



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 Tunnel Zustand: Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln

**Gestion constructive de la maintenance en tunnel creusé -
processus d'endommagement et comportement à long
terme dans les tunnels**

**Maintenance management of underground mining tunnels -
damage processes and long-term behavior in tunnels**

Lombardi AG
Reto Weishaupt, MSc Bauing. ETH
Patrick Beeler, dipl. Bauing. ETH

**Forschungsprojekt AST_2020_101 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

Dezember 2024

1781

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 Tunnel Zustand: Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln

**Gestion constructive de la maintenance en tunnel creusé -
processus d'endommagement et comportement à long
terme dans les tunnels**

**Maintenance management of underground mining tunnels -
damage processes and long-term behavior in tunnels**

Lombardi AG
Reto Weishaupt, MSc Bauing. ETH
Patrick Beeler, dipl. Bauing. ETH

**Forschungsprojekt AST_2020_101 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

Dezember 2024

1781

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Patrick Beeler, Lombardi AG, Luzern

Mitglieder

Reto Weishaupt, Lombardi AG, Luzern

Begleitkommission

Präsident

Heinz Ehrbar, Heinz Ehrbar Partners GmbH

Mitglieder

Raffaele Filippini, Filippini & Partner Ingegneria SA

Christian Gammeter, ASTRA

Federica Sandrone, SBB

Bastian Otto, AXPO Power AG

Urs Vollmer, ASTRA

Martin Wyss, ASTRA

Antragsteller

Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	11
Summary	15
1 Einleitung	19
1.1 Anlass.....	19
1.1.1 Ausgangslage und Kontext	19
1.1.2 Übergeordnete Fragestellungen im Forschungsprojekt.....	20
1.1.3 Fragestellung auf Einzelprojekt bezogen	21
1.2 Grundlagen und Datenbasis	22
1.2.1 Normen und Richtlinien	22
1.2.2 Literaturrecherche	22
1.2.3 Fallbeispiele	22
1.3 Stand der Praxis und Forschung (State of the Art)	23
1.3.1 Stand der Praxis und Forschung Erhaltungsmanagement Tunnel	23
1.3.2 Stand der Forschung in Bereich von Schadensprozessen und Verfallsmodellen	27
1.3.3 Folgerungen für das Forschungsprojekt	37
1.4 Zweck und Ziel des Einzelprojektes.....	39
1.4.1 Übergeordnetes Hauptziel des Forschungsprojekts	39
1.4.2 Beitrag des Einzelprojekts zum Hauptziel.....	40
1.5 Erwartete Resultate und Nutzniessung	41
1.6 Definition Erhaltungsprozess und Abgrenzung	42
1.6.1 Erhaltungsprozess und Projektgenerierung	42
1.6.2 Abgrenzung Forschungsprojekt	47
1.7 Methodik der Forschungsarbeit.....	48
1.8 Ablauf und Organisation des Forschungsprojekts	51
1.8.1 Organisation und Beauftragter	51
1.8.2 Ablauf und Bearbeitungszeitraum	51
1.9 Bauwerksgliederung unter Berücksichtigung der Anforderungen des ASTRA.....	52
2 Ergebnisse des Einzelprojekts	55
2.1 Bauwerksgliederung des Forschungsprojekts	55
2.1.1 Relevanz der Bauwerksgliederung für Forschungsprojekt	55
2.1.2 Datengrundlage der Bauwerksgliederung.....	55
2.1.3 Struktur der Bauwerksgliederung im Forschungsprojekt	56
2.1.4 Umsetzung der Bauwerksgliederung in den Katalogen EP1/EP2/EP3	58
2.1.5 Implementierung der Bauwerksgliederung in bestehende und neue Datenmodelle / - banken.....	59
2.2 Anforderungen an die Kataloge der Schadensprozesse und der Gefährdungsbilder	61
2.3 Katalog Schadensprozesse	62
2.3.1 Systematisierung und Aufbau Katalog Schadensprozesse	62
2.3.2 Information zu Schadensprozessen.....	64
2.3.3 Vollständigkeitsnachweis Katalog Schadensprozesse	66
2.4 Katalog der Gefährdungsbilder	69
2.4.1 Systematisierung und Aufbau Katalog Gefährdungsbilder	69
2.4.2 Information zu Gefährdungsbildern.....	71
2.4.3 Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren	72
2.5 Aussagekraft und Grenzen der Kataloge	74
3 Erkenntnisse und Folgerungen	77
3.1 Grundsätzliches	77
3.2 Kompatibilität der Grundlagen mit bestehenden Daten und Planungsmethoden	77
3.3 Anwendung	78

3.3.1	Anwendung der Kataloge.....	78
3.3.2	Hinweise zu Anwendungsmöglichkeiten der Kataloge	80
3.3.3	Anwendungsbeispiel	86
3.3.4	Auswertung Fallbeispiele	92
3.4	Plausibilität und Zuverlässigkeit der Angaben	92
3.5	Praktischer Nutzen.....	92
4	Empfehlungen	95
5	Datengrundlage.....	97
5.1	Kompilation der Literatur	97
5.2	Kompilation Fallbeispiele	97
	Anhänge.....	99
	Glossar.....	101
	Literaturverzeichnis.....	105
	Projektabschluss	109

Zusammenfassung

Im Jahr 2014 hat das ASTRA einen Forschungsauftrag zum Thema Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln ausgelöst, der 2016 in einem Bericht zum Initialprojekt [67] resultierte. In diesem Bericht wird aufgezeigt, dass die Erhaltungsprozesse für Tunnel im Vergleich zu Kunstbauten nicht angemessen berücksichtigt und auch nicht standardisiert sind.

Darauf aufbauend wurde das vorliegende Forschungspaket mit den Einzelprojekten initiiert, welches das Hauptziel verfolgt, die Grundlagen für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunneln zu verbessern und zu systematisieren, um stabile Erhaltungsentscheidungen und kosteneffiziente Erhaltungsmassnahmen zu gewährleisten. Das vorliegende Forschungsprojekt EP1 «Einzelprojekt EP1 – Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln» behandelt dabei die für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse und deren Konsequenzen bzw. Gefährdungsbilder.

Das vorliegende Forschungsprojekt berücksichtigt ausschliesslich die bergmännisch erstellten baulichen Tunnelstrukturen bestehend aus dem Aussen- und Innengewölbe, der Fahrbahn inkl. Fahrbahnkonstruktion oder Werkleitungskanal, der Zwischendecke und dem Entwässerungssystem. Nicht Gegenstand des vorliegenden Forschungsprojekts sind die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) eines Tunnels, welche Bestandteil eines separaten Fachbereichs sind.

Die Literaturrecherche sowie der aktuelle Stand der Praxis und Forschung haben in Bezug auf das Erhaltungsmanagement gezeigt, dass der Tunnel nicht als Teilsystem, sondern oft als Teil der gesamten Kunstbauten bewertet wird. Ebenso kann festgehalten werden, dass zwar zahlreiche verschiedene Studien und Fallstudien zu einzelnen konkreten Schadensprozessen existieren, jedoch nur sehr wenige, welche die für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse und deren Auslöser / Ursachen und Einflussfaktoren systematisch und gesamtheitlich betrachten. Dies gilt insbesondere für die Beurteilung der Konsequenzen der Schadensprozesse auf Objektebene.

Die Ergebnisse aus dem im Einzelprojekt EP1 liefern Informationen, welche im Rahmen des Erhaltungsmanagement-Prozesses die Basis für stabile und nachvollziehbare Erhaltungsentscheide bilden. Die aus dem EP1 resultierenden Grundlagenkataloge von Schadensprozessen (S.-Katalog) und Gefährdungsbildern (GB.-Katalog) umfassen alle für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse und deren Konsequenzen. Zudem wurde durch EP1 eine übergeordnete Bauwerksgliederung erarbeitet, welche einerseits eine gemeinsame Bezugsgrösse für alle EP's darstellt und somit die Durchgängigkeit und Kompatibilität der einzelnen Forschungsprojekte sicherstellt sowie andererseits auch die Kompatibilität mit aktuellen (KUBA 5.0) und zukünftigen (BIM) Datenmodellen / -banken gewährleistet.

Der S.-Katalog und GB.-Katalog wurde neu erarbeitet und strukturiert aufgebaut. Analog zu den Einzelprojekten von EP2 und EP3 wird hierbei ein Ansatz der Systematisierung verfolgt, welcher die einzelnen Schadensprozesse und Gefährdungsbilder in übergeordneten Einheiten gliedert. Dies dient der Übersichtlichkeit, Lesbarkeit und somit letztlich der Praxistauglichkeit. Die Kataloge sind untereinander logisch verknüpft. Alle Schadensprozesse und Gefährdungsbilder sind einerseits untereinander andererseits aber auch mit den relevanten Bauwerksteilen, Bauarten und den zugehörigen visuellen Befunden verknüpft. Zudem bestehen in den Katalogen EP2 und EP3 weitere Verknüpfungen mit den S.-Katalog. Diese logischen Verknüpfungen eröffnen verschiedene Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis. So ist es beispielsweise basierend auf den angetroffenen visuellen Befunden im Rahmen einer Inspektion möglich, sich alle möglichen Schadensprozesse auflisten zu lassen, welche zum entsprechenden Schaden führen können. Weiter ist es auch möglich, anhand der vermuteten Schadensprozesse zweckmässige Untersuchungsmethoden (EP2) oder Instandsetzungsmassnahmen (EP3) aufzulisten.

Der S.-Katalog enthält folgende «Attribute» zur Beschreibung von Eigenschaften der einzelnen Schadensprozesse:

- Strukturierung und Beschreibung der Schadensprozesse (S);
- Zuordnung Bauwerksgliederung (BWT x BA) und der visuellen Befunde (BE);
- Auflistung der Auslöser / Ursachen und der begünstigenden Faktoren;
- Zuordnung Konsequenzen bzw. Gefährdungsbilder (GB);
- Hinweise zu Verfallsfunktionen in Literatur;
- Verweise / Referenzen.

Der GB.-Katalog enthält folgende «Attribute» zur Beschreibung von Eigenschaften der einzelnen Gefährdungsbilder:

- Strukturierung Gefährdungsbilder (GB) inkl. Beschreibung der Gefährdungsbilder;
- Zuordnung Schadensprozesse (S) und der Bauwerksgliederung (BWT x BA).

Für sämtliche Schadensprozesse und Gefährdungsbilder wurden Katalogblätter erstellt, die übersichtlich und zusammengefasst das Grundlagenverständnis des Schadensprozesses und des Gefährdungsbilds vermitteln sowie die wesentlichen Merkmale wie Auslöser / Ursache und begünstigende Faktoren auflisten. Diese Katalogblätter sind einheitlich strukturiert und gut lesbar dargestellt. Für sämtliche Schadensprozesse und Gefährdungsbilder wurden Prozessskizzen erstellt und einleitend in den entsprechenden Katalogblättern visualisiert.

Es hat sich gezeigt, dass eine eindeutige Identifizierung der zugrundeliegenden Schadensprozesse nur auf Basis von visuellen Befunden ohne weiterführende Untersuchungsmethoden (EP2) in der Regel nicht möglich ist. Weiter hat sich gezeigt, dass keine generellen Verfallsmodelle von Schadensprozessen in bergmännischen Tunneln für die Risikobeurteilung auf Objektebene existieren. Basierend auf historischen Zustandsdaten - teilweise unter Berücksichtigung von schadensprozessspezifischen Verfallsfunktionen - wurden zwar in vergleichbaren Forschungsprojekten einzelne generelle Verfallsmodelle abgeleitet, diese gelten aber ausschliesslich und explizit für die Netzebene bzw. -betrachtung. Ohne Überwachungsmessungen, Laborprüfungen bzw. den Untersuchungsmethoden von EP2 sowie oftmals zusätzlichen numerischen Simulationen ist es heutzutage nicht möglich, das Langzeitverhalten von bergmännischen Tunneln auf Objektebene mit hinreichender Sicherheit zu prognostizieren. Die in der Literatur existierenden zeitabhängigen Verfallsfunktionen und historische Zustandsdaten können zwar ergänzend bei der Prognose hinzugezogen werden, stellen im Allgemeinen aber keine ausreichende Datenbasis dar für eine verlässliche Prognose.

Die Heterogenität der aus der Vielzahl möglicher Quellen (visuelle Befunde, messtechnisch / detektierbare Befunde, Resultate aus Laborprüfungen und numerische Modelle, etc.) resultierenden Inputdaten stellt eine Herausforderung hinsichtlich einer zukünftigen Standardisierung und Systematisierung der Risikobeurteilung bzw. des Erhaltungsmanagement-Prozesses dar. Neben den strukturierten Grundlagenkatalogen wurde im EP1 in Abstimmung mit EP4 ein Konzeptvorschlag für die objektspezifische Risikobeurteilung basierend auf einem Bayes'schen Netzwerk erarbeitet. EP1 hat in diesem Zusammenhang für jedes Gefährdungsbild des GB.-Katalogs Beziehungsstrukturen der relevanten Einflussfaktoren erarbeitet, welche die Grundlage für eine zukünftige, standardisierte und einheitliche Risikobeurteilung bilden. Die Standardisierung der objektspezifischen Risikobeurteilung auf einer übergeordneten einheitlichen Ebene für das ganze Tunnelportfolio ist zudem auch eine Grundlage, um im Rahmen von zukünftigen Forschungsprojekten basierend auf statistischen und empirischen Datenanalysen generelle Risikoverläufe (vergleichbar mit Verfallsmodellen) je Schadensprozess bzw. Gefährdungsbild abzuleiten.

Mit der Darlegung der Ergebnisse wird auch der praktische Nutzen des S.- / und GB.-Katalogs und der entsprechenden Katalogblätter für die Anwendergruppen des Erhaltungsmanagements von Tunneln aufgezeigt. So wird zum Beispiel ein Vorgehensvorschlag zur systematischen Eingrenzung der möglichen Schadensprozesse per Ausschlussverfahren basierend auf den Bestandsdaten und den visuellen Befunden im Rahmen einer Inspektion erläutert.

Aus den Erkenntnissen des Forschungsprojekts wurden u.a. nachfolgende Empfehlungen für die Weiterentwicklung des Erhaltungsmanagements abgeleitet.

Vereinheitlichung Begrifflichkeiten im Erhaltungsmanagement-Prozess:

- Für die schweizweite Umsetzung des Erhaltungsmanagement für Strassentunnel wird empfohlen, eine einheitliche Begrifflichkeit festzulegen und anzuwenden.

Verlässliche Datengrundlagen für Erhaltungsmanagement-Prozess:

- Eine Homogenisierung und Intensivierung der Datensammlung sowie qualitative Verbesserung der Datenerfassung sowie Ablage aller relevanten Daten in einer logisch strukturierten und umfassenden Datenbankstruktur bzw. Bauwerksdatenbank als Grundlage für weiterführende Forschungsprojekte ist anzustreben;
- Weiterer Forschungsbedarf besteht im Zusammenhang mit der Ermittlung der Einflussfaktoren auf die Risikobeurteilung von Gefährdungsszenarien. Dabei gilt es den Einsatz und die Verantwortlichkeiten bei Risikobetrachtungen im Gesamtprozess abschliessend zu klären.

Vorbereitung der Umsetzung des Erhaltungsmanagements-Prozesses mit BIM:

- Formulierung von übergeordneten während dem ganzen Lebenszyklus gültigen Informationsanforderungen an die Erstellung der BIM-Modelle bzw. der für die Betriebsphase relevanten Digitalen Zwillinge durch die für die Erhaltungsplanung verantwortlichen Personen (Lead bei ASTRA Erhaltungsplanung nicht bei Projektmanagement);
- Antizipierung und Berücksichtigung der Entwicklungen im Bereich BIM bei allen aktuellen und zukünftigen Forschungsprojekten in Zusammenhang mit dem Erhaltungsmanagement-Prozesses;
- Aktuelle und zukünftige Datenbestände sind so aufzubauen, dass sie einfach in neue Datenbanken migriert werden können.

Résumé

En 2014, l'OFROU a déclenché un mandat de recherche sur le thème la gestion de la maintenance des tunnels miniers, qui a abouti en 2016 à un rapport sur le projet initial [67]. Ce rapport montre que, par rapport aux ouvrages d'art, les processus de maintenance des tunnels ne sont pas pris en compte de manière adéquate et qu'ils ne sont pas non plus standardisés.

C'est sur cette base que le présent paquet de recherche, dont font partie les projets individuels, a été initié. L'objectif principal est d'améliorer et de systématiser les bases de la gestion de la maintenance des tunnels routiers miniers, afin de garantir des décisions de maintenance stables et des mesures de maintenance rentables. Le présent projet de recherche EP1 « Projet individuel EP1 - Processus d'endommagement et comportement à long terme dans les tunnels » traite des processus d'endommagement pertinents pour les tunnels routiers miniers et de leurs conséquences respectivement situations de risque.

Le présent projet de recherche prend exclusivement en considération les structures des tunnels réalisées par des mineurs, dont font partie les revêtements extérieure (soutènement) et intérieure, la chaussée y compris la structure de la chaussée et la galerie technique, la dalle intermédiaire et le système de drainage. Il ne porte pas sur les équipements d'exploitations et de sécurité (BSA) d'un tunnel, qui font partie d'un domaine séparé.

La recherche bibliographique et l'état actuel de la pratique et de la recherche ont montré, en ce qui concerne la gestion de la maintenance, que le tunnel n'est pas évalué comme un sous-système, mais souvent comme une partie de l'ensemble des ouvrages d'art. De la même façon, on peut constater qu'il existe certes de nombreuses études différentes et des études de cas sur certains processus concrets d'endommagement, mais que très peu d'entre elles considèrent systématiquement et intégralement les processus d'endommagement pertinents pour les tunnels routiers miniers, leurs déclencheurs / causes et facteurs d'influence. Cela vaut en particulier pour l'évaluation des conséquences des processus d'endommagement au niveau de l'objet.

Les résultats du projet EP1 doivent fournir des informations qui, dans le cadre du processus de gestion de la maintenance, constituent la base pour de décisions stables et cohérentes en matière de maintenance. Les catalogues de base des processus d'endommagement (catalogue S.) et des situations de risque (catalogue GB.) résultant de EP1 comprennent tous les processus d'endommagement pertinents pour les tunnels routiers miniers et leurs conséquences. En outre, à travers EP1, a été élaborée une structure générale de l'ouvrage (classification des éléments de construction de l'ouvrage) qui représente d'une part une valeur de référence commune pour tous les EP et qui garantit ainsi la continuité et la compatibilité des différents projets de recherche et d'autre part la compatibilité avec les modèles / bases de données actuels (KUBA 5.0) et futurs (BIM).

Le catalogue S. et le catalogue GB. ont été réélaborés et structurés. Par analogie aux projets individuels EP2 et EP3, une approche de systématisation a été suivie, qui organise les différents processus d'endommagement et les situations de risque en groupes subordonnés. Cela permet d'obtenir une meilleure vue d'ensemble, une plus grande lisibilité et, en fin de compte, une meilleure application pratique. Les catalogues sont connectés logiquement entre eux. Tous les processus d'endommagement et les situations de risque sont reliés entre eux, mais aussi avec les éléments de construction, les types de construction et les résultats visuels correspondants. En outre, les catalogues EP2 et EP3 contiennent d'autres liens avec les catalogues S. Ces liens logiques ouvrent différentes possibilités d'application dans la pratique. Il est ainsi possible, par exemple, sur la base des résultats visuels rencontrés dans le cadre d'une inspection, de dresser une liste de tous les processus d'endommagement possibles qui peuvent conduire à un tel dommage. Il est également possible, sur la base des processus d'endommagement présumés, d'établir une liste des méthodes d'investigation (EP2) ou des interventions de remise en état (EP3) appropriées.

Le catalogue S. contient les domaines d'information suivants avec des « attributs » décrivant les propriétés des différentes méthodes d'investigation :

- Structuration des processus d'endommagement (S) y compris description des processus d'endommagement ;
- Structure de l'ouvrage (BWT x BA) et des constatations visuelles (BE) ;
- Liste des déclencheurs / causes et des facteurs favorisants ;
- Attribution des conséquences respectivement des situations de risque (GB) ;
- Références aux fonctions de détérioration dans la littérature ;
- Renvois / références.

Le catalogue GB. contient les domaines d'information suivants avec des « attributs » décrivant les propriétés des différentes méthodes d'investigation :

- Structuration des situations de risque (GB) y compris description des situations de risque ;
- Attribution des processus d'endommagement (S) et Structure de l'ouvrage (BWT x BA).

Des fiches de données ont été élaborées pour l'ensemble des processus d'endommagement et des situations de risque. Elles fournissent une compréhension de base claire et synthétique du processus d'endommagement et des situations de risque et énumèrent les caractéristiques essentielles telles que déclencheur / cause et les facteurs favorisants. Ces fiches de données sont structurées de manière uniforme et présentées de manière lisible. Des schémas ont été élaborés pour l'ensemble des processus d'endommagement et des situations de risque et sont présentés en introduction dans les fiches de données correspondantes.

Il s'est avéré qu'il n'est généralement pas possible d'identifier clairement les processus d'endommagement sous-jacents en se basant uniquement sur les résultats visuels rencontrés sans recourir à des méthodes d'investigation plus détaillées (EP2). En outre, il s'est également avéré qu'il n'existe pas de modèle général de détérioration pour l'évaluation des risques au niveau des objets. Sur la base de données d'état historiques et en tenant compte en partie des fonctions de détérioration spécifiques aux processus d'endommagement, certains modèles de détérioration généraux ont été établis dans le cadre de projets de recherche comparables. Ces modèles s'appliquent toutefois exclusivement et explicitement au niveau du réseau ou à l'examen de celui-ci. Sans les mesures des contrôles de surveillance, les essais en laboratoire ou les méthodes d'investigation de EP2, ainsi que souvent des simulations numériques supplémentaires, il n'est pas possible aujourd'hui de prévoir avec suffisamment de certitude le comportement à long terme des tunnels au niveau de l'objet. Les fonctions de détérioration en fonction du temps et les données historiques sur l'état de conservation qui existent dans la littérature peuvent certes être utilisées en complément lors de la prédiction, mais elles ne constituent en général pas une base de données suffisante pour une prédiction fiable.

L'hétérogénéité des données résultant de la multitude de sources possibles (constatations visuelles, constatations mesurables/déTECTABLES, résultats d'essais en laboratoire et de modèles numériques, etc.) représente un défi en ce qui concerne la standardisation et la systématisation futures de l'évaluation des risques et du processus de gestion de la maintenance. Outre les catalogues de base structurés, dans EP1 a également été élaborée, en accord avec EP4, une proposition de concept pour l'évaluation des risques spécifiques à l'objet, basée sur un réseau bayésien.

Dans ce contexte, EP1 a élaboré, pour chaque situation de risque du catalogue GB, des structures relationnelles des facteurs d'influence pertinents, qui constituent la base de la future évaluation standardisée et uniforme des risques. La standardisation de l'évaluation des risques spécifiques aux objets sur un niveau subordonné pour l'ensemble du portefeuille des tunnels constitue en outre une base permettant de déduire, dans le cadre de futurs projets de recherche et sur la base d'analyses statistiques et empiriques de données, des évolutions générales des risques (comparables à des modèles de détérioration) selon le processus d'endommagement ou la situation de risque.

Avec la présentation des résultats l'utilité pratique des catalogues S. et GB. et des fiches de données correspondantes pour les groupes d'utilisateurs de la gestion de la maintenance des tunnels est mise en évidence. Ainsi, par exemple, dans le cadre d'une inspection, une proposition de procédure peut être faite et expliquée pour délimiter

systématiquement les processus d'endommagement possibles par une procédure d'exclusion basée sur les constatations visuelles rencontrées et les données d'inventaire.

Les conclusions tirées de l'élaboration de ce projet de recherche ont permis de formuler, entre autres, les recommandations suivantes pour le développement futur de la gestion de la maintenance.

Uniformité des termes utilisés dans le processus de gestion de la maintenance :

- Pour l'implémentation de la gestion de la maintenance des tunnels routiers dans toute la Suisse, il est recommandé de définir et d'appliquer une terminologie unifiée.

Base de données fiable pour le processus de gestion de la maintenance :

- Homogénéisation et intensification de la collecte de données et amélioration de la qualité des données collectées, ainsi que classement de toutes les données pertinentes dans une structure de base de données logiquement structurée et complète respectivement dans une base de données des ouvrages, comme base pour des projets de recherche ultérieurs ;
- Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer les facteurs d'influence sur l'évaluation des risques des scénarios de risques. Il s'agit de clarifier définitivement l'utilisation et les responsabilités pour les évaluations des risques dans le processus global.

Préparer l'implémentation du processus de gestion de la maintenance avec le BIM :

- Formulation, par les personnes responsables de la planification de la maintenance (lead à l'OFROU planification de la maintenance et non à la gestion du projet), d'exigences supérieures en matière d'information, valables pendant toutes les phases du projet, pour la création des modèles BIM ou des jumeaux numériques pertinents pour la phase d'exploitation ;
- Anticiper et prendre en compte les développements dans le domaine du BIM dans tous les projets de recherche actuels et futurs en rapport avec le processus de gestion de la maintenance ;
- Veiller à ce que les bases de données actuelles et futures soient structurées de manière à pouvoir être facilement migrées vers les nouvelles bases de données.

Summary

In 2014, FEDRO initiated a research assignment on the topic of maintenance management of mining tunnels, which resulted in a report on the initial project [67] in 2016. In this report, it is shown that the maintenance processes for tunnels are not adequately considered and also not standardized compared to engineered structures.

Based on this, the present research package with the individual projects was launched, which has the main objective of improving and systematizing the basis for the maintenance management of mined road tunnels in order to ensure robust maintenance decisions and cost-efficient maintenance measures. The present research project EP1 "Individual Project EP1 - Damage Processes and Long-Term Behavior of Tunnels" deals with the damage processes relevant for mined road tunnels and their consequences or hazard patterns.

The present research project exclusively considers mined tunnel structures consisting of the outer and inner lining, the roadway incl. roadway structure or utility duct, the suspended ceiling and the drainage system. The operating and safety equipment (OSS) of a tunnel, which is part of a separate discipline, is not included.

Literature research and the current state of practice & research with regard to maintenance management have shown that the tunnel is not evaluated as a subsystem, but often as part of the entire engineering structures. Likewise, it can be stated that although there are numerous different studies and case studies on individual concrete damage processes, there are very few that systematically and holistically consider the damage processes relevant for mining road tunnels and their triggers / causes and influencing factors. This applies in particular to the assessment of the consequences of the damage processes at the object level.

The results from the individual project EP1 must provide information that forms the basis for stable and consistent maintenance decisions within the framework of the maintenance management process. The basic catalogues of damage processes (S.-Catalogue) and hazard images (GB.-Catalogue) resulting from EP1 comprise all damage processes relevant for mining road tunnels and their consequences. In addition, EP1 developed a superordinate structure classification which, on the one hand, represents a common reference value for all EPs and thus ensures the consistency and compatibility of the individual research projects and, on the other hand, also the compatibility with current (KUBA 5.0) and future (BIM) data models / banks.

The S. catalogue and GB. catalogue were newly developed and structured. Analogous to the individual projects of EP2 and EP3, a systematization approach is followed here, which divides the individual damage processes and hazard patterns into superordinate units. This serves the clarity, readability and thus ultimately the practicability. The catalogues are logically linked to each other. All damage processes and hazard images are linked to each other on the one hand, but also to the relevant building components, building types and the associated visual findings on the other. In addition, there are further links with the S. catalogue in the EP2 and EP3 catalogues. These logical links open up various application possibilities in practice. For example, it is possible, based on the visual findings encountered during an inspection, to list all possible damage processes that could lead to such damage. Furthermore, it is also possible to list appropriate inspection methods (EP2) or repair measures (EP3) on the basis of the suspected damage processes.

The S. catalogue contains the following information areas with "attributes" for describing properties of the individual examination methods:

- Structuring damage processes (S) incl. description of damage processes;
- Assignment of building structure (BWT x BA) and of visual findings (BE);
- Listing of the triggers / causes and the favoring factors;
- Assignment of consequences or hazard patterns (GB);
- References to decay functions in literature;
- References.

The GB. catalogue contains the following information areas with "attributes" to describe characteristics of the individual investigation methods:

- Structuring hazard images (GB) incl. description of hazard images;
- Assignment of damage processes (S) and the structure of the building (BWT x BA).

Catalogue sheets have been prepared for all damage processes and hazard images, which provide a clear and summarized basic understanding of the damage process and the hazard image and list the essential features such as trigger/cause and promoting factors. These catalogue sheets are uniformly structured and presented in an easy-to-read manner. For all damage processes and hazard images, process sketches were created and visualized in the introduction to the corresponding catalogue sheets.

It has been shown that the clear identification of the underlying damage processes purely based on the visual findings encountered is generally not possible without further investigation methods (EP2). Furthermore, it has been shown that no general deterioration models exist for risk assessment at the object level. Based on historical condition data, partly considering damage process-specific deterioration functions, individual general deterioration models have been derived in comparable research projects, but these apply exclusively and explicitly to the network level or observation. Without monitoring measurements, laboratory tests or the investigation methods of EP2 as well as often additional numerical simulations, it is not possible today to predict the long-term behavior of tunnels at the object level with sufficient certainty. The time-dependent deterioration functions and historical condition data that exist in the literature can be used as a supplement in the prognosis, but generally do not provide a sufficient database for a reliable prognosis.

The heterogeneity of the input data resulting from the multitude of possible sources (visual findings, metrological / detectable findings, results from laboratory tests and numerical models, etc.) represents a challenge regarding a future standardization and systematization of the risk assessment or the maintenance management process. In addition to the structured basic catalogues, a concept proposal for object-specific risk assessment based on a Bayesian network was also developed in EP1 in coordination with EP4 for this purpose. In this context, EP1 has developed relationship structures of the relevant influencing factors for each hazard image of the GB. catalogue, which form the basis for the future standardized and uniform risk assessment. The standardization of the object-specific risk assessment on a superordinate uniform level for the entire tunnel portfolio is also a basis for deriving general risk progressions (comparable with deterioration models) per damage process or hazard pattern within the framework of future research projects based on statistical and empirical data analyses.

The presentation of the results also shows the practical benefits of the S./ and GB. catalogue and the corresponding catalogue sheets for the user groups of the maintenance management of tunnels. For example, a proposal is made and explained for the systematic delimitation of possible damage processes by means of an exclusion procedure based on the visual findings encountered and the as-built data in the course of an inspection.

The following recommendations for the further development of maintenance management were derived from the findings of this research project.

Consistency of terminology in the maintenance management process:

- For the nationwide implementation of maintenance management for road tunnels, it is recommended to define and apply a uniform terminology.
Reliable data basis for maintenance management process:
- Homogenization and intensification of data collection and qualitative improvement of the collected data as well as storage of all relevant data in a logically structured and comprehensive database structure or construction database as a basis for further research projects should be strived for;
- There is a need for further research in connection with the determination of the factors influencing the risk assessment of hazard scenarios. The use of and responsibilities for risk assessments in the overall process must be finally clarified.

Preparation of the implementation of the maintenance management process with BIM:

- Formulation of higher-level information requirements valid during all project phases for the creation of the BIM models or the digital twins relevant for the operational phase by the persons responsible for maintenance planning (lead for FEDRO maintenance planning not for project management);
- Anticipate and consider developments in BIM in all current and future research projects related to the preservation management process;
- Ensure that current and future data sets are built in such a way that they can be easily migrated to new databases.

1 Einleitung

1.1 Anlass

1.1.1 Ausgangslage und Kontext

Nationalstrassen sind all jene Strassen, bei denen der Bund für Finanzierung, Betrieb, Unterhalt und Ausbau aufkommt. Zuständig ist das Bundesamt für Strassen («ASTRA»). Je nach Ausbaustand gehören dazu nationale Autobahnen, nationale Autostrassen und nationale Hauptstrassen. Ende 2021 mass das Schweizer Nationalstrassennetz insgesamt 2254.5 Kilometer. Als Folge des 2017 vom Volk angenommenen Fonds für die Nationalstrassen und den Agglomerationsverkehr (NAF) wurden per 2020 über 400 km kantonale Strassen (i.d.R. für Gemischtverkehr) neu in das Nationalstrassennetz aufgenommen. Im Vergleich zum Autobahnbeschluss von 1960 verkehrt heute rund fünfmal so viel Strassenverkehr auf dem Strassennetz. Viele Strecken werden an der Kapazitätsgrenze betrieben (Anzahl Stautunden in 2021: 32'481 h).

Der Unterhalt des Nationalstrassennetzes ist neben dem Betrieb, der Fertigstellung des Netzes, den Kapazitätserweiterungen und dem Ausbau eine zentrale Aufgabe des ASTRA, der Schweizer Fachbehörde für die Strasseninfrastruktur.

Das ASTRA schätzt den mittleren jährlichen Erhaltungsbedarf im langfristigen Mittel für die gesamte Nationalstrasseninfrastruktur auf 1'144 Mio. CHF [20]. Das entspricht ungefähr jährlichen Ausgaben von 1.2% des Wiederbeschaffungswerts (WBW)¹. Tunnelanlagen stellen mit einem WBW von 31.5 Mrd. CHF rund 1/3 des WBW des gesamten Nationalstrassennetzes dar.

Auf Tunnel entfielen im Jahr 2020 164 Mio. CHF an Ausgaben für Unterhalt, was rund 15% des jährlichen Erhaltungsbedarfs des Gesamtsystems entspricht. Diese entsprechen ca. 0.5% des Wiederbeschaffungswertes.

Das ASTRA betreut rund 338 Tunnelanlagen (Stand 2017) mit einer Gesamtlänge von rund 300 km (bzw. 450 km Röhrenlänge) und einem Alter zwischen 66 und 1 Jahren (Eröffnungsjahr). Davon sind rund 204 bergmännische Tunnel (Stand 2017). Über 100 Tunnel sind mehr als 40 Jahre in Betrieb, weitere 100 sind zwischen 20 und 40 Jahre in Betrieb.

In den letzten 10 Jahren haben sich die Unterhaltsausgaben für Tunnel mehr als verachtacht. Die Mehrausgaben kamen einerseits der Erhaltung und der Verbesserung des baulichen Zustands zugute, andererseits sind sie auch eine Folge gestiegener Anforderungen (z.B. an die Sicherheit). Zudem hat sich in dieser Periode auch die Anzahl Tunnel um 26% (gemessen am Wiederbeschaffungswert) erhöht. Zu guter Letzt dürfte auch eine Rolle gespielt haben, dass vor 10 Jahren erst 38% der Tunnelanlagen zustandsbewertet waren, während dieser Anteil (gemessen am Wiederbeschaffungswert) heute bereits 88% umfasst.

Der Zustand der Infrastrukturen fasst das ASTRA mit einer Zustandsbenotung mit Zustandsklassen zusammen (siehe **Abb. 1 Kurzbezeichnung der Zustandsnoten für die verschiedenen Infrastrukturen und Beschreibung der Qualität in Worten aus [21]**). Der mittlere Zustand aller per 2021 zustandsbewerteten Tunnelanlagen beträgt 2.17 gemäss Netzzustandsbericht 2021 [21]. Damit ist der Gesamtzustand schlechter als die vom ASTRA als Zielvorgabe gesetzte mittlere Zustandsnote von 1.90. Der grösste Teil davon ist in einem guten und akzeptablen Zustand (Zustandsklasse 1 und 2). Rund 20% weisen mittelschwere Schäden auf und müssen verstärkt überwacht werden. Nur einzelne Tunnelbauwerke sind in einem schlechten Zustand und müssen mittelfristig saniert werden.

¹ Gemäss SN 640 907 [11] entspricht der Wiederbeschaffungswert den Kosten, welche erforderlich sind, ein aus dem Betrieb ausgeschiedenes Objekt zu ersetzen.

Kurzbezeichnung Zustandsnote					
Zustandsklasse	Fahrbahnen	Kunstabtuten, sowie Tunnel	BSA	Gesamtnetz	Beschreibung
1	gut	gut	gut	gut	Keine oder geringfügige Schäden
2	mittel	akzeptabel	annehmbar	annehmbar	Unbedeutende Schäden ohne Auswirkung auf die Sicherheit; bedingen eine verschärfte Überwachung
3	ausreichend	beschädigt	ungenügend	ungenügend	Mittelschwere Schäden ohne Auswirkung auf die Sicherheit; bedingen eine verschärfte Überwachung
4	kritisch	schlecht	schlecht	schlecht	Grosse Schäden ohne Auswirkung auf die Tragsicherheit oder Verkehrssicherheit. Mittelfristig ist eine Massnahme nötig.
5	schlecht	alarmierend	alarmierend	alarmierend	Dringliche Massnahmen sind erforderlich, z. B. Auswechseln eines Fahrbahnübergangs, Ersatz von Einzelelementen, Montage von provisorischen Abstützungen oder Einführung einer Gewichtsbeschränkung.

Abb. 1 Kurzbezeichnung der Zustandsnoten für die verschiedenen Infrastrukture Objekte und Beschreibung der Qualität in Worten aus [21]

Mit der Zunahme der Grösse und Komplexität des Nationalstrassennetzes, der Zunahme der Verkehrsbelastung und der Anforderungen, auch aufgrund neuer Technologien oder Klimaveränderung, steigt die Bedeutung und der Mittelbedarf des Erhaltungsmanagement u.a. von Tunnel. Ziel des Erhaltungsmanagement ist es, die Verkehrssicherheit und die Verfügbarkeit der Anlagen bei hoher Kostenwirksamkeit dauerhaft sicherzustellen.

Zum Thema Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel hat das ASTRA im 2014 einen Forschungsauftrag ausgelöst, welcher 2016 in einem Bericht zum Initialprojekt [67] mündete.

Das Initialprojekt schreibt in der Einleitung, dass «zum Thema Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen bereits umfassende Forschungsarbeiten durchgeführt wurden. 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 Tunnel, auch im Hinblick auf eine künftige Integration dieses Teilbereiches in ein übergeordnetes systematisches Erhaltungsmanagement, noch in einem Anfangsstadium» [29, 63].

In der Schweiz ist die Erhaltung von bergmännischen Tunnel bisher eher projektbezogen und nicht systematisiert, behandelt worden. Tunnel werden alle fünf Jahre in einer Hauptinspektion inspiziert. Typischerweise werden die visuell erkennbaren Schäden auf Schadensskizzen nachgeführt, so dass die Schadensentwicklungen nachvollzogen werden können.

In naher Zukunft werden technologische und gesellschaftliche Entwicklungen das Verkehrssystem grundlegen beeinflussen. Die Veränderungen unter Nutzung der digitalen Technologien² erfordern in Zukunft auch in der Erhaltungsplanung Anpassungen und Weiterentwicklungen.

1.1.2 Übergeordnete Fragestellungen im Forschungsprojekt

Im Initialprojekt [67] ist dargelegt, dass die Erhaltungsprozesse für Tunnels, im Vergleich zu Kunstbauten, nicht gebührend berücksichtigt und auch nicht standardisiert erfolgen. Im Initialprojekt wird empfohlen, durch weitere Forschungen Wissenslücken zu schliessen und die Erhaltungsmassnahmen in Abhängigkeit ihrer Wirkung, ihrer Kosten und ihres Ausführungsaufwandes zu systematisieren und zu katalogisieren. Als Ergebnis wird ein Steuerungsinstrument zur langfristigen Erhaltungsplanung und Erhaltungsentscheiden, sowohl für die präventiven als auch für die korrektiven Massnahmen, erwartet.

² Das ASTRA will in Zukunft vermehrt digitale Technologien nutzen. Bedeutende Anwendungsgebiete sind die Gewinnung und Verwaltung von Informationen sowie die Überwachung von Bauwerken, Naturgefahren und des Verkehrsgeschehens. Durch eine integrale Erhaltungsplanung kann diese damit in verschiedenen Bereichen optimiert werden (siehe auch [20], Seite 44).

Im Initialprojekt [67] wurden folgende Wissenslücken für bergmännische Tunnel besonders hervorgehoben:

- Es fehlen trotz zahlreicher Studien und Richtlinien grundlegende Erkenntnisse für einen langfristigen und systematischen Planungsprozess für die Erhaltung von bergmännischen Tunnel;
- Es fehlen konkretisierte Gliederungen von Tunnel die einheitliche Abgrenzungen zu anderen Teilsystemen der Strasseninfrastruktur ermöglichen;
- Es bestehen Wissenslücken, welche spezifischen Schäden in Tunnel mit relevanten Schadensprozessen verknüpft werden können und wie sich insbesondere das Tunnelgewölbe (Verkleidung inkl. Abdichtung) über die gesamte Lebensdauer zeitlich verhält;
- Welche Inspektionsmethoden existieren im Bereich von bergmännischen Tunnel und wie zuverlässig sind sie in Bezug auf die Offenlegung von Schadensprozessen;
- Welche Auswirkungen haben Erhaltungsmassnahmen auf Tunnel und beteiligte Anspruchsgruppen;
- Wie sieht ein systematischer und stabiler Prozess der Entscheidungsfindung im Bereich der Erhaltung von bergmännischen Tunnel aus.

Für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel leiten sich folgende Ziele ab:

- Gewährleistung eines dauerhaft guten Zustandes zur Sicherstellung von Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit bis zu einem vom Anlagen-besitzer akzeptierten Restrisiko;
- Dafür erforderliche Erhaltungsmassnahmen sollen langfristig die Verfügbarkeit so wenig wie möglich beeinflussen und eine hohe Kostenwirksamkeit aufweisen.

Das Erhaltungsmanagement liefert langfristige, tunnelobjektbezogene Entscheidungsoptionen für Erhaltungsmassnahmen. Diese sind in einem übergeordneten Erhaltungsprozess mit den Entscheidungsoptionen aus anderen Teilsystemen zu Erhaltungsprojekten zusammenzuführen.

1.1.3 Fragestellung auf Einzelprojekt bezogen

Die Zustandsüberwachung ist ein relevanter Bestandteil des Erhaltungsmanagements auch bei den Tunnelbauwerken, wie das generell u.a. in der VSS-Norm SN EN 640 900 «Erhaltungsmanagement von Bauwerken» [12] festgehalten ist. Die Ergebnisse aus dem Teilprozess der Überwachung müssen Informationen liefern, welche im Rahmen des Erhaltungsmanagement-Prozesses die Basis für stabile und nachvollziehbare Massnahmenentscheide bilden. Die Bestimmung und Beurteilung der Schadensprozesse, welche der Zustandsverschlechterung eines Bauwerks zugrunde liegen, ist ein Bestandteil der Zustandsüberwachung und bildet die Grundlage für die nachfolgenden Erhaltungsentscheide.

Es existieren zwar diverse Studien zu einzelnen Schadensprozessen und deren Verlauf unter spezifischen Bedingungen, jedoch fehlt ein umfassender Überblick über die in bergmännischen Strassentunneln relevanten Schadensprozesse. Weiter fehlt auch eine umfassende, systematische Betrachtung dieser Schadensprozesse hinsichtlich deren Auslöser, Einflussfaktoren und Konsequenzen in bergmännischen Strassentunneln.

Die Systematisierung und Typisierung der bekannten und für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse mit Bezug zu deren Auslöser / Ursachen und Einflussfaktoren sind für eine verbesserte Übersicht sowie die angezielte übergeordnete Systematisierung des Erhaltungsprozesses unabdinglich; insbesondere auch im Hinblick auf die vom ASTRA angestrebte Digitalisierung in der Erhaltungsplanung ([20], Seite 44).

1.2 Grundlagen und Datenbasis

1.2.1 Normen und Richtlinien

Es existieren diverse für die Schweiz geltende Normen und Richtlinien, welche das Erhaltungsmanagement oder deren Teilprozesse umfassen. Diese gelten u.a. übergeordnet für Strasseninfrastrukturen (z.B. VSS-Normen) oder für Ingenieurbauten (v.a. SIA-Normen) sowie spezifischer als Richtlinien für Kunstbauten (z.B. in ASTRA Fachhandbüchern), welche bei Tunnel angewendet werden können. Die bekanntesten Normen und Richtlinien dazu sind:

- SN EN 640 900 (2022) – Erhaltungsmanagement (EM): Grundnorm [12];
- SIA 469 (1997) – Erhaltung von Bauwerken [15];
- SIA 269 (2011) – Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken [14];
- Richtlinie Bundesamt für Strassen ASTRA (2005) – Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten [2].

Diese und weitere für dieses Forschungsprojekt relevante Normen und Richtlinien sind Bestandteil der Literaturrecherche (Kap. 1.2.2) und sind im Verzeichnis der Literatur im entsprechenden Anhang erfasst.

1.2.2 Literaturrecherche

Im Rahmen des EP1 wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, welche die ausführliche Zusammenstellung der Literatur des Initialprojekts [67] spezifisch für das EP1 «Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln» bei Bedarf aktualisiert und ergänzt. Die Erkenntnisse aus der Literatur sind insbesondere in Kap. 1.3 «Stand der Praxis und Forschung (State of the Art)» des vorliegenden Berichts enthalten.

Auf Basis dieser Recherche wurde die ergänzte Literaturliste EP1 in elektronischer Form als CITAVI-Literatur-Datenbank für die weitere Verwendung der Literaturquellen erstellt. Diese ist Teil des Projekts bzw. der Schlussberichterstattung.

Das EP1-spezifische Literaturverzeichnis befindet sich im Anhang «Literaturverzeichnis» des vorliegenden Schlussberichts.

1.2.3 Fallbeispiele

Aufgrund der Wissenslücken, wie übergeordnet im Kap. 1.1.2 aufgelistet, wurden neun Tunnelobjekte als Fallbeispiele für die Einzelprojekte EP1, EP2 und EP3 herangezogen, welche teilweise seit Jahrzehnten von den Partnern der INGE «Lombardi-EBP» betreut werden. Es handelt sich dabei ausschliesslich um bergmännische Strassentunnel, welche im Zuständigkeitsbereich einzelner ASTRA-Filialen bzw. deren Bereiche Erhaltungsplanung und Projektmanagement liegen.

Die verwendeten Fallbeispiele / Tunnelobjekte sind:

- (1) Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre;
- (2) Seelisbergtunnel;
- (3) Kerenzerbergtunnel;
- (4) Gotschnatunnel;
- (5) Gubristtunnel;
- (6) Tunnel Belchen;
- (7) Tunnel Girsberg;
- (8) Sonnenbergtunnel;
- (9) Reussporttunnel.

Mit diesen neun Fallbeispielen wird das Tunnelportfolio des ASTRA gemäss Kap. 1.1.1 gut repräsentiert. Es handelt sich um Tunnel verteilt auf die ganze Schweiz mit unterschiedlicher Geologie. Die Tunnellängen reichen von weniger als 1 km bis hin zu 17 km des Gotthard-Strassentunnels, dem längsten Strassentunnel der Schweiz.

Auch bezüglich der Betriebsjahre decken diese neun Beispiele mit einem Alter von 18 bis 53 Jahren praktisch die gesamte Bandbreite ab. Wie unter Kap. 1.1.1 beschrieben, ist der grösste Teil der Tunnel nicht älter als 50 Jahre alt. Entsprechend wurden sie von Anfang an als «Hochleistungs-Strassentunnel» für Nationalstrassen konzipiert sind dadurch baulich bezüglich Bauart und Ausbaustandard deutlich homogener als z.B. im Vergleich zu den vielen verschiedenen Tunnel der SBB.

Die verwendeten Fallbeispiele bilden dieses vorhandene Bauart- und Ausbaustandard-Spektrum gut ab. Aufgezeigt werden dabei neben den verschiedenen Profiltypen (Kreis-, Maul-, Hufeisenprofil mit und ohne Sohlgewölbe) auch ein- und zweischalige Ausbauten, teilweise mit vorgestellten Wandplatten.

Fünf der neun Tunnel sind bereits seit mehr als 40 Jahren in Betrieb. Dies bedeutet, dass bei den meisten Tunnel bereits diverse Zustandsuntersuchungen und Instandsetzungsmassnahmen zusätzlich zu den regelmässigen Hauptinspektionen durchgeführt wurden.

Um die in Kap. 1.1.1 formulierten Ziele - nämlich die Systematisierung und Katalogisierung von Schadensprozessen, Untersuchungsmethoden und Erhaltungsmassnahmen - zu erreichen, wurden die Fallbeispiele hinsichtlich der objektspezifischen Erhaltungsplanung ausgewertet, analysiert und im Hinblick auf das Einzelprojekt aufgeführt.

Die Beschreibung der Tunnelobjekte, die als Fallbeispiele verwendet wurden, befindet sich in Form von objektweisen Faktenblättern als Anhang I im vorliegenden Schlussbericht EP1 (siehe auch Kap. 5.2).

1.3 Stand der Praxis und Forschung (State of the Art)

Dieses Kapitel gibt in einem ersten Teil (Kap. 1.3.1) einen Überblick zum aktuellen Stand der Praxis der Bauwerkserhaltung bzw. des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Strassentunneln in der Schweiz, in Österreich und in Deutschland (D-A-CH). Im Schlussbericht von EP2 (vgl. [54]) sind im korrespondierenden Kapitel ergänzende Ausführungen zu diesem Thema insbesondere zum Stand der Praxis in weiteren Ländern ausserhalb D-A-CH zu finden. In einem zweiten Teil (Kap. 1.3.2) wird spezifisch auf den aktuellen Stand der Forschung hinsichtlich der Schadensprozesse und deren Verfallsmodelle eingegangen. Die diesem Kapitel zugrundeliegende Literaturrecherche bildete die Grundlage für die Katalogisierung und Beschreibung der für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse in den erarbeiteten Katalogblättern (siehe III Katalogblätter Schadensprozesse (S)). Kap. 1.3.3 fasst die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Literaturstudium themenmässig zusammen. Pro Thema wird aus Sicht EP1 ein Fazit gezogen, welche Aspekte als weiterer Forschungsbedarf behandelt werden sollen.

1.3.1 Stand der Praxis und Forschung Erhaltungsmanagement Tunnel

Stand der Praxis und deren Weiterentwicklung in der Schweiz

In der **Schweiz** sind zentrale Aspekte des Erhaltungsprozesses von Ingenieurbauten bzw. Kunstbauten (inklusive Tunnelbauwerke) in entsprechenden Normen [14, 15] und Richtlinien vor allem der Infrastrukturbesitzer und -betreiber festgehalten (siehe dazu Kap. 1.2.1).

Die Normenreihe zur «Erhaltung von Tragwerken» mit der Grundnorm SIA 269 (2011; [14]) und den zugehörigen Bauart-spezifischen Normen 269/2 bis 269/6 enthalten wesentliche Vorgaben des Erhaltungsprozesses, u.a. zu Überwachung und Instandhaltung wie auch zur Überprüfung. Für bergmännische Tunnel hat die SIA 269/2 «Erhaltung von Tragwerken - Betonbau» (2011; [10]) besondere Relevanz. In Kap. 5 «Zustandserfassung» sind Untersuchungsmethoden für Betonbauten, Stand 2011, aufgelistet. Im nachfolgenden Kap. 6 sind Vorgaben und Hinweise zur «Prognose der Zustandsbeurteilung» festgehalten.

Das Bundesamt für Strassen ASTRA, als grösster Betreiber von bergmännischen Strassentunnel in der Schweiz, hat bereits 2005 seine Vorgaben für den Erhaltungsplanungs-Prozess in der Richtlinie «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten» [2] aus früheren Versionen der Erhaltungsnormen abgeleitet. Der darin beschriebene Prozess, welcher auch für Tunnel gilt, wird im nachfolgenden Kap. 1.6.1 «Erhaltungsprozess und Projektgenerierung» ausführlich beschrieben. Diese Richtlinie legt die Grundsätze für die Überwachung und den Unterhalt der Kunstbauten und Tunnel auf den Nationalstrassen fest. Für den in der Grundnorm Erhaltungsmanagement [12] definierten Teilprozess «Überwachung» sieht die ASTRA-Richtlinie [2] folgende zwei Phasen und deren Regelung vor (siehe auch Kap. 1.6.1):

- Überwachung: Beobachtung – Inspektionen – Kontrollmessungen sowie nachfolgend;
- Überprüfungen: generelle Überprüfung – detaillierte Überprüfung.

Die Zustandsbeurteilung ist das Ergebnis des Teilprozesses «Überwachung». Diese ist eine «zusammenfassende Analyse und Bewertung der Informationen über den aktuellen Zustand und die bisherige Zustandsentwicklung, verbunden mit einer Voraussage der weiteren Zustandsentwicklung und deren Konsequenzen im Laufe der festgelegten Restnutzungsdauer» (gemäss [2]). Die Zustandsbeurteilung bildet die zentrale Grundlage für die anschliessende Massnahmenempfehlung und -planung. Diese Richtlinie enthält jedoch keine weitergehenden Informationen zu eigentlichen Untersuchungsmethoden.

In der Praxis wurden in den letzten Jahrzehnten regelmässig Inspektionen, Kontrollmessungen und Überprüfungen durchgeführt, um die sichere Nutzung der Strassentunnel weiter zu gewährleisten. Die neun Fallbeispiele dieses Forschungsprojekts zeigen dies auf (Kap. 1.2.3; Anhang I) und bestätigen, dass die Erhaltung und Überwachung von bergmännischen Tunnel in der Schweiz eher projektbezogen und nicht standardisiert behandelt wird (vgl. Initialprojekt [67]).

Das Ende 2016 abgeschlossene «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel - Initialprojekt» [67] hält fest, dass für Strassentunnel im heutigen Erhaltungsprozess die Anforderungen an deren Erhaltung nicht gebührend berücksichtigt werden. Zukünftig sollen die Erhaltungsmassnahmen Tunnel-spezifisch in Abhängigkeit ihrer Wirkung, ihrer Kosten und ihres Ausführungsaufwandes systematisiert werden. Dies gilt auch für das EP1 hinsichtlich der relevanten Schadensprozesse und deren Konsequenzen. Die Zielsetzung des EP1 gemäss Pflichtenheft [37] ist im Kap. 1.1.3 festgehalten.

Stand der Praxis und deren Weiterentwicklung in Österreich und Deutschland

Die nationalen Normierungen und Richtlinien zur Erhaltungsplanung von Tunnelbauwerken verschiedener Länder bilden einen Stand der Praxis ab, der in den Grundzügen des zugrundeliegenden Prozesses sehr ähnlich ist. Dies zeigt sich u.a. bei der logischen Abfolge der Teilprozesse, wie sie den übergeordneten Normen (z.B. DIN 30151 [7] oder SN EN 640 900 [12]) definiert sind. Übergeordnet gehen die verschiedenen nationalen Normen und Richtlinien von vergleichbaren Prozessschritten aus, die jedoch z.T. anders abgegrenzt und benannt werden. In der konkreten Umsetzung des Erhaltungsprozesses werden bei der Ausführung die Unterschiede grösser, auch abhängig von den in den einzelnen Ländern geforderten Zielsetzungen fürs Erhaltungsmanagement.

In **Österreich** wurden im Forschungsprojekt AMBITION von 2015 [17] nationale Normen, Richtlinien und Handlungsvorgaben fürs Erhaltungsmanagement von Tunnelbauwerken von insgesamt 11 Ländern zusammengetragen und ausgewertet. Als Beispiel einer der Auswertungen zeigt die nachfolgende Abbildung den Verwendungszweck von Tunnelzustandsdaten in den elf untersuchten Ländern auf:

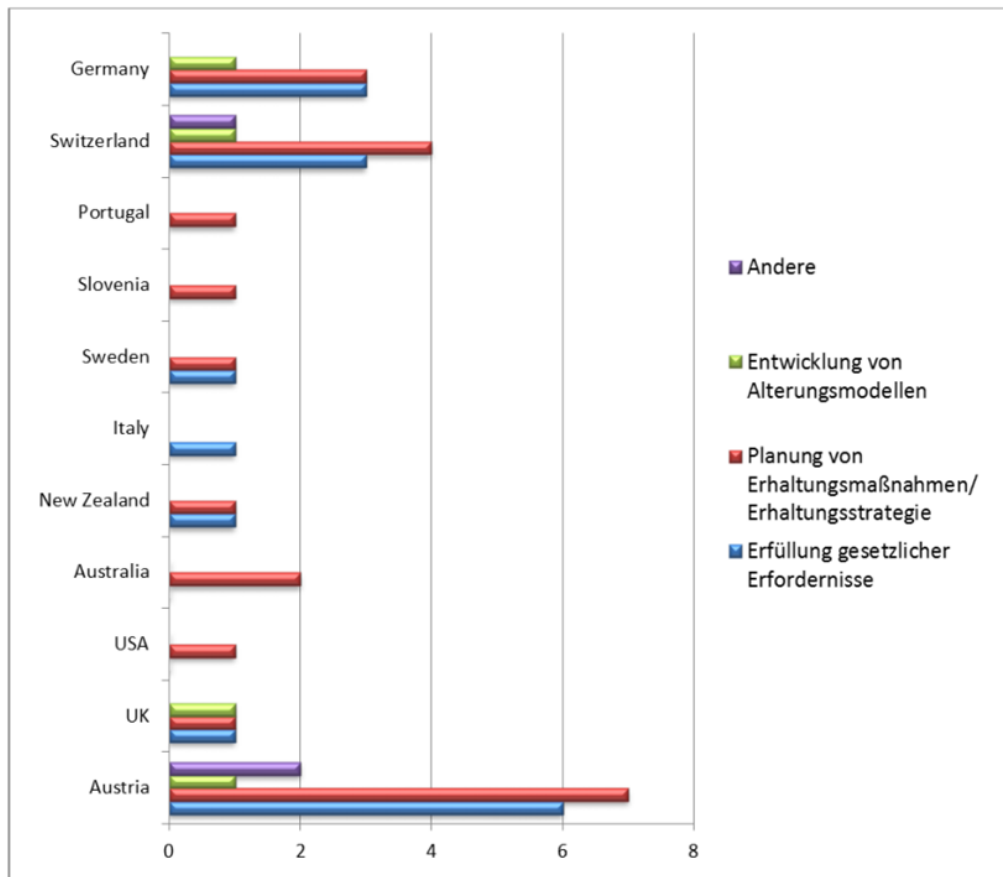


Abb. 2 Verwendungszweck von Tunnelzustandsdaten nach Ländern (aus [17])

Ein Fazit des Projekts AMBITION 2015 nach der Auswertung dieser Regulierungen der Zustandsbewertung von Tunnel ist, dass es «markante Unterschiede bei der Objektivierbarkeit der Schadensansprache und der Dokumentation zu verzeichnen gibt. Dort wo Bauwerkmanagementsysteme zur Zustandsüberwachung und Instandhaltungssplanung eingesetzt werden, ist ein höherer Grad an festen Schadenskatalogen und Algorithmen zur Zustandsbewertung erkennbar» (gemäss [17]).

Dass weiterer Handlungsbedarf für die Optimierung des Erhaltungsmanagements von Tunnel besteht, zeigt sich in den Zielsetzungen von Forschungsprojekten, wie zum Beispiel im bereits erwähnten Projekt AMBITION [17], dem Projekt OPTimAL [66] oder dem Initialprojekt [67].

In den letzten Jahren wurden wenige Forschungsarbeiten im Bereich der Erhaltungsprozesse bergmännischer Strassentunnel publiziert. In Österreich wurde 2020 mit dem Projekt OPTimAL [66] ein interessantes Forschungsprojekt mit vergleichbarer Zielsetzung publiziert. Darin wurden Regel Lebenszyklen für die bauliche Infrastruktur sowie sehr ausführlich für die Elektromaschinelle Ausrüstung³ von Tunnelanlagen bereitgestellt. Damit sollen Investitionen bei Tunnelbauprojekten über den gesamten Lebenszyklus evaluiert und optimiert werden können, wobei alle Kosten, von der Erstellung, über den Betrieb, die Instandhaltung und Instandsetzung berücksichtigt werden. Beim Projekt OPTimAL wurden für die Alterungsmodelle typischer Bauteile von Strassentunnel auf historische Zustandsdaten zurückgegriffen.

Dabei wird auf die österreichische Richtlinie «RVS 13.03.31 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Strassentunnel – Bauliche konstruktive Teile» von 2013 [9] verwiesen. Diese ist die Grundlage für die «Bestandesprüfung von Tunnel» und ist somit für die laufende Überwachung und Kontrolle sowie die Prüfung von Strassentunnel und vergleichbaren Bauwerken anzuwenden. Diese Tätigkeiten beschränken sich auf baulich konstruktive Teile des Tunnels und der

³ In der der Schweiz als «Betriebs- und Sicherheitsausrüstung» (BSA) bezeichnet.

zugehörigen baulichen Anlagen, in gesamtheitlicher Betrachtung mit den Einwirkungen auf das Bauwerk. Diese RVS enthält ein standardisiertes Bewertungssystem für Tunnel, das auf der Erfahrung und damit subjektiven Einschätzung der jeweiligen beurteilenden Person z.B. eines Bauingenieurs beruht. Der in dieser RVS beschriebene Ablauf des Erhaltungsplanungsprozesses mit «Laufende Überwachung», «Kontrolle», «Prüfung» ist mit den schweizerischen Vorgaben gemäss Richtlinie [2] vergleichbar.

Da für das Erhaltungsmanagement auf belastbare Zustandsdaten der Tunnel zurückgegriffen werden muss, wird im Projekt AMBITION zudem auf die praktische Umsetzung von Zustandserfassung und Zustandsbewertung und deren Weiterentwicklung eingegangen. Dies u.a. mit dem Einsatz von neuen unterstützenden Technologien (Sensorik, Scans) sowie der Standardisierung von Schadensphänomenen und deren Zuordnung zu Zustandsnoten bezüglich Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

In einer Gegenüberstellung der klassischen manuellen Tunnelinspektion mit der neuen «virtuellen» Inspektion wird der Zeitgewinn im Tunnel (weniger Sperrungen) sowie vor allem auch bei der Dokumentation des Zustandes hervorgehoben. Die im Bericht beschriebene Auswertung der Zustandsnoten führt zur aggregierten Zustandsbewertung pro Bauteilart des Tunnels. Diese Auswertungen werden in einer 5er Zustandsnoten-Gliederung dargestellt, welche auch als Zustandsachse (y-Achse) der verwendeten Alterungskurven-Diagramme verwendet wird. Die Art der Darstellung der Zustandes mittels Zustandsnoten wird in gleicher Art in der Schweiz für die Dokumentation des Zustandes zu beurteilter Bauteile und Bauwerke verwendet (ZK1 bis ZK5; vgl. auch **Abb. 1**; [2,3]). Die im Forschungsprojekt AMBITION [17] ermittelten Alterungs- / Degradationskurven für die einzelnen Bauteilarten wurden als Grundlage beim Projekt OPTimAL weiterverwendet.

Beim OPTimAL-Forschungsprojekt [66] sind die risikobasierten Überlegungen im Rahmen des ganzen Erhaltungsmanagement-Prozesses von Interesse, wobei hier neben der Wahl der geeigneten Inspektionsmethode auch die Priorisierung der gefährlichen Bauteile sowie das Inspektionsintervall in Bezug auf die Regel Lebenszyklen betrachtet werden. Auf den in OPTimAL berücksichtigten Aspekt der Wechselwirkungen des Erneuerungsbedarfs verschiedener Bauteile und Komponenten als «Täter-Opfer-Gegenüberstellung» wird auch in der Publikation [55] Bezug genommen. Als Projekt mit Praxisbezug beruht der OPTimAL-Risikoansatz auf der Auswertung historischer Zustandsdaten und Zustandsbeurteilungen von Tunnelinspektionen (u.a. gemäss [17]), wobei eine konsequente Erfassung der Zustandsnoten nicht über den gesamten Betrachtungszeitraum gegeben war.

In **Deutschland** kommt der DIN 1076 «Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen» [8] eine zentrale Rolle zu, die jedoch sehr allgemein für diverse Ingenieurbauten gehalten ist. Die zugehörige Richtlinie «RI-ERH-ING» [5] regelt die einheitliche Erfassung, Bewertung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076.

In der «Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Strassentunnel» des «Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen» (DAUB) [25] spielt die Betriebs- und vor allem auch Erhaltungsphase eine wesentlich Rolle für die Ermittlung der Life Cycle Costs (LCC). Die Empfehlung enthält jedoch keine weitergehenden Angaben, insbesondere zur Überwachung und Zustandsbeurteilung. Es gibt jedoch Hinweise, dass beim Erhaltungsmanagement die Auswirkungen der kürzeren Lebenszyklen der Ausrüstung (EMA/BSA) und deren mehrfacher Ersatz nicht unterschätzt werden sollten (vergleichbar mit den Überlegungen im Projekt OPTimAL [66]).

Die aktuellen Publikationen bzw. Empfehlungen des DAUB zum Thema BIM (vgl. www.daub-ita.de/publikationen/empfehlungen/ [24]) zeigen diesen zukünftigen Schwerpunkt im unterirdischen Bauen klar auf [26, 27]. Auch wenn die für BIM notwendigen Standardisierungen aller Daten und Prozesse u.a. für Tunnel erst später vorliegen werden, ist BIM für die Weiterentwicklung des Erhaltungsmanagements ein zentrales Zukunftsthema. Gemäss den bereits vom DAUB vorliegenden Publikationen u.a. zu den BIM Modellanforderungen / Informationsmodell [26, 27] wird klar, dass mit dem Betriebsmodell als digitaler Zwilling auch die Asset Management-Aufgaben, zu der auch die Erhaltungsplanung inkl. Inspektionen und Überprüfungen gehören, zukünftig Bestandteil des BIM-Prozesses sein werden.

2020 wurde von der deutschen «Bundesanstalt für Strassenwesen» (BASt) mit dem «Untersuchungsbericht zur Strategischen Planung von Erhaltungsmassnahmen an Ingenieurbauwerken» [22] die Grundlage für die entsprechende Richtlinie RPE-ING [4] publiziert. Die dort erarbeiteten Grundsätze zur strategischen Planung der Erhaltungsmassnahmen, u.a. mit Überlegungen zu Zustandsnotenverläufen und zu optimalen Eingriffszeiträumen für Erhaltungsmassnahmen, gelten (nur) für Brücken. Sie könnten sinngemäss für Tunnel auch angewandt werden, da diese Richtlinie auch auf der DIN 1076 basiert, welche explizit auch bei Tunneln anzuwenden ist.

1.3.2 Stand der Forschung in Bereich von Schadensprozessen und Verfallsmodellen

Bereits im Initialprojekt (vgl. [67]) wurde festgehalten, dass in Bezug auf einzelne konkrete Schadensprozesse zahlreiche verschiedene Studien existieren, jedoch eine systematische Betrachtung der Einflussfaktoren, deren Verlauf sowie deren Kombination auf die Schadensentwicklung fehlt. Es wird zudem auf die fehlende Typisierung der relevanten Schadensprozesse und deren Langzeitentwicklung hingewiesen. Die ausführliche Zusammenstellung der Literatur des Initialprojekts wurde daher im Rahmen der Forschungsarbeit von EP1 analysiert und hinsichtlich der erwähnten Punkte ausgewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse sind wie eingangs in Kap. 1.3 erwähnt in die Katalogblätter der Schadensprozesse eingeflossen (siehe III Katalogblätter Schadensprozesse (S)). Wichtig zu erwähnen ist, dass viele der untersuchten Literaturbeiträge auf Fallstudien beruhen und somit hauptsächlich objektspezifische Erkenntnisse erarbeitet wurden. Wo nötig wurden die Literaturliste spezifisch für den jeweiligen Schadensprozess mit weiteren Forschungsbeiträgen oder Literatur aus der Lehre erweitert. Nachfolgend werden die Erkenntnisse der untersuchten Literatur themenspezifisch kurz zusammengefasst.

Schadensprozesse Stahlbeton

Stahlbeton gehört bedingt durch die breite Anwendung des Werkstoffs zu den am intensivsten untersuchten Werkstoffen. Entsprechend liegen zahlreiche Studien und Literaturbeiträge vor, die sich mit den Schadensprozessen in Stahlbeton auseinandersetzen.

Die Beiträge [56, 59, 69, 73] geben einen umfassenden Überblick und Detailinformationen zu den verschiedenen Schadensprozessen in Stahlbeton bzw. der Bewehrungskorrosion und dem Betonangriff / Gefügezerstörung. Eine weitere sehr umfassende Übersicht über die Schadensprozesse in Stahlbeton liefert das Handbuch der Handbuch «Betonpraxis» der Holcim (Schweiz) AG (vgl. [75]). Diese Literaturbeiträge liefern in erster Linie allgemeine Beschreibungen und Grundlageninformationen zu den ablaufenden physikalischen und chemischen Prozessen der einzelnen Schadenprozesse. Sie befassen sich nicht mit den spezifischen Umgebungsbedingungen in Tunneln.

Es existieren jedoch auch mehrere Studien der EMPA Dübendorf [49, 52, 57], welche sich spezifisch mit dem Sulfatangriff in Tunnelbauwerken auseinandersetzen. Die Bedeutung des externen Sulfatangriffs im Tunnelbau infolge hoch mineralisierten Bergwässern wird in diesen Arbeiten verdeutlicht. Insbesondere wird im Rahmen dieser Arbeiten auf die besonderen Umstände in der Tunnelumgebung eingegangen und verdeutlicht, wieso in diesen Umgebungsbedingungen bei Kontakt mit hoch mineralisierten Bergwässern im Gegensatz zu oberirdischen Bauwerken nicht die Ettringit- sondern die Thaumasilbildung der massgebende Schädigungsprozess ist. Es wird festgehalten, dass die Thaumasilbildung auch in sogenannten «sulfatbeständigen» Zementen ablaufen kann, sofern neben dem Sulfatzufluss auch eine Karbonatquelle bzw. Karbonat im Bergwasser vorhanden ist. Die Beeinflussung der Tunnelbauwerke durch Sulfatangriff unterscheidet sich demnach wesentlich von den anderen Verkehrsinfrastrukturen. In [52], einer Studie EMPA Dübendorf aus dem Jahr 2013, wurde daher ein verbessertes Prüfverfahren für die Sulfatwiderstandsprüfung in Tunneln entwickelt. Bei [57] und bei [49] handelt es sich um Fallstudien der EMPA Dübendorf aus den Jahren 2001 bzw. 2011. Im Rahmen dieser Studien wurden sehr detailliert die Schäden infolge Sulfatangriff beim Harderbandtunnel (Bauenstrasse, Kanton Uri), dem San Bernardino-Tunnel (Nationalstrasse A3, Kanton Graubünden), dem Gotschnatunnel (Nationalstrasse A28a, Kanton Graubünden) und dem

Abluftschacht des Belchentunnels untersucht. Die Studien erläutern sehr detailliert die dem Sulfatangriff zugrundeliegenden chemischen und physikalischen Gesetzmässigkeiten, die Auslöser / Ursachen und die relevanten Einflussfaktoren in der Tunnelumgebung hinsichtlich der damit zusammenhängenden, aufgetretenen Schäden. In beiden Studien wurden primäre und sekundäre Inhomogenitäten (Risse, Fugen, Kiesnester, Kontaktflächen mit Bergwasser, etc.) bzw. Bereiche mit mangelhafter Betonqualität als hauptsächliche Ausgangspunkte des Sulfatangriffs identifiziert. Anhand von Bohrkernen und anschliessenden Laborprüfungen wurde in [49] festgestellt, dass innerhalb eines Betonquerschnitts sehr relevante Unterschiede hinsichtlich des ablaufenden Schädigungsprozesses bestehen können. Im Abluftschacht des Belchentunnels führte die expansive Ettringitbildung, welche oftmals eine Vorstufe der Thaumasitbildung darstellt, auf der Innenseite der einschaligen Betonauskleidung bereits früh zu schweren Abplatzungen. Die Thaumasitbildung konnte daher stellenweise gar nicht mehr stattfinden. Die Thaumasitbildung wurde hingegen hauptsächlich auf der Aussenseite der Betonauskleidung beobachtet worden, wo aufgrund der Einspannung zwischen Tragwerk und Gebirge keine Abplatzungen auftreten konnten und der Beton demnach während einer langen Dauer mit sulfathaltigem Bergwasser beaufschlagt wurde. Die Schädigung und die daraus folgenden Konsequenzen eines Sulfatangriffs sind auch bei tiefem Mineralisationsgrad des Bergwassers sehr relevant, sofern die Expositionszeit bzw. die Zeitdauer des Betonangriffs genügend lang ist. Der effektive Sulfatanfall kann sich (z.B. aufgrund veränderter Wasserwegigkeiten bei Ausfällung / Ausblühungen in Klüften) über die Jahre aber auch stark verändern und teilweise lokal versiegen. Die in einem Bauwerk angetroffenen Schäden und demnach auch die daraus resultierenden Gefährdungen können zeitlich und örtlich stark variabel auftreten. Der Sulfatangriff ist gemäss [57] besonders bei einschaligen Spritzbetonauskleidungen sehr relevant. Spritzbeton weist aufgrund seiner höheren Porosität verglichen mit Ortbeton ein grösseres Schädigungspotential auf. Zudem ist bedingt durch den direkten Kontakt mit dem Gebirge bzw. dem Bergwasser ein flächiger Verlust des Verbunds möglich und damit die Gefährdung für den Verkehr erheblich. Bei zweischaliger Verkleidung oder bei Fertigteilen treten massive Schädigungen dagegen eher lokal (Wasserzutritte, beschädigte Abdichtung, primäre / sekundäre Inhomogenitäten, etc.) und besonders in Zusammenhang mit hoch-mineralisierten, aggressiven Bergwässern auf. Hier äussert sich der Betonangriff vor allem durch eine tiefgreifende Aufweichung des Zementsteins bis hin zu einem vollständigen Festigkeitsverlust. In allen drei Studien der EMPA Dübendorf wurde der Betonqualität bzw. insbesondere dessen Porosität grösste Bedeutung hinsichtlich eines Sulfatangriffs beigemessen. Ein dichter Beton mit entsprechend hoher Einbauqualität bietet im Allgemeinen den besten Schutz gegen Schäden infolge Sulfatangriff. In keiner der Studien der EMPA wurden allgemeine zeitabhängige Verfallsfunktionen entwickelt. Dies liegt unter anderem daran, dass wie in [52] festgehalten, für die Beurteilung der Auswirkungen von Sulfatschäden auf das Bauwerk eine ganzheitliche Betrachtung (materialtechnologisches Verhalten unter Standardbedingungen, konstruktive Durchbildung, Qualität der Ausführung, Tragwerkskonzept, etc.) notwendig ist. Ein Versuch, den Verfall eines Tunnelgewölbes zu modellieren und prognostizieren, wurde hingegen in [50] unter-nommen. Diese Studie basiert auf zahlreichen Felduntersuchungen und Laborprüfungen an 10 Tunnels der Chengdu-Kunming Bahnlinie in Westchina. Die Tunnels dieser Bahnlinie sind bedingt durch die lokale Geologie und die starke Beaufschlagung mit Abgasen der Diesellokomotiven hohen Sulfatangriffen ausgesetzt. Im Rahmen dieser Studie wurde ein Labormodell basierend auf den in-situ Feststellungen (Sulfatkonzentrationen, etc.) einem Sulfatangriff und verschiedenen Belastungsstufen ausgesetzt. Mittels Dehnmessstreifen (Strain Gauges) und Rissmonitoring wurde die fortlaufende Schädigung und Zunahme der Schnittkräfte unter verschiedenen Belastungsstufen und Sulfatangriffszeiten ermittelt. Basierend auf diesen Daten wurde die zeitliche Veränderung der Tragsicherheitsfaktoren eines Tunnelgewölbes bei einem Sulfatangriff rückgerechnet. Es wurde festgestellt, dass im Labormodell die Tragsicherheit rapide mit zunehmender Belastung und / oder zunehmender Sulfatangriffszeit (Erosionszeit) abnimmt (exponentieller Verfall).

Eine weitere interessante Forschungsarbeit ist eine Studie der TFB AG und dem Tiefbauamt Kanton Basel-Landschaft aus dem Jahr 2013 [36], welche sich mit der Schädigung von Stützmauern und Brücken infolge der Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) befasst und sehr detailliert den Ablauf einer Alkali-Aggregat-Reaktion und deren

wesentlichen Auslöser / Ursachen sowie Einflussfaktoren erläutert. Für das grundlegende Verständnis der Alkali-Aggregat-Reaktion und die dadurch entstehenden Schäden an Bauwerken liefert die Studie wertvolle Erläuterungen und wichtige grundlegende Erkenntnisse. Die Studie befasst sich zwar explizit nur mit Stützmauern und Brücken, unterstreicht jedoch einleitend mit der Feststellung, dass zum Zeitpunkt der Studie in rund 45 Tunneln und Galerien AAR-Schäden festgestellt wurden, aber dennoch die Relevanz der AAR für Tunnelbauwerke in der Schweiz. Die Studie befasst sich intensiv mit dem Monitoring der AAR-Schädigung und weist auf den lokal sehr unterschiedlichen und möglichen inhomogenen Verlauf der AAR innerhalb eines Betonquerschnitts hin. Den Randbedingungen der heutigen Monitoringmethoden wird besonderes Augenmerk beigemessen und auf die Schwierigkeiten bei der Prognose des Verlaufs der AAR hingewiesen. Es existiert keine Verfallsfunktion. Es wird festgehalten, dass die heutigen Kenntnisse der Kinetik der Alkali-Aggregat-Reaktion nach wie vor ungenügend sind. Dies liegt unter anderem daran, dass die AAR in der Regel langsam abläuft und es etwa 20 Jahre (durchschnittliche Latenzzeit) dauert, bis erste Bauwerksschäden (Risse mit Breiten > 0.3 mm) infolge AAR überhaupt erkennbar sind. Zur Bestätigung, dass es sich um AAR-bedingte Risse handelt, sind zudem mikroskopische Untersuchungen am Dünnschliff unerlässlich. Viele der AAR-Schäden sind daher (noch) nicht erkannt worden, oder in der Vergangenheit unter Umständen auch falsch interpretiert und anderen Schadensprozessen zugeordnet worden. Da die schweizerische Verkehrsinfrastruktur jedoch immer älter wird und entsprechend viele Bauwerke die Latenzzeit überschritten haben, wird die Alkali-Aggregat-Reaktion als Schädigungsmechanismus für das Erhaltungsmanagement zukünftig immer relevanter. Um eine verlässliche Basis für Prognosen des zeitlichen Verlaufs von AAR-Schäden zur Verfügung zu haben, sind weitere Forschungsanstrengungen nötig.

Die Forschungsbeiträge hinsichtlich der Ermüdung von Stahlbeton stammen verständlicherweise hauptsächlich aus dem Brückenbau, wo dieser Schädigungsprozess eine hohe Relevanz hat. Einige der Forschungsbeiträge wie z.B. [35] befassen sich ausschliesslich mit den ermüdungsbedingten Schädigungsmechanismen im Bewehrungsstahl und Spannstahl. Einen sehr interessanten Beitrag für die Ermüdungsbeanspruchung im Komposit-Material Stahlbeton bzw. Beton und Bewehrungsstahl im Verbund leistet hingegen die Dissertation [31]. Diese befasst sich mit der Ermüdungsbeanspruchung von Stahlbetonbrücken und entwickelt basierend anerkannten Grundlagen der Stahlbetontheorie und auf Versuchsergebnissen an Grossversuchen ein Tragwerksmodell mit einer zufallsverteilten Ermüdungsfestigkeit in den Bewehrungsstäben. Einleitend zur Dissertation wird festgehalten, dass in der Vergangenheit der Ermüdung von Stahlbetontragwerken zu wenig Beachtung geschenkt wurde. Zum Zeitpunkt der Dissertation im Jahre 2021 in der Schweiz waren zwar keine Schäden an Brücken infolge Ermüdung bekannt, was gemäss der Dissertation aber u. a. am geringen Durchschnittsalter der Brückeninfrastruktur in der Schweiz, dem Nicht-Erkennen versteckter Schäden bzw. dem Zuordnen vorhandener Schäden zu anderen Schadensprozessen wie z. B. Bewehrungskorrosion liegt. Aufgrund der heutigen Tendenz, die eingesetzten Werkstoffe bzw. die Tragwerke immer stärker auszunutzen und den damit verbundenen grösseren Spannungswechseln, sowie der Verkehrszunahme und der Zunahme der massgebenden Achslasten, wird die Ermüdungsbeanspruchung von Stahlbetonbauwerken zukünftig immer relevanter werden. Im Rahmen der durchgeführten Grossversuche, konnte die Ermüdungsbeanspruchung bei bestehenden Stahlbetonbrücken als reales Gefährdungsbild identifiziert und nachgewiesen werden, welches sich primär auf die Bewehrung beschränkt. Der Schädigungsprozess konnte als «kontinuierlich, langsam und nicht linear ablaufend charakterisiert werden». Die Verformungszunahmen nahmen in der Schlussphase des Ermüdungslebensdauer unkontrolliert zu, weshalb diese Phase als eigentliche Versagensphase bezeichnet werden kann. Es wird auf weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich des Verständnisses der Ermüdungsbeanspruchung von Stahlbeton hingewiesen und abschliessend festgehalten, dass es nach wie vor mit den heutigen zur Verfügung stehenden Mitteln und Modellen nicht möglich ist, den derzeitigen Ermüdungszustand eines bestehenden Bauteils zu erfassen und eine zuverlässige Prognose über seine Restlebensdauer abzugeben.

Schadensprozesse Metall

Der Beitrag [69] gibt einen umfassenden Überblick und Detailinformationen zu den verschiedenen Korrosionsarten bei Metallen. In [38] wird die Kontakt- und Spaltkorrosion, deren Auslöser / Ursache und Einflussfaktoren erläutert. In [46] wird der Schadensprozess der Metaller müdung deren Auslöser / Ursachen und Einflussfaktoren erläutert. Diese Literaturbeiträge liefern in erster Linie allgemeine Beschreibungen und Grundlageninformationen zu den ablaufenden physikalischen und chemischen Prozessen der Schadenprozesse. Sie befassen sich nicht mit den spezifischen Umgebungsbedingungen in Tunnels.

Schadensprozesse Baugrund

Für Schadenprozesse im Baugrund gibt es zahlreiche Fallstudien, die sich mit einem spezifischen Prozess in einem bestimmten Tunnel / Tunnelabschnitt auseinandersetzen. Literaturbeiträge, die die verschiedenen Schadenprozesse im Baugrund in Abhängigkeit der Geologie in einen übergeordneten, systematisierten Kontext stellen, gibt es hingegen wenige.

Eine Studie der EPF Lausanne aus dem Jahre 2011 [61] bildet hierbei eine Ausnahme. Im Rahmen dieser Studie wurden die Tunnels der schweizerischen Nationalstrassen hinsichtlich der auftretenden Schäden bzw. Befunde analysiert. Die Studie befasste sich dabei ausschliesslich mit Schäden, die das Tunnelgewölbe betreffen. In der Studie wurden basierend auf einer detaillierten Literaturrecherche sowie der Analyse von Hauptinspektionsdaten relevante Schadenprozesse für schweizerische Strassentunnel bestimmt und zugehörige Degradationspotentiale und Degradationsraten abgeleitet. Mittels Korrespondenz-Analyse wurden dabei die Haupteinflussgrössen der Degradationspotentiale und Degradationsraten bestimmt. Die hauptsächlich angetroffenen Schäden bzw. Befunde und Datenbasis der Studie sind in **Abb. 3** ersichtlich. Viele der analysierten Schäden sind dabei nicht (direkt) auf Schadenprozesse im Baugrund zurückzuführen, sondern sind typisch für Schäden an Beton- bzw. Stahlbetonbauwerken und somit auf zugehörige Schadenprozesse Stahlbeton zurückzuführen. Es wird darauf hingewiesen, dass in den der Studie zugrundeliegenden Inspektionen weder Hohlräume hinter dem Tunnelgewölbe noch Gewölbeverformungen aufgenommen und dokumentiert wurden. Die damit zusammenhängenden Schadenprozesse, deren Ursachen insbesondere im Baugrund zu suchen sind, wurden bei der durchgeführten Analyse daher nicht berücksichtigt. Im Rahmen der Studie wurde jedoch eine Charakterisierung des schweizerischen Gebirges vorgenommen und dieses in die nachfolgenden Klassen unterteilt:

- Lockermaterial;
- Tone und Mergel;
- Kalkgestein;
- Evaporiten;
- Schiefer und Phyllite;
- kristalline Gesteine und Gneise.

Die angetroffenen Schäden wurden in Abhängigkeit dieser geolgischen Klassen ausgewertet. Die Studie bietet daher trotz allgemeinem Fokus auch einen sehr guten Überblick über die angetroffenen Schäden in Abhängigkeit der Geologie. Es wurde festgestellt, dass Tunnel in Lockermaterial eine hohe durchschnittliche Anzahl an Schäden insbesondere aufgrund der Bettungsverhältnisse, asymmetrischen Belastung und der oftmals geringen Überlagerung aufweisen. Tunnel in Evaporiten werden massgeblich durch Quellprozesse und Sulfatangriffe beeinträchtigt. In kristallinem Gebirge stehen Schadenprozesse infolge Berg- / Grundwasser im Vordergrund. In weichen schiefrigem, phyllitischem, mergeligen oder tonigen Gesteinen sind hingegen zeitabhängige Spannungsumlagerungen im Tunnelgebirge relevante Schadenprozesse. Tunnels in Kalk bzw. karstigen Verhältnissen wird im Allgemeinen ein geringes Degradationspotential attestiert, weil in karstigen Verhältnissen das Bergwasser klar definierte Fliesswege hat und somit die Beeinflussung des Tunnelgewölbes durch Bergwasser sich nur lokal auswirkt.

Type	Disorder	Number of records	Number of affected tunnels
[1]	Water leakage, Moisture	75	57
[2]	Efflorescence (sulphates)	19	16
[3]	Staining, Calcium leaching effects, Calcareous concretion, Honeycomb	29	25
[4]	Concrete spalling, Delaminated concrete (due to corrosion of reinforcements)	34	28
[5]	Plain concrete corrosion, Concrete scaling (de-icing salts attack)	15	14
[6]	Corrosion of steel bars (reinforced concrete)	76	52
[7]	Voids behind the lining	-	-
[8]	Cracks, Fissures	131	80
[9]	Local deformation (crown)	1	1
[10]	Local deformation (walls)	-	-
[11]	Fines transport in the drainage system	10	8
[12]	Ice formation	15	15
[13]	Concrete lining crumbling - local failure, fragments fall	6	5
[14]	Track scaling	10	8
[15]	Invert heave up	15	12
[16]	Impact damages	12	10
[17]	Drainage system obstruction by calcareous concretion	33	30

Abb. 3 Typische Befunde in Tunnel der schweizerischen Nationalstrasse gemäss [61]

Hinsichtlich der Haupteinflussgrössen der Degradationspotentiale und Degradationsraten wurde abschliessend festgehalten, dass das Degradationspotential massgeblich vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme, der Konstruktionsmethode (z.B. Vergrösserung Auflockerungszone bei Sprengvortrieb), dem Abdichtungskonzept, der Geologie und der Hydrogeologie abhängt. Hingegen wird die Degradationsrate hauptsächlich durch das Bauwerksalter, das Verkehrsvolumen, den Lüftungsbetrieb, das Abdichtungskonzept, das (zeitabhängige) Gebirgsverhalten sowie die Wasserzirkulation und chemische Zusammensetzung des Bergwassers (welche primär vom Tunnelgebirge abhängt) beeinflusst. Im Rahmen der Studie wird auch auf die Schwierigkeiten bei der Inspektion bzw. der Verwendung der Inspektionsdaten als Grundlage zur Ableitung der Degradationspotentiale und Degradationsraten eingegangen. In diesem Zusammenhang wurde festgestellt, dass im Rahmen der Inspektion die Beurteilung des Tunnelzustands hauptsächlich auf den am Tunnelgewölbe festgestellten Schäden beruht. Dadurch kann der Anschein erweckt werden, dass die massgeblichen Schadensprozesse nur im Tunnelgewölbe ablaufen. Die geologischen oder hydrogeologischen Verhältnisse und auch die Baumethode werden trotz der Relevanz hinsichtlich des Verfalls des Tragwerks bei der Beurteilung des Tunnelzustands üblicherweise nicht berücksichtigt und fehlen somit bei der Analyse der Inspektionsdaten. Der Datensammlung und Datenanalyse ab Baubeginn und anschliessend während dem Tunnelbetrieb bzw. der Länge der Messdauer werden im Allgemeinen eine grosse Wichtigkeit attestiert, um darauf aufbauend das zukünftige Bauwerksverhalten zu prognostizieren. Es wird festgehalten, dass die hauptsächliche Erschwernis bei der Datenauswertung und -analyse zur Herleitung des Bauwerkverfalls das Fehlen einer standardisierten Inspektionsmethode insbesondere in Bezug auf die Lage der Schäden im Tunnelbauwerk / -gewölbe und den zugrundeliegenden Schadensprozessen ist. Die angewendete Korrespondenz-Analyse

wurde als geeignet beurteilt, um die Haupteinflussfaktoren von Schadensprozessen zu ermitteln, sofern eine ausreichende Anzahl an Schäden als Datengrundlage vorhanden ist. In dieser Hinsicht wurde darauf hingewiesen, dass einige Schäden nur in einer geringen Anzahl festgestellt wurden und es somit nicht möglich war, alle Einflussfaktoren für deren Entwicklung zu ermitteln. Auch wird in diesem Zusammenhang auf die geringe Datenqualität in der zum Zeitpunkt der Studie vorliegenden Tunneldatenbank hingewiesen, welche der Datenanalyse gewisse Grenzen gesetzt hat.

Eine weitere sehr umfassende Arbeit hinsichtlich Schadensprozessen im Baugrund liefert [18]. Es handelt sich hierbei um eine Forschungsarbeit zur Untersuchung und Beschreibung der Quellphänomene im Untertagebau. Es werden einerseits die Grundlagen zum Verständnis der Quellprozesse in ton- und anhydrithaltigem Fels und zur Rolle des Bergwassers erläutert. Andererseits wird auf die Besonderheiten bei der Projektierung und der Bauausführung in quellfähigem Fels eingegangen. Es wird festgehalten, dass aufgrund der chemischen Natur des Quellvorgangs in anhydrithaltigen Gesteinen und der Kopplung dieser Vorgänge mit der mechanischen Beanspruchung des Gesteins bzw. des im Unterschied zum Tonquellen bis heute noch nicht geklärten Einfluss des Spannungszustands auf die Quelldehnung und den Quelldruck die Gesetzmässigkeiten des Sulfatquellens heute noch Gegenstand aktueller Forschung sind. Es existieren keine generellen Modelle zur Prognose des Quellprozesses.

Umfangreiche Untersuchungen zu druckhaften Gebirgsverhältnissen wurde in Zusammenhang mit dem Bau des Gotthard-Basistunnels angestellt. Verschiedene Literaturbeiträge wie z.B. [28, 65] widmen sich den stark druckhaften Gebirgsverhältnissen bei der Durchörterung des Tavetscher Zwischenmassivs im Rahmen des Jahrhundertprojekts. Insbesondere der Beitrag von K. Kovári in [65] liefert wertvolle Erkenntnisse für das Verständnis der ablaufenden Prozesse bei druckhaften Gebirgsverhältnissen, deren Auslöser / Ursachen und den primären Einflussfaktoren sowie den beobachtbaren Phänomenen beim Tunnelbau. Die Dissertation [72] befasst sich detailliert mit dem Einfluss des Porenwasserdrucks bei druckhaften Gebirgsverhältnissen. Im Rahmen dieser Dissertation wurden Kakirite aus dem Tavetscher Zwischenmassiv Nord und der Clavaniev-Zone des Gotthardbasistunnels experimentell und theoretisch untersucht. In diesem Zusammenhang wurden umfangreiche Triaxialversuche im Labor unter Beachtung des Porenwassers bzw. der Porenwasserdrücke durchgeführt. Diese ermöglichten die Formulierung von Stoffgleichungen zur Reproduktion des Festigkeits- und Verformungsverhalten in den besagten Zonen und unterstrichen die relative Bedeutung des Porenwassers in dieser Hinsicht. Diese Studien liefern alle sehr detaillierte Informationen für das grundlegende Verständnis der druckhaften Gebirgsverhältnisse. Sie legen den Fokus aber hauptsächlich auf den Bau der Tunnel in druckhaften Gebirgsverhältnissen und nicht auf deren Verhalten während der Betriebsphase. So wurde z.B. das Kriechvermögen der Gesteinsproben im Rahmen der Dissertation von [72] gänzlich und bewusst ausser Acht gelassen. Einen Beitrag das zeitabhängige Verhalten von Tunnelbauwerken in druckhaften Verhältnissen zu untersuchen, liefert hingegen [64]. Im Rahmen dieser Fallstudie wird das zeitabhängige Kriechverhalten des Gebirges des zweiröhrigen Shibli-Tunnels im Iran untersucht. Die interessierenden Tunnelabschnitte liegen in einer stark zerklüfteten Zone aus weichem Schiefer und Mergel. In diesem Abschnitt sind die Tunnelröhren als Hufeisenprofil ausgebaut. Die Studie basiert auf Laborversuchen, in-situ Monitoring-Daten und einer auf dieser Datengrundlage aufbauenden FDM-Simulation. Im Rahmen der Laborversuche wurden triaxiale Kriechversuche an intakten Gesteinsproben durchgeführt. Die Versuchsergebnisse flossen anschliessend in eine numerische Simulation zur Modellierung des zeitabhängigen Gebirgsverhaltens ein. Das numerische Modell wurde mit in-situ Messdaten während dem Tunnelvortrieb und Rückrechnungen gefittet und anschliessend für die Prognose der Zunahme der Schnittkräfte während der Nutzungsdauer der Tunnelröhre verwendet. Die Studie kam zum Schluss, dass die Schnittkräfte graduell zunehmen und innert den nächsten 55 Jahren die Traglast der beiden Tunnelröhren überschreiten werden.

Setzungen bzw. Konsolidationsprozesse in Zusammenhang mit Tunnelbauten wurden in [45] untersucht. Im Rahmen dieser Fallstudie wurde anhand zweier Fallbeispiele aus Spanien und Deutschland die zeitabhängige Boden-Bauwerks-Interaktion zwischen Tunnels und Hochbauten in deren Umgebung untersucht. Der Fokus der Studie liegt auf

Tunnel im Lockergestein und in urbanem Gebiet mit entsprechend sensibler Umgebung in Bezug auf Setzungen. Neben der Beeinflussung der Nachbarbauwerke durch den Tunnelbau wird auch die Beeinflussung bestehender Tunneln durch Bautätigkeiten in deren Nahbereich untersucht (Belastung / Setzung während Bau, Entlastung / Hebung während Abbruch und Aushub). Die Studie basiert auf umfassenden Bodenuntersuchungen und darauf aufbauenden umfangreichen analytischen und numerischen Simulationen der Boden-Bauwerks Interaktion. Die Studie hält fest, dass im realen Umfeld nur umfangreiche Bodenuntersuchungen und darauf aufbauende Simulationen in Kombination mit der Beobachtungsmethode hinreichende Sicherheit während den Bautätigkeiten gewährleisten. Hierfür ist während der Bautätigkeit ein entsprechendes Monitoringsystem einzurichten.

Schadensprozesse Berg- / Grundwasser

Eine Vielzahl der in Strassentunnel angetroffenen Schäden und Schadensprozesse sind entweder eine direkte Folge des Berg- / und Grundwassers im umliegenden Tunnelgebirge oder werden massgeblich durch dieses beeinflusst. So wird in [61] z. B. festgestellt, dass eine Vielzahl der angetroffenen Schäden in Strassentunneln in Zusammenhang mit Wasser stehen und dies besonders in Portalnähe und bei Tunnel mit geringer Überdeckung ausgeprägt ist. Die Relevanz des Berg- und Grundwassers für die Schäden und Schadensprozesse in Strassentunneln unterstreicht auch die etwas ältere Studie [39] aus dem Jahre 1991, welche auf 48 Fallstudien von Tunneln aus 12 verschiedenen Ländern basiert. Im Rahmen dieser Studie werden die Probleme und Schädigungsprozesse in Zusammenhang mit Berg- und Grundwasser beschrieben. Es handelt sich einerseits um Schadenprozesse, die direkt auf das Berg- und Grundwasser zurückzuführen sind (z.B. Wasseraufstau), aber andererseits auch um Schadenprozesse, die durch das anfallende Berg- und Grundwasser beeinflusst und begünstigt werden (z.B. Sulfatangriff). Neben den eigentlichen Schadensprozessen werden auch zweckmässige Instandsetzungsmassnahmen für verschiedene Ausbauarten beleuchtet. Da es sich um eine ältere Studie handelt, basieren die Feststellungen auf Ausbauarten, welche heutzutage nicht mehr den Stand der Technik widerspiegeln. Viele der untersuchten Tunnel sind nur einschalig ausgebaut und besitzen keine Tunnelabdichtung. Die im Bericht dargelegte Relevanz der Schädigungsprozesse ist daher nur bedingt vergleichbar mit dem heutigen Ausbaustandard bzw. Tunnelportfolio. Die aufgezeigten Abhängigkeiten zwischen den direkt und indirekt mit Berg- und Grundwasser zusammenhängenden Schadensprozessen sind aber nach wie vor gültig.

Im Beitrag [33] aus dem Jahre 2007 wird speziell auf die Versinterungsprobleme im Tunnelbau bzw. im Betrieb eines Tunnels eingegangen. Es werden die Entstehung von Versinterungen in Tunnelndrainagen und deren Auslöser / Ursachen erläutert und auf damit zusammenhängende Planungs- und Ausführungsfehler hingewiesen. Als bedeutende Kalklieferanten wurden neben dem Bergwasser bzw. kalkhaltigen Gesteinen eindeutig zementöse Baustoffe identifiziert (Spritzbeton, Injektionsmörtel, Ortbeton). Insbesondere den Injektionsmörteln wird hierbei aufgrund derer hohen Zementgehalte ein grosses Versinterungspotential attestiert. Im Rahmen des Aufsatzes werden Massnahmen und Konstruktionskonzepte skizziert, um die Versinterungsproblematik nachhaltig zu reduzieren. Die wesentlichen Stossrichtungen hierbei sind die Vermeidung des Wasserkontakts mit alkalischen Baustoffen, die Verhinderung von Luftaustausch (Verhinderung Turbulenzen, Reduktion Abflussfläche) und die Vermeidung von Austrocknung (Zementation).

Die meisten der Literaturbeiträge befassen sich ausschliesslich mit der Beschreibung der Schadensprozesse aufgrund von Berg- und Grundwasser, nicht jedoch mit der zeitlichen Entwicklung der damit zusammenhängenden Schäden. Nur in einer der untersuchten Literaturquellen wurde auf die zeitabhängige Veränderung der Schadensprozesse von Berg- und Grundwasser eingegangen. Es handelt sich hierbei um eine Studie [70], die die zeitabhängige Veränderung des Porenwasserdrucks beim Seikantunnel zwischen Honshu und Hokkaido in Japan untersucht. Beim Seikantunnel handelt es sich um ein System aus drei Untersee-Tunnelröhren, welche 240 m unter der Wasseroberfläche im Schutze eines Injektionsschirmes ausgebrochen wurden. Zur Beherrschung der Wasserdrücke wird das anfallende Grundwasser über einen Drainagestollen entwässert. Im Rahmen der Studie

wurden fortlaufend überwachte Drainagemengen und Konvergenzmessungen im Haupttunnel untersucht. Es wurde eine anhaltende Reduktion des Wasseranfalls und eine laufende Zunahme der Bauwerksverformungen festgestellt. Basierend darauf wurde ein numerisches Modell zur Simulation des Langzeitverhaltens des Tunnels erstellt, in welchem die Drainagekapazität im Injektionsschirm und im Drainagesystem rund um den Tunnel variiert und in Abhängigkeit davon die resultierenden Schnittkräfte und Verformungen des Tunnelgewölbes ermittelt wurden. Es wurde festgehalten, dass es infolge der Reduktion der Drainagekapazität im Injektionsschirm und im Drainagesystem des Tunnels zu einem Anstieg des Wasserdrucks und damit zu einer Zusatzbelastung und zu Verformungen des Tunnelgewölbes kommt. Der Verlust der Drainagekapazität im Drainagesystem ist dabei aufgrund des grossen resultierenden hydraulischen Gradienten weit kritischer als jene im Injektionsschirm. Neben dem Anstieg des Wasserdrucks sind die Bettungsverhältnisse des Tunnels ein wesentlicher Einflussfaktor hinsichtlich der resultierenden Schnittkräfte resp. der Tragsicherheit. Die Notwendigkeit des Langzeit-Monitorings als Basis für eine hinreichende Prognose des Bauwerkverhaltens wird unterstrichen.

Schadensprozesse Kunststoff

Die Langzeitbeständigkeit von Kunststoffabdichtungen in Tunnelumgebung wurde umfassend in [47] und [53] untersucht. Es handelt sich hierbei um eine Forschungsarbeit der EMPA Dübendorf, welche 2011 in Zusammenhang mit dem Bau des Gotthard-Basistunnels durchgeführt wurde. Die Forschungsarbeit hatte zum Ziel, die für den Einsatz beim Gotthard-Basistunnel bestmögliche Materialwahl treffen zu können. Im Rahmen der Laborprüfungen wurden verschiedene Materialien für Abdichtungs- und Drainagesysteme unterschiedlichen Umweltbedingungen ausgesetzt (Temperatur, Säure, Lauge, mit/ohne Lufteinblasung). Es wurde festgehalten, dass bei Dichtungsbahnen auf Polyolefin-Basis thermo-oxidative Alterungsprozesse massgebend sind. Hohe Temperaturen wurden hierbei als relevanter Einflussfaktor bestimmt. Bei Dichtungsbahnen aus PVC steht die Hydrolyse der Weichmacher und die damit zusammenhängende Versprödung im Vordergrund. Alkalische oder saure Bedingungen stellen bei Abdichtungen aus PVC wesentliche Einflussfaktoren dar. Basierend auf den umfangreichen Laborversuchen konnte das Alterungsverhalten der Abdichtungsbahnen studiert und deren erwartete Lebensdauer unter realen Bedingungen abgeschätzt werden. Mit der darauf aufbauenden Optimierung der Rezepturen der Abdichtungsmaterialien konnte deren erwartete Lebensdauer in den Umgebungsbedingungen des Gotthard-Basistunnels von anfänglich 40 bis 50 Jahren auf 50 bis 100 Jahre verlängert werden.

Schadensprozesse Strassenoberbau

Im Beitrag [44] werden die Ursachen und Entstehungsmechanismen von Fahrbahnschäden erläutert. Hinsichtlich der Erfassung und Beurteilung von Fahrbahnschäden in der Schweiz ist zudem die VSS Norm 40 925b [13] massgebend. Diese Norm beinhaltet einen umfassenden Schadenskatalog und bietet demnach einen guten Überblick über die für die Fahrbahn relevanten Schadensprozesse. In [51], einer Studie aus China, wird spezifisch die Rissbildung in Betonfahrbahnen von Strassentunnels untersucht. Als wesentliche Einflussfaktoren auf die Rissbildung wurden die Temperatur bzw. Temperaturwechsel, die Feuchtigkeit sowie die Einbaubedingungen und die Nachbehandlung bestimmt. Diese Literaturbeiträge liefern in erster Linie allgemeine Beschreibungen und Grundlageninformationen zu den ablaufenden physikalischen und chemischen Prozessen der Schadenprozesse.

Verfallsmodelle

Bereits in [61] wurde festgehalten, dass der Verfall des Tunnelgewölbes von einer Vielzahl an chemischen, physikalischen und mechanischen Prozessen beeinflusst wird und die Kenntnis über den zu erwartenden Verfall für ein effektives Erhaltungsmanagement von Strassentunnel unabdinglich ist. Obwohl die grundlegenden Prozesse, deren Auslöser / Ursachen und deren Einflussfaktoren bei den meisten Schadensprozessen detailliert untersucht und beschrieben wurden, fehlt bei den allermeisten Schadensprozessen die Kenntnis über deren zeitlichen Verlauf bzw. eine allgemeingültige Verfallsfunktion. Viele der studierten Literaturbeiträge, welche sich mit dem zeitlichen Verlauf des identifizierten Schadensprozesses bzw. des Verfalls beschäftigten, taten dies objektspezifisch und

basierend auf in-situ Versuchen, Laborprüfungen und zeitabhängigen, numerischen Simulationsmodellen (vgl. [45, 50, 64, 70]). In anderen Literaturbeiträgen wird zudem auf die grundsätzliche Unkenntnis hinsichtlich der für die zeitliche Entwicklung des entsprechenden Schadensprozesses massgebenden Gesetzmässigkeiten hingewiesen (z.B. AAR in [36], Ermüdung Stahlbeton in [31], Sulfatquellen bzw. Quellprozess in Anhydrit in [18]). Viele der den Schadensprozessen zugrundeliegenden Verfallsfunktionen sind demnach nach wie vor unbekannt und die Entwicklung darauf aufbauender bauteil-spezifischer Verfallsmodelle unmöglich. Aufgrund der Relevanz für das Erhaltungsmanagement wurde in den vergangenen Jahren aber im Rahmen verschiedener Projekte im Bereich der Verfallsmodelle geforscht.

In dieser Hinsicht sind die bereits unter Kap. 1.3.1 erwähnten Forschungsprojekte OPTIMAL [66] und AMBITION [17] aus Österreich zu erwähnen, in deren Rahmen basierend auf historischen Zustandsdaten und Zustandsbeurteilungen von Tunnelinspektionen Alterungs- / Degradationskurven für einzelne Bauteilarten und Regellebenszyklen für die bauliche Infrastruktur abgeleitet wurden. In Bezug auf die Alterung bzw. Degradation infolge Schadensprozesse ist insbesondere AMBITION [17] von Bedeutung. Dabei wurden basierend auf in der Literatur vorhandener, chemischen und physikalischen Verfallsfunktionen für die Karbonatisierung und die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion generische Alterungs- bzw. Verfallsmodelle hergeleitet. Hierzu wurden die Resultate der Verfallsfunktionen beurteilt und mittels der in **Abb. 4** ersichtlichen Bewertungsskala einer Zustandsnote zugeordnet. Es ist zu erwähnen, dass für die vorhandenen Verfallsfunktionen eine grosse Anzahl an Eingangsparameter benötigt wurden. Viele dieser Parameter sind zudem einer Streuung unterworfen. Um diese Streuung zu berücksichtigen, wurde daher für die Berechnung der Verfallsmodelle ein probabilistischer Ansatz gewählt. Verfallsmodelle für weitere Schadensprozesse im Stahlbeton wie z. B. Frost-Tausalzschäden oder Sulfatangriff sowie auch für sämtliche geomechanischen Schadensprozesse wurden nicht hergeleitet und stattdessen auf die Kenntnislücken hinsichtlich deren Verfallsfunktionen hingewiesen. Abschliessend wurde in AMBITION [17] festgehalten, dass die Zustandsgrösse «die Zustandsverteilung der Anlagengattung Tunnel auf Netzebene kompakt darstellen» soll. «Zustandsgrösse und Alterungsmodell sind Eingangsgrössen für Erhaltungsstrategien auf Netzebene. Sie sind (im Umkehrschluss) kein Werkzeug zur objektbezogenen Analyse und Bewertung».

Zustandsnote	Beschreibung
1	Note des neuen Tunnels, keine Verschlechterung der Schäden; entspricht der Noten 1 und 2 der RVS 13.03.31 [1]
2	Wurde als Rissweite von $w = 0,3$ mm definiert; entspricht Note 3 der RVS 13.03.31 [1]
3	Wurde als Rissweite von $w = 0,8$ mm definiert; entspricht Note 4 der RVS 13.03.31 [1]
4	Wurde als Verlust von Stahlmasse von 10 % definiert; entspricht Note 5 der RVS 13.03.31 [1]

Abb. 4 Zustandsnotenvergabe auf Basis der Ergebnisse der Verfallsfunktion gemäss [17]

Ein ähnlicher Ansatz wie AMBITION verfolgte das Forschungsprojekt MAINLINE [71], wo gemeinsam von verschiedenen Bahnbetreibern Europas Degradationsmodelle für verschiedene Bahninfrastrukturen u. a. auch Bahntunnel erarbeitet wurden. Die Herleitung der Degradationsmodelle ist ausführlich in den Deliverables 2.1 – 2.4 [40–43] dokumentiert. Im Deliverable 2.2 [41] werden die Schadensprozesse und die damit zusammenhängenden Verfallsarten erläutert. Es wird dabei zwischen der Zustandsverschlechterung aufgrund der geotechnisch bedingten Veränderung der äusseren Einwirkungen, aufgrund des Verfalls Baumaterials und aufgrund von aussergewöhnlichen Ereignissen unterschieden. Es wird festgehalten, dass die Modellierung der geotechnisch bedingten Zustandsverschlechterung insbesondere in Anbetracht der Variabilität der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse entlang

eines Tunnels sehr komplex und aufwendig ist und in der Regel den Einsatz von geeigneten numerischen Modellen voraussetzt. Im Rahmen der Forschungsarbeit werden daher nur auf einer Literaturrecherche basierende Verfallsfunktionen für den Verfall des Baumaterials präsentiert und deren Einflussfaktoren erläutert. Dies erfolgt für die Bewehrungskorrosion, den Sulfatangriff und den Frost- / Tausalzangriff. In Bezug auf die AAR wird darauf hingewiesen, dass bisher keine Verfallsfunktion in der einschlägigen Literatur existiert. Es wird zudem darauf hingewiesen, dass in der Literatur zwar einige Verfallsfunktionen für die Herleitung der verbleibenden mechanischen Eigenschaften eines durch Sulfatangriff oder Frost- / Tausalzangriff beschädigten Betontragwerk existieren, diese jedoch keine Aussage über den zeitlichen Verlauf der Schädigung zulassen. Im Deliverable 2.3 [42] wird daher ausschliesslich für die im Deliverable 2.2 präsentierte Verfallsfunktion für die Bewehrungskorrosion ein zeitabhängiges Leistungsprofil (vergleichbar mit dem Bauwerkszustand) bzw. Verfallsmodell der Tunnelinfrastruktur hergeleitet. Abschliessend wird festgehalten, dass die Modellierung des zeitabhängigen Materialverhaltens von Betontragwerken aufgrund der aktuellen Notwendigkeit von umfangreichen chemisch-physikalischen, numerischen Berechnungen und von Betonprüfungen zur Modellkalibrierung ein sehr aufwendiges Unterfangen ist.

Einen alternativen Ansatz eines Verfallsmodell liefert die Dissertation [60]. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde das Langzeitverhalten von Tunnel anhand von zeitabhängigen Gebirgs- bzw. Ausbaukennlinien modelliert. Die Dissertation baut u. a. auf dem vorgängig erwähnten Forschungsbeitrag [61] derselben Autorin auf, worin basierend auf einer detaillierten Literaturrecherche und der Analyse der Hauptinspektionsdaten die relevanten Schadensprozesse für schweizerische Strassentunnel bestimmt und die zugehörigen Degradationspotentiale und Degradationsraten abgeleitet werden. Um das Langzeitverhalten von Tunneln zu modellieren, wurde einerseits die Verfallsprozesse im Gebirge (zeitabhängige Gebirgskennlinie) und andererseits die Verfallsprozesse im Tunnelgewölbe (zeitabhängige Ausbaukennlinie) berücksichtigt und mittels Verfallsfunktionen für verschiedene Schadensprozesse berechnet. Über die zeitliche Veränderung des Schnittpunkts zwischen Gebirgs- und Ausbaukennlinie wurde der zeitliche Verlauf des Sicherheitsfaktors für die Gesamtstabilität des Tunnels abgeleitet. Es wird festgehalten, dass das angewendete Kennlinienverfahren eine starke Vereinfachung der Realität darstellt und nur unter ganz spezifischen Randbedingungen Gültigkeit hat bzw. die effektiven Spannungsverhältnisse hinreichend abbildet. Die Grundannahmen des Kennlinienverfahrens sind:

- kreisrundes Tunnelprofil;
- uniformes (hydrostatisches) Spannungsfeld;
- isotropes und homogenes Material / Gebirge;
- axial-symmetrischer Ausbauwiderstand.

Diese Randbedingungen sind in der Realität in der Regel nicht gegeben. Im Gebirgskennlinienverfahren wird zudem immer das ganze Tunneltragwerk untersucht. Die Auswirkungen von lokalen Schäden bzw. lokal auftretenden Schadensprozessen können nicht berücksichtigt werden. Zudem führen die Grundannahmen eines kreisrunden Tunnelprofils in einem axialsymmetrischen Spannungszustand zu einer Überschätzung des resultierenden Sicherheitsfaktors. Die Berechnungsergebnisse der Forschungsarbeit sind daher nicht direkt auf reale Verhältnisse übertragbar. Die im Rahmen der Forschungsarbeit angewandte Methodik mittels zeitabhängigem Gebirgskennlinienverfahren liefert aber eine gute Grundlage für ein besseres Verständnis der Haupteinflussfaktoren der Verfallsprozesse in Strassentunnel und deren Auswirkung auf die Langzeitstabilität des Tunneltragwerks. Im Rahmen der Forschungsarbeit konnte mit dem angewandten, zeitabhängigen Kennlinienverfahren festgestellt werden, dass das zeitabhängige Verhalten des Gesteins bzw. Tunnelgebirges verglichen mit dem Verfall des Tunnelgewölbes einen stärkeren Effekt auf die Veränderung der Gesamtstabilität des Tunnels hat. Die Berücksichtigung und die Beurteilung der zeitlichen Veränderung der Gebirgseigenschaften im Rahmen des Erhaltungsmanagements und abgeleitet daraus die Wahl von geeigneten rheologischen Stoffmodellen zur Abbildung des zeitabhängigen Verhaltens des Tunnelgebirges sind von zentraler Bedeutung. Abschliessend wird festgehalten, dass die in der Forschungsarbeit angewandte Methodik nicht die objektspezifischen Berechnungen und Untersuchungen des mit der Erhaltungsplanung beauftragten, verantwortlichen Personen ersetzt. Die Methodik bildet vielmehr eine

Grundlage, um im Rahmen der Erhaltungsplanung verfeinerte FEM-Modelle zu entwickeln, die das zeitabhängige Verhalten des Gebirges und des Ausbaus mitberücksichtigen. Die Dissertation gibt zudem einen guten Überblick über die in der Literatur vorhandenen zeitabhängigen Kennlinienfunktionen.

Hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf den Verfall von Verkehrsinfrastrukturen liefert [48] einen Beitrag. Der Artikel befasst sich mit den Auswirkungen der Treibhausgase und der sich verändernden klimatischen Bedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, etc.) sowie auch von extremen Wetterereignissen auf den Verfall der Baumaterialien bzw. die Beeinträchtigung der Verkehrsinfrastrukturen. Der Artikel gibt eine gute Übersicht der schädigenden Emissionen auf die heute eingesetzten Baumaterialien. Weiter wird auch die Sensitivität der heute eingesetzten Baumaterialien auf sich ändernde Umweltbedingungen beleuchtet. Es werden dose-response functions formuliert, welche die Abschätzung des Einflusses der sich ändernden Umweltbedingungen auf die Korrosionsraten bei Metallen zulassen. Es wurde festgestellt, dass Änderungen in der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit nur eine bescheidene Auswirkung auf die Metallkorrosion haben hingegen höhere Niederschlagsraten und die Erhöhung des SO₂-Ausstosses die Metallkorrosion zukünftig massgeblich beeinflussen. Über die Beeinflussung des Verfalls von Kompositmaterialien wie Beton gibt es hingegen nur sehr limitierte Informationen und es existieren keine entsprechenden dose-response functions. Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Verkehrsinfrastrukturen besser abschätzen zu können, ist weitere Forschung nötig.

Einen wichtigen theoretischen Beitrag für zu entwickelnde, zukünftige Verfallsmodelle der Verkehrsinfrastruktur liefert [30]. Dieser befasst sich mit den theoretischen Grundlagen der risikobasierten Inspektion (Risk-Based Inspection RBI). Darin wird festgehalten, dass der Verfallsprozess von Bauwerken wesentlichen Unsicherheiten unterworfen ist. Ein probabilistisches Verfallsmodell soll nicht nur diese Unsicherheiten berücksichtigen, sondern auch in einer Art und Weise formuliert sein, dass die Informationen der zukünftigen Inspektionen eine Aktualisierung des prognostizierten Verfalls zulassen. Es wird festgehalten, dass die Formulierung eines hinreichenden probabilistischen Verfallsmodell objektspezifisch zu erfolgen, damit die spezifischen Randbedingungen des untersuchten Risikoszenarios abgebildet werden können.

1.3.3 Folgerungen für das Forschungsprojekt

Nachfolgend werden basierend auf den Erkenntnissen aus dem Literaturstudium die Folgerungen für das Forschungsprojekt EP1 aufgelistet und erläutert.

Der Teilprozess «Überwachung» mit den Inspektionen, Bauwerküberprüfungen und Zustandsbewertungen ist etabliert und wird in diversen Ländern vergleichbar als relevanter Beitrag für das Erhaltungsmanagement bei Tunneln umgesetzt. Auch zukünftige «Asset Management»-Systeme für Strassentunnel werden nicht ohne Überwachung auskommen.

Fazit fürs Forschungsprojekt EP1:

Für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunneln braucht es auch zukünftig die «Überwachung», in deren Zusammenhang die möglichen Schadensursachen bzw. die ablaufenden Schadensprozesse zu bestimmen und daraus resultierende Konsequenzen resp. Gefährdungsbilder zu beurteilen sind. Somit müssen die zu erarbeitenden, strukturierten Forschungsergebnisse neue zukünftige Entwicklungen adaptieren können.

- Aktuelle Entwicklungen beim Erhaltungsmanagement / Asset Management von Tunneln benötigen entsprechende Datenbanken (CDE etc.), welche u.a. die verschiedensten Daten enthalten müssen. Das sind detaillierte Objektdaten der Tunnelanlagen, deren effektiv vorhandene Bauwerksgliederung, Zustandsdaten z.B. aus der Überwachung und auch Angaben zu ausgeführten Instandsetzungsmassnahmen. In der Schweiz ist aktuell beim ASTRA dafür aktuell KUBA [3] im Einsatz. In Österreich werden für das gemäss Forschungsprojekt OPTimal [66] angedachte Asset Management auch zahlreiche Daten bzw. entsprechende

Datenapplikationen benötigt. Wenn es jedoch um den Trend der Digitalisierung beim (auch unterirdischen) Bauen geht, ist BIM das zentrale Thema. BIM ist in der Praxis des Tunnelbaus u.a. bei der SBB bereits aktuell und wird zukünftig auch die Daten des Betriebs und die der Instandhaltung als Teil eines umfassenden Erhaltungsmanagements / Asset Managements umfassen. Auch neue, effiziente Zustandserfassungs- bzw. Dokumentationslösungen [6] bauen auf bestehende BIM/3D-Bauwerksmodelle auf.

Fazit fürs Forschungsprojekt EP1:

Sämtliche im Forschungsprojekt zusammengestellten Daten bzw. Informationen, wie zum Beispiel die Grundlagenkataloge der EP1, EP2 und EP3, müssen so aufgearbeitet und strukturiert sein, dass sie ohne relevante Datenverluste digital weiterverarbeitet und für andere Datenbanken / CDEs aufgearbeitet werden können. Dabei soll nicht nur KUBA vom ASTRA im Vordergrund stehen. In Zukunft werden Erhaltungsplanungsdaten, wie z.B. die Ergebnisse von Untersuchungs-methoden bzw. die daraus abgeleitete Bauteil-spezifische Zustandsbeurteilung, möglicherweise als Attribute in BIM-Applikationen geführt. Bis diese Entwicklung so weit ist, können die bereits bestehenden, klar strukturieren Kataloge jederzeit mit neuen Daten bzw. Erkenntnissen ergänzt werden, wie z.B. neue Schadensprozesse bei bisher im Tunnelbau noch nicht eingesetzten Werkstoffen, so dass diese Angaben dann ebenfalls in zukünftige Applikationen einfließen.

- Risikoüberlegungen spielen für das Erhaltungsmanagement bei der Optimierung der Ressourcen für Überwachungs- und Instandsetzungsprozesse eine relevante Rolle. Dabei wird, wie in der produzierenden Industrie bereits seit Jahren umgesetzt, die Anwendung von «Risk-based inspection» (RBI) ins Spiel gebracht. Aktuelle Publikationen aus Projekten u.a. aus Österreich und Deutschland (u.a. [23, 25]) zeigen Umsetzungen auf, wie Risikoabschätzungen zentral in den Asset Management-Prozess von Tunneln einbezogen werden.

Fazit fürs Forschungsprojekt EP1:

Die Identifikation der ablaufenden Schadensprozesse und die daraus folgenden bauwerksteilspezifischen Konsequenzen sind zentrale Informationen zur Überprüfung von Tunneln. Es ist mit dem zu erstellenden Grundlagenkatalogen sicherzustellen, dass sämtliche für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse und Gefährdungsbilder abgedeckt sind, um allfällige Risiken erkennen zu können;

- Es existieren zahlreiche Studien zu konkreten Schadensprozessen teilweise auch spezifisch mit Fokus auf Tunnelumgebungsbedingungen. Bei einigen der Schadensprozesse sind die grundlegenden chemischen und physikalischen Prozesse und deren Abhängigkeiten aber nach wie vor ungeklärt und Gegenstand aktueller Forschung. Es existieren demnach auch keine Verfallsfunktionen für diese Prozesse. Für andere, intensiver erforschte Schadensprozesse existieren in der Literatur zwar teilweise mehrere unterschiedliche Verfallsfunktionen, welche aber oftmals von einer Vielzahl und in der Praxis aufwendig zu bestimmenden Eingangsparametern abhängen. Zudem sagt die Verfallsfunktion nicht direkt etwas über die vorliegenden, objektspezifischen Gefährdungsszenarien aus.

Fazit fürs Forschungsprojekt EP1:

Den Verfall eines Tunnels basierend auf chemischen und physikalischen Verfallsfunktionen zu modellieren, ist nur in Ausnahmefällen, bei bestimmten Schadensprozessen und unter bestimmten Umständen möglich. Für den flächendeckenden Einsatz in einem standardisierten Erhaltungsmanagement erscheint dieser Ansatz zurzeit als ungeeignet. Die objektspezifische Risikobeurteilung kann sich zudem nicht ausschliesslich auf einer Verfallsfunktion abstützen, sondern bedarf einer ganzheitlichen Betrachtung;

- Die meisten der studierten Literaturbeiträge, welche sich mit dem zeitlichen Verlauf des identifizierten Schadensprozesses bzw. des Verfalls beschäftigten, taten dies objektspezifisch und basierend auf in-situ Versuchen, Laborprüfungen und zeitabhängigen, numerischen Simulationsmodellen (vgl. [45, 50, 64, 70]). Einige wenige Beiträge untersuchten das Langzeitverhalten von Tunnel basierend auf

historischen Zustandsnoten (vgl. [17, 66]). Es wird jedoch explizit darauf hingewiesen, dass die damit hergeleiteten Verfalls- bzw. Alterungsmodelle Eingangsgrößen für Erhaltungsstrategien auf Netzebene und keine Werkzeuge zur objektbezogenen Analyse und Bewertung sind.

Fazit fürs Forschungsprojekt EP1:

Ohne mehrjährige Überwachungsmessungen und in den meisten Fällen ergänzt mit zusätzlichen Laborprüfungen bzw. den Untersuchungsmethoden von EP2 (vgl. [54]) sowie numerischen Simulationen ist es zurzeit nicht möglich, das Langzeitverhalten von Tunnel auf Objektebene mit hinreichender Sicherheit zu prognostizieren. Die Herausforderung besteht darin, dass die Auswertung und Interpretation, der aus der Überwachung und Überprüfung gewonnenen Erkenntnisse, in einer Art und Weise erfolgt, dass sie zukünftig standardisiert und systematisch in eine objektspezifische Risikobeurteilung einfließen können;

- In mehreren Forschungsbeiträgen (vgl. [60, 61, 66]) wird auf die unzureichende Datenqualität in den zur Verfügung stehenden Tunneldatenbanken hingewiesen. Die Wichtigkeit der Lokalität des angetroffenen Schadens und der Kenntnis der Initial- und Betriebsbedingungen (Geologie, Hydrogeologie, Baumethode, Abdichtungskonzept, Verkehrszahlen, Lüftungsbetrieb, etc.) als Basis für eine effektive und folgerichtige Datenanalyse wird mehrfach hervorgehoben.

Fazit fürs Forschungsprojekt EP1:

Die klare Strukturierung der relevanten Schadensprozesse und der daraus resultierenden Gefährdungsbilder sowie deren Verknüpfung mit den davon betroffenen Bauwerksteilen sind zentral für die Standardisierung der Zustandserfassung und -beurteilung im Rahmen der Überprüfung. Sie bilden dadurch eine Grundvoraussetzung für die Homogenisierung der in der Tunneldatenbank erfassten Daten und darauf aufbauenden, verfeinerten zukünftigen Datenanalysen.

1.4 Zweck und Ziel des Einzelprojektes

1.4.1 Übergeordnetes Hauptziel des Forschungsprojekts

Übergeordnetes Hauptziel des Forschungsprojektes ist es, die Grundlagen für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunnel zu verbessern und zu systematisieren, damit stabile Erhaltungsentscheide und kosteneffiziente Erhaltungsmassnahmen gewährleistet sind.

Die Erhaltungsplaner erhoffen sich im Rahmen der integralen Erhaltungsplanung Instrumente nutzen zu können, um Erhaltungsentscheide systematischer und nach vereinheitlichten Vorgehen treffen zu können. Diese Erhaltungsentscheide beziehen sich primär auf den Verfahrensschritt «Projektgenerierung» (siehe auch **Abb. 6**). Die Systematisierung des Erhaltungsprozesses bzw. des Entscheidungsprozesses dient auch der Transparenz der Entscheide. Damit soll erreicht werden, dass sowohl die Erhaltungsentscheide als auch die dazugehörenden Kostenbudgets im weiteren Projektierungsverlauf stabil bleiben.

Das Ziel der Kosteneffizienz von Erhaltungsmassnahmen ist aufgrund des laufend zunehmenden Umfangs und Alters der Infrastruktur geboten. Sie lässt sich aber nur schwer messen und wird von vielen Faktoren beeinflusst (Erhalt des Restwertes, Erkennen der Schadensprozesse und -entwicklung, Nutzungseinschränkung während der Umsetzung von Erhaltungsmassnahmen, Wirksamkeit und Nachhaltigkeit von Massnahmen). Die Kosteneffizienz dürfte sich am ehesten übergeordnet auf Netzebene und langfristig messen lassen. Ein sinnvolles, messbares Ziel der Kosteneffizienz könnte sein, dass der angestrebte mittlere Zustand von 1.90 (siehe Kap.1.1.1) über alle Tunnelanlagen bei einem vorgegebenen Anteil des jährlichen Erhaltungsbudget vom Wiederbeschaffungswert nicht überschritten wird.

Zudem sollen die Voraussetzungen verbessert werden, die Möglichkeiten der digitalen Technologien im Rahmen des Erhaltungsmanagements in Zukunft optimal und vermehrt nutzen zu können, sei es zur Gewinnung, Verwaltung und Auswertung von Informationen

oder sei es durch den Einsatz von Sensoren und Lasertechnologien zur Ergänzung von Bauwerksinspektionen.

1.4.2 Beitrag des Einzelprojekts zum Hauptziel

Das EP1 leistet einen wesentlichen Beitrag an das übergeordnete Ziel zur Verbesserung der Systematisierung der Erhaltungsplanung. Wie eingangs in Kap. 1.1.3 erwähnt bildet die Bestimmung und Beurteilung der Schadensprozesse im Rahmen der Zustandsüberwachung die Grundlage für die nachfolgenden Erhaltungsentscheide. Die systematisch in einem Katalog zusammengestellten Informationen über die für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse enthalten Angaben zu deren Befunden, Auslöser / Ursachen und Einflussfaktoren sowie auch deren bauwerksteilspezifischen Konsequenzen. Diese strukturierten Informationen sollen der Erhaltungsplanung zur Verfügung gestellt werden und die Bestimmung des Schadensprozesses und objektspezifische Beurteilung der Relevanz der Konsequenzen des vermuteten Schadensprozess unterstützen.

Im Katalog der Schadensprozesse (S) wird der bekannte, aktuelle Stand der Praxis und der Forschung in heutigen Strassentunnel abgebildet. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekt werden keine neuen Schadensprozesse evaluiert und untersucht. Neue Schadensprozesse beziehen sich hierbei im Verständnis der Autoren auf Prozesse, welche in Schadensmedien resp. Baumaterialien ablaufen können, die gemäss heutigem Stand der Technik nicht in bergmännischen Strassentunneln verbaut werden, jedoch das Potential für einen zukünftigen Einsatz hätten.

Wichtig zu erwähnen ist, dass es sich um ein praxisorientiertes Forschungsprojekt handelt. Die zukünftigen Anwenderinnen und Anwender der zu erarbeitenden Systematik (FaS Erhaltungsplanung, Ingenieurinnen, Inspektoren, Sachverständige) werden von Anfang an in das Zentrum gerückt. Um trotz der Vielzahl an Nutzerinnen und Nutzer mit unterschiedlichen Fachkenntnissen stabile, nachvollziehbare und wiederholbare Entscheidungen zu gewährleisten, ist es notwendig, die Komplexität zu verringern. Dazu sind die in bergmännischen Strassentunnel vorkommenden Bauwerksteile und Bauarten, die möglichen, u. a. durch geeignete Untersuchungsmethoden bestätigten Schadensprozesse sowie deren Konsequenzen auf wenige, dafür in allen Strassentunnel gleich und objektiv beurteilbare Grundlagen und Attribute zu reduzieren.

Das Einzelprojekt EP1 hat, gemäss vorgegebenem Pflichtenheft, folgende Ziele:

- Schadensprozesse sollen systematisiert und in Abhängigkeit ihrer Auslöser und Ursache sowie Einflussfaktoren katalogisiert werden, um einen Beitrag zum übergeordneten Hauptforschungsziel gemäss Kap. 1.4.1 zu leisten
- Der Schadensprozess soll vollständig sein und alle wesentlichen Materialien, Bauwerksteile und Bauwerksteiltypen eines bergmännischen Tunnels abdecken. Das heisst, dass alle bekannten Schadensprozesse in bergmännischen Strassentunnel abgedeckt sein sollen. Das heisst aber auch, dass der gesamte Ablauf von Schadensprozessen dargestellt und deren direkte Konsequenzen (kurzfristig und langfristig) aufgezeigt werden. Die Konsequenzen sollen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit, Restnutzungsdauer und Sicherheit bewertet werden können.
- Der Schadensprozesskatalog soll für jeden beschriebenen Schadensprozess die relevanten Informationen umfassen. Zu den relevanten Informationen gehören zum Beispiel:
 - korrekte bzw. anerkannte Bezeichnung;
 - Beschreibung der Schadensprozesses;
 - Auslöser / Ursachen;
 - Schadensfaktoren (dazu gehört bspw. auch der umliegende Boden) und weitere Einflussfaktoren.
- für Schadensprozesse sollen Befunde angegeben werden;
- Tunneltyp;
- Bauelement / Bauwerksteiltyp;

- Hinweise auf typische Auswirkungen / Folgen der Schäden (pro Bauelement) Beurteilung und Hinweise auf Ablauf und Langzeitentwicklung des Schadens;
- Fallbeispiele;
- Literatur;
- weitere Informationen gemäss Vorschlag Auftragnehmer;
- Der Schadenskatalog soll eine Grundlage für die Einzelprojekte EP2 «Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden», EP3 «Erhaltungsmassnahmen» und EP4 «Entscheidungsmodell» darstellen und in einer Form vorliegen, dass er später bei Bedarf einfach in bestehende (KUBA 5.0) oder neue Datenmodelle und -banken implementiert und weiterentwickelt bzw. -verwendet werden könnte (EP6).

Durch die Beschreibung der bauwerksteilspezifischen Gefährdungsbilder je Schadensprozess und das Aufzeigen und die Vernetzung der relevanten Einflussfaktoren je Gefährdungsbild leistet EP1 zudem einen wesentlichen Beitrag zur Risikobeurteilung der objektspezifischen Gefährdungsszenarien im «Entscheidungsmodell» durch EP4 (Hauptschnittstelle EP1 zu EP4 gemäss **Abb. 11** in Kap. 1.7).

1.5 Erwartete Resultate und Nutzniessung

Als Resultat der vorliegenden Forschungsarbeit EP1 liegen systematische Kataloge von Schadensprozessen und Gefährdungsbildern vor, welche einen guten Überblick über die für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse und deren Konsequenzen schafft. Durch die Verknüpfung des Schadensprozesskatalogs mit den Bauwerksteilen und Bauarten eines bergmännischen Strassentunnels und den visuell erkennbaren Befunden dienen sie u. a. als strukturiertes Nachschlagewerk für die mit der Erhaltungsplanung von bergmännischen Tunneln beschäftigten Personen. Die bestehende Bauwerksstrukturierung in KUBA 5.0 (siehe Kap. 2.1) wurde dahingehend angepasst, dass sie den Belangen des Forschungsprojekts resp. den einzelnen EPs hinsichtlich Detaillierung und Praktikabilität sowie möglichst auch zukünftigen Entwicklungen im Bereich BIM gerecht wird. Zudem wurde sie hinsichtlich der für bergmännische Strassentunnel relevanten Bauwerksteile und Bauarten überarbeitet. Die Gliederungsstrukturen dieser einfach anzuwendenden Kataloge erlauben die problemlose Erweiterung von weiteren zukünftigen Bauwerksteilen, Bauarten, Schadensprozessen und Gefährdungsbildern. Die Kataloge von EP1 bilden somit die Grundlage zur Bestimmung und Beurteilung der in bergmännischen Strassentunneln angetroffenen Schadensprozesse. Damit sind sie auch eine gleichzeitig auch eine Grundlage für die nachfolgenden Erhaltungsentscheide im Rahmen der Überwachung und der Erhaltungsplanung. Die erarbeitete Bauwerksgliederung gewährleistet eine gemeinsame Bezugsgrösse für alle EPs und gewährleistet die Implementierung der Forschungsergebnisse in bestehende und zukünftige Datenmodelle und -banken.

Nutzniesser des übergeordneten, gesamten Forschungsprojekts ist zur Hauptsache das operative Erhaltungsmanagement der Tunnelanlagen, namentlich die FaS Erhaltungsplanung (EP) der einzelnen ASTRA-Filialen sowie ihre Inspektionsteams und beauftragten privaten Ingenieurbüros. Das Forschungsprojekt enthält für diese Inspektionsteams eine Übersicht über die bekannten und für bergmännische Strassentunnel relevante Schadensprozesse, deren Auslöser / Ursachen und Einflussfaktoren sowie deren möglichen Konsequenzen welche zuvor in dieser strukturierten als Kataloge nicht zur Verfügung standen.

Neben den Erhaltungsplanern in den Filialen dient das Forschungsprojekt auch der im Jahr 2018 neu geschaffenen «Erhaltungsplanung Zentrale» in Ittigen, welche die organisatorische Drehscheibe der Erhaltungsplanung im ASTRA übernehmen soll. Das Forschungsprojekt kann damit auch Grundlagen für die netz- und systemübergreifende Zustandsbewertung und das strategische Erhaltungsmanagement liefern.

Die indirekten Nutzniesser werden die Nutzer der Tunnel-Infrastrukturen und damit die Verkehrsteilnehmer sein, welche dank effizienter Massnahmen mit weniger Behinderungen und geringeren Kosten rechnen dürfen.

1.6 Definition Erhaltungsprozess und Abgrenzung

1.6.1 Erhaltungsprozess und Projektgenerierung

Erhaltungsprozess und Projektgenerierung übergeordnet

Die Prozesse des Erhaltungsmanagements des ASTRA sind in den Richtlinien 11002 «Planung und Durchführung des Unterhalts» [1] und 12002 «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen» [2] geregelt. Bergmännische Tunnel sind dem Teilsystem Kunstbauten angegliedert. Das Erhaltungsmanagement stützt sich u.a. auf die SIA Normen 469 «Erhaltung von Bauwerken» [15] oder die «Grundnorm Erhaltungsmanagement» SN 640 900 [12]. **Abb. 5** zeigt den Prozess des Erhaltungsmanagements aus dieser Grundnorm.

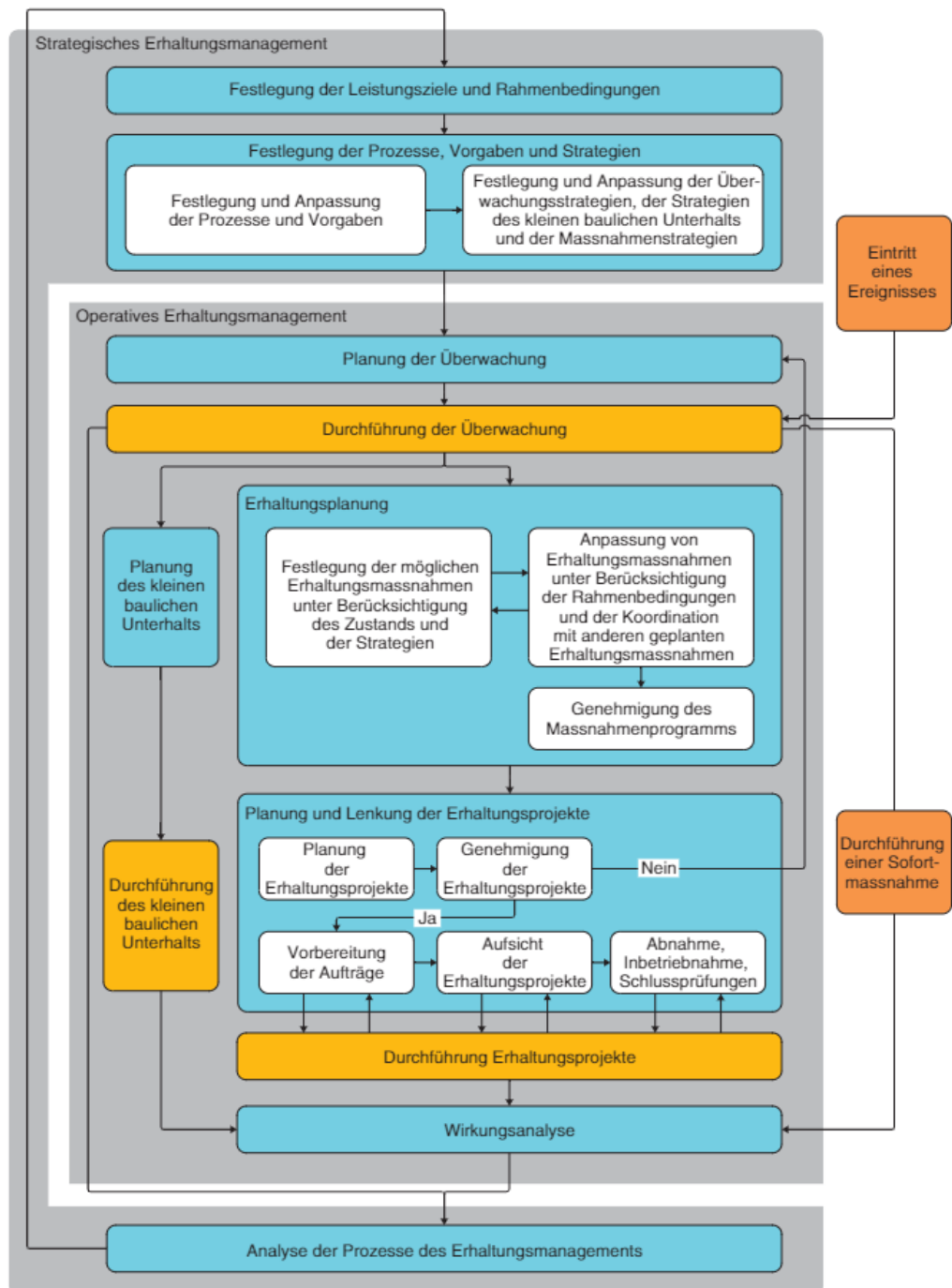


Abb. 5 Prozesse des Erhaltungsmanagements gemäss SN 640 900 [12]

Im Rahmen des übergeordneten Forschungsprojektes wird der nachfolgende Erhaltungsprozess gemäss **Abb. 6** zugrunde gelegt, welcher auf einen Vorschlag des Einzelprojekt EP4 basiert und auf ASTRA Kunstbauten ausgelegt ist.

Ausgehend von einem Ereignis oder Befund auf Ebene des operativen Erhaltungsmanagements sind zu verschiedenen Zeitpunkten Aufgaben wie Überwachung und Überprüfung der Tunnelanlagen und die Beurteilung des Zustandes mit Bezug auf verschiedene Leistungsindikatoren aufgeführt. Je nach Abweichung der Leistungsindikatoren zu einem Soll-Zustand sind Handlungsoptionen zu prüfen, welche allenfalls zu einem Entscheid für die Generierung eines Erhaltungsprojektes führen können. Mit dem Entscheid geht die Tunnelanlage als Projektauftrag in die Verantwortung des Projektmanagements über.

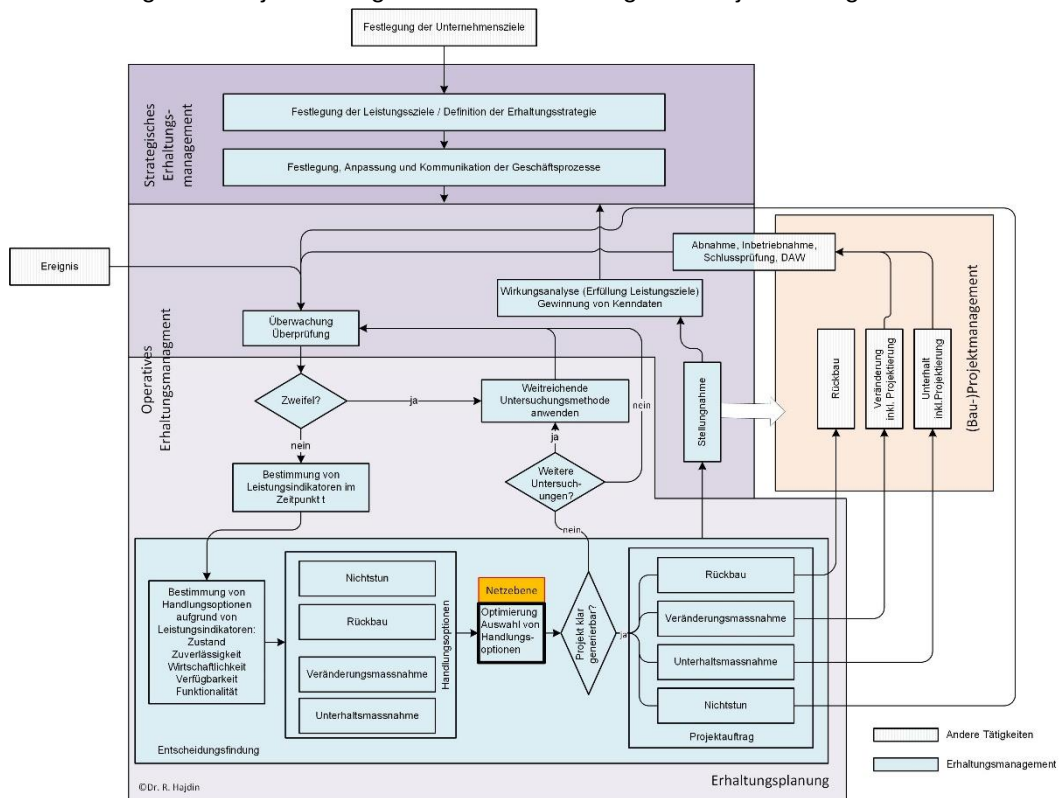


Abb. 6 Aufgaben im Erhaltungsprozess gemäss Vorschlag Einzelprojekt EP4

Eine zentrale Aufgabe im systematischen Erhaltungsmanagement bildet die Vorbereitung der Entscheidungsfindung zur Projektgenerierung. Teil der Projektgenerierung ist auch der Vorschlag der gewählten Handlungsoption. Im Rahmen des übergeordneten Forschungsprojektes wird der Entscheidungsfindungsprozess gemäss **Abb. 7** zugrunde gelegt, welcher auf einem Vorschlag des EP4 [34] basiert.

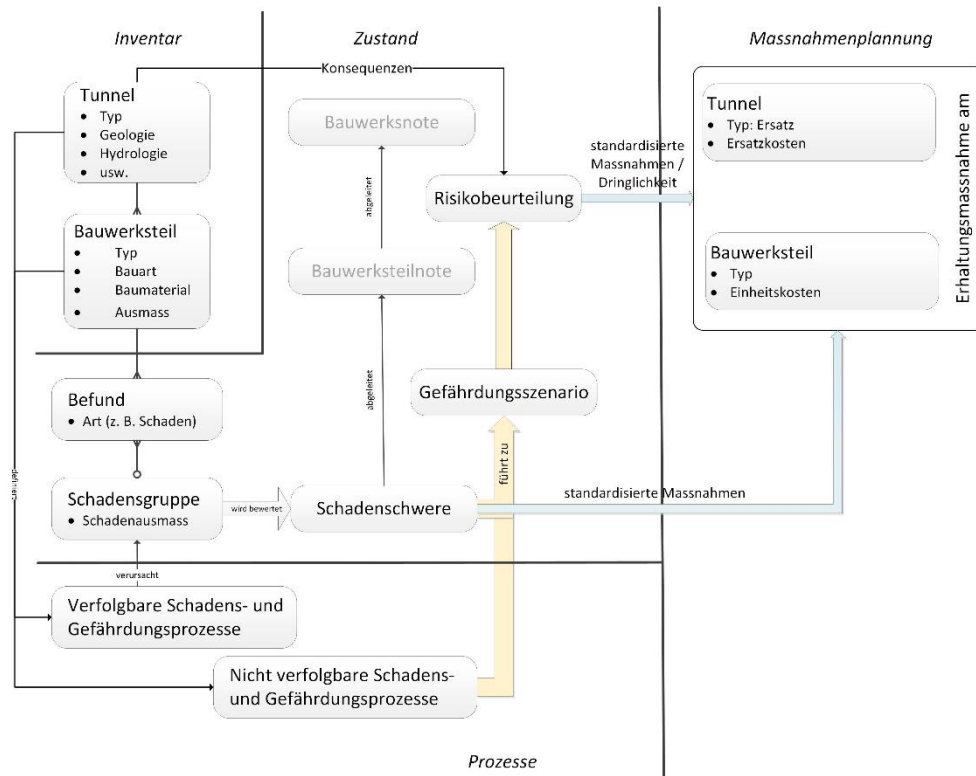


Abb. 7 Entscheidungsfindungsprozess in der Erhaltungsplanung von bergmännischen Strassentunnel (Quelle: Einzelprojekt EP4)

Definitionen und verwendete Terminologie Teilprozess Überwachung EP1

Das Einzelprojekt EP1 «Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunnel» ist im Prozess des Erhaltungsmanagements gemäss der Grundnorm SN 640 900 [12] im Teilprozess «Überwachung» angesiedelt. In der Abbildung 2 dieser Norm [12] wird beim operativen Erhaltungsmanagement von der «Planung der Überwachung» und «Durchführung der Überwachung» gesprochen.

Gemäss ASTRA-Richtlinie 12002 «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen» [2] ist unter «2. Geltungsbereich» festgehalten, dass in dieser Richtlinie die bergmännischen Tunnel den Kunstbauten angegliedert sind.

In der Richtlinie in Kap. 3.3 werden als erste zwei Phasen der Bauwerkserhaltung folgende Überwachungstätigkeiten festgehalten:

- Überwachung (Beobachtung – Inspektionen – Kontrollmessungen);
- Überprüfungen (generelle Überprüfung – detaillierte Überprüfung).

Beides wird übergeordnet, gemäss der Grundnorm SN 640 900 unter «Überprüfung» zusammengefasst. Unter Kap. «4.3 Inspektion» ist u. a. festgehalten, dass eine der wichtigsten Zielsetzungen der Inspektion ist, die entstandenen Schäden und die möglichen Schadensursachen, sowie die gefährdeten Bauwerksteile frühzeitig zu erkennen. Weiter ist unter Kap. «5.3 Generelle Überprüfung» festgehalten, dass das Resultat der Zustandserfassung ermöglichen muss «Ursachen, Schadensprozesse und zugehörige Versagensmechanismen zu erkennen, um bezüglich Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Schadensentwicklung generelle Aussagen machen zu können.» Im gleichen Kapitel heisst es in Bezug auf die Zustandsbeurteilung, dass diese «die wesentlichen Fragen bezüglich der Sicherheit (Trag-, Verkehrs- und Betriebssicherheit), der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit (Prognose der Zustandsentwicklung) generell beantworten» soll.

Im Anhang II dieser Richtlinie ist der ganze Ablauf mit den beiden Phasen «Überwachung» und «Überprüfung» abgebildet. Die beiden Phasen sind, als Auszug dieses Anhangs, in der nachfolgenden **Abb. 8** grafisch dargestellt.

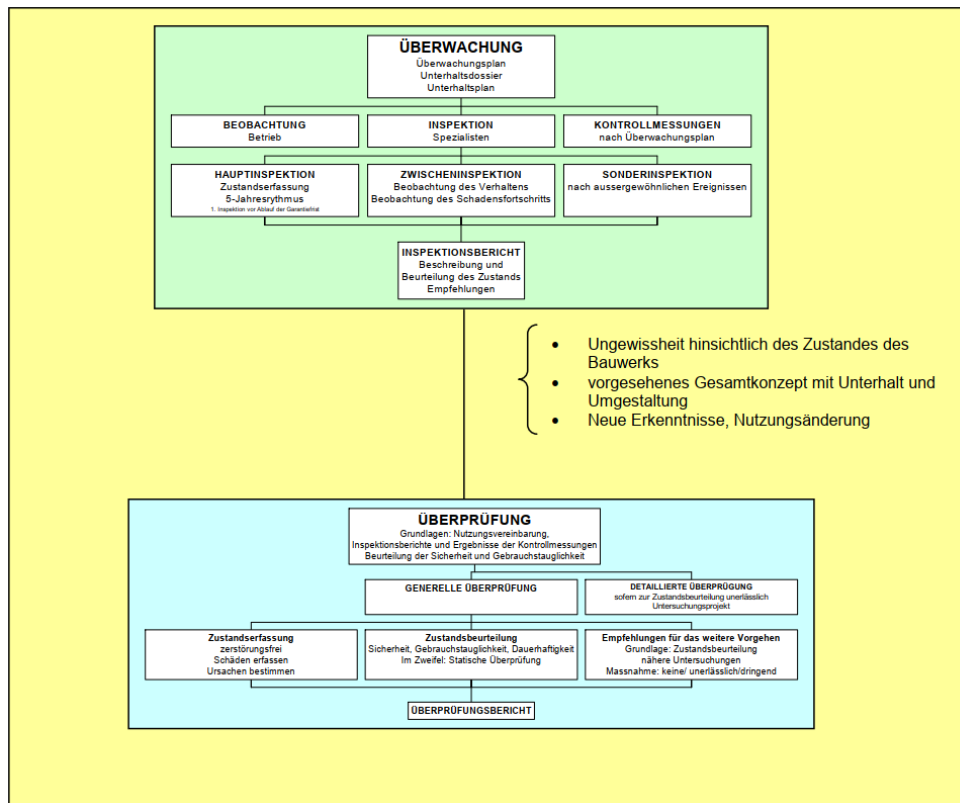


Abb. 8 Auszug Flussdiagramm Anhang A4.2 aus der Richtlinie ASTRA 12002 «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten» [2]

Wie in der oben genannten Richtlinie und der Originalabbildung (gemäss Anhang 4.2) festgehalten, findet die Überwachung und Überprüfung vorgelagert zur Massnahmenplanung statt, welche im Rahmen des Gesamtprojektes [32] in den EP3 bis EP5 behandelt werden. Das ist in Übereinstimmung mit dem vorgängig aufgezeigten Erhaltungsprozess gemäss **Abb. 5**.

Das Erkennen der möglichen Schadensursachen und der gefährdeten Bauwerksteile im Rahmen der Inspektion wird durch den Katalog von EP1 in Form eines strukturierten Nachschlagewerks unterstützt. Mit der Strukturierung, der Systematisierung und der Verknüpfung der für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse mit den Katalogen von EP2 und EP3 sowie dem Katalog der Gefährdungsbilder mit den zugehörigen Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren wird durch EP1 eine der Grundlagen geschaffen für die nachfolgende Massnahmenplanung, welche durch EP3 bis EP5 behandelt wird. Der Schwerpunkt von EP1 liegt demnach auf der Zustandserfassung und -beurteilung im Rahmen des Teilprozesses der generellen Überprüfung gemäss **Abb. 8**. Der von EP1 geleistete Beitrag zum Hauptziel der Forschungsarbeit lässt sich demnach eindeutig im Erhaltungsprozess einordnen und abbilden (siehe **Abb. 9** und **Abb. 10**).

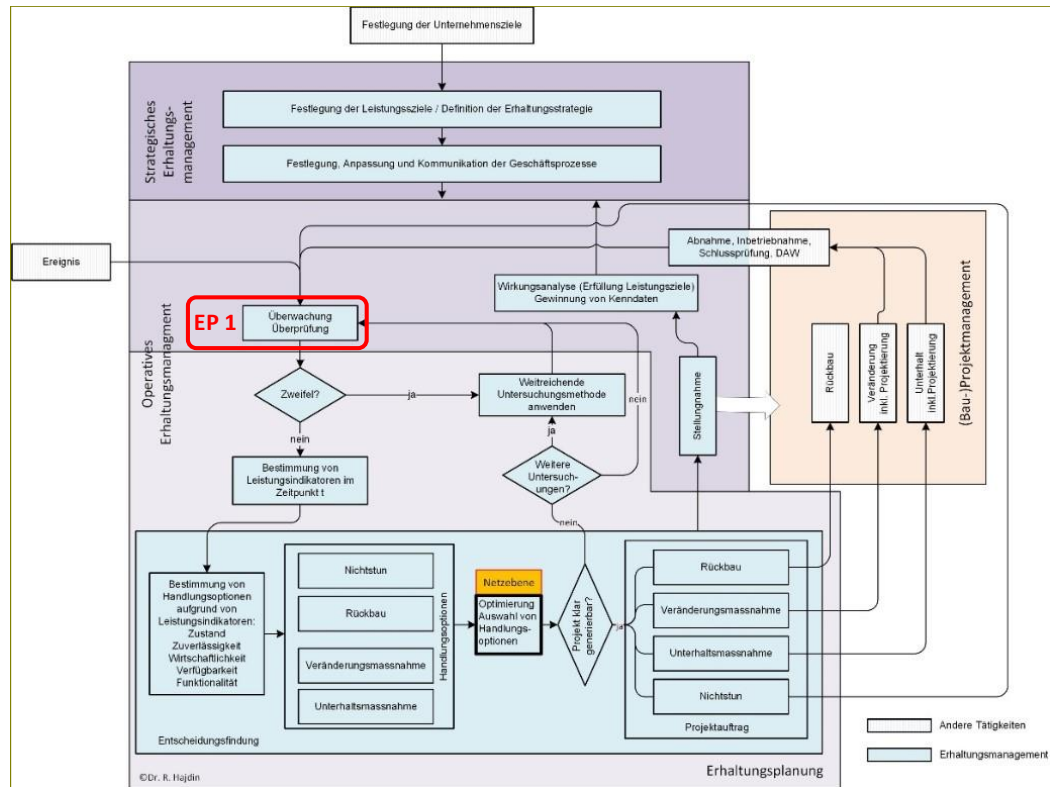


Abb. 9 Einbettung Beitrag EP1 zum Forschungsprojekt im Teilprozess «Überwachung und Überprüfung» im vorgesehenen Erhaltungsprozess gemäss EP4

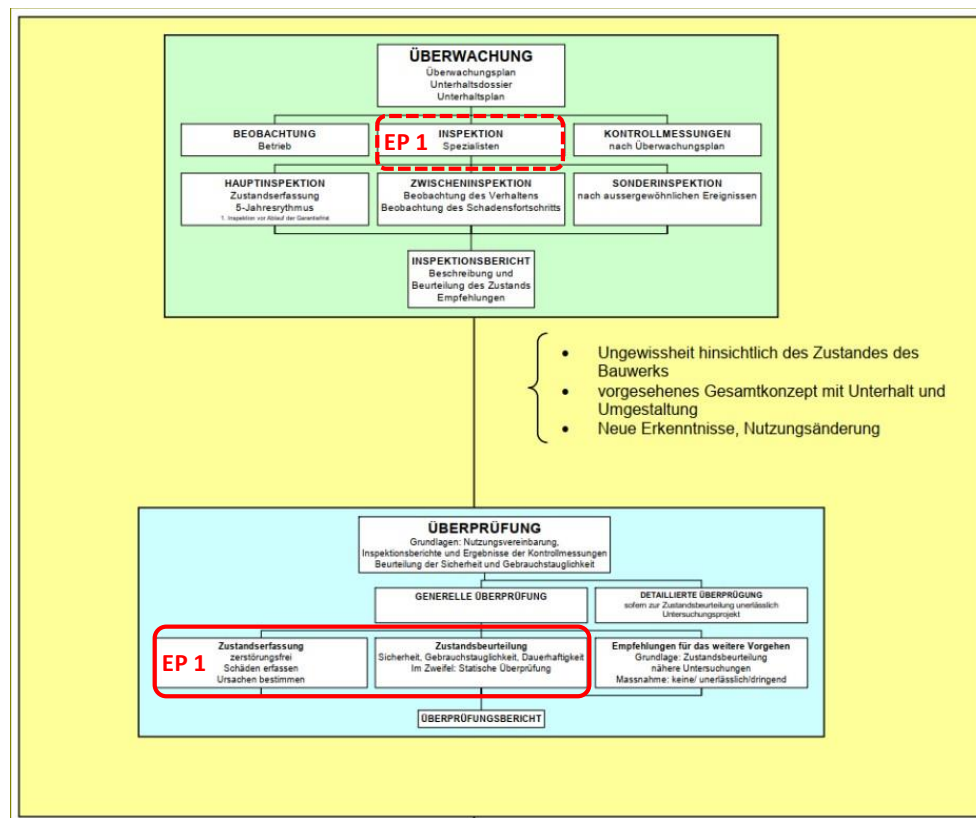


Abb. 10 Einbettung Beitrag EP1 zum Forschungsprojekt im Auszug Flussdiagramm Anhang A4.2 aus der Richtlinie ASTRA 12002 «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten» [2]

1.6.2 Abgrenzung Forschungsprojekt

Abgrenzung übergeordnet

Im Erhaltungsmanagement unterscheidet das ASTRA die vier Fachbereiche Trasse, Kunstbauten, Tunnel sowie Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen, wobei der Fachbereich Tunnel sämtliche Elemente der bergmännisch erstellten Tunnelstrukturen umfasst [1].

Dieses Forschungsprojekt berücksichtigt somit ausschliesslich die bergmännisch erstellten baulichen Tunnelstrukturen bestehend aus dem Aussen- und Innengewölbe, der Fahrbahn inkl. Fahrbahnkonstruktion oder Werkleitungskanal, der Zwischendecke und dem Entwässerungssystem sowie alle bergmännisch erstellten, funktional zur Tunnelstruktur gehörenden Nebenbauwerke wie Sicherheitsstollen (SISTO), Querverbindungen, SOS/Hydrantennischen, Aufweitungen und Überfirstungen sowie Energieversorgungsstationen, Technik- und Lüftungszentralen inkl. Lüftungsschächte.

Nicht Gegenstand des Forschungsprojektes sind die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) eines Tunnels, welche Bestandteil eines separaten Fachbereichs sind.

Der Fokus des Forschungsprojektes gilt dem operativem Erhaltungsmanagement auf Stufe des einzelnen Tunnelobjekts (d.h. Objektebene) und nicht der strategischen Netzebene. Unter Netzebene wird gemäss Begriffsdefinition SN 640 900 [12] die Gesamtheit der Strassenabschnitte des Nationalstrassennetzes verstanden. Letzteres schliesst aber nicht aus, dass die Forschungsergebnisse auch von Nutzen für das strategische Erhaltungsmanagement auf Netzebene sein kann.

Im Forschungsprojekt sollen nur Erhaltungsaspekte systematisiert werden, welche auf externe Angriffsfaktoren, Verfallsprozesse und alters- und abnutzungsbedingte Materialentwicklungen zurückgeführt werden können. Erhaltungsbedarf als Folge von Nutzungsänderungen (z.B. Mehrverkehr), geänderter Anforderungen (z.B. Normkonformität) oder BSA-induzierter baulicher Anpassungen sind nicht Gegenstand dieses Forschungsprojektes.

In Bezug auf die Projektplanung bzw. Projektstufe steht der objektspezifische Erhaltungsentscheid zur Projektgenerierung durch die Erhaltungsplanung im Vordergrund des Forschungsprojektes. Die Umsetzung des Erhaltungsentscheids in der Verantwortung des Projektmanagements (PM) ist hingegen nicht Gegenstand des Forschungsprojektes, obwohl die Ergebnisse auch hierzu einen Nutzen bieten können.

Ergänzende Abgrenzungen beim Forschungsprojekt EP1

Entsprechend der übergeordneten Abgrenzungen werden nur Schadensprozesse katalogisiert, die auf Bauwerksteile und Bauarten von bergmännischen Strassentunneln einwirken. Schadensprozesse, die auf BSA-Komponenten einwirken (exkl. Befestigungen), sind nicht Gegenstand des EP1 und werden nicht im Katalog aufgeführt.

Es werden ausschliesslich Schadensprozesse katalogisiert. Ein Schadensprozess bezeichnet hierbei einen Prozess, welcher zu einer fortschreitenden Zustandsverschlechterung des betroffenen Bauwerkteils und in Abhängigkeit von dessen Funktion ohne Gegenmassnahmen zu einer Beeinträchtigung der Tragsicherheit und/oder Betriebssicherheit führt. Es werden hingegen keine Mängel katalogisiert. Ein Mangel kann durch unsachgemässe, fehlerhafte Herstellung oder durch äussere Einwirkungen entstehen (z.B. Anprall). Ein Mangel zeichnet sich dadurch aus, dass sein Zustand konstant bleibt und somit keinem Schadensprozess unterworfen ist. Ebenso sind aussergewöhnliche, punktuelle Ereignisse und damit zusammenhängende Kaskadenschäden (z.B. Tragwerksversagen Zwischendecke infolge Tunnelbrand) nicht Gegenstand des EP1.

Das Einzelprojekt EP1 leistet mit den Beziehungsstrukturen der Einflussgrössen von Gefährdungsbildern einen Beitrag zur Risikobeurteilung durch EP4. Die Risikobeurteilung

selbst und die Formulierung objektspezifischen Gefährdungsszenarien sind jedoch nicht Gegenstand des Einzelprojekts EP1.

Die Anwendung der Ergebnisse der Einzelprojekte in BIM ist nicht die primäre Zielsetzung. Durch die systematische Aufarbeitung der Forschungsinhalte in Katalogen mit spezifischen Attributen ist jedoch die Möglichkeit der Überführung der Erkenntnisse und Ergebnisse des EP1 in ein BIM-Projekt bzw. -Umfeld zu einem späteren Zeitpunkt gegeben.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden, gemäss Projektauftrag, keine neuen Schadensprozesse evaluiert und untersucht. Neue Schadensprozesse beziehen sich hierbei im Verständnis der Autoren auf Prozesse, welche in Schadensmedien resp. Baumaterialien ablaufen können, die gemäss heutigem Stand der Technik nicht in bergmännischen Strassentunneln verbaut werden, jedoch das Potential für einen zukünftigen Einsatz hätten.

1.7 Methodik der Forschungsarbeit

Generelles Vorgehen Gesamtprojekt:

Auf Basis des Erhaltungsprozesses von bergmännischen Tunnel (vgl. Kap. 1.6.1) wurden im Rahmen des Initialprojektes [67] Teilprozesse identifiziert, für welche spezifische Grundlagen zu erarbeiten sind. Auf dieser Basis wurde im Initialprojekt eine Untergliederung des Forschungsvorhabens in folgende 6 Einzelprojekte (EP) vorgeschlagen:

Tab. 1 Projektaufbau	
Einzelprojekt EP1:	Zustand (Beschreibung der Schadensprozesse und des Langzeitverhaltens bei Tunnel);
Einzelprojekt EP2:	Diagnostik (Überwachungs- und Inspektionsmethoden);
Einzelprojekt EP3:	Massnahmen (Festlegung der Erhaltungsmassnahmen);
Einzelprojekt EP4:	Entscheidungen (Entwicklung eines Entscheidungsmodells);
Einzelprojekt EP5:	Kosten (Kostenmodell für die Erhaltung von bergmännischen Tunnel und Auswirkungen).
Einzelprojekt EP6:	Umsetzung (Praktische Umsetzung, Aufbau einer Tunnel-datenbank-Skizze durch ein Prototyp).

Ausgehend vom Erhaltungsprozess bestehen mehr oder weniger bedeutende Schnittstellen zwischen den Einzelprojekten, welche in **Abb. 11** dargestellt sind. In der Abbildung wird zwischen Haupt- und Nebenschnittstellen unterschieden. In der Leseart bedeuten Hauptschnittstellen in Pfeilrichtung, dass die Angaben des Vorgänger-Einzelprojektes ein notwendiger (aber nicht hinreichender) Input für das Folge-Einzelprojekt sind. Nebenschnittstellen zeigen mögliche weitere Inputdaten, die aber nicht zwingend für das Folge-Einzelprojekt sind.

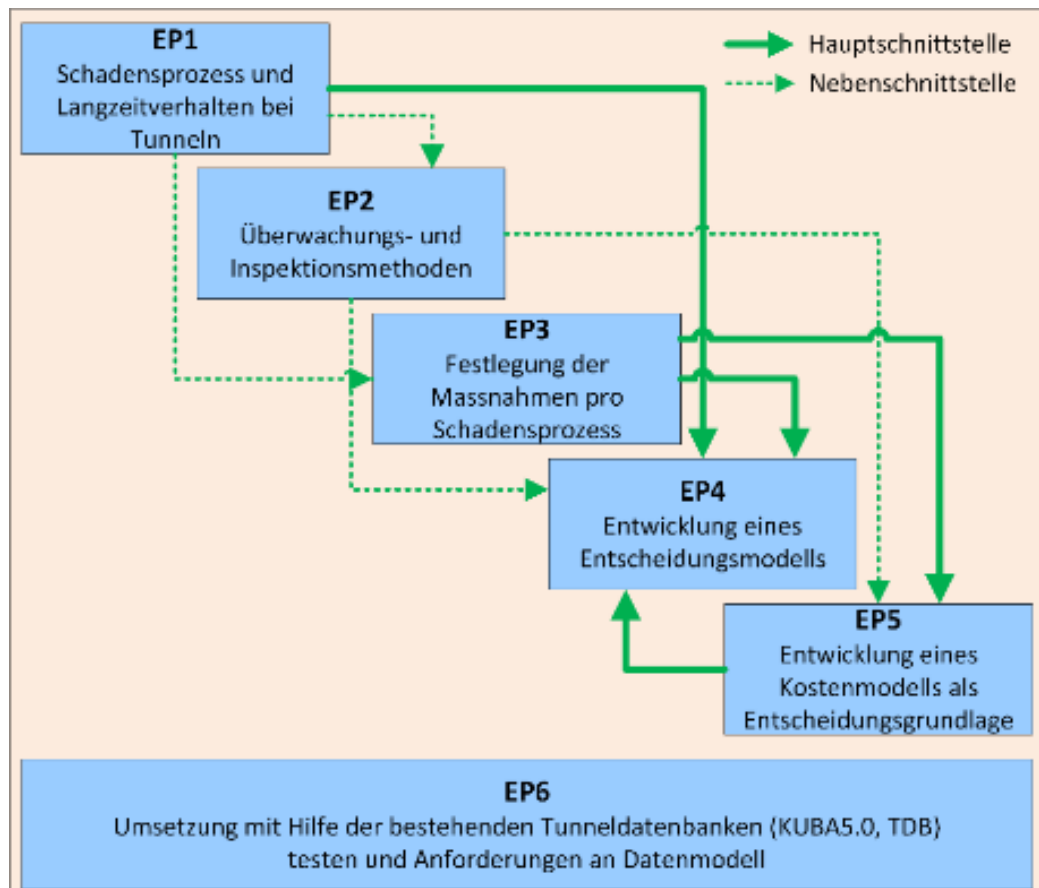


Abb. 11 Hauptschnittstellen Einzelprojekte und Datenlieferung (u.a. aus Pflichtenheft [37])

Zu Beginn des Forschungsprojektes wurde auf Anraten der Begleitkommission entschieden, dass das Einzelprojekt EP6 nicht gleichzeitig erarbeitet werden soll bzw. vorerst zurückgestellt werden soll. Die erfolgreiche Umsetzung eines Datenmodells bedingt eine klare Beschreibung der Rahmenbedingungen und Anforderungen. Diese sind aber zuerst durch die 5 Einzelprojekte EP1-5 zu entwickeln und abzustimmen, bevor ein dazu notwendiges Pflichtenheft erstellt werden kann.

Generelles Vorgehen Methodik EP1 – 3:

Die Methodik der Forschungsarbeit wurde in enger Abstimmung mit den weiteren EPs definiert und auf die künftige praktische Umsetzung ausgerichtet. Sie orientiert sich an den Grundsätzen des wissenschaftlichen Arbeitens. Die Bearbeitung erfolgte analytisch, die Ergebnisse sind wiederholbar und werden im Rahmen des vorliegenden Schlussberichts objektiv nachvollziehbar erläutert. Die verwendeten Quellen werden spezifisch in jedem Einzelprojekt offengelegt (siehe u.a. Kap. 1.3) und nach Möglichkeit werden mehrere berücksichtigt, um eine kritische Auseinandersetzung mit den jeweiligen Erkenntnissen zu gewährleisten. Es wird klar ausgewiesen, wenn es sich bei den verwendeten Grundlagen um Praxiserfahrungen der Projektverfasser handelt, welche nicht mit wissenschaftlichen Arbeiten und entsprechenden Quellenangaben belegbar sind. Das gewählte Vorgehen entspricht zudem den Vorgaben des Initialprojekts (vgl. [67]). Die Vorarbeit in Form der Formulierung der Forschungsfragen, der Gliederung der wissenschaftlichen Arbeit und die Literaturrecherche wurden im Rahmen des Initialprojekts bereits weitestgehend abgeschlossen. Sie wird im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts stellenweise mit themenspezifischen Punkten und neuen Erkenntnissen ergänzt.

Die zu erarbeitenden Kataloge wurden so erstellt, dass sie später einfach in eine Datenbank überführt werden können. Die Datenstruktur wurde so gewählt, dass zukünftige Entwicklungen einfach integriert und antizipiert werden können. Des Weiteren ist die Durchgängigkeit der Datenstruktur innerhalb der einzelnen EPs gewährleistet.

Dies erfolgt über eine einheitliche Gliederung der Bauwerksteile und Bauarten für bergmännische Strassentunnel durch das EP1 (vgl. Kap. 2.1), welche allen EPs als Bezugsgrösse dient, die unterschiedlichen Detaillierungsgrade der einzelnen EPs berücksichtigt und somit die spätere Vernetzung der Informationen der einzelnen Kataloge in der Datenbank einfach zulässt. Die erarbeitete Gliederung baut auf der bestehenden Struktur von KUBA 5.0 [3] auf, wobei diese wo nötig ergänzt wurde, sodass die bestehende Wissensdatenbank weiterhin genutzt und gleichzeitig baulichen Strukturen von bergmännischen Strassentunnel zukünftig vollständig abgebildet werden können. Aktuelle Entwicklungen, wie z.B. im Bereich BIM, wurden insofern mitberücksichtigt, dass mit der vorgeschlagenen Gliederung eine Überführung der aufgearbeiteten Informationen in zukünftige Bauwerksdatenbanken (z.B. Digitaler Zwilling) einfach möglich sein wird. Die Datenanforderungen an die zu erarbeitenden Kataloge wurden zu Beginn des Forschungsprojekts an mehreren Workshops mit dem Datenmanager EP4 festgelegt und unter Berücksichtigung der Inputs und Erfordernisse der restlichen EPs umgesetzt. Die Katalogisierung der Informationen und Daten erfolgt mittels Excel. Dieses ermöglicht ein offenes und weiterverwendbares Dateiformat und kann bei Bedarf durch Plugins und grafische Programmiersoftware ergänzt werden.

Spezifisches Vorgehen / Methodik beim EP1:

Der Schadensprozess- und Gefährdungsbildkatalog von EP1 wurde komplett neu erarbeitet und aufgebaut. Der bestehende Katalog der Schadensprozesse in KUBA 5.0 wurde hierbei nicht mitberücksichtigt, da er nach Ansicht der Autoren für bergmännische Tunnels nicht zweckmässig strukturiert und detailliert ist und somit für das vorliegende Forschungsprojekt als ungeeignet erscheint.

Im Rahmen des Projekts wurden sämtliche für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse einheitlich strukturiert. Aus auf dem Schadensprozesskatalog wurde für die bauwerksteilspezifischen Konsequenzen eines Schadensprozesses anschliessend der Gefährdungsbildkatalog abgeleitet. Für die Zusammenstellung und die Überprüfung der Kataloge von EP1 dienten die Praxiserfahrung von aktuellen Fallbeispielen (vgl. Kap. 1.2.3) und diverse Literaturangaben (vgl. Kap. 1.2.2). Die Kataloge von EP1 wurde in enger Abstimmung mit EP2 und EP3 erarbeitet.

Im Rahmen des Projekts wurde zur Eingrenzung der möglichen Schadensprozesse basierend auf den während der Inspektion dokumentierten Befunden (vgl. Kap. 2.3.3) eine Auswahlliste der visuell diagnostizierbaren Befunde erstellt. Diese basiert auf dem bestehenden KUBA-Katalog der Befunde, welcher wo nötig erweitert und ergänzt wurde. Für bergmännische Strassentunnel irrelevante Befunde wurden dabei ausgeblendet. Die Auswahlliste der visuell diagnostizierbaren Befunde wurde in enger Abstimmung mit EP2 erarbeitet.

Die EP-spezifischen Ergebnisse von EP1 sind ein Schadensprozesskatalog (S.-Katalog) und ein Gefährdungsbildkatalog (GB.-Katalog). Die Kataloge lassen die Verknüpfung mit dem Bauwerksteil, der Bauart und den visuellen Befunden sowie den Katalogen von EP2 und EP3 zu. Da es sich bei den Gefährdungsbildern um die möglichen bauwerkssteilspezifischen Konsequenzen eines Schadensprozesses handelt, sind die beiden erarbeiteten Kataloge auch untereinander verknüpft. Im Rahmen des Projekts wurden durch EP1 den Schadensprozessen keine detektierbaren Befunde direkt zugeordnet. Diese Zuordnung erfolgt jedoch indirekt über die Verknüpfung des Schadensprozesskatalogs von EP1 mit dem Katalog der Untersuchungsmethoden und den zugehörigen Ergebnissen von EP2 (siehe **Abb. 13**, Kap. 2.1.4). Des Weiteren wird mit den Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren für jedes Gefährdungsbild die Grundlage für die Formulierung der objektspezifischen Gefährdungsszenarien und die Risikobeurteilung durch EP4 geschaffen.

Da es sich um ein praxisorientiertes Forschungsprojekt handelt, werden den zukünftigen Anwenderinnen und Anwendern zusätzlich – als Auszüge der Datenbank-mässigen S. / GB.-Katalogs – einfach lesbare, illustrierte Katalogblätter der für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse und deren Konsequenzen resp. Gefährdungsbilder zur Verfügung gestellt. Die Katalogblätter (siehe III Katalogblätter Schadensprozesse

(S) und V Katalogblätter Gefährdungsbilder (GB)) stellen für die Anwender; u.a. FaS Erhaltungsplanung, Ingenieurinnen, Inspektoren, Sachverständige; alle relevanten Informationen zu den relevanten Schadensprozessen und deren Konsequenzen zusammen. Dies immer mit Bezug auf die im EP1 erarbeitete Systematik der Informationen des S. / GB.-Katalogs.

1.8 Ablauf und Organisation des Forschungsprojekts

1.8.1 Organisation und Beauftragter

Organisation Forschungsprojekt

Basierend auf den Empfehlungen des Initialprojektes [67] beauftragte das ASTRA für die Gesamtprojektleitung die Firma ILF Beratende Ingenieure AG. Die Gesamtprojektleitung (GPL) war für die organisatorisch Koordination des gesamten Forschungspaketes und der übergreifenden fachlichen Einbettung der erarbeiteten Ergebnisse in den Einzelprojekten zuständig. Zudem erstellt die Gesamtprojektleitung einen Synthesebericht «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel» [32], in welchem die Untersuchungen und Ergebnisse aller fünf Forschungsvorhaben EP1 bis EP5 zusammenfassend dargestellt werden.

Die fünf Einzelprojekte wurden separat ausgeschrieben, wobei die Einzelprojekte EP1 bis EP3 durch ein und dieselbe Forschungsstelle in Form einer Ingenieurgemeinschaft aus zwei Ingenieurbüros umgesetzt wurden. Die beiden übrigen Einzelprojekte wurden ebenfalls von zwei unterschiedlichen Ingenieurgemeinschaften abgewickelt, wobei einzelne Firmen in verschiedenen Forschungsstellen mitwirkten.

Die Begleitkommission (BK) besteht aus 7 Mitgliedern, einem Präsidenten, 3 Mitgliedern, welche in anderen Infrastrukturanlagenbetreibern Funktionen im Erhaltungsmanagement wahrnehmen und 3 Mitgliedern des ASTRA.

Beauftragte und Organisation Einzelprojekt EP1:

Die Einzelprojekte EP1 bis EP3 wurden durch die INGE «Lombardi – EBP» erarbeitet. Die Projektleitung der INGE erfolgte durch Philipp Rietmann (EBP Schweiz AG) und Patrick Beeler (Lombardi AG) mit Unterstützung durch Hannes Heller (EBP Schweiz AG) und Maren Katterbach (Lombardi AG).

Innerhalb der INGE war die Lombardi AG verantwortlich für das EP1 «Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln». Die vorliegende Forschungsarbeit von EP1 wurde durch Reto Weishaupt und Patrick Beeler der Lombardi AG erarbeitet.

Die Koordination der Projektleitung EP1 mit der GPL, der BK sowie den EP4 und EP5 wurde übergeordnet in Abstimmung mit Projektleitung der INGE «Lombardi – EBP» wahrgenommen. Die Koordination des EP1 mit den EP2 und dem EP3 erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Stefan Matsch, Hannes Heller und Sonja Wacker (EP2, EBP Schweiz AG), Jürg Portner und Nikola Vasic (EP3, EBP Schweiz AG).

1.8.2 Ablauf und Bearbeitungszeitraum

Gegenüber dem ursprünglich geplanten Zeitplan und Ablauf des Forschungsprojekts wurden aus verschiedenen Gründen Anpassungen erforderlich. Es hat sich gezeigt, dass die Bearbeitung der ersten beiden Arbeitspakete, Grundlagenstudium und Katalogerstellung, mit der intensiven Koordination und dem iterativem Vorgehen unter den Teilprojekten EP1 bis EP3 mehr Zeit in Anspruch nahm als im ursprünglichen Terminprogramm dafür vorgesehen war. Dazu kamen die diversen Absprachen zu den übergeordneten Schnittstellen bzw. nachgelagerten «Datenlieferungen», u.a. mit dem EP4, welche ebenfalls einen Einfluss auf die Art der Strukturierung der Kataloge EP1 / EP2 / EP3 und deren interne «Verknüpfungen» hatte. Rückblickend lässt sich der Zeitablauf folgendermassen gliedern:

Tab. 2 Projektplan

Projektstart:	Januar 2021
Arbeitspakete 1 (Grundlagenstudium) und 2 (Katalogerstellung):	März 2021 bis April 2022
Arbeitspaket 3 (Dokumentation Vorabzug 1):	Februar bis Juni 2022
Bereinigung Rückmeldung BK + GPL zu Vorabzug 1:	Juli bis September 2022
Bereinigung Schlussbericht und Abgabe:	Oktober 2022 bis März 2023
Schlussprüfung Rückmeldung zu Abschluss:	März bis April 2023
Abschluss Schlussbericht und Forschungsprojekt EP1:	Mai bis Juni 2023

Die Bearbeitungsdauer des Forschungsprojekts erstreckte sich somit über 30 Monate zwischen Januar 2021 und Juni 2023.

Im Rahmen mehrerer Begleitkommissionssitzungen wurde der Fortschritt der Arbeiten präsentiert. Die Begleitkommission unterstützte die Forschungsstelle (EPs) und überwachte die Forschungsarbeiten laufend sowohl inhaltlich wie auch terminlich und finanziell. Zudem wurden bei mehreren EP-übergreifenden Workshops mit Beteiligung der GPL die Anforderungen an die Daten und die Struktur der zu erstellenden Kataloge gemeinsam festgelegt, Modelle und Forschungsansätze abgestimmt und die Koordination der Schnittstellen detailliert vorgenommen. Innerhalb der INGE «Lombardi – EBP» erfolgte die Koordination der Forschungsarbeiten und die Detailabstimmung der Kataloge EP1 bis EP3 im Rahmen von Arbeitssitzungen auf Stufe Projektleitung und Sachbearbeitung.

1.9 Bauwerksgliederung unter Berücksichtigung der Anforderungen des ASTRA

Die Kunstbauten der Nationalstrassen sollen unter minimaler Behinderung des Verkehrs technisch und wirtschaftlich optimal instandgehalten werden. Dazu bedarf es gemäss [3] in einem ersten Schritt einer strukturierten Erfassung von Substanz-, Inspektions- und Erhaltungsdaten. Das ASTRA verwendet hierzu aktuell die Kunstbautendatenbank KUBA 5.0. In dieser Datenbank werden sämtliche bergmännische Strassentunnel der Nationalstrassen, sowie der zugehörigen Daten und Informationen aus der Überwachung und Überprüfung laufend erfasst. Sie stellt aktuell als Wissensdatenbank die Grundlage für alle weiteren Projektphasen der Erhaltungsplanung dar.

Gleichzeitig ist der Fortschritt im Bereich des digitalen Bauens rasant. BIM (Building Information Modeling) stellt hierbei ein Lösungsansatz für das Verwalten von Informationen dar, welcher von der Industrie weitgehend akzeptiert ist. Informationen sollen in Zukunft insbesondere von grossen Infrastrukturen wie bergmännische Strassentunnel entlang des gesamten Lebenszyklus anhand eines digitalen Zwillings verwaltet werden. BIM ist im Infrastrukturbereich aber vielerorts erst in der Pilotphase. Die internationalen und nationalen Standards sind noch nicht abschliessend homogenisiert und aufeinander abgestimmt. Das ASTRA hat zurzeit keine Vorgaben hinsichtlich einer einheitlichen Objektstrukturierung des Tunnelportfolios in BIM. Die Systematisierung des Erhaltungsmanagements von Strassentunneln voranzutreiben und dabei die aktuellen Entwicklungen im Bereich BIM ausser Acht zu lassen, erwies sich dennoch als nicht zukunftsweisend.

Die zu erarbeitenden Kataloge sind daher gemäss dem Forschungsauftrag so zu strukturieren, dass sie in bestehende (KUBA) Datenmodelle und -banken implementiert werden können. Die aktuellen Entwicklungen im Bereich BIM sind wo möglich mitzuberücksichtigen damit die Forschungsergebnisse später bei Bedarf einfach in die neuen Datenmodelle und -banken überführt werden können. So soll gewährleistet werden, dass das über die Jahre angesammelte Wissen in KUBA und die Ergebnisse der Forschungsarbeit weiterhin genutzt und zukünftige Entwicklungen insbesondere im Bereich BIM einfach antizipiert werden können. Die Herausforderung besteht darin, eine Bauwerksgliederung zu erstellen, welche diesen Anforderungen erfüllt und gleichzeitig den Belangen des Forschungsprojekts resp. den einzelnen EPs hinsichtlich Detaillierung und Praktikabilität gerecht wird. Um diesen Anspruch zu erfüllen, wurde daher durch EP1 in enger Absprache mit den weiteren EPs eine Bauwerksgliederung für das Forschungs-

projekt erarbeitet. Diese Bauwerksgliederung stellt eine gemeinsame Bezugsgrösse aller EPs dar und bildet die Basis für die Datenverknüpfung zwischen den einzelnen EPs. Die erarbeitete Bauwerksgliederung und deren Umsetzung in den Katalogen von EP 1, EP2 und EP3 ist in Kap. 2.1 erläutert.

2 Ergebnisse des Einzelprojekts

2.1 Bauwerksgliederung des Forschungsprojekts

2.1.1 Relevanz der Bauwerksgliederung für Forschungsprojekt

Eine Infrastrukturanlage oder -bauwerk besteht aus einer Vielzahl an unterschiedlichen Elementen resp. Infrastrukturobjekten, die in ihrer Kombination das Gesamtsystem bilden. Die einzelnen Infrastrukturobjekte werden alle einerseits durch ihren Zweck im Gesamtsystem und andererseits durch ihre Materialisierung charakterisiert. Dies ist sowohl in KUBA als auch in BIM der Fall. Durch die Verknüpfung der zu erarbeitenden Kataloge resp. den darin enthaltenen Informationen mit den einzelnen Infrastrukturobjekten und deren jeweiligen Materialisierung lässt sich daher die Implementierung in bestehende und zukünftige Datenmodelle / -banken sicherstellen. Gleichzeitig ist mit einer übergeordneten allgemeingültigen Bauwerksgliederung die Durchgängigkeit der Datenstruktur zwischen den einzelnen EPs gewährleistet (vgl. Kap. 1.7).

2.1.2 Datengrundlage der Bauwerksgliederung

Die Bauwerksgliederung für das Forschungsprojekt baut auf der bestehenden Kunstbautendatenbank KUBA 5.0 auf bzw. berücksichtigt diese insoweit, dass eine einfache Implementierung der zu erarbeitenden Kataloge in die bestehende Datenbank gewährleistet ist.

In KUBA 5.0 wird eine Infrastrukturanlage gemäss [4] in 5 Ebenen untergliedert. Es handelt sich dabei in absteigender Reihenfolge um die Bauanlage, das Bauwerk, die Baueinheit, das Bauwerksteil und den Oberflächenschutz (siehe **Tab. 4**). Die Bauanlage (BA) umfasst mehrere Infrastrukturobjekte der Bauwerksebene wie z. B. Tunnelröhren, Querverbindungen und Zentralen. Das Bauwerk (BW) umfasst einzelne klar abgegrenzte Infrastrukturobjekte. Wie bereits erwähnt kann es sich hierbei z. B. um eine Tunnelröhre oder eine Querverbindung handeln. Die Baueinheit (BE) stellt eine Erweiterung der Bauwerksstruktur dar, mit welcher mehrere Bauwerksteile unterhalb der Bauwerksebene zusammengefasst werden können. Es handelt sich hierbei typischerweise um unterschiedliche Tunnelabschnitte (z.B. Tagbauabschnitte oder bergmännische Abschnitte) oder auch um Objekte, die in einer grossen Anzahl entlang des Tunnels vorliegen und zwecks Übersichtlichkeit in einer Baueinheit zusammengefasst werden wie z.B. Nischen. Bauwerksteile (BWT) sind Infrastrukturobjekte, die einzelne nicht weiter unterteilte Elemente des Bauwerks abbilden (Ausbruchsicherung, Verkleidung, Zwischendecke, Werkleitungskanal, Innenausbauten, Fahrbahn, etc.). Die Bauwerksteile bilden zusammen mit dem Oberflächenschutz (OS), welcher den Bauwerksteilen zugeordnet ist, die unterste Ebene der bestehenden Bauwerksgliederung in KUBA und beschreiben gewissermassen den Zweck eines Tunnelelements im Gesamtsystem (siehe Kap. 2.1.1). Eine Tunnelbauwerk in KUBA entsteht, indem aus verschiedenen Bauwerksteilen die einzelnen Tunnelblöcke modelliert und in einer Blockreihe zusammengehängt werden.

Tab. 3 Bauwerksgliederung KUBA

Ebene	Bezeichnung	Beispiel
Bauanlage (BA)	Infrastrukturobjekte, die auf der obersten Hierarchiestufe mehrere Bauwerke zu einer Einheit zusammenfassen. [3]	Anlage aus Tunnelröhre 1, Tunnelröhre 2 und Querverbindungen
Bauwerk (BW)	Infrastrukturobjekte, die ein komplettes klar abgrenzbares Infrastrukturobjekt abbilden. [3]	Tunnelröhre 1
Baueinheit (BE)	Infrastrukturobjekte, die unterhalb der Bauwerksebene mehrere Bauwerksteile zu einer Einheit zusammenfassen.[3]	SOS-Nischen in Tunnelröhre 1
Bauwerksteil (BWT)	Infrastrukturobjekte, untergeordneter Ebenen, die einzelne nicht weiter unterteilbare Elemente des Bauwerks abbilden. [3]	Innenschale
Oberflächenschutz (OS)	Infrastrukturobjekte, die den Oberflächenschutz einesBauwerkteils abbilden und daher einemInnenschale Infrastrukturobjekt dieser Gruppe zugeordnet sind. [3]	auf

2.1.3 Struktur der Bauwerksgliederung im Forschungsprojekt

Bauwerksteil (BWT) und Bauwerksteil-Ebene (BWT-Ebene)

Das Forschungsprojekt ist wie in Kap. 1.7 erwähnt in 6 verschiedene Einzelprojekte bzw. EPs unterteilt. Im Rahmen der Forschungsarbeit stellte sich heraus, dass für die einzelnen EPs unterschiedliche Detaillierungsstufen der Tunnelbauwerke relevant sind. So werden z.B. die Schäden und Befunde der Inspektionen zur eindeutigen Lokalisierung entlang des Tunnelbauwerks in KUBA der untersten Hierarchiestufe bzw. den Bauwerksteilen (BWT) zugeordnet. Das Bauwerksteil ist folglich die massgebende Hierarchiestufe für das EP1, welches sich mit der Beurteilung von Schäden, visuellen Befunden, deren Ursachen und Konsequenzen in bergmännischen Strassentunneln auseinandersetzt. Für das Kostenmodell von EP5 sind hingegen nur die wesentlichen, kostenrelevanten Elemente eines Tunnelblocks massgebend. Die Baueinheit als nächst grössere, bereits bestehende Gliederungsebene in KUBA ist hierfür bereits zu grob. Deshalb wurde im Rahmen des Forschungsprojekts eine neue Gliederungsstufe eingeführt, welche die Gruppierung der für die Kostenermittlung massgebenden Bauwerksteile je Tunnelblock zulässt. Es handelt sich hierbei um die Bauwerksteil-Ebene (BWT-Ebene), welche in **Abb. 12** dargestellt ist.

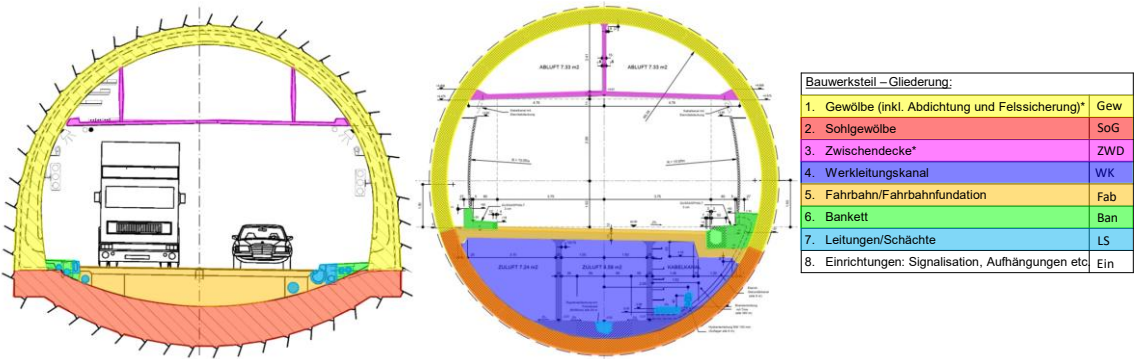


Abb. 12 Bauwerksteil-Ebene (BWT-Ebene) gemäss EP5

Die sich daraus ergebende Gliederungsstruktur des Forschungsprojekts im Kontext zur bestehenden Gliederung in KUBA ist nachfolgend in **Tab. 4** ersichtlich. Die für das Forschungsprojekt neu ergänzte BWT-Ebene ist grau hinterlegt und mit fetter Schrift hervorgehoben.

Tab. 4 Bauwerksgliederung des Forschungsprojekt im Kontext zu KUBA

Ebene	Bezeichnung
Bauanlage (BA)	Infrastrukturobjekte, die auf der obersten Hierarchiestufe mehrere Bauwerke zu einer Einheit zusammenfassen. [3]
Bauwerk (BW)	Infrastrukturobjekte, die ein komplettes klar abgrenzbares Infrastrukturobjekt abbilden. [3]

Baueinheit (BE)	Infrastrukturobjekte, die unterhalb der Bauwerksebene mehrere Bauwerksteile zu einer Einheit zusammenfassen.[3]
Bauwerkteil-Ebene (BWT-Ebene)	Gruppierung der für die Kostenmodellierung (EP5) massgebenden Bauwerksteile je Tunnelblock.
Bauwerksteil (BWT)	Infrastrukturobjekte, untergeordneter Ebenen, die einzelne nicht weiter unterteilbare Elemente des Bauwerks abbilden. [3]
Oberflächenschutz (OS)	Infrastrukturobjekte, die den Oberflächenschutz eines Bauwerkteils abbilden und daher einem Infrastrukturobjekt dieser Gruppe zugeordnet sind. [3]

Neben der Integration der BWT-Ebene in die bestehende Bauteilstrukturierung von KUBA wurden im Rahmen des Forschungsprojekts zudem die bestehenden Einträge der Bauwerksteile in KUBA analysiert und hinsichtlich der anerkannten Bezeichnungen der Bauwerksteile eines bergmännischen Strassentunnels überarbeitet. Wo nötig wurden neue, bisher in KUBA nicht enthaltene Bauwerksteile, ergänzt. Jedem aufgelisteten Bauwerksteil wurde eine eindeutige ID zugewiesen. Die Strukturierung der Bauwerksteile und die entsprechende Codierung der zugehörigen ID wird am Beispiel der Zwischendecke erläutert.

- 1. Ebene: Grundlagenkatalog Bauwerksteil BWT
- 2. Ebene: Zuordnung Bauwerksteil Ebene (vgl. EP5): ZWD
- 3. Ebene: Bauwerksteiltyp, z.B. Nebenbau-/tragwerk NTW
- 4. Ebene: eindeutiges Bauteil, hier 101 = ZwD-Element 101

Über diese Strukturierung und Codierung «BWT-ZWD-NTW-101» bzw. die unten erläuterte Bauteilart, erfolgt die Zuweisung der Schadensprozesse, Untersuchungsmethoden und der Instandsetzungsmassnahmen zu den zugehörigen Bauwerksteilen in den Katalogen von EP1, EP2 und EP3. Zur einfacheren Auswahlmöglichkeit innerhalb der Grundlagenkataloge wurde der Oberflächenschutz als eigenständige Hierarchieebene in KUBA (vgl. **Tab. 4**) hierbei vereinfachend im Katalog der Bauwerksteile aufgelistet resp. darin den entsprechenden Bauwerksteilen direkt zugeordnet. Aufgrund dieser Strukturierung kann jedes definierte Bauwerksteil (4. Ebene) als Grundlage für die Kostenermittlung von EP5 der zugehörigen Bauwerksteil-Ebene (2. Ebene) zugeordnet werden.

Die dem vorliegenden Forschungsprojekt zugrundeliegende Bauwerksteilgliederung ist in VI Katalog Bauwerksteil (BWT) ersichtlich.

Bauart (BA)

Die Bauart bezeichnet gemäss [3] die Art und Weise, wie ein Baustoff verwendet wird. Die Bauart steuert die Materialisierung der Bauwerksteile und ist somit neben den Bauwerksteilen der zweite wichtige Parameter zur Charakterisierung der Tunnelelemente im Gesamtsystem (siehe Kap. 0). Analog zu den Bauwerksteilen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts die bestehenden Einträge der Bauarten in KUBA analysiert und hinsichtlich der anerkannten Bezeichnungen der Bauarten eines bergmännischen Strassentunnels überarbeitet. Jeder im entsprechenden Grundlagenkatalog aufgelisteten Bauart (BA) wurde eine eindeutige ID zugewiesen. Die Strukturierung der Bauart und die entsprechende Codierung der zugehörigen ID wird am Beispiel der Stahlbetonkonstruktion erläutert.

- 1. Ebene: Grundlagenkatalog Bauart BA
- 2. Ebene: Betonkonstruktion: BK
- 3. Ebene: Stahlbetonkonstruktion, hier Subtyp. Nr. 3 03

Über diese Strukturierung und Codierung «BA-BK-03» resp. die weiter unten erläuterte Bauteilart erfolgt die Zuweisung der Schadensprozesse, Untersuchungsmethoden und der Instandsetzungsmassnahmen zu den zugehörigen Bauarten in den Katalogen von EP1, EP2 und EP3.

Die dem vorliegenden Forschungsprojekt zugrundeliegende Bauartgliederung ist in VII Katalog Bauart (BA) ersichtlich.

Bauteilart (BWT x BA)

Die in Realität tatsächlich in einem bergmännischen Strassentunnel vorkommenden Kombinationen von Bauwerksteilen und Bauarten wurden in einer Kombinationsmatrix zusammengestellt. Die Kombination aus Bauwerksteil und Bauart wird im Rahmen dieses Forschungsprojekt als Bauteilart (BWT x BA) bezeichnet. Schadensprozesse, Untersuchungsmethoden und Massnahmen können einerseits vom Bauwerksteil, andererseits aber auch von der Bauart abhängig sein. So sind z.B. von einer Belastungsänderung im Baugrund unabhängig von der Bauart sämtliche Bauwerksteile massgeblich betroffen, welche in direktem oder indirektem Kontakt zum anstehenden Baugrund stehen. Auf der anderen Seite macht eine Potentialfeldmessung nur bei Bauwerksteilen aus Stahlbeton Sinn. Für eine zweckmässige und eindeutige Verknüpfung der Kataloge von EP1, EP2 und EP3 untereinander wird daher die Bauteilart verwendet. Jeder aufgelisteten Bauteilart wurde eine eindeutige ID zugewiesen. Die ID kann aufgrund der klaren, eindeutigen Strukturierung der Bauwerksteile und der Bauarten einfach aus der Kombination ebendieser gebildet werden. Die Codierung der «Zwischendecke aus Stahlbeton» lautet entsprechend:

BWT-ZWD-NTW-101 _ BA-BK-03
Zwischendecke aus Stahlbetonkonstruktion

Die dem vorliegenden Forschungsprojekt zugrundeliegende Bauteilarten sind in Anhang VIII ersichtlich.

Bei der Bauteilart handelt es sich nicht um einen eigenständigen Katalog, sondern lediglich um ein Hilfsmittel zur Sicherstellung von eindeutigen Verknüpfungen zwischen den Katalogen EP1, EP2 und EP3 resp. zur Vermeidung von unlogischen Verknüpfungen mit in der Realität nicht vorkommenden Bauwerksteil-Bauart-Kombinationen bei einer späteren Implementierung der Kataloge in eine Datenbank. Die Kompatibilität der für die Verknüpfungen verwendeten Bauteilart mit zukünftigen Entwicklungen ist daher gewährleistet. Zukünftige neue Bauwerksteile oder Bauarten können weiterhin unabhängig voneinander in den dafür vorgesehenen, eigenständigen Katalogen angepasst und ergänzt werden.

2.1.4 Umsetzung der Bauwerksgliederung in den Katalogen EP1/EP2/EP3

Wie vorgängig in Kap. 1.9 beschrieben, ist der Anspruch, eine als gemeinsame Bezugsgrösse benutzbare Bauwerksgliederung fürs gesamte Forschungsprojekt zu entwickeln. Die bestehende Bauwerksstrukturierung in KUBA 5.0 wurde hierfür durch EP1, EP2 und EP3 für das Forschungsprojekt erweitert, weiterentwickelt und EP-übergreifend festgelegt. Bei der Erarbeitung der Kataloge der drei Einzelprojekte wurde diese neue Bauwerksgliederung laufend weiter optimiert und vervollständigt. Ein Abgleich erfolgte auch im Austausch mit den Einzelprojekten EP4 und EP5, gemäss dem Ablauf des Erhaltungsprozesses, wie er übergeordnet Kap. 1.6.1 detailliert beschreiben und in der **Abb. 7** vom EP4 dargestellt ist.

Die beschriebene Bauwerksgliederung des Forschungsprojekts dient als wesentliche Grundlage für die (Daten-)Verknüpfung zwischen den fünf Einzelprojekten. Diese erfolgt zwischen den Katalogen der EP1, EP2 und EP3 wie vorgängig beschrieben über die Bauteilart. Eine Verknüpfung zwischen den Katalogen des EP1, EP2 und EP3 ist sinngemäss in **Abb. 13** schematisch dargestellt. Das Beispiel wird nachfolgend kurz erläutert.

In einem bergmännischen Strassentunnel werden Schäden bzw. Befunde an einem bestimmten Bauwerksteil mit einer bestimmten Bauart bzw. einer Bauteilart festgestellt und dokumentiert. Über die Datenverknüpfungen der Bauteilart und der visuellen Befunde mit den Schadensprozessen im Katalog von EP1 lässt sich in einer Datenbank nun eine Auswahl der möglichen Schadensprozesse und der daraus folgenden Konsequenzen bzw. Gefährdungsbilder generieren. Da die Kataloge von EP2 und EP3 wiederum über die Bauteilart mit dem Bestand bzw. über die Schadensprozesse mit EP1 verknüpft sind, lassen sich basierend auf der Auswahl der vermuteten Schadensprozesse auch direkt eine

Auswahl der zweckmässigen möglichen Untersuchungs- und Instandsetzungsmethoden generieren. Die Datenverknüpfungen funktionieren grundsätzlich in beide Richtungen. Somit kann auch eine Auswahlliste generiert werden, welche alle mit einer bestimmten Methode an einer Bauteilart untersuchbaren Schadensprozesse auflistet, falls dies von Interesse sein sollte.

Über die erarbeitete, übergeordnete und EP-übergreifende Bauwerksstrukturierung sowie die darauf basierenden und in den Katalogen von EP1, EP2 und EP3 umgesetzten Datenverknüpfungen lassen sich bei der zukünftigen Datenbankimplementierung des Forschungsprojekts durch EP6 eine Vielzahl an möglichen Datenabfragen für verschiedene Anwendungsfälle generieren.

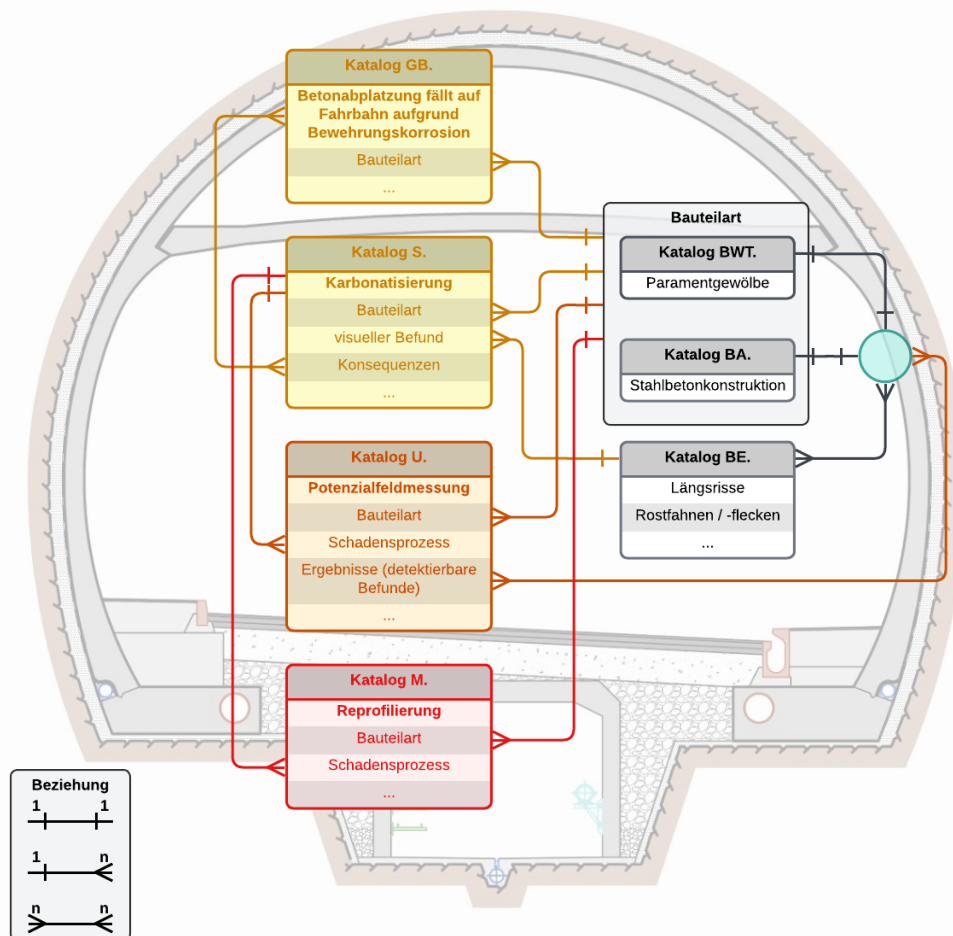


Abb. 13 Beispiel für die Verknüpfungen der Kataloge der EP 1 bis EP3 mit Hilfe der übergeordnet definierten Bauwerksgliederung

2.1.5 Implementierung der Bauwerksgliederung in bestehende und neue Datenmodelle / -banken

Eine Infrastrukturanlage oder -bauwerk besteht aus einer Vielzahl an unterschiedlichen Elementen resp. Infrastrukturobjekten, die in ihrer Kombination das Gesamtsystem bilden. Die einzelnen Infrastrukturobjekte werden alle einerseits durch ihren Zweck im Gesamtsystem und andererseits durch ihre Materialisierung charakterisiert. Dies ist sowohl in KUBA als auch in BIM der Fall. Die Bauwerksgliederung des Forschungsprojekts setzt hier an, indem sämtliche in den Katalogen von EP 1 – 3 enthaltenen Informationen mit den in bergmännischen Strassentunnel vorkommenden Bauteilarten bzw. einer eindeutigen

Kombination aus Bauwerksteil (Zweck) und Bauart (Materialisierung) gemäss Kap. 2.1.3 verknüpft werden. Durch diese Verknüpfung lässt sich daher die Implementierung der Kataloge in bestehende und zukünftige Datenmodelle / -banken im Grundsatz sicherstellen. Gleichzeitig ist mit einer übergeordneten allgemeingültigen Bauwerksgliederung die Durchgängigkeit der Datenstruktur zwischen den einzelnen EPs gewährleistet (vgl. Kap. 1.7).

bestehende Datenmodelle (KUBA)

Die im Forschungsprojekt umgesetzte Bauwerksgliederung baut auf der bestehenden Gliederungsstruktur von KUBA auf. Diese wird zusätzlich um eine weitere Ebene bzw. der BWT-Ebene zur Kostenmodellierung erweitert. Die Gliederungsstrukturen sind wie in Kap. 2.1.3 erläutert untereinander kompatibel. Die bestehenden KUBA-Einträge wurden analysiert und hinsichtlich der anerkannten Bezeichnungen der Bauwerksteile eines bergmännischen Strassentunnels überarbeitet. Wo nötig wurden neue Einträge ergänzt. Zum einfacheren Abgleich bei der späteren Implementierung der Forschungsarbeit in KUBA wurde ein Matching der Einträge der Bauwerksgliederung des Forschungsprojekts mit den korrespondierenden, bestehenden Einträgen in KUBA vorgenommen. Das Matching der Datenbankeinträge ist im detaillierten Katalog in VI Katalog Bauwerksteil (BWT) im und in VII Katalog Bauart (BA) ersichtlich. Unterschiede zwischen der Bauwerksteilgliederung des Forschungsprojekts und der Gliederung oder den Einträgen in KUBA sind ausgewiesen und farblich hervorgehoben.

neue Datenmodelle (BIM)

Wie eingangs in Kap. 1.9 erwähnt, stellt BIM ein Lösungsansatz für das Verwalten von Informationen von Bauwerken dar. Im Wesentlichen geht es darum, alle für den Anwender in einem bestimmten Use Case bzw. Anwendungsfall interessierenden Informationen mit einem digitalen, dreidimensionalen Modell des Bauwerks zu verknüpfen. Indem sämtliche in den Katalogen von EP 1 – 3 enthaltenen Informationen mit den auf einer einheitlichen, übergeordneten Bauwerksstrukturierung basierenden Bauteilarten verknüpft werden, wird der Lösungsansatz zur Informationsverwaltung in BIM antizipiert.

BIM-Modelle bestehen aus verschiedenen Objekten deren Struktur und Datenanforderungen der Bauherr und / oder der Betreiber üblicherweise vorgeben. Eine einheitliche Datenstruktur über das gesamte Portfolio ist eine Voraussetzung für dessen standardisierte Erhaltungsplanung. BIM ist im Infrastrukturbereich aber vielerorts erst in der Pilotphase. Die internationalen und nationalen Standards sind noch nicht abschliessend homogenisiert und aufeinander abgestimmt. Das ASTRA hat zurzeit keine Vorgaben hinsichtlich einer einheitlichen Objektstrukturierung. Für die Berücksichtigung der aktuellen Entwicklungen der Datenbankstrukturen im Bereich BIM wurde daher bei der Erarbeitung der übergeordneten Bauwerksgliederung im Forschungsprojekt der Fachdatenkatalog (FDK) der SBB [62] als Referenz herbei gezogen. Der Fachdatenkatalog dient der Standardisierung von Objekten bzw. der Abgrenzung und Bezeichnung von Objekttypen für Projekte der SBB. Er bildet die Basis für die Definition der Anforderungen an das Projektinformationsmodell (PIM) während der Projektierungs- und Bauphase bzw. das Asset Informationsmodell (AIM) während der Betriebsphase und ist zwingende Vorgabe für die Modellerstellung bei der SBB. Der FDK wird regelmässig überarbeitet, um internationale Entwicklungen bei Festlegung der zukünftigen IFC⁴-Struktur für Tunnel sowie Erfahrungen aus laufenden Pilotprojekten gebührend zu berücksichtigen. Der FDK der SBB befasst sich aber ausschliesslich mit Bahntunneln. Es versteht sich daher von selbst, dass dessen Objektstrukturierung nicht unverändert für bergmännische Strassentunnel adaptiert werden kann. In **Tab. 5** wird die übergeordnete, dem Forschungsprojekt zugrundeliegende Bauwerksteilstrukturierung mit den korrespondierenden Objekten im FDK SBB verglichen. Es ist ersichtlich, dass die übergeordnete Bauwerksteilstrukturierung mehrheitlich mit der übergeordneten FDK-Struktur kompatibel ist. bzw. es ein korrespondierendes übergeordnetes Objekt im FDK gibt, sofern das Bauwerksteil in einem Bahntunnel auch vorkommt. Der wesentliche Unterschied (grau hinterlegt und mit fatter Schrift hervorgehoben) besteht darin, dass die

⁴ Industry Foundation Classes - offener Standard im Bauwesen zur digitalen Beschreibung von BIM-Modellen

Zwischendecke, der Werkleitungskanal und das Bankett im FDK nicht als eigenständige übergeordnete Objekte geführt werden, sondern unter «14 Innenausbau» zusammengefasst sind. Die Strukturierung der Zwischendecke, des Werkleitungskanals und des Banketts als eigenständige übergeordnete Bauwerksteile ergibt sich aus den Anforderungen des EP5 an die Bauwerksstrukturierung hinsichtlich der Kostenmodellierung.

Tab. 5 schematischer Vergleich der übergeordneten Bauwerksteilstrukturierung im Forschungsprojekt mit dem FDK der SBB [62] (k. E. = kein Eintrag)

BWT-Ebene im Forschungsprojekt		Korrespondierendes Objekt gem. FDK SBB	
BWT-Gew-AS-1	Ausbruchssicherung	9	Ausbruchssicherung
BWT-Gew-AD-2	Abdichtung	11	Abdichtung
BWT-Gew-TTW-3	Gewölbe	10	Verkleidung
BWT-SoG-TTW-1	Fundament	10	Verkleidung
BWT-ZWD-NTW-1	Zwischendecke	14	Innenausbau
		14.5	Zwischendecke
BWT-WK-NTW-1	Werkleitungskanal	14	Innenausbau
		14.11	Werkleitungskanal
BWT-Fab-BG-1	Schicht des Strassenoberbaus	k. E.	k. E.
BWT-Ban-BA-1	Bankett	14	Innenausbau
		14.2	Bankett
BWT-LS-ENT-1	Entwässerung	12	Entwässerung
BWT-LS-WL-2	Werkleitung	k. E.	k. E.
BWT-Ein-VK-1	Bauwerksverkleidung	k. E.	k. E.
BWT-Ein-BE-2	Befestigung, Aufhängung	k. E.	k. E.

Analog zum bestehenden Datenmodell (KUBA) wurde zum einfacheren Abgleich bei der späteren Implementierung der Forschungsarbeit in die zukünftige IFC-Struktur für Tunnel ergänzend zu **Tab. 5** auch für alle untergeordneten Einträge der Bauwerksteile des Forschungsprojekts ein Matching mit den korrespondierenden Objekten im FDK vorgenommen. Das Matching der Datenbankeinträge ist im detaillierten Katalog in VI

Katalog Bauwerksteil (BWT) ersichtlich. Unterschiede zwischen der Bauwerksteilgliederung des Forschungsprojekt und der Gliederung oder den Einträgen im FDK sind ausgewiesen und farblich hervorgehoben. Da in Bezug auf Materialisierung im IFC-Tunnel bzw. FDK keine übergeordnete Gliederung bzw. allgemeingültige Einträge vorhanden sind, erfolgt das Matching nur für den Katalog der Bauwerksteilgliederung nicht jedoch für die Bauartgliederung. Durch das Matching der Bauwerksteile des Forschungsprojekts mit den korrespondierenden Objekten im FDK der SBB ist ein erster Schritt in Bezug auf die Kompatibilität mit der zukünftigen IFC-Struktur für Tunnel und entsprechend zur Vereinfachung der Überführung der Katalogeinträge in die neuen, zukünftigen Datenmodelle gemacht.

2.2 Anforderungen an die Kataloge der Schadensprozesse und der Gefährdungsbilder

Die Kataloge der Schadensprozesse und deren Konsequenzen bzw. Gefährdungsbilder haben, abgeleitet aus dem Pflichtenheft des EP1 (vgl. Kap. 1.4.2), folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Systematische Erfassung der relevanten Schadensprozesse und deren Konsequenzen bzw. Gefährdungsbilder in Katalogform als strukturiertes Nachschlagewerk für die Inspektion und als Grundlage für die Zustandserfassung und -beurteilung im Rahmen der Überwachung und Überprüfung;
- Beschreibung der erfassten Schadensprozesse und Gefährdungsbilder u. a. mit ihrer anerkannten Bezeichnung;
- Bezug der Schadensprozesse zu den visuell im Rahmen einer Inspektion erkennbaren Befunden und Bauteilarten, d. h. ermöglichen einer bauteilartspezifischen Auswahl von Schadensprozessen für die erkannten Befunde;
- Bezug der Gefährdungsbilder zu den Schadensprozessen und Bauteilarten, d. h. ermöglichen einer bauteilartspezifischen Auswahl von Gefährdungsbildern für die

erkannten, möglichen Schadensprozessen bzw. Aufzeigen der bauteilartspezifischen Konsequenzen der Schadensprozesse;

- Beschreibung und Auflistung der Auslöser / Ursachen und der Einflussfaktoren der relevanten Schadensprozesse als Grundlage zur Identifizierung bzw. Eingrenzung der möglichen Schadensprozesse;
- Hinweise zur Langzeitentwicklung der Schadensprozesse und Schaffung einer Grundlage zur einheitlichen Risikobeurteilung und darauf aufbauend der Verbesserung der Systematisierung der Erhaltungsplanung;
- Durchgängige Kompatibilität mit den Forschungsprojekten EP2 [54] und EP3 [58];
- Saubere und einheitliche Strukturierung der Informationen bzw. Daten pro Schadensprozess und Gefährdungsbild, sodass die Informationen zukünftig in einer Datenbank zur Verfügung gestellt werden können;
- Einfache und einheitliche Anwendung in der Praxis;
- Hinweise zu Grundlagen sofern vorhanden (z.B. Forschungsbeiträge, Fallstudien, Verfallsfunktionen, etc.).

2.3 Katalog Schadensprozesse

2.3.1 Systematisierung und Aufbau Katalog Schadensprozesse

Der Katalog EP1 «S. Schadensprozesse» (S. Katalog) stellt die für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse strukturiert zusammen (siehe Anhang II).

Der Ansatz für die Systematisierung der Schadensprozesse verfolgt das Ziel, die einzelnen Schadensprozesse in übergeordneten Einheiten zu gliedern, was der Übersichtlichkeit, Lesbarkeit und somit der Praxistauglichkeit dient. Zudem soll sich die Struktur des S. Katalogs auf die visuellen Befunde und die Bauteilart beziehen.

Gliederung Schadensprozesse

Als übergeordnete Gliederungseinheit wurde das Schadensmedium bzw. das Medium⁵ gewählt, in welchem der Schadensprozess abläuft. Das Schadensmedium wird hierbei als Ausbreitungsmedium einer physikalischen Erscheinung verstanden. Diese Gliederung der Schadensprozesse zeigt im Wesentlichen auf, wo diese ablaufen. Sämtliche im Katalog EP1 aufgeführten Schadensprozesse (S.) werden demnach in die folgenden Typen (S. Typ) unterteilt:

- **S-1 : Schadensprozess Stahlbeton**
- **S-2 : Schadensprozess Metall**
- **S-3 : Schadensprozess Baugrund**
- **S-4 : Schadensprozess Berg- / Grundwasser**
- **S-5 : Schadensprozess Kunststoff**
- **S-6 : Schadensprozess Strassenoberbau**

Diese übergeordneten nach Schadensmedium unterteilten Gliederungseinheiten werden weiter unterteilt in die Schadensprozesstypen.

⁵ In der Physik und Technik bezeichnet (Ausbreitungs-)Medium einen Träger für die Ausbreitung einer physikalischen Erscheinung.

S-1: Schadensprozess Stahlbeton

Stahlbeton ist ein Kompositmaterial aus Bewehrungsstahl und Beton. Die Schadensprozesse Stahlbeton beinhalten daher sowohl Schadensprozesse die entweder im Bewehrungsstahl, im Betongefüge oder im Falle der Ermüdung in beiden Materialien ablaufen. Die Schadensprozesse Stahlbeton umfassen sowohl bewehrten als auch unbewehrten Beton und beinhalten demnach folgende Schadensprozesstypen:

- **S-11 : Bewehrungskorrosion**
- S-11.1 : Karbonatisierung
- S-11.2 : Lochfrasskorrosion / Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion
- S-11.3 : Spannungsrisskorrosion, inter- / transkristalline Korrosion Bewehrungsstahl
- **S-12 : Betonangriff / Gefügezerstörung**
- S-12.1 : Alkali Aggregat Reaktion (AAR)
- S-12.2 : Sulfatangriff intern
- S-12.3 : Sulfatangriff extern
- S-12.4 : chemisch lösender Angriff / Betonkorrosion
- S-12.5 : Frost- / Tausalzschäden
- **S-19 : Ermüdung Stahlbeton**
- S-19.1 : Ermüdung Stahlbeton

S-2: Schadensprozess Metall

Die Schadensprozesse Metall enthalten verschiedene relevante Korrosionsarten und andererseits die Metallermüdung, welche analog zur Ermüdung im Stahlbeton als separater Schadensprozesstyp aufgeführt ist. Die Schadensprozesse Metall beinhalten folgende Schadensprozesstypen:

- **S-21 : Metallkorrosion**
- S-21.1 : Flächenkorrosion (Rost)
- S-21.2 : Lochfrasskorrosion
- S-21.3 : Kontaktkorrosion / Spaltkorrosion
- S-21.4 : Spannungsrisskorrosion, inter- / transkristalline Korrosion Metall
- **S-29 : Ermüdung Metall**
- S-29.1 : Ermüdung Metall

S-3: Schadensprozess Baugrund

Die Schadensprozesse Baugrund enthalten geomechanische Prozesse, welche im Baugrund um den Tunnel ablaufen. Die Schadensprozesse Baugrund beinhalten demnach folgende Schadensprozesstypen:

- **S-31 : Belastungsänderung Baugrund**
- S-31.1 : Entfestigung / Vernässung
- S-31.2 : druckhaftes Gebirge
- S-31.3 : Baugrundverformungen Lockergestein
- S-31.4 : Tonquellen / Quellprozess in Tonmineralien
- S-31.5 : Sulfatquellen / Quellprozess in Anhydrit

S-4: Schadensprozess Berg- / Grundwasser

Das Berg- / Grundwasser ist einer der Auslöser / Ursachen bei ganz verschiedenen Schadensprozessen (z.B. S-12.3 Sulfatangriff extern, S-31.3 Entfestigung / Vernässung, etc.). Die schädigende Wirkung des Berg- / Grundwasser kann demzufolge vielgestaltig sein. Unter Schadensprozess Berg- / Grundwasser werden aber nur jene Prozesse verstanden, welche zu einer Zusatzbelastung bzw. zu einem zusätzlichen Wasserdruck auf den Tunneln führen. Die Schadensprozesse Berg- / Grundwasser beinhalten demnach folgende Schadensprozesstypen:

- **S-41 : Belastungsänderung Berg- / Grundwasser**
- S-41.1 : Wasserdruckaufbau
- S-41.2 : fortschreitender Verlust Abflusskapazität

S-5: Schadensprozess Kunststoff

Die Schadensprozesse Kunststoff beinhalten die Alterungsprozesse in Kunststoffen bzw. polymeren Baustoffen. Beim Tunnelbau ist hierbei in erster Linie die Alterung der

Abdichtung relevant. Entwässerungsleitungen aus Kunststoff altern zwar auch. Kommt es infolge der materialbedingten Alterung jedoch zu einer Beschädigung der Entwässerungsleitung, äussert sich dies in erster Linie als Verlust der Abflusskapazität bzw. Wasserdruckaufbau, was mit den Schadensprozessstypen S-41.1 und S-41.2 bereits abgedeckt ist. Die Alterung von Kunststoffleitungen wird daher nicht als separater Schadensprozessstyp aufgeführt. Die Schadensprozesse Kunststoff beinhalten somit folgende Schadensprozessstypen:

- **S-51 : Beschädigung / Alterung Kunststoff**
- S-51.1 : Beschädigung / Alterung Abdichtung

S-6: Schadensprozess Strassenoberbau

Die Schadensprozesse Strassenoberbau enthalten einerseits Schädigungen des Asphaltbelags bzw. der Trag- / Binder- / Deckschicht (Belagsverformungen und Belagschäden) und andererseits der Fundamentalschicht (Strukturelle Schäden). Die Schadensprozesse Strassenoberbau umfassen folgende Schadensprozessstypen:

- **S-61 : Beschädigung Strassenoberbau**
- S-61.1 : Belagsverformungen
- S-61.2 : Belagsschäden
- S-61.3 : Strukturelle Schäden

2.3.2 Information zu Schadensprozessen

Im Katalog finden sich als gruppierte Spalten folgende Informationsbereiche mit «Attributen» zur Beschreibung der Eigenschaften der einzelnen Schadensprozessen, welche als Zeilen aufgeführt sind (gegliedert gemäss Kap 2.3.1):

Übersicht der Informationsbereich des S. Katalogs:

- Strukturierung Schadensprozesse (S) inkl. Beschreibung der Schadensprozesse;
- Zuordnung Bauwerksgliederung (BWT x BA) und der visuellen Befunde (BE);
- Auflistung der Auslöser / Ursachen und der begünstigenden Faktoren;
- Zuordnung Konsequenzen bzw. Gefährdungsbilder (GB);
- Hinweise zu Verfallsfunktionen in Literatur;
- Verweise / Referenzen.

Diese decken die gemäss Pflichtenheft geforderten Informationen gemäss Kap. 1.4.2 ab.

In der nachfolgenden Tabelle sind die zugeordneten Attribute der Schadensprozesse (Informationen) aufgeführt.

Tab. 6 Übersicht Informationsbereich S.-Katalog		
Information (Attribut)	Beschrieb Attribut	Art der Daten
Strukturierung Schadensprozesse		
ID S.	Eindeutige ID (gemäss Gliederung S, siehe Kap. 2.3.1)	Nummerierung S-##.# (obligatorisch)
S. Nummer	Fortlaufende Nummerierung gem. Gliederungsstruktur EP1 (siehe Kap. 2.3.1)	Nummerierung ##.# (obligatorisch)
H. Code	Verweis Nr. KUBA Katalog Schadensprozesse	Nummerierung ## wenn in KUBA 5.0 vorhanden k. E. = kein Eintrag wenn in KUBA nicht vorhanden
Schadensmedium	Schadensmedium gem. Gliederungsstruktur EP1 (siehe Kap. 2.3.1) Eindeutige Bezeichnung des Schadensmedium	Werteliste (Text) (obligatorisch)
S. Bezeichnung	Schadensprozessstyp gem. Gliederungsstruktur EP1 (siehe Kap. 2.3.1) Eindeutige Bezeichnung des Schadensprozessstyps	Freitext (obligatorisch)

Beschreibung	Beschrieb der S. Enthält: • Verständnisgrundlagen, Beschrieb der physikalischen / chemischen und geomechanischen Prozesse • Beschrieb Auslöser / Ursachen und deren Abhängigkeiten • Beschrieb auftretenden Befunde und der Konsequenzen • evtl. Beschrieb besonderer Merkmale und Ausprägungen	Freitext (obligatorisch)
Zuordnung Bauteilarten (BWT x BA) / Befunde (BE)		
BWT x BA: Bauwerksteil-Bauart Kombination	Zuweisung zu Bauteilarten, welche vom Schadensprozess betroffen sein können	Werteliste «ID Bauteilarten» gem. Kap. 2.1.3 (Mehrfachzuweisung)
BE. Befund	Zuweisung zu visuellen Befunden, welche eine Folge des Schadensprozesses sein können	Werteliste «ID Befunde» (siehe Kap. 3.3.2, Tab. 12) (Mehrfachzuweisung)
Auslöser / Ursachen und begünstigende Faktoren		
Auslöser / Ursachen	Auflistung der Auslöser / Ursachen die erfüllt sein müssen damit Schadensprozess ablaufen kann. • Auslöser / Ursachen die gemeinsam erfüllt sein müssen werden jeweils unter denselben Spiegelpunkt zusammengefasst.	Auswahlliste (Mehrfachzuweisung)
Begünstigender Faktor	Auflistung der begünstigenden Einflussfaktoren die zu einer Beschleunigung des Verfalls oder einer Vergrößerung des Schadensausmasses / -schwere führen können, jedoch keine Grundvoraussetzung bzw. Auslöser / Ursachen für das Ablaufen des Schadensprozesses sind	Freitext
Konsequenzen		
Konsequenz kurzfristig	Zuweisung zu Gefährdungsbildern, welche die kurzfristige Konsequenz des Schadensprozesses sein können • Kurzfristige Konsequenzen sind Gefährdungen mit kurzer Vorwarnzeit. Als Vorwarnzeit wird die Zeitdauer zwischen Auftreten der ersten Befunde bis zum Eintreten der Gefährdung verstanden.	Werteliste «ID Gefährdungsbild» gem. Kap. 2.4.1 (Mehrfachzuweisung)
Konsequenz langfristig	Zuweisung zu Gefährdungsbildern, welche die kurzfristige Konsequenz des Schadensprozesses sein können • Langfristige Konsequenzen sind Gefährdungen mit langer Vorwarnzeit. Als Vorwarnzeit wird die Zeitdauer zwischen Auftreten der ersten Befunde bis zum Eintreten der Gefährdung verstanden.	Werteliste «ID Gefährdungsbild» gem. Kap. 2.4.1 (Mehrfachzuweisung)
Verfallsfunktion		
Verfallsfunktion	Hinweise / Verweise zu in Literatur existierenden Verfallsfunktionen	Literaturverweis
Verweise / Referenzen		
Katalogblatt	Katalogblätter S als Anhang des Schlussberichts EP1 (siehe Anhang III)	Nr. Katalogblatt

Referenz Faktenblatt Fallbeispiel	Aufzählung der Fallbeispiele, bei welchen diese Schadensprozesse angetroffen wurde bezogen auf die übergeordneten Schadensprozessstypen.	Nr. und Objekt Fallbeispiel
--------------------------------------	--	-----------------------------

Im Katalog der Schadensprozesse wird wo möglich über die Spalte «H. Code» ein Bezug zum korrespondierenden Prozess im bestehenden KUBA-Katalog hergestellt. Dies vereinfacht die Übertragung der bestehenden Daten von KUBA in die neue tunnelspezifische Gliederungsstruktur. Weiter wird in der Spalte «Verfallsfunktion» wo möglich ein Verweis zu in der Literatur vorhandenen Verfallsfunktionen gemacht. Als Verfallsfunktion wird hierbei eine mathematische Funktion zur Beschreibung eines Schadensprozesses verstanden. Es existieren zurzeit nicht für alle relevanten Schadensprozesse Verfallsfunktionen. Verfallsfunktionen können zwar als Hilfsmittel zur Risikobeurteilung dienen (z.B. Berechnung von Abrostraten), die Risikobeurteilung darf sich aber nicht allein auf eine Verfallsfunktion abstützen, da sie einer ganzheitlichen Betrachtung und Modellbildung bedarf (vgl. Kap. 1.3.3). Die Eignung und Einsatzgrenzen der aufgeführten Verfallsfunktionen sind im Einzelfall durch die Anwender zu prüfen.

2.3.3 Vollständigkeitsnachweis Katalog Schadensprozesse

Das Ziel des Forschungsauftrags EP1 ist unter anderem, eine vollständige Übersicht und Katalogisierung aller für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse zusammenzustellen bzw. vorzunehmen. Gemäss Kap. 1.6.2 werden im Rahmen des Forschungsprojekts keine aussergewöhnlichen, punktuellen Ereignisse und damit zusammenhängende Kaskadenschäden und keine neuen Schadensprozesse, d. h. Schadensprozesse in bisher noch nicht im Tunnelbau eingesetzten Werkstoffen, evaluiert oder untersucht. Die Vollständigkeit wird einerseits anhand der Literaturrecherche (vgl. Kap. 1.3.2) und andererseits anhand der Fallbeispiele aufgezeigt.

Vollständigkeit Schadensprozesse bezüglich Literaturrecherche

Die Forschungsbeiträge von [17] und [60] geben einen Überblick über die in bergmännischen Tunnel ablaufenden Prozesse. In den nachfolgenden Tabellen werden die darin aufgelisteten Prozesse mit dem erarbeiteten Katalog der Schadensprozesse unter Berücksichtigung der Abgrenzung gemäss Kap. 1.6.2 verglichen. In der nachfolgenden Tabelle erfolgt der Vergleich mit [17]. Es ist ersichtlich, dass für alle relevanten und im Rahmen des Forschungsprojekts nicht abgegrenzten Schadensprozesse korrespondierende Einträge im Katalog Schadensprozesse von EP1 vorhanden sind.

Tab. 7 Vergleich Schadensprozesse gemäss Tab. 20, 22 und 23 in [17]

Prozessbezeichnung in [17]	Korrespondierender Prozessstyp EP1	Bemerkung
Treibender Angriff	S-12.2 Sulfatangriff intern	
Lösender Angriff	S-12.4 chemisch lösender Angriff / Betonkorrosion	
Thaumasitschädigung	S-12.3 Sulfatangriff extern	
Frost-Tauwechsel	S-12.5 Frost- / Tausalzschäden	
Verschleiss	S-61.2 Belagsschäden	
Brand	Nicht vorhanden	nicht Projektbestandteil
Karbonatisierung	S-11.1 Karbonatisierung	
Chloridinduzierte Korrosion	S-11.2 Lochfrasskorrosion / Chloridinduzierte Korrosion	
Streustromkorrosion	Nicht vorhanden.	Nicht relevant für Strassentunnel
Kontaktkorrosion	S-21.3 Kontaktkorrosion / Spaltkorrosion	
Ermüdung	S-29.1 Ermüdung Metall	
Druckhaftigkeit	S-31.3 druckhaftes Gebirge	
Vernässung und Auslaugung	S-31.1 Entfestigung / Vernässung	
Quellen / Schwellen	S-31.4 Tonquellen / Quellprozess in Tonmineralien S-31.5 Sulfatquellen / Quellprozess in Anhydrit	
Hangtektonik	S-31.3 Baugrundverformungen Lockergestein	

In der nachfolgenden Tabelle erfolgt der Vergleich mit [60]. Es ist ersichtlich, dass sich die Gliederung teilweise unterscheidet aber auch, dass für alle relevanten und im Rahmen des Forschungsprojekts nicht abgegrenzten Schadensprozesse korrespondierende Einträge im Katalog Schadensprozesse von EP1 vorhanden sind. Zu erwähnen ist, dass nach Ansicht der Autoren Kriechen / Relaxation und Schwinden zwar Alterungsprozesse bei Beton- bzw. Stahlbetonbauwerken darstellen, diese aber nie alleinige und massgebende Ursache einer Gefährdung in bergmännischen Strassentunnel sind bzw. zu keinem Tragwerksversagen oder zu einer Einschränkung der Betriebssicherheit (vgl. Kap. 2.4) in Strassentunnel führen. Die infolge Kriechen / Relaxation und Schwinden entstehenden Risse und Verformungen können aber andere Schadensprozesse begünstigen und / oder verstärken. Diese Alterungsprozesse werden daher im Rahmen dieses Forschungsprojekts als begünstigende Faktoren verstanden.

Tab. 8 Vergleich Schadensprozesse gemäss Tab. 2.2 und 2.1 in [60]

Prozessbezeichnung in [60]	Korrespondierender Prozesstyp EP1	Bemerkung
Kriechen / Relaxation	Nicht vorhanden.	Begünstigender Faktor
Schwinden	Nicht vorhanden	Begünstigender Faktor
Auslaugung	S-12.4 chemisch lösender Angriff / Betonkorrosion	
Chloridangriff	S-11.2 Lochfrasskorrosion / Chloridinduzierte Korrosion	
Sulfatangriff	S-12.2 Sulfatangriff intern S-12.3 Sulfatangriff extern	
Eis / Frost	S-12.5 Frost- / Tausalzschäden	
Unfall / Anprall	Nicht vorhanden	nicht Projektbestandteil
Brand	Nicht vorhanden	nicht Projektbestandteil
Kriechen / Druckhaftigkeit	S-31.1 Entfestigung / Vernässung S-31.2 druckhaftes Gebirge	
Quellen	S-31.4 Tonquellen / Quellprozess in Tonmineralien S-31.5 Sulfatquellen / Quellprozess in Anhydrit	
Mineralausfällungen im Gebirge	S-41.1 Wasserdruckaufbau	
Konsolidation	S-31.3 Baugrundverformungen Lockergestein	
Böschungsstabilität / Niederbruch	S-31.1 Entfestigung / Vernässung S-31.3 Baugrundverformungen Lockergestein	

In der nachfolgenden Tabelle wird der umgekehrte Vergleich angestellt und die Schadensprozess im Katalog EP1 mit den beiden erwähnten Forschungsbeiträgen [17] und [60] angestellt. Es ist ersichtlich, dass die meisten Schadensprozesse im Katalog EP1 entweder in [17] oder [60] enthalten oder teilweise enthalten sind. Es ist zudem ersichtlich, dass die Liste der Schadensprozesse aus [17] oder [60] mit weiteren für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse ergänzt wurden. Die Relevanz der neu ergänzten Schadensprozesse für bergmännische Strassentunnel ist in den entsprechenden Katalogblättern (siehe III Katalogblätter Schadensprozesse (S)) dargelegt.

Tab. 9 Vollständigkeitsnachweis Schadensprozesse bzgl. Literaturrecherche
 (■ = enthalten oder teilweise enthalten, ■ = nicht enthalten, ■ = neu ergänzt EP1)

Schadensprozessstyp EP1		enthalten in	
		[17]	[60]
S-1	Schadensprozess Stahlbeton		
S-11	Bewehrungskorrosion		
S-11.1	Karbonatisierung		
S-11.2	Lochfrasskorrosion / Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion		
S-11.3	Spannungsrissskorrosion, inter- / transkristalline Korrosion Bewehrungsstahl		
S-12	Betonangriff / Gefügezerstörung		
S-12.1	Alkali Aggregat Reaktion (AAR)		
S-12.2	Sulfatangriff intern		
S-12.3	Sulfatangriff extern		
S-12.4	chemisch lösender Angriff / Betonkorrosion		
S-12.5	Frost- / Tausalzschäden		
S-19	Ermüdung Stahlbeton		
S-19.1	Ermüdung Stahlbeton		
S-2	Schadensprozess Metall		
S-21	Metallkorrosion		
S-21.1	Flächenkorrosion (Rost)		
S-21.2	Lochfrasskorrosion		
S-21.3	Kontaktkorrosion / Spaltkorrosion		
S-21.4	Spannungsrissskorrosion, inter- / transkristalline Korrosion Metall		
S-29	Ermüdung Metall		
S-29.1	Ermüdung Metall		
S-3	Schadensprozess Baugrund		
S-31	Belastungsänderung Baugrund		
S-31.1	Entfestigung / Vernässung		
S-31.2	druckhaftes Gebirge		
S-31.3	Baugrundverformungen Lockergestein		
S-31.4	Tonquellen / Quellprozess in Tonmineralien		
S-31.5	Sulfatquellen / Quellprozess in Anhydrit		
S-4	Schadensprozess Berg- / Grundwasser		
S-41	Belastungsänderung Berg- / Grundwasser		
S-41.1	Wasserdruckaufbau		
S-41.2	fortschreitender Verlust Abflusskapazität		
S-5	Schadensprozess Kunststoff		
S-51	Beschädigung / Alterung Kunststoff		
S-51.1	Beschädigung / Alterung Abdichtung		
S-6	Schadensprozess Fahrbahn		
S-61	Beschädigung Strassenoberbau		
S-61.1	Belagsverformungen		
S-61.2	Belagsschäden		
S-61.3	Strukturelle Schäden		

Vollständigkeit Schadensprozesse bezüglich Fallbeispiele

Der Nachweis der Vollständigkeit der Schadensprozesse erfolgt für die übergeordneten Schadensprozessstypen auch bezüglich der Fallbeispiele in Anhang I. In der nachfolgenden Tabelle ist ersichtlich, dass bis auf die S-29 Ermüdung Metall alle übergeordneten Schadensprozessstypen in den Fallbeispielen angetroffen wurden bzw. in den entsprechenden Erhaltungsprojekten relevant waren.

Tab. 10 Vollständigkeitsnachweis Schadensprozesse bzgl. Fallbeispiele gemäss Anhang I (■ = in Fallbeispiel angetroffen, ■ = in Fallbeispiel nicht angetroffen)

Schadensprozestyp EP1		Nr. 1 – Gotthard Strassentunnel, 1. Röhre	Nr. 2 – Seelisbergtunnel	Nr. 3 – Kerenzerbergtunnel	Nr. 4 – Gotschnatunnel	Nr. 5 – Gubristtunnel	Nr. 6 – Tunnel Belchen	Nr. 7 – Tunnel Girsberg	Nr. 8 – Sonnenbergtunnel	Nr. 9 – Reussporttunnel
S-1	Schadensprozess Stahlbeton									
S-11	Bewehrungskorrosion	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S-12	Betonangriff / Gefügezerstörung	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S-19	Ermüdung Stahlbeton	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S-2	Schadensprozess Metall									
S-21	Metallkorrosion	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S-29	Ermüdung Metall	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S-3	Schadensprozess Baugrund									
S-31	Belastungsänderung Baugrund	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S-4	Schadensprozess Berg- / Grundwasser									
S-41	Belastungsänderung Berg- / Grundwasser	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S-5	Schadensprozess Kunststoff									
S-51	Beschädigung / Alterung Kunststoff	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S-6	Schadensprozess Fahrbahn									
S-61	Beschädigung Strassenoberbau	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Basierend auf der Literaturrecherche und der ausgewerteten Datengrundlage sowie der Erfahrung aus der Praxis wird der Katalog der Schadensprozesse aktuell als vollständig erachtet. Mit der vorhandenen Gliederung ist aber jederzeit die Möglichkeit gegeben, weitere Schadensmedien oder Schadensprozesse in den Katalog aufzunehmen.

2.4 Katalog der Gefährdungsbilder

2.4.1 Systematisierung und Aufbau Katalog Gefährdungsbilder

Der Katalog EP1 «GB. Gefährdungsbilder» (GB. Katalog) stellt die für bergmännische Strassentunnel relevanten Gefährdungsbilder strukturiert zusammen (siehe Anhang IV). Der Ansatz für die Systematisierung der Gefährdungsbilder verfolgt das Ziel, die einzelnen Gefährdungsbilder in übergeordneten Einheiten zu gliedern, was der Übersichtlichkeit, Lesbarkeit und somit der Praxistauglichkeit dient. Zudem soll sich die Struktur des GB. Katalogs auf die Schadensprozesse und die Bauteilart beziehen.

Gliederung Gefährdungsbilder

Eines der Hauptziele der Bauwerkserhaltung gemäss der dem Forschungsprojekt zugrunde gelegten ASTRA Richtlinie – Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten [2] ist die «Gewährleistung einer ausreichenden Sicherheit». Der Begriff «ausreichende Sicherheit» wird dabei unterschieden in:

- Tragsicherheit;
- Verkehrssicherheit (betrifft: Verkehrsteilnehmer und Beschäftigte auf der Baustelle);

- Betriebssicherheit (z.B. Leiteinrichtungen, Fahrbahnübergänge, Entwässerung, elektromechanische Einrichtungen, etc.);
- Umweltverträglichkeit (Laufstärke, Ölaustritt, etc.).

Erhaltungsmassnahmen zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit und der Umweltverträglichkeit sind primär durch Nutzungsänderungen (z.B. Mehrverkehr), geänderter Anforderungen (z.B. Normkonformität) oder durch die BSA-induziert und somit gemäss Kap. 1.6.2 nicht Gegenstand des Forschungsprojekts. Im Rahmen des Forschungsprojekts wird daher postuliert, dass die Verkehrssicherheit und Umweltverträglichkeit nicht negativ durch Schadensprozesse an der baulichen Infrastruktur beeinflusst werden, sofern die Tragsicherheit und Betriebssicherheit gewährleistet sind. Sämtliche im Katalog EP1 aufgeführten Gefährdungsbilder (GB.) werden demnach in die folgenden übergeordneten Gefährdungsbilder unterteilt.

- **GB-1: Tragsicherheit**
- **GB-2: Betriebssicherheit**

Die Gefährdungsbilder der Betriebssicherheit beinhalten hierbei auch die relevanten Aspekte (Funktionstüchtigkeit, Komfort) der Gebrauchstauglichkeit im Sinne, dass so lange z. B. die Tragwerksverformungen oder die Fahrbahnebenheit innerhalb der objekt-spezifisch festgesetzten Anforderungen liegen, der Tunnel sicher betrieben werden kann bzw. die Betriebssicherheit nicht beeinträchtigt ist.

Um den Bezug zu den zugrundeliegenden Schadensprozessen und den betroffenen Bauteilarten herzustellen, werden die übergeordnet in Tragsicherheit und Betriebs-sicherheit gegliederten Gefährdungsbilder weiter unterteilt.

GB-1: Tragsicherheit

Die Tragsicherheit beinhaltet folgende Gefährdungsbilder:

- **GB-11 : Versagen Gewölbe**
 - GB-111 : Versagen Gewölbe aufgrund Bewehrungskorrosion
 - GB-112 : Versagen Gewölbe aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung
 - GB-113 : Versagen Gewölbe aufgrund Überlastung
- **GB-12 : Versagen Foundation**
 - GB-121 : Versagen Foundation aufgrund Bewehrungskorrosion
 - GB-122 : Versagen Foundation aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung
 - GB-123 : Versagen Foundation aufgrund Überlastung
- **GB-13 : Versagen Zwischendecke**
 - GB-131 : Versagen Zwischendecke aufgrund Bewehrungskorrosion
 - GB-132 : Versagen Zwischendecke aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung
 - GB-133 : Versagen Zwischendecke aufgrund Beschädigung Auflagerkonsole oder Aufhängung
 - GB-134 : Versagen Zwischendecke aufgrund Ermüdung
 - GB-135 : Versagen Zwischendecke aufgrund Überlastung
- **GB-14 : Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte**
 - GB-141 : Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte aufgrund Bewehrungskorrosion
 - GB-142 : Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung
 - GB-143 : Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte aufgrund Beschädigung Auflagerkonsole oder Abstützung
 - GB-144 : Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte aufgrund Ermüdung
 - GB-145 : Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte aufgrund Überlastung
- **GB-15 : Versagen Aufhängungen**
 - GB-151 : Versagen Aufhängungen aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung
 - GB-152 : Versagen Aufhängungen aufgrund Metallkorrosion
 - GB-153 : Versagen Aufhängungen aufgrund Ermüdung

GB-2: Betriebssicherheit

Die Betriebssicherheit beinhaltet folgende Gefährdungsbilder:

- **GB-21 : Unzulässige Verformungen Tragwerk**
- GB-211 : Unzulässige Verformungen des Tragwerks aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung
- GB-212 : Unzulässige Verformungen des Tragwerks aufgrund Überlastung
- **GB-22 : Fahrkomfort / Ablenkung**
- GB-221 : Unebene Fahrbahn (flächig)
- GB-222 : Beschädigte Fahrbahn (punktuell)
- **GB-23 : Betonabplatzung auf Fahrbahn**
- GB-231 : Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Bewehrungskorrosion
- GB-232 : Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung
- GB-233 : Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Zusatzbelastung / Zwängungen
- **GB-24 : Feuchtigkeit / Eisbildung**
- GB-241 : Eiszapfen auf Fahrbahn
- GB-242 : Aquaplanung / Strassenglätte

2.4.2 Information zu Gefährdungsbildern

Im Katalog finden sich als gruppierte Spalten mit «Attributen» zur Beschreibung der Eigenschaften der einzelnen Gefährdungsbilder, welche als Zeilen aufgeführt sind (gegliedert gemäss Kap 2.4.1):

Übersicht der Attribute des GB. Katalogs:

- Strukturierung Gefährdungsbilder (GB) inkl. Beschreibung der Gefährdungsbilder;
- Zuordnung Schadensprozesse (S) und der Bauwerksgliederung (BWT x BA).

Diese decken die gemäss Pflichtenheft geforderten Informationen gemäss Kap. 1.4.2 ab.

In der nachfolgenden Tabelle sind die zugeordneten Attribute der Gefährdungsbilder (Informationen) aufgeführt.

Tab. 11 Übersicht Informationsbereich GB.-Katalog

Information (Attribut)	Beschrieb Attribut	Art der Daten
Strukturierung Gefährdungsbilder		
ID GB.	Eindeutige ID (gemäss Gliederung GB, siehe Kap. 2.4.1)	Nummerierung GB-### (obligatorisch)
S. Nummer	Fortlaufende Nummerierung gem. Gliederungsstruktur EP1 (siehe Kap. 2.4.1)	Nummerierung ### (obligatorisch)
GB. Bezeichnung	Gefährdungsbild gem. Gliederungsstruktur EP1 (siehe Kap. 2.4.1) Eindeutige Bezeichnung des Gefährdungsbild	Freitext (obligatorisch)
Beschreibung	Beschrieb der GB. Enthält: • Beschreibung Gefährdungsbild / Versagensmechanismus • besondere Merkmale • grobe Aufzählung mit Gefährdungsbild zusammenhängender Schadensprozesse	Freitext (obligatorisch)
Zuordnung Schadensprozesse (S) / Bauteilarten (BWT x BA)		
S: Schadensprozess	Zuweisung zu Schadensprozessen, welche dem Gefährdungsbild zugrunde liegen können	Werteliste «ID Schadensprozesse» gem. Kap. 2.3.1 (Mehrfachzuweisung)

BWT x BA: Bauwerksteil- Bauart Kombination	Zuweisung zu Bauteilarten, welche vom Schadensprozess betroffen sein können	Werteliste «ID Bauteilarten» gem. Kap. 2.1.3 (Mehrfachzuweisung)
---	---	---

2.4.3 Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren

In Kap. 1.3.3 wurde dargelegt, dass eine der Herausforderungen darin besteht, die Auswertung und Interpretation der im Rahmen der Überwachung und Überprüfung gewonnenen Erkenntnisse (Bauwerksdaten, Befunde, Modellrechnungen, etc.) zukünftig standardisiert und systematisch in eine objektspezifische Risikobeurteilung einfließen zu lassen. Um dies zu ermöglichen, muss die Risikobeurteilung auf einer Ebene erfolgen, welche für das ganze Tunnelportfolio das kleinste gemeinsame Vielfache darstellt. Die Formulierung und Beschreibung dieser Ebene, schafft letztlich die Basis für die einheitliche, standardisierte und systematisierte Risikobeurteilung im Rahmen des Entscheidungsmodell durch EP4.

Für das Entscheidungsmodell wurde von EP4 ein Ansatz für die qualitative Risikobewertung basierend auf einem Bayes'schen Netzwerk gewählt. Ein ähnlicher Ansatz wird in [74] präsentiert. In enger Abstimmung mit EP4 wurden als Basis hierfür durch EP1 zu allen übergeordneten Gefährdungsbilder gemäss Kap. 2.4.1 Beziehungsstrukturen erarbeitet, welche die Abhängigkeiten der Einflussfaktoren der Gefährdungsbilder darstellen. Die erarbeiteten Beziehungsstrukturen sind in Anhang X ersichtlich. Diese Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren sind die Grundlage für EP4, um die Bayes'schen Netzwerke aufzustellen und die objektspezifischen Gefährdungsszenarien zu formulieren bzw. das Risiko zu beurteilen. In den Katalogblätter der einzelnen Gefährdungsbilder in V Katalogblätter Gefährdungsbilder (GB) sind die Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren schematisch erläutert. Das Konzept der Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren wird nachfolgend am Beispiel der Tragsicherheit beschrieben.

Für die qualitative Risikobewertung muss zuerst bestimmt werden, welche Einflussfaktoren sich wie auf die Eintretenswahrscheinlichkeit des objektspezifischen Gefährdungsszenarios auswirken. In der Realität sind die Abhängigkeiten zwischen den Einflussfaktoren bei einem bergmännischen Strassentunnel aufgrund der Gebirge-Bauwerks-Interaktion sehr komplex. Dies wird in der SIA 197 in Ziff. 7.1.4.1 (vgl. [16]) verdeutlicht, in welcher das Tragwerkskonzept eines Tunnels mit folgenden Angaben definiert wird: Gebirgs- und Baustoffeigenschaften, Form und Abmessungen von Ausbruchsicherung und Verkleidung, Abdichtungskonzept, Hinweise zu den vorgesehenen Bauverfahren, Ausbruchart, Ringschlusslänge und Ringschlusszeit, Bauhilfsmassnahmen, wichtige Konstruktionsdetails, Nutzungsdauer der verschiedenen Bauteile und Massnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit. Die Anzahl der im Bayes'schen Netzwerk qualitativ zu bewertenden Netzwerkknoten steigt exponentiell mit der Anzahl der darin berücksichtigten Einflussfaktoren an. Aus der vielfältigen Kombinatorik der erwähnten Einflussfaktoren des bestehenden Tunneltragwerks gemäss SIA 197, bzw. ohne zusätzlich Berücksichtigung der betrieblichen Einflussfaktoren, lässt sich bereits erkennen, dass für eine einheitliche und praxistaugliche Anwendung der Risikobeurteilung die Reduktion auf die massgebenden Einflussfaktoren hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit des Entscheidungsprozesses (vgl. Kap. 1.4.2) zweckmässig erscheint. Basierend auf der Erfahrung von EP1 wurden daher die massgebenden Einflussfaktoren bestimmt und nur diese in einer Beziehungsstruktur miteinander verknüpft. Eine schematische Darstellung einer Beziehungsstruktur der Einflussfaktoren für das Gefährdungsbild Tragwerkversagen ist in **Abb. 14** ersichtlich. Die darin ersichtlichen Pfeile stellen Verknüpfungen zwischen den Einflussfaktoren dar. Ausgehend von der Traglastreserve, welche aus den Bestandsdaten abgeleitet wird, kann durch eine Bewertung der Ausmasse der Schadensprozesse resp. der Einwirkung und des Widerstand die aktuelle Tragsicherheit für einen Tunnelblock oder eine bestimmte Bauteilart bewertet werden. Unter Berücksichtigung der Ausdehnung der Schädigung entlang des Tunnels, kann daraus schliesslich die objektspezifische Risikobeurteilung erfolgen.

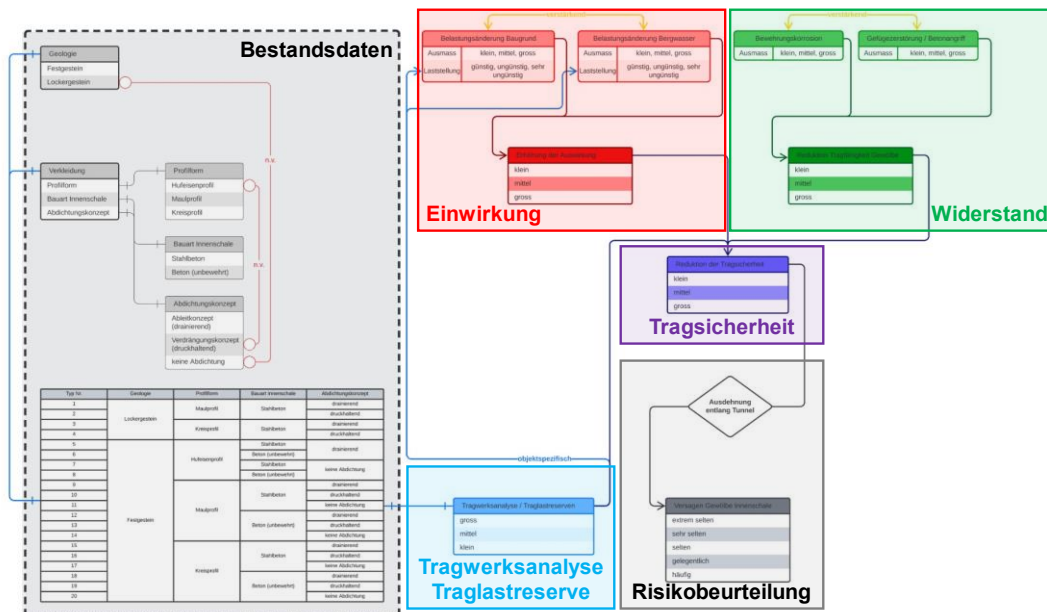


Abb. 14 Schematische Darstellung einer Beziehungsstruktur der Einflussfaktoren für Gefährdungsbild Tragwerksversagen

Wie bereits erwähnt stellt jede Verknüpfung zwischen den Einflussfaktoren und jede mögliche Charakterisierung einen Netzwerkknoten im Bayes'schen Netzwerk dar, welchen es für die Risikobeurteilung zu bewerten gilt. Die Bewertung erfolgt dabei rein qualitativ. So wird zum Beispiel der Einfluss der Bewehrungskorrosion aufgrund deren Ausmasses mit «klein», «mittel», «gross» bewertet. Für diese Bewertung können wiederum alle objektspezifisch zur Verfügung stehenden Informationen und Erkenntnisse verwendet werden. So kann das Ausmass der Bewehrungskorrosion z.B. anhand von Potentialfeldmessungen messtechnisch abgeschätzt, mittels Verfallsfunktion für die spezifischen Umgebungsbedingungen theoretisch hergeleitet oder basierend auf den visuellen Befunden bzw. anhand der angetroffenen Abplatzungen und Rostfahnen abgeschätzt werden. Die Bewertung der Bewehrungskorrosion fliesst wiederum auf der Widerstandseite (R_d) in die Beurteilung der Reduktion der Tragsicherheit und letztlich in die Risikobeurteilung eines Tragwerkversagens mit ein. Erfolgt die Bewertung der verschiedenen Einflussfaktoren systematisch und über mehrere Jahre (z. B. im Rahmen eines Monitoringkonzepts) so lässt sich der Verlauf der Risikobeurteilung bzw. des Risikos auch in Abhängigkeit der Zeit darstellen. Nimmt das Ausmass der Bewehrungskorrosion mit der Zeit zu, so reduziert sich in der Folge der Tragwerkswiderstand bzw. die Tragsicherheit ($SF_{t0} \rightarrow SF_{ti} \rightarrow SF_{tu}$, vgl. **Abb. 15**). Liegen nach einigen Bewertungszyklen genügend Daten in ausreichender Qualität vor, könnten theoretisch auch Prognosen hinsichtlich des zukünftigen Verlaufs des Risiko angestellt, und so gewissermassen der gefährdungsbildspezifische Verfall des Tunnels modelliert werden. Da die Risikobeurteilung in der gewählten Ebene für alle Tunnels gleich erfolgen kann, wird hierdurch eine homogene Datenbasis geschaffen. Die Prognosen des Risikoverlaufs verschiedener Tunnel könnten so direkt einander gegenübergestellt und in Abhängigkeit ihrer Inputparameter statistisch ausgewertet werden.

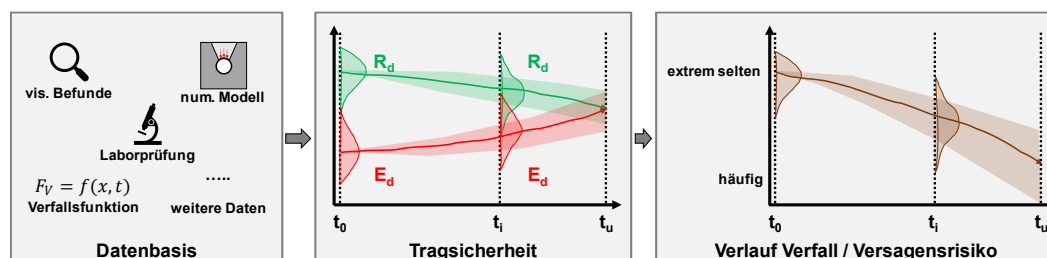


Abb. 15 Reduktion der Tragsicherheit im Verlauf der Zeit und Risikoverlauf

Abschliessend ist es wichtig festzuhalten, dass die erarbeiteten Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren eine starke Vereinfachung der Realität darstellen. Die kritische und ingenieurmässige Beurteilung der Datenbasis ist für eine korrekte Risikobeurteilung unabdingbar und mit dem jetzigen Stand der Technik nicht automatisierbar. Weiter ist festzuhalten, dass jede Bewertung eines Einflussfaktors mit einer gewissen Unsicherheit (z.B. Unkenntnis hinsichtlich Auslöser / Ursachen und begünstigenden Faktoren, Erfahrung der bewertenden Person, Genauigkeit und Aussagekraft der eingesetzten Untersuchungsmethoden, etc.) verbunden ist. Diese Unsicherheit sind in den erarbeiteten Beziehungsstrukturen in Anhang X nicht dargestellt. Sie führen jedoch zu einer Streuung (Spannbreite) bei der Bewertung, welche es bei der objektspezifischen Risikobeurteilung im Entscheidungsmodell durch EP4 zu berücksichtigen gilt. Die effektiven Bewertungskriterien und die Angabe der Unsicherheit bei deren Beurteilung (Spannbreite) sind durch EP4 im Rahmen der Risikobeurteilung festzulegen resp. durch die späteren Nutzer bei der Beurteilung anzugeben.

2.5 Aussagekraft und Grenzen der Kataloge

Wie im vorangegangenen Kap. 2.2 erläutert, müssen die in den Katalogen Schadensprozesse und Gefährdungsbilder verschiedenste, für die Zustandserfassung und Zustandsbeurteilung von bergmännischen Tunneln relevante Aspekte abdecken.

Die erarbeiteten Kataloge liefern detaillierte Informationen zu den für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozessen und deren möglichen Konsequenzen. In den Katalogen wird einerseits ein Bezug zum Bestand bzw. der Bauteilart und andererseits zu möglichen Ausprägungen der Schadensprozesse bzw. zu den auftretenden visuellen Befunden geschaffen. Zudem sind alle Kataloge und die darin enthaltenen Informationen über die Schadensprozesse und die Bauteilart mit den Katalogen von EP2 und EP3 verknüpft. Die Kataloge von EP1 dienen dadurch einerseits als strukturiertes Nachschlagewerk und als Basis für eine standardisierte Erhaltungsplanung.

Die Ausprägung der verschiedenen Schadensprozesse kann in Abhängigkeit der Initial- und Betriebsbedingungen sehr ähnlich sein. Dies gilt insbesondere dann, wenn sich zwei verschiedene Schadensprozesse an einem Ort überlagern. Weiter kann die Ausprägung desselben Schadensprozesses entlang des Tunnels oder innerhalb eines Bauwerkteils in Abhängigkeit der Initial- und Betriebsbedingungen stark variieren. Wie nachfolgend in Kap. 3.3.2 dargelegt, kann daher basierend auf der Ausprägung der Schadensprozesse bzw. den während der Inspektion angetroffenen visuellen Befunden in den allermeisten Fällen der zugrundeliegende Schadensprozess nicht eindeutig identifiziert werden. In der Regel sind hierfür weiterführende Untersuchungen nötig (vgl. Katalog Untersuchungsmethoden EP2 [54]). Mit dem in Kap. 3.3.2 erläuterten Vorgehensvorschlag, lassen sich aber die für die angetroffenen visuellen Befunde in Frage kommenden Schadensprozesse mit einem systematischen Ausschlussverfahren soweit möglich eingrenzen.

Im Schadensprozesskatalog sind Literaturverweise zu existierenden Verfallsfunktion enthalten. Diese Literaturverweise sind lückenhaft, da wie in Kap. 2.3.2 erwähnt nicht für alle relevanten Schadensprozesse solche Verfallsfunktionen existieren. Zudem sind die Resultate dieser Verfallsfunktionen stark von der Eignung der Funktion für die objektspezifischen Umweltbedingungen bzw. deren Einsatzgrenzen und verständlicherweise der Güte der Inputdaten abhängig.

Bei der Interpretation der zur Verfügung stehenden Informationen (visuelle und detektierbaren / messtechnischen Befunden, Bauwerksdaten, Auslöser / Ursachen und Einflussfaktoren, etc.) im Rahmen der objektspezifischen Risikobeurteilung ist insbesondere bei der Bewertung der Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren (vgl. Kap. 2.4.3) der Einfluss des Faktors «Mensch» von relevanter Bedeutung. Die erarbeiteten Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren schaffen jedoch eine Ebene zur einheitlichen und standardisierten und systematisierten Risikobeurteilung unabhängig vom betrachteten Tunnelobjekt oder von der mit der Erhaltungsplanung beschäftigten Personen. Dadurch wird im Verlauf der Anwendung eine stetig wachsende, homogenisierte Datenbasis aufgebaut, welche im Rahmen von weiterführenden Forschungsarbeiten statistisch

ausgewertet werden kann. Dies ermöglicht zukünftig gegebenenfalls die Herleitung genereller, empirischer Verfallsmodelle für bergmännische Strassentunnel.

3 Erkenntnisse und Folgerungen

3.1 Grundsätzliches

Gemäss dem Überblick zum Prozess Erhaltungsmanagement von Tunneln, u.a. aus der Literatur (vgl. Kap. 1.3) und aus der aktuellen Erarbeitung des vorliegenden Projekts geht hervor:

- Die Prozesse des Erhaltungsmanagements / der Erhaltungsplanung / des Asset Managements von Infrastrukturbauten sind international vergleichbar aufgebaut (vgl. Kap. 1.3.3). Jedoch gibt es Unterschiede, u.a. auch im deutschen Sprachraum (D-A-CH), bezüglich der Abgrenzungen der Prozesse und vor allem bei den Bezeichnungen;
- Der in diesem Forschungsprojekt behandelte «Teilprozess Überwachung» und seine Phasen / Teilgebiete, werden je nach Herkunft, z.B. Land, Norm / Richtlinie oder Organisation / Betreiber, unterschiedlich bezeichnet;
- Häufig werden im deutschen Sprachraum die Begriffe Zustandsaufnahmen, Zustandserfassung, auch Inspektionen für ähnliche oder gleiche Tätigkeiten verwendet, wobei nicht klar wird, ob jeweils dasselbe gemeint ist. Ähnliches gilt u.a. auch für die Begriffe wie Zustandsbeurteilung, Zustandsbewertung, Ermittlung Bauwerkszustand.
- Ähnliches gilt auch für die aktuelle Situation in der Schweiz. Dies kann an einzelnen Begriffen, die Gegenstand des EP2 sind, veranschaulicht werden:
 - Überwachung = Teilprozess des Erhaltungsmanagements gemäss Grundnorm [12]; in der geltenden ASTRA Richtlinie [1,2] zu Überwachung und Unterhalt, wird bei diesem Teilprozess zwischen den Phasen «Überwachung» und «Überprüfung» unterschieden (siehe Kap. 1.6.1). In beiden Phasen kommen Untersuchungsmethoden zum Einsatz;
 - Gemäss Projektvorgaben und der Grundnorm geht es um die Aufgabe / den Prozess des Erhaltungsmanagements [12] (u.a. in Österreich in vergleichbaren Projekten [23] als «Asset Management» bezeichnet). Gleichzeitig wird jedoch in der heutigen Praxis des ASTRA der Begriff «Erhaltungsplanung» verwendet, welcher sich z.B. im System KUBA nur auf die Massnahmenplanung beschränkt [3]. Die Fachbereiche Erhaltungsplanung des ASTRA, in der Verantwortung für die Instandhaltung der Tunnel, sind auch für den Teilprozess Überwachung und fürs «Asset Management» zuständig.

Die Folgerung dieser Erkenntnisse ist, dass bei der zukünftigen Weiterentwicklung des Erhaltungsmanagements, u.a. von Kunstbauten und von Tunneln, Widersprüche und Unklarheiten bei den Begrifflichkeiten bereinigt werden sollten. Dies auch im Hinblick, auch zukünftige Entwicklungen und Prozesse fürs «Asset Management», z.B. mit BIM.

3.2 Kompatibilität der Grundlagen mit bestehenden Daten und Planungsmethoden

Hinsichtlich der Bauwerksgliederung, der Schadensprozesse und der daraus folgenden möglichen Gefährdungen weisen die bisher verfügbaren Daten, u.a. aus KUBA [3] Ergänzungspotential auf, welches durch das vorliegende Forschungsprojekt aufgenommen wurde:

- Die in den KUBA-Katalogen «Infrastrukturobjekt» und «Bauart» aufgeführten Daten decken viele, aber nicht alle relevanten Bauwerksteile und Bauarten in bergmännischen Strassentunnel ab. Die vorhandenen Bezeichnungen sind zudem teilweise nicht eindeutig in Tunnelbauwerke übertragbar;
- Die im KUBA-Katalog «Schadensprozesse» aufgeführten Daten decken die für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadendprozesse ungenügend ab. Es handelt sich dabei meist nur um Sammelbegriffe für Schadensprozesse wie «Korrosion im Stahlbeton» (HCode 10), welche im neuen Grundlagenkatalog der Schadensprozesse (S.-Katalog) eher den übergeordneten Schadensprozestypen

entsprechen (S-## gemäss Kap. 2.3.1). Schadensprozesse in Zusammenhang mit dem Baugrund und dem Berg- / Grundwasser fehlen gänzlich. Die Bezeichnungen der Schadensprozesse sind teilweise verwirrend und entsprechen eher einem Befund als einem zugrundeliegenden Schadensprozesse z. B. «Ausblühungen» (HCode 30);

- In den vorliegenden KUBA-Katalogen sind in den Datensätzen keine Verknüpfung zwischen Schadensprozessen und den Bauwerksteilen, Bauarten und Untersuchungsmethoden zu erkennen. Es liegt kein KUBA-Katalog mit Gefährdungsbildern vor;
- Die im Schadensprozesskatalog aufgelisteten Auslöser / Ursachen sind vergleichbar mit den in KUBA vorhandenen Eigenschaftsreihen und lassen sich in diese integrieren. Teilweise sind die Auslöser / Ursachen in KUBA bereits erfasst (z.B. H.Code 231: nicht druckhaft resp. H.Code 232: Druckhaft).
- Die Umsetzung der Überwachung hat einen entscheidenden Einfluss auf die dabei erfassten Zustandsdaten und den ganzen Erhaltungsmanagement-Prozess:
 - Die Umsetzung des Teilprozesses Überwachung bei den Strassentunneln des ASTRA zeigt bezüglich Durchführung und Detaillierung Unterschiede auf, welche sich auf die Ergebnisse und vorhandenen Daten der Zustandsbeurteilungen auswirken. Dies zeigt die Praxiserfahrung aus verschiedenen Erhaltungsprojekten (u.a. auch der Fallbeispiele), wie auch bei den z.T. unvollständigen Daten in der heutigen KUBA-Datenbank. Dies resultiert vom oft projektspezifischen Vorgehen (vgl. Folgerungen Initialprojekt [67]) oder auch von der unterschiedlichen Handhabung der Überwachung durch die zuständigen Fachbereiche Erhaltungsplanung der ASTRA-Filialen;
 - Der Auswertung und Darstellung der Datenbasis (vgl. **Abb. 15** in Kap. 2.4.3) sowie einem einheitlichen Bewertungssystem der Einflussfaktoren kommt ein hoher Stellenwert zu. Eine gute Datengrundlage dient der Qualität der nachfolgenden Entscheide für die Massnahmenfestlegung im Erhaltungsmanagement-Prozess;
 - Ungeklärt ist unseres Erachtens die systematische «Übersetzung» der objektspezifisch ermittelten heterogenen Datenbasis (vgl. **Abb. 15** in Kap. 2.4.3) insbesondere der Resultate der Untersuchungsmethoden (vgl. EP2) als Inputdaten für die Identifikation von Schadensprozessen und die Bestimmung der massgebenden Gefährdungsbilder sowie der Formulierung der objektspezifischen Gefährdungsszenarien (vgl. EP4). Hier zeigt sich ein weiterer Entwicklungs- / Forschungsbedarf in der Schnittstelle EP1 / EP2 und dem Entscheidungsmodell von EP4. Heute stellen projekt- und objektspezifisch Fachpersonen diese Übersetzung sicher, was weder systematisch noch in jeden Fall nachvollziehbar ist. Dabei hat der «Faktor Mensch» besonders bei der Risikoeinschätzung der Gefährdungsbilder einen grossen, nicht einschätzbaren Einfluss.

Das vorliegende Forschungsprojekt liefert mit den BWT.- / BA.- / S.- und GB.-Katalogen ergänzende, weiterführende Daten und Informationen (auch im Sinne eines «Fachkataloges» gemäss KUBA), welche der Weiterentwicklung der praktischen Umsetzung des gesamten Erhaltungsmanagement-Prozesses für Tunnel zugutekommt.

3.3 Anwendung

3.3.1 Anwendung der Kataloge

Die Grundlagenkataloge «Schadensprozesse» (S.-Katalog) und «Gefährdungsbilder» (GB.-Katalog) wurden mit dem Fokus auf die verständliche, nachvollziehbare Darstellung der klar strukturierten Informationen erstellt.

Diese Kataloge machen Anwenderinnen und Anwendern, auch ohne vertiefte Spezialkenntnisse, detaillierte Informationen zu den diversen für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse zugänglich und geben ihnen einen Überblick, was für chemisch-physikalische Prozesse ablaufen, was deren Auslöser / Ursachen sind und welche Einflüsse beschleunigend oder verstärkend auf den Schadensprozess einwirken können.

Die praktische Anwendung des Katalogs wird durch die Gliederung und durch Such- und Filterfunktionen für den Vergleich und die Bestimmung vermuteter Schadensprozesse massgeblich unterstützt. Diese Funktionalitäten stehen bereits bei der aktuell vorliegenden einfachen Excel-Lösung zur Verfügung. Ergänzende Ausführungen dazu sind im Kap. 3.5 «Praktischer Nutzen» beschrieben.

Die Einbindung des S.-Katalogs und des GB.-Katalogs in die übergeordnet festgelegte Bauwerksgliederung sowie die Verknüpfung mit den Schadensprozessen stellt die Kompatibilität dieser Grundlagenkataloge mit dem ganzen Erhaltungsprozess (gemäss EP1 bis EP5) sicher.

Darstellung der Informationen des Grundlagenkatalogs für die Anwendung

Der S.-Katalog und GB.-Katalog als zentrale inhaltliche Ergebnisse des EP1 wurden, wie die verknüpften Grundlagenkatalogen von EP2 und von EP3, als Exceltabelle erstellt, in der die gemäss Kap. 2.3 und 2.4 strukturierten Informationen erfasst sind. Digital in der Excel-Applikation lassen sich im Katalog Informationen suchen und darstellen. In der umfassenden Tabelle können Schadensprozesse und Gefährdungsbilder nach bestimmten Kriterien vorhandener Attribute gefiltert, d.h. spezifisch angezeigt und ausgewählt werden.

Die Entwicklung einer Anwendung bzw. Applikation für die anwenderfreundliche Nutzung dieses Katalogs ist nicht Gegenstand des EP1. Dies ist für die praktische Anwendung als Bestandteil eines Nachfolgeprojekts angedacht, basierend auf den Ergebnissen aller fünf Einzelprojekte EP1 bis EP5 (vgl. dazu auch Kap. 1.7). Zum jetzigen Zeitpunkt ist noch nicht bestimmt, auf welche Art und zu welchem Zeitpunkt die Daten zu den Schadensprozessen und Gefährdungsbildern über eine Applikation anwenderfreundlich zur Verfügung gestellt werden können.

Darstellung der Schadensprozesse und Gefährdungsbilder als Katalogblätter

Der Ausdruck des S.-Katalogs und GB.-Katalogs auf Papier ist weder bezüglich des Formats praktikabel noch bezüglich Lesbarkeit anwenderfreundlich. Aus diesem Grund wurde vorgeschlagen, sämtliche Informationen der relevanten Schadensprozesse und Gefährdungsbilder (gemäss Kap. 1.7) in «Katalogblättern» abzubilden. Diese enthalten pro Schadensprozess und Gefährdungsbild sämtliche Informationen aus den Katalogen und zur Visualisierung typische Fotos bzw. Abbildungen. Diese Katalogblätter liegen dem vorliegenden Schlussbericht EP1 bei (Anhänge A3 und A5).

Aktualisierung des Grundlagenkatalogs mit neuen Informationen

Durch den strukturierten Aufbau der Kataloge können diese als Tabelle oder später in einer Anwendung als Applikation / Datenbank einfach mit aktualisierten Daten ergänzt werden. Dies unabhängig davon, ob bereits erfasste Informationen zu aktualisieren sind oder neue Schadensprozesse und Gefährdungsbilder ergänzt werden sollen. Der systematische Aufbau dieser Datensätze mit ihren Attributen macht möglich, dass auch zukünftig komplett neue Prozesse insbesondere in Zusammenhang mit neuen Werkstoffen auf die gleiche Weise vollständig erfasst werden können.

Datenformat für Migration und späteren Einsatz in einer Datenbank / Applikation

Der vollständige digitale Katalog wird als Exceldatei, inkl. den verknüpften Grundlagendaten von EP1, EP2 und EP3 abgegeben. Das dafür verwendete Microsoft Excel-Format ist eine sehr einfache, aber auch flexible Lösung, welche bezüglich zukünftigem Datenformat keine Präjudizien schafft. Es ermöglicht die Datenmigration genauso in eine KUBA- bzw. EP4-Entscheidungsmodell-Lösung [3, 34] wie in ein zukünftiges BIM-Common Data Environment (CDE).

Die aktuell in den Katalogen (BWT. / BA. / S. / GB.) verwendeten Bezeichnungen für die Codierung der Strukturierung u.a. mit alphanummerischen Zeichen, welche auch für die Verknüpfungen verwendet werden, sind nicht für jedes zukünftige Datenmodell optimal. Ist das Datenmodell des neuen Zielsystems bekannt, können die Daten dank den logisch aufgebauten Codes einfach bei der Migration in neue Anwendung übertragen werden.

Vergleichbare Überlegungen zu späteren Anpassungen bei den Datenformaten der Kataloginhalte gelten auch für die vorhandenen Freitexteingaben. Es gilt dabei zu beachten, dass die gespeicherten Daten vor allem Informationszwecken dienen (Nachschlagewerk).

3.3.2 Hinweise zu Anwendungsmöglichkeiten der Kataloge

Eingrenzung / Identifizierung vermuteter Schadensprozesse

Die Inspektion ist ein wesentlicher Bestandteil der Überwachung (vgl. **Abb. 8** in Kap. 1.6.1.). Ihr kommt – als einer der Ausgangspunkte im operativen Erhaltungsmanagement – hinsichtlich der Stabilität der nachfolgenden Erhaltungsentscheide eine besondere Bedeutung zu. Wie in Kap. 1.6.1 erwähnt, ist eine der wichtigsten Zielsetzungen der Inspektion, die entstandenen Schäden und die möglichen Schadensursachen sowie die gefährdeten Bauwerksteile frühzeitig zu erkennen. Die Inspektion erfolgt in der Regel visuell («U-1-100: Visuelle Inspektionen» in USM.-Katalog gemäss EP2 [54]). Durch die Inspektoren werden dabei an den verschiedenen Bauwerksteilen der bergmännischen Strassentunnel festgestellte Schäden bzw. visuelle Befunde aufgenommen und dokumentiert. Basierend auf den aufgenommenen Befunden und gegebenenfalls weiteren zur Verfügung stehenden Daten (z.B. frühere Inspektionsberichte, etc.) sollen die Inspektoren die möglichen Schadensursachen bzw. die vermuteten Schadensprozesse identifizieren bzw. zumindest einzugrenzen. Wie die Erfahrung zeigt, ist die folgerichtige Eingrenzung / Identifikation des Schadensprozesses im Rahmen der Inspektion nicht unwesentlich vom Faktor «Mensch» bzw. den Inspektoren (Ausbildung, Erfahrung, etc.) abhängig.

Um diese Eingrenzung / Identifikation der vermuteten Schadensprozesse zu systematisieren, wurden im S.-Katalog sämtliche Schadensprozesse mit möglichen, daraus folgenden visuellen Befunden verknüpft (vgl. Kap. 2.3.2). Bei dieser Werteliste der Befunde (BE.) handelt es sich um alle in bergmännischen Strassentunnel relevanten, mit blossen Auge, d.h. visuell während der Inspektion erkennbaren Befunde. Sie bilden einen Teil der insgesamt visuell und messtechnisch detektierbaren Befunde gemäss EP2 (Ergebnisse USM [54]). Die dem S.-Katalog von EP1 zugrundeliegende Werteliste der Befunde (BE) ist nachfolgend in **Tab. 12** ersichtlich. Die übergeordnete Struktur der Werteliste der Befunde orientiert sich am bestehenden KUBA-Katalog «Befunde», welcher analysiert und hinsichtlich der in bergmännischen Strassentunnel relevanten Befunde überarbeitet und teilweise ergänzt wurde. Der Vergleich der dem Forschungsprojekt zugrundeliegenden Werteliste mit dem KUBA-Katalog ist in Anhang IX ersichtlich. Jedem Befund wurde eine eindeutige ID zugewiesen. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Auswahlliste der Befunde nur visuell erkennbare Schäden bzw. Befunde enthält, welche die Folge eines Schadensprozesses gemäss Kap. 1.6.2 sind. Mängel am Bauwerk oder Schäden infolge von punktuellen, aussergewöhnlichen Ereignissen sind nicht enthalten.

Tab. 12 Visuelle Befunde und Befundgruppen

ID	Befundgruppe	Befund
BE-1000	Mechanische Integrität	
BE-1100	Setzungen, Verschiebungen, Verformungen, Hebungen	
BE-1101		Setzungen
BE-1102		Verschiebungen
BE-1103		Verformungen
BE-1104		Hebungen
BE-1200	Fugenversätze, Fugenöffnungen, Kantenausbrüche	
BE-1201		Fugenversätze / Fugenabsätze
BE-1202		Fugenöffnungen
BE-1203		Kantenausbrüche
BE-1300	Risse	
BE-1301		Netzrisse
BE-1302		Längsrisse
BE-1303		Querrisse
BE-1400	Abplatzungen	

BE-1500	Belagsschäden
BE-1501	Belagsrisse
BE-1502	Ausbrüche
BE-1503	Kornausbrüche
BE-1504	Schlaglöcher
BE-1505	Spurrinnen
BE-1506	Unebenheiten
BE-1600	Absanden der Betonoberfläche
BE-2000	Chemische Integrität
BE-2100	Korrosion
BE-2101	Rostfahnen / -flecken
BE-2102	Lokale Korrosion
BE-2103	Flächenhafte Korrosion
BE-3000	Undichtigkeit
BE-3100	Nassstellen, Tropfwasser, Wasserzutritte
BE-3101	Feuchtstellen
BE-3102	Lokale Nassstellen
BE-3103	Flächenhafte Nassstellen
BE-3104	Wasserzutritte (tropfend / fliessend)
BE-3105	Eisbildung
BE-3106	Mineralische Ausblühungen / Sinter
BE-4000	Funktionsstörung
BE-4100	Querschnittsverluste in Leitungen (Entwässerung)
BE-4200	Ausfällungen, Versinterungen
BE-4201	Ausfällungen
BE-4202	Versinterungen

Aufgrund der Verknüpfung können die Schadensprozesse den daraus resultierenden möglichen Befunden gegenübergestellt und deren Ausprägung so visualisiert werden. Dies ist nachfolgend in **Tab. 13** für die übergeordneten Befundgruppen dargestellt. Analog kann man auch für die untergeordneten Befunde vorgehen. So kann beispielsweise auch dem Rissbild Rechnung getragen werden, für erste Rückschlüsse auf die am wahrscheinlichsten in Frage kommenden Schadensprozesse. So sind z.B. Netzsrisse typische Befunde für die AAR und den Sulfatangriff. Anhand der Gegenüberstellung in **Tab. 13** ist erkennbar, dass die eindeutige Identifizierung der Schadensprozesse im Rahmen der Inspektion rein basierend auf visuellen Befunden ist in der Regel nicht möglich. Die eindeutige Identifikation erfordert in den meisten Fällen weiterführende Untersuchungsmethoden (vgl. USM.-Katalog gemäss EP2 [54]). Aufgrund der Verknüpfung der Schadensprozesse mit den Befunden, den Bauteilarten und vor allem der im S. Katalog aufgelisteten Auslöser / Ursachen je Schadensprozess lassen sich im Rahmen der Inspektion per Ausschlussverfahren die möglichen Schadensprozesse aber systematisch eingrenzen. Hierfür wird ein Vorgehen gemäss **Abb. 16** vorgeschlagen. Dieses Vorgehen wird nachfolgend erläutert.

Tab. 13 Gegenüberstellung der Schadensprozesse mit möglichen visuellen Befunden

Schadensprozess EP1		Befundgruppe								
		BE-1100 Setzungen, Verschiebungen, ...	BE-1200 Fugenversätze, Fugenöffnungen, ...	BE-1300 Risse	BE-1400 Abplatzungen	BE-1500 Belagsschäden	BE-1600 Absanden der Oberfläche	BE-2100 Korrosion	BE-3000 Undichtigkeit	BE-4100 Querschnittsverluste in Drainage- ...
S-1	Schadensprozess Stahlbeton									
S-11	Bewehrungskorrosion									
S-11.1	Karbonatisierung									
S-11.2	Lochfrasskorrosion / Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion									
S-11.3	Spannungsrissskorrosion, inter- / transkristalline Korrosion Bewehrungsstahl									
S-12	Betonangriff / Gefügezerstörung									
S-12.1	Alkali Aggregat Reaktion (AAR)									
S-12.2	Sulfatangriff intern									
S-12.3	Sulfatangriff extern									
S-12.4	chemisch lösender Angriff / Betonkorrosion									
S-12.5	Frost- / Tausalzschäden									
S-19	Ermüdung Stahlbeton									
S-19.1	Ermüdung Stahlbeton									
S-2	Schadensprozess Metall									
S-21	Metallkorrosion									
S-21.1	Flächenkorrosion (Rost)									
S-21.2	Lochfrasskorrosion									
S-21.3	Kontaktkorrosion / Spaltkorrosion									
S-21.4	Spannungsrissskorrosion, inter- / transkristalline Korrosion Metall									
S-29	Ermüdung Metall									
S-29.1	Ermüdung Metall									
S-3	Schadensprozess Baugrund									
S-31	Belastungsänderung Baugrund									
S-31.1	Entfestigung / Vernässung									
S-31.2	druckhaftes Gebirge									
S-31.3	Baugrundverformungen Lockergestein									
S-31.4	Tonquellen / Quellprozess in Tonmineralien									
S-31.5	Sulfatquellen / Quellprozess in Anhydrit									
S-4	Schadensprozess Berg- / Grundwasser									
S-41	Belastungsänderung Berg- / Grundwasser									
S-41.1	Wasserdruckaufbau									
S-41.2	fortschreitender Verlust Abflusskapazität									
S-5	Schadensprozess Kunststoff									
S-51	Beschädigung / Alterung Kunststoff									
S-51.1	Beschädigung / Alterung Abdichtung									
S-6	Schadensprozess Fahrbahn									

S-61	Beschädigung Strassenoberbau
S-61.1	Belagsverformungen
S-61.2	Belagsschäden
S-61.3	Strukturelle Schäden

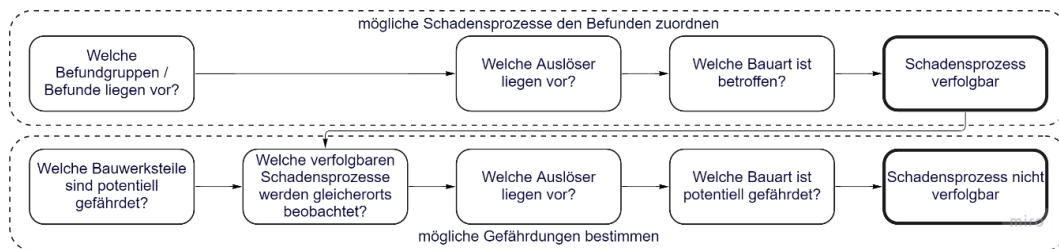


Abb. 16 Vorgehensvorschlag zur systematischen Eingrenzung der möglichen Schadensprozesse basierend auf visuellen Befunden im Rahmen der Inspektion

Der Vorgehensvorschlag gemäss **Abb. 16** basiert auf dem Entscheidungsbaumansatz. Durch hierarchisch aufeinanderfolgende Fragestellungen werden die in Frage kommenden Schadensprozesse systematisch eingegrenzt. Die Systematik ist zweistufig aufgebaut. In einem ersten Schritt werden die erfassten Befunde den möglichen Schadensprozessen zugeordnet. Dieser Schritt bezieht sich nur auf einsehbare Bauteilarten und visuell erkennbare Schadensprozesse resp. verfolgbare Schadensprozesse. In einem zweiten Schritt werden systematisch alle nicht einsehbaren Bauteilarten und visuell nicht erkennbaren Schadensprozesse resp. nicht verfolgbaren Schadensprozesse beurteilt und somit die möglichen Gefährdungen (in KUBA [3] bisher mit «9 Zustand nicht überprüfbar» bzw. «91 Gefährdung unwahrscheinlich» und «92 Gefährdung wahrscheinlich» bewertet) bestimmt.

Zu Beginn werden wie vorgängig erwähnt die erfassten Befundgruppen / Befunde analysiert. Je nach erfassten Befundgruppen / Befunden lassen sich einzelne Schadensprozesse bereits zu Beginn ausschliessen. So lässt sich z.B. beim Absanden der Betonoberfläche direkt auf den Schadensprozess «S-12 Betonangriff / Gefügezerstörung» schliessen. Anschliessend werden die vor Ort erfassten oder in der Bauwerksdatenbank hinterlegten Auslöser und Bauarten analysiert und die möglichen Schadensprozesse weiter reduziert. «S-11.1 Karbonatisierung» kann z.B. bei Stahlbeton nur auftreten, wenn die Passivschicht des Bewehrungsstahls zerstört, sowie Feuchtigkeit und Sauerstoff verfügbar ist (vgl. **Abb. 17**). Analog verhält es sich mit der Analyse der betroffenen Bauarten. «S-11 Bewehrungskorrosion» kann nur bei Stahlbeton- oder Spannbetonkonstruktionen auftreten (vgl. **Abb. 18**). Mit der systematischen Analyse der Auslöser und der betroffenen Bauarten, lassen sich somit Schritt für Schritt die in Frage kommenden visuell verfolgbaren Schadensprozesse den am betrachteten Bauwerksteil auftretenden Befunden zuordnen.



Abb. 17 Ausschlusskriterium Auslöser «S-11.1 Karbonatisierung»



Abb. 18 Ausschlusskriterium Bauart «S-11 Bewehrungskorrosion»

Analog kann man auch bei den Gefährdungen resp. den visuell nicht verfolgbaren Schadensprozesse und nicht einsehbaren Bauwerksteilen vorgehen. Im Unterschied zu

den verfolgbaren Schadensprozessen liegen bei den nicht verfolgbaren Schadensprozessen aber keine Befunde resp. keine Beweise für einen tatsächlich ablaufenden Schadensprozess vor. Die Eingrenzung der möglichen Gefährdungen basiert demnach auf Vermutungen. Hierzu werden zu Beginn bei allen potentiell gefährdeten Bauwerksteilen eines bergmännischen Strassentunnels die möglichen Schadensprozesse zugeordnet. Anschliessend werden die bereits im ersten Schritt gleichenorts vermuteten verfolgbaren Schadensprozesse analysiert, da einige Schadensprozesse bezogen auf den Tunnelblock nicht nur lokal, sondern systematisch auftreten. So ist es z.B. eher unwahrscheinlich, dass aufgrund von «S. 61.3 strukturelle Schäden» in der Fundationsschicht Schäden auftreten, ohne dass es im Deckbelag zu Verformungen und Rissen kommt. Die anschliessende Analyse der Auslöser und der Bauarten erfolgt für alle Gefährdungen analog zu den verfolgbaren Schadensprozesse in der ersten Stufe. Mit dieser systematischen Analyse der potentiell gefährdeten Bauwerksteile, den gleichenorts festgestellten / vermuteten verfolgbaren Schadensprozesse, sowie Auslöser und betroffenen Bauarten, lassen sich basierend auf den Inspektionsdaten die nicht verfolgbaren Schadensprozesse bzw. die potentiellen Gefährdungen bestmöglich eingrenzen.

Der Vorgehensvorschlag lässt sich mit den erarbeiteten Katalogen aufgrund der Verknüpfungen zwischen den Bauwerksteilen (BWT), Bauarten (BA), Schadensprozessen (S) und den entsprechenden Ausprägungen der Schadensprozesse bzw. den Befunden (BE) relativ einfach in einer Datenbank umsetzen. Mit systematischen und standardisierten Abfragen gemäss dem Schema in **Abb. 16** wird die in Frage kommende Schnittmenge der Schadensprozesse automatisch reduziert, sodass am Schluss nur noch wenige und vor allem logische Auswahlmöglichkeiten bestehen. Mit den systematischen Abfragen gemäss dem Vorgehensvorschlag wird zudem vermieden, dass aufgrund weniger, aber offensichtlicher Befunde (z.B. BE-2100 Korrosion) einzelne Schadensprozesse zu stark in den Vordergrund rücken und andere, parallel ablaufenden Schadensprozesse vernachlässigt oder übersehen werden, obwohl gegebenenfalls genau diese massgebend sind. Die Fehlerquelle bei der Erstauswahl der möglichen Schadensprozesse im Rahmen der Inspektion wird reduziert und damit die Folgerichtigkeit und Stabilität der nachfolgenden Erhaltungsentscheide erhöht.

Beurteilung Bestand anhand Tragwerks- / Tunneltypologien

Wie in 2.4.3 erläutert werden für die praxistaugliche Umsetzung und Anwendung der qualitativen Risikobeurteilung in einem Bayes'schen Netzwerk sowie hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit der daraus resultierenden Erhaltungsentscheide in den Beziehungsstrukturen nur die massgebenden Einflussfaktoren eines Gefährdungsbild zueinander in Beziehung gesetzt. Zur einheitlichen und praxistauglichen Abbildung der Vielzahl an in der Realität vorkommenden Tunneltragwerken und Nebentragwerken (Zwischendecke, WELK / Fahrbahnplatte) wurden daher durch EP1 unterschiedliche Tragwerks- / Tunneltypologien formuliert. Die Typologien stellen die in der Realität vorkommenden Tragwerkskonzepte in einer vereinfachten und übergeordneten Ebene dar. Es handelt sich hierbei um logische Kombinationen aus verschiedenen relevanten Tragwerksbestandteile / -konzepte. Die den Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren zugrunde gelegten Typologien sind für die Tragwerksbestandteile eines Tunnels und dessen Nebentragwerke gemäss Kap. 2.1.3 in den nachfolgenden Tabellen ersichtlich.

Tab. 14 Tragwerkstypen Gewölbe

Typ Nr.	Geologie	Profilform	Bauart Innenschale	Abdichtungskonzept
1	Lockergestein	Maulprofil	Stahlbeton	Drainierend
2				Druckhaltend
3		Kreisprofil		Drainierend
4				druckhaltend
5	Festgestein	Hufeisenprofil	Stahlbeton	Drainierend
6			Beton (unbewehrt)	
7			Stahlbeton	Keine Abdichtung
8			Beton (unbewehrt)	
9		Maulprofil	Stahlbeton	Drainierend
10				Druckhaltend

11			Keine Abdichtung
12			Drainierend
13		Beton (unbewehrt)	Druckhaltend
14			Keine Abdichtung
15			Drainierend
16		Stahlbeton	Druckhaltend
17			Keine Abdichtung
18	Kreisprofil		Drainierend
19		Beton (unbewehrt)	Druckhaltend
20			Keine Abdichtung

Tab. 15 Tragwerkstypen Fundament / Sohlgewölbe

Typ Nr.	Geologie	Fundationstyp	Bauart Fundament	Abdichtungskonzept
1	Lockergestein	Sohlgewölbe / Sohlplatte	Stahlbeton	Drainierend
2			Beton (unbewehrt)	Druckhaltend
3			Stahlbeton	Drainierend
4	Festgestein	Streifenfundament	Beton (unbewehrt)	Drainierend
5			Stahlbeton	Keine Abdichtung
6			Beton (unbewehrt)	Keine Abdichtung
7		Sohlgewölbe / Sohlplatte		Drainierend
8			Stahlbeton	Druckhaltend
9				Keine Abdichtung
10				Drainierend
11			Beton (unbewehrt)	Druckhaltend
12				Keine Abdichtung

Tab. 16 Tragwerkstypen Zwischendecke

Typ Nr.	Statische Bestimmtheit	Bauart Zwischendecke	Lagerart
1	Einfeldträger	Stahlbeton	Linienlager
2		Spannbeton	
3		Stahlbeton	
4	Zweifeldträger		Punktlager
5		Spannbeton	Linienlager
6			Punktlager
7	Dreifeldträger	Stahlbeton	Linienlager
8			Punktlager
9		Spannbeton	Linienlager
10			Punktlager

Tab. 17 Tragwerkstypen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte

Typ Nr.	Statische Bestimmtheit	Bauart WELK	Lagerart
1	Einfeldträger	Stahlbeton	Linienlager
2	Zweifeldträger		Linienlager
3			Punktlager
4	Dreifeldträger		Linienlager
5			Punktlager
6	Rahmentragwerk		Linienlager

Basierend auf diesen Tragwerks- / Tunneltypologien kann die Beurteilung der bestehenden Tragwerke bzw. des Ist-Zustands / Initialzustand erfolgen. Das Vorgehen wird am Beispiel des Gefährdungsbild «GB-11 Versagen Gewölbe» veranschaulicht. Beim Tunneltyp Nr. 4 bzw. einem kreisrunden Tunnel im Lockergestein, aus Stahlbeton und mit einer druckhaltenden Abdichtung (Verdrängungskonzept), kann davon ausgegangen werden, dass dieser auf die vorherrschenden, erwarteten Erd- / Wasserdrücke bemessen und die Tragwerksdimensionen (Gewölbestärke, etc.) und die Materialisierung (Beton-druckfestigkeiten, etc.) somit den örtlichen Gegebenheiten entsprechend gewählt wurden. Ein kreisrundes Tunnelprofil weist unabhängig von der Belastungsrichtung (z.B. asymmetrischen Belastungen statisch) ein gutes Tragverhalten auf. Bei einer normgemässen Bemessung zeigen Stahlbetontragwerke zudem ein duktileres Versagen und weisen im Allgemeinen grössere systeminterne Tragreserven auf die mobilisiert werden können bevor es tatsächlich zu einem Tragwerksversagen kommt (Kraftumlagerungen,

etc.). Bei diesem Tunneltyp handelt es sich qualitativ entsprechend um ein robustes Tunneltragwerk.

Der Tunneltyp Nr. 6 bzw. ein unbewehrtes Hufeisenprofil im Festgestein mit einer drainierenden Abdichtung (Ableitkonzept) ist primär auf Belastungen im Bereich des Tunnelfirstes ausgelegt. Bei horizontalen Belastungen oder Bettungsverlusten infolge Aufweichung / Vernässung im Paramentbereich zeigt dieser Tunneltyp hingegen ein schlechtes Tragverhalten. Obwohl auch in diesem Fall die Tragwerksdimensionen und die Materialisierung anhand der örtlichen Gegebenheiten gewählt wurde, sind Wasserdrücke aufgrund der drainierenden Abdichtung in der Bemessung nicht berücksichtigt. Kommt es nun wider Erwarten zu einem Wasseraufstau hinter dem Gewölbe, liegt plötzlich ein Lastfall vor, auf welchen das Tragwerk implizit nicht ausgelegt ist. Die unbewehrte Innenschale hat im Allgemeinen geringere systeminterne Tragreserven und neigt zudem zu einem spröderen Versagen verglichen mit einem Stahlbetontragwerk.

Die Tunneltypologien sagen nichts über die effektiv vorherrschenden Traglastreserven aus, welche objektspezifisch basierend auf der vorliegenden Datenbasis (z.B. vis. Befunde, num. Modell, Laborprüfungen, etc.) zu beurteilen sind. So wird zum Beispiel der Tunneltyp Nr. 6 oftmals aufgrund dessen Wirtschaftlichkeit im standhaften Fels eingebaut, wo es quasi unbelastet ist und in erster Linie als Abdichtungsträger dient. Die effektive Tragwerksauslastung ist in diesem Fall gering bzw. die Traglastreserven gross. Dennoch ist anhand der Gegenüberstellung der Tunneltypen Nr. 4 und Nr. 6 erkennbar, wie sich das Tragverhalten und die Robustheit grundsätzlich unterscheidet. Sie stellen demnach gewissermassen unterschiedliche Verteilungsformen und Streuungen (in **Abb. 19** gestrichelt dargestellt) bei der Beurteilung der Tragsicherheit resp. der Risikobeurteilung dar. Die Beurteilung der Typologien der Nebentragwerke bzw. der Zwischendecke und des Werkleitungskanals / Fahrbahnplatte erfolgt analog, wobei dort die systeminternen Traglastreserven anders als beim Tunneltragwerk nicht von der Profilform sondern in erster Linie von der statischen Bestimmtheit geprägt sind.

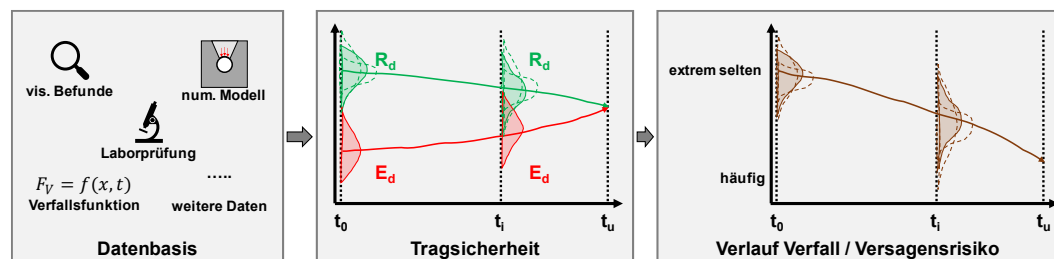


Abb. 19 Visualisierung Einfluss unterschiedlicher Tragwerks- / Tunneltypen auf Beurteilung der Tragsicherheit im Verlauf der Zeit und auf Risikoverlauf

3.3.3 Anwendungsbeispiel

Das Anwendungsbeispiel erfolgt anhand des Fallbeispiels Tunnel Gotschna (A28, Kanton Graubünden, Eröffnung 09.12.2005). Die technischen Daten dieses Fallbeispiels sind in Anhang I ersichtlich. Es handelt sich um einen 4.2 km langen Gegenverkehrstunnel, welcher in den Jahren 2019 – 2020 in zwei Zonen aufgrund Quellprozessen eine umfangreiche Instandsetzung erfahren hatte. Im nachfolgenden Beispiel werden die in Kap. 3.3.2 erläuterten Anwendungsmöglichkeiten praxisbezogen angewandt. Das Beispiel beschränkt sich auf die in **Abb. 20** dargestellten Tunnelblöcke 206 – 213.

Studium der Bauwerksdatenbank

Der betrachtete Tunnelabschnitt liegt in der Überganszone zwischen dem Bündnerschiefer und der sogenannten Mélange. Während dem Vortrieb wurden in diesem Tunnelabschnitt teilweise stark kakiritisierte Bereiche und an mehreren Stellen Quellen mit stark mineralisierten Bergwässern festgestellt. Zudem wurden in der Mélange quellfähige, sulfathaltige Gesteine nachgewiesen. In den betrachteten Blöcken wurde ein unbewehrtes Sohlgewölbe mit einem Ableitkonzept erstellt. Im Rahmen des Anwendungsbeispiels wird

angenommen, dass diese Informationen in der Bauwerksdatenbank hinterlegt und zugänglich sind.

Erfassung der visuellen Befunde

Im Rahmen der Hauptinspektion 2015 wurden die in **Abb. 20** und **Abb. 21** ersichtlichen visuellen Befunde aufgenommen. Dargestellt sind die an den Paramenten resp. Tunnelwänden, der Untersicht der Zwischendecke, den Banketten und der Fahrbahn aufgenommenen Befunde. Speziell zu erwähnen sind die mit blossen Auge erkennbaren Hebungen im Bankettbereich. Im Firstgewölbe und im Lüftungskanal wurden nur wenige Befunde erfasst und werden darum im vorliegenden Beispiel vernachlässigt. Die erfassten Befundgruppen sind in **Tab. 18** mit der davon betroffenen BWT-Ebene gemäss Kap. 2.1.1 gegenübergestellt.

Tab. 18 Anwendungsbeispiel Erfassung visuelle Befunde und Befundgruppen

ID	Befundgruppe / Befund	Gew	Fab	Ban
BE-1000	Mechanische Integrität			
BE-1100	Setzungen, Verschiebungen, Verformungen, Hebungen			✗
BE-1200	Fugenversätze, Fugenöffnungen, Kantenausbrüche			
BE-1300	Risse	✗		✗
BE-1400	Abplatzungen			✗
BE-1500	Belagsschäden		✗	
BE-1600	Absanden der Betonoberfläche			
BE-2000	Chemische Integrität			
BE-2100	Korrosion	✗		
BE-3000	Dichtigkeit			
BE-3100	Nassstellen, Tropfwasser, Wasserzutritte	✗		✗
BE-4000	Funktionsstörung			
BE-4100	Querschnittsverluste / -verengungen Leitungen			
BE-4200	Ausfällungen, Versinterungen			

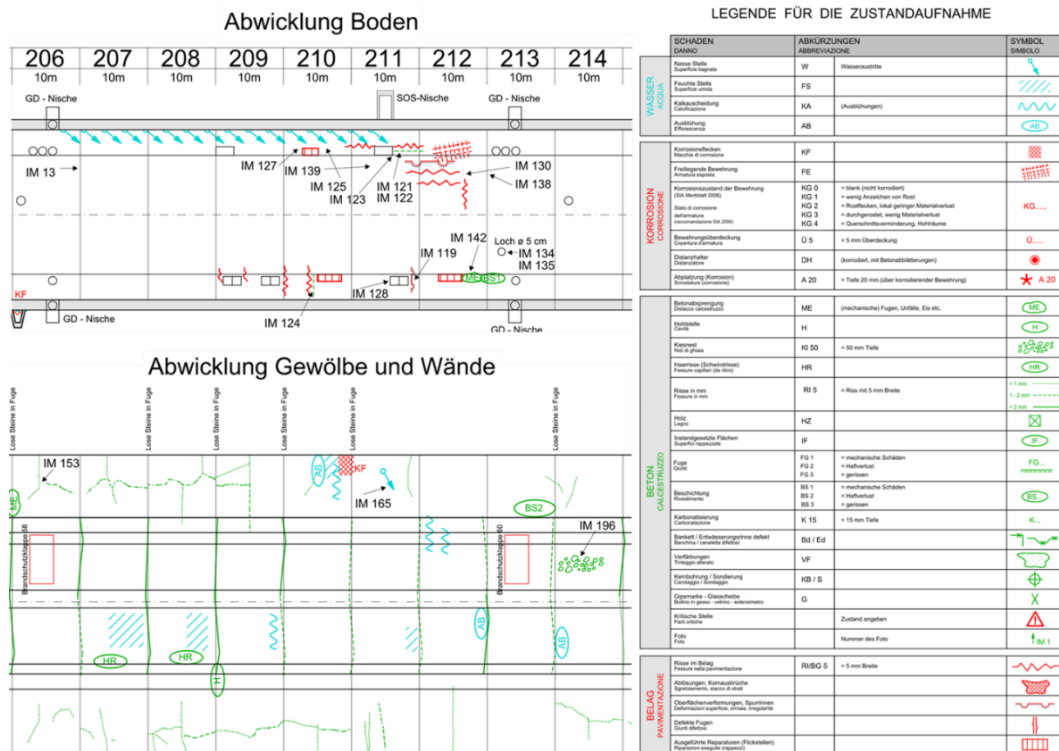


Abb. 20 Befundaufnahme Hauptinspektion 2015 N28 Tunnel Gotschna (Ausschnitt Schadenplan)



Abb. 21 Befundaufnahme Hauptinspektion 2015 N28 Gotschnatunnel (Ausschnitt Fotodokumentation)

Eingrenzung / Identifizierung vermuteter Schadensprozesse

Über die systematischen Abfragen gemäss dem Vorgehensvorschlag in **Abb. 16** können nun die möglichen Schadensprozesse eingegrenzt werden. Die Analyse der Auslöser / Ursachen und der betroffenen Bauarten führt zum Schluss, dass es sich um keine ermüdungsbeanspruchten Bauwerksteile handelt und somit der Schadensprozess «S-19 Ermüdung Stahlbeton» ausgeschlossen werden kann. Weiter liegt der Tunnel nicht im Lockergestein und es konnten im Baugrund keine quellfähigen Tongesteine / Mergel nachgewiesen werden. Die Schadensprozesse «S-31.3 Baugrundverformungen Lockergestein» und «S- 31.4 Tonquellen / Quellprozess in Tonmineralien» können somit auch ausgeschlossen werden. Mit Ausnahme des Konsolkopf beim Zwischendeckenaufleger handelt es sich zudem bei allen betroffenen Bauwerksteilen um unbewehrte Betonkonstruktionen. Die intensive Rissbildung im Gewölbe kann nicht auf den Schadensprozess «S-11 Bewehrungskorrosion» zurückgeführt werden, d. h. es muss ein anderer massgebender Schadensprozess vorliegen. Aufgrund der Lage in der Tunnelmitte (Temperaturen über Gefrierpunkt, kein Wasser auf der Fahrbahn) und des jungen Bauwerkalters bzw. der damit verbundenen geringen kumulierten Verkehrsbelastung ist es zudem eher unwahrscheinlich, dass die festgestellten Belagsrisse (siehe **Abb. 21** Foto 130) auf den Schadensprozess «S-61 Beschädigung Strassenoberbau» zurückzuführen sind. Die festgestellten Befundgruppen / visuellen Befunden sind in **Tab. 19** den noch möglichen Schadensprozessen gegenübergestellt. Wichtig zu erwähnen ist, dass der Schadensprozess «S-12 Betonangriff / Gefügezerstörung» zwar Schäden der Befundgruppe «BE-1100 Setzungen, Verschiebungen, Verformungen, Hebungen» verursachen können, jedoch zu keinen «BE-1104 Hebungen» zur Folge haben. In der Darstellung mit den übergeordneten Befundgruppen in **Tab. 19** ist dies zwar nicht ersichtlich, jedoch im S.-Katalog mit logischen Verknüpfungen zu einzelnen Befunden auf der tieferen Gliederungsebene ausgeschlossen. Die Ursache für die Hebungen im Bankettbereich muss entweder auf Belastungsänderungen im Baugrund oder im Berg- / Grundwasser zurückgeführt werden. Es lässt sich somit bereits erkennen, dass die Schadensprozesse «S-31 Belastungsänderung Baugrund» und «S-41 Belastungsänderung Berg- / Grundwasser»

die erfassten Befunde gut erklären würde. Das heisst aber nicht, dass die anderen noch möglichen Schadensprozesse dadurch direkt ausgeschlossen werden können.

Tab. 19 Anwendungsbeispiel mögliche Schadensprozesse den Befunden zuordnen

Schadensprozess EP1		Befundgruppe									
		BE-1100 Setzungen, Verschiebungen, ...	BE-1200 Fugenversätze, Fugenöffnungen, ...	BE-1300 Risse	BE-1400 Abplatzungen	BE-1500 Belagsschäden	BE-1600 Absanden der Oberfläche	BE-2100 Korrosion	BE-3000 Undichtigkeit	BE-4100 Querschnittsverluste in Drainage- ...	BE-4200 Ausfällungen, Versinterungen
S-1	Schadensprozess Stahlbeton										
S-12	Betonangriff / Gefügezerstörung			X	X						
S-12.1	Alkali Aggregat Reaktion (AAR)			X	X						
S-12.2	Sulfatangriff intern			X	X						
S-12.3	Sulfatangriff extern			X	X						
S-12.4	chemisch lösender Angriff / Betonkorrosion			X	X						
S-12.5	Frost- / Tausalzschäden			X	X						
S-3	Schadensprozess Baugrund										
S-31	Belastungsänderung Baugrund	X		X	X	X					
S-31.1	Entfestigung / Vernässung	X		X	X	X					
S-31.2	druckhaftes Gebirge	X		X	X	X					
S-31.5	Sulfatquellen / Quellprozess in Anhydrit	X		X	X	X					
S-4	Schadensprozess Berg- / Grundwasser										
S-41	Belastungsänderung Berg- / Grundwasser	X		X	X	X			X		
S-41.1	Wasserdruckaufbau	X		X	X				X		
S-41.2	fortschreitender Verlust Abflusskapazität					X			X		
S-5	Schadensprozess Kunststoff										
S-51	Beschädigung / Alterung Kunststoff								X		
S-51.1	Beschädigung / Alterung Abdichtung								X		
S-6	Schadensprozess Fahrbahn										
S-61	Beschädigung Strassenoberbau										
S-61.1	Belagsverformungen										
S-61.2	Belagsschäden										
S-61.3	Strukturelle Schäden										

Nachdem die möglichen Schadensprozesse basierend auf den angetroffenen Befunden bzw. die verfolgbaren Schadensprozesse eingegrenzt wurden, werden die potentiell gefährdeten Bauwerksteile bzw. die nicht verfolgbaren Schadensprozesse analysiert. Aufgrund des noch jungen Bauwerksalters zum Zeitpunkt der Hauptinspektion ist es eher unwahrscheinlich, dass die Lebensdauer des Abdichtungssystems bereits erreicht ist. Da in den Gewölbedrainagenischen keine Anzeichen von problematischen Versinterungen oder unzureichenden Abflusskapazitäten festgestellt wurden, ist auch der «S-41-2 fortschreitender Verlust Abflusskapazität» in den nicht einsehbaren Gewölbedrainageleitungen eher unwahrscheinlich. Die erfassten Wasserzutritte sind daher eher eine Folge der lokalen Schädigung aufgrund des Einbaus eines Gleitmikrometers (siehe **Abb. 21** Foto 165) bzw. eines Mangels und nicht die Ursache eines Schadensprozesses.

Weiter ist aufgrund des Bauwerkalters auch davon auszugehen, dass die kritische Anzahl der ermüdungsrelevanten Lastwechsel der Zwischendecke noch nicht erreicht ist und somit «S-19 Ermüdung Stahlbeton» auch bei der Zwischendecke ausgeschlossen ist. Bei den verbleibenden potentiell gefährdeten Bauwerksteilen handelt es somit noch um das Sohlgewölbe und die nicht einsehbaren Schichten des Strassenoberbaus. Mit der Analyse der gleichenorts beobachteten verfolgbaren Schadensprozesse lässt eine Gefährdung der nicht einsehbaren Schichten des Strassenoberbaus unwahrscheinlich erscheinen, da der Schadensprozess «S-61 Beschädigung Strassenoberbau» als Ursache für die Belagsrisse im Deckbelag bereits im vorherigen Schritt ausgeschlossen wurde. Die Analyse der Auslöser / Ursachen und der Bauart lässt in diesem Beispiel keine weitere Eingrenzung der Gefährdungen zu. Das einzige verbleibende und potentiell durch «S-31 Belastungsänderung Baugrund» und «S-41 Belastungsänderung Berg- / Grundwasser» gefährdete Bauwerksteil ist somit das Sohlgewölbe.

Bestimmung der Gefährdungsbilder

Ausgehend von den identifizierten Schadensprozessen und Gefährdungen lassen sich nun unter Berücksichtigung der betroffenen Bauteilarten die Gefährdungsbilder ableiten. Diese sind zusammenfassend in **Tab. 20** aufgelistet. Basierend auf diesen Gefährdungsbildern kann nun im Entscheidungsmodell eine Risikobeurteilung durchgeführt werden. Ein mögliches Resultat einer solchen Risikoanalyse könnte beispielsweise sein, dass die Gefährdungsbilder infolge des Schadensprozesses «S-12 Betonangriff / Gefügezerstörung» ein eher geringes Risiko aufweisen, da eine systematische Schädigung der Abdichtung unwahrscheinlich ist und somit das Gewölbe nicht grossflächig mit betonaggressivem Bergwasser in Kontakt steht und keine weiteren Auslöser / Ursachen für diesen Schadensprozess erfasst wurden. Weiter kann aufgrund des geringen festgestellten Wasseranfalls und den Temperaturen über dem Gefrierpunkt geurteilt werden, dass das Risiko von «GB-24 Feuchtigkeit / Eisbildung» sehr klein ist.

Aufgrund der Verknüpfungen des Schadensprozesskatalogs (EP1) mit dem Katalog der Untersuchungsmethoden (EP2) können anschliessend z. B. die zweckmässigen zu treffenden Untersuchungsmethoden bestimmt werden. Im Fall des Tunnel Gotschna wurden z.B. Kanal-TV Aufnahmen durchgeführt, Betonproben entnommen, eine messtechnische Überwachung installiert, Gleitmikrometer eingebaut, etc. Hierzu ist zu erwähnen, dass aufgrund der festgestellten quellfähigen, sulfathaltigen Gesteine bereits nach Abschluss der Vortriebsarbeiten eine messtechnische Überwachung installiert wurde und somit unabhängig vom Ergebnis der ersten Hauptinspektion auf umfangreiche Überwachungsdaten zurückgegriffen werden konnte. Es war daher bereits sehr früh klar, dass die angetroffenen Schäden bzw. Befunde auf «S-31 Belastungsänderung Baugrund» zurückgeführt werden können. Dass weitere Schadensprozesse mit ähnlichen Ausprägungen wie «S-12 Betonangriff / Gefügezerstörung» und «S-41 Belastungsänderung Berg- / Grundwasser» parallel dazu abliefen, konnte mittels den Kanal-TV-Aufnahmen und den Betonprüfungen ausgeschlossen werden. Mittels geotechnischen und statischen Rückrechnungen sowie der Auswertung der Gleitmikrometer, Kernbohrungen, Dünnschliffanalysen und Quellversuchen konnte zudem der Schadensprozesstyp «S-31.5 Sulfatquellen / Quellprozess in Anhydrit» als massgebender Schädigungsprozess bestimmt und dem Instandsetzungsprojekt zugrunde gelegt werden. Unter Berücksichtigung aller Bestandsdaten, visuellen und messtechnisch detektierbaren Befunden, den Resultaten aus den Laborprüfungen und den Rückrechnungen konnte die Gefährdungsbilder «GB-21 unzulässige Verformungen Tragwerk» und «GB-22 Fahrkomfort / Ablenkung» als massgebend für das Massnahmenprojekt bestimmt werden. Basierend auf den mehrjährigen Überwachungsmessungen konnte zudem eine Prognose der Hebungsraten bzw. Verformungen erstellt und der zukünftige Verfall modelliert werden.

Tab. 20 Anwendungsbeispiel Bestimmung Gefährdungsbilder

Gefährdungsbild EP1		Konsequenzen	
		kurzfristig	langfristig
GB-1	Tragsicherheit		
GB-11	Versagen Gewölbe		X
GB-111	Versagen Gewölbe aufgrund Bewehrungskorrosion		
GB-112	Versagen Gewölbe aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung		X
GB-113	Versagen Gewölbe aufgrund Überlastung		X
GB-12	Versagen Foundation		X
GB-121	Versagen Foundation aufgrund Bewehrungskorrosion		
GB-122	Versagen Foundation aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung		X
GB-123	Versagen Foundation aufgrund Überlastung		X
GB-13	Versagen Zwischendecke		X
GB-131	Versagen Zwischendecke aufgrund Bewehrungskorrosion		
GB-132	Versagen Zwischendecke aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung		
GB-133	Versagen Zwischendecke aufgrund Beschädigung Auflagerkonsole oder Aufhängung		
GB-134	Versagen Zwischendecke aufgrund Ermüdung		
GB-135	Versagen Zwischendecke aufgrund Überlastung		X
GB-14	Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte		
GB-141	Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte aufgrund Bewehrungskorrosion		
GB-142	Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung		
GB-143	Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte aufgrund Beschädigung Auflagerkonsole oder Abstützung		
GB-144	Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte aufgrund Ermüdung		
GB-145	Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte aufgrund Überlastung		
GB-15	Versagen Aufhängungen		
GB-151	Versagen Aufhängungen aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung		
GB-152	Versagen Aufhängungen aufgrund Metallkorrosion		
GB-153	Versagen Aufhängungen aufgrund Ermüdung		
GB-2	Betriebssicherheit		
GB-21	unzulässige Verformungen Tragwerk		X
GB-211	unzulässige Verformungen des Tragwerks aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung		X
GB-212	unzulässige Verformungen des Tragwerks aufgrund Zusatzbelastung		X
GB-22	Fahrkomfort / Ablenkung	X	X
GB-221	unebene Fahrbahn (flächig)	X	X
GB-222	beschädigte Fahrbahn (punktuell)	X	X
GB-23	Betonabplatzung auf Fahrbahn	X	
GB-231	Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Bewehrungskorrosion		
GB-232	Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung	X	
GB-233	Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Zusatzbelastung / Zwängungen	X	
GB-24	Feuchtigkeit / Eisbildung	X	
GB-241	Eiszapfen auf Fahrbahn	X	
GB-242	Aquaplaning / Strassenglätte	X	

Das Anwendungsbeispiel zeigt, wie sich mit systematischen Abfragen gemäss dem Vorgehensvorschlag in **Abb. 16** im Rahmen der Inspektion die in Frage kommenden Schadensprozesse und Gefährdungen eingrenzen lassen und sich anschliessend mittels objektspezifischen Risikobeurteilungen im Entscheidungsmodell (EP4) und der Überwachung mit zweckmässigen Untersuchungsmethoden (EP2) die relevanten Risikoszenarien bestimmen und deren zukünftigen Verlauf modellieren lassen.

3.3.4 Auswertung Fallbeispiele

Wie im Kap. 2.3.3 erläutert, sind die im Projekt ausgewerteten und dokumentierten Fallbeispiele bzw. die angetroffenen Schadensprozesse im S.-Katalog enthalten. Dies ist in den Faktenblättern der Fallbeispiele (Anhang I) und im S.-Katalog als Referenz dokumentiert. Die Auswertung der Fallbeispiele wurde zur Bestimmung der für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse bzw. für die Vollständigkeitsprüfung des S.-Katalogs verwendet.

Zudem wurden die Fallbeispiele für das «gedankliche Durchspielen» der Anwendung des S.-/GB.-Katalogs herangezogen, um einerseits die Praxistauglichkeit zu prüfen und andererseits auch um die Ergebnisse zu veranschaulichen (vgl. Kap. 3.3.3).

Die Fallbeispiele wurden so auch für die übergreifende Koordination zwischen den EPs verwendet, um die Schnittstellen zu diskutieren und Einträge in den Katalogen festzulegen. Die Fallbeispiele können künftig auch fürs Testen der praktischen Anwendung in einer Applikation (zukünftiges EP6) verwendet werden.

3.4 Plausibilität und Zuverlässigkeit der Angaben

Die Erstellung des S.-Katalogs und GB.-Katalogs mit dem Zusammentragen und der Plausibilisierung der im Katalog festgehaltenen Angaben erfolgte in mehreren Schritten. Diese Schritte trugen massgeblich zur Vervollständigung und Verbesserung der Katalogdaten und auch auf verschiedenen Ebenen zur Prüfung der Zuverlässigkeit der Angaben bei, dies u.a. durch:

- Erstellung der grundlegenden Strukturierung des S.-Katalogs und GB.-Katalogs mit sämtlichen erforderlichen Attributen/Eigenschaften pro S / GB, sowie der Verknüpfung mit der Bauwerksgliederung (BWT x BA) und der visuellen Befunde (BE);
- Auswertung der Literatur und Fallbeispiele bezüglich der für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse;
- Auswertung der Literatur hinsichtlich der Beurteilung der Konsequenzen bzw. Risikobeurteilung und den Ansätzen zur Prognose des erwarteten, zukünftigen Verlaufs;
- Abgleich und Aufnahme bisheriger Daten aus den beiden Fachdatenkatalogen von KUBA und deren Integration in die neue Struktur der BWT.- / BA.- / BE.- und S.-Kataloge (vgl. Attribute/Spalten «Herkunft» und «H Code»);
- Laufender Quervergleich erfasster Schadensprozesse und Gefährdungsbilder bezüglich ihrer Beschreibung und der Logik der Strukturierung der S. und GB. im entsprechenden Katalog;
- Verifikation, dass sämtliche bekannten Schadensprozesse abgedeckt sind (vgl. Kap. 2.3.3);
- Spiegeln der erfassten Schadensprozesse und deren Strukturierung mit vergleichbaren Projekten und Publikationen.

Die Prüfung der Praxistauglichkeit der vorgeschlagenen Anwendungsmöglichkeiten erfolgte durch Auswertung der Fallbeispiele, wie im vorangehenden Kap. 3.3.3 am Beispiel des Tunnel Gotschna erläutert.

3.5 Praktischer Nutzen

Der praktische Nutzen der vorliegenden Ergebnisse des EP1 sollen den folgenden Anwenderkreisen zugutekommen:

- Beauftragte Planende bzw. Ingenieurbüros, welche basierend auf den vorliegenden Bestands- und Inspektionsdaten sowie ggf. weiterführender detektierbaren / messtechnischen Befunden aus Untersuchungsmethoden etc. die relevanten Schadensprozesse identifizieren und deren Konsequenzen beurteilen müssen. Dies mit dem Fokus auf belastbare Ergebnisse für die nachfolgende Massnahmenempfehlung;

- Mitarbeitende des ASTRA, insbesondere der Abteilung Erhaltungsplanung, bei der Beurteilung der Schlussfolgerungen der beauftragten Ingenieurbüros sowie als Unterstützung bei der Beurteilung der Risiken und des zukünftigen, erwarteten Verlaufs resp. bei der Festlegung der Instandsetzungsstrategie und -ziele;
- Übergeordnete Stellen von Tunnelbetreibern / -besitzern, wie z.B. die Erhaltungsplanung Zentrale des ASTRA, welche auch aus Netzsicht eine projektübergreifende Vereinheitlichung des Erhaltungsmanagement-Prozesses anstreben, um bessere Datengrundlagen fürs aktuelle und für ein optimiertes, zukünftiges «Asset Management» von Tunneln zu erhalten.

Der praktische Nutzen in der Umsetzung zeigt sich u.a. in folgenden Bereichen:

Die Grundlagenkataloge der Schadenprozesse und Gefährdungsbilder liefern als Nachschlagewerk den Anwenderinnen und Anwendern einheitlich strukturierte Informationen für alle in bergmännischen Strassentunnel relevanten Schadensprozesse und deren Konsequenzen. Diese können damit bezüglich ihrer Ausprägungen / Befunde, Auslöser / Ursache sowie begünstigenden Faktoren gut miteinander verglichen werden. Die aufgearbeiteten digitalen Daten bzw. Informationen können vollständig und flexibel u.a. am Bildschirm dargestellt werden. Zudem stehen sie als S- / und GB-Katalogblätter zur Verfügung. Diese immer gleich aufgebauten Katalogblätter stellen alle Angaben auf wenigen A4-Seiten zusammen, so dass sie ausgedruckt oder auch als pdf schnell zur Hand sind bzw. auf einem beliebigen pdf-fähigen Mobilgerät angezeigt werden können. Die Katalogblätter können so z.B. als strukturiertes Nachschlagewerk während der Inspektion dienen.

Die einfache Suchmöglichkeit der in Frage kommenden Schadensprozesse und Gefährdungsbilder wird massgeblich dadurch unterstützt, dass diese mit den Grundlagenkatalogen der Bauwerksteilen, den Bauarten und den visuellen Befunden verknüpft sind und für jeden Schadensprozess auch die Auslöser / Ursachen hinterlegt sind. Dies ermöglicht die einfache Eingrenzung der möglichen Schadensprozesse und potentiellen Gefährdungen per systematischem Ausschlussverfahren.

Die Einbindung der Kataloge in die übergeordnet festgelegte Bauwerksgliederung stellt die Kompatibilität dieser Grundlagenkataloge mit dem ganzen übergeordneten Erhaltungsprozess, d.h. auch mit den nachfolgenden Teilprozessen EP2 – EP5 sicher.

Als Datenbank-Anwendung, z.B. als Nachschlagewerk in Form eines Fachdatenkatalogs (gemäss KUBA) oder als Teil eines Asset-Management-Systems, können diese Kataloge jederzeit aufgrund neuer Erkenntnissen ergänzt werden. Dies möglichst von einer zentralen Stelle, die fürs Erhaltungsmanagement von Tunneln verantwortlich ist. So können diese Ergebnisse und ihre Aktualisierungen für neue Entwicklungen, wie z.B. BIM, jederzeit adaptiert und weiterverwendet werden.

Der Beitrag des Forschungsprojekts EP1 erzielt auch ungeachtet des übergeordneten Gesamtprojekts einen Beitrag für ein gesamtheitliches, effizienteres Erhaltungsmanagements von bergmännischen Strassentunnels. Die Hauptbestandteile des EP1 mit der neunten übergeordneten Bauwerksgliederung und den umfassenden Katalogen der relevanten Schadensprozesse sowie Gefährdungsbilder leisten einen wichtigen Beitrag, um stabile und nachvollziehbare Erhaltungsentscheide zu gewährleisten. Insbesondere die erarbeiteten Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren als Basis für eine systematisierte und standardisierte Risikobeurteilung, erzielt einen Mehrwert im Erhaltungsprozesses.

4 Empfehlungen

Basierend auf den Erkenntnissen und Folgerungen aus der Erarbeitung des Projekts EP1 und in enger Abstimmung mit EP2 haben sich folgende Empfehlungen ergeben:

Grundlagen Prozess Erhaltungsmanagement inkl. Überwachung

Für die schweizweite Umsetzung des Erhaltungsmanagement für Strassentunnel wird empfohlen, eine einheitliche Begrifflichkeit festzulegen und anzuwenden. Das gilt besonders für den Teilprozess Überwachung mit seinen Untersuchungsmethoden in den Phasen Überwachung und Überprüfung (vgl. dazu Kap. 1.6.1 zu den Definitionen im Prozess und Kap. 3.1)

In mehreren Studien wird auf die geringe Datenqualität in den vorliegenden Bauwerksdatenbanken und auf die damit verbundenen Schwierigkeiten bei der Auswertung und Analyse der Daten hingewiesen. Neben der Datenqualität spielt auch die Anzahl der erfassten Daten eine relevante Rolle bei der statistischen und empirischen Datenanalyse. Die Initial- und / Betriebsbedingungen sowie die Lokalität der erfassten Schäden sind vollständig und einheitlich zu erfassen. Die Homogenisierung und Intensivierung der Datensammlung und qualitative Verbesserung der erfassten Daten sowie die Ablage aller relevanten Daten in einer logisch strukturierten und umfassenden Datenbankstruktur bzw. Bauwerksdatenbank als Grundlage für weiterführende Forschungsprojekte ist anzustreben. Für verlässliche Datengrundlagen im Erhaltungsmanagement-Prozess, d. h. für stabile objektspezifische und folgerichtige Erhaltungsentscheide braucht es aber auch klare übergeordnete und tunnelspezifische Vorgaben bzgl. der Datenerfassung.

Ohne Überwachungsmessungen, Laborprüfungen bzw. den Untersuchungsmethoden von EP2 (vgl. [54]) sowie oftmals zusätzlichen numerischen Simulationen ist es heutzutage nicht möglich, das Langzeitverhalten von Tunnel auf Objektebene mit hinreichender Sicherheit zu prognostizieren. Die in der Literatur existierenden zeitabhängigen Verfallsfunktionen und historische Zustandsdaten können zwar ergänzend bei der Prognose hinzugezogen werden, stellen im Allgemeinen aber keine ausreichende Datenbasis dar für eine verlässliche Prognose. Die Heterogenität der aus der Vielzahl möglicher Quellen (visuelle Befunde, messtechnisch / detektierbare Befunde, Resultate aus Laborprüfungen und numerischen Modellen, etc.) resultierenden Inputdaten stellt eine Herausforderung hinsichtlich einer zukünftigen Standardisierung und Systematisierung der Risikobeurteilung bzw. des Erhaltungsmanagement-Prozesses dar. In der Schnittstelle zwischen EP1/EP2 zu EP4 sehen wir daher weiteren Forschungsbedarf in der Entwicklung einer tunnelspezifischen Systematik/Methodik zur Übersetzung der verschiedenen Datenquelle / -formate als Inputdaten im Entscheidungsmodell.

In diesem Zusammenhang ist der praxistaugliche Einsatz von Risikobetrachtungen, inkl. der Erstellung der dazu nötigen Grundlagendaten, für die Implementierung im Erhaltungsmanagement-Prozess abschliessend zu klären. Dabei sind auch die Verantwortlichkeiten für die Umsetzung der Implementation klar zuzuweisen.

Umsetzung Teilprozess Überwachung

Wie in Kap. 2.1.5 erläutert ist davon auszugehen, dass zukünftig die Entwicklungen im Bereich BIM die massgebenden Datenbankstrukturen für das Erhaltungsmanagement von Strassentunnel vorgeben werden. Diese Entwicklungen und Lösungsansätze zur Informationsverwaltung mit der BIM-Methodik sind zwingend bereits jetzt zu antizipieren. Auf die Implementation des Erhaltungsprozess in die BIM-Methodik ist daher bereits heute hinarbeiten u.a. da nicht in der Projektierungs- und Bauphase sondern im Erhaltungsprozess bzw. der Betriebsphase der grosse volkswirtschaftliche Nutzen der BIM-Methodik liegt. Dies heisst im Umkehrschluss, dass die Anforderungen und die Informationen, welche für den Erhaltungsprozess relevant sind und in den einzelnen Projektphasen in einem BIM-Modell durch die verschiedenen Akteure (Erhaltungsplaner, Ingenieurbüros, Betrieb, Geologe, etc.) massgeblich durch die für den Erhaltungsprozess verantwortlichen Personen vorgegeben werden müssen. Der Lead für die Formulierung übergeordneten

Informationsanforderungen bei der Erstellung der BIM-Modelle bzw. der für die Betriebsphase relevanten Digitalen Zwillinge sollte bereits ab der Projektierungsphase zwingend bei der Erhaltungsplanung liegen, welche nach Inbetriebnahme die im Modell während der Projektierungs- und Bauphase hinterlegten Informationen weitenutzen werden. Weiter ist die vollständige Übertragung der bisher in der Bauwerksdatenbank erfassten Informationen bzw. der Wissensdatenbank in die zukünftigen Datenmodelle zentral, um diese auch zukünftig für die Datenanalyse nutzbar zu machen und einen Wissensverlust zu vermeiden. Hierzu sind auch die Empfehlungen des EP2 zu beachten.

Weitergehender Forschungs- und Handlungsbedarf

Aus den Erläuterungen der vorhergehenden Abschnitte lassen sich somit nachfolgender weitergehender Forschungs- und Handlungsbedarf zusammenfassen:

- Vereinheitlichung der Begrifflichkeiten im Erhaltungsmanagement-Prozess, insbesondere im Teilprozess Überwachung;
- Verbesserung der Datenqualität (vollständige Erfassung der Initial- / Betriebsbedingungen und Lokalität von Befunden / Schäden) in Bauwerksdatenbanken sowie Homogenisierung und Intensivierung der Datensammlung;
- Ablage der erfassten, relevanten Daten in einer logisch strukturierten, umfassenden und tunnelspezifischen Datenbankstruktur bzw. Bauwerksdatenbank als Grundlage für Datenanalysen in zukünftigen Forschungsprojekten (klare, übergeordnete und tunnelspezifische Vorgaben bzgl. der Datenerfassung);
- Ermittlung der Einflussfaktoren auf die Risikobeurteilung der Gefährdungsszenarien im Gesamtprozess insbesondere hinsichtlich tunnelspezifischer Systematik / Methodik zu Übersetzung der verschiedenen Datenquellen / -formate als Inputdaten im Entscheidungsmodell;
- Federführende Mitwirkung der Erhaltungsplanung bei der Entwicklung der BIM-Standards für Tunnel und Bauten im Bestand;
- Formulierung übergeordneter Informationsanforderungen bei der Erstellung der BIM-Modelle bzw. der für die Betriebsphase relevanten Digitalen Zwillinge bereits während der Projektierungsphase in der Verantwortung der Erhaltungsplanung;
- Pilotprojekte für die Erstellung von digitalen Zwillingen von Strassentunneln mit der Abbildung von Zustandsdaten mit BIM;
- Sicherstellung der Migrierbarkeit bestehender Daten in neue Datenbanken / Datenmodelle.

5 Datengrundlage

5.1 Kompilation der Literatur

Die im vorliegenden Schlussbericht EP1 verwendete Literatur, gemäss dem Literaturverzeichnis im Anhang, ist Bestandteil der strukturierten Literaturdatenbank des EP1 in Citavi und steht dem Gesamtprojekt zur Verfügung.

5.2 Kompilation Fallbeispiele

Die als Fallbeispiele für die Beurteilung der Vollständigkeit und der Relevanz der Schadensprozesse und Gefährdungsbilder (EP1) sowie auch die Anwendung von Untersuchungsmethoden (EP2) und Instandsetzungsmassnahmen (EP3) verwendeten Tunnelobjekte, ausgewählt gemäss Kap. 1.2.3 «Fallbeispiele», sind ausführlich und systematisch im Anhang I dokumentiert.

Anhänge

- I Fallbeispiele: Faktenblätter Tunnel**
- II Übersicht Katalog Schadensprozesse (S)**
- III Katalogblätter Schadensprozesse (S)**
- IV Übersicht Katalog Gefährdungsbilder (GB)**
- V Katalogblätter Gefährdungsbilder (GB)**
- VI Katalog Bauwerksteil (BWT)**
- VII Katalog Bauart (BA)**
- VIII Katalog Bauteilart (BWT x BA)**
- IX Katalog Befunde (BE)**
- X Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren**

Glossar

Begriff	Bedeutung
Akzeptiertes Risiko	In seiner Grösse bekanntes, durch den Konsens der Beteiligten bewusst hingenommenes Risiko
Bauart	Bauart (BA), beschreibt die Materialisierung z.B. eines Bauwerkteils
BA	Bauart, Materialisierung gemäss Grundlagenkatalog EP1
Bauteilart	Kombination aus Bauwerksteil und Bauart, zur eindeutigen Verknüpfung der Kataloge von EP1, EP2 und EP3 im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts.
Bauwerkserhaltung	Gesamtheit der Tätigkeiten und Massnahmen zur Sicherstellung des Bestandes sowie der materiellen und kulturellen Werte eines Bauwerks. Die Bauwerkserhaltung ist derbauspezifische Teil der der Bauwerksbewirtschaftung. Sie beginnt nach erfolgter Inbetriebnahme eines Bauwerks und erstreckt sich über dessen gesamte Nutzungsdauer. Nicht zur Bauwerkserhaltung gehörten die Verwaltung und der eigentliche Betrieb des Bauwerks.
Bauwerksteil	Element der Bauwerksgliederung (BWT), tiefste Ebene als Bewertungseinheit bei Zustandserfassung
BE	Befund (visuell) gemäss Grundlagenkatalog EP1
Befund	Befunde (BE) beschreiben Abweichungen vom Sollzustand. Als solche beschreiben sie die vor Ort festgestellten Fakten. Befunde können, müssen aber nicht, Schäden entsprechen (z.B. auch Baumängel, Schwachstellen Tragwerk, u.a. [Ergänzung GPL]). Sie können aus Ereignissen (z.B. Anprall) oder Schadensprozessen (z.B. Korrosion im Stahlbeton) resultieren.
Beobachtung	Die Beobachtung besteht aus einfachen Kontrollen zur Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit. Sie umfasst auch die Überprüfung der Nutzung der Bauwerke und der Funktionstauglichkeit der technischen Anlagen. Dabei geht es insbesondere darum, zu überprüfen, ob sie den Nutzungs- und Betriebsanweisungen entsprechen. Die Beobachtung erfolgt in der Regel im Rahmen des Betriebs. Überprüfen der Gebrauchstauglichkeit durch einfache und regelmässige, in der Regel visuelle Kontrollen.
BIM	Building Information Modeling: Methode zur digitalen Planung und dem Betreiben von Bauwerken
BSA / EES	EMA Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA); in Literatur auch als Elektromaschinelle Ausrüstung (EMA) bezeichnet. <i>Französisch: équipements d'exploitation et de sécurité (EES)</i>
BWT	Bauwerksteil gemäss Grundlagenkatalog EP1
BWT x BA	Bauteilart gemäss Grundlagenkatalog EP1; ist Kombination von Bauwerksteil und Bauart
Diagnostik	Gesamtheit aller Massnahmen, die zur Erkennung von Schadensbildern aufgrund von unterschiedlichen Schadensprozessen auftreten.
Untersuchungsmethoden	Methoden, Prüfverfahren zur Untersuchung am Bauwerk, d.h. für die Überwachung und Überprüfung des Bauwerkszustands (EP2: USM, im Teilprozess Überwachung)
Eintrittswahrscheinlichkeit	Häufigkeit; erwartete Anzahl Ereignisse pro Zeiteinheit, i.d.R. bezogen auf ein Jahr
EM	Erhaltungsmanagement; in Literatur auch als «Asset Management» bezeichnet
EP	Einzelprojekt = Teilprojekt des Forschungsauftrag / auch: Fachbereich Erhaltungsplanung des ASTRA
Erhaltungsplanung	Ausarbeiten eines Erhaltungskonzeptes für einen festgelegten Zeitabschnitt (mittels Optimierung von Erhaltungsvarianten). Beim ASTRA Bezeichnung des gleichnamigen Fachbereichs
FaS	Fachspezialistin / Fachspezialist ASTRA, u.a. für die Erhaltungsplanung
Inspektion	Feststellen des Zustandes durch gezielte, in der Regel visuelle und einfache Untersuchungen mit Bewertung desselben; u.a. als Haupt- Zwischen oder Sonderinspektion.

Instandhaltung	Die Instandhaltung beinhaltet die geplanten Tätigkeiten gemäss dem Unterhaltsplan und die Behebung kleiner Schädigungen. Diese Tätigkeiten haben vorwiegend präventiven Charakter.
LCC	Life Cycle Costs
KUBA	Datenbank des ASTRA fürs Erhaltungsmanagement für Kunstbauten und Tunnel
Monitoring	Einsatz von geeigneten Untersuchungsmethoden für die Überwachung der Zustandsentwicklung durch regelmässige oder ständige Datenerfassung, die weitgehend automatisiert ist.
OS	Oberflächenschutz gemäss Grundlagenkatalog EP1
Risiko	Produkt aus der auf eine bestimmte Zeiteinheit bezogenen Eintretenswahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses und der quantifizierten, potenziellen Schadenfolge für Personen, Sachgüter und Umwelt.
Schaden	Negative Konsequenz
S	Schadensprozess (Alterungs- und Zerfallsprozess)
Schadensprozess	Einem Schaden zugrundeliegender Prozess, welcher zu einer fortschreitenden Zustandsverschlechterung des betroffenen Bauwerkteils und in Abhängigkeit von dessen Funktion ohne Gegenmassnahmen zu einer Beeinträchtigung der Tragsicherheit und/oder Betriebssicherheit führt.
Sicherheit	Sicherheit hinsichtlich einer Gefahr besteht dann, wenn das Risiko akzeptierbar klein ist.
SISTo	Sicherheits- und Infrastrukturstollen
SN	Schweizer Norm (SN)
Überprüfung	Die Überprüfung hat die Beurteilung der Sicherheit und der Gebrauchstauglichkeit des Bauwerkes hinsichtlich seiner derzeitigen und zukünftigen Nutzung zum Ziel. Sie wird veranlasst, wenn: • auf Grund der Überwachung Zweifel über die Bewertung des Zustandes bestehen. • die Sicherheit oder die Gebrauchstauglichkeit durch neue Erkenntnisse in Frage gestellt sind. • Unterhalts- oder Umgestaltungsmassnahmen für das Bauwerk vorgesehen sind. • Nutzungsänderungen für das Bauwerk vorgesehen sind Die Überprüfung ist eine Phase des Teilprozesses Überwachung gemäss Grundnorm.
Überwachung	Die Überwachung hat zum Ziel, die Prognose über das Tragwerkverhalten zu verifizieren und ein unvorhergesehenes Tragverhalten, Schädigungsmechanismen und Gefährdungen möglichst frühzeitig zu erkennen. Zur Überwachung zählen Beobachtungen, Inspektionen und Kontrollmessungen. Die Überwachung ist auch eine Phase des gleichnamigen Teilprozesses Überwachung gemäss Grundnorm.
Unterhalt	Bewahren oder Wiederherstellen eines Bauwerks ohne wesentliche Änderung der Anforderungen
U.-Katalog	Grundlagenkatalog Untersuchungsmethoden (USM / Diagnostik)
USM	Untersuchungsmethoden (bei EP2: Methoden angewendet im Teilprozess Überwachung)
Verfallsfunktion	mathematische Funktion zur Beschreibung eines Schadensprozesses.
Verfolgbare / Nicht verfolgbare Schäden	visuell, mit einfachen Mitteln erkennbare Schäden bzw. Schadensentwicklung
Verhältnismässigkeit von Massnahmen	Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen von Erhaltungsmaßnahmen mit dem Ziel eines effizienten Mitteleinsatzes.
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Nor
WELK	Werkleitungskanal
Wirksamkeit	Mass für die Wirkung einer Massnahme. Die Wirksamkeit einer Massnahme entspricht der erzielbaren Risikominderung.
Zerfallsgesetz	der Verfallsfunktion zugrundeliegende chemisch-physikalische Gesetzmässigkeit
Zustandsbeurteilung	Resultat Überwachung vor allem Überprüfung von Bauwerken; Zusammenfassende Analyse und Bewertung der Informationen über den aktuellen Zustand und die bisherige Zustandsentwicklung, verbunden mit einer Voraussage der weiteren Zustandsentwicklung und deren Konsequenzen im Laufe einer festgelegten Restnutzungsdauer.

Zustandsbewertung	Resultat der Inspektion; Qualitative und quantitative Bewertung des Zustandes des Bauwerkes und der Bauwerksteile.
Zustandserfassung	Beschaffung von Informationen über den aktuellen Zustand und die bisherige Zustandsentwicklung mit dem Ziel, wesentliche Mängel, Schäden und Schädigungsmechanismen zu erkennen
Zustandsklasse	Systematische Bewertung deren Dokumentation des Zustandes in Klassen; CH: von ZK1 gut bis ZK5 alarmierend
Zustandsverlauf	Zeitliche Entwicklung des Zustandes, u.a. eines Bauwerks oder Bauwerkteil

Literaturverzeichnis

Weisungen und Richtlinien des ASTRA

- [1] Bundesamt für Strassen ASTRA (2002), „**Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen Planung und Durchführung des Unterhalts**“, *Richtlinie ASTRA 110002*.
- [2] Bundesamt für Strassen ASTRA (2005), „**Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen**“, *Richtlinie ASTRA 12002*.
- [3] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012), „**KUBA 5.0 Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel: Datenerfassungshandbuch**“, *IT Dokumentation ASTRA 62014*.

Weisungen und Richtlinien anderer Länder

- [4] Bundesanstalt für Strassenwesen BAST (2020), „**Richtlinien für die strategische Planung von Erhaltungsmassnahmen an Ingenieurbauwerken RPE-ING (RPE-ING)**“, Deutschland.
- [5] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017), „**Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)**“, Deutschland.
- [6] Centre d'Etudes des Tunnels CETU (2012), „**Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, fascicule 40: Tunnel**“, Frankreich.
- [7] DIN Deutsche Institut für Normung (2012), „**Grundlagen der Instandhaltung DIN 31051**“, Deutschland.
- [8] DIN Deutsches Institut für Normung (2012), „**Ingenieurbauwerke (Brücken, Tunneln, Durchlässe und sonstige Bauwerke) im Zuge von Strasse und Wegen, Überwachung und Prüfung DIN 1076**“, Deutschland.
- [9] Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse Schiene Verkehr (FSV) (2013), „**Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Strassentunnel – Bauliche konstruktive Teile: RVS 13.03.31**“, Österreich.

Normen

- [10] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2011), „**Erhaltung von Tragwerken - Betonbau**“, *Norm SIA 269/2*.
- [11] Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute VSS / SNV Schweizerische Normen-Vereinigung (2013), „**Erhaltungsmanagement (EM): Grundlagen zur Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement**“, *SN 640 907*.
- [12] Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute VSS / SNV Schweizerische Normen-Vereinigung (2022), „**Erhaltungsmanagement (EM): Grundnorm**“, *SN 640 900*.
- [13] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) (2019), „**Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF): Anleitung zur visuellen Zustandserhebung und Indexbewertung mit dem Schadenkatalog**“, *SN 40925b*.
- [14] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2011), „**Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken**“, *Norm SIA 269*.
- [15] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (1997), „**Erhaltung von Bauwerken**“, *Norm SIA 469*.
- [16] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), „**Projektierung Tunnel: Grundlagen**“, *Norm SIA 197*.

Dokumentation

- [17] AIT Austrian Institute of Technology GmbH, ILF Consulting Engineers Austria GmbH, DIBIT Messtechnik GmbH (2015), „**AMBITION - Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und Bewertung von Eisenbahn- und Strassentunnel: Ergebnisbericht Projekt VIF 2015**“.
- [18] C. Amstad und K. Kovári (2001), „**Untertagbau in quelfähigem Fels**“.
- [19] P. Beeler und R. Weishaupt (2023), „**Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel: EP1 - Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunnel**“, *Forschungsprojekt AGT2020-101 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)*.
- [20] Bundesamt für Strassen ASTRA (2021), „**Netzzustandsbericht der Nationalstrassen 2020: Ausgabe Stand 2020**“.

-
- [21] Bundesamt für Strassen ASTRA (2022), „**Netzzustandsbericht der Nationalstrassen 2021: Ausgabe Stand 2021**“.
-
- [22] Bundesanstalt für Strassenwesen BAST (2020), „**Untersuchungsbericht zur strategischen Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken: RPE-ING**“.
-
- [23] Ch. Stefan, U. H. Grunicke, V. Prändl-Zika, A. Weninger-Vycudil, A. Hula, A. Van Linn, B. Brozek, D. Prammer und L. D. Mellert (2020), „**Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA (OPTiMAL): Forschungsbericht. FFG**“.
-
- [24] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen DAUB (accessed on 18.03.2023), „**Empfehlungen für unterirdisches Bauen: u.a. zu BIM (Building information modeling)**“, <https://www.daub-ita.de/publikationen/empfehlungen/>.
-
- [25] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen DAUB (2018), „**Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Strassentunnel**“.
-
- [26] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen DAUB (2019), „**Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten - BIM im Untertagebau**“.
-
- [27] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen DAUB (2022), „**Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten, Modellanforderungen - Teil 2 Informationsmanagement: Ergänzung zur DAUB-Empfehlung "BIM im Untertagebau"**“.
-
- [28] H. Ehrbar (2016), „**Tavetscher Zwischenmassiv Nord: Nachweis der Machbarkeit: Tunneling the Gotthard**“.
-
- [29] Emch+Berger (2010), „**Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten - Synthesebericht**“.
-
- [30] M. H. Faber (2000), „**Risk Based Inspection and Maintenance Planning**“.
-
- [31] P. Fehlmann (2012), „**Zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken**“, *ETH Zürich*.
-
- [32] T. Fries (2024), „**Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel - Synthesebericht**“, *Forschungsprojekt AGT2020-101 bis -105 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)*.
-
- [33] G. Girmscheid, T. Gamisch und A. Meinschmidt (2007), „**Versinterung von Tunneldrainagen - Empfehlungen für die Planung und Bauausführung von Tunneln in deszendenden Wässern**“.
-
- [34] R. Haydin (2024), „**Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln: EP4 - Entwicklung eines Entscheidungsmodells**“, *Forschungsprojekt AGT2020-104 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)*.
-
- [35] G. Heeke (2016), „**Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Betonstahl und Spannstahl im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich mit sehr hohen Lastwechselzahlen**“, *Technische Universität Dortmund*.
-
- [36] Dr. F. Hunkeler, Dr. P. Kronenberg und Dr. U. Püschner (2013), „**Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken**“.
-
- [37] ILF Beratende Ingenieure AG (2020), „**Forschungsauftrag AGT2017/002: Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln; Einzelprojekt EP1 -Pflichtenheft: Zustand: Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln**“.
-
- [38] Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (2018), „**Edelstahl Rostfrei in Kontakt mit anderen Werkstoffen**“, *Merkblatt 829*.
-
- [39] ITA Working Group on Maintenance and Repair of Underground Structures (1991), „**Report on the Damaging Effects of Water of Tunnels During Their Working Life**“.
-
- [40] J. Jensen, M. Sloth, P. Linneberg, B. Paulsson und L. Elfgren (2013), „**MAINLINE Deliverable 2.1: Degradation and performance specification for selected assets**“.
-
- [41] J. Jensen, M. Sloth, P. Linneberg, B. Paulsson und L. Elfgren (2013), „**MAINLINE Deliverable 2.2: Degradation an intervention modelling techniques**“.
-
- [42] J. Jensen, M. Sloth, P. Linneberg, B. Paulsson und L. Elfgren (2013), „**MAINLINE Deliverable 2.3: Time-variant Performance Profiles for Life-Cycle Cost and Life-Cycle Analysis**“.
-
- [43] J. Jensen, M. Sloth, P. Linneberg, B. Paulsson und L. Elfgren (2014), „**MAINLINE Deliverable 2.4: Field validated Performance Profiles**“.
-
- [44] Dr.-Ing. C. Karcher (2011), „**Ursachen und Entstehungsmechanismen von Strassenschäden**“.
-
- [45] R. Katzenbach, S. Leppla, M. Vogler, M. Seip und S. Kurze (2013), „**Soil-structure-interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time**“.
-
- [46] Dr.-Ing. P. Knödel (2010), „**Ermüdung im Stahl- und Anlagenbau - vom Wöhlerdiagramm bis zu Schadensfällen**“.
-
- [47] Dr. H. Kramer, B. Fischer und Dr. C. Löwe (2014), „**Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)**“.
-

-
- [48] P. Kumar und B. Imam (2012), „**Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure**“.
-
- [49] A. Leemann und R. Loser (2010), „**Analysis of concrete in a vertical ventilation shaft exposed to sulfate-containing groundwater for 45 years**“.
-
- [50] M. Lei, L. Peng, C. Shi und S. Wang (2013), „**Experimental study on the damage mechanism of tunnel structure suffering from sulfate attack**“.
-
- [51] J. Liu, D. Zhao, J. Shen und Y. Zhang (2013), „**Comparative Study on Crack and Factor of Continuously Reinforced Concrete Pavement in the Tunnel and Outside**“.
-
- [52] R. Loser und A. Leemann (2013), „**Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D**“.
-
- [53] C. Löwe, B. Fischer, H. Kramer und C. Walder (2011), „**Waterproofing systems for tunnels: chemical resistance after 10 years**“.
-
- [54] S. Matsch, S. Wacker und H. Heller (2023), „**Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln: EP2 - Diagnostik - Überwachungs- und Inspektionsmethoden**“, *Forschungsprojekt AGT2020-102 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)*.
-
- [55] L. Mellert, A. Van Linn, C. Stefan, U. Grunicke und A. Weninger-Vycudil (2020), „**Von Tätern und Opfern im Strassentunnel - Erhaltungsplanung mal anders gedacht: Neue Erkenntnisse und Methoden aus der internationalen Verkehrsinfrastrukturforschung**“ *Strasse und Verkehr (VSS) 106(10):28–33*.
-
- [56] H. S. Müller, M. Vogel und T. Neumann (2011), „**Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse: Bericht zum Forschungsprojekt FE 89.0219/2009/AP**“.
-
- [57] Dr. M. Pfiffner und Dr. L. Holzer (2001), „**Schädigungsmechanismen der Betonkorrosion in Tunnelbauwerken**“.
-
- [58] J. Portner und N. Vasic (2023), „**Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel: EP3 - Festlegung von standardisieren Erhaltungsmaßnahmen pro Schadensprozess**“, *Forschungsprojekt AGT2020-103 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)*.
-
- [59] Prof. Dr.-Ing. M. Raupach (2012) „**Auswirkung von Chloriden im Beton, Abhängigkeit von Betoneigenschaften**“, *RWTH Aachen*.
-
- [60] F. Sandrone (2008), „**Analysis of pathologies and long term behaviour of the swiss national road tunnels**“, *EPF Lausanne*.
-
- [61] F. Sandrone und V. Labiouse (2011), „**Identification and analysis of Swiss National Road tunnels pathologies**“.
-
- [62] Schweizerische Bundesbahnen SBB (2021), „**BIM@SBB - Fachdatenkatalog: Fachbereich: Tunnel. 7th ed**“.
-
- [63] Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute VSS / SNV Schweizerische Normen-Vereinigung (2010), „**Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen**“.
-
- [64] M. Sharifzadeh, A. Tarifard und M. A. Moridi (2013), „**Time-dependent behavior of tunnel lining in weak rock mass based on displacement back analysis method**“.
-
- [65] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, (Ed.) (1997), „**AlpTransit: Das Bauprojekt - Schlüsselfragen und erste Erfahrungen**“.
-
- [66] C. Stefan, U. H. Grunicke, V. Prändl-Zika, A. Weninger-Vycudil, A. Hula, A. Van Linn, B. Brozek, D. Prammer und L. D. Mellert (2020), „**OPTimal_Ergebnisbericht: Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA**“.
-
- [67] B. Stempfel und M. Dell'Antonio (2016), „**Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln - Initialprojekt**“.
-
- [68] B. Stempfel und B. Schädler (2023), „**Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln: EP5 - Kostenmodell**“, *Forschungsprojekt AGT2020-105 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)*.
-
- [69] Prof. Dr.-Ing. K. C. Thienel (2017), „**Schadensmechanismen**“, *Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens*.
-
- [70] Y. Tuchiya, T. Kurakawa, T. Matsunaga und T. Kudo (2009), „**Research on the long-term behaviour an evaluation on lining concrete of the seikan tunnel**“.
-
- [71] Tunneling and Underground Space Technology (2014), „**MAINLINE: MAINTenance, renewal and improvement of rail transport INfrastructure to reduce Economic and environmental impacts**“.
-
- [72] M. Vogelhuber (2007), „**Der Einfluss des Porenwasserdrucks auf das mechanische Verhalten kakiritisierter Gesteine**“, *ETH Zurich*.
-
- [73] S. Werner (2018), „**Betonschäden bieten Potenzial für Fachleute**“.
-
- [74] L. Zhang, X. Wu, M. Skibniewski, J. Zhong und Y. Lu (2014), „**Bayesian-network-based safety risk analysis in construction projects**“.
-

Firmendokumentation

[75] Holcim (Schweiz) AG (accessed on März 2023), „**Betonpraxis: Betonschäden**“
<https://www.holcimpartner.ch/de/betonpraxis>.

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: 23.08.2023

Grunddaten

Projekt-Nr.: AST_2020_101
Projekttitel: Forschungspaket Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln EP1 Zustand: Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln
Enddatum: 07.08.2023

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im Rahmen des übergeordneten Projekts «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln» werden im vorliegenden Forschungsprojekt EP1 «Zustand: Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln» die für die Erhaltungsplanung von bergmännischen Strassentunneln relevanten Schadensprozesse und deren Konsequenzen im Detail behandelt. Die Ergebnisse aus dem im Einzelprojekt EP1 haben Informationen zu liefern, welche im Rahmen des Erhaltungsmanagement-Prozesses die Basis für stabile und nachvollziehbare Erhaltungsentscheide bilden.

Die aus dem EP1 resultierenden Grundlagenkataloge der Schadensprozesse (S.-Katalog) und der Gefährdungsbilder (GB.-Katalog) umfassen alle für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse und deren Konsequenzen. Zudem wurde durch EP1 eine übergeordnete Bauwerksgliederung erarbeitet, welche einerseits eine gemeinsame Bezugsgrosse für alle EPs darstellt und somit die Durchgängigkeit und Kompatibilität der einzelnen Forschungsprojekte sicherstellt sowie andererseits auch die Kompatibilität mit aktuellen (KUBA 5.0) und zukünftigen (BIM) Datenmodellen / -banken gewährleistet. Die datenbankkompatiblen S.- / und GB.-Kataloge als zentrales «Produkt» des Forschungsprojekts EP1 wurde neu erarbeitet und strukturiert aufgebaut. Analog zu den Einzelprojekten von EP2 und EP3 wird hierbei ein Ansatz der Systematisierung verfolgt, welcher die einzelnen Schadensprozesse und Gefährdungsbilder in übergeordneten Einheiten gliedert. Dies dient der Übersichtlichkeit, Lesbarkeit und somit letztlich der Praxisanwendung. Die Kataloge sind untereinander logisch verknüpft. Alle Schadensprozesse und Gefährdungsbilder sind einerseits untereinander andererseits aber auch mit den relevanten Bauwerksteilen, Bauarten und den zugehörigen visuellen Befunden verknüpft. Zudem bestehen in den Katalogen EP2 und EP3 weitere Verknüpfungen mit den S.-Katalog. Diese logischen Verknüpfungen eröffnen verschiedene Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis, welche im Schlussberichten von EP1, EP2 und EP3 umschrieben werden.

Der S.-Katalog enthält Attribute (strukturierte Informationen) zur Beschreibung von Eigenschaften der einzelnen Schadensprozesse:

- Strukturierung und Beschreibung der Schadensprozesse (S)
- Zuordnung Bauwerksgliederung (BWT x BA) und der visuellen Befunde (BE)
- Auflistung der Auslöser / Ursachen und der begünstigenden Faktoren
- Zuordnung Konsequenzen bzw. Gefährdungsbilder (GB)
- Hinweise zu Verfallsfunktionen in Literatur
- Verweise / Referenzen

Der GB.-Katalog enthält Attribute zur Beschreibung von Eigenschaften der einzelnen Gefährdungsbilder:

- Strukturierung Gefährdungsbilder (GB) inkl. Beschreibung der Gefährdungsbilder
- Zuordnung Schadensprozesse (S) und der Bauwerksgliederung (BWT x BA)

Für sämtliche Schadensprozesse und Gefährdungsbilder wurden Katalogblätter erstellt, die übersichtlich und zusammengefasst das Grundlagenverständnis des Schadensprozesses und des Gefährdungsbilds vermitteln sowie die wesentlichen Merkmale wie Auslöser / Ursache und begünstigende Faktoren auflisten. Diese Katalogblätter sind einheitlich strukturiert und gut lesbar dargestellt. Für sämtliche Schadensprozesse und Gefährdungsbilder wurden Prozessskizzen erstellt und einleitend in den entsprechenden Katalogblättern visualisiert.

Ergänzend wurde in Abstimmung mit EP4 ein Konzeptvorschlag für die objektspezifische Risiko-beurteilung basierend auf einem Bayes'schen Netzwerk erarbeitet. EP1 hat in diesem Zusammenhang für jedes Gefährdungsbild des GB.-Katalogs Beziehungsstrukturen der relevanten Einflussfaktoren erarbeitet, welche die Grundlage für eine zukünftige, standardisierte und einheitliche Risikobeurteilung und eine möglicherweise für die Ableitung von generellen Risikoverläufen (vergleichbar mit Verfallsmodellen) je Schadensprozess bzw. Gefährdungsbild im Rahmen von zukünftigen Forschungsprojekten bilden.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die Anforderungen an die Ergebnisse des Forschungsprojekt EP1 gemäss Pflichtenheft wurden vollständig und gut erfüllt. Die Ergebnisse werden grundsätzlich als vollständig, nützlich, zweckmässig und up to date beurteilt.

Der Schlussbericht dokumentiert detailliert die erarbeiteten umfangreichen, verknüpften und datenbankfähigen Kataloge der Schadensprozesse und Gefährdungsbilder, die übergeordnete Bauwerksgliederung sowie die Methodik der Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren als zentrale Beiträge des EP1 für das Gesamtprojekt «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln».

Die Katalogblätter der Schadensprozesse und Gefährdungsbilder enthalten eine Fülle wertvoller Informationen, welche übersichtlich und strukturiert bzw. praxistauglich dargestellt sind. Diese sollen in der Praxis als Nachschlagewerke Anwendung finden. Zudem zeigen die Faktenblätter zu den Fallbeispielen typischer Strassentunnel die Relevanz der beschriebenen Schadensprozesse und Gefährdungsbilder in der Praxis des Erhaltungsmanagements von Tunneln auf.

Im Schlussbericht wird zudem weiterer möglicher Entwicklungs- / Forschungsbedarf aufgezeigt, basierend auf den Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt EP1 sowie aus dem Literaturstudium zum Stand der Technik und Forschung (vgl. nachfolgender Abschnitt).

Folgerungen und Empfehlungen:

Im Forschungsprojekt EP1 wurden in nachfolgenden zwei Bereichen nachfolgende Empfehlungen abgegeben:

1. Einheitlichkeit + verlässliche Datengrundlagen für Erhaltungsmanagement-Prozess:
 - Vereinheitlichung der Begrifflichkeiten im Erhaltungsmanagement-Prozess, insbesondere im Teilprozess Überwachung
 - Verbesserung der Datenqualität (vollständige Erfassung der Initial- / Betriebsbedingungen und Lokalität von Befunden / Schäden) in Bauwerksdatenbanken sowie Homogenisierung und Intensivierung der Datensammlung
 - Ablage der erfassten, relevanten Daten in einer logisch strukturierten, umfassenden und tunnelspezifischen Datenbanksstruktur bzw. Bauwerksdatenbank als Grundlage für Datenanalysen in zukünftigen Forschungsprojekten (klare, übergeordnete und tunnelspezifische Vorgaben bzgl. der Datenerfassung)
 - Weiterer Forschungsbedarf: Ermittlung Einflussfaktoren auf Risikobeurteilung Gefährdungsszenarien im Gesamtprozess insbesondere hinsichtlich tunnelspezifischer Systematik / Methodik zur Übersetzung der verschiedenen Datenquellen / -formate als Inputdaten im Entscheidungsmodell.
2. Vorbereitung der Umsetzung des Erhaltungsmanagements-Prozesses mit BIM:
 - ledführende Mitwirkung Erhaltungsplanung bei der Entwicklung der BIM-Standards für Tunnel und Bauten im Bestand
 - Formulierung übergeordneter Informationsanforderung bei der Erstellung der BIM-Modelle bzw. der für die Betriebsphase relevanten Digitalen Zwillinge bereits während Projektierungsphase in der Verantwortung von Erhaltungsplanung
 - Pilotprojekte für die Erstellung von digitalen Zwillingen von Strassentunneln mit der Abbildung von Zustandsdaten mit BIM
 - Sicherstellung Migrationsfähigkeit Daten in neue Datenbanken / Datenmodelle

Publikationen:

- keine -

Die durch das EP1 erstellten Katalogblätter der Schadensprozesse und Gefährdungsbilder können den beim Erhaltungsmanagement von Tunneln beteiligten Fachpersonen als Praxishilfe / Nachschlagewerk zur Verfügung gestellt werden. Dies als downloadbare pdf-Dateien z.B. auf der Website des ASTRA.

Zudem können auch die Faktenblätter der Fallbeispiele als Praxisbeispiele zur Verfügung gestellt werden.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Beeler

Vorname: Patrick

Amt, Firma, Institut: Lombardi AG

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:

Der Bericht «Zustand: Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln» ist klar strukturiert und gut formuliert. Die erarbeiteten Grundlagenkataloge der Schadensprozesse und Gefährdungsbilder sind auf die bei Strassentunneln relevanten Schäden ausgerichtet. Die daraus resultierenden Konsequenzen sind detailliert behandelt.

Die erarbeiteten Ergebnisse werden grundsätzlich als vollständig, nützlich und zweckmässig sowie als up to date beurteilt. Im Bericht finden sich Überlegungen zur Berücksichtigung der erwarteten Entwicklung hinsichtlich BIM, inkl. Hinweise zum entsprechenden Fachdatenkatalog der SBB (vom ASTRA gibt es dazu aktuell noch keine Vorgaben).

Um möglichst Datenkompatibilität unter den EPs zu erreichen, erfolgten diverse Abstimmungen, die bei der Anwendung hilfreich sein werden. Weil die Grundlagen zum EP4 (Entscheidungsmodell) zum Zeitpunkt der Fertigstellung fehlten, war die Prüfung der Kompatibilität zu diesem Einzelprojekt nur teilweise möglich.

Der Stand der Forschung und Praxis (Literatur, Fallbeispiele) ist gut dargestellt und liefert wertvolle Informationen.

Der Schlussbericht erfüllt die Erwartungen an die Zielerreichung der Forschungsarbeit gut. Die erarbeiteten Katalogblätter sind gut lesbar und sehr nützlich und von wertvoller Substanz. Es ist davon auszugehen, dass diese in der Praxis zirkulieren und schnell als Referenzblätter dienen.

Die Anforderungen gemäss Pflichtenheft wurden vollständig und gut erfüllt.

Umsetzung:

Die Forschungsarbeit stellt ein wertvolles Dokument für das Astra (Filialen und Zentrale) und die planenden Büros dar. Bei fachgerechter Anwendung entsteht ein deutlicher Mehrwert: schneller, systematischer am Ziel mit zuverlässigen Aussagen zu den Schadensprozessen, den Gefährdungsbildern und dem Langzeitverhalten.

Die angestrebte Verbesserung des Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel wird aber erst erreicht, wenn es gelingt, die erarbeiteten Grundlagenkataloge der Schadensprozesse und Gefährdungsbilder praxistauglich in das Entscheidungsmodell des EP4 zu integrieren. Die Voraussetzungen dazu sind mit dem vorliegenden Bericht geschaffen worden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Eine künftige Implementierung und Weiterentwicklung in Datenmodellen ist möglich und sollte überlegt werden. Die künftige Entwicklung in der Beurteilung der Schadensprozesse und dem Langzeitverhalten sollte verfolgt werden. Ebenso sollte das Zusammenspiel mit den anderen EPs, insbesondere mit EP2 «Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden» sowie EP3 «Erhaltungsmassnahmen» sollte beobachtet werden, um allfällige Verbesserungen, die aufgrund weiterer Entwicklungen und gemachten Erfahrungen entstehen, berücksichtigen zu können. Allenfalls ergeben sich daraus Erkenntnisse für EP1, z.B. zum Langzeitverhalten.

Einfluss auf Normenwerk:

Zur Zeit nicht gegeben. Die künftige Entwicklung der Normen sowie die gemachten Erfahrungen beim Erhaltungsmanagement sind im Auge zu behalten.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Ehrbar

Vorname: Heinz

Amt, Firma, Institut: Heinz Ehrbar Partners GmbH

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: