

SIA-Norm 197/2 (2004) Projektierung Tunnel-Strassentunnel, 1. Oktober 2004

SIA-Norm 260 (2003) Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, 1. Januar 2003

SIA-Norm 269 (2011) Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken, 1. Januar 2011

SIA-Norm 269-2 (2011) Erhaltung von Tragwerken – Betonbau, 1. Januar 2011



## Literaturverzeichnis

	Literatur - Autor - Verlag - Jahr - Land	Einzelprojekt	Inhalt
[1]	<b>Time-dependent behavior of tunnel lining in weak rock mass based on displacement back analysis method</b> - Mostafa Sharifzadeh, Abolfazl Tarifard, Mohammad Ali Moridi - Tunnelling and Underground Space Technology – 2013 - AUS	EP1	Konzept inkl Prozess. Back analysis, degradation, deterioration mechanism
[2]	<b>Sensing solutions for assessing and monitoring tunnels</b> - N. A. Hault, K. Soga – 2014 - CDN	EP2	Studie über den Stand der Praxis. Monitoring, soft ground rock, wireless sensor networks, deterioration
[3]	<b>Particulate matter emissions from on-road vehicles in a freeway tunnel study</b> - Chiang Hung-Lung, Huang Yao-Sheng - Atmospheric Environment – 2009 - CHN	EP1	Studie und Messungen an einem bestehenden Tunnelanlage. Air pollutant
[4]	<b>Bayesian-network-based safety risk analysis in construction projects</b> - Limao Zhang, XianguoWu, MirosławJ.Skibniewski, JingbingZhong, YujieLu - Reliability Engineering and System Safety – 2014 - CHN	EP5, EP1	Konzept inkl Prozess. Fuzzy probability assessment of basic risk factors, tunnel leakage
[5]	<b>Predictive maintenance of shield tunnels</b> - Yong Yuan, Xiaomo Jiang, Xian Liu - Tunnelling and Underground Space Technology – 2013 -CHN	EP 2, EP 4, EP 5	Konzept inkl. Methodologie. Predictive maintenance, failure mode, damage accumulation model
[6]	<b>Experimental study on the damage mechanism of tunnel structure suffering from sulfate attack</b> - Mingfeng Lei, Limin Peng, Chenghua Shi, Shuying Wang - Tunnelling and Underground Space Technology – 2013 - CHN	EP 1	Studie und Konzept über mehre Tunnelanlage. Damage mechanism, experience-based evaluation, tunnel lining
[7]	<b>Comparative Study on Crack and Factor of Continuously Reinforced Concrete Pavement in the Tunnel and Outside</b> - Jianwei Liu, Duijia Zhao, Junmin Shen, Yancong Zhang - Procedia - Social and Behavioral Sciences – 2013 - CHN	EP2, EP1	Studie und Konzept. Damage mechanism, concrete pavement
[8]	<b>Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation fo rthe 2008 Wenchuan earthquake</b> - Z.Z. Wangn, Z.Zhang - Soil Dynamics and Earthquake Engineering – 2013 - CHN	EP1	Studie und Konzept. Influencing factors, structural information, ground condition, risk assessment
[9]	<b>A Method of Construction of Index System for Highway Maintenance Management</b> - Jie ZHU, Zhang CHEN, Li-jun SUN - Procedia - Social and Behavioral Sciences 96 -2013 -CHN	EP1, EP4	Konzept, inkl. Prozess. Index system of maintenance management (safety, quality, progress, cost and environment protection)
[10]	<b>Co-location decision tree for enhancing decision-making of pavement maintenance and rehabilitation</b> - Guoqing Zhou, Linbing Wang - Transportation Research Part C – 2012 -CHN	EP1, EP3, EP4	Konzept, inkl. Prozess. Pavement maintenance, treatment strategy
[11]	<b>Assessment service state of tunnel structure</b> - Yong Yuan, Yun Bai, Jianhang Liu - Tunnelling and Underground Space Technology – 2012 - CHN	EP2, EP1	Konzept inkl. Prozess. Structural assessment, external loads, environmental effects, tunnel lining, long term behaviour
[12]	<b>Probabilistic risk optimization of road tunnels</b> - Milan Holicky - Structural Safety – 2009 - CZ	EP4	Konzept inkl. Prozess. Probabilistic methods, risk optimization, tunnel safety
[13]	<b>Probabilistic risk assessment of highway tunnels</b> - Ondrej Nyvlt, Samuel Privara, Lukás Ferkl - Tunnelling and Underground Space Technology – 2011 - CZ	EP4, EP5, EP3, EP1	Konzept und Methode. Building and refurbishing costs minimization, preservation of satisfactory safety level, risk management
[14]	<b>Probabilistic models for tunnel construction risk assessment</b> - Olga Spacková, Eva Novotná, Michal Sejnoha, Jirí Sejnoha - Advances in Engineering Software – 2013 - CZ	EP1, EP4	Konzept und Methode. Probabilistic modelling, decision-making, prediction of tunnel construction risk
[15]	<b>Catalogue des désordres en ouvrages souterrains GT14R7F1 n°191 HS3</b> - AFTES GT 14 – AFTES – 2005 - F	EP2, EP1	Konzept und Katalogue. Damage classification, damage mechanism
[16]	<b>Assessment of tunnels</b> (provisorisch) – UIC – 2013 - EU	EP2, EP1,, EP3	Studie über den Stand der Praxis. Konzept in Entwicklung. Assessment, quantitative or qualitative indicators, prioritization of maintenance works, Bahntunnel
[17]	<b>Traitement des arrêts d'eau dans les ouvrages souterrains</b> - AFTES GT 9 – AFTES – 2006 - F	EP3	Konzept und Methodologie. Repair method, lining, tunnel leakage
[18]	<b>L'informatisation de l'archivage et de l'exploitation des données pour les tunnels en service</b> - AFTES GT 14 – AFTES – 1993 - F	EP6	Konzept, Katalogue und Tool. Data base
[19]	<b>State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining</b> - A. Haack, J. Schreyer, and G. Jackel - ITA-AITES – 1995 - F	EP2	Studie über den Stand der Technik. nondestructive testing methode, lining

	Literatur - Autor - Verlag - Jahr - Land	Einzelprojekt	Inhalt
[20]	<b>Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers - du désordre à l'analyse, de l'analyse à la cotation</b> - CETU -2015 - F	EP1, EP2	Konzept und Methodologie. Inspection, catalogue, damage mechanism, monitoring, Damage classification
[21]	<b>Analyse des effets thermiques sur le comportement mécanique des bétons destinés aux revêtements de tunnels</b> - S. Aggoun, J. M. Torrenti, J. Probst and M. Legrand - Materials and Structures – 1994 - F	EP1	Forschungskonzept, Lining, long term behaviour
[22]	<b>Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, fascicule 40: Tunnel</b> – CETU – 2012 - F	EP2, EP1	Konzept und Methodologie. Inspection, damage mechanism, monitoring
[23]	<b>AFTES GT14R8F1 Méthodologie d'aide à la gestion patrimoniale d'un parc d'ouvrages souterrains</b> - AFTES - 2013 - F	EP6, EP2	Studie über den Stand der Praxis. Maintenance management
[24]	<b>Stratégie d'auscultation des tunnels : implantation et notation</b> - N. Rhayma, P. Breul, A. Talon, P. Goirand, - AFTES Lyon – 2014 - F	EP2	Studie über den Stand der Praxis. Rail tunnel, inspection, monitoring
[25]	<b>Nomadisation des relevés de désordres sur ouvrages d'art à la RATP</b> - F. Mirouze, J.-F. Duroux - AFTES Lyon – 2014 - F	EP2	Studie über den Stand der Praxis. Rail tunnel, inspection, data base
[26]	<b>Les méthodes de diagnostic pour les tunnels revêtus GT14R4F2</b> - AFTES GT 14 – AFTES – 1995 - F	EP2, EP1	Konzept und Methodologie. Inspection, catalogue, damage mechanism
[27]	<b>Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion</b> – AFGC – AFGC – 2003 - F	EP3, EP1	Konzept und Methodologie. Repair method, lining
[28]	<b>WG 6 Maitenance and Repair - Study of methode for repair of tunnel lining</b> - ITA Working Group on Maintenance and Repair of Underground Structures - ITA-AITES – 2001 - F	EP3	Konzept und Methodologie. Repair method, lining
[29]	<b>RADIS - Relevé d'Avaries Détaillé Informatisé des Souterrains</b> - Martinière Plus – CETU – 2011 - F	EP6	Konzept, Katalogue und Tool. Inspection, data base
[30]	<b>Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsch Fernstrassennetz Stufe 1 und 2</b> - Schlussbericht zum AP-Projekt 99 245 - Ralph Holst - Bundesanstalt für Strassenwesen – 2002 - D	EP6	Konzept, inkl. Prozesse und Tool. Inspection, maintenance, data base
[31]	<b>Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsch Fernstrassennetz Stufe 3</b> - Schlussbericht zum AP-Projekt 02 244/B4 - Ralph Holst - Bundesanstalt für Strassenwesen – 2005 - D	EP6	Konzept, inkl. Prozesse und Tool. Inspection, maintenance, data base
[32]	<b>Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung</b> - Deutsche Forschungsgemeinschaft – 2010 - D	EP2	Studie über den Stand der Technik. nondestructive testing methode
[33]	<b>Soil-Structure-Interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time</b> – R. Katzenbacha, S. Lepplaa, M. Voglerb, M. Seipb, S. Kurze P. Engineering – 2013 - D	EP2, EP1	Konzept und Methodologie geotechnical monitoring, long term behaviour
[34]	<b>Network-Level Infrastructure Management Based on Metaheuristics</b> - Katharina C.Lukas, Andre Borrmann - 2013 - D	EP5, EP3, EP4	Konzept und Methodologie. Maintenance cost, probabilistic deterioration functions, Verkehrsbelastung
[35]	<b>Ingenieurbauwerke (Brücken, Tunneln, Durchlässen und sonstigen Bauwerken) im Zuge von Strassen und Wegen, Überwachung und Prüfung DIN 1076</b> - DIN Deutsche Institut für Normung – 1999 - D	EP1, EP2	Normen Inspektion
[36]	<b>Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076</b> Bundesministerium für Verkehr – 2013 - D	EP1, EP4	Normen Inspektion
[37]	<b>Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken bei Kreis- und Gemeindestraßen</b> – M. Schmid - Bayerischer Kommunalen Prüfungsverband 2009 - D	EP1	Konzept und Methodologie Inspection, monitoring, non destructive testing method
[38]	<b>Dauerhaftigkeit von Übergängen zwischen unterschiedlichen Abdichtungssystemen</b> - STUVA – 2011 - D	EP3	Konzept und Methodologie. Long term behaviour
[39]	<b>Tunnelauskleidung aus geschliffener weißer Spritzmörtelschicht. Dauerhaft und betriebssicher</b> - Krispel, Stefan – Beton – 2011 - D	EP3	Konzept und Methodologie. Repair method, long term behaviour, lining
[40]	<b>A risk-based maintenance management model for toll road/tunnel operations</b> - M. F. Ng, V. M. Rao Tummala, Richard C. M. Yam - Construction Management and Economics – 2003 - HK	EP5, EP4, EP1	Konzept und Methodologie Risk management, preventive maintenance
[41]	<b>The effects of atmospheric multipollutants on modern concrete</b> – N. Marinonia, M. Pellizon Birelli, C. Rostagno, A. Pavese - Atmospheric Environment – 2003 - I	EP1	Konzept und Methodologie Air pollutant, damage mechanism, lining
[42]	<b>A methodology based on the Analytic Hierarchy Process for the quantitative assessment of emergency preparedness and response in road tunnels</b> – D. Manca, S. Brambilla - Transport Policy – 2011 - I	EP4	Methodologie Risk assessment, analytic hierarchy Process, decision making, tunnel safety
[43]	<b>Research on the long-term behaviour and evaluation of lining concrete of the Seikan tunnel</b> - Y. Tuchiya, T. Kurakawa, T. Matsunaga, T. Kudo - Soils and foundations – 2009 - JP	EP1	Konzept und Methodologie Long term behaviour, lining
[44]	<b>Monitoring System of Railway Tunnels with Wireless Sensor Network</b> - Kiwanu Tsuno, Ryo Hirata - Quarterly Report of RTRI – 2014 - JP	EP2	Konzept und Methodologie Monitoring, rail tunnel
[45]	<b>Road Tunnels in Japan: Deterioration and Countermeasures</b> - Akira Inokuma and Shigeru Inano - Tunneling and Underground Space Technology – 1996 - JP	EP1	Forschungsprojekt, Deterioration mechanism

	Literatur - Autor - Verlag - Jahr - Land	Einzelprojekt	Inhalt
[46]	<b>Identification of Correlation between Demand Performances to Damage of Lining Concrete for Tunnel Management</b> - T. Sato, A. Sutoh, H. Nishi and H. Arai - Procedia Engineering – 2011 -- JP	EP1, EP2, EP5	Forschungsprojekt, Aeging, management system, life cycle cost
[47]	<b>Development of Performance-Based Tunnel Evaluation Methodology and Performance Evaluation of Existing Railway Tunnels</b> - S. Kimura, T. Kitani, A. Koizumi - Journal of Transportation Technologies – 2012 - JP	EP1	Konzept und Methodologie Performance indicator, performance-based design, maintenance, lining, rail tunnel
[48]	<b>Reflections on Bayesian Network models for road tunnel safety design: A case study from Norway</b> - Audun Borg, Henrik Bjelland, Ove Na - Tunneling and Underground Space Technology – 2014 - NO	EP4	Konzept und Methodologie Risk assessments, Bayesian Network, tunnel safety
[49]	<b>Mobilisation of heavy metals during tunnel</b> - S. Andersen, O. Vethe - The Science of the Total Environment – 1994 - NO	EP1	Forschungsprojekt Maintenance, wash water
[50]	<b>Treatment of tunnel wash waters – experiments with organic sorbent materials. Part I: Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons and nonpolar oil</b> - Paruch A. M, Roseth R. - Journal of Environmental Sciences – 2008 - NO	EP1	Forschungsprojekt Maintenance, wash water
[51]	<b>Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel</b> - Seung-Nam Yu, Jae-Ho Jang, Chang-Soo Han - Automation in Construction – 2007 - ROK	EP2	Forschungsprojekt Inspection, image processing
[52]	<b>Inspection, Maintenance and Repair of Tunnels: International Lessons and Practice</b> - J. A. Richards - Tunneling and Underground Space Technology – 1998 - ZA	EP2	Studie über den Stand der Praxis. Non destructive testing method
[53]	<b>MAINTenance, renewAL and improvement of rail transport INfrastructure to reduce Economic and environmental impacts MAINLINE</b> - Julian Canto-Perello, Jorge Curiel-Esparza, Vicente Calvo - Tunneling and Underground Space Technology – 2009 - EU	EP6, EP2, EP3, EP1	Forschungsprojekt, Methodologie und Tool Asset management, repair method, decision making,
[54]	<b>Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau</b> - IP BAU – 2000 - CH	EP2	Forschungsprojekt und Methodologie Inspection, nondestructive testing, monitoring
[55]	<b>Analysis of concrete in a vertical ventilation shaft exposed to sulfate-containing groundwater for 45 years</b> - A. Leemann, R. Loser – EMPA – 2011 - CH	EP1	Forschungsprojekt und Methodologie Damage mechanism, lining, aeging
[56]	<b>Analysis of Pathologies and Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels</b> – F. Sandrone – EPFL – 2008 - CH	EP6, EP2, EP3, EP1	Konzept, Methodologie und Tool Long term behaviour, Correspondence analysis, maintenance, data base
[57]	<b>Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten - Synthesebericht</b> - Emch Berger – ASTRA – 2010 - CH	EP3, EP4	Forschungsbericht und Methodologie Repair method, risk analysis, bridge
[58]	<b>Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen</b> – VSS – 2010 - CH	EP3	Forschungsbericht und Methodologie Damage mechanism, costs
[59]	<b>Risk based inspection and maintenance planning</b> – International Workshop – IBK ETHZ - 2000 - CH	EP2, EP3, EP4	Sammlung von Forschungskonzept und Methodologie Risk based inspection, maintenance
[60]	<b>Tunnel conditions assessment based on image analysis : a new inspection procedure for railway tunnels</b> - F. Sandrone – WTC – 2013 - CH	EP2	Konzept und Methodologie Inspection, image processing
[61]	<b>Schädigungsmechanismen der Betonkorrosion in Tunnelbauwerken</b> - M. Pfiffner, L. Holzer – ASTRA – 2001 - CH	EP1	Forschungsprojekt und Methodologie Maintenance. damage mechanism, long term behaviour, lining
[62]	<b>Versinterungsprobleme in Bauwerkentwässerungen</b> - T. Gamisch, G. Girmscheid – Bauwerk – 2007 - CH	EP3, EP1	Forschungsprojekt und Methodologie Maintenance. damage mechanism
[63]	<b>Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen</b> – ASTRA – 2005 - CH	EP2, EP3	Richtlinie Maintenance
[64]	<b>Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen - Planung und Durchführung des Unterhalts</b> - ASTRA – 2002 - CH	EP2	Richtlinie Maintenance
[65]	<b>KUBA 5.0 - Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel - Datenerfassungshandbuch</b> - A. Fastrich, R. Hajdin, D. Brunner, B. Stempfel – ASTRA – 2012 - CH	EP6, EP2, EP3	Konzept und Tool Inspection, catalogue, data base
[66]	<b>Datenbank für die Erhaltung von bergmännischen Tunneln - Fachkonzept und Fachkataloge</b> - B. Stempfel – ASTRA – 2004 - CH	EP6, EP2	Konzept und Tool Inspection, catalogue, data base
[67]	<b>Langzeitverhalten von Abdichtungssystem für Tagbautunnel (LABSY-TBT)</b> - P. Flueler – ASTRA – 2004 - CH	EP1	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, damage mechanism
[68]	<b>Identification and analysis of Swiss National Road tunnels pathologies</b> - F. Sandrone, V. Labiouse - Tunneling and Underground Space Technology – 2011 - CH	EP6, EP2	Konzept, Methodologie und Tool Long term behaviour, Correspondence analysis, maintenance, data base
[69]	<b>Die zerstörungsfreie Untersuchung von Leckstellen in zweischaligen Untertagbauwerken</b> – FGU – 2008 - CH	EP2	Forschungsprojekt Maintenance, non destructive testing method
[70]	<b>Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D</b> – R. Loser, A. Leemann, - ASTRA - 2013 - CH	EP1	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, damage mechanism

	Literatur - Autor - Verlag - Jahr - Land	Einzelprojekt	Inhalt
[71]	<b>Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)</b> - H. Kramer, B. Fischer, Dr. C. Löwe – ASTRA – 2014 - CH	EP1	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, damage mechanism, ageing, repair method
[72]	<b>Data Collection for Swiss Road Tunnels maintenance</b> - Sandrone F., Labiouse V. Mathier JF – Felsbau – 2007 - CH	EP6	Konzept, Methodologie und Tool Long term behaviour, data base
[73]	<b>Risque Base Inspection - Framework</b> - M.H. Faber – International Workshop – IBK ETHZ – 2000 - CH	EP2, EP1	Forschungskonzept und Methodologie Risk based inspection, maintenance
[74]	<b>Erhaltungsmanagement der Strassenverkehrsanlagen, Generelle Fachkonzepte, MSE 99 / 00</b> - HP. Lindenmann, H. Bär, Dr. R. Hajdin, C. Morzier, Dr. A. Rafi, Hr. Scheidegger, Chr. Scholer, U. Welte, - VSS – 2000 - CH	EP2	Forschungsprojekt und Methodologie Maintenance management. Damage classification, repair method, inkl BSA
[75]	<b>Waterproofing systems for tunnels: chemical resistance after 10 years?</b> - C. Löwe, B. Fischer, H. Kramer, C. Walder - AFTES Lyon – 2011 - CH	EP1	Forschungsprojekt und Methodologie Damage mechanism, long term behaviour
[76]	<b>Laser scanning images analysis for tunnel inspection</b> - F. Sandrone, R. Wissler – 2010 - CH	EP2	Konzept und Methodologie Inspection, image processing
[77]	<b>Modèle d'évolution de l'état des ponts-routes en béton</b> - Roelfstra G. – EPFL – 2001 - CH	EP1, EP4	Forschungsprojekt und Methodologie deterioration mechanism, Zustandsbewertung
[78]	<b>Effet du microclimat sur l'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton armé</b> – D. Conciatori – EPFL – 2005 - CH	EP1	Forschungsprojekt und Methodologie deterioration mechanism,
[79]	<b>Anwendbarkeit der zerstörungsfreien Prüfmethode Impact-Echo</b> – VSS – 2001 - CH	EP2	Forschungsprojekt und Methodologie Monitoring, non destructive testing method
[80]	<b>Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Georadar-Ergebnissen auf Betonbrücken</b> – VSS – 2005 - CH	EP2	Forschungsprojekt und Methodologie Monitoring, non destructive testing method
[81]	<b>Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken</b> - TFB, Tiefbauamt Kanton Basel-Landschaft – ASTRA – 2013 - CH	EP1, EP2	Forschungsprojekt und Methodologie Monitoring, deterioration mechanism, repair
[82]	<b>Entwicklung einer besten Praxis Methode zur Risikomodellierung für Strassentunnelanlagen</b> - ASTRA – 2011 - CH	EP4	Forschungsprojekt und Methodologie Risk analysis, tunnel safety
[83]	<b>KUBA-MS Technisches Handbuch</b> - R. Hajdin, A. Fastrich – ASTRA – 2011 - CH	EP5	Konzept und Tool Inspection, costs, deterioration mechanism, data base
[84]	<b>Erhaltungsmanagement: Gesamtbewertung- Substanz- und Grebrauchswert</b> - Rafi A. Hajdin R., Lindenmann H.-P. – VSS – 2003 - CH	EP5	Forschungsprojekt und Methodologie
[85]	<b>Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlagen im Erhaltungsmanagement</b> A. Schneider, T. Herrmann, J. Lüking, A.-A. Rafi - VSS – 2012 - CH	EP5	Forschungsprojekt und Methodologie Cost
[86]	<b>Gesamtbewertung von Kunstbauten</b> - ewp AG Effretikon – ASTRA – 2014 - CH	EP1, EP2, EP4	Forschungsprojekt und Methodologie, Inspection, damage classification
[87]	<b>Kostenmodell für das Erhaltungsmanagement von Kunstbauten</b> - R. Hajdin, - ASTRA – 2006 - CH	EP5	Forschungsprojekt und Methodologie Cost
[88]	<b>Statische Auswirkung, Machbarkeit und Ausführungsaspekte von Gebirgsdrainagen im Untertagbau</b> - G. Anagnostou – FGU – 2013 - CH	EP3	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour
[89]	<b>Verbesserung von Reparaturmörtel</b> - B. Stutz – ASTRA – 1992 - CH	EP3	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, repair method
[90]	<b>Eignung zweier Inhibitoren (MFP und Sika FerroGard-903) zur Instandsetzung von chloridbelasteten Stahlbetonbauten</b> - F. Hunkeler, H. Ungricht, Y. Schiegg; - ASTRA – 2001 - CH	EP3	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, repair method
[91]	<b>Herstellung, Anwendung und Dauerhaftigkeit von selbstverdichtendem Beton Teil 1</b> - C. Hoffmann, A. Lehmann – ASTRA – 2004 - CH	EP3	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, lining
[92]	<b>Dauerhafte Kunstbauten bei geringem Unterhalt – Ausgewählte Kapitel</b> - E. Brühwiler, D. Denarié, T. Wälchli, M. Maître, D. Conciatori – ASTRA – 2005 - CH	EP3	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, lining
[93]	<b>Hydrophobieren von Betonoberflächen – Empfehlungen für Planung und Applikation</b> - S. Meyer, E. Volker, H. Wittmann – ASTRA – 2005 - CH	EP3	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, lining
[94]	<b>Untersuchung der Wirkung unterschiedlicher Oberflächenschutzkonzepte</b> - S. Meier und G. Martinola – ASTRA – 2006 - CH	EP3	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, repair method, lining
[95]	<b>Instandsetzung von Galerien – Wirkung und Wirksamkeit der ergriffenen Massnahmen</b> - H. Ungricht, F. Hunkeler – ASTRA – 2007 - CH	EP3	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, repair method, lining
[96]	<b>Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke</b> - A. Steiger, V. Nicollier – ASTRA – 2008 - CH	EP3	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, repair method, lining
[97]	<b>Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen</b> - E. Iglesias, V. Wetzig – ASTRA – 2009 -CH	EP3	Forschungsprojekt und Methodologie Repair method, lining
[98]	<b>1260 FGU 2005/001 "Testeinsatz der Methodik «Indirekte Voraus erkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten» anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels"</b> – FGU - 2009 - CH	EP2	Forschungsprojekt und Methodologie Vortrieb, non destructive testing method

	Literatur - Autor - Verlag - Jahr - Land	Einzelprojekt	Inhalt
[99]	<b>FGU 2003/003 Evaluation der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten" in Bezug auf Aussagekraft und Nutzen für den Vortrieb</b> – FGU – 2005 - CH	EP2	Forschungsprojekt und Methodologie Vortrieb, non destructive testing method
[100]	<b>FGU 2009/003 Karst-ALEA: Prevision of karst-related hazards in underground works</b> - FGU – 2011 - CH	EP2	Forschungsprojekt und Methodologie Vortrieb, non destructive testing method
[101]	<b>ASTRA 52/94, 5408.01 Untertagbau in quellfähigem Fels</b> - Christian Amstad und Kalman Kovári – ASTRA – 2001 CH	EP1	Forschungsprojekt und Methodologie Long term behaviour, repair method, lining
[102]	<b>Wireless sensor networks for underground railway applications: case studies in Prague and London</b> - P. J. Bennett, K. Soga, I. Wassell, P. Fidler, K. Abe - Smart Structures and Systems – 2010 - GB	EP2	Konzept und Methodologie Monitoring, rail tunnel
[103]	<b>Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure</b> – P. Kumar, B. Imam - Science of the Total Environment – 2013 - GB	EP1	Forschungsprojekt Air pollutant, lining, building
[104]	<b>Reduction of operational cost of road tunnels, report and recommendation</b> - Groupe de travail 1 C5 – AIPCR – 1999 - GB	EP5	Studie über den Stand der Praxis und Methodologie Maintenance,
[105]	<b>An Image-Based System for Change Detection on Tunnel Linings</b> – S. Stent, R. Gherardiy, B. Stengery, K. Soga, R. Cipolla - Machine Intelligence Laboratory, Cambridge University Engineering Department.- 2013 - GB	EP2	Forschungsprojekt Inspection, image processing
[106]	<b>Report on the Damaging Effects of Water on Tunnels During Their Working Life</b> - ITA Working Group on Maintenance and Repair of Underground Structures - Tunnelling and Underground Space Technology – 1991 - GB	EP3, EP1	Konzept und Methodologie Damage classification, repair method tunnel leakage
[107]	<b>NeTTUN WP10 - Decision Support on Tunnel Maintenance Management</b> - 2014 - GB	EP1, EP6	Forschungsprojekt und Methodologie Decision Support system, maintenance management
[108]	<b>Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and infrastructure</b> – 11th International conference on structural safety and liability - 2013 –USA	EP2, EP1	Sammlung von technische Artikel Deterioration mechanism, risk analysis, monitoring, probabilistic modeling
[109]	<b>Smart bridges, smart tunnels: Transforming wireless sensor networks from research prototypes into robust engineering infrastructure</b> - F. Stajano, N. Hoult, I. Wassell, P. Bennett, C. Middleton, - Ad Hoc Networks – 2010 - GB	EP2, EP1	Konzept und Methodologie Monitoring,
[110]	<b>Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual</b> - Federal Highway Administration - Federal Highway Administration – 2005 - USA	EP2	Konzept, Methodologie und Handbuch Inspection,
[111]	<b>The Application of Nondestructive Evaluation to Subway Tunnel Systems</b> - N. Delatte, Shen-en Chen, -TRB Annual Meeting - 2003 - USA	EP2	Konzept und Methodologie Inspection, monitoring, non destructive testing method, rail tunnel
[112]	<b>Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance of structures and infrastructures: a brief review</b> - - D. M. Frangopol, D. Saydam, S. Kim - Structure and Infrastructure Engineering – 2012 - USA	EP2, EP3, EP1	Studie über den Stand der Praxis Maintenance, life-cycle performance
[113]	<b>Bridge network performance, maintenance and optimisation under uncertainty: accomplishments and challenges</b> – D. M. Frangopol, P. Bocchini - Structure and Infrastructure Engineering – 2012 - USA	EP3, EP5, EP1	Studie über den Stand der Praxis Maintenance, life-cycle performance
[114]	<b>Integration of structural health monitoring in a system performance based life-cycle bridge management framework</b> – N. M. Okasha, D. M. Frangopol - Structure and Infrastructure Engineering – 2012 - USA	EP2, EP1, EP3	Konzept und Methodologie Monitoring, performance indicator, Damage classification
[115]	<b>Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost</b> – D. M. Frangopol, M. Liu - Structure and Infrastructure Engineering – 2007 - USA	EP5, EP1, EP3	Konzept und Methodologie Life-cycle cost, performance indicator, deterioration mechanism
[116]	<b>Life-cycle performance, management, and optimisation of structural systems under uncertainty: accomplishments and challenges</b> – D. M. Frangopol - Structure and Infrastructure Engineering – 2011 - USA	EP2, EP1, EP3	Konzept und Methodologie Predictive maintenance, life-cycle cost, performance indicator,
[117]	<b>Fiber Optic Sensors for Transportation Infrastructural Health Monitoring</b> –C. Chang, R. Mehta - American J. of Engineering and Applied Sciences – 2010 - USA	EP2	Studie über den Stand der Technik. Non destructive testing methode
[118]	<b>Modeling of risk-based inspection, maintenance and life-cycle cost with partially observable Markov decision processes</b> - R.B. Corotis, J. H. Ellis, M. Jiang - Structure and Infrastructure Engineering – 2005 - USA	EP2, EP1	Konzept und Methodologie Inspection, risk management, decision making
[119]	<b>Tunnel Asset Management (TAM) Program Application for High Risk Structural Components</b> - H. Zamenian, D. D. Koo - Journal of Engineering and Architecture – 2014 - USA	EP2	Konzept und Methodologie High risk structural components inspection
[120]	<b>Tunnel operations, maintenance, inspection and evaluation (tomie) manual</b> - Federal Highway Administration - Federal Highway Administration – 2013 - USA	EP2, EP3, EP1	Konzept, Methodologie und Handbuch Inspection, maintenance management, non destructiv testing method, deterioration mechanism
[121]	<b>Highway and Rail Transit Tunnel Maintenance and Rehabilitation Manual</b> - US department of transportation - US department of transportation – 2004 - USA	EP5, EP3	Konzept, Methodologie und Handbuch Predictive maintenance, repair method, lining, cost
[122]	<b>Weisung 74001 Sicherheitsanforderungen an Tunnel im Nationalstrassennetz</b> - ASTRA - 2011 - CH		Tunnelsicherheit
[123]	<b>Operative Sicherheit Betrieb - Vorgaben für die Tunnel und die offene Strecke</b> - ASTRA 80050 2011 - CH		Tunnelsicherheit

	Literatur - Autor - Verlag - Jahr - Land	Einzelprojekt	Inhalt
[124]	<b>Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz</b> - Europäischen Parlaments Richtlinie 2004/54/ce 2004 - EU		Tunnelsicherheit
[125]	<b>Sicherheitsbewertung von Straßenverkehrstunneln auf Basis richtliniengerecht ausgestatteter Tunnel</b> " - 03.433 - D		Tunnelsicherheit
[126]	<b>Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen</b> - 2308003 "Verbundprojekt SKRIBT - D		Tunnelsicherheit
[127]	<b>RABT Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln</b> - 2006 - D		Tunnelsicherheit
[128]	<b>Methodik zur Analyse und Bewertung von Straßennetzen und der darin enthaltenen Straßeninfrastrukturelemente (Brücken und Tunnel) im Hinblick auf ihre Sensibilität bei möglichen Schadensereignissen mit kriminellen Hintergrund</b> - EU-Projekt SERON (2309016) - D		Tunnelsicherheit
[129]	<b>Facteurs humains et sécurité dans les tunnels du point de vue des usagers</b> - AIPCR Comité technique C3.3 Exploitation des tunnels routiers 2.		Tunnelsicherheit
[130]	<b>Exploitation des tunnels routiers 3.Outils pour la gestion de la sécurité des tunnels routiers</b> - AIPCR Comité technique C3.3 - 2009		Tunnelsicherheit
[131]	<b>Exploitation des tunnels routiers 4.Tunnels routiers : évaluation des systèmes fixes de lutte contre l'incendie</b> - AIPCR Comité technique C3.3 2008		Tunnelsicherheit
[132]	<b>Exploitation des tunnels routiers 8.Approche intégrée de la sécurité des tunnels routiers</b> - AIPCR Comité technique C3.3		Tunnelsicherheit
[133]	<b>Road Safety Guide sur les audits de sécurité routière pour l'évaluation de la sécurité dans les nouveaux projets routiers</b> - AIPCR Comité technique 3.1 Sécurité routière / Technical Committee 3.1		Tunnelsicherheit
[134]	<b>Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation)</b> - Ministère de l'équipement, 2000 - F		Tunnelsicherheit
[135]	<b>Circulaire du 12 juin 2009 relative à l'établissement des diagnostics de sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 mètres</b> - Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire – 2009 - F		Tunnelsicherheit
[136]	<b>Multiyear Plan for Bridge and Tunnel Security Research, Development, and Deployment</b> – Research, Development, and Technology, Turner-Fairbank Highway Research Center - US department of transportation – 2006 - USA		Tunnelsicherheit
[137]	<b>Managementsystem für Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen der Schweizer Nationalstrassen (EMS-CH).</b> – Fachkonzept – 2012, V4.00		BSA

# 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: 31.08.2016

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: AGT 2014/001

Projekttitel: Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln - Initialprojekt

Enddatum: 31.08.2016

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die vorliegende Studie zum Thema Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln und tunnelähnlichen Objekten wie Tagbautunneln, Galerien, Einhausungen, etc. stützt auf eine umfassende Bestandsaufnahme der bis heute vorhandenen sowohl schweizerischen als auch länderübergreifenden Literatur und den bisherigen Erkenntnissen aus der Praxis. Für die Analyse der bestehenden Literatur wurden die Aspekte Erhaltungsprozess, Inventar, Schadensprozesse, Inspektionsmethoden, Entscheidungsprozess und Erhaltungsmassnahmen im Einzelnen untersucht und die entsprechenden Literaturquellen aufgeführt und kommentiert.

Betreffend Erhaltungsprozess konnte festgestellt werden, dass der Tunnel nicht als Teilsystem, sondern als Teil der gesamten Kunstbauten bewertet ist und daher die Anforderungen an die Erhaltung des Tunnels nicht gebührend berücksichtigt sind. Auch in der Schweiz ist die Erhaltung von bergmännischen Tunneln bisher eher projektbezogen und nicht standardisiert behandelt.

In Bezug auf das Inventar und die Schadensprozesse kann ausgesagt werden, dass zwar zahlreiche Studien zu konkreten Schadensprozessen ausgeführt wurden, jedoch eine systematische Betrachtung der Einflussfaktoren, deren Verlauf sowie deren Kombinationen auf die Schadensentwicklung fehlt. Ausserdem ist in keiner der untersuchten Literaturquellen eine Typisierung der relevanten Schadensprozesse und deren Langzeitentwicklung vorzufinden.

Zur Thematik Inspektionsmethoden ist hervorzuheben, dass Bahnunternehmungen in den letzten Jahren eine konstruktive Analyse gestartet haben, um die Inspektionsprozesse zu vereinfachen und teilweise zu automatisieren. Bei Strassentunneln ist die Problematik zwar ähnlich, es fehlen jedoch bis heute Vergleiche und eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Methoden. Die Literatur zeigt zudem, dass gewisse Untersuchungsmethoden sowie messtechnische Überwachungen ein grosses Verbesserungspotential für den Inspektionsprozess darstellen.

Zu den Themen Risikomanagement, Bewertungsmethodik und Prognosemodell, welche zur Entscheidungsfindung beitragen, gibt es deutlich mehr Literatur im Zusammenhang mit Strassen- bzw. Kunstbauten-Erhaltungsmanagement, als für Tunnelbauten. Mögliche Prognosemodelle für bergmännische Tunnel sind auf ihre Umsetzbarkeit und Integration in die Entscheidungsfindung zu evaluieren.

Im Hinblick auf die Erhaltungsmassnahmen ergibt sich aus der Analyse der bestehenden Literatur, die Notwendigkeit, die Erhaltungsmassnahmen in Abhängigkeit ihrer Wirkung, ihrer Kosten und ihres Ausführungsaufwandes zu systematisieren und zu katalogisieren. Eine Gliederung der Erhaltungsmassnahmen und deren langfristigen Auswirkung ist sowohl für präventive als auch für korrektive Massnahmen von Nutzen.

Die ausführliche Literaturrecherche, welche diesem Initialprojekt zu Grunde liegt, hat es erlaubt, die Grundlagen zu erarbeiten, die für die Definition des Erhaltungsmanagementprozesses erforderlich sind und auf dessen Basis die Ausschreibung der Einzelprojekte erfolgt.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

#### Zielerreichung:

Das systematische und methodische Vorgehen hat erlaubt, die zu Beginn der Studie aufgeworfenen Fragestellungen zu beantworten. Die nachstehenden Projektziele konnten somit erreicht werden.

- Umfassende Bestandsaufnahme der bis heute bestehenden schweizerischen und internationalen Literatur.
- Aufzeigen von Wissenslücken um die weitere Forschung anzuregen.
- Systemdefinition und Abgrenzung für das Teilsystem bergmännische Tunnel.
- Definition des Prozesses Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln und Integration in den Gesamtprozess Erhaltungsmanagement der Strasseninfrastruktur.
- Vorschlag von Einzelprojekten, welche sich auf die verschiedenen Teilprozesse des Erhaltungsmanagements beziehen und dessen Grundlagen vertiefen.

#### Folgerungen und Empfehlungen:

Mit Bezug auf den aktuellen Wissensstand und insbesondere um die bestehenden Wissenslücken zu schliessen, wird im Rahmen des Initialprojektes aufgezeigt, dass im Hinblick auf eine langfristige, effiziente und objektbezogene Erhaltungsplanung von bergmännischen Tunneln zwingend weiterführende Grundlagen erforderlich sind. Es wird aus diesem Grund empfohlen, folgende Einzelprojekte zu entwickeln.

- EP1 Schadensprozesse und Langzeiterhalten bei Tunneln: Beschreibung und Systematisierung der Schadensprozesse, ihrer Einflussfaktoren und Auswirkungen auf das Langzeilverhalten der Tunnel auf der Basis von Befunden aus Inspektionen, Beobachtungen und Kontrollmessungen.
- EP2 Überwachungs- und Inspektionsmethoden: Identifikation der Methoden und der notwendigen Werkzeuge zur Festlegung der Schadensprozesse sowie Optimierung der Inspektionen und Integration der Risikoanalyse in das Inspektionsprogramm.
- EP3 Analyse, Festlegung und Katalogisierung der Erhaltungsmassnahmen im Hinblick auf eine langfristige, effiziente Erhaltungsplanung der verschiedenen Schadensprozesse, ihrer Kosten und ihrer Umsetzung.
- EP4 Entwicklung eines geeigneten Entscheidungsmodells mit Integration von Befunden, Schadensprozessen und Erhaltungsmassnahmen, mit/ohne Berücksichtigung der Schnittstelle des Teilsystems BSA.
- EP5 Entwicklung eines Kostenmodells als Entscheidungsgrundlage für die Auslösung der erforderlichen Erhaltungsmassnahmen für bergmännische Tunnel.
- EP6 Praktische Umsetzung der aus den fünf EP entwickelten Methoden mit Hilfe der Daten der bereits bestehenden Tunneldatenbanken. Entwurf eines Datenmodells und Prüfung anhand eines einfachen Prototyps.

Die Gesamtprojektleitung, welche die spezifischen Projekte begleiten wird, gewährleistet den geordneten Projektlauf sowie die Koordination zwischen den Einzelprojekten.

#### Publikationen:

B. Stempfel, M. Dell Antonio, A. Mordasini (2016): Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln - Initialprojekt. Forschungsprojekt AGT 2014/001 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT), Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.

#### Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Stempfel

Vorname: Benoit

Amt, Firma, Institut: Lombardi SA, Minusio

#### Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



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

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Im Rahmen der durchgeführten BK-Sitzungen wurde jeweils der aktuelle Stand des Forschungsprojektes erläutert und in den entsprechenden Protokollen erfasst. Sämtliche Anpassungswünsche und Anregungen insbesondere zur Schnittstellenthematik zwischen den Einzelprojekten seitens der Begleitkommission zum weiteren Vorgehen wurden ausführlich diskutiert und von der Forschungsstelle dankend entgegengenommen und weiter bearbeitet.

Umsetzung:

Die zu Beginn des Initialprojektes aufgeworfene Fragestellung zur Systematisierung der einzelnen Fachprozesse, welche den übergeordneten Erhaltungsmanagementprozess kennzeichnen, konnte im Verlauf der Berichterstellung und infolge der Diskussionen innerhalb der BK-Sitzungen beantwortet und im Schlussbericht klar dargestellt werden. Ausgehend von der Literaturanalyse und der Zuordnung der bestehenden Forschungs- und Literaturquellen zu einzelnen Prozessen wie Bauwerksdiagnostik, Inspektions- und Überwachungsprozessen, Erhaltungsmaßnahmen und Unterstützungsprozessen zur Entscheidungsfindung hat es ermöglicht, die Einzelprojekte und deren Schnittstellen zu definieren.

weitergehender Forschungsbedarf:

Das vorliegende Initialprojekt bildet die Grundlage für das vorgeschlagene Forschungspaket. Jedes der sechs vorgeschlagenen Einzelprojekte soll weiterführende Grundlagen erarbeiten, um eine langfristige Erhaltungsplanung zu ermöglichen.

Einfluss auf Normenwerk:

Keiner.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Welte

Vorname: Urs

Amt, Firma, Institut: Amstein und Walther AG, Zürich

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch) (*Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.