



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassen- tunnel: Synthesebericht

**Gestion constructive de la maintenance en tunnel
routiers creusé: Synthèse**

**Maintenance management of mining road tunnels:
Synthesis**

ILF Beratende Ingenieure AG

Thomas Fries
Konrad Blank
Angelika Zoderer

**Forschungsprojekt AGT2017/002 auf Antrag des Bundesamtes für
Strassen ASTRA
April 2026 | 1822**

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)

Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunnel: Synthesebericht

Gestion constructive de la maintenance en tunnel routiers creusé: Synthèse

Maintenance management of mining road tunnels: Synthesis

ILF Beratende Ingenieure AG

Thomas Fries

Konrad Blank

Angelika Zoderer

**Forschungsprojekt AGT2017/002 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA
April 2026 | 1822**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Konrad Blank

Mitglieder

Thomas Fries

Angelika Zoderer

Federführende Fachkommission

Begleitkommission Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunnel

Begleitkommission

Präsident

Heinz Ehrbar

Mitglieder

Raffaele Filippini

Christian Gammeter

Federica Sandrone

Bastian Otto

Urs Vollmer

Martin Wyss

Antragsteller

Bundesamt für Strassen ASTRA

Bezugsquelle

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

April 2026

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Zusammenfassung.....	10
Résumé	15
Summary	20
Präambel.....	25
1 Einleitung	27
1.1 Ausgangslage	27
1.2 Übergeordnete Fragestellungen im Forschungsprojekt.....	27
2 Forschungsauftrag und Vorgehen	29
2.1 Ziel des Forschungsprojekts	29
2.2 Abgrenzung Forschungsprojekt	31
2.3 Gliederung der Forschungsarbeit in Einzelprojekte ...	32
2.4 Nutzniesser	33
2.5 Methodik und Vorgehen	33
2.6 Ablauf und Organisation des Forschungsprojekts	35
3 Überblick über die Resultate	37
4 Stand der Praxis und Forschung	41
4.1 Stand der Praxis und Forschung im Erhaltungsmanagement Tunnel.....	41
4.2 Folgerungen für das Forschungsprojekt.....	46
5 Erhaltungsprozess und Projektgenerierung	49
6 Bauwerksgliederung	53
7 Fallbeispiele	57
8 Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln	59
8.1 Einleitung	59
8.2 Katalog der Befunde und Schadensprozesse	59
8.3 Katalog der Gefährdungsbilder	64
8.4 Anwendung, Aussagekraft und Grenzen der Kataloge	67
9 Überwachungs- und Inspektionsmethoden.....	69
9.1 Einleitung	69

9.2	Katalog der Untersuchungsmethoden	69
9.3	Konzeptvorschlag Vergleichsmethodik inkl. Überlegungen zur Integration von Risikoansätzen	72
9.4	Anwendung, Aussagekraft und Grenzen bei Untersuchungsmethoden.....	73
10	Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	75
10.1	Einleitung.....	75
10.2	Katalog erprobter Erhaltungsmassnahmen	75
10.3	Anwendung sowie Aussagekraft und Grenzen bei Erhaltungsmassnahmen	80
11	Entwicklung eines Kostenmodells	83
11.1	Einleitung.....	83
11.2	Vorgeschlagenes Kostenmodell (Bottom-Up-Ansatz)	83
11.3	Verifizierung Kostenkennwerte (Top-Down-Ansatz)	85
11.4	Anwendung sowie Aussagekraft und Grenzen.....	86
12	Entscheidungsfindung	89
12.1	Einleitung.....	89
12.2	Aktuelles Vorgehen Zustandsbeurteilung und Entscheidungsfindung im operativen Erhaltungsmanagement.....	89
13	Erkenntnisse und Folgerungen	97
13.1	Stand der Praxis des operativen Erhaltungsmanagement von Strassentunnel.....	97
13.2	Bauwerksgliederung.....	98
13.3	Untersuchungsmethoden.....	101
13.4	Erhaltungsmassnahmen	102
13.5	Kostenmodell	103
13.6	Entscheidungsmodell.....	104
14	Empfehlungen.....	105
14.1	Allgemeine Empfehlung.....	105
14.2	Konkrete Empfehlungen	105
	Literaturverzeichnis	109
	Datenverwendung	112
	Anhänge.....	113
I	Fallbeispiel Nr. 4 Gotschnatunnel	114
II	Liste der Schadensprozesse (S.-Katalog)	118
III	Liste der Befunde (BE-Katalog)	119
IV	Informationsbereich S.-Katalog.....	120
V	Beispiel Katalogblatt Schadensprozess	122
VI	Liste der Gefährdungsbilder (GB. Katalog)	126
VII	Beispiel Katalogblatt Gefährdungsbild	127
VIII	Beispiel Beziehungsstruktur GB-23 «Betonabplatzung auf Fahrbahn»	129

IX	Liste der Untersuchungsmethoden (U.-Katalog)	130
X	Informationsbereiche U.-Katalog	134
XI	Bsp. Katalogblatt Untersuchungsmethoden.....	137
XII	Liste der Erhaltungsmassnahmen (M.-Katalog)	139
XIII	Beispiel Katalogblatt Erhaltungsmassnahmen.....	142
XIV	Zusammenfassung der Empfehlungen aus den Einzelprojekten.....	145
XII	Glossar	148
	Projektabschluss	151

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einzelprojekte und ihre Hauptschnittstellen und Datenlieferungen	32
Abbildung 2: Prozesse des Erhaltungsmanagements gemäss SN 640 900	50
Abbildung 3: Entscheidungsfindungsprozess in der Erhaltungsplanung von bergmännischen Strassentunnel (Quelle siehe Schlussbericht EP1 [2])	51
Abbildung 4: Tunnelprofiltypen	55
Abbildung 5: Beispiel für die Verknüpfungen der Kataloge EP1 bis EP3 mit Hilfe der übergeordnet definierten Bauwerksgliederung. Quelle Schlussbericht EP1 [2]	56
Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Beziehungsstruktur der Einflussfaktoren für Gefährdungsbild Tragwerksversagen (lesbares Beispiel, siehe Anhang VIII)	66
Abbildung 7: Vorgehensvorschlag zur systematischen Eingrenzung der möglichen Schadensprozesse basierend auf visuellen Befunden im Rahmen der Inspektion	67
Abbildung 8: Beispielhafter Auszug aus Katalogblatt 3 mit Angaben zu Kostenelementen der Erhaltungsmassnahme «Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz	78
Abbildung 9: Idealisierte, theoretische Zustand- und Alterungsentwicklungskurve ohne/mit Massnahmen	79
Abbildung 10: Attribute zur Wirkungsweise / Effektivität zu Handen Entscheidungsmodellen (Legende: PoF = Eintretenswahrscheinlichkeit), aus [5]	80
Abbildung 11: Schematische Darstellung des Kostenmodells und die Verknüpfung mit den anderen Einzelprojekten	85
Abbildung 12: Ermittlung Kosten auf Kostenebene K2 mittels Bottom-Up- und Top-Down-Ansatz	86
Abbildung 13: Definition der Zustandsklassen und Kriterien gemäss ASTRA [9]	93
Abbildung 14: Kurzbezeichnung der Zustandsnoten für die verschiedenen Infrastrukturobjekte und Beschreibung der Qualität, der Beurteilungskriterien und der Handlungsanweisung in Worten aus [6]	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektorganisation und beteiligte Firmen	35
Tabelle 2: Übersicht der Resultate aus dem Forschungsprojekt	39
Tabelle 3: Schadensmedium Typ (S. Typ)	60
Tabelle 4: Schadensprozessstypen am Beispiel Schadensmedium «Baugrund»	60
Tabelle 5: Befundgruppen	62
Tabelle 6: Massnahmengliederung, Massnahmentyp	76

Abkürzungsverzeichnis

Art.	Artikel
AAR	Alkali-Aggregat Reaktion
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BA	Bauart
Bd.	Band
BE	Befunde
BIM	Building Information Modeling
BK	Begleitkommission
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstung
BWT	Bauwerksteile
CoF	Consequences of Failure (Auswirkungen)
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen
DK	Drittkosten
E	Effizienz = Risikodifferenz Ausgangszustand / Kosten des Untersuchs
EP	Einzelprojekt oder Erhaltungsplanung
FaS	Fachspezialisten
FOST	Forschungsstellen
GB	Gefährdungsbilder
GPL	Gesamtprojektleitung
ID	Eindeutige Identifizierungsnummer
KI	Künstliche Intelligenz
KUBA	Kunstabtendatenbank
LCC	Life Cycle Costs
LIDAR	Light Detecting an Ranging
M	Erhaltungsmassnahmen
MUF	Maschinenunterstützter Vortrieb im Festgestein
MUL	Maschinenunterstützter Vortrieb im Lockergestein
PM	Projektmanagement
PoF	Probability of Failure (Eintretenswahrscheinlichkeit)
R	Risiko (Produkt aus PoF x CoF)
S	Schadensprozesse
SBV	Schweizerischer Baumeisterverband
SK	Strassennutzerkosten
SIA	Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizer Norm
SPV	Sprengvortrieb
TBM	Tunnelbohrmaschinenvortrieb
UB	Unsicherheitsbeiwert
UHFB	Ultrahochfester Faserbeton
USM	Untersuchungsmethoden
VSS	Vereinigung Schweizerischer Strassen- und Verkehrsfachleute
ZK	Zustandsklasse

Zusammenfassung

Im Jahr 2014 hat das ASTRA einen Forschungsauftrag zum Thema Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln ausgelöst, der 2016 in einem Bericht zum Initialprojekt [1] 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 fünf 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. Diese fünf Einzelprojekte gemäss nachfolgender Liste wurden in Anlehnung an die Teilprozesse des operativen Erhaltungsmanagement unterteilt bzw. definiert, so dass eine gesamtheitliche Systematik für bergmännische Tunnel entwickelt wurde.

- Einzelprojekt EP1 Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln [2]
- Einzelprojekt EP2 Diagnostik - Überwachungs- und Inspektionsmethoden [3]
- Einzelprojekt EP3 Festlegung von standardisierten Erhaltungsmassnahmen pro Schadensprozess [4]
- Einzelprojekt EP4 Entwicklung eines Entscheidungsmodells (nicht publiziert)
- Einzelprojekt EP5 Kostenmodell [5]

Zwischen diesen Teilprozessen bzw. Einzelprojekten bestehen mehr oder weniger bedeutende Schnittstellen, welche in Abbildung 1 dargestellt sind. In der Abbildung wird zwischen Haupt- und Nebenschnittstellen unterschieden. In der Leseart bedeuten Hauptschnittstellen in Pfeilrichtung, dass die Angaben des Vorgänger-Einzelprojekts ein notwendiger (aber nicht hinreichender) Input für das Folge-Einzelprojekt sind. Nebenschnittstellen zeigen mögliche weitere Inputdaten, die aber nicht zwingend für das Folge-Einzelprojekt erforderlich sind.

Der vorliegende Synthesebericht fasst die im Rahmen des Forschungsprojekts erstellten Forschungsergebnisse der Einzelprojekte EP1 bis EP3 und EP5 zusammen. Autor des Syntheseberichtes ist die Gesamtprojektleitung (GPL) dieser Forschungsarbeit. Die umfassende und massgebende Beschreibung der Forschungsergebnisse ist in den Schlussberichten VSS 1781, VSS 1784, VSS 1779 sowie VSS 1774 der Einzelprojekte enthalten.

Der Schlussbericht zu EP4 «Entwicklung eine Entscheidungsmodelles» wurde auf Antrag der Begleitkommission (BK) und Gesamtprojektleitung (GPL) sowie Entscheid des ASTRA nicht publiziert, weshalb diese Forschungsergebnisse im Synthesebericht nicht dokumentiert werden können. Anstelle dieser Ergebnisse gehen die Autoren des Syntheseberichtes im Kap. 0 auf die heutige Praxis und dessen Grenzen zum operativen Erhaltungsentscheid ein und skizzieren mögliche Ansätze zur Systematisierung und Standardisierung.

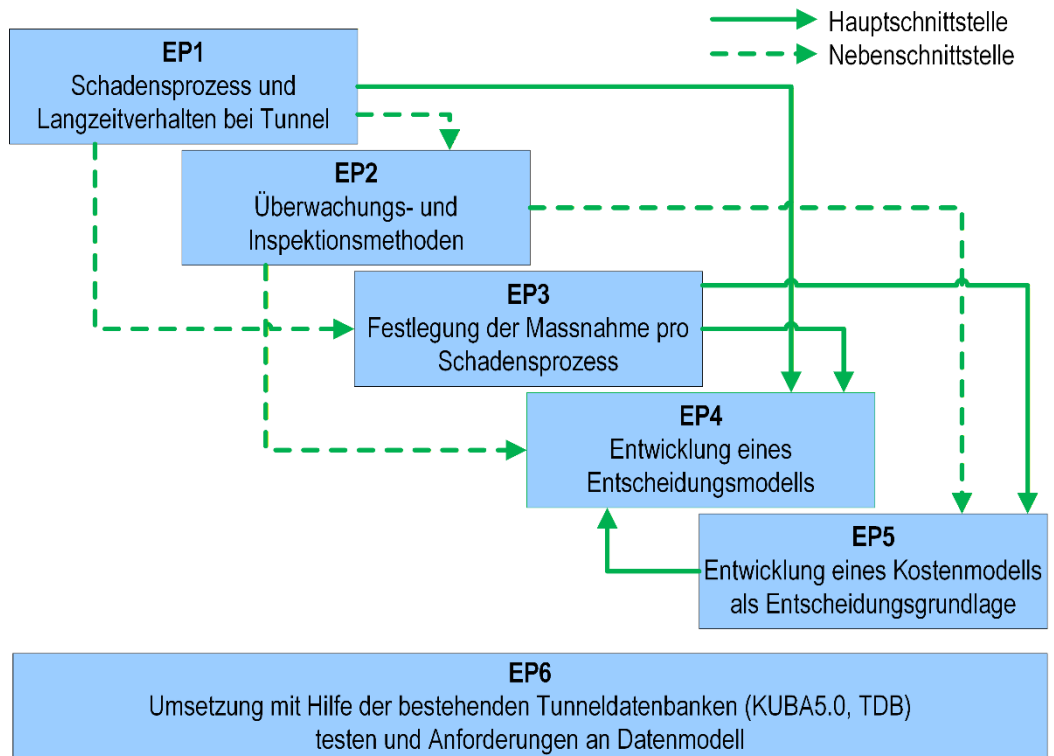


Abbildung 1: Einzelprojekte und ihre Hauptschnittstellen und Datenlieferungen

Der Synthesebericht legt den Schwerpunkt auf die Beschreibung der erarbeiteten Resultate und deren Verknüpfungen untereinander, ohne auf die dazu verwendeten Datengrundlagen, Methoden, Auswertungen und Herleitungen vertieft einzugehen. Der Synthesebericht soll damit den Einstieg in die Einzelprojekte vereinfachen. Als Beitrag zum Verständnis der Einzelprojekte sind relevante Resultate in Form von Anhängen beigelegt. Sie dienen als Illustration und können nachgeschlagen werden, ohne dass die Schlussberichte aller Einzelprojekte konsultiert werden müssen.

Der Fokus des Forschungsprojekts gilt dem operativen Erhaltungsmanagement auf Stufe des einzelnen Tunnelobjekts (d.h. Objektebene) und nicht der strategischen Netzebene. Es berücksichtigt ausschliesslich die Zustandsverschlechterung als Folge von Materialalterung, Abnutzung und externen Angriffsfaktoren der bergmännisch erstellten, baulichen Strukturen von Strassentunnel.

Nicht Gegenstand des vorliegenden Forschungsprojekts sind die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) eines Tunnels, welche Bestandteil eines separaten Fachbereichs sind. Erhaltungsbedarf als Folge von Nutzungsänderungen (z.B. Mehrverkehr), geänderter Anforderungen (z.B. Normkonformität) oder BSA-induzierter baulicher Anpassungen sind nicht Gegenstand dieses Forschungsprojekts.

Das gewählte Vorgehen entsprach den Vorgaben des Initialprojekts [1]. Die Forschungsstellen der EPs stützten sich einerseits auf den aktuellen schweizerischen und internationalen Forschungsstand gemäss Literaturrecherche sowie auf die Erfahrungen aus bereits ausgeführten Erhaltungsprojekten ab. Für letzteres wurden neun

repräsentative Fallbeispiele von Strassentunnel in der Schweiz evaluiert und beschrieben, welche in allen Einzelprojekten gleichermaßen aber themenspezifisch analysiert und ausgewertet wurden.

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 Objektenebene.

Als Ergebnis aus dem Einzelprojekt «Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln» (EP1) sind drei Kataloge entstanden, welche detaillierte und strukturierte Informationen zu den für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozessen und deren möglichen Konsequenzen (Gefährdungen) liefern.

Im Rahmen des Einzelprojekt «Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden» (EP2) resultierte ein Katalog der Untersuchungsmethoden (USM), sowie ein Konzeptvorschlag Vergleichsmethodik (inkl. erste Überlegungen zur Integration von Risikoüberlegungen). Darin werden Methoden und Werkzeuge zur Identifikation von Schadensprozessen aus detektierten Befunden in Tunnelbauwerken systematisiert und katalogisiert. Zudem wurde versucht, eine praxisbezogene Vergleichsmethodik für die Optimierung der Überwachungsprogramme unter Berücksichtigung von Risiken zu erarbeiten.

Im Einzelprojekt «Standardisierte Erhaltungsmassnahmen» (EP3) wurden Erhaltungsmassnahmen für jeden Schadensprozess standardisiert beschrieben und in Abhängigkeit ihrer Wirksamkeit und Effizienz, ihrer Folgekosten während der Nutzung, ihres Ausführungsaufwandes und ihres Langzeitverhaltens katalogisiert. Als Ergebnis entstand auch hier ein Katalog erprobter Erhaltungsmassnahmen.

Die Kataloge «Befunde», «Schadensprozesse» und «Gefährdungsbilder» aus EP1 beschreiben die relevanten chemischen und physikalischen Prozesse, welche zu Materialschwächung und -alterung führen und letztendlich die Trag- bzw. Betriebssicherheit von Tunnelbauwerken oder einzelnen Bauwerksteilen in unzulässiger Art und Weise beeinträchtigen bzw. gefährden. Die Beschriebe zu den Gefährdungsbildern enthalten neben Angaben zum Versagensmechanismus auch eine Beziehungsstruktur der Einflussfaktoren. Solche Beziehungsstrukturen können eine Basis für eine einheitliche, standardisierte und systematisierte Risikobeurteilung im Rahmen von Entscheidungsmodellen bilden. Die Autoren schränken ein, dass diese Beziehungsstrukturen eine starke Vereinfachung der Realität darstellen und die kritische und ingenieurmässige Beurteilung der Datenbasis für eine korrekte Risikobeurteilung unabdingbar und mit dem jetzigen Stand der Technik nicht automatisierbar bleibt.

Die Kataloge der «Untersuchungsmethoden» und der «Erhaltungsmassnahmen» aus den Einzelprojekten EP2 und EP3 listen andererseits eine grosse Zahl von Werkzeugen

auf, um Schadensprozesse zu verifizieren bzw. in Bezug auf Umfang und Entwicklung möglichst genau einzugrenzen (USM) oder um präventiv oder korrigierend wirkende, wirksame «Massnahmen» zur Verlängerung der Restnutzungsdauer vorzuschlagen.

Systematisch gegliederte Kataloge der tunnelrelevanten tragenden Bauwerksteile ermöglichen, die Schadensprozesse und Massnahmen eindeutig mit den gefährdeten Bauwerksteilen zu verknüpfen. Hierzu wurde der Begriff der Bauteilart vorgeschlagen, welcher sich aus der Kombination des Bauwerksteils (z.B. Zwischendecke) und deren Bauart (z.B. Stahlbeton) zusammensetzt.

Diese Kataloge dienen Erhaltungsplanern einerseits als strukturierte Nachschlagewerke und andererseits als Basis für eine systematisierte und standardisierte Erhaltungsplanung von Strassentunnel auf Objektebene. Die Kataloge sind so gegliedert, dass sie einfach in digitale Datenmodelle übertragbar sind. Damit ist die Voraussetzung geschaffen, um in einer späteren Entwicklungsphase diese Informationen effizient in bestehende Tunneldatenbanken (z.B. KUBA5.0) oder neue digitale Datenmodelle zu integrieren.

Im Einzelprojekt EP5 - Kosten wurde ein transparentes Kostenmodell entwickelt, welches auf Basis objekt- und Varianten-spezifischer Angaben auf einfache Art eine Kostenschätzung ermöglicht. In Form eines Exceltools wurde ein Bottom-up Ansatz entwickelt, welcher ausgehend vom Aufwand pro Einzelmassnahme und Grundeinheit (z.B. Reprofilierung pro Quadratmeter Fläche) und Faktorisierungen weiterer kostenrelevanter Aspekte wie Zugänglichkeit und Installationsgrad die Basiskosten ohne Berücksichtigung von Prognoseungenauigkeiten und Risikokosten nachvollziehbar hergeleitet werden können. Das dient dazu, mögliche Massnahmenvarianten bzw. Handlungsoptionen auch in Bezug auf Kosten miteinander zu vergleichen.

Zur Verifikation des Kostenmodells wurde ein Top-Down-Ansatz vorgeschlagen, welcher ausgehend von den Nachkalkulationskosten ausgeführter Bauwerke (Fallbeispiele) Kostenkennwerte herleitete. Die Struktur dieses Top-Down-Ansatzes kann auch als Vorlage für Erhaltungsplaner dienen, in Zukunft Kostenkennwerte aus Erhaltungsprojekten systematisch zu sammeln.

Im Einzelprojekt EP4 sollte ein praxistaugliches Entscheidungsmodell für objektbezogene Erhaltungsentscheide unter Berücksichtigung der Eigenschaften von Bauwerk und Gebirge sowie deren Zustand und Entwicklung erarbeitet werden. Für visuell einfach verfolgbare Schäden kann grundsätzlich auf die «klassische» Erhaltungsplanung verwiesen werden, wie sie bei den Kunstbauten Standard ist. Auf der Grundlage der Befunde und der Schadensgruppen zusammen mit der bekannten Bewertung der Schadensschwere nach Zustandsklassen 1 - 5 können standardisierte Massnahmen vorgeschlagen werden. Anstelle des nicht publizierten Schlussberichtes aus EP4 legen die Autoren des Syntheseberichts die heutige Praxis der Bewertung und Entscheidungsfindung (in Anlehnung an die ASTRA Richtlinien) dar und zeigen mögliche Ansätze zur Systematisierung und Standardisierung innerhalb der bekannten Methoden auf, die einen Beitrag für verbesserte Erhaltungsentscheide leisten könnten.

Durch die Systematisierung und Standardisierung aller Teilprozesse im operativen Erhaltungsmanagement mit Fokus auf Strassentunnel besteht für den Tunnelbetreiber

die Chance, Erhaltungsentscheide einheitlicher und damit auch stabiler zu gestalten, sowie die finanziellen Mittel zur fortdauernden Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit optimal einzusetzen.

Die dazu erarbeitete strukturierte Informationssammlung in Form von Katalogen und Tools stellt für sich allein eine wertvolle Grundlage (Nachschlagewerk) für Inspektoren und Erhaltungsplaner dar. Im Hinblick einer vermehrten Digitalisierung des Erhaltungsmanagement sind zudem wertvolle Vorarbeiten durch die systematische, datenbanktaugliche Gliederung und die durchgehende Verknüpfung der Datensätze zwischen den Katalogen bspw. von Befunden zu Schadensprozessen zu mögliche Untersuchungsmethoden und Gefährdungsbilder bis zu wirksamen Massnahmen erarbeitet worden.

Die eine oder andere Fragestellung wird auch nach Abschluss des Forschungsprojekts noch zu klären sein. Wie weit der Nutzen in Zukunft materialisiert werden kann, hängt davon ab, wie die Vorschläge umgesetzt bzw. durchgesetzt werden können und auch wie weit sie sich in der Praxis bewähren. Die Autoren des Syntheseberichtes formulieren zum Schluss 5 Empfehlungen für weitere Schritte, welche die übergeordnete Zielsetzung und Umsetzung der Vorschläge dieser Forschungsarbeit unterstützen.

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 [1]. 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. Ces cinq projets individuels selon le tableau ci-dessous ont été subdivisés ou définis sur la base des processus partiels de la gestion opérationnelle de la maintenance, de sorte qu'une systématique globale a été développée pour les tunnels miniers.

- Projet individuel EP1 Processus d'endommagement et comportement à long terme dans les tunnels [2]
- Projet individuel EP2 Diagnostic - Méthodes de surveillance et d'inspection [3]
- Projet individuel EP3 Définition d'interventions de maintenance standardisées par processus d'endommagement [4]
- Projet individuel EP4 Développement d'un modèle de décision (non publié)
- Projet individuel EP5 Modèle des coûts [5]

Entre ces sous-processus ou projets individuels existent des interfaces plus ou moins importantes, qui sont représentées dans la figure 1. Dans la figure, une distinction est faite entre les interfaces principales et secondaires. Dans cette lecture, les interfaces principales dans le sens de la flèche signifient que les informations du projet individuel précédent sont une entrée nécessaire (mais pas suffisante) pour le projet individuel suivant. Les interfaces secondaires montrent d'autres données d'entrée possibles, mais qui ne sont pas indispensables pour le projet individuel suivant.

Le présent rapport de synthèse résume les résultats des recherches menées dans le cadre du projet de recherche EP1 à EP3 et EP5. L'auteur du rapport de synthèse est la direction générale du projet (DGP) de ce travail de recherche. La description complète et déterminante des résultats de la recherche est contenue dans les rapports finaux VSS 1781, VSS 1784, VSS 1779 et VSS 1774 des projets individuels.

Le rapport final du projet EP4 « Développement d'un modèle de décision » n'a pas été publié à la demande de la commission d'accompagnement (CE) et de la direction générale du projet (DGP) ainsi que sur décision de l'OFROU, raison pour laquelle ces résultats de recherche ne peuvent pas être documentés dans le rapport de synthèse. En lieu et place de ces résultats, les auteurs du rapport de synthèse se penchent au chapitre 0 sur la pratique actuelle et ses limites en matière de décision opérationnelle de conservation et esquissent des approches possibles de systématisation et de standardisation.

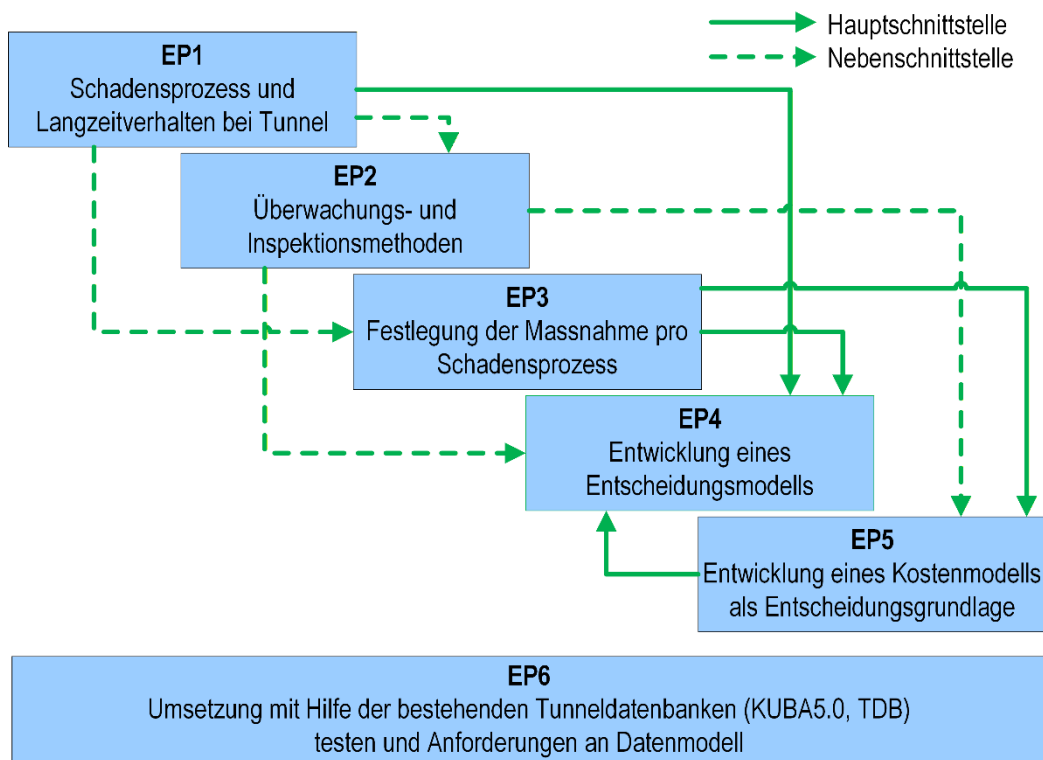


Figure 1: Projets individuels et leurs principales interfaces et livraisons de données

Le rapport de synthèse met l'accent sur la description des résultats obtenus et sur les liens entre eux, sans entrer dans le détail des données de base, des méthodes, des évaluations et des déductions utilisées à cet effet. Le rapport de synthèse doit ainsi simplifier l'accès aux projets individuels. Les résultats pertinents sont présentés sous forme d'annexes afin de contribuer à la compréhension des projets individuels. Ils servent d'illustration et peuvent être consultés sans qu'il soit nécessaire de consulter les rapports finaux de tous les projets individuels.

Le projet de recherche se concentre sur la gestion opérationnelle de la maintenance au niveau de l'objet individuel du tunnel (c'est-à-dire au niveau de l'objet) et non au niveau stratégique du réseau. Il ne prend en compte que la dégradation de l'état due au vieillissement matériel, à l'usure et aux facteurs d'attaque externes des structures construites par l'homme dans les tunnels routiers.

Le présent projet de recherche ne porte pas sur les équipements d'exploitation et de sécurité (EES) d'un tunnel, qui font partie d'un domaine spécialisé distinct. Les besoins de maintenance résultant de changements d'utilisation (p. ex. augmentation du trafic), d'exigences modifiées (p. ex. conformité aux normes) ou d'adaptations de la construction induites par les EES ne font pas l'objet du présent projet de recherche.

La procédure choisie correspondait aux directives du projet initial [1]. Les services de recherche des EP se sont appuyés d'une part sur l'état actuel de la recherche suisse et internationale selon une recherche bibliographique et d'autre part sur les expériences de projets de maintenance déjà réalisés. Pour ce dernier, neuf exemples de cas représentatifs de tunnels routiers en Suisse ont été évalués et décrits, qui ont été analysés et

évalués de la même manière dans tous les projets individuels, mais de manière spécifique au thème.

La recherche bibliographique ainsi que 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 même, on peut constater qu'il existe certes de nombreuses études différentes et des études de cas sur des processus de détérioration concrets, mais que très peu d'entre elles considèrent de manière systématique et globale les processus de détérioration pertinents pour les tunnels routiers miniers ainsi que leurs déclencheurs / causes et facteurs d'influence. Cela vaut en particulier pour l'évaluation des conséquences des processus de détérioration au niveau de l'ouvrage.

Le projet individuel « Processus de détérioration et comportement à long terme dans les tunnels » (EP1) a donné naissance à trois catalogues qui fournissent des informations détaillées et structurées sur les processus de détérioration pertinents pour les tunnels routiers miniers et sur leurs conséquences possibles (dangers).

Dans le cadre du projet individuel « Diagnostic : méthodes de surveillance et d'inspection » (EP2), un catalogue des méthodes d'investigation (USM) ainsi qu'une proposition de concept de méthode comparative (y compris les premières réflexions sur l'intégration des considérations de risque) ont été élaborés. Ce document systématise et catalogue les méthodes et outils permettant d'identifier les processus de détérioration à partir des résultats détectés dans les ouvrages de tunnel. En outre, on a tenté d'élaborer une méthodologie comparative axée sur la pratique pour l'optimisation des programmes de surveillance en tenant compte des risques.

Dans le projet individuel « Mesures de conservation standardisées » (EP3), les mesures de conservation ont été décrites de manière standardisée pour chaque processus de détérioration et cataloguées en fonction de leur efficacité et de leur efficacité, de leurs coûts consécutifs pendant l'utilisation, de leur coût d'exécution et de leur comportement à long terme. Il en résulte ici aussi un catalogue de mesures de conservation éprouvées.

Les catalogues « Constatations », « Processus de détérioration » et « Images de danger » de l'EP1 décrivent les processus chimiques et physiques pertinents qui conduisent à l'affaiblissement et au vieillissement des matériaux et qui, en fin de compte, affectent ou mettent en danger de manière inadmissible la sécurité structurale ou opérationnelle des ouvrages de tunnel ou de certaines parties d'ouvrage. Les descriptions des dangers contiennent, outre des indications sur le mécanisme de défaillance, une structure de relations entre les facteurs d'influence. De telles structures relationnelles peuvent constituer une base pour une évaluation des risques uniforme, standardisée et systématique dans le cadre de modèles de décision. Les auteurs nuancent toutefois le fait que ces structures de relations représentent une simplification importante de la réalité et que l'évaluation critique et par des ingénieurs de la base de données est indispensable pour une évaluation correcte des risques et ne peut pas être automatisée en l'état actuel de la technique.

Les catalogues des « méthodes d'investigation » et des « mesures de conservation » des projets EP2 et EP3 énumèrent d'autre part un grand nombre d'outils permettant de vérifier les processus de détérioration ou de les délimiter le plus précisément possible en termes d'ampleur et d'évolution (USM) ou de proposer des « mesures » préventives ou correctives efficaces pour prolonger la durée d'utilisation résiduelle.

Des catalogues systématiquement structurés des éléments de construction porteurs pertinents pour les tunnels permettent de relier clairement les processus de détérioration et les mesures aux éléments de construction menacés. A cet effet, la notion de type d'élément de construction a été proposée, qui se compose de la combinaison de l'élément de construction (p. ex. faux plafond) et de son type de construction (p. ex. béton armé).

Ces catalogues servent d'une part aux planificateurs de l'entretien comme ouvrages de référence structurés et d'autre part comme base pour une planification systématique et standardisée de l'entretien des tunnels routiers au niveau des ouvrages. Les catalogues sont structurés de manière à pouvoir être facilement transférés dans des modèles de données numériques. Les conditions sont ainsi réunies pour intégrer efficacement ces informations dans des bases de données de tunnels existantes (p. ex. KUBA5.0) ou dans de nouveaux modèles de données numériques lors d'une phase de développement ultérieure.

Dans le projet EP5 - Coûts, un modèle de coûts simple mais transparent a été développé, qui permet d'estimer les coûts de manière simple sur la base de données spécifiques à l'objet et à la variante. Une approche ascendante a été développée sous la forme d'un outil Excel, qui permet de déduire clairement les coûts de base sans tenir compte des imprécisions des prévisions et des coûts liés aux risques, en partant des dépenses par mesure individuelle et unité de base (p. ex. reprofilage par mètre carré de surface) et en facturant d'autres aspects importants pour les coûts, tels que l'accessibilité et le degré d'installation. Cela permet de comparer les variantes de mesures ou les options d'action possibles, également en termes de coûts.

Pour vérifier le modèle de coûts, une approche descendante a été proposée, qui a permis de déduire des valeurs référentielles de coûts à partir des coûts de calcul ultérieur d'ouvrages exécutés (exemples de cas). La structure de cette approche descendante peut également servir de modèle aux planificateurs de la maintenance pour collecter systématiquement à l'avenir les valeurs caractéristiques des coûts des projets de maintenance.

Le projet EP4 avait pour but d'élaborer un modèle décisionnel pratique pour les décisions de conservation relatives à l'objet, en tenant compte des propriétés de l'ouvrage et de la montagne ainsi que de leur état et de leur évolution. Pour les dommages faciles à suivre visuellement, on peut en principe se référer à la planification « classique » de la conservation, telle qu'elle est standard pour les ouvrages d'art. Des mesures standardisées peuvent être proposées sur la base des constats et des groupes de dommages, ainsi que de l'évaluation connue de la gravité des dommages selon les classes d'état 1 à 5. En lieu et place du rapport final non publié de l'EP4, les auteurs du rapport de synthèse présentent la pratique actuelle de l'évaluation et de la prise de décision (sur la

base des directives de l'OFROU) et indiquent des approches possibles de systématisation et de standardisation dans le cadre des méthodes connues, qui pourraient contribuer à améliorer les décisions en matière de conservation.

La systématisation et la standardisation de tous les processus partiels dans la gestion opérationnelle de l'entretien, en mettant l'accent sur les tunnels routiers, offrent à l'exploitant du tunnel la possibilité de prendre des décisions d'entretien plus uniformes et donc plus stables, et d'utiliser de manière optimale les moyens financiers pour garantir en permanence la sécurité et la disponibilité. Cela profite également aux usagers de la route et aux contribuables.

La collection d'informations structurée élaborée à cet effet sous forme de catalogues et d'outils constitue en soi une base précieuse (ouvrage de référence) pour les inspecteurs et les planificateurs de la conservation. Dans la perspective d'une numérisation accrue de la gestion de la conservation, des travaux préparatoires précieux ont en outre été réalisés grâce à la structuration systématique, adaptée à une base de données, et au lien continu des jeux de données entre les catalogues, par exemple des constatations sur les processus de détérioration aux méthodes d'examen possibles et aux images des dangers jusqu'aux mesures efficaces.

L'une ou l'autre question devra encore être clarifiée après la fin du projet de recherche. La mesure dans laquelle l'utilité pourra être matérialisée à l'avenir dépendra de la manière dont les propositions pourront être mises en œuvre ou imposées et également de la mesure dans laquelle elles feront leurs preuves dans la pratique. Les auteurs du rapport de synthèse concluent en formulant 5 recommandations pour des étapes ultérieures qui soutiennent l'objectif global et la mise en œuvre des propositions de ce travail de recherche.

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 [1]. In 2016, in this report, it is shown that the maintenance processes for tunnels are not adequately considered and 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 to ensure robust maintenance decisions and cost-efficient maintenance measures. These five individual projects according to the following table were subdivided or defined based on the sub-processes of operational maintenance management, so that a holistic system for mined tunnels was developed.

- Individual project EP1 Damage processes and long-term behavior in tunnels [2]
- Individual project EP2 Diagnostics - monitoring and inspection methods [3]
- Individual project EP3 Definition of standardized maintenance measures per damage process [4]
- Individual project EP4 Development of a decision mode (not published)
- Individual project EP5 Cost model [5]

There are more or less significant interfaces between these subprocesses or individual projects, which are shown in figure 1. The figure distinguishes between main and secondary interfaces. In this reading, main interfaces in the direction of the arrow mean that the information from the preceding individual project is necessary (but not sufficient) input for the subsequent individual project. Secondary interfaces indicate possible additional input data, which, however, are not necessarily required for the subsequent individual project.

This synthesis report summarizes the research results of the individual projects EP1 to EP3 and EP5 produced as part of the research project. The author of the synthesis report is the overall project management (GPL) of this research work. The comprehensive and authoritative description of the research results is contained in the final reports VSS 1781, VSS 1784, VSS 1779 and VSS 1774 of the individual projects.

The final report on EP4 'Development of a decision model' was not published at the request of the monitoring committee (BK) and overall project management (GPL) as well as the decision of FEDRO, which is why these results cannot be documented in the synthesis report. Instead of these results, the authors of the synthesis report discuss current practice and its limits for operational maintenance decisions in Chapter 0 and outline possible approaches for systematisation and standardisation.

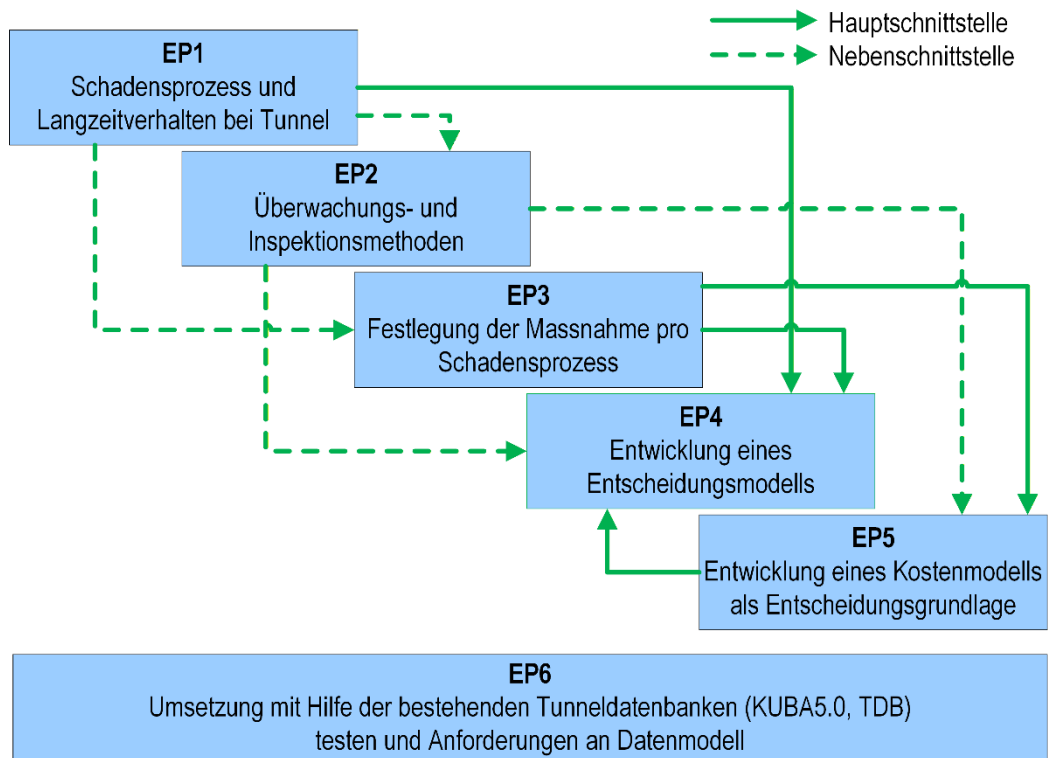


Figure 1: Individual projects and their main interfaces and data deliveries

The synthesis report focuses on the description of the results obtained and the links between them, without going into detail about the databases, methods, analyses and derivations used. The synthesis report is thus intended to simplify access to individual projects. Relevant results are included in the form of appendices as a contribution to understanding the individual projects. They serve as illustrations and can be consulted without having to consult the final reports of all the individual projects.

The focus of the research project is on operational maintenance management at the level of the individual tunnel object (i.e. object level) and not at the strategic network level. It only considers the deterioration of the condition of road tunnels as a result of mechanical ageing, wear and tear and external attack factors.

This research project does not cover the operating and safety equipment of a tunnel, which is part of a separate specialised field. Maintenance requirements as a result of changes in use (e.g. increased traffic), changed requirements (e.g. conformity to standards) or BSA-induced structural adaptations are not the subject of this research project.

The chosen approach corresponded to the specifications of the initial project [1]. The research centers of the EPs drew on the current state of Swiss and international research according to the literature review as well as on the experience gained from maintenance projects already carried out. For the latter, nine representative case studies of road tunnels in Switzerland were evaluated and described, which were analysed and evaluated in all individual projects equally but on a topic-specific basis.

The literature research and the current state of practice and research in relation to maintenance management have shown that the tunnel is not assessed as a subsystem, but often as part of the entire engineering structures. It can also 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 to 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 property level.

As a result of the individual project 'Damage processes and longterm behaviour in tunnels' (EP1), three catalogues have been produced which provide detailed and structured information on the damage processes relevant to road tunnels and their possible consequences (hazards).

The individual project 'Diagnostics: monitoring and inspection methods' (EP2) resulted in a catalogue of investigation methods (USM) and a concept proposal for comparative methodology (including initial considerations on the integration of risk considerations). This catalogue systematises and catalogues methods and tools for identifying damage processes from detected findings in tunnel structures. In addition, an attempt was made to develop a practical comparative methodology for optimising monitoring programs, taking risks into account.

In the individual project 'Standardised maintenance measures' (EP3), maintenance measures for each damage process were described in a standardised way and catalogued depending on their effectiveness and efficiency, their follow-up costs during use, their implementation costs and their longterm behaviour. The result was a catalogue of tried and tested maintenance measures.

The catalogues 'Findings', 'Damage Processes' and 'Hazard Patterns' from EP1 describe the relevant chemical and physical processes that lead to material weakening and ageing and ultimately impair or endanger the load-bearing or operational safety of tunnel structures or individual structural components in an unacceptable manner. In addition to information on the failure mechanism, the descriptions of the hazard patterns also contain a relationship structure of the influencing factors. Such relationship structures can form a basis for a uniform, standardised and systematised risk assessment within the framework of decision models. The authors qualify that these relationship structures represent a strong simplification of reality and that the critical and engineering assessment of the data is indispensable for a correct risk assessment and cannot be automated with the current state of the art.

The catalogues of 'investigation methods' and 'conservation measures' from the individual projects EP2 and EP3, on the other hand, list a large number of tools to verify damage processes or to limit them as precisely as possible in terms of scope and development (USM) or to propose preventive or corrective, effective 'measures' to extend the remaining useful life.

Systematically structured catalogues of the tunnel-relevant load-bearing structural components make it possible to clearly link the damage processes and measures with

the endangered structural components. For this purpose, the concept of component type was proposed, which is made up of the combination of the structural component (e.g. intermediate ceiling) and its type of construction (e.g. reinforced concrete).

These catalogues serve maintenance planners on the one hand as structured reference works and on the other hand as a basis for systematised and standardised maintenance planning of road tunnels at object level. The catalogues are structured in such a way that they can be easily transferred to digital data models. This creates the prerequisite for efficiently integrating this information into existing tunnel databases (e.g. KUBA5.0) or new digital data models in a later development phase.

In the individual project EP5 - Costs, a simple but transparent cost model was developed that enables a simple cost estimate based on object and variant-specific information. A bottom-up approach was developed in the form of an Excel tool which, starting from the cost per individual measure and basic unit (e.g. reprofiling per square metre of area) and factoring in other cost-relevant aspects such as accessibility and degree of installation, allows the basic costs to be derived in a comprehensible manner without taking into account forecasting inaccuracies and risk costs. This serves to compare possible variants of measures or options for action with each other, also in terms of costs.

To verify the cost model, a top-down approach was proposed, which derived cost parameters based on the post-calculation costs of completed buildings (case studies). The structure of this top-down approach can also serve as a template for maintenance planners to systematically collect cost parameters from maintenance projects in the future. In the individual project EP4, a practicable decision model for object-related maintenance decisions was to be developed, taking into account the properties of the structure and rock mass as well as their condition and development. For visually easily traceable damage, reference can generally be made to 'classic' maintenance planning, as is standard for engineering structures. Standardised measures can be proposed based on the findings and the damage groups together with the known assessment of the damage severity according to condition classes 1 - 5. Instead of the unpublished final report from EP4, the authors of the synthesis report present the current practice of assessment and decision-making (based on the FEDRO guidelines) and show possible approaches for systematisation and standardisation within the known methods, which could contribute to improved maintenance decisions.

By systematising and standardising all sub-processes in operational maintenance management with a focus on road tunnels, tunnel operators can make maintenance decisions more uniform and therefore more stable, and to make optimum use of financial resources to ensure continued safety and availability. This also benefits road users and taxpayers.

The structured collection of information developed for this purpose in the form of catalogues and tools represents a valuable basis (reference work) for inspectors and conservation planners. With regard to the increased digitisation of conservation management, valuable preliminary work has also been carried out through the systematic, database-compatible structure and the continuous linking of the data records between

the catalogues, e.g. findings on damage processes to possible investigation methods and hazard patterns to effective measures.

One or two questions will still need to be clarified after the research project has been completed. The extent to which the benefits can be materialised in the future depends on how the proposals can be implemented or enforced and how far they prove themselves in practice. The authors of the synthesis report conclude by formulating 5 recommendations for further steps that support the overall objective and implementation of the proposals for this research work.

Präambel

Dieser Synthesebericht fasst die wichtigsten Ergebnisse des Forschungsprojekt Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel (AGT2017/002) zusammen, welche in fünf Einzelprojekten EP1 bis EP5 erarbeitet wurde. Der Forschungsbericht zu EP4 wird auf Antrag der BK und GPL sowie Entscheid des ASTRA nicht publiziert, weshalb diese Forschungsergebnisse im Synthesebericht nicht dokumentiert werden können.

Die umfassende und massgebende Beschreibung der Forschungsergebnisse ist in den Schlussberichten VSS 1781, VSS 1784, VSS 1179 sowie VSS 1774 der Einzelprojekte enthalten. Diese Berichte gehen der hier zusammengefassten Beschreibung vor. Das Urheberrecht der Ergebnisse der Einzelprojekte steht den Autoren der Einzelprojekte zu. Im Synthesebericht werden zahlreiche Textbausteine und Abbildungen unverändert oder leicht angepasst übernommen. Die Quelle der Abbildungen wird in der Beschriftung jeweils referenziert. Hingegen werden die Textbausteine nicht in Anführungszeichen gesetzt und auf die Nennung der Quelle verzichtet. In der Regel können die Texte aufgrund der Kapitelwahl eindeutig den Schlussberichten und damit der Quelle zugewiesen werden.

Die Autoren des Syntheseberichtes haben einzelne Themen und Aspekte weiter vertieft, welche nicht in den Einzelprojekten erarbeitet bzw. in den Schlussberichten zu den Einzelprojekten dokumentiert sind. Diese Textstellen werden entsprechend vermerkt und das Urheberrecht dazu steht den Autoren des Syntheseberichtes zu.

Der Synthesebericht ist wie folgt gegliedert. In Kap. 0 wird einleitend der Kontext zur Forschungsarbeit gegeben bevor in Kap. 1 der Forschungsauftrag (Ziel, Abgrenzung, Gliederung, Nutzniesser) und das Vorgehen (inkl. Methodik und Grundlagen) umrissen werden. In Kap. 2 wird gleich vorneweg ein Überblick über die Resultate aus allen Einzelprojekten gegeben, ohne bereits auf deren Inhalte einzugehen. Alle nachfolgenden Kap. 3 bis 13 fassen die Resultate inhaltlich zusammen. Dazu gehört eine zusammenfassende Analyse des Stands der Praxis und Forschung (Kap. 3), der aufgearbeiteten Fallbeispiele zur Plausibilisierung aller EP (Kap. 4), der unter den EPs abgestimmten Bauwerksgliederung (Kap. 5) sowie die Beschreibung der Ergebnisse der Einzelprojekte EP1 bis EP5 (Kap. 6 bis Kap. 13). In Kap. 14 werden die wesentlichen Erkenntnisse und Folgerungen und in Kap. 15 die davon abgeleiteten Empfehlungen aus Sicht der Autoren dieses Syntheseberichtes dokumentiert. Die Anhänge I bis XIV enthalten beispielhafte Auszüge von Katalogen und Listen aus den EP.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Der Unterhalt des Nationalstrassennetzes ist eine zentrale Aufgabe des ASTRA, der Schweizer Fachbehörde für die Strasseninfrastruktur. Das ASTRA betreut über 250 Tunnelanlagen (Stand 20123) im Alter zwischen 75 bis 1 Jahr und einem Wiederbeschaffungswert (WBW) von 38 Mrd. CHF. In den letzten 10 Jahren haben sich die Unterhaltsausgaben für Tunnel fast verdreifacht [6]. Auf Tunnel entfielen im Jahr 2023 170 Mio. CHF an Ausgaben für Unterhalt, was ca. 0.45% ihres Wiederbeschaffungswertes bzw. 14% der gesamten Unterhaltskosten für Nationalstrassen entspricht.

Der Zustand der Infrastruktur fasst das ASTRA mit einer Zustandsbenotung mit Zustandsklassen zusammen (Kap. 12.2.4 bzw. Abbildung 13). Während um 2011 erst 38% der Tunnelanlagen zustandsbewertet waren, liegt dieser Anteil (gemessen am WBW) heute bereits bei 96% (Stand 2023). Der mittlere Zustand aller per Ende 2023 zustandsbewerteten Tunnelanlagen betrug 2.19. Damit ist der Gesamtzustand leicht schlechter als die vom ASTRA als Zielvorgabe angestrebte mittlere Zustandsnote von 1.90 [6]. Der grösste Teil davon (78%) ist in einem guten und akzeptablen Zustand. Nur einzelne Tunnelbauwerke sind in einem schlechten Zustand und müssen mittelfristig saniert werden.

Mit der Zunahme der Grösse und Komplexität des Nationalstrassennetzes, der Zunahme der Verkehrsbelastung und der Anforderungen steigt die Bedeutung und der Mittelbedarf des Erhaltungsmanagement u.a. von Tunneln. Ziel des Erhaltungsmanagement ist es, die Verkehrssicherheit und die Verfügbarkeit der Anlagen bei hoher Kostenwirksamkeit dauerhaft sicherzustellen.

1.2 Übergeordnete Fragestellungen im Forschungsprojekt

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

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

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

Zum Thema Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln hat das ASTRA im Jahr 2014 einen Forschungsauftrag ausgelöst, welcher 2016 in einem Bericht zum Initialprojekt [1] 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 anderen Konzepte, die sich auf Teilsysteme, insbesondere auf die Erhaltung des Trassees (offene Fahrbahn), der Brücken und der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) beziehen. Während für die Kunstbauten und das Trassee bereits fortgeschrittene Modelle für die langfristige Erhaltungsplanung bestehen, befindet sich das Erhaltungsmanagement von Tunneln, auch im Hinblick auf eine künftige Integration dieses Teilbereiches in ein übergeordnetes systematisches Erhaltungsmanagement, noch in einem Anfangsstadium» [7], [8].

In der Schweiz ist die Erhaltung von bergmännischen Tunneln bisher projektbezogen, aber nicht systematisiert, behandelt worden. Die Schadenserfassung und Zustandsbewertung aller Infrastrukturprojekte des ASTRA ist vereinheitlicht [9]. Tunnel werden generell alle fünf Jahre in einer Hauptinspektion inspiziert. Typischerweise werden die visuell erkennbaren, bedeutenden Schäden auf Schadensskizzen, Tabellen/Listen oder in KUBA-Tunnel-Tool nachgeführt, so dass die Schadensentwicklung nachvollzogen werden kann. Diese Informationen bilden die wichtigste, datenbasierte Grundlage für strategische und operative Erhaltungsentscheide. Anzustreben ist dafür eine Datenqualität, welche die relevanten Informationen objektiv, effizient, reproduzierbar und verwertbar erhoben hat. Das ist mit den heutigen Methoden und Systematiken nicht bzw. nur teilweise der Fall; hier besteht ein grosses Potential für Verbesserungen.

In naher Zukunft werden technologische und gesellschaftliche Entwicklungen das Verkehrssystem aber auch die Zustandserfassung grundlegend beeinflussen. Die Veränderungen unter Nutzung der digitalen Technologien erfordern in Zukunft auch in der Erhaltungsplanung Anpassungen und Weiterentwicklungen.

Im Initialprojekt [1] ist dargelegt, dass die Erhaltungsprozesse für Tunneln, 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 Forschungsauftrag und Vorgehen

2.1 Ziel des Forschungsprojekts

2.1.1 Übergeordnetes Ziel

Übergeordnetes Hauptziel des Forschungsprojekts 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 einheitlichem Vorgehen treffen zu können. Diese Erhaltungsentscheide beziehen sich primär auf den Verfahrensschritt «Projektgenerierung». Die Systematisierung des Erhaltungsprozesses bzw. des Entscheidungsprozesses dient auch der Transparenz der Entscheide. Damit soll erreicht werden, dass sowohl die Erhaltungsentscheide als auch die dazugehörigen 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, Einfluss anderer Fachgebiete vor allem BSA). 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) über alle Tunnelanlagen bei einem vorgegebenen Anteil des jährlichen Erhaltungsbudget vom Wiederbeschaffungswert nicht überschritten wird.

Zudem sollen die Voraussetzungen verbessert werden, um 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.

2.1.2 Pflichtenheft

Die drei Einzelprojekte EP1 bis EP3 wurden aufgefordert, Schadensprozesse und Gefährdungsbilder (also Konsequenzen von Schäden) (EP1), Untersuchungsmethoden (EP2) und Standardmassnahmen (EP3) zu kompilieren und zu katalogisieren. Die Katalogeinträge sollten systematisiert beschrieben werden. Es sollten alle für die Erhaltungsplanung relevanten Informationen strukturiert beschrieben werden. In den

Pflichtenheften wurden die relevanten Informationen für jedes Einzelprojekt aufgelistet.

Die Kataloge sollten vollständig sein, also alle heute bekannten Schadensprozesse, Untersuchungsmethoden und Massnahmen auflisten. Dazu wurden die Einzelprojekte aufgefordert, den Nachweis der Vollständigkeit zu erbringen.

Kosten spielen für Erhaltungsentscheide eine wichtige Entscheidungsgrundlage. Daher war das Ziel des Einzelprojekts EP5, ein einheitliches, zuverlässiges und praxistaugliches Kostenmodell zur Bewertung von Erhaltungsvarianten (Erhaltungsmassnahmen und Untersuchungsmethoden) für bergmännische Tunnel zu entwickeln. Es sollten die relevanten Kosten für präventive und korrektive Massnahmen definiert und systematisiert werden. Es sollte ein ausreichend detailliertes und nachvollziehbares Kostenmodell vorgeschlagen werden, das als Entscheidungsgrundlage zur Projektgenerierung genutzt werden kann.

Das Einzelprojekt EP4 sollte ein praktikables und umsetzbares Entscheidungsmodell für die Erhaltungsplanung von Tunnel ausarbeiten, das nachvollziehbare Hinweise gibt, ob ein Erhaltungsprojekt initiiert werden soll und welche Massnahmen bzw. Handlungsoptionen im Vordergrund stehen. Die systematische Verknüpfung zwischen Befund, Schadensprozess und Massnahmen sollten in das Modell einfließen. Das Modell sollte daher mit den Katalogen und Modellen der übrigen Einzelprojekte kompatibel sein. Das Entscheidungsmodell sollte auf transparenten und nachvollziehbaren Bewertungsmethoden und -kriterien basieren; Risikobetrachtungen sollten Bestandteil der Bewertung sein.

Im Hinblick auf die spätere digitale Nutzung sollten die Kataloge und Informationen sowie das Kosten- und Entscheidungsmodell in einer Form vorliegen, dass sie später bei Bedarf in bestehende oder neue Datenmodelle und -banken einfach implementiert und weiterentwickelt bzw. -verwendet werden könnten.

Zudem wurden die Einzelprojekte aufgefordert, diese Informationen auch über die Schnittstellen zwischen den Einzelprojekten so zu gliedern und zu beschreiben, dass diese ebenfalls datenbankkompatibel miteinander verknüpft werden können.

Allen Einzelprojekten wurde eine einheitliche, im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelte Bauwerksgliederung zugrunde gelegt. Entsprechend sollten mit den Katalogeinträgen auch klare Bezüge zu den Bauwerksteilen geschaffen werden.

Als Resultat wurde neben einem Schlussbericht pro Einzelprojekt auch Katalogblätter und Modelle in elektronischer Form sowie Datenblätter von Fallbeispielen verlangt.

In den Kap. o bis o werden die Einzelprojekt-bezogenen Vorgaben für jedes EP zusammengefasst und deren Erfüllung summarisch kommentiert.

2.2 Abgrenzung Forschungsprojekt

Im Erhaltungsmanagement unterscheidet das ASTRA die vier Fachbereiche Fahrbahnen (Trasse), Kunstbauten, Tunnel sowie Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen, wobei der Fachbereich Tunnel sämtliche Elemente der bergmännisch erstellten Tunnelstrukturen umfasst, [6].

Dieses Forschungsprojekt berücksichtigt ausschliesslich die bergmännisch erstellten baulichen Strukturen von Strassentunnel 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, Querverbindungen, SOS-/Hydrantennischen, Aufweitungen und Überfirungen sowie Energieversorgungsstationen und Lüftungszentralen inkl. Lüftungsschächte. Da in Strassentunnel praktisch ausschliesslich Tunnelinnenschalen in Ortbeton vorkommen, wird auf gemauerte Gewölbe, wie sie in alten Bahntunnel typisch sind, verzichtet.

Nicht Gegenstand des Forschungsprojekts sind die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) inkl. der elektromechanischen Ausrüstung eines Tunnels, welche Bestandteil eines separaten Fachbereichs sind. Das ist eine relevante Abgrenzung, sind doch die Wartungszyklen von elektrisch-mechanischen Komponenten im Vergleich zu baulichen Komponenten in der Regel deutlich kürzer. Als Folge davon werden oft Erhaltungsentscheide für Tunnel als Folge von Lebenszyklen der BSA-Einrichtungen getroffen und im Zuge davon auch bauliche Erhaltungsmassnahmen umgesetzt [10].

Der Fokus des Forschungsprojekts gilt dem operativem Erhaltungsmanagement auf Stufe des einzelnen Tunnelobjekts (d.h. Objektebene) und nicht der strategischen Netzebene¹. Unter Netzebene wird gemäss Begriffsdefinition SN 640 900 [8] die Gesamtheit der Strassenabschnitte des Nationalstrassennetzes verstanden. Letzteres schliesst aber nicht aus, dass die Forschungsergebnisse auch von Nutzen für das strategische Erhaltungsmanagement auf Netzebene sind.

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

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

¹ Das ASTRA unterscheidet organisatorisch zwischen Erhaltungsmanagement (strategisches Erhaltungsmanagement bei Abteilung N Strassennetze) und Erhaltungsplanung (operatives Erhaltungsmanagement beim gleichnamigen Fachbereich der fünf ASTRA-Filialen)

Als weitere Abgrenzung lag der Fokus des Forschungsprojekts, Wissenslücken in Bezug auf Elemente im Erhaltungsprozess von bergmännischen Tunnel auf bekannte und in der Praxis erprobte Prozesse, Methoden und Massnahmen zu beschränken [11].

2.3 Gliederung der Forschungsarbeit in Einzelprojekte

Ausgehend vom Erhaltungsprozess für bergmännische Tunnel (vgl. Kap. 0) wurden im Rahmen des Initialprojekts [1] Teilprozesse identifiziert, für welche spezifische Grundlagen zu erarbeiten sind. Auf dieser Basis wurde im Initialprojekt eine Untergliederung des Forschungsvorhabens «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel» in sechs Einzelprojekte (EP) wie folgt vorgeschlagen:

- Einzelprojekt EP1 Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln [2]
- Einzelprojekt EP2 Diagnostik- Überwachungs- und Inspektionsmethoden [3]
- Einzelprojekt EP3 Festlegung von standardisierten Erhaltungsmassnahmen pro Schadensprozess [4]
- Einzelprojekt EP4 Entwicklung eines Entscheidungsmodells (nicht publiziert)
- Einzelprojekt EP5 Kostenmodell [5]
- Einzelprojekt EP6 Umsetzung- Aufbau einer Tunneldatenbank - Skizze durch einen Prototyp (zurückgestellt)

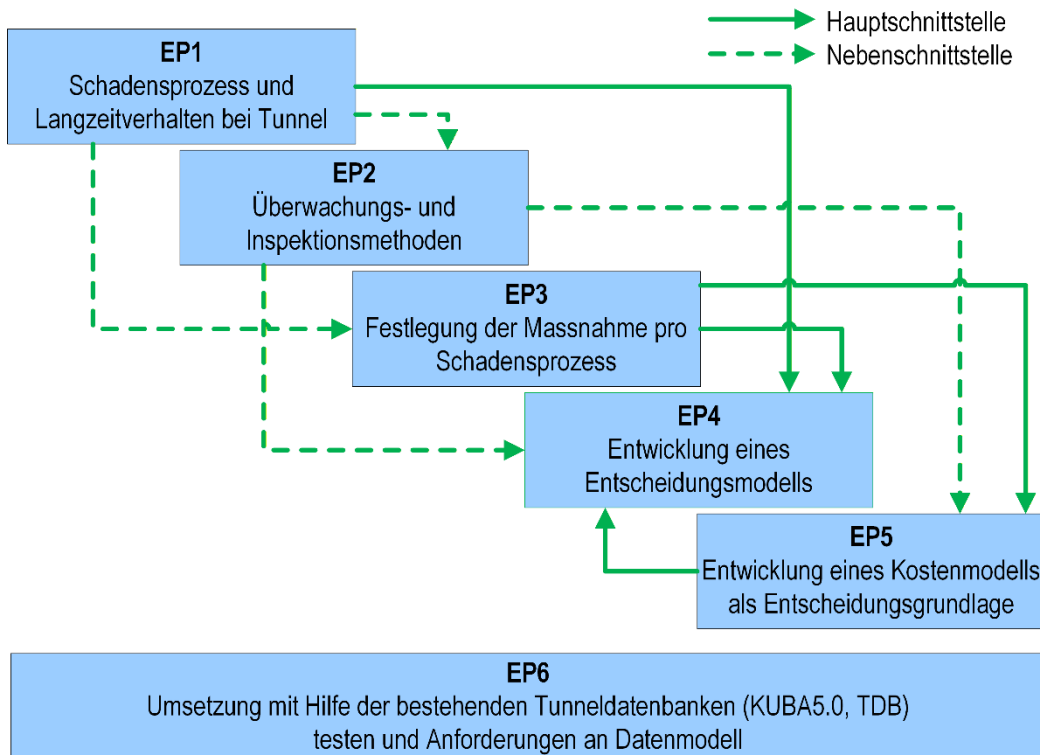


Abbildung 1: Einzelprojekte und ihre Hauptschnittstellen und Datenlieferungen

Zwischen diesen Teilprozessen bzw. Einzelprojekten bestehen mehr oder weniger bedeutende Schnittstellen, welche in Abbildung 1 dargestellt sind. In der Abbildung wird zwischen Haupt- und Nebenschnittstellen unterschieden. In der Leseart bedeuten Hauptschnittstellen in Pfeilrichtung, dass die Angaben des Vorgänger-Einzelprojekts

ein notwendiger (aber nicht hinreichender) Input für das Folge-Einzelprojekt sind. Nebenschnittstellen zeigen mögliche weitere Inputdaten, die aber nicht zwingend für das Folge-Einzelprojekt erforderlich sind.

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

2.4 Nutzniesser

Nutzniesser des übergeordneten, gesamten Forschungsprojekts ist zur Hauptsache das operative Erhaltungsmanagement der Tunnelanlagen, namentlich die Fachspezialistinnen und Fachspezialisten (FaS) der Erhaltungsplanung (EP) der einzelnen ASTRA-Filialen, sowie ihre Inspektionsteams der beauftragten Ingenieurbüros und Gebiets-einheiten.

Nach der Projektgenerierung gehen Erhaltungsprojekte organisatorisch in das Projektmanagement (PM) der einzelnen ASTRA-Filialen über. Im Rahmen der Konkretisierung der Massnahmenprojekte werden oft weitere Zustandserfassungen und -beurteilungen sowie Massnahmenentscheide getroffen, weshalb die Ergebnisse des Forschungsberichtes auch dem Projektmanagement und den für die Projektierung beauftragten Ingenieurbüros gleichermaßen von Nutzen sind.

Neben den Erhaltungsplanerinnen und -planern 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.

2.5 Methodik und Vorgehen

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 und die Ergebnisse werden im Rahmen der Schlussberichte der Einzelprojekte objektiv nachvollziehbar erläutert (siehe [2], [3], [4] und [5]).

Die verwendeten Quellen werden spezifisch in jedem Einzelprojekt offengelegt und nach Möglichkeit werden mehrere berücksichtigt, um eine kritische Auseinandersetzung mit den jeweiligen Erkenntnissen zu gewährleisten. Es wird 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. [1]). 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 wurden im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts stellenweise mit themenspezifischen Punkten und neuen Erkenntnissen ergänzt. Dabei stützten sich die Forschungsstellen einerseits auf den aktuellen schweizerischen und internationalen Forschungsstand gemäss Literaturrecherche sowie auf die Erfahrungen aus bereits ausgeführten Erhaltungsprojekten von bestehenden Strassentunnel. Für letzteres wurden neun Fallbeispiele von Strassentunnel in der Schweiz evaluiert und beschrieben, welche in allen Einzelprojekten themenspezifisch analysiert und ausgewertet wurden (siehe auch Kap. 0). Diese Erfahrungswerte stellen daher eine wertvolle Ergänzung zur Vorarbeit im Initialprojekt [1] dar.

Die Fallbeispiele dienten zudem auch zur Plausibilisierung der vorgeschlagenen Teilprozesse und Tools (z.B. Kostenmodell EP5, Beziehungsstrukturen EP1 oder Vergleichsmethodik EP2) sowie zum Nachweis der Vollständigkeit der Kataloge.

In Bezug auf Begrifflichkeiten, Methoden, Zuständigkeiten und Gliederungen orientierte sich die Forschungsarbeit nach Möglichkeit an den bestehenden Schweizer Normen und ASTRA-Richtlinien.

Die zu erarbeitende 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 wurde sichergestellt, dass die Durchgängigkeit der Datenstruktur innerhalb der einzelnen EPs gewährleistet ist.

Dies erfolgt über eine einheitliche Gliederung der Bauwerksteile und Bauarten für bergmännische Strassentunnel durch das EP1 (vgl. Kap. 0), 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 [12] auf, wobei diese wo nötig ergänzt wurde, sodass die bestehenden Fachdatenbanken weiterhin genutzt und gleichzeitig die baulichen Strukturen von bergmännischen Strassentunneln 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) möglich sein wird.

Die Datenanforderungen an die zu erarbeitende Kataloge wurden zu Beginn des Forschungsprojekts an mehreren Workshops festgelegt und unter Berücksichtigung der Inputs und Erfordernisse der restlichen EPs umgesetzt.

Die Katalogisierung der Informationen und Daten erfolgt mittels Excel. Dies ermöglicht einen späteren Export in ein offenes und weiterverwendbares Dateiformat und kann bei Bedarf durch Plugins und grafische Programmiersoftware ergänzt werden.

2.6 Ablauf und Organisation des Forschungsprojekts

Die am Forschungsprojekt beteiligten Firmen können aus der Tabelle 1 entnommen werden. Das ASTRA beauftragte 2019 eine Gesamtprojektleitung (GPL), welche für die organisatorische Koordination des gesamten Forschungspaketes (inkl. der Beschaffung der Forschungsstellen) und der übergreifenden fachlichen Einbettung der erarbeiteten Ergebnisse in den Einzelprojekten zuständig ist. Zudem erstellt die Gesamtprojektleitung einen Synthesebericht «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln», in welchem die Untersuchungen und Ergebnisse aller fünf Forschungsvorhaben EP1 bis EP5 zusammenfassend dargestellt werden.

Die Forschungsarbeit wurde von Beginn an durch eine Begleitkommission (BK) bestehend aus 7 Mitgliedern, d.h. einem Präsidenten, 3 Mitgliedern, welche bei anderen Infrastrukturbetreibern Funktionen im Erhaltungsmanagement wahrnehmen und 3 Mitgliedern des ASTRA aktiv begleitet.

Die Forschungsstellen für die fünf Einzelprojekte wurden 2020 durch eine öffentliche Ausschreibung beschafft und starteten 2021 mit der Bearbeitung. Die Schlussberichte der EP1 bis EP3 und EP5 wurden 2025 publiziert. Das Einzelprojekt EP4 wurde auf Empfehlung der BK und GPL zurückgestellt bzw. dem ASTRA empfohlen, den Schlussbericht dazu nicht zu veröffentlichen, da die Praxistauglichkeit mit derzeitigem Stand dazu nicht gewährleistet ist.

Projektorganisation und beteiligte Firmen

Funktion	Beteiligte Personen oder Firmen
Begleitkommission (BK):	Präsident und 6 Mitglieder
Gesamtprojektleitung (GPL):	ILF Beratende Ingenieure AG, Zürich
Forschungsstellen (FOST)	
EP1 -3:	Lombardi AG, Luzern und Ernst Basler Partner AG, Zürich
EP4:	IG IMC GmbH, Zürich, Lombardi AG, Luzern und weitere
EP5:	IG Lombardi AG, Luzern und Aegerter Bosshard AG, Basel

Tabelle 1: Projektorganisation und beteiligte Firmen

3 Überblick über die Resultate

Die Resultate der Einzelprojekte sind in Form von Schlussberichten und Katalogen in Datenbank kompatibelem Format zur Weiterverwendung oder -entwicklung bzw. zur Integration in Datenbankmodelle erarbeitet worden. Die Tabelle 2 (Seite 39) gibt eine Übersicht über alle Resultate aus dem Forschungsprojekt «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel».

Der vorliegende Synthesebericht fasst die im Rahmen des Forschungsprojekts erstellten Forschungsergebnisse der Einzelprojekte EP1 bis EP3 und EP5 zusammen. Jedes dieser Einzelprojekte liefert einen Beitrag zum operativen Erhaltungsmanagement. Der Synthesebericht legt den Schwerpunkt auf die Beschreibung der erarbeiteten Resultate und deren Verknüpfungen untereinander, ohne auf die dazu verwendeten Datengrundlagen, Methoden, Auswertungen und Herleitungen vertieft einzugehen. Der Synthesebericht soll damit den Einstieg in die Einzelprojekte vereinfachen. Als Beitrag zum Verständnis der Einzelprojekte sind relevante Resultate dem Synthesebericht in Form von Anhängen beigelegt. Sie dienen als Illustration und können nachgeschlagen werden, ohne dass die Schlussberichte aller Einzelprojekte konsultiert werden müssen.

Zum einen sind beispielhaft bzw. auszugsweise Katalogblätter (EP1 bis EP3) und Tabellenblätter (Kostentool EP5) beigelegt. Zum anderen sind vollständige Listen angehängt, welche eine Übersicht über alle Katalogblätter und deren Informationsumfang geben (z.B. Liste der erfassten Schadensprozesse und Informationen pro Schadensprozess).

Jedes der vier Einzelprojekte EP1 bis EP3 und EP5 ist in einem themenspezifischen Schlussbericht (bzw. Forschungsbericht) dokumentiert. Aus Gründen der Übersicht wurde die Gliederung dieser Schlussberichte untereinander abgestimmt. Um den Kontext in jedem einzelnen Forschungsbericht jeweils korrekt darstellen zu können, enthalten alle Schlussberichte einige Unterkapitel im einleitenden Kapitel 1, die im Wortlaut identisch sind.

Ein wesentlicher Bestandteil der Schlussberichte ist die Darstellung des Stands der Praxis und Forschung und der daraus gewonnenen Erkenntnisse für das jeweilige Thema. Diesbezüglich stützen sich die Einzelprojekte stark auf die Kompilation und Auswertung im Rahmen des Initialprojekts [1] ab. Aus diesem Grund wird der Stand der Praxis und Forschung im Synthesebericht nur zusammenfassend dargestellt. Sowohl dem Synthesebericht als auch den Schlussberichten der Einzelprojekte liegt im Anhang «Literaturverzeichnis» jeweils eine umfassende Literaturliste bei.

Übersicht der Resultate aus dem Forschungsprojekt

Forschungsprojekt	Resultat	Bemerkungen
Gesamtprojekt	Synthesebericht	Vorliegender Schlussbericht
EP1 Schadensprozesse und Langzeitverhalten	Schlussbericht	VSS 1781
	Katalog der Befunde	Liste der 31 Befunden (BE)
	Katalog der Schadensprozesse	Katalogblätter für 25 Schadensprozesse (S)
	Katalog der Gefährdungsbilder inkl. Beziehungsstrukturen	Katalogblätter für 28 Gefährdungsbilder (GB)
	Katalog Bauwerksteil	Liste der 53 Bauwerksteile (BWT)
	Katalog Bauart	Liste der 32 Bauarten (BA)
	Katalog Bauteilart	Liste der 229 relevanten Bauteilarten (BWT x BA)
	Excel-Datenbank	mit allen Katalogeinträgen (exkl. Bilder) u. Verknüpfungen zwischen den Katalogen und den übrigen EPs
	Fallbeispiele	Datenblätter von 9 instandgesetzten oder erneuerten Strassentunnel in der Schweiz
Glossar und Literaturverzeichnis	Themenspezifisch (Literatursammlung CITAVI)	
EP2 Überwachung und Inspektionsmethoden	Schlussbericht	VSS 1784
	Liste Untersuchungsmethoden	Liste von 144 Untersuchungsmethoden (USM)
	Katalog bewährte USM	Katalogblätter für 25 bewährte USM
	Vergleichsmethodik	Skizze einer Vergleichsmethodik für USM
	Excel-Datenbank	mit allen Katalogeinträgen (exkl. Bilder) u. Verknüpfungen zwischen den Katalogen und den übrigen EPs
	Glossar und Literaturverzeichnis	Themenspezifisch (Literatursammlung CITAVI)
EP3 Erhaltungsmassnahmen	Schlussbericht	VSS 1779
	Katalog Erhaltungsmassnahmen	Katalogblätter für 55 Erhaltungsmassnahmen (M)
	Excel-Datenbank	mit allen Katalogeinträgen (exkl. Bilder) u. Verknüpfungen zwischen den Katalogen und den übrigen EPs
	Glossar und Literaturverzeichnis	Themenspezifisch (Literatursammlung CITAVI)
EP4 Entscheidungsmodell	Schlussbericht	Nicht publiziert

EP5 Kostenmodell	Schlussbericht	VSS 1774
	Kostenmodell (Excel-Tool)	Excel-Berechnungstool zum Kostenmodell
	Bedienungsanleitung Kosten-tool	
	Plausibilisierung von Kosten	Tabellen zur Plausibilisierung von Kosten, Faktoren und UN-Kalkulation
	Schreiben an Expertenkommission VSS SN 640 907 (2013)	Schlussfolgerungen und Anregungen aus der Analyse von Strassennutzerkosten und Kosten Dritter
	Glossar und Literaturverzeichnis	Themenspezifisch (Literatursammlung CITAVI)

Tabelle 2: Übersicht der Resultate aus dem Forschungsprojekt

Als wesentliches Resultat liegen den Anhängen der Schlussberichte der Einzelprojekte strukturierte, einfach zu verwendende Kataloge oder Werkzeuge (v.a. Kostenmodell) bei. Die Gliederungsstruktur der Kataloge erlaubt die Erweiterung von zukünftigen Schadensprozessen, Untersuchungsmethoden oder Massnahmen. In den Katalogen werden zudem mittels Attribute Bezüge zwischen Befunden und Schadensprozessen, Untersuchungsmethoden, Bauwerksteilen, Konsequenzen in Form von Gefährdungsbildern sowie Erhaltungsmassnahmen und deren Kostenfolgen geschaffen. Damit werden auch alle relevanten Informationen im Erhaltungsprozess systematisch miteinander verknüpft. Im Synthesebericht werden diese Resultate in den Anhängen nur auszugswise beigelegt: In den Anhängen zum Synthesebericht werden vollständige Listen der Kataloge aber nur beispielhafte einzelne Katalogblätter dargestellt.

In den Einzelprojekten liegen sowohl die Kataloge als auch das Kostenmodell (Werkzeug) auch als strukturierte Exceldateien in digitaler Form bei. Letztere können unter <https://www.mobilityplatform.ch/> heruntergeladen werden. Diesbezüglich wird auf die Schlussberichte und -dokumentation der Einzelprojekte verwiesen und im Synthesebericht nicht eingegangen.

Wie einleitend erwähnt, wird der Schlussbericht zu EP4 Entscheidungsmodelle nicht publiziert. Anstelle dieser Ergebnisse gehen die Autoren des Syntheseberichtes im Kap. 12 auf die heutige Praxis und dessen Grenzen zum operativen Erhaltungsentscheid ein und skizzieren mögliche Ansätze zur Systematisierung und Standardisierung.

4 Stand der Praxis und Forschung

4.1 Stand der Praxis und Forschung im Erhaltungsmanagement Tunnel

In diesem Unterkapitel wird ein Überblick über den Stand der Praxis und Forschung zum Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunnel im Allgemeinen gegeben. Dieser stützt sich vor allem auf den Stand der Praxis in der Schweiz, in Österreich und in Deutschland (D-A-CH).

In der Schweiz sind zentrale Aspekte des Erhaltungsprozesses von Ingenieurbauten bzw. Kunstbauten sowohl in nationalen Normen und Richtlinien als auch in Handbüchern der Infrastrukturbetreiber geregelt. Tunnelbauwerke werden in den nationalen Richtlinien nicht separat behandelt; sie werden allgemein als Teil von Kunstbauten betrachtet. Erst in den letzten Jahren wird der Erhaltungsprozess von Tunnelbauwerken in internen Handbüchern vermehrt spezifisch behandelt.

Im Forschungsprojekt AMBITION von 2015 [13] wurden mit einer weltweiten Befragung nationale Normen, Richtlinien und Handlungsvorgaben fürs Erhaltungsmanagement von Tunnelbauwerken aus insgesamt 11 Ländern zusammengetragen und ausgewertet. Im internationalen Vergleich zeigt sich, dass der Regulierungsgrad in Bezug auf Erhaltung von Tunnel stark mit der Bedeutung des Tunnelbaus im jeweiligen Land korreliert. Das gilt für Länder wie Österreich, Schweiz, Italien und Schweden. Ein weiteres Fazit war, dass es «markante Unterschiede bei der Objektivierbarkeit der Schadensansprache und der Dokumentation zu verzeichnen gibt. Dort, wo Bauwerkmanagementsysteme zur Zustandsüberwachung und Instandhaltungsplanung eingesetzt werden, ist ein höherer Grad an festen Schadenskatalogen und Algorithmen zur Zustandsbewertung erkennbar».

Die schweizerische Normenreihe zur «Erhaltung von Tragwerken» mit der Grundnorm SIA 269 (2011; [8] und den zugehörigen Bauartspezifischen Normen) enthalten wesentliche Vorgaben des Erhaltungsprozesses, u.a. zur Überwachung und Instandhaltung wie auch zur Überprüfung für Tragwerke, ohne speziell auf Tunnel einzugehen.

Die nationalen Normierungen und Richtlinien zur Erhaltungsplanung von Infrastrukturprojekten verschiedener Länder (z.B. DIN 31051 [14], RVS 13.03-31 [15]) gehen von vergleichbaren Prozessschritten aus, die jedoch z.T. anders abgegrenzt und benannt werden. Anders als in den nationalen Normen und Richtlinien in der Schweiz werden hier Tunnelbauwerke z.T. gesondert geregelt (z.B. Österreich). 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.

Das Bundesamt für Strassen ASTRA hat 2005 seine Vorgaben für den Erhaltungsplanungsprozess in der Richtlinie «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten» [9] aus früheren Versionen der Erhaltungsnormen abgeleitet. Der darin beschriebene Prozess, welcher auch für Tunnel gilt, wird im Kap. 10 «Erhaltungsprozess und Projektgenerierung» 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 [8] definierten Teilprozess «Überwachung» sieht diese ASTRA-Richtlinie die zwei Phasen «Überwachung» (Beobachtung, Inspektionen, Kontrollmessungen) und «Überprüfungen» vor.

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» (gem. [9]). Die Zustandsbeurteilung bildet die zentrale Grundlage für die anschliessende Massnahmenempfehlung und -planung.

Zwar ist die Zustandsbewertung durch die Vorgabe von 5 Zustandsklassen gemäss der Richtlinie [9] vereinheitlicht. Wie in Kap. 12.2.4 dieses Berichtes (Seite 92) beschrieben, führt diese Vorgabe in der Praxis aber nicht zu einer reproduzierbaren und systematisierten Bewertung von Schäden in Tunnel.

Zum Vergleich wird auf die österreichische Richtlinie «RVS 13.03.31 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Strassentunnel – Bauliche konstruktive Teile» von 2013 [15] verwiesen. Diese ist die Grundlage für die «Bestandsprüfung von Tunnel». 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 und somit mit den schweizerischen Vorgaben mit Zustandsnoten gemäss Richtlinie [9] vergleichbar ist.

Die bereits zitierte, internationale Umfrage im Rahmen des Forschungsprojekts AMBITION [13] hatte ergeben, dass die hohe Subjektivität dieser bestehenden Prozesse zur Tunnelzustandsbewertung und der damit einhergehenden schlechten Vergleichbarkeit der Ergebnisse als Hauptnegativpunkt betrachtet wird.

In Deutschland kommt der DIN 1076 «Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen» [16] eine zentrale Rolle zu, die jedoch sehr allgemein für diverse Ingenieurbauten gehalten ist. Die zugehörige Richtlinie «RI-ERH-ING» [17] regelt die einheitliche Erfassung, Bewertung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076.

Für bergmännische Tunnel hat die Norm SIA 269/2 «Erhaltung von Tragwerken - Betonbau» (2011; [18]) besondere Relevanz, vor allem, wenn es um die Beurteilung der Tragsicherheit tragender Bauwerksteile im Tunnel wie Gewölbe, Zwischendecken und

Fahrbahnbrücken geht. Sie enthält wichtige Grundlagen für statische Nachrechnungen im Bestand (Baustoffeigenschaften, Berechnungsverfahren, Nachweisverfahren), Vorgaben zur Zustandserfassung (Liste von Untersuchungsmethoden, Bestimmung des Korrosionsgrades oder des Rissbreitenindex) sowie Hinweise zur Zustandsbeurteilung (Bedeutung von Rissen, Schädigung infolge AAR oder Bewehrungskorrosion).

Mit der europaweit gültigen Betoninstandsetzungsnormen SN EN 1504 werden die Produkte für die Instandsetzung und den Schutz von Betontragwerken definiert und genormt. Der Normenteil SN EN 1504-9 [19] «Teil 9 - Allgemeine Grundsätze für die Anwendung von Produkten und Systemen» listet ausgehend von den Zielsetzungen der Erhaltung 11 Grundprinzipien für die Instandsetzung auf und ordnet jedem Prinzip Instandsetzungsverfahren zu. Diese Grundprinzipien verknüpfen betonrelevante Schadensprozesse mit Instandsetzungsmassnahmen.

In der «Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Strassentunnel» des «Deutsche(r) Ausschuss für unterirdisches Bauen» (DAUB) [20] spielt die Betriebs- und vor allem auch Erhaltungsphase eine wesentliche Rolle für die Ermittlung der Life Cycle Costs (LCC). Die Empfehlung enthält jedoch keine weitergehenden Angaben, insbesondere zur Überwachung und Zustandsbeurteilung.

Im Forschungsprojekt AMBITION [13] wurden auch die derzeit gängigsten physikalischen Messverfahren zur Zustandserfassung zusammengestellt und auf ihre Einsatzfähigkeit in Bezug auf Schadensbilder geprüft und charakterisiert. Neben klassischen Bohrkernentnahmen (zerstörendes Prüfverfahren) werden hier zerstörungsfreie Verfahren wie Ultraschall-, Impact-Echo-, Radar- (luft- und bodengekoppelte GPR), Infrarot- sowie 3D-Laserscan (Lidar) Verfahren beschrieben und in Bezug auf ihre Anwendbarkeit in Tunnel charakterisiert.

Immer grössere Bedeutung bei Zustandsaufnahmen gewinnen bildgebende Verfahren wie photogrammetrische Aufnahmen in Kombination mit anderen Messverfahren wie Tunnelscan (LIDAR) oder Infrarotaufnahmen. Heute können so flächenhafte Daten sowohl aus dem Fahrraum als auch aus schlecht zugänglichen Lüftungs- und Werkleitungskanälen oder Schächten effizient und in hoher Auflösung (bspw. Erkennung von Rissbreiten < 0.1 mm) erfasst und weiterbearbeitet werden. Neben den Messmethoden gibt es sowohl bei der KI-unterstützten Auswertung als auch bei der 3D- bzw. BIM-mässigen Darstellung laufend grosse Entwicklungsschritte. So wurde kürzlich im Rahmen des D.A.CH Verkehrsinfrastruktur-Call 2024 ein Forschungsprojekt zur automatisierten Zustandserfassung und Schadenserkennung im Strassentunnel mit dem Schwerpunkt von schwer zugänglichen Bereichen und KI-basierten Methoden zur Schadbildererkennung und -analyse und sowie automatisierter Übertragung in BIM-Modelle ausgelöst [21].

Da für das Erhaltungsmanagement auf belastbare Zustandsdaten von Tunnel zurückgegriffen werden muss, wird im Projekt AMBITION [13] 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.

Als Folge davon ist mittlerweile die digitale Schadensaufnahme und -auswertung mit Tunnelscanverfahren und automatisierten Auswertetools bei österreichischen Strassentunnelbauwerken der ASFINAG für die periodischen Tunnelprüfungen verpflichtend. Beim ASTRA bestehen keine diesbezüglichen Vorschriften. In der Regel werden hier im Rahmen der alle 5 Jahre durchzuführenden Hauptinspektionen die visuell einsehbaren Schäden manuell in Schadenskizzen übertragen und nachgeführt bzw. allenfalls in 2d-Abwicklungspläne im Format dwg/dxf oder KUBA-Tunnel Tool übertragen. Zum Teil werden die Schäden nur tabellarisch und beschreibend pro Gewölbeblock erfasst und mit der Zustandsnote bewertet. Mit dieser traditionellen Vorgehensweise ist die anzustrebende Datenqualität für Erhaltungsentscheide fraglich, da diese nicht wirklich objektiv und reproduzierbar erfasst werden und aufgrund der fehlenden digitalisierten Aufnahmeform nur eingeschränkt verwertbar sind (siehe auch Absatz zur «Datenqualität», Seite 28).

In den letzten Jahren wurden wenige Forschungsarbeiten im Bereich der Erhaltungsprozesse bergmännischer Strassentunnel publiziert. In Österreich wurde 2020 mit dem Projekt OPTIMAL [10] ein interessantes Forschungsprojekt mit vergleichbarer Zielsetzung, wie das vorliegende, publiziert. Darin wurden Regellebenszyklen für die bauliche Infrastruktur sowie sehr ausführlich für die elektromechanische Ausrüstung 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.

Beim OPTIMAL-Forschungsprojekt sind zudem die risikobasierten Überlegungen im Rahmen des ganzen Erhaltungsmanagement-Prozesses von Interesse, wobei hier u.a. auch die Priorisierung der gefährlichen Bauteile sowie das Inspektionsintervall in Bezug auf die Regellebenszyklen betrachtet werden. Als Projekt mit Praxisbezug beruht der OPTIMAL-Risikoansatz auf der Auswertung historischer Zustandsdaten und Zustandsbeurteilungen von Tunnelinspektionen, wobei eine konsequente Erfassung der Zustandsnoten nicht über den gesamten Betrachtungszeitraum gegeben war.

Als wesentliches Ergebnis dieses Forschungsprojekts wurde aufgezeigt, dass innerhalb eines Lebenszyklus eines Strassentunnels vor allem die technischen Anlagen im Vergleich zu den baulichen Strukturen mehrere Erneuerungszyklen durchlaufen und, dass bei Berücksichtigung kombinierter Regelzyklen das Erhaltungsrisiko in Abhängigkeit vom Erhaltungsintervall variiert. Basierend auf Werten des gesamten Tunnelportfolios der ASFINAG kamen die Autoren zum Schluss, dass mit einem konstanten Erhaltungsintervall von 7 Jahren das geringste durchschnittliche Erhaltungsrisiko bei einer Betrachtungsperiode von 19 Jahren ermittelt werden konnte.

Ein Bestandteil zur Standardisierung der Erhaltungsplanung ist die Bereitstellung von Schadenskatalogen. Solche Kataloge liegen sowohl in der Schweiz als auch international auch für Tunnelbauwerke seit einigen Jahren vor.

Im Jahr 2008 hatte Sandrone in ihrer Doktorarbeit [22] Substanz- und Inspektionsdaten von 168 Strassentunnel des ASTRA in Bezug auf Alterungsprozessen und Langzeitverhalten untersucht. Darauf basierend wurden 17 typische Schadensprozesse («Disorders») in Strassentunnel identifiziert und auf Basis von statistischen Verfahren die dazugehörenden relevanten Einflussfaktoren herausgearbeitet. Bereits in dieser Arbeit vermutete Sandrone, dass die Betondegradation infolge Alkali-Aggregat Reaktion (AAR) in Zukunft ein zusätzlicher, relevanter Schadensprozess werden wird. Als relevante 6 Einflussfaktoren wurden das Bauwerksalter, die Verkehrsmenge, das Lüftungssystem, die Geologie und Hydrogeologie, die Überlagerung sowie das Abdichtungs- und Entwässerungssystems des Tunnels evaluiert.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde das schweizerische Gebirge in Bezug auf die Relevanz für die Degradation von Strassentunnel in 6 Klassen Lockermaterial, Tone und Mergel, Kalkgestein, Evaporiten, Schiefer und Phyllite sowie kristalline Gesteine und Gneise unterteilt. Neben der geologischen Formation wurde in dieser Studie auch die Überlagerung als relevanter Einflussfaktor des Baugrunds bezeichnet und drei Kategorien der Überlagerung mit Klein (<50 m); Mittel (50 – 200 m) und Hoch (>200 m) unterschieden.

Der Fachapplikation KUBA 5.1 des Erhaltungsmanagement des ASTRA liegt ein allgemeingültiger Schadensprozesskatalog aus 9 Prozessen bei, welcher sich nicht auf Tunnelbauwerke bezieht und daher unvollständig (keine Schadensprozesse aus der Geologie und Hydrogeologie) und unspezifisch bleibt (z.B. 90 «Schäden an der Abdichtung»).

Als Basis der Fachapplikation KUBA 5.1 wurde ein «Leitfaden für Inspektoren von Kunstbauten» [23] des ASTRA erstellt, worin diverse Befunde und Schadensbilder systematisch beschrieben sind. Zudem wurde den Schadensbildern in Abhängigkeit zur Ausprägung der Schäden Zustandsnoten von 1 – 5 gemäss [9] zugewiesen, was der Objektivierung der Zustandsbewertung dient. Diese Befunde und Schadensbilder illustrieren aber ausschliesslich Schäden an Brücken, Brückenlagern, Fahrbahnübergängen, Stützmauern, Abdichtungen und Belägen. Dieser Leitfaden ist daher nicht auf Tunnelbauwerke anwendbar.

In Bezug auf die Zustandsbeurteilung von tunneltypischen Schadensbildern bildet das Forschungsprojekt RIBET [24] eine interessante Grundlage. RIBET beinhaltet die Bewertung und Systematisierung von Rissbildern unbewehrter Tunnelinnenschalen (wie sie vor allem in der Schweiz und in Österreich üblich sind) und eine Methodik zur messbasierten Beurteilung und Prognose der Gefährdung auch hinter Verkleidungsschichten. Zu ersterem wurde eine umfassende Zusammenstellung denkbarer Phänomene und Ursachen für Risse im Tunnel erstellt (Risskatalog), welche als Hilfsmittel bei der nachvollziehbaren Interpretation von Rissbildern in unbewehrten Tunnelinnenschalen dienen kann (siehe [24]). Der entwickelte Risskatalog soll auch eine Basis für eine zukünftige (halb)automatische Rissauswertung sein.

Die aktuellen Publikationen bzw. Empfehlungen des DAUB zum Thema BIM (vgl. www.daub-ita.de/publikationen/empfehlungen/ [25] zeigen den zukünftigen Schwerpunkt im unterirdischen Bauen klar auf [26] [27]. BIM ist für die Weiterentwicklung des Erhaltungsmanagements ein zentrales Zukunftsthema. Mit dem Betriebsmodell als digitaler Zwilling werden auch die Asset Management-Aufgaben zukünftig Bestandteil des BIM-Prozesses sein. In dem bereits weiter oben referenzierten Forschungsprojekt TUNSPEKT ist die Kombination von KI-gestützten Zustandsaufnahmen und -bewertungen mit BIM-Modellen gerade ein Hauptforschungsziel.

4.2 Folgerungen für das Forschungsprojekt

Zum Forschungsauftrag jedes Einzelprojekts zählte auch eine Aufarbeitung des nationalen und internationalen Stands der Forschung und Praxis mit besonderem Fokus auf den jeweiligen Themenschwerpunkt bzw. Teilprozess. In diesem Kapitel wird auf die Zusammenfassung des Stands der Praxis und Forschung in Bezug auf die einzelprojektbezogenen Themen mit Verweis auf die Schlussberichte der Einzelprojekte verzichtet.

Nachfolgend werden aber die wichtigsten Erkenntnisse zum Stand der Praxis und Forschung und die daraus gewonnenen Folgerungen für das Forschungsprojekt zusammengefasst.

Handlungsbedarf im Erhaltungsmanagement von Tunnel:

Im Hinblick auf den Erhaltungsprozess lässt sich vorläufig festhalten, dass der Tunnel nicht als Teilsystem, sondern als Teil der gesamten Kunstbauten bewertet wird. Dies führt dazu, dass die spezifischen Randbedingungen und Anforderungen an die Erhaltung von Tunnel nicht angemessen berücksichtigt sind. Aus dem Initialprojekt [1] geht ebenso hervor, dass keine der darin genannten Quellen einen globalen Ansatz des Erhaltungsmanagementprozesses von bergmännischen Tunneln resp. eine übergreifende Integration der einzelnen Unterprozesse beschreibt. Dass weiterer Handlungsbedarf für die Optimierung des Erhaltungsmanagements von Tunnel besteht, zeigt sich in den Zielsetzungen von Forschungsprojekten (wie bspw. in [13], [10] oder [1]).

- **Fazit:** Der vorliegende Forschungsauftrag erfüllt grundsätzlich den globalen Ansatz auf Stufe operativer Erhaltungsmassnahmen für Tunnel.

Überwachung:

Zukünftige «Asset Management»-Systeme für Strassentunnel werden nicht ohne Überwachung auskommen.

- **Fazit:** Die zu erarbeitenden, strukturierten Forschungsergebnisse müssen neue, zukünftige Entwicklungen adaptieren können.

BIM Planung

Die Digitalisierung bzw. BIM wird zukünftig auch die Daten des Asset Managements umfassen.

- **Fazit:** Daten bzw. Informationen müssen so strukturiert sein, dass sie digital weiterverarbeitet und für andere Datenbanken / CDEs aufgearbeitet werden können.

Risikobasierte Zustandsbeurteilung

Risikobasierte Zustandsbeurteilungen und -entscheide werden eine zunehmende Rolle spielen.

- **Fazit:** Die Identifikation von Schadensprozessen und die daraus folgenden bauwerksteilspezifischen Konsequenzen (Gefährdungsbilder) sind zentrale Informationen zur Beurteilung von Risiken in Tunnel. Zudem ist ein Konzept für eine Vergleichsmethodik zur Auswahl von kostenoptimierten Untersuchungen (Wahl und Umfang Methode) mit einem risikobasierten Ansatz erstrebenswert.

Verfallsfunktionen

Es stehen trotz Forschung noch keine praxistaugliche Verfallsfunktionen chemischer und physikalischer Schadensprozessen bereit. Zudem sagen Verfallsfunktionen nicht direkt etwas über ein objektspezifisches Gefährdungsszenarium aus.

- **Fazit:** Die Modellierung des Verfalls eines Tunnels basierend auf Verfallsfunktionen steht zurzeit für die flächendeckende Erhaltungsplanung nicht zur Verfügung. Die objektspezifische Risikobeurteilung bedarf einer ganzheitlichen Betrachtung.

Prognose des Langzeitverhaltens aus Zustandsnoten

Die Untersuchung des Langzeitverhaltens von Tunnel basierend auf historische Zustandsnoten zeigen, dass die daraus gewonnenen Alterungsmodelle nur für strategische Planungen auf Netzebene geeignet sind.

Fazit: Ohne mehrjährige Überwachungsmessungen und zusätzlichen Untersuchungen 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.

Datenqualität

In mehreren Forschungsbeiträgen wird auf die unzureichende Datenqualität in den Tunneldatenbanken hingewiesen. Die Wichtigkeit der Lokalität des angetroffenen Schadens und der Kenntnis der Initial- und Betriebsbedingungen als Basis für eine effektive und folgerichtige Datenanalyse wird hervorgehoben.

- **Fazit:** Die klare Strukturierung der relevanten Schadensprozesse und der daraus resultierenden Gefährdungsbilder sowie deren Verknüpfung mit den davon betroffenen Bauwerksteilen bilden die Voraussetzung für die Homogenisierung der in der Tunneldatenbank erfassten Daten und darauf aufbauenden, verfeinerten zukünftigen Datenanalysen.

Etablierte Untersuchungsmethoden

Die bisher in der Praxis eingesetzten Untersuchungs- und Inspektionsmethoden für bergmännische Tunnel sind auch international im Bauwesen etabliert.

- **Fazit:** Da sich die Materialisierungen, die Bauarten und die Messprinzipien nicht komplett verändern werden, werden die in den Katalogen strukturiert erfassten, etablierten Untersuchungsmethoden auch zukünftig als Hilfestellung dienen.

Technologische Entwicklung von Untersuchungsmethoden

Technologische Entwicklung bei Mikroelektronik und Digitalisierung werden in den kommenden Jahren für einen weiteren Entwicklungsschub bei Untersuchungsmethoden (USM) sorgen und stehen bei Strassentunnel im Ausland mittlerweile im Einsatz. Dazu gehören Scanning-Aufnahmen, Automatisierung von Aufnahmen, die Digitalisierung der KI-gestützten Auswertung sowie Sensorik (z.B. Fiberoptics) für den Einsatz als Online-Monitoring.

- **Fazit:** Im vorgesehenen Grundlagenkatalog der USM sind neue Methoden aufzuführen. Zukünftige USM sollen einfach in die Kataloge integriert werden können.

Kostenmodelle

Die meisten Kostenmodelle für Strassentunnel beinhalten eine Monetarisierung von Erhaltungsmaßnahmen bzw. eine Berechnung der Lebenszykluskosten basierend auf finanzmathematischen Ansätzen aus der Investitionsrechnung. Sie berücksichtigen die Erhaltungskosten der letzten Jahre und extrapolieren sie auf die folgenden Jahre, ohne die erwartete Zustandsentwicklung des Bauwerks zu berücksichtigen. Die überwiegende Mehrheit der konsultierten Modelle beziehen sich auf die Gesamtkosten (Bau und BSA) ohne anzugeben, wie die Kennzahlen berechnet werden.

- **Fazit:** Die existierenden Kostenmodelle sind nicht geeignet, die Kostengrundlagen für objektbezogene Wahl der Massnahmenvariante zu treffen. Es muss daher ein praxistaugliches Kostenmodell entwickelt werden.

5 Erhaltungsprozess und Projektgenerierung

Die Prozesse des Erhaltungsmanagements des ASTRA sind in den Richtlinien 11002 «Planung und Durchführung des Unterhalts» [28] und 12002 «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen» [9] geregelt. Bergmännische Tunnel sind dem Teilsystem Kunstbauten angegliedert. Das Erhaltungsmanagement stützt sich u.a. auf die SIA-Normen 469 «Erhaltung von Bauwerken» [29] oder die Grundnorm Erhaltungsmanagement SN 640 900 [8]. Abbildung 2 zeigt den Prozess des Erhaltungsmanagements aus dieser Grundnorm.

Im Rahmen des übergeordneten Forschungsprojekts wird der Erhaltungsprozess wie folgt zugrunde gelegt. 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. Die Zustandsbeurteilung umfasst gemäss [6] eine «zusammenfassende Analyse und Bewertung der Informationen über den aktuellen Zustand und die bisherige Zustandsentwicklung und deren Konsequenzen im Laufe der festgelegten Restnutzungsdauer».

Basierend auf dieser Zustandsbeurteilung sind je nach Abweichung der Leistungsindikatoren zu einem Soll-Zustand Handlungsoptionen zu prüfen, welche allenfalls zu einer Entscheidung für Einzelmassnahmen im Rahmen des kleinen baulichen Unterhalts oder für die Generierung eines Erhaltungsprojekts führen.

Nach der Übergabe der Projektgenerierung seitens EP (Erhaltungsplanung) geht die Tunnelanlage als Projektauftrag in die Verantwortung des Projektmanagements über, welche die Massnahmenplanung und -realisierung umsetzt.

In diesem Erhaltungsprozess finden sich alle Teilprozesse, die sich mit den Themenschwerpunkten der fünf Einzelprojekte decken.

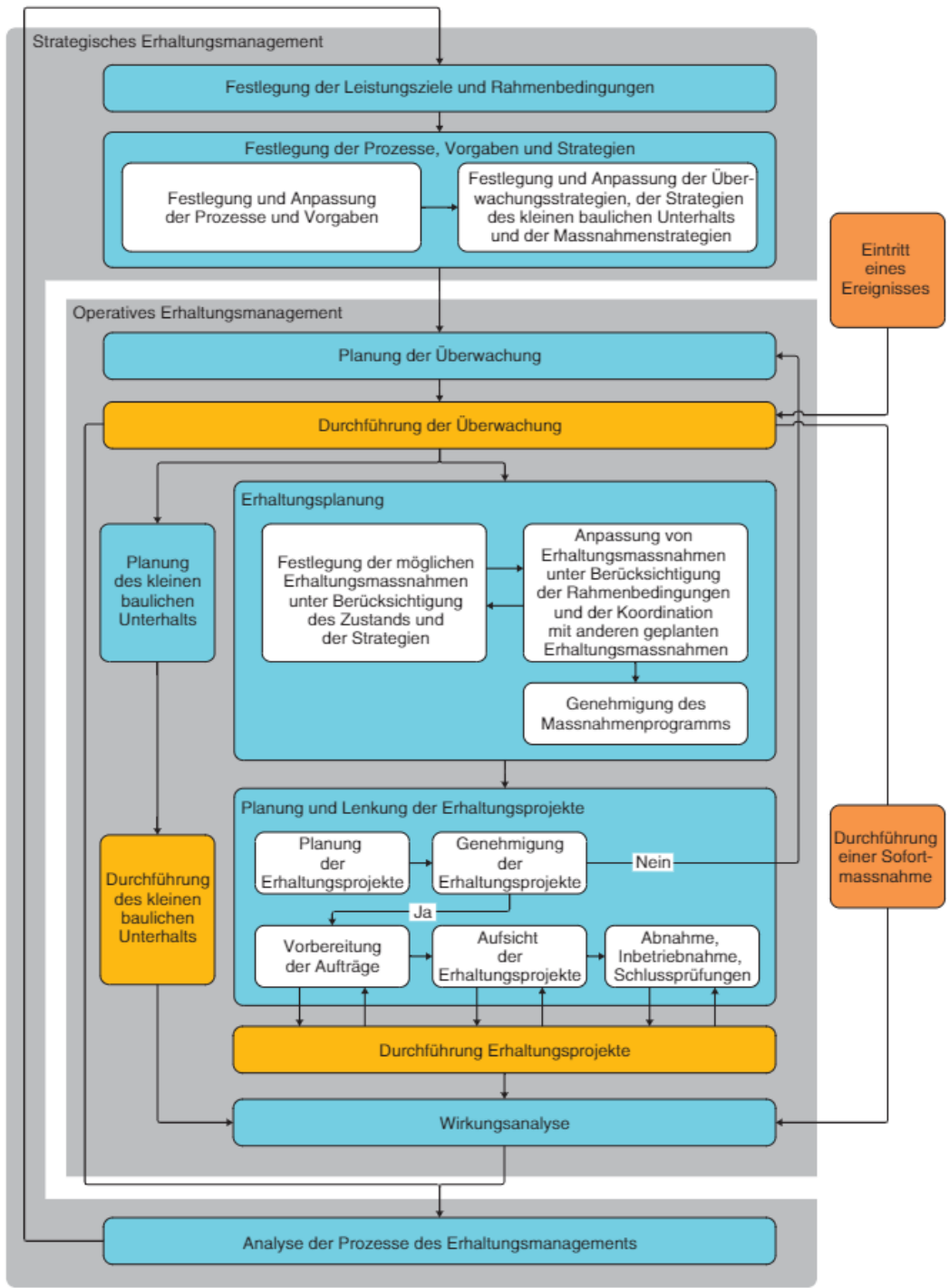


Abbildung 2: Prozesse des Erhaltungsmanagements gemäss SN 640 900

Eine zentrale Aufgabe im operativen Erhaltungsmanagement bildet die Vorbereitung der Entscheidungsfindung zur Projektgenerierung. Teil der Projektgenerierung ist auch der Vorschlag der gewählten Handlungsoption. Im Rahmen des übergeordneten Forschungsprojekts wurde ein Entscheidungsfindungsprozess gemäss Abbildung 3 zugrunde gelegt.

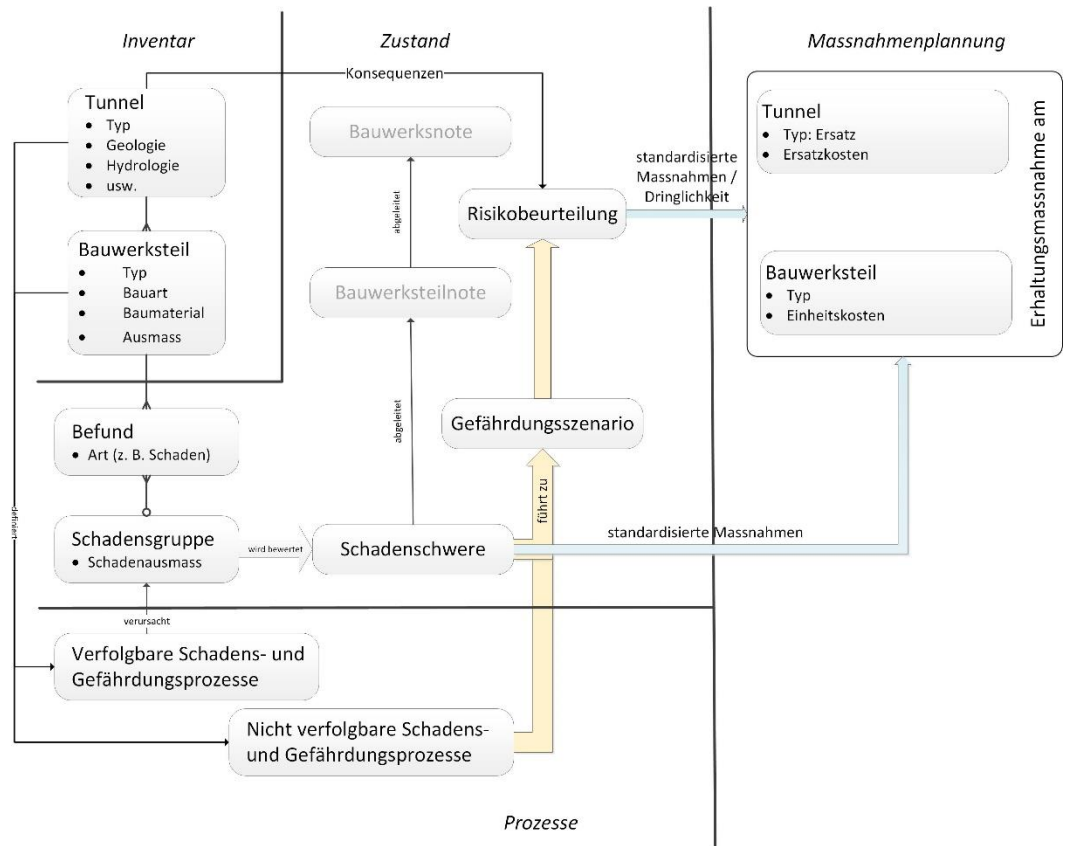


Abbildung 3: Entscheidungsfindungsprozess in der Erhaltungsplanung von bergmännischen Strassentunnel (Quelle siehe Schlussbericht EP1 [2])

6 Bauwerksgliederung

Das ASTRA verwendet aktuell die Kunstbauten-Datenbank KUBA 5.0 [12] zur laufenden und strukturierten Erfassung von Substanz-, Inspektions- und Erhaltungsdaten von Kunstbauten. Tunnel können hingegen nur teilweise mit Tunnel-Tool erfasst werden. Der Forschungsauftrag verlangte, dass die Kataloge so zu strukturieren sind, dass sie sowohl in bestehende (KUBA) Datenmodelle und -banken implementiert, als auch die aktuellen Entwicklungen im Bereich BIM wo möglich mitberücksichtigt werden können, damit die Ergebnisse später bei Bedarf einfach in neue Datenmodelle überführt werden können.

Strassentunnel stellen langgezogene Infrastrukturobjekte dar, weshalb sie in KUBA über eine Objektachse definiert werden. Über die Objektachse erfolgt die Definition der Länge der Tunnelröhre und die Ortung der weiteren Bauwerke und Objekte des Tunnels (z.B. Zentralen, Querverbindungen, Aufweitungen, Nischen, etc.).

Strassentunnel weisen eine ausgeprägte Vielfalt an Ausprägungen, Bauarten und -methoden sowie Komponenten auf.

In Bezug auf den Zustand und der Alterung einer Tunnelanlage sind gemäss Sandrone [22] besonders fünf Einflussfaktoren wie Bauwerksalter, Verkehrsmenge, Lüftungssystem, Geologie und Hydrogeologie, sowie Abdichtungs- und Entwässerungssystem relevant. Diese Faktoren sind als Substanzinformationen daher wichtig; sie können entlang der Objektachse einfach verortet werden oder als globale Information dem ganzen Bauwerk hinterlegt werden.

Als unterste Bezugseinheit zur Zustandsbewertung in einem Strassentunnel hat sich sowohl national als auch international ein Gewölbeblock bewährt. In einem Tunnel stellt ein Gewölbeblock ein von den Nachbarblöcken unabhängiges Tragwerk dar. Ein Versagen oder eine Funktionsbeeinträchtigung eines Gewölbeblocks oder der darin platzierten Bauwerksteile stellen i.d.R. die Verfügbarkeit oder die Sicherheit für die gesamte Tunnelröhre in Frage. Ein Gewölbeblock hat typischerweise eine Längsausdehnung von 8 – 12.5 m und ist über diese Länge in Bezug auf Bauart, Bauwerksteile und Geometrie i.d.R. konstant. Jeder Block kann einfach über die Objektachse und damit auch mit den massgebenden Einflussfaktoren verortet werden.

Diese Betrachtungsebene ist naturgemäss mit den höheren Ebenen «Tunnelröhre», «Tunnelanlage bzw. -bauwerk», «Strassenkorridor» oder «Gesamtnetz» gekoppelt. Somit nehmen die Ergebnisse auf Gewölbeblockebene früher oder später Einfluss auf diese höheren Ebenen. Diese höheren Ebenen haben vor allem einen Einfluss bei der Evaluation von Handlungsoptionen inkl. deren Kostenfolgen sowie der Entscheidung für Erhaltungsmaßnahmen (EP3, EP4 und EP5).

Die baulichen Komponenten bzw. Bauwerksteile eines Tunnelbauwerks werden einerseits durch ihre Funktion im Gesamtsystem und andererseits durch ihre Materialisie-

rung charakterisiert. Durch die Verknüpfung der zu erarbeitende Kataloge resp. den darin enthaltenen Informationen mit den Bauwerksteilen (pro Gewölbeblock) und deren jeweilige Materialisierung lässt sich daher die Implementierung in bestehende und zukünftige Datenmodelle sicherstellen. Dazu wurde eine übergeordnete allgemeingültige Bauwerksgliederung entwickelt, die auch die Durchgängigkeit der Datenstruktur zwischen den einzelnen Einzelprojekten gewährleistet.

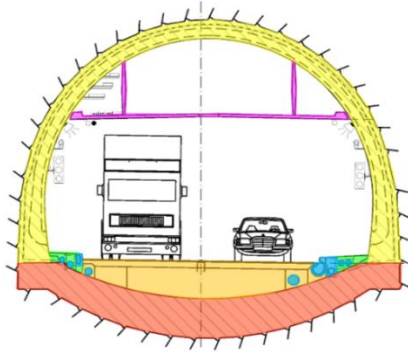
Ausgangslage waren die aus KUBA übernommenen Gliederungen Bauwerksteil (BWT) und Bauart (BA). Ersteres bezeichnet ein funktionell einheitliches nicht mehr unterteilbares Element des Tunnels (z.B. Zwischendecke), letzteres die Art und Weise, wie ein Baustoff verwendet wird (z.B. Stahlbetonkonstruktion). Als zweckmässige und eindeutige Verknüpfung aller Kataloge (Befunde, Schadensprozesse, Gefährdungsbilder, Untersuchungsmethoden und Massnahmen) wurde neu das Element «Bauteilart» (BWT x BA) als Kombination von Bauwerksteilen und Bauarten eingeführt. Dieser «Bauteilart-Katalog» bildet keinen neuen Katalog, sondern dient lediglich als Hilfsmittel zur eindeutigen Verknüpfung der Kataloge untereinander und zur Vermeidung unlogischer, d.h. in der Realität nicht vorkommender Verknüpfungen.

Über die erarbeitete, übergeordnete und EP-übergreifende Bauwerksstrukturierung sowie die darauf basierende und in den Katalogen von EP1, EP2 und EP3 sowie dem Kostenmodell EP5 umgesetzte Datenverknüpfungen (Abbildung 1), lassen sich demnach bei der zukünftigen Datenbankimplementierung des Forschungsprojekts eine Vielzahl an möglichen Datenabfragen für verschiedene Anwendungsfälle generieren.

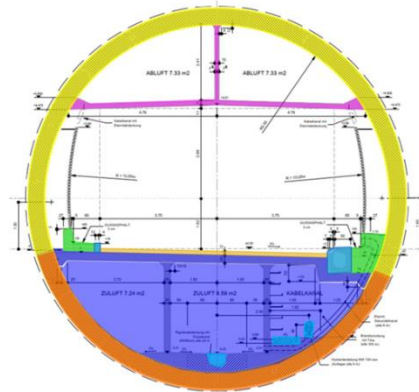
In der Schweiz kommen verschiedene Baumethoden bzw. Tunnelprofiltypen vor. Als wichtige Unterscheidung seien konventionell aufgefahrene Tunnel (SPV, MUL, MUF² gemäss Definition SIA 198) und mechanisch aufgefahrene, kreisrunde Tunnel (TBM²) genannt. Des Weiteren gibt es einschalige bzw. zweischalige Tunnelgewölbe mit oder ohne Sohlgewölbe. Bei den Innenausbauten gibt es Strassentunnel mit oder ohne Zwischendecken sowie solche mit oder ohne Werkleitungskanal bzw. mit Werkleitungskanal oder Fahrbahnkonstruktion. Im Forschungsprojekt wurden für 3 typische Tunnelprofiltypen die Bauwerksteile definiert (siehe Abbildung 4).

² SPV = Sprengvortrieb, MUL = maschinenunterstützter Vortrieb im Lockergestein, MUF = maschinenunterstützter Vortrieb im Festgestein, TBM= Tunnelbohrmaschinenvortrieb

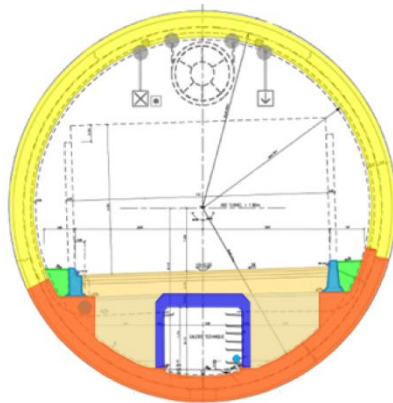
Tunnelprofiltyp 1



Tunnelprofiltyp 2a



Tunnelprofiltyp



2b

Bauwerksteil – Gliederung:	
1. Gewölbe (inkl. Abdichtung und Felsicherung)*	Gew
2. Sohlgewölbe	SoG
3. Zwischendecke*	ZWD
4. Werkleitungskanal	WK
5. Fahrbahn/Fahrbahnfundation	Fab
6. Bankett	Ban
7. Leitungen/Schächte	LS
8. Einrichtungen: Signalisation, Aufhängungen etc.	Ein
I. Querverbindungen**	QV
II. Kamine/Schächte**	KS
III. Zentralen**	ZE
IV. Nischen	NI
V. Stollen	ST

Abbildung 4: Tunnelprofiltypen

In einem bergmännischen Strassentunnel werden Schäden bzw. Befunde an einem bestimmten Bauwerksteil mit einer bestimmten Bauart bzw. einer Bauteilart in einen bestimmten Gewölbeblock festgestellt und dokumentiert. Über die Datenverknüpfungen der Bauteilart (BWT x BA) und der visuellen Befunde (BE) mit den Schadensprozessen im dazugehörigen S.-Katalog von EP1 lässt sich in einer Datenbank nun eine Auswahl der möglichen Schadensprozesse und der daraus folgenden Konsequenzen bzw. Gefährdungsbilder pro Gewölbeblock 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 Untersuchungsmethoden und Erhaltungsmaßnahmen generieren.

Über die erarbeitete, übergeordnete und EP-übergreifende Bauwerksstrukturierung sowie die darauf basierende und in den Katalogen von EP1, EP2 und EP3 umgesetzte Datenverknüpfungen (Abbildung 5), lassen sich demnach bei der zukünftigen Datenbankimplementierung des Forschungsprojekts durch EP6 eine Vielzahl an möglichen Datenabfragen für verschiedene Anwendungsfälle generieren.

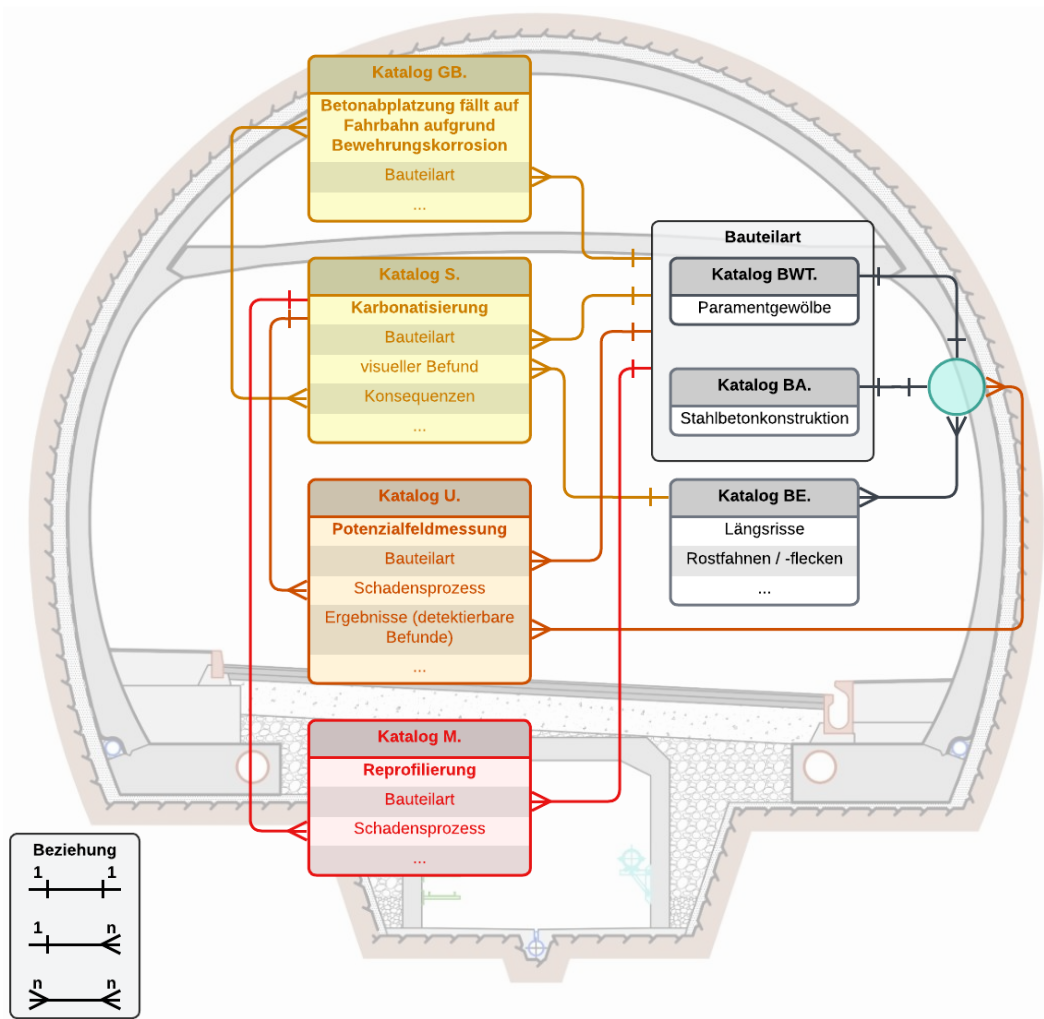


Abbildung 5: Beispiel für die Verknüpfungen der Kataloge EP1 bis EP3 mit Hilfe der übergeordnet definierten Bauwerksgliederung. Quelle Schlussbericht EP1 [2]

7 Fallbeispiele

Als Ergänzung zur Literatur wurden die Erfahrungen aus mehr als 40 Jahre Erhaltung von Tunnel neun Fallbeispiele von bergmännischen Strassentunnel in der Schweiz ausgewertet. Es handelt sich dabei ausschliesslich um bergmännische Strassentunnel, welche im Zuständigkeitsbereich einzelner ASTRA-Filialen bzw. deren Bereiche Erhaltungplanung und Projektmanagement liegen.

Die verwendeten Fallbeispiele / Tunnelobjekte sind:

- Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre
- Seelisbergtunnel
- Kerenzerbergtunnel
- Gotschnatunnel
- Gubristtunnel
- Tunnel Belchen
- Tunnel Girsberg
- Sonnenbergtunnel
- Reussporttunnel.

Diese Fallbeispiele wurden in allen Einzelprojekten entsprechend den Themenschwerpunkten analysiert und ausgewertet. Zu dem Zweck wurden die Fallbeispiele in einheitlich strukturierten Faktenblättern dokumentiert. Die Dokumentation enthält alle verfügbaren Informationen und Daten, welche Erkenntnisse zu den relevanten bzw. zu untersuchenden Teilprozessen der Erhaltungplanung enthalten (also Bauwerksgliederung, Befunde und Schadensprozesse, Untersuchungsmethoden, Erhaltungsmassnahmen u. m.). Damit dienen sie auch, die Anwendung der Kataloge und Werkzeuge in den Einzelprojekten zu verifizieren, nachzuvollziehen und zu veranschaulichen. Die Fallbeispiele können künftig auch fürs Testen der praktischen Anwendung in einer Applikation verwendet werden.

Die neun Fallbeispiele repräsentieren das Tunnelportfolio des ASTRA gut. Es handelt sich um Tunnel verteilt auf die 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.

Die aufgeführten Strassentunnel decken zudem unterschiedlichste Charakteristika ab, welche massgeblich die Zustandsentwicklung der Anlagen mitbestimmen: Von hochfrequentierten innerstädtischen, richtungsgetrenten Tunneln bis zum Alpen querenden Autobahntunnel mit Gegenverkehrsbetrieb auf über 1'000 Meter Höhe.

Auch bezüglich der Betriebsjahre decken diese neun Beispiele mit einem Alter von knapp 20 Jahren bis über 50 Jahren praktisch die gesamte Bandbreite ab. Diese Tunnel wurden von Anfang an als «Hochleistungs-Strassentunnel» für Nationalstrassen konzipiert und sind dadurch baulich bezüglich Bauart und Ausbaustandard deutlich homogener als z.B. im Vergleich dazu die vielen verschiedenen Tunnel der SBB.

Die verwendeten Fallbeispiele bilden das 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. Die Beschreibung der Tunnelobjekte, die als Fallbeispiele verwendet wurden, sind in Form von objektweisen, gleicherweise strukturierten und bebilderten Faktenblättern den Schlussberichten angefügt. Beispielfhaft liegt diesem Synthesebericht das Fallbeispiel Nr. 4 «Gotschnatunnel» in Anhang I bei.

8 Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln

8.1 Einleitung

Als Ergebnis aus dem Einzelprojekt «Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln» (EP1) sind drei Kataloge entstanden, auf die nachfolgend eingegangen wird:

- Katalog der Befunde (BE),
- Katalog der Schadensprozesse (S)
- Katalog der Gefährdungsbilder (GB) inkl. Beziehungsstrukturen zu den GB

Die 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 (Überwachungs- und Untersuchungsmethoden, Kap. o) und EP3 (Erhaltungsmassnahmen, Kap. o) verknüpft. Die Kataloge von EP1 dienen damit einerseits als strukturiertes Nachschlagewerk und andererseits als Basis für eine standardisierte Erhaltungsplanung von Strassentunnel.

8.2 Katalog der Befunde und Schadensprozesse

8.2.1 Systematisierung und Aufbau Katalog Schadensprozesse

Der Katalog «S. Schadensprozesse» (S. Katalog) stellt die für bergmännische Strassentunnel relevanten Schadensprozesse strukturiert und systematisch zusammen. 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 bezieht sich die Struktur des S. Katalogs auf die visuellen Befunde und die Bauteilart, was den Einstieg für Inspektoren erleichtert.

Als übergeordnete Gliederungseinheit wurde das Medium gewählt, in welchem der Schadensprozess abläuft. Das Medium wird hierbei als Ausbreitungsmedium einer physikalischen Erscheinung verstanden. Diese Gliederung der Schadensprozesse zeigt im Wesentlichen auf, wo diese ablaufen. Sämtliche im Katalog aufgeführten Schadensprozesse (S.) werden demnach in die folgenden Typen (S. Typ) unterteilt (Tabelle 3).

Schadensmedium Typ (S. Typ)

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 (inkl. Foundation ³)

Tabelle 3: Schadensmedium Typ (S. Typ)

Diese übergeordneten Gliederungseinheiten werden weiter unterteilt in die Schadensprozessstypen, welche wiederum einheitlich mit Informationen (Attributen) in Katalogblättern beschrieben werden. Insgesamt wurden 25 tunnelrelevante Schadensprozesse identifiziert und katalogisiert (siehe Liste im Anhang II).

Beispielhaft illustriert der Schadentyp S-3 «Schadensprozesse Baugrund» diese Gliederung (Tabelle 4). Er steht für geomechanische Prozesse im Baugrund, die zu Belastungsänderungen auf die Tunneltragstruktur führen. Beispielhaft wurden fünf Schadensprozesse im Medium Baugrund identifiziert, welche zu solchen Belastungsänderungen führen können.

Schadensprozessstypen am Beispiel Schadensmedium «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

Tabelle 4: Schadensprozessstypen am Beispiel Schadensmedium «Baugrund»

Zusammenfassend werden die Schadensprozesse pro Medium wie folgt definiert.

S-1: Schadensprozess Stahlbeton

- Stahlbeton ist ein Kompositmaterial aus Bewehrungsstahl und Beton. Die Schadensprozesse Stahlbeton beinhalten daher sowohl Schadensprozesse, die entweder im Bewehrungsstahl (Bewehrungskorrosion), im Betongefüge (Betonangriff / Gefügezerstörung) oder im Falle der Ermüdung in beiden Materialien ablaufen. Die Schadensprozesse Stahlbeton umfassen sowohl bewehrten als auch unbewehrten Beton.

S-2: Schadensprozess Metall

- Die Schadensprozesse Metall enthalten verschiedene relevante Korrosionsarten und andererseits die Metallermüdung, welche als separater Schadensprozessstyp aufgeführt ist.

³ Die Foundation ist im Schlussbericht EP1 nicht explizit genannt, ist aber Teil des Bauwerksteil Fahrbahn/Fahrbahnfundation und daher auch sinnvollerweise Teil dieses Schadensprozesses.

S-3: Schadensprozess Baugrund

- Die Schadensprozesse Baugrund enthalten geomechanische Prozesse, welche im Baugrund um den Tunnel als Folge unterschiedlicher Auslöser / Ursachen ablaufen. Als Auslöser/Ursache werden dabei nicht nur gebirgsmechanische Veränderungen (Konsolidation, quellendes Gebirge, druckhaftes Gebirge etc.) berücksichtigt, sondern auch als Folge von neuen Bauten im Einflussbereich des Tunnels oder Verlust der Tragfähigkeit der Ausbruchsicherung.
- Alle diese Schadensprozesse führen zu Belastungsänderungen auf das Tunnelgewölbe und als Folge davon zu Rissen, Abplatzungen und Verformungen als Folge von äusserem Zwang. Da das Tunnelgewölbe zugleich Auflager weiterer Bauwerksteile wie Zwischendecke, Werkleitungskanal, Fahrbahn etc. ist, können Gewölbeverformungen wiederum Auslöser von Belastungsänderungen und Verformungen auf diese Bauwerksteile sein.

S-4: Schadensprozess Berg- / Grundwasser

- Das Berg- / Grundwasser ist einer der Auslöser / Ursachen bei ganz verschiedenen Schadensprozessen. Die schädigende Wirkung des Berg- / Grundwasser kann demzufolge vielgestaltig sein. Unter Schadensprozess Berg- / Grundwasser werden hier aber nur jene Prozesse verstanden, welche zu einer Zusatzbelastung bzw. zu einem zusätzlichen Wasserdruck auf den Tunnels führen.

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 und als Folge davon zu einem Wasserdruckaufbau, was mit Schadensprozessstyp S-4 Berg- / Grundwasser abgedeckt wird. Die Alterung von Kunststoffleitungen wird daher nicht als separater Schadensprozessstyp aufgeführt.

S-6: Schadensprozess Strassenoberbau (inkl. Foundation)

- Die Schadensprozesse Strassenoberbau enthalten einerseits Schädigungen des Asphaltbelags bzw. der Trag- / Binder- / Deckschicht (Belagsverformungen und Belagsschäden) und andererseits der Foundationsschicht (Strukturelle Schäden).

8.2.2 Katalog der Befunde

Die Identifikation von Schadensprozessen erfolgt in der Praxis zur Hauptsache über einfach verfolgbare, visuelle Befunde aus Inspektionen, Beobachtungen sowie Kontrollmessungen und Überprüfungen. Aus Sicht der Praxistauglichkeit bilden Befunde daher den geeigneten Einstieg, um Schadensprozesse zu identifizieren. Zu dem Zweck liegt dem Forschungsprojekt EP1 auch ein Katalog mit 31 typischen visuellen Befunden (BE) bei (siehe Anhang III). Dieser Katalog basiert auf dem bestehenden KUBA-Katalog der Befunde, welcher wo nötig erweitert und ergänzt wurde. Für bergmännische Strassentunnel irrelevante Befunde wurden dabei ausgeblendet.

Diese Befunde sind in vier Gruppen wie folgt gegliedert (Tabelle 5).

Befundgruppen (BE)

BE-1000:	Mechanische Integrität
BE-2000:	Chemische Integrität
BE-3000:	Undichtigkeit
BE-4000:	Funktionsstörungen

Tabelle 5: Befundgruppen

Es ist zu berücksichtigen, dass viele Befunde nicht von vornherein für die Erhaltungsplanung relevanten Schadensprozessen zugeordnet werden können. Befunde können auch eine Folge von Mängeln bei der Herstellung des Bauwerks sein (bspw. Risse im unbewehrten Tunnelinnengewölbe als Folge von äusserem Zwang und Schwinden nach dem Ausschalen). Es ist daher wichtig, solche Mängel zur Abgrenzung der Zustandsentwicklung zu Beginn der Betriebsaufnahme mit Werksabnahme zu erfassen. In der Regel wird vor Garantieablauf eine 1. Hauptinspektion durchgeführt, welche zur Abgrenzung der Mängel dient.

8.2.3 Vollständigkeit des Katalogs Schadensprozesse

Entsprechend der übergeordneten Abgrenzungen werden nur Schadensprozesse katalogisiert, die auf Bauwerksteile und Bauarten von bergmännischen Strassentunneln einwirken. So sind bspw. Schadensprozesse an gemauerten Tunnelgewölben, wie sie in alten Bahntunnel typisch sind, nicht im Katalog aufgeführt. Das gleiche gilt für Schadensprozesse, die auf BSA-Komponenten einwirken (exkl. Befestigungen).

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.

Ein solch typischer Mangel sind Risse in unbewehrten Tunnelinnengewölbe als Folge von äusserem oder innerem Zwang bei der Herstellung (siehe [24]). Ersteres ist eine Folge von Schwinden des Gewölbebetons und behinderten Verformungen beim Übergang in die Sohle (Firstlängsrisse) oder Unebenheiten Übergang Gewölbe / Gebirge. Letzteres ist eine Folge der unterschiedlichen Hydratationswärmeentwicklung zwischen Kern und Oberfläche, wie sie bei massigen (>80 cm dicken) Betonteilen bspw. dicken Tunnelgewölben relevant sein können. Solche Mängel können aber als begünstigende Faktoren für bestimmte Schadensprozesse relevant sein (siehe auch Kap. 8.2.2).

Aussergewöhnliche, punktuelle Ereignisse und damit zusammenhängende Kaskadenschäden (z.B. Tragwerksversagen Zwischendecke infolge Tunnelbrand) sind nicht Gegenstand des EP1.

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.

Das Forschungsprojekt stellte den Anspruch, eine vollständige Übersicht und Katalogisierung aller für bergmännische Strassentunnel relevanter Schadensprozesse zusammenzustellen. Die Vollständigkeit wurde anhand der Literaturrecherche und anhand der neun Fallbeispiele (siehe Kap. 0) geprüft.

Als massgebende Literatur für die Vollständigkeitsprüfung wurden die Forschungsbeiträge von [13] und [22] gewählt (siehe auch Kap. 4.1). Sie geben einen Überblick über die in bergmännischen Tunnel ablaufenden Prozesse. Die in den beiden Literaturquellen aufgelisteten Prozesse wurden mit denjenigen im Katalog der Schadensprozesse verglichen. Es konnten für alle relevanten und im Rahmen des Forschungsprojekts nicht abgegrenzten Schadensprozesse in den Literaturquellen korrespondierende Einträge im Katalog Schadensprozesse von EP1 evaluiert werden.

Der Nachweis der Vollständigkeit erfolgte auch bezüglich der Fallbeispiele Kap. 0: Mit Ausnahme des Schadensprozess «Ermüdung Metall» (S-29) wurden alle übergeordneten Schadensprozesstypen in den Fallbeispielen angetroffen bzw. waren dort relevant. 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.

8.2.4 Informationen zu Schadensprozessen

Jeder Schadensprozesstyp liegt sowohl als übersichtliches Katalogblatt als auch als datenbankkompatibel strukturierte EXCEL-Tabelle vor, welche alle im Pflichtenheft (siehe Kap. 2.1.2) geforderten Informationen systematisch aufführen. Der S.-Katalog umfasst folgende Informationsbereiche:

- 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.

Einen vollständigen Überblick über die Informationen (Attribute) und deren Art der Daten gibt die Tabelle in Anhang IV.

Zur Illustration ist das Katalogblatt des Schadensprozesstyp S-12.3 «Sulfatangriff extern» des Schadensmedium S-1 «Schadensprozesse Stahlbeton» im Anhang V abgebildet. Jeder Schadensprozesstyp ist mit dazugehörigen möglichen visuellen Befunden (Katalog BE, Anhang III) und den davon betroffenen Bauteilarten (Kap. 0) verknüpft, was Inspektoren eine praxistaugliche Hilfe bei der Identifizierung von Schadenprozessen gibt.

Für die Beurteilung der Schadensprozesse sind die strukturierten Informationen zu den Auslösern / Ursachen, den begünstigenden Faktoren sowie den möglichen Konsequenzen dienlich. Letztere werden in Form der Verknüpfung mit Gefährdungsbildern gemacht (siehe Kap. 8.3).

Wo möglich wird ein Bezug zum korrespondierenden Prozess im bestehenden KUBA-Katalog [12] hergestellt. Dies vereinfacht eine zukünftige 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 Abstraten). Die Eignung und Einsatzgrenzen der aufgeführten Verfallsfunktionen für Risikobeurteilungen sind aber im Einzelfall durch die Anwender zu prüfen.

Im Schlussbericht EP1 wird vertieft auf den Stand der Forschung in Bezug auf Verfallsfunktionen und die Folgen für das Forschungsprojekt eingegangen (siehe [2], Kap. 1.3.2 und Kap. 1.3.3).

8.3 Katalog der Gefährdungsbilder

8.3.1 Systematisierung und Aufbau Katalog Gefährdungsbilder

Als Konsequenz von Schadensprozessen und des damit ausgelösten kontinuierlichen Verfalls des Bauwerksteil schlägt EP1 die Verknüpfung mit Gefährdungsbildern vor, wozu ein Katalog relevanter Gefährdungsbilder (GB. Katalog) erstellt wurde.

Dazu wird auf eines der Hauptziele der Bauwerkserhaltung gemäss [9] verwiesen, die die «Gewährleistung einer ausreichenden Sicherheit» verlangt. Erhaltungsmassnahmen Bauwerkserhaltung 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 nicht Gegenstand des Forschungsprojekts, welches sich auf werterhaltende Massnahmen konzentriert. 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 28 Gefährdungsbilder (GB) werden demnach in die zwei übergeordneten Gefährdungsbilder «Tragsicherheit» (19x GB-1) und «Betriebssicherheit» (9x GB-2) unterteilt (siehe Liste der Gefährdungsbilder im Anhang V). 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

objektspezifisch festgesetzten Anforderungen liegen, der Tunnel sicher betrieben werden kann bzw. die Betriebssicherheit nicht beeinträchtigt ist.

Jedes Gefährdungsbild enthält wiederum einheitlich strukturierte Informationen und Verknüpfungen zu Schadensprozessen und Bauteilarten. Diese Informationen sind ebenfalls strukturiert für jedes GB in einem Katalogblatt dokumentiert (siehe beispielhaft GB-23 «Betonabplatzung auf Fahrbahn» in Anhang VIII).

8.3.2 Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren

Der Beschrieb der Gefährdungsbilder enthält neben Angaben zum Versagensmechanismus auch eine Beziehungsstruktur der Einflussfaktoren. Solche Beziehungsstrukturen können eine Basis für eine einheitliche, standardisierte und systematisierte Risikobeurteilung im Rahmen von Entscheidungsmodellen bilden.

Die Herausforderungen bestehen darin, 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 eine einheitliche, standardisierte und systematisierte Risikobeurteilung im Rahmen von Erhaltungsentscheiden. Mögliche Ansätze für qualitative Risikobewertungen basieren auf Bayes'schen Netzwerken, wie sie bspw. in [30] präsentiert werden. Im EP1 wurde zu allen übergeordneten Gefährdungsbilder Beziehungsstrukturen erarbeitet, welche die Abhängigkeiten der Einflussfaktoren der Gefährdungsbilder darstellen. Daraus könnten objektspezifische Gefährdungsszenarien formuliert und das Risiko beurteilt werden, was eine mögliche Basis für zukünftige, systematische Erhaltungsentscheide sein könnte.

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. Neben den Gebirgseigenschaften können bspw. auch die angewendeten Bauverfahren oder verbleibende Bauwerksmängel (z.B. fehlende Gewölbebettung, Hohlräume) eine massgebende Rolle bei der Risikobeurteilung spielen. Für eine einheitliche und praxistaugliche Anwendung der Risikobeurteilung ist daher eine Reduktion auf die massgebenden Einflussfaktoren zweckmässig.

Der Beitrag des EP1 besteht darin, basierend auf der Erfahrung massgebende Einflussfaktoren bestimmt und nur diese in einer Beziehungsstruktur miteinander verknüpft zu haben. Eine schematische Darstellung einer Beziehungsstruktur der Einflussfaktoren beispielhaft für das Gefährdungsbild «Tragwerkversagen» ist in Abbildung 6 ersichtlich.

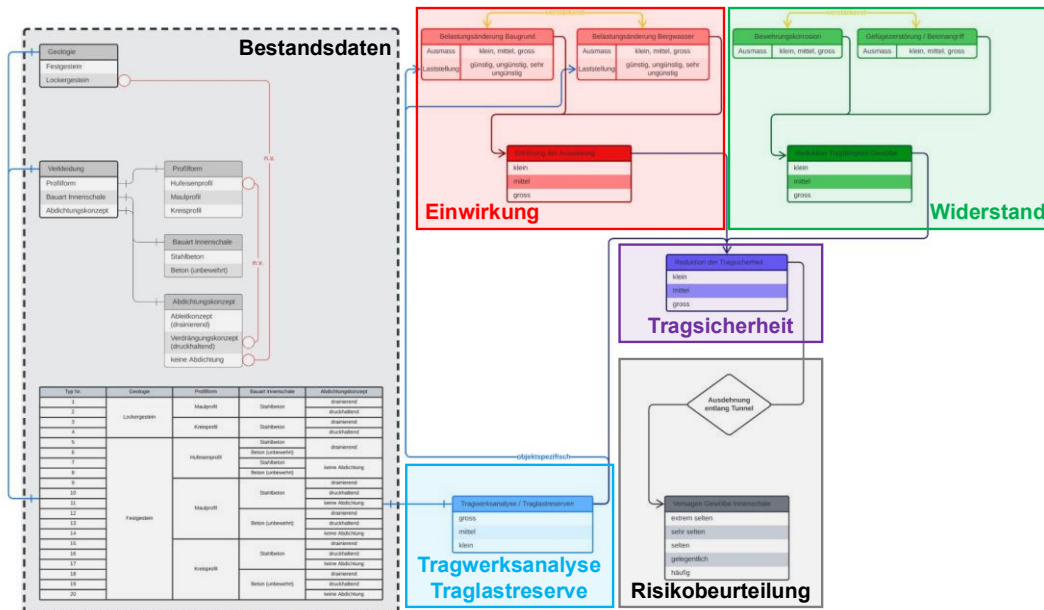


Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Beziehungsstruktur der Einflussfaktoren für Gefährdungsbild Tragwerksversagen (lesbares Beispiel, siehe Anhang VIII)

Die 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 Widerstands die aktuelle Tragsicherheit für einen Tunnelblock oder eine bestimmte Bauteilart bewertet werden. Unter Berücksichtigung der Ausdehnung der Schädigung entlang des Tunnels, könnte daraus schliesslich die objektspezifische Risikobeurteilung erfolgen.

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 eines Schadens (z.B. die Bewehrungskorrosion) mit der Zeit zu, so reduziert sich in der Folge der Tragwerkswiderstand bzw. die Tragsicherheit. Liegen nach einigen Bewertungszyklen genügend Daten in ausreichender Qualität vor, könnten theoretisch auch Prognosen hinsichtlich des zukünftigen Verlaufs des Risikos ange stellt, 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 gegenüber gestellt und in Abhängigkeit ihrer Inputparameter statistisch ausgewertet werden.

Die Autoren schränken aber ein, 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.

8.4 Anwendung, Aussagekraft und Grenzen der Kataloge

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 (siehe Kap. o) und EP3 (siehe Kap. o) verknüpft. Die Kataloge von EP1 dienen dadurch einerseits als strukturiertes Nachschlagewerk und andererseits als Basis für Erhaltungsentscheide und eine standardisierte Erhaltungsplanung.

Basierend auf einem Entscheidungsbaumansatz stellt EP1 einen Vorgehensvorschlag vor (Abbildung 7). 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, d.h. «verfolgbarer Schadensprozesse». In einem zweiten Schritt werden systematisch alle nicht einsehbaren Bauteilarten und visuell nicht erkennbaren Schadensprozesse resp. «nicht verfolgbarer Schadensprozesse» beurteilt und somit die möglichen Gefährdungen (in KUBA [12] bisher mit «9 Zustand nicht überprüfbar» bzw. «91 Gefährdung unwahrscheinlich» und «92 Gefährdung wahrscheinlich» bewertet) bestimmt.

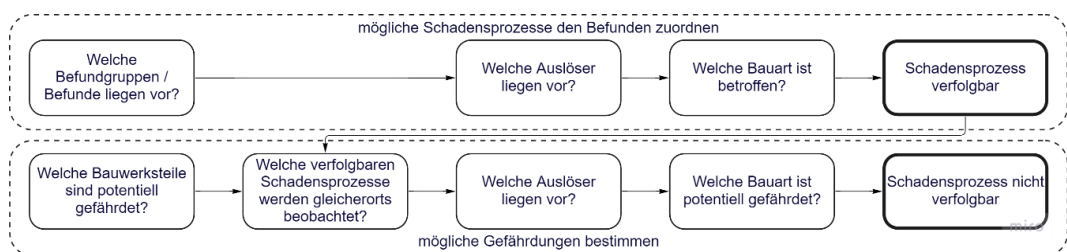


Abbildung 7: Vorgehensvorschlag zur systematischen Eingrenzung der möglichen Schadensprozesse basierend auf visuellen Befunden im Rahmen der Inspektion

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 Bauwerksteils in Abhängigkeit der Initial- und Betriebsbedingungen stark variieren, letzteres ist ein typisches erschwerendes Merkmal von Tunnelbauwerken gegenüber anderen Kunstbauten.

Im Schlussbericht EP1 ist ein Kapitel der Anwendung der Kataloge gewidmet. Unter anderem am konkreten Fallbeispiel Tunnel Gotschna (A28, Kanton Graubünden, Eröffnung 09.12.2005, siehe Anhang I) wird beispielhaft gezeigt, wie Anwenderinnen und Anwender ohne vertiefte Spezialkenntnisse die Kataloge nutzen können. Diverse Funktionalitäten (Gliederung, Such- und Filterfunktionen, Verknüpfungen) helfen

bereits bei der aktuell vorliegenden Excel-Lösungen und können in Zukunft datenbankunterstützt ausgebaut werden.

Das Anwendungsbeispiel zeigt, wie sich mit systematischen Abfragen gem. dem Vorgehensvorschlag in Abbildung 7 im Rahmen der Inspektion die in Frage kommenden Schadensprozesse und Gefährdungen eingrenzen lassen. Dank der Verknüpfung mit EP2 lassen sich zweckmässige weiterführende Untersuchungsmethoden evaluieren, welche helfen, die massgebenden Schadensprozesse und deren Ausprägung zu bestätigen und verbesserte Grundlagen für objektspezifische Risikobeurteilungen und deren zukünftigen Verlauf als Grundlage für Erhaltungsentscheide zu liefern (Kap. o).

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. 8.3.2) der Einfluss des Faktors «Mensch» von relevanter Bedeutung. Darin liegen auch die Grenzen betreffend die anzustrebende Objektivität und Reproduzierbarkeit der Daten (siehe auch Thema 'Datenqualität', Seite 28). Die erarbeiteten Beziehungsstrukturen der Einflussfaktoren schaffen jedoch eine Ebene zur standardisierten und systematisierten Risikobeurteilung unabhängig vom betrachteten Tunnelobjekt oder von der mit der Erhaltungsplanung beschäftigten Personen. Dadurch kann 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.

9 Überwachungs- und Inspektionsmethoden

9.1 Einleitung

Im Rahmen des Einzelprojekt «Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden» (EP2) sind im Wesentlichen folgende Ergebnisse erarbeitet worden, auf die nachfolgend eingegangen wird:

- Katalog der Untersuchungsmethoden (USM),
- Konzeptvorschlag Vergleichsmethodik (inkl. erste Überlegungen zur Integration von Risikoüberlegungen)

Darin werden Methoden und Werkzeuge zur Identifikation von Schadensprozessen aus detektierten Befunden in Tunnelbauwerken systematisiert und katalogisiert. Die Methoden sollen in Bezug auf die Aussagekraft für nachfolgende Zustandsbeurteilungen miteinander verglichen und bewertet werden können. Zudem wurde versucht, eine praxisbezogene Vergleichsmethodik für die Optimierung der Überwachungsprogramme unter Berücksichtigung von Risiken zu erarbeiten.

9.2 Katalog der Untersuchungsmethoden

9.2.1 Systematisierung und Aufbau Katalog Untersuchungsmethoden

Der Katalog der USM (U.-Katalog) stellt Informationen zusammen, welche die Auswahl einer geeigneten Methode ermöglichen, z.B. aufgrund vorgefundener Befunde oder schadhafter Bauwerksteile. Die Ergebnisse der so ausgewählten und durchgeführten Untersuchungen liefern unabdingbare Informationen für die Zustandsbeurteilung und damit indirekt auch für Erhaltungsentscheide.

Die Struktur des U.-Katalogs bezieht sich auf die gemäss EP1 definierten visuellen Befunde, Schadensprozesse und Bauteilarten. Die USM werden übergeordnet in vier Typen (U. Typ) unterteilt. Diese Unterteilung der USM zeigt auf, ob die Untersuchungen visuell, d.h. ohne bzw. mit spezifischen Messgeräten durchgeführt werden, sowie wo diese Untersuchungen stattfinden, z.B. direkt im/am Bauwerk oder im Labor bzw. im Büro bei statischen Überprüfungen.

Es wurden insgesamt 144 USM katalogisiert und mit einheitlichen Attributen (Informationen) beschrieben. Sie sind in Anhang IX aufgelistet. Die zusammengetragenen 144 USM gliedern sich gemäss erläuterter Struktur wie folgt in die vier U.-Typen:

- U.-Typ 1: Visuelle Untersuchungen (12 USM)
- U.-Typ 2: Messtechnische Untersuchungen am Bauwerk (69 USM)
- U.-Typ 3: Laborprüfungen (53 USM)
- U.-Typ 4: Statische, geodätische & konstruktive Untersuchungen und Belastungsversuche (10 USM)

Zusammenfassend werden die USM pro Typ wie folgt definiert.

U.-Typ 1: Visuelle Untersuchungen:

- Zu den visuellen Untersuchungen gehören die visuellen Inspektionen mit unterschiedlichem Fokus von der Sichtkontrolle bis hin zur visuellen Inspektion durch Fach-Spezialist/in. Ebenfalls zum U.-Typ 1 gehören die technischen visuellen Untersuchungen mit Hilfsmitteln wie Foto- und Videokameras, Spezialgeräte für automatisierte Bilddatenerfassung, Kanal-TV Aufnahmen und Endoskopie.

U.-Typ 2: Messtechnische Untersuchungen am Bauwerk:

- Die Messtechnischen Untersuchungen am Bauwerk beinhalten diverse Arten von Untersuchungen, wie Riss-, Dehnungs- und Verformungsmessungen mit diversen Gerätschaften, zerstörungsfreie, geophysikalische Verfahren, Sensoren und Hilfsmitteln; Mechanische Überprüfungen, Messung Wassermengen und -drücke, materialtechnologische Untersuchungen sowie klimatische Untersuchungen.

U.-Typ 3: Laborprüfungen:

- Die Laborprüfungen beinhalten folgende Arten von Untersuchungen, wobei die Proben vor Ort entnommen werden müssen. Dazu zählen diverse Prüfungen chemischer, mechanischer und physikalischer Kennwerte, mikroskopische Untersuchungen, chemischer Untersuchungen der Einwirkungen sowie weiterer Laboruntersuchungen (z.B. Biologische Untersuchungen).

U.-Typ 4: Statische, geodätische, konstruktive Untersuchungen & Belastungsversuche:

- Diese spezialisierten Methoden beinhalten statische und konstruktive Untersuchungen, Belastungsversuche sowie geodätische Untersuchungen.

9.2.2 Vollständigkeit des Katalogs Untersuchungsmethoden

Gemäss der übergeordneten Abgrenzung werden USM aufgeführt, welche ausschliesslich beim baulichen Teil von bergmännischen Tunneln eingesetzt werden können. Entsprechend nicht erfasst und behandelt werden Methoden, welche für die Ausrüstung der Betriebs- und Sicherheitsanlagen (BSA) oder ausschliesslich nur bei Tagbautunneln oder beim Neubau von Tunneln eingesetzt werden. USM, die sich noch in Entwicklung befinden und trotz Beschrieb in Publikationen noch nicht in der Praxisanwendung mehrfach erprobt sind bzw. produktiv eingesetzt werden, wurden ebenfalls nicht erfasst.

Das Forschungsprojekt stellte den Anspruch, eine vollständige Übersicht des Stands der Praxis der USM für Überwachung und Überprüfung zusammenzustellen. Einerseits sollen damit alle Typen von USM dargestellt und andererseits sämtliche möglichen Schadensprozesse bei Tunneln abgedeckt werden können.

Die Vollständigkeit des U.-Katalogs wurde in mehreren Schritten geprüft und nachgewiesen. Ausgehend vom bestehenden Fachdaten-Katalogen aus der Anwendung KUBA 5.0 [12] für Kunstbauten wurden die neun Fallbeispiele gemäss Kapitel 0 bzgl. der bei diesen Tunneln durchgeführten Untersuchungen ausgewertet und in den U.-Katalog aufgenommen. Bei diesem Schritt kamen bereits 65 USM zusammen. Unter Einbezug

von Literaturquellen (wie z.B. [13]), Prüfkataloge von akkreditierten Baulaboren, Vermessungsbüros und geotechnische Labore sowie gezielten Rückfragen wurden diese abgeglichen und auf über 140 USM vervollständigt. Die Vollständigkeit des U.-Katalogs kann auch damit gezeigt werden, dass für alle vier Typen von USM mehrere unterschiedliche Methoden im Katalog zu finden sind. Im Bericht wurde auch nachgewiesen, dass für jeden Schadensprozess gemäss S.-Katalog (Anhang II) mindestens eine USM aufgeführt ist.

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

9.2.3 Information zu den Untersuchungsmethoden

Jede USM liegt als datenbankkompatibel einheitlich strukturierte EXCEL-Tabelle vor, welche alle im Pflichtenheft geforderten Informationen systematisch aufführen. Eine Anzahl von 25 oft genutzte Methoden wurden als «bewährte Untersuchungsmethoden» bezeichnet. Sie liegen auch in Form übersichtlicher Katalogblätter mit zusätzlicher Bilddokumentation vor. Am beispielhaften Katalogblatt Nr. U-2-151 «Laserscanning (ohne KI)» im Anhang XIXI werden die strukturierten Informationen und die Art der Daten pro USM illustriert.

Der U.-Katalog umfasst folgende Informationsbereiche:

- Strukturierung Untersuchungsmethoden (USM);
- Zuordnung Bauwerksgliederung (BWT x BA) / Befunde (BE.) / Schäden (S.);
- Kontext Untersuchungsmethoden (USM);
- Ergebnisse;
- Attribute für Aufwand und Kostenschätzung;
- Informationen zu Anbietern;
- Verweise / Referenzen.

Einen vollständigen Überblick über die Informationen (Attribute) und deren Art der Daten gibt die Tabelle in Anhang XX).

Neben einer eindeutigen Bezeichnung der USM wird auch eine Beschreibung gegeben, welche u.a. Angaben zur Funktionsweise, zum Ziel und zur Motivation der Untersuchung sowie besondere Merkmale und Abgrenzungen zu Alternativen liefert. Es werden bspw. auch Attribute gegeben, ob die USM zerstörungsfrei durchgeführt werden kann oder für Langzeitmonitoring und damit zur Beobachtung der Zustandsentwicklung geeignet ist. In Bezug auf die Messresultate werden die Art (Messgrösse, Messeinheit) und die Qualität (Aussagekraft, Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Grenzen) der Ergebnisse in Freitexten beurteilt. Es werden Angaben zu Aufwand und Kostenschätzung gemacht und Verweise auf Normierungen, Art der Anbieter und Referenzen zu Fallbeispielen gegeben. Eine wichtige Verknüpfung im Hinblick auf die Praxistauglichkeit besteht zu den Schadensprozessen und damit auch indirekt zu den Befunden.

9.3 Konzeptvorschlag Vergleichsmethodik inkl. Überlegungen zur Integration von Risikoansätzen

Für die Bestimmung einer optimalen Untersuchungsmethode erlaubt der U.-Katalog eine effiziente Vorauswahl der in Frage kommenden USM und bietet mit den einheitlichen Eigenschafts-Attributen eine gute Grundlage für die spezifische Auswahl von Methoden.

Kommen bei dieser Vorauswahl aus technischer Sicht immer noch mehrere geeignete Methoden in Frage, werden die Kriterien Kosten und Wirksamkeit entscheidend. Die Untersuchungskosten sind allein oft nicht ausschlaggebend, welches die optimale Methode ist. Ein zentraler Punkt bei Untersuchungen ist deren Wirkung, wie sie zur Verringerung von Unsicherheiten bezüglich Zustand und Risiken beitragen. Die Themen «Schadensprozesse», «Zustandsentwicklung» und als Folge davon «Gefährdungsszenarien» sind dabei von besonderer Bedeutung, denn sie haben einen entscheidenden Einfluss auf Erhaltungsentscheide. In EP2 wird ein Konzept «Vergleichsmethodik mittels Unsicherheitsbeiwert» skizziert, wie Risikobetrachtungen bei der Wahl optimierter USM genutzt werden könnten.

Ein Untersuchungsergebnis vermag die tatsächliche Eintretenswahrscheinlichkeit (Probability of Failure oder PoF) eines Gefährdungsszenarios nicht zu vermindern. Es kann lediglich die Unsicherheit dessen Beurteilung vermindern. Bei hoher Unsicherheit muss die PoF erhöht werden, was in einem höheren Betriebsrisiko und als Folge davon unnötig vorgezogenen bzw. umfangreichen Erhaltungsentscheiden resultiert. Der Nutzen einer Untersuchung ist, diese Unsicherheit und damit das angenommene Betriebsrisiko zu verringern. Eine Vergleichsmethodik bezweckt, die optimale Untersuchungsmethode zu identifizieren, welche die grösste Verringerung dieser Unsicherheit bringt. Dafür muss diese Verringerung vorgängig abgeschätzt werden.

EP2 schlägt dafür einen Unsicherheitsbeiwert $UB \geq 1.0$ in Anlehnung an Sicherheitsfaktoren bei der Tragwerksplanung einzuführen. Der Unsicherheitsbeiwert UB erhöht die PoF von einem charakteristischen Basisniveau PoF_k (z.B. aus Zerfalls- bzw. Alterungskurven, basierend auf Schadensprozess, Bauteilart und dimensionierter Nutzungsdauer etc.) auf ein Entscheidungsniveau PoF_d .

Der UB besteht aus Teilfaktoren, welche nach den unterschiedlichen Ursachen der Unsicherheit gegliedert sind. Zu diesen Teilfaktoren gehören solche, welche durch Untersuchungen nicht beeinflusst werden können (z.B. Streuung der Schadensprozesse) und solchen, welche von der Art und Umfang der USM abhängen (z.B. Ort und Umfang der Untersuchung) und somit verringert werden können.

Es wird jeweils der UB und das resultierende Risiko für den aktuellen Zustand $R_{(o,d)}$ und nach Anwendung jeder zu vergleichenden USM i bestimmt. Das Risiko $R_{(i,d)}$ wird aus dem Produkt der PoF_d und den Konsequenzen (CoF) bestimmt.

$$R_{i,d} = PoF_d \cdot CoF \quad (1)$$

Die Differenz zum Ausgangszustand $\Delta R_{i,d} = R_{i,d} - R_{o,d}$ erlaubt den Vergleich verschiedener Untersuchungsmethoden anhand ihrer Wirkung auf die Unsicherheit sowie auf ihre Effizienz E_i .

$$E_i = \frac{\Delta R_{i,d}}{C_i} \quad (2)$$

Wobei C_i die geschätzten Kosten des Untersuchs darstellt.

Als Anwendung des vorgeschlagenen Konzepts der Vergleichsmethodik wurde ein Fallbeispiel mit zwei bewährten Untersuchungsmethoden durchgespielt, die auch im U.-Katalog erfasst sind. Dieser erste «Anwendungstest» für den Konzeptvorschlag hat aufgezeigt, dass die praxistaugliche Umsetzung noch nicht gegeben ist.

Die Autoren des EP2 kommen zum Schluss, dass die Vergleichsmethodik ist noch zu theoretisch und kann im Rahmen dieses praxisorientierten Forschungsprojekts nicht auf die nötige Reife für die Anwendung gebracht werden. Dazu müssen erst Daten gesammelt, zusammengestellt, respektive Normen bzw. Vorgaben entwickelt werden, die weitgehend unabhängig von den Anwenderinnen und Anwendern stabile, aussagekräftige Resultate liefern.

Trotzdem kommen die Autoren zum Schluss, dass die Machbarkeit des Konzepts mit Unsicherheitsbeiwerten gegeben ist, wie das zum Beispiel die Analogie zu vergleichbaren Überlegungen aus den Tragwerksnormen aufzeigt. Bei der Bemessung von Tragwerken wird die Risikoüberlegung auch mittels Beiwerte integriert, für deren Bestimmung es Normen mit Modellen und ausführliche Tabellen zur Ermittlung gibt (beispielsweise SIA 261). Entsprechend erfordert auch die Bestimmung von Beiwerten zur Integration von Risikoüberlegungen beim Vergleich von Untersuchungsmethoden, respektive für den Erhaltungsprozess, analoge Datensammlungen bzw. Normenwerke und zugrundeliegende Studien.

9.4 Anwendung, Aussagekraft und Grenzen bei Untersuchungsmethoden

Im Katalog der USM wird auf die Schadensprozesse verwiesen, jedoch gibt es auch - aus der Perspektive einer Inspektorin oder eines Inspektors - eine Verknüpfung zu den visuellen Befunden, welche durch verschiedene Schadensprozesse hervorgerufen werden können. Im U.-Katalog steht in der Spalte «B. Befund» (Spalte L) die Werteliste der visuellen Befunde aus dem EP1 zur Auswahl. Damit ist der direkte Bezug zum Katalog des EP1 geschaffen und vor allem auch zu den visuellen Befunden, wie sie als einfache Ergebnisse aus ersten Überwachungsmassnahmen typisch sind.

Die katalogisierten Methoden und ihre Ergebnisse sind abhängig u.a. von Messart, Messort, Zuordnung Bauwerksart, Messtechnik und Umfeld. Im Katalog finden sich spezifische Hinweise auf die Verlässlichkeit und das Potential beim Einsatz der aufgeführten USM. Diese sind im Informations-Bereich «Ergebnisse (Resultate)» mit den Spalten Q bis U im U.-Katalog festgehalten.

Auf weitergehende Angaben zur Aussagekraft, insbesondere zur Genauigkeit der Methoden wird bewusst verzichtet. Untersuchungsmethoden haben je nach Messprinzip Grenzen für ihre Anwendung. Ebenso relevant sind die Grenzen bezüglich der Auswertung und Interpretation. Bei qualitativen Messmethoden ist es der Faktor Mensch, welcher massgeblich zum Resultat beiträgt (z.B. eindeutigen, konsequenten Zuordnung der Befunde (Schadensbilder) zu den Zustandsklassen). Bei messtechnischen USM (physikalische / chemische Messwerte) hängen die Genauigkeit und Grenzen von der eingesetzten Technologie, dem exakten Prüfverfahren, der Umgebungsbedingungen und mehr ab, die sich im Katalog nicht ausreichend eindeutig abbilden lassen. Müssen solche Ergebnisse in eine Zustandsklassen «übersetzt» werden, wird durch die grobe Klassenbildung die Ungenauigkeit grösser. Bei einer an sich sehr exakten Messmethode können die begrenzten Anzahl Proben oder sehr lokale, nicht repräsentative Analysen einen grossen Einfluss auf die Aussagekraft und Genauigkeit fürs Bauwerk haben und entsprechend aus statistischen Gründen Grenzen gesetzt sind.

Dies macht deutlich, dass hinsichtlich Genauigkeit und Grenzen die USM nicht isoliert betrachtet werden können, sondern auch das übergeordnete Untersuchungsprogramm und -konzept einen massgebenden Einfluss auf das Resultat der Zustandsbeurteilung ausübt.

Dem Monitoring kommt bei Zustandsuntersuchungen bezüglich Aussagekraft besondere Bedeutung zu. Ein gezielt eingerichtetes Monitoring erlaubt die Entwicklung eines Gefährdungsszenarios besser zu erfassen. Damit kann, im Sinn einer detaillierten Überprüfung, die Prognose der weiteren Zustandsentwicklung und des daraus abgeleiteten Gefährdungspotentials deutlich verbessert werden. Im Kontext des Konzepts Vergleichsmethodik (Kap. 9.3) kann mit einem optimal eingerichteten Monitoring die Unsicherheit bezüglich Risikos massgeblich reduziert werden, wobei jedoch dafür höhere Kosten für diese längerfristigen Untersuchungsmassnahme mitberücksichtigt werden müssen.

Ob eine Untersuchungsmethode für die Umsetzung als Monitoring geeignet ist, d.h. dauerhaft installiert werden kann, wird im U.-Katalog in der Spalte N «Überwachung / Monitoring (Onlinemessung)» aufgezeigt.

10 Standardisierte Erhaltungs- massnahmen

10.1 Einleitung

Im Einzelprojekt «Standardisierte Erhaltungsmaßnahmen» (EP3) sollen Erhaltungsmaßnahmen für jeden Schadensprozess systematisiert und in Abhängigkeit ihrer Wirksamkeit und Effizienz, ihrer Folgekosten während der Nutzung, ihres Ausführungsaufwandes und ihres Langzeitverhaltens katalogisiert werden.

Als Ergebnis ist im Rahmen des EP3 nun ein Katalog erprobter Erhaltungsmaßnahmen (M) erstellt worden, auf den nachfolgend eingegangen wird.

10.2 Katalog erprobter Erhaltungsmaßnahmen

10.2.1 Systematisierung und Aufbau Katalog Erhaltungsmaßnahmen

EP3 hat die Erhaltungsmaßnahmen in der folgenden Gliederungsstruktur erfasst und entsprechend mit einer 4-stelligen Dezimalzahl nummeriert.

- └ Bauwerksteil-Ebene
 - └ Massnahmenart/Erhaltungsaufwand
 - └ Erhaltungsmaßnahme
 - └ Massnahmentyp (Massnahmenausdehnung und -umfang)

Erhaltungsmaßnahmen unterscheiden sich wesentlich bezüglich ihrer Teilleistungen an welchem Bauwerksteil sie umgesetzt werden, sowie bezüglich ihres Erhaltungsaufwandes. Aus diesem Grund geht die Systematisierung der Erhaltungsmaßnahmen für bergmännische Strassentunnel vom Bauwerksteil und von der Massnahmenart/ Erhaltungsaufwand aus.

Die Gliederung der Bauwerksteile erfolgt gemäss Abbildung 4, Seite 55. Der werterhaltende Erhaltungsaufwand setzt sich in Anlehnung an [8] aus den Komponenten betrieblicher (Reinigung, Wartung, Instandhaltung, Kleinreparatur) und baulicher Unterhalt (Reparaturen, Schutz gegen Eindringen von Stoffen, Abdichtung von Bauwerksteilen, Instandsetzung, Ersatz) zusammen.

Die dritte Gliederungsstufe umfasst die Erhaltungsmaßnahme und die vierte den Massnahmentyp. Letztere gibt einen Hinweis auf die Massnahmenausdehnung /-umfang einer Erhaltungsmaßnahme (siehe nachfolgende Tabelle 6).

Insgesamt wurden 55 Erhaltungsmaßnahmen zusammengestellt. Dabei wurde sichergestellt, dass jeder Schadensprozess durch mindestens eine geeignete Massnahme abgedeckt wird. In Anhang XI ist der Massnahmenkatalog aufgelistet. Dieser basiert auf

den einzelnen Erhaltungsmassnahmen, die unter Berücksichtigung des Erhaltungsaufwands bzw. der Massnahmenart auf die Bauwerksteil-Ebenen (grau hinterlegt und mit fetter Schrift hervorgehoben) verteilt wurden.

Massnahmengliederung, Massnahmentyp			
Massnahmen-Nr.	M.-Typ	Kurzbeschreibung	Umfang (pro Tunnelblock) semi-quantitativ
xxx1	2 / 3.1	Lokale / punktuelle Instandsetzung (kleine lokale Massnahme)	wenige m ² («1-2 m ² »)
xxx2	3.2	Instandsetzung in Teilflächen / örtlich systematisch (mittlere Massnahme)	viele m ² («10-20 m ² »)
xxx3	3.3	Systematische / grossflächige Instandsetzung / Teilersatz (grosse Massnahme)	ganzer Tunnelblock
xxx4	3.4	Ersatz (1:1)	viele m ² («10-20 m ² »)
xxx5	3.5	Ersatz (1:1)	ganzer Tunnelblock

Tabelle 6: Massnahmengliederung, Massnahmentyp

10.2.2 Vollständigkeit des Katalogs Erhaltungsmassnahmen

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden nur werterhaltende Massnahmen berücksichtigt. Nicht enthalten sind wertvermehrnde Veränderungen, welche auf Umgestaltungsmassnahmen aufgrund von Nutzungserweiterungen oder Normanpassungen zurückzuführen sind.

Für den Massnahmenkatalog werden ausschliesslich bekannte und erprobte Erhaltungsmassnahmen für die bauliche Instandsetzung von bergmännischen Strassentunneln erfasst. Erhaltungsmassnahmen an nachfolgend aufgeführten Elementen werden nicht berücksichtigt:

- Betriebs- und Sicherheitsausrüstung, inkl. deren Montageelemente;
- Tagbautunnel;
- Nebenbauwerke (Zentralenbauwerke, Kamine und Schächte, Querverbindungen) ;
- (ersatzloser) Rückbau.

In Bezug auf das Tunnelgewölbe werden nur Erhaltungsmassnahmen am Betongewölbe betrachtet, d.h. ohne Mauerwerksgewölbe. Dies begründet sich damit, dass der grösste Teil der Strassentunnel nicht älter als 50 Jahre ist. Die ASTRA-Strassentunnel sind bezüglich Bauart und Ausbaustandard deutlich homogener als bspw. Bahntunnel und von Anfang an als «Hochleistungs-Strassentunnel» konzipiert worden. ASTRA-Strassentunnel mit einem Mauerwerksgewölbe oder anderen Baumaterialien für das Gewölbe sind nahezu nicht vorhanden.

Die Erhaltungsmassnahmen wurden aus der Praxiserfahrung von mehr als 40 Jahre Betrieb von Strassentunnel gewonnen. Insbesondere wurden die Instandsetzungsmassnahmen aus den neun Fallbeispielen Kap. 0 (wovon fünf seit mehr als 40 Jahre in Betrieb sind) analysiert und standardisiert. Des Weiteren wurden Massnahmen aus der Literaturrecherche insbesondere aus [31] ausgewertet. Aus der Norm SIA 269/2 (2011) – Erhaltung von Tragwerken – Betonbau [18] wurden Grundprinzipien und zugeordnete Verfahren für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken

analysiert und standardisiert. Als weitere Vollständigkeitsprüfung wurden die identifizierten Massnahmen dem bestehenden Fachkatalog Erhaltungsmassnahmen am kostenrelevanten Infrastrukturobjekt aus KUBA [12] gegenübergestellt.

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

10.2.3 Information zu Erhaltungsmassnahmen

Die standardisierten Erhaltungsmassnahmen liegen sowohl als übersichtliches Katalogblatt als auch als datenbankkompatibel strukturierte EXCEL-Tabelle vor, welche alle im Pflichtenheft geforderten Informationen systematisch aufführen.

Der M.-Katalog umfasst folgende Informationsbereiche:

- Strukturierung Massnahmen (M);
- Zuordnung Eignung für Bauwerkgliederung (BWT x BA) / Schadensprozess (S) und Strassentunneltyp
- Beschreibung und Zuordnung Massnahme (Massnahmen-Art / Massnahmen-Typ und bauliche Abhängigkeit zu anderen Massnahmen)
- Beschreibung zu Massnahmenziel und Wirkungsweise
- Hinweise zu Risiken (Chancen und Gefahren) sowie Effektivität und Langzeitverhalten der Massnahme
- Attribute für Ausführungsaufwand und Kostenermittlung;
- Verweise auf Fallbeispiele.

Neben der Verknüpfung zu Bauteilarten (für die die Massnahme grundsätzlich geeignet ist) und zu Schadensprozessen (für welche sie nachweislich wirksam ist), enthalten die Katalogeinträge diverse weitere Informationen.

Jede Massnahme wird in Kurzform beschrieben. Dazu gehört auch die Beschreibung des Massnahmenziels und deren Wirkungsweise. Die bauliche Abhängigkeit einzelner Erhaltungsmassnahmen zu anderen Massnahmen sofern vorhanden werden ebenfalls genannt. Bspw. erfordert der Ersatz der Binderschicht auch den Ersatz des Deckbelags. Weitere Informationen dienen der Beurteilung in Bezug auf Wirksamkeit und Effizienz zur Unterbindung oder Verlangsamung von Schadensprozessen auch unter Berücksichtigung auf deren Langzeitverhalten (z.B. Restnutzungsdauer und Zustand des instandgesetzten Bauelements, Auswirkung auf Nutzer). Diesbezüglich werden zu jeder Massnahme Chancen und Gefahren bezüglich ihrer gewünschten Wirkungsweise aufgelistet, so dass die Risiken in Bezug auf Massnahmenziel beurteilt werden können. Auf die Einschätzung der Wirksamkeit, Effektivität und des Langzeitverhalten wird im nachfolgenden Kapitel näher eingegangen.

Bei Erhaltungsentscheiden spielt neben der Wirksamkeit i.d.R. auch der Zeit- und Kostenaufwand eine massgebende Rolle. Eine wichtige Information sind daher Angaben zu den Kostentreibern (Personalbedarf, Dauer der Ausführung, Material- und Gerätekosten, spezifischer Installationsgrad, Zugänglichkeit), die in Abstimmung mit dem Einzelprojekt EP5 als strukturierte und systematisierte Inputdaten im «Kosten-

modell» (EP5) Verwendung finden. Als Beispiel, wie diese Informationen in den Katalogen bereitgestellt werden, ist nachfolgend ein entsprechender Ausschnitt in Abbildung 8 abgebildet.

Tab. 3 Katalogblatt 3: *Erhaltungsmassnahme: Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz*

ID-M-Code:	M-1220
	M-2220
	M-2310
	M-3210
	M-3310
	M-4210

Attribute für Kostenermittlung:

• Personal (MA):	2 (4 für M-2310)		
• Dauer (Stunden pro GrE) ⁶ :	0.283 (0.567 für M-2310)		
• Grundeinheit (GrE):	m ²		
	ID-M-Code: M-1220	M-2220 M-2310	M-3210 M-3310 M-4210
• lokale / punktuelle Instandsetzung:	5 m ² ▶ 1.42 h	2 m ² ▶ 0.57 h (1.13 h für M-2310)	5 m ² ▶ 1.42 h
• Instandsetzung in Teilflächen / örtlich systematisch:	25 m ² ▶ 7.08 h	5 m ² ▶ 1.42 h (2.83 h für M-2310)	10 m ² ▶ 2.83 h
• systematische / grossflächige Instandsetzung / Teilersatz:	50 m ² ▶ 14.17 h	20 m ² ▶ 5.67 h (11.33 h für M-2310)	20 m ² ▶ 5.67 h

Qualitative Angaben zum theoretischen Ausführungsaufwand⁷:

ID-M-Code:	Material	Maschinen und Geräte	Baulogistik / Zugang	Installationsgrad	temp. Verkehrsführung und Betrieb
M-1220	1.50	1.10	1.00	1.05	1-Spur-Sperrung
M-2220	1.50	1.10	1.20	1.05	unter Betrieb
M-2310	1.50	1.10	1.00	1.05	Röhren-Sperrung
M-3210	1.50	1.10	1.20	1.05	Röhren-Sperrung
M-3310	1.50	1.10	1.20	1.05	Röhren-Sperrung
M-4210	1.50	1.10	1.20	1.05	unter Betrieb

Abbildung 8: Beispielhafter Auszug aus Katalogblatt 3 mit Angaben zu Kostenelementen der Erhaltungsmassnahme «Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz»

10.2.4 Einschätzung der Wirkungsweise, Effektivität und Langzeitverhalten

Ein wichtiger Beitrag aus den Katalogen bilden Informationen zur Wirksamkeit und Effektivität der Massnahme und deren Langzeitverhalten, weil sie wichtige Grundlagen für den Vergleich von Erhaltungsmassnahmen und damit letztendlich von Erhaltungsentscheiden bilden. Es geht darum, mit welchen Massnahmenvarianten kann das Risiko hinsichtlich der Trag- und Betriebssicherheit kurz- und langfristig mit verhältnismässigem Aufwand zuverlässig reduziert werden.

Die Massnahmenart impliziert in qualitativer Hinsicht die übergeordnete Wirkungsweise der Massnahme. Die Überlegungen und die Auswahl der Erhaltungsmassnah-

men im Rahmen des EP2 stützen sich auf die SIA 269 Ziff. 7.2.1.1 [32], die folgenden Ziele bzw. Wirkungsweisen unterscheidet:

- Ursachen beseitigen: (Verantwortung des Betreibers, nicht Teil von EP3);
- Schädigungsmechanismen verlangsamen oder unterbinden;
- Schädigungen beheben;
- Bauwerksteile schützen.

Folgendes kann in Bezug auf die Wirkungsweise, den Zustand und die Restnutzungsdauer einer Massnahme festgehalten werden.

Die Wirkungsweise einer Erhaltungsmassnahme kann anhand der Zustands- und Alterungsentwicklungskurve (siehe Abbildung 9) erklärt werden.

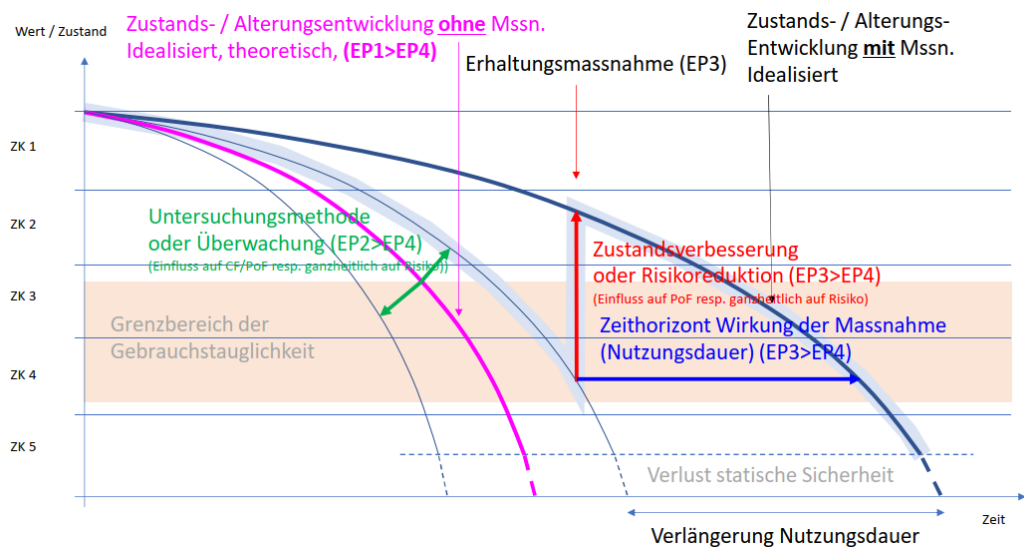


Abbildung 9: Idealisierte, theoretische Zustand- und Alterungsentwicklungskurve ohne/mit Massnahmen

Die Massnahme x führt zu einer Verzögerung der Alterung resp. Schadensentwicklung (präventive Massnahme = Langzeitverhalten, blauer horizontaler Pfeil), einer Zustandsverbesserung (korrektive Massnahme = Sofortwirkung, roter vertikaler Pfeil) oder einer Kombination dieser Wirkungen. Beide Wirkungsweisen führen insgesamt zur Erfüllung der Anforderung, die Restnutzungsdauer zu erhöhen oder zumindest zu erhalten / sicherzustellen. Mit der (Neben)Wirkung «Wissensgewinn des Zustandes» mit Hilfe von Untersuchungsmethoden kann eine verbesserte Aussage über die noch verbleibende Restnutzungsdauer (ohne Massnahmen) gemacht werden und der Zeitpunkt von Erhaltungsmassnahmen optimiert werden (grüner Pfeil).

Unter Berücksichtigung der oben genannten Überlegungen wurden die folgenden Attribute zur Wirkungsweise und Effektivität der Erhaltungsmassnahmen definiert (siehe Abbildung 10, Spalten aus dem Massnahmenkatalog).

Neben textlichen Hinweisen zu Massnahmenziel und Wirkungsweise werden in Abhängigkeit zur Massnahmenart eine Zustandsverbesserung durch die Veränderung der Zustandsklasse (sofortwirkend) oder die Verlängerung der (Rest)Nutzungsdauer um eine bestimmte Anzahl Jahre als Attribut vorgeschlagen. Im Schlussbericht zu EP3

wird darauf detailliert eingegangen. Diese Angaben können bei Erhaltungsentscheiden für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit verwendet werden.

Massnahmenziel und Wirkungsweise	Effektivität und Langzeitverhalten							
	Sofortwirkung auf <u>PoF</u>				Langzeitwirkung auf <u>PoF</u>			
Hinweise für die Beurteilung	Zustand Verbesserung bezogen auf Bauwerksteil				Zeithorizont Verlängerung (Rest-) Nutzungsdauer bezogen auf Bauwerksteil			
Hinweise auf die Verhaltensverbesserung	Keine	[klein]	[mittel]	[gross]	Keine	[klein]	[mittel]	[gross]
Sprachlich / verbal	Veränderung Zustandsklasse ZK				Jahre			
	± 0	-1	-2	zu 1	± 0	+5	+15	≥25

Abbildung 10: Attribute zur Wirkungsweise / Effektivität zu Handen Entscheidungsmodellen (Legende: PoF = Eintretenswahrscheinlichkeit), aus [5]

10.3 Anwendung sowie Aussagekraft und Grenzen bei Erhaltungsmassnahmen

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens EP3 bauen weitgehend auf bekannten Planungsinstrumenten und -begrifflichkeiten auf. Die Gliederungsstruktur der Massnahmen baut auf den Bauwerksteilen (Gewölbe, Sohle, Werkleitungskanal usw.) auf. Konkret werden Massnahmen immer an Bauwerksteilen umgesetzt, ungeachtet der Ursachen, Materialisierung, ihres Ausführungsaufwandes und Kosten. Im Rahmen der Inspektionen werden ebenfalls die Befunde als auch die Massnahmenempfehlungen des Inspektors nach den Bauwerksteilen gegliedert und erfasst.

Der erarbeitete Katalog liefert detaillierte Informationen zu den für bergmännische Strassentunnel seit 40 Jahren erprobten Erhaltungsmassnahmen. Über die übergeordnete Strukturierung der Bauwerksteile und Bauarten bzw. Bauteilarten sind die Erhaltungsmassnahmen auch mit den anderen EP's verknüpft.

Aufgrund der einheitlichen Gliederung der Informationen lassen sich Erhaltungsmassnahmen nach bestimmten Kriterien (wie Bauwerksteilen, Bauteilarten und Schadensprozessen etc.) filtern, um sie spezifisch anzuzeigen und auszuwählen.

Der Massnahmenkatalog ist mit einer logischen Gliederungsstruktur aufgebaut. Jeder Eintrag im Katalog ist durch eine eindeutige ID gekennzeichnet, über die eine Verbindung zu den anderen Katalogen hergestellt wird.

Daher ist die Integration des erstellten Massnahmenkatalogs sowie der anderen Kataloge in bestehende und zukünftige Datenbanken gewährleistet.

Die Ausarbeitung des Massnahmenkatalogs erfolgte in mehreren Schritten, einschliesslich der Zusammenstellung der Erhaltungsmassnahmen und der Plausibilisierung der Attribute für das Kosten- und Risikomodell des EP5 und EP4. Die Schritte trugen massgeblich zur Vervollständigung und Verbesserung der Daten und deren Aussagekraft im Katalog bei und dienten daher auch auf verschiedenen Ebenen zur Überprüfung der Zuverlässigkeit der Angaben:

- Erstellung der grundlegenden Strukturierung des M.-Katalogs, einschliesslich aller erforderlichen Attribute pro Erhaltungsmassnahme und der Verknüpfung mit dem Grundlagenkatalog des EP1;
- Auswertung der Fallbeispiele bezüglich der Erhaltungsmassnahmen und der daraus gewonnenen Ergebnisse für die Massnahmenplanung, u.a. zur Kontrolle, wie diese Informationen im Katalog abgebildet werden können;
- Abgleich und Aufnahme bisheriger Daten aus den Fachdatenkatalogen von KUBA zu Erhaltungsmassnahmentypen am kostenrelevanten Infrastrukturobjekt und deren vollständige Integration in die Struktur des Massnahmenkatalogs;
- Verifikation, dass sämtliche bekannten Schadensprozesse durch die aufgeführten Erhaltungsmassnahmen abgedeckt werden können;
- Spiegeln der erfassten Erhaltungsmassnahmen mit Angaben aus früheren und aktuellen Normen, Richtlinien und Publikationen.

Beim zuletzt genannten Schritt wurde der vorliegende Massnahmenkatalog u.a. anhand der Norm SIA 269/2 [18] und der darin beschriebenen Grundprinzipien und zugeordneten Verfahren für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken kontrolliert.

Aus Sicht der Autoren des Syntheseberichtes bilden die Kataloge eine transparente und praktikable Grundlage, um zu Handen der Projektgenerierung Massnahmenvarianten miteinander zu vergleichen und bevorzugte Handlungsoptionen zu evaluieren. Hingegen können diese Kataloge die Massnahmenplanung nicht ersetzen.

11 Entwicklung eines Kostenmodells

11.1 Einleitung

Im Einzelprojekt EP5 ist ein Kostenmodell entwickelt worden, welches relevante und zuverlässige Kostengrundlagen für Erhaltungsentscheide auf Stufe Projektgenerierung inkl. Wahl der Handlungsoption liefert.

- Als Resultat wurde ein einfaches Exceltool zur systematisierten Kostenermittlung Bottom up (Bottom-Up-Methode) von objektspezifischen Massnahmenvarianten entwickelt.
- Zur Verifikation des Kostenmodells wurde ein Top-Down-Ansatz vorgeschlagen, welcher ausgehend von den Nachkalkulationskosten ausgeführter Bauwerke vergleichbare Kosten ermittelt.

11.2 Vorgeschlagenes Kostenmodell (Bottom-Up-Ansatz)

Es wurde ein Kostenmodell entwickelt, welches die objektspezifischen Gesamtkosten von Erhaltungsmassnahmen transparent und systematisch liefert. Die Gesamtkosten setzen sich aus den Kosten für die Realisierung inklusive der notwendigen Massnahmen zur Aufrechterhaltung des Betriebes, sowie die Kosten aus der Projektierung für alle Projektphasen und alle Dienstleistungen zusammen. Diese Kosten werden den Betreiberkosten zugewiesen.

Nicht berücksichtigt sind die Strassennutzerkosten und die Kosten Dritter (Umwelt und Unfallkosten) gemäss Norm VSS SN 640 907 [33], welche die volkswirtschaftlichen Kosten monetarisieren, die aus diesen Erhaltungsmassnahmen entstehen. Dazu werden Kosten-Nutzen-Betrachtungen angestellt, welche in aller Regel abschnitts- bzw. netzbezogen angestellt, das heisst, über einen Projektperimeter, welcher eine Vielzahl von instandsetzungswürdigen Objekten umfasst. Zudem bedarf die erwähnte Kosten-Nutzen-Analyse Daten und Informationen, die von Verkehrsspezialisten konkret für einen Abschnitt ermittelt und ausgewertet werden müssen. Die Analyse der Auswirkungen auf den Verkehr und die Umwelt erfolgt gemäss der Normenreihe VSS SN 641 820 [34] bis 641 828 [35]. Da sich das Kostenmodell im Rahmen dieses Forschungsprojekts auf ein Tunnelobjekt beziehen soll, fliessen hier keine Kennzahlen zu Strassennutzerkosten SK und Drittkosten DK ein⁴.

⁴ Ergänzend zum eigentlichen Forschungsauftrag hat das EP5 mit Vergleichsszenarien analysiert, welche der insgesamt sieben Kostenelemente SK und DK einen massgebenden Einfluss auf die Gesamtkosten einer Massnahmenvariante haben und welche weiteren Daten (bspw. Besetzungsgrad der Fahrzeuge, Bauzeitfenster) zur Quantifizierung von SK und DK notwendig sind. EP5 kommt zum Schluss, dass die Zeitkosten in allen Fällen das massgebliche Kostenelement sind. In Fällen mit sehr hohem Bauumsatz (leistungs- bzw. kostenintensive Baumassnahmen) erhalten die Luftverschmutzungskosten aufgrund ihrer prozentualen Abhängigkeit zu den Baukosten (6.7%) einen relevanten Anteil. In Fällen ohne Ableitung des Verkehrs auf das untergeordnete Strassennetz ergeben die vier Kostenelemente interne und externe Unfallkosten, Lärmkosten und Klimakosten keinen Beitrag an SK/DK. Zudem kommt EP5 auf Basis eines Vergleichs mit Inputdaten «gemittelter Stundenwert

Das Kostenmodell basiert auf einer Excel-Lösung und ist in mehrere Tabellenblätter gegliedert. Ausgehend von einem konkreten Instandsetzungsvorhaben mit einer oder mehreren kombinierten Massnahmenvarianten werden die Gesamtkosten mit einer «Bottom-Up-Methode» kalkuliert. Bottom-Up in dem Sinne, dass ausgehend von definierten Einzelmassnahmen und der dazugehörigen Aufwandschätzung die Gesamtkosten für alle Massnahmen und das Gesamtobjekt schrittweise ermittelt werden. Die Methode lehnt sich dabei an die Unternehmerkalkulation gemäss Kalkulationsschema des SBV [36] an.

Nachfolgend wird die Anwendung des Kostentools zusammenfassend erläutert. Detaillierte Angaben zur Anwendung des Tools und zur Plausibilisierung der darin verwendeten Faktoren und Kostenbeiträge können dem Schlussbericht zu EP5 entnommen werden. Unter anderem liegt auch eine Bedienungsanleitung zum Kostentool bei.

Als Input zum Kostentool dienen kostenrelevante Kennzahlen für Einzelmassnahmen (siehe Abbildung 11 unten und Abbildung 8, Seite 78), welche in den Katalogen des Einzelprojekt EP3 «Erhaltungsmassnahmen» zur Verfügung gestellt werden und welche sich auf massnahmenpezifische Grundeinheiten (m1, m2, m3 sowie Stk.) beziehen.

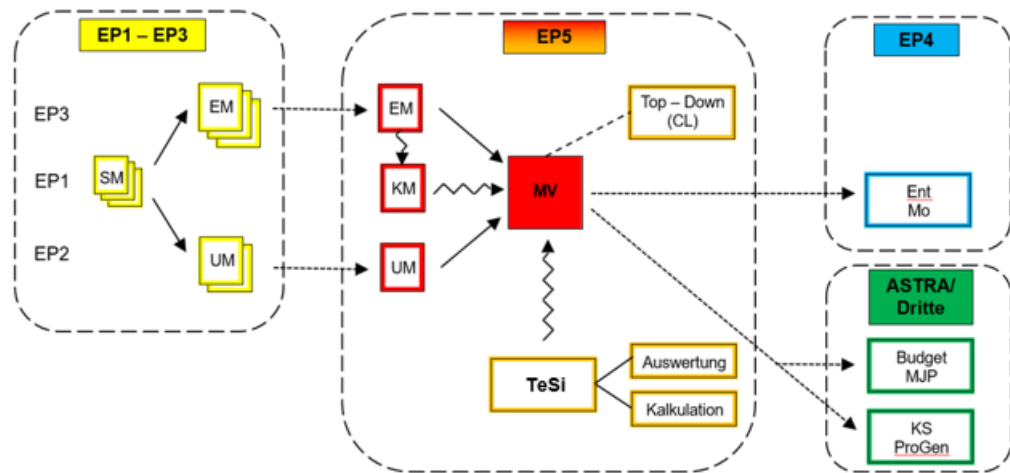
Damit die Kosten von Einzelmassnahmen zu Massnahmenvarianten zusammengeführt werden können, bedarf es einer Umrechnung der Einzelmassnahmen in eine einheitliche Einheit, für welche EP5 die Einheit Tunnellaufmeter (m1) («Tunnellänge in Achsrichtung») vorschlägt.

Das Tabellenblatt «Massnahmenvariante» ist für den Anwender das eigentliche Arbeitsdokument. Entsprechend den Zielsetzungen und Bedürfnissen eines konkreten Instandsetzungsvorhabens definiert der Anwender eine oder mehrere Massnahmenvariante(n), welche sich aus spezifischen Einzelmassnahmen zusammensetzen. Diese Massnahmen kann der Anwender den mit EP3 und EP2 abgestimmten und vorerfassten Tabellenblättern «Einzelmassnahme und Untersuchungsmethode» entnehmen.

Ergeben sich durch die getroffene Auswahl von Einzelmassnahmen bzw. durch deren gleichzeitige Ausführung eine Kosteneinsparung im Vergleich zu unabhängig voneinander ausgeführten Einzelrealisierungen, so wird diese Einsparung automatisch im Tabellenblatt «Massnahmenvariante» eingerechnet. Als Beispiel mit einer relevanten Kosteneinsparung ist der Ersatz der Löschwasserleitung in Kombination mit dem Ersatzkabelrohrblock / Banketersatz zu nennen.

Im Weiteren sind durch den Anwender die verkehrlichen und betrieblichen Randbedingungen sowie die projekt- und objektspezifischen Gegebenheiten festzulegen. Dazu gehören bspw. die Länge des Tunnels oder ob die Arbeiten zu Nacht- oder Wochenendarbeiten führen. Die daraus resultierenden Kosten werden automatisch generiert, sodass die Totalkosten je definierte Massnahmenvariante ausgewiesen sind.

aus DTV» sowie aus der Betrachtung des Verkehrsaufkommens über eine Tagesganglinie zum Schluss, dass bei der Betrachtung über Tagesganglinie gegenüber der Betrachtung mit DTV der Faktor Stau wesentlich akzentuiertere Kosten SK/DK zur Folge hat.

Legende:

EM:	(Ebene) Einzelmassnahme
KM:	(Ebene) Kombimassnahme
UM:	(Ebene) Untersuchungsmethode
MV:	(Ebene) Massnahmenvarianten
TeSi:	Temporäre Signalisation
CL:	Checkliste
SM:	Schadenmechanismus
Ent Mo:	Entscheidungsmodell
MJP:	Mehrjahresplanung
KS:	Kostenschätzung
ProGen:	Projektgenerierung

Aktivität Anwender EP5 - Kostenmodell

→	aktive Tätigkeit
- - - -	Hilfsdokument
~ ~ ~ ~	automatisierte Verlinkungen
- - - -	Input- /Output - Daten

Abbildung 11: Schematische Darstellung des Kostenmodells und die Verknüpfung mit den anderen Einzelprojekten

Damit bildet dieses Tool ein einfaches und praktikables Instrument, um die Kostenwirkungen verschiedener Instandsetzungsoptionen bzw. Handlungsoptionen systematisch, einheitlich und nachvollziehbar zu untersuchen. Die Bottom-up-Methode auf Basis der Unternehmerkalkulation gewährleistet, dass allgemein gültige Kosten zu Verfügung stehen, die nicht projekt- und marktspezifischen Randbedingungen oder spezifischen Angebotsstrategien von Anbietern unterliegen bzw. durch die Organisationsform des ausführenden Konsortiums (Subunternehmer, Lieferanten) beeinflusst sind. Sie sind zudem sehr transparent und nachvollziehbar und decken Basiskosten ab, d.h. Risikokosten (als Folge von Gefahren und Chancen während des Baus) sind darin nicht berücksichtigt.

11.3 Verifizierung Kostenkennwerte (Top-Down-Ansatz)

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde das Kostenmodell für 27 Einzelmassnahmen, fünf Kombimassnahmen und 4 Untersuchungsmethoden erstellt. Damit ist bereits ein beträchtlicher Anteil der üblicherweise vorkommenden Instandsetzungsmassnahmen abgedeckt. Es wird angeregt, mittels periodischer Aktualisierungen entweder weitere Massnahmen zu ergänzen oder die bestehenden Kostenangaben mittels ausgeführter Projekte auf die Ebene K2 (projekt- und objektneutrale Ebene) rückgerechneter Kosten zu verfeinern (Abbildung 12).

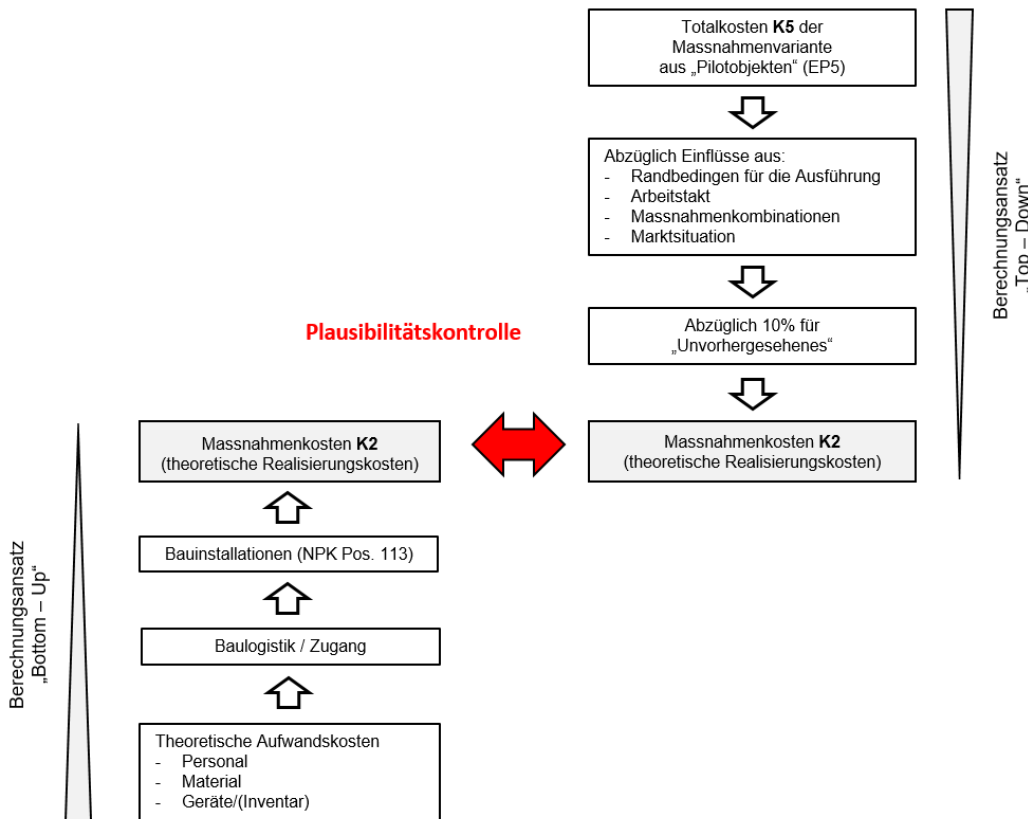


Abbildung 12: Ermittlung Kosten auf Kostenebene K2 mittels Bottom-Up- und Top-Down-Ansatz

Zur Sicherstellung einer für den Verwendungszweck dieses Kostentools ausreichenden Kostenzuverlässigkeit wurden auch Kostenkennwerte aus ausgeführten Projekten sowie eigene Unternehmerkalkulationen für ausgewählte Einzelmassnahmen herangezogen.

Ergänzend zum Kostenmodell hat das Einzelprojekt EP5 einen weiteren Ansatz ermittelt, wie aus Kosten ausgeführter Projekte systematisch vergleichbare Kosten ermittelt werden können (Top-Down-Ansatz). Dazu sind ausgehend von der Schlussrechnung die Bauobjekt spezifischen Eigenheiten (z.B. Marktsituation, ausserordentliche Projektumstände etc.) herauszurechnen, um die Kosten auf das gleiche Kostenniveau K2 zu bringen (vgl. Abbildung 12). Wie das im Detail erfolgen kann, kann im Schlussbericht EP5 der entsprechenden Checkliste (Anhang I.2 von [5]) entnommen werden.

11.4 Anwendung sowie Aussagekraft und Grenzen

Beim Aufbau des Kostentools wurde grosser Wert auf Praktikabilität und Einfachheit gelegt, sodass der Anwender keine vertieften Spezialkenntnisse haben muss und künftige Erweiterungen des Kostentools keiner allzu umfangreichen Einarbeitung bedürfen. In allen Sheets sind jeweils am Ende der Tabellen Bemerkungen mit Erläuterungen und spezifischen Ergänzungen aufgeführt. Dies dient der Gewährleistung eines einheitlichen Verständnisses von Hintergrund und Inhalt der jeweiligen Angabe, als

Voraussetzung für eine konsistente Weiterführung des Kostenmodells und eine sinn-gemässe Verwendung der Kostenangaben. Zur Erläuterung wird für den Anwender eine «Bedienungsanleitung Kostentool» (bzw. Anwendungsbeispiel) zur Verfügung gestellt.

Wird in einem späteren Zeitpunkt das Kostenmodell mit weiteren Massnahmen ergänzt, so gewährleistet beim Bottom-Up-Verfahren die Struktur bzw. der Aufbau der Sheets Einzelmassnahmen und Untersuchungsmethoden eine einheitliche und konsequente Erfassung der Kosten bis hin zur Kostenebene K2. Plausibilisierungsbetrachtungen mittels bestehenden Kenngrössen und in spezifischen Fällen mittels Beizug eines Unternehmers zur Verifikation der eigenen Kalkulation werden empfohlen.

Im Zuge von weiteren Schritten kann das Kostentool erweitert und mit weiteren Rückrechnungen aus ausgeführten Projekten ergänzt werden, was die Kostenzuverlässigkeit weiter erhöht. Allerdings bemerken die Autoren, dass mittels statistischer Analysen kaum je tiefergreifendere Erkenntnisse erhalten werden können, da die Auswirkung der Varianz an projektspezifischen Randbedingungen auf die Kosten von Einzel-massnahmen im Vergleich zu der Anzahl der Projekte hoch ist.

Eine konkrete Aussage betreffend Kostengenauigkeit des Kostenmodells erachten die Autoren im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht als opportun. Sie schätzen, dass die Genauigkeit einer grösseren Bandbreite unterliegt als die für die Phase «Projektgenerierung» i.d.R. angestrebte Kostengenauigkeit von ca. $\pm 30\%$.

Trotz dieser grossen Bandbreite ermöglicht das Kostentool die einfache und nachvoll-ziehbare Berechnung der Kosten verschiedener Massnahmenvarianten (bzw. Handlungsoptionen), welche zuverlässige Kostenvergleiche als Grundlage von Erhaltungsentscheiden ermöglichen. Dank der durchgängigen Strukturierung des Kostenmodells mit den Erhaltungsmassnahmen aus EP3 ist es zudem durchgängig mit dem gesamten Erhaltungsprozess verknüpft.

12 Entscheidungsfindung

12.1 Einleitung

Im Einzelprojekt EP4 sollte ein praxistaugliches Entscheidungsmodell unter Berücksichtigung der Eigenschaften von Bauwerk und Gebirge sowie deren Zustand und Entwicklung erarbeitet werden. Es liefert Modelle zur Erarbeitung von objektbezogenen Entscheidungsoptionen für kurz-, mittel- und langfristige Erhaltungsmassnahmen für bergmännische Strassentunnel unter Berücksichtigung ihrer langfristigen Auswirkungen und Kosten.

Für visuell einfach verfolgbare Schäden kann grundsätzlich auf die «klassische» Erhaltungsplanung verwiesen werden, wie sie bei den Kunstbauten Standard ist (z.B. KUBA-MS). Auf der Grundlage der Befunde und der Schadensgruppen zusammen mit der bekannten Bewertung der Schadensschwere nach Zustandsklassen 1-5 können standardisierte Massnahmen vorgeschlagen werden.

Für nicht einfach bzw. visuell verfolgbare Schäden, wie sie für Tunnel charakteristisch sind, sollten dafür auf Empfehlung des Initialprojekts [1] geeignete Bewertungsmethoden unter anderem basierend auf Risikobetrachtungen evaluiert und entwickelt werden.

Aus Sicht der Begleitkommission und der Gesamtprojektleitung erwiesen sich die Vorschläge des Einzelprojekts EP4 für ein solches Entscheidungsmodell noch nicht als ausreichend nachvollziehbar und praxistauglich, um publiziert zu werden.

Nachfolgend legen die Autoren des Syntheseberichts die heutige Praxis der Bewertung und Entscheidungsfindung (in Anlehnung an die Astra Richtlinien) dar und analysieren, inwiefern diese die formulierten Ziele dieser Forschungsarbeit an Entscheidungsmodelle bereits erfüllen und wo Lücken existieren.

Die Autoren zeigen mögliche Ansätze zur Systematisierung und Standardisierung auf, die einen Beitrag für verbesserte Erhaltungsentscheide leisten könnten. Das angestrebte Entscheidungsmodell gemäss EP4 wird damit aber nicht abgedeckt.

12.2 Aktuelles Vorgehen Zustandsbeurteilung und Entscheidungsfindung im operativen Erhaltungsmanagement

In der derzeitigen Erhaltungspraxis für Strassentunnel des ASTRA werden auf der Grundlage von Befunden und Schadensgruppen zusammen mit der bekannten Bewertung der Schadensschwere nach Zustandsklassen 1-5 standardisierte Massnahmen vorgeschlagen. Eine wichtige Grundlage dazu bildet die Prognose der Zustandsentwicklung. Auf der Basis dieser Massnahmenempfehlung entscheidet der Werkeigentümer über das weitere Vorgehen (z.B. Projektgenerierung, Akzeptieren des Zustands).

Die Zustandsbeurteilung bewertet den Zustand des gesamten Bauwerks oder von einzelnen Bauwerksteilen bezüglich Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit (Ziff. 6.3.1.1 Grundlagennorm SIA 269 [32])⁵.

Die Bewertung in Zustandsnoten erfolgt subjektiv nach der Einschätzung des Bewertenden. Weder die Tragsicherheit, die Gebrauchstauglichkeit noch die Dauerhaftigkeit werden dabei explizit bewertet, sondern rein die Schadensschwere. Diese Subjektivität und die damit einhergehende fehlende Reproduzierbarkeit steht dem Ziel, standardisierter und systematisierter Erhaltungsentscheide im Wege. Sie erschwert auch den Vergleich verschiedener Tunnelobjekte untereinander oder die Verfolgung der Zustandsentwicklung über mehrere Jahre. Letztendlich erschwert dies auch die Nachvollziehbarkeit und Transparenz von Entscheidungsentscheiden.

12.2.1 Übergeordnete Zielvorgabe

Mit der vorgegebenen Bewertung des Zustands mit Zustandsnoten steht zwar eine Methode zur Verfügung, die auf alle Tunnelobjekte unabhängig von der Art der Schäden und der Rahmenbedingungen gleichermassen angewendet werden kann, hingegen gibt es keine klare Vorgabe, welcher Zustand noch akzeptiert werden kann und weshalb.

In den Netzzustandsberichten formuliert das ASTRA das übergeordnete Ziel in Bezug auf die Erhaltung von allen Tunnelbauwerken des Nationalstrassennetzes wie folgt (siehe auch Kapitel 1.1 und Abbildung 1):

- Mittlere Zustandsnote aller Tunnel: ≤ 1.90
- Keine Tunnel mit Zustandsnote 5 (alarmierend)

Davon abgeleitet könnten übergeordnete Zielvorgaben von operativen Erhaltungsentscheiden bei Tunnel formuliert werden, welche auf alle Strassentunnel gleichermassen angewendet werden können und das übergeordnete Ziel des Werkeigentümers ASTRA stützt.

Vorschlag 1: Formulierung folgender übergeordneter Zielvorgabe für Projektgenerierungsentscheide von Strassentunnel:

- Ein Tunnelobjekt soll dauerhaft in gutem (ZK1) bzw. annehmbaren Zustand (ZK2) bleiben und ein alarmierender Zustand (Zustandsnote 5) muss umgehend behoben werden.
- Diese Bewertung soll den Zustand hauptsächlich in Bezug auf den Erfüllungsgrad der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit (d.h. auch in Bezug auf Funktionalität bzw. Verfügbarkeit) repräsentieren.
- Erhaltungsmaßnahmen sind dann zu ergreifen und so auszulegen, dass der Zustand über eine vorgegebene Restnutzungsdauer den Zustand ZK1 oder ZK2 gewährleisten.
- Bevorzugt sind solche Massnahmen zu wählen, welche eine hohe Kostenwirksamkeit haben und die langfristige Verfügbarkeit möglichst wenig einschränken.

⁵ EP1 schlägt vor, die Tragsicherheit und die Betriebssicherheit zu prüfen (siehe Kap. 8.3.1). Die Gebrauchstauglichkeit bildet Bestandteil der Betriebssicherheit, hingegen wird die Dauerhaftigkeit als Prüfkriterium nicht erwähnt.

- Das ist eine Optimierungsaufgabe, weshalb Erhaltungsentscheide i.d.R. auf Basis von Massnahmenvarianten gefällt werden sollen.
- Voraussetzung für Erhaltungsentscheide ist die Kenntnis des aktuellen Zustandes und der zuverlässigen Prognose der Zustandsentwicklung auf Bauwerksteilebene für jedes Tunnelobjekt.

12.2.2 Handlungsvorgaben für Projektgenerierung

Ausgehend von einer solchen Zielvorgabe könnten übergeordnete, einheitliche Handlungsvorgaben formuliert werden, welche wiederum als Orientierung dienen, ob bzw. wann Massnahmen ergriffen werden sollen.

Vorschlag 2: Handlungsvorgaben für Projektgenerierung:

- Zustandsnote 5: Massnahmen müssen umgehend umgesetzt werden;
- Zustandsnote 3 oder 4: Massnahmen sind mittelfristig so umzusetzen, dass der Zustand mindestens auf die Zustandsnote 2 verbessert werden kann.
- Zustandsnote 2 oder 1: Massnahmen sind nicht erforderlich, es sei denn, die Prognose der Zustandsentwicklung lässt erwarten, dass die Gesamt-Zustandsnote mittelfristig 3 oder schlechter wird. Allenfalls sind präventive Massnahmen vorzu schlagen oder die Überprüfung oder Überwachung zu intensivieren.

12.2.3 Umgang mit unterschiedlicher Befunddatenqualität

Die periodische, alle 5 Jahre geforderte Hauptinspektion stellt wohl die wichtigste Datengrundlage für die systematische und vollständige Zustandserfassung eines Bauwerks dar. Sie stellt damit sicher, dass erstens das Bauwerk vollständig erfasst wird und zweitens die Schadensentwicklung verfolgt werden kann.

Mit der Hauptinspektion werden nur die visuell einfach verfolgbaren Schäden flächenhaft aufgenommen. Das bedeutet in der Praxis, dass der Zustand einiger Bauwerksteile (z.B. Zwischendecke, Belag und Bankette, Gewölbe und Paramente) vollständig und gut erfasst werden, während für andere (z.B. Sohlgewölbe, Abdichtungs- und Entwässerungssystem, Aussengewölbe etc.) keine oder nur punktuelle Befunddaten gesammelt werden können.

Punktuelle Daten können bspw. durch punktuelle, zerstörende Messungen (z.B. Bohrungen), durch aufwändige flächenhafte nicht zerstörende Sondierverfahren (Ultraschall, Radar, Infrarot) oder durch indirekte Messverfahren (Verformungsmessungen, Dehnungsmessungen, etc.) erfasst werden.

Weitere Daten könne bspw. auch durch statische Überprüfungen erarbeitet werden.

Vorschlag 3: Ein Entscheidungsmodell soll methodische Hinweise geben, wie diese unterschiedliche Datenqualität (flächenhafte, punktuell, fehlend) in einen systematisierten Entscheid einfließen bzw. gewichtet werden soll, um reproduzierbare bzw. stabile Massnahmenentscheide zu generieren.

Wie in Kap. 1.2 unter dem Stichwort Datenqualität Seite 280 bereits erwähnt, sollen relevante Informationen zum Zustand objektiv, effizient, reproduzierbar und verwertbar erhoben werden. Das ist mit den heutigen Methoden und Systematik nicht bzw. nur teilweise der Fall; hier besteht ein grosses Potential für Verbesserungen.

Vorschlag 4: Der Werkeigentümer bzw. das ASTRA kann Mindestvorgaben an die Art und Weise der Datenerfassung und Datenauswertung stellen.

12.2.4 Zustandsbewertungssystem

In der Richtlinie [9] wird die Schadensbewertung mit Zustandsnoten von 1 - 5 eingeführt bzw. definiert. Damit können ganze Bauwerke, einzelne Bauwerksteile oder sogar einzelne Schadensgruppen einheitlich aufgrund der Schadensschwere in Zustandsklassen eingeteilt bzw. benotet werden.

Dieses Konzept ist für ein systematisiertes und standardisiertes Entscheidungsmodell grundsätzlich geeignet. Unabhängig von der Art des Bauwerksteils, des Befundtyps oder der Abgrenzung der Schadensbereiche kann der Zustand vereinheitlicht und damit vergleichbar gemacht werden. Damit kann auch die Zustandsentwicklung einheitlich nachvollzogen werden. Auch Erhaltungsentscheide können damit systematisiert erfolgen. So könnte bspw. definiert werden, dass alle Bauwerksteile ab einer bestimmten Zustandsnote instandgesetzt werden sollen. Zudem wäre dieses System auch einfach zu digitalisieren.

Vorschlag 5: Die Verwendung dieses etablierten Zustandsbewertungssystem mit Zustandsnoten zwischen 1 - 5 bildet weiterhin eine zweckmässige und praxistaugliche Grundlage für ein Entscheidungsmodell.

Der Nachteil des bestehenden Systems ist wie bereits weiter vorne erwähnt, dass die Zuweisung der Zustandsnote bereits eine Interpretation darstellt und in der Praxis subjektiv erfolgt.

Abbildung 13 ist der Richtlinie [9] entnommen. Darin sind die Zustandsnoten aufgelistet und bezeichnet sowie Kriterien zur Zuteilung der Noten aufgeführt. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass die Kriterien einen grossen Interpretationsspielraum zulassen, welche zwangsläufig zu subjektiven bzw. nicht reproduzierbaren Bewertungen führen.

So einprägend die Zuteilung ist, so wenig eindeutig sind die Kriterien definiert. Zur Illustration kann die Zustandsklasse 3 „beschädigter Zustand“ mit dem Kriterium ‚bedeutende Schäden‘ gewählt werden: Hier stellt sich für den Inspektor die Frage der Abgrenzung gegenüber der ZK 2 „akzeptabler Zustand“ (= ‚unbedeutende‘ Schäden) oder ZK 4 „schlechter Zustand“ (= ‚grosse‘ Schäden).

Bei allen 3 Zustandsklassen liegen Schäden vor. Wann sind Schäden nun bedeutend, wann unbedeutend, wann gross? Es ist anzunehmen, dass der eine Inspektor „bedeutend“ von der Ausprägung (z.B. Rissbreite) und Ausdehnung (Anzahl und Länge von Rissen) ableitet, unabhängig ob die Risse z.B. die Sicherheit oder die Dauerhaftigkeit unmittelbar beeinträchtigen (z.B. Risse infolge äusseren Zwangs in der unbewehrten

Verkleidung). Der andere Inspektor beurteilt „bedeutend“ dahingehend, welche unerwünschte Wirkung ein bestimmter Schaden auf ein Bauwerksteil hat: So könnte bspw. ein langer radialer Riss in der Verkleidung als weniger bedeutend beurteilt werden als ein langer horizontaler Riss im Kämpfer derselben Ausprägung. Ein dritter Inspektor wiederum bezeichnet grosse Schäden nicht aufgrund derer Wirkung oder der Ausprägung, sondern allein, ob die Risse eine grosse Fläche des Tunnels betreffen.

Zustandsbewertung	
Im Rahmen der Inspektion soll der Zustand des Bauwerks und seiner Bestandteile bewertet werden. Hierfür sind folgende Zustandsklassen zu verwenden:	
• "1" guter Zustand	: keine / geringfügige Schäden
• "2" akzeptabler Zustand	: unbedeutende Schäden
• "3" beschädigter Zustand	: bedeutende Schäden
• "4" schlechter Zustand	: grosse Schäden
• "5" alarmierender Zustand	: Die Sicherheit ist gefährdet, Massnahmen sind vor der nächsten Hauptinspektion erforderlich: dringliche Massnahme
• "9" Zustand unkontrollierbar	: Zustand nicht inspizierbar.

Abbildung 13: Definition der Zustandsklassen und Kriterien gemäss ASTRA [9]

Vorschlag 6:

Um das Ziel von systematisierten und stabilen Entscheidungen unter Verwendung von Zustandsnoten zu erreichen, sind die Kriterien zur Zuteilung von Zustandsnoten in der Richtlinie [9] übergeordnet zu präzisieren.

Einen Hinweis, wie die Kriterien präzisiert werden können, bringt das ASTRA bereits in den sogenannten jährlich publizierten Netzzustandsberichten (z.B. [6] von 2023). Darin gibt das ASTRA einen Überblick über den Zustand aller Bauwerkstypen (Fahrbahn, Kunstbauten, Tunnel, BSA). Das ASTRA verweist dabei auf eine Tabelle, in welcher die Zustandsklassen aller Bauwerkstypen gegenübergestellt werden (mit kleinen semantischen Abweichungen werden die gleichen Noten und Begriffe über alle Bauwerkstypen verwendet). In dieser Tabelle werden auch die Kriterien zur Zuteilung detaillierter beschrieben (Abbildung 14).

Anders als die Kriterien in der Tabelle gemäss Abbildung 13 werden diese hier präzisiert. So werden mit dem Hinweis auf die Sicherheit, die Verkehrssicherheit und die Tragsicherheit Hinweise gegeben, nach was sich die Bedeutung der Schäden richtet („Mittelschwere Schäden ohne Auswirkung auf die Sicherheit, ...“ für ZK3). Zudem werden den Zustandsklassen auch Handlungsanweisungen gegeben („... bedingen eine Überwachung“ im Falle ZK3).

Diese Formulierung der Kriterien macht einen Bezug zu wichtigen Anforderungen an Bauwerke und gelten gleichermassen für alle Bauwerkstypen, sind also allgemeingültig. Die bereits formulierten Handlungsanweisungen decken sich zudem bereits mit dem Vorschlag / Empfehlung 2 in Kap. 12.2.2).

Kurzbezeichnung Zustandsnote					
Zustandsklasse	Fahrbahnen	Kunstabauten, 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.

Abbildung 14: Kurzbezeichnung der Zustandsnoten für die verschiedenen Infrastrukturobjekte und Beschreibung der Qualität, der Beurteilungskriterien und der Handlungsanweisung in Worten aus [6]

Vorschlag 7: Die Tabelle gemäss Abbildung 13 stellt bereits eine präzisere Beschreibung der Zustandsnoten dar. Sie könnte noch etwas geschärft werden und soll die bestehende Tabelle gemäss Richtlinie [9] ersetzen.

Auch wenn die übergeordneten Kriterien zu Zuteilung der Zustandsklassen präziser beschreiben werden, verbleibt weiterhin ein Interpretationsspielraum, wie bspw. ein schadhafte Bauwerksteil zu bewerten ist. Die Bewertung der Bedeutung eines bestimmten Schadens an einem Bauwerksteil im Tunnel hängt u.a. stark davon ab, wie die visuell nicht einfach verfolgbaren Schäden angenommen werden und welche Expertise der Inspektor mitbringt.

Hier könnten bspw. Kataloge von verschiedenen Schadensausprägungen und -schwere pro Schadensprozess und Bauwerksteil sowie zugewiesene Zustandsnoten einen Beitrag zur Systematisierung leisten. Als Vorlage dazu kann bspw. der Leitfaden «KUBA 5.1: Leitfaden für Inspektoren von Kunstbauten - IT Dokumentation» [23]) erwähnt werden

Vorschlag 8: Entwicklung von typischen Schadensbefunden in Tunnel und der Zuweisung von Zustandsnoten.

12.2.5 Bewertungseinheit

Mit dem Ziel einer systematisierten und standardisierten Entscheidungsmethode ist es möglicherweise sinnvoll, Empfehlungen oder Vorgaben zu machen, in welcher „Granularität“ bzw. wie auf welche Bewertungseinheit Zustandsnoten vergeben werden sollen.

In einem Strassentunnel bilden Gewölbeblöcke unabhängig voneinander wirkende Tragwerksteile (siehe auch Kap. o). Zudem bilden die Bauwerksteile Tragwerke mit unterschiedlichen Risikoprofilen. Es ist daher naheliegend, die Bewertungseinheit mindestens pro Bauwerksteil und Blockelement herunterzubrechen.

Nun können pro Bauwerksteil verschiedene Schadensprozesse eine unterschiedliche Wirkung erzeugen und damit den Zustand bzw. dessen Auswirkung auf die Anforderungen (z.B. Tragsicherheit) beeinflussen. Als Beispiel können in Zwischendecken sowohl Risse als auch Auflagerschäden oder Abplatzungen infolge Korrosion ähnlich bedeutend sein, aber unterschiedlichen Ursachen und Wirkungen unterliegen.

Werden diese Unterscheidungen nicht berücksichtigt, so geht mit der Zuweisung von Zustandsklassen eine bedeutende Information des Befunds verloren. Das kann dazu führen, dass der eine Inspektor den einen Schadensprozess höher gewichtet als einen anderen oder eine Zustandsnote pro Schadenstyp und/oder Bauwerksteil vergibt (z.B. für das Auflager, die Decke und die Fugenabdichtung), wohingegen der andere Inspektor nur eine Zustandsnote für die Zwischendecke aufgrund seiner summarischen Beurteilung vergibt.

Vorschlag 9: Für systematisierte Entscheidungen sind auch Empfehlungen und Vorgaben für die Bewertungseinheit zu machen. Als Mindestanforderung sollte vorgegeben werden, dass die Bewertungseinheit vor der ersten Inspektion für ein bestimmtes Tunnelobjekt definiert und beschrieben werden soll, so dass diese nachvollzogen und reproduzierbar sind.

12.2.6 Aggregation von Zustandsnoten

In Kap. 12.2.1 wird eine Gesamt-Zustandsnote als Zielvorgabe vorgeschlagen. Das setzt voraus, dass die Aggregation einer Gesamt-Zustandsnote aus Zustandsnoten pro Bewertungseinheit nachvollziehbar wird bzw. nach einer methodisch sinnvollen Regel erfolgen sollte.

Vorschlag 10: Es sollen methodisch sinnvolle Regeln entwickelt und vorgegeben werden, wie Gesamt-Zustandsnoten aus Noten pro Bewertungseinheit aggregiert werden sollen, um systematisierte Erhaltungsentscheide zu ermöglichen.

13 Erkenntnisse und Folgerungen

In den Schlussberichten der Einzelprojekte [2], [3], [4] und [5] sind die Erkenntnisse und Folgerungen aus Sicht der Forschungsstellen themenspezifisch dokumentiert. Auf eine zusammenfassende Wiedergabe dieser Erkenntnisse und Folgerungen im vorliegenden Synthesebericht wird mit Verweis auf die Schlussberichte verzichtet.

In diesem Kapitel werden die aus Sicht der Autoren des Syntheseberichts wichtigsten Erkenntnisse und Folgerungen, ausgehend von der Zielsetzung des Forschungsprojekts, zusammengefasst.

13.1 Stand der Praxis des operativen Erhaltungsmanagement von Strassentunnel

In der Schweiz liegen gute und etablierte nationale Richtlinien zum Erhaltungsmanagement von Infrastrukturbauwerken vor, welche auch auf Tunnelbauwerke als Teil von Kunstbauten angewendet werden können und im internationalen Vergleich, insbesondere innerhalb der DACH-Länder, ähnliche Prozesse und Methoden verwenden. Tunnelspezifische Vorgaben zum operativen Erhaltungsmanagement hingegen fehlen, sowohl auf nationaler Ebene als auch in Bezug auf Handbücher der Strassentunnelbetreiber. Ausnahme davon bildet KUBA 5.0, das zur laufenden und strukturierten Erfassung von Substanz-, Inspektions- und Erhaltungsdaten seit kurzem auch Tunnelbauwerke als eigenständige Kunstbauten separat aufführt.

Tunnelbauwerke gelten zwar als Kunstbauten, unterscheiden sich aber doch in wesentlichen Aspekten von anderen Kunstbauten wie Brücken und Stützbauwerke. Tunnelbauwerke sind i.d.R. langgestreckte Tragwerke, welche zahlreichen Einwirkungen und Einflussfaktoren wie Geologie, Hydrologie, Überlagerung, Baumethode und Klima (infolge Lüftung) ausgesetzt sind, die sich über die Länge ändern. Die Tragstruktur eines Strassentunnels setzt sich aus unterschiedlichen Tragwerksteilen zusammen (Gewölbe, Zwischendecke, Fahrbahnkonstruktion), die u.a. ein komplexes Tragverhalten infolge Bauwerk-Baugrund Interaktion aufweisen. Wichtige tragende Bauwerksteile sind nicht einsehbar bzw. nicht einfach verfolgbar. Hinzukommt, dass Tunnelbauwerke nur aus dem Fahrraum einsehbar sind und somit die Zugänglichkeit für Überwachung und Massnahmenumsetzung Auswirkungen auf die Verfügbarkeit der Bauwerke haben.

Das Nachbarland Österreich mit einer ähnlichen Strassentunneltradition wie die Schweiz kennt anders als die Schweiz mit RVS 13.03.31 [15] auch tunnelbauspezifische Richtlinien zum Erhaltungsmanagement. Darüber hinaus engagieren sich die Verkehrstunnelbetreiber und Industrie in Österreich aktiv bei der Weiterentwicklung des Erhaltungsmanagement im Tunnelbau: Davon zeugen in der jüngeren Vergangenheit

wertvolle Forschungsarbeiten wie AMBITION, OpTimal, RIBET, TUNSPEKT, u.m (siehe Kap. 4.1).

Das Hauptziel dieses Forschungsprojekts ist es, die Grundlagen für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunnel zu verbessern und zu systematisieren (siehe Kap. 2.1), wozu auch die Möglichkeiten der Digitalisierung vermehrt genutzt werden sollen. Aus Sicht der Autoren ist eine notwendige Bedingung hierfür, dass die Datenqualität verbessert wird. Als Massstab gilt, dass die relevanten Informationen objektiv, effizient, reproduzierbar und idealerweise digital verwertbar erhoben werden (siehe Kap. 1.2 unter Stichwort «Datenqualität», Seite 28).

Einen Schritt in diese Richtung hat die ASFINAG in Österreich vor kurzem vollzogen, in dem der Zustand von Strassentunnel verpflichtend mit flächendeckenden Tunnelscanmethoden erfasst und mit vorgegebener Software dokumentiert und ausgewertet werden müssen. Das bietet eine hervorragende Chance für das ASTRA, durch Zusammenarbeit und Austausch mit ASFINAG von den Erfahrungen zu profitieren und ähnliche Vorgaben an die Erhaltungsplaner zu prüfen.

Wie auch international etabliert, erfolgt die Zustandsbewertung in der Schweiz mit Zustandsnoten zwischen 1 (keine Schäden) bis 5 (katastrophal). Die Bewertung mit Zustandsnoten ist etabliert und hat weiterhin seine Berechtigung; so ermöglichen diese im strategischen Erhaltungsmanagement den Vergleich des Zustands zwischen verschiedenen Objekten und Gewerken. Zudem gibt es dem Betreiber die Möglichkeit, allgemeingültige Handlungsanweisungen mit Zustandsnoten zu verknüpfen und damit stabile Erhaltungsentscheide zu fördern. Die Kritik ist berechtigt, dass das heutige Bewertungssystem sowohl aufgrund der Definition gemäss [9] als auch aufgrund der gelebten Umsetzung in der Praxis weder objektive noch reproduzierbare Zustandsnoten ermöglichen. Hier gibt es Verbesserungspotential im Rahmen von Entscheidungsmodellen. Wie in Kap. 12.2 gezeigt, helfen die Präzisierungen des ASTRA, wie sie in den Netzzustandsberichten [6] zugrunde liegen, die Objektivität zu steigern. Präzisierungen zu tunneltypischen Schadensbildern, wie sie als Leitfaden für Inspektoren anderer Kunstbauten [23] ausgearbeitet wurden, könnten hier auch für bergmännische Tunnel eine Verbesserung im Sinne der Zielsetzung dieses Forschungsprojekts bringen.

Das ASTRA misst dem Erhaltungsmanagement einen hohen Stellenwert zu. Davon zeugen diverse laufende Projekte. Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt wurden dazu weitere wesentliche Grundlagen erarbeitet (klare Bauwerksgliederung, Kataloge, Kostentool etc.), die den ASTRA-Filialen, den Inspektionsteams und den Planern wertvolle Unterlagen bieten. Es gilt, diese Grundlagen nun auch bekannt zu machen und in die Praxis einfließen zu lassen.

13.2 Bauwerksgliederung

Obwohl Verkehrstunnelanlagen vielseitig sind, gelingt es, sie einheitlich zu gliedern. Als sinnvolle Gliederung erweist sich die Unterteilung in funktional unterschiedliche Bauwerksteile (z.B. Zwischendecke) mit gleicher Bauart (z.B. Stahlbeton). Die Autoren der Einzelprojekte schlagen dafür den Begriff «Bauteilart» als die Kombination

zwischen Bauwerksteil und Bauart vor. Ausgehend von heute typischen Verkehrstunnelbauwerken ist so ein Katalog von Bauteilarten erarbeitet worden, auf den sich alle Standardisierungskataloge beziehen bzw. darauf verknüpft werden. Aus Sicht der Autoren bildet diese funktionale Gliederung eine praxistaugliche und auch im Hinblick auf die zunehmende Digitalisierung (bspw. BIM) nachhaltige Unterteilung von Tunnelbauwerken.

Als weitere Bezugseinheit für die Zustandsbewertung schlagen die Autoren des Syntheseberichts die Unterteilung der zum Teil sehr langen Bauwerksobjekte in Gewölbeblöcke (von 8 – 12.5 m Länge) vor. Dies einerseits, weil ein Gewölbeblock als eigenständig und unabhängig von den Nachbarblöcken tragend gelten und bei schlechtem Zustand die Verfügbarkeit der ganzen Tunnelröhre beeinträchtigt werden kann. Der Gewölbeblock bildet zudem das Auflager für alle weiteren relevanten (tragenden) Bauwerksteile. Andererseits auch, weil die relevanten Einflussfaktoren auf den Zustand wie Geologie, Überlagerung, Klima, Belastung aus Baugrund i.d.R. über die Länge variieren.

Diese Betrachtungsweise lässt sich zudem auch sinnvoll auf risikobasierte Entscheidungsmodelle übertragen: Die Einflussfaktoren sind relevant für die Einordnung der Eintretenswahrscheinlichkeit von Gefährdungen infolge Zustandsdefiziten, die Beurteilung der Schadensschwere, deren Zustandsentwicklung und deren Folgen für die Einschätzung der Auswirkungen. Es ist charakteristisch, dass sich Risikoprofile entlang einer Tunnelröhre von Block zu Block deutlich ändern können.

Grundsätzlich ist die Verwendung von Blockelemente als Bezugseinheit von Schaden- und Massnahmenplänen von Strassentunnel allgemeine Praxis. Im Hinblick auf eine weitere Standardisierung und Systematisierung des Erhaltungsmanagement von Tunnel kann dies auch als Vorgabe durch das ASTRA verbindlich gefordert werden.

13.2.1 Befund, Schadens- und Gefährdungsbildkataloge

Im Rahmen des EP1 wurden sowohl tunnelspezifische Schadensprozesse und Befunde als auch daraus folgende Gefährdungen umfassend und vertieft aufgearbeitet. Als Quelle diente die systematische Berücksichtigung der Literatur, die Auswertung von 9 Fallbeispielen Schweizer Nationalstrassen sowie das implizite Erfahrungswissen der beteiligten Ingenieurfirmen. Jeder Schadensprozess und jedes Gefährdungsbild wurden systematisch in gleicher Art und Weise beschrieben. Die dazu verwendeten und strukturiert erfassten Informationen decken alle relevanten Aspekte ab, welche für eine Zustandsbeurteilung notwendig sind.

Diese Informationen sind sowohl in Form von illustrierten und für Leser leicht zugänglichen Katalogblättern als auch in Tabellenform als digitaler Datensatz dokumentiert worden. Ersteres kann unmittelbar in der Praxis als Nachschlagewerk für Erhaltungsplaner genutzt werden. Letzteres steht für kommende Digitalisierungsschritte als datenbanktauglicher Datensatz zur Verfügung: Jede Zeile entspricht einem Datensatz, jede Spalte einem Attribut. Zudem sind die Abhängigkeiten zu weiteren relevanten Daten mit Verknüpfungen bereits angelegt. Damit ist mit dieser Entwicklungsarbeit eine signifikante Vorleistung für spätere Digitalisierungsschritte erbracht worden.

Die Datensätze sind so strukturiert, dass kommende neue Erkenntnisse (neue Schadensprozesse, neue Informationen) einfach darin integriert werden können. Damit besteht für das ASTRA die Chance, Erfahrungen und Erkenntnisse in Form von systematisierten Daten innerhalb des Erhaltungsmanagement nachhaltig aufzubauen und zu nutzen. Voraussetzung dazu ist, dass diese erarbeiteten Grundlagen in allen Filialen implementiert und deren Verwendung und Pflege entsprechend gefördert werden.

13.2.2 Prognose der Zustandsentwicklung

Die zuverlässige Prognose der Zustandsentwicklung ist die wohl wichtigste und zugleich anspruchsvollste Aufgabe bei der Zustandsbeurteilung. Diesbezüglich ist der Stand des Wissens im EP1 aufgearbeitet und dargestellt. Zwar wurde das Wissen von Verfallfunktionen Schadensprozessspezifisch aufgearbeitet, aber die Autoren kommen aufgrund der Komplexität zum Schluss, dass es weiterhin eine vertiefte, objekt-spezifische Expertenbeurteilung braucht und die periodische Erfassung von Zustandsdaten über die Zeit wohl die wichtigste Grundlage dafür bleibt.

Umso wichtiger ist es, dass diese Daten über die Zeit einheitlich und in hoher Qualität erfasst werden. Das ist eine Kernaufgabe des EP2 Untersuchungsmethoden, worauf im Kap. 13.3 noch eingegangen wird.

13.2.3 Gefährdungsbilder

EP1 postuliert, dass die Materialalterung in erster Linie Auswirkungen auf die Tragsicherheit und die Betriebssicherheit (und die Gebrauchstauglichkeit als Teil der Betriebssicherheit) haben. Hingegen betrachtet EP1 die Verkehrssicherheit und Umweltverträglichkeit nicht von der Materialalterung, sondern von Nutzungsänderungen beeinflusste Auswirkungen. Damit schlägt EP1 eine konsequente Trennung auf höchster Gliederungsstufe zwischen Auswirkungen infolge Materialalterung und anderer Treiber vor. Die Autoren des Syntheseberichts erachten diesen Ansatz als methodisch richtig, welche auch hilfreich bei der Evaluation von Handlungsoptionen und der Begründung von Erhaltungsentscheiden ist. Nichtsdestotrotz zeigt sich in der Praxis des Erhaltungsmanagement, dass diese beiden Treiber von Erhaltungsmaßnahmen oft gleichzeitig auftreten und Erhaltungsentscheide massgeblich beeinflussen können.

Folgerichtig schlägt EP1 einen Katalog von tunnelrelevanten Gefährdungsbildern vor, welche nur die Tragsicherheit oder die Betriebssicherheit beeinträchtigen und die von Schadensprozessen beeinflusst sind. Im vorangegangenen Kap. 13.2.1 wurden die erarbeiteten Gefährdungsbildkataloge bereits erwähnt.

Als Grundlage für mögliche risikobasierte Entscheidungsmodelle sind zusätzlich Beziehungsstrukturen geschaffen worden, mit welchen typische Abhängigkeiten zwischen Ursachen bzw. Einflussfaktoren und Wirkungen von Gefährdungen in Tunnel qualitativ aufgezeigt werden. Damit liegt auch ein erster Katalog von Beziehungsstrukturen vor, welcher als Entscheidungshilfe für Erhaltungsplaner dienen kann, aber wohl noch nicht reif für automatisierte und systematisierte Entscheide ist. Es macht Sinn, solche Beziehungsstrukturen unter Berücksichtigung laufend gewonnener Erfahrungen weiterzuentwickeln und vermehrt in Entscheidungen einzubinden.

13.2.4 Vorgehensvorschlag

Ausgehend von einem zugrunde gelegten Entscheidungsbaumansatz macht EP1 einen Vorgehensvorschlag: Ausgehend von Befunden und betroffenen Bauwerksteilen werden durch hierarchisch aufeinanderfolgende, einfache Fragestellungen die infrage kommenden Schadensprozesse und daraus resultierende Gefährdungen systematisch eingegrenzt. Aus Sicht der Autoren des Syntheseberichtes deckt sich dieses Vorgehen mit der gelebten Praxis im Erhaltungsmanagement, systematisiert diese aber konsequenter und verknüpft sie mit standardisierten Informationen (Kataloge). Damit wird ein wesentlicher Beitrag zum Hauptziel dieser Forschungsarbeit geleistet.

13.3 Untersuchungsmethoden

13.3.1 Kataloge von Untersuchungsmethoden

Ausgehend von tunnelspezifischen Schadensprozesse und der Breite der Bauwerksteile in Tunnel wurde in EP2 ein breiter Katalog von Untersuchungsmethoden erstellt. Die Erkenntnisse und Folgerungen zu den Schadensprozesskatalogen von EP1 in Kap. 13.2.1 können auf die Kataloge der Untersuchungsmethoden ohne Einschränkung übertragen werden: Auch hier wurde ein vollständiger und systematisch strukturierter Katalog von praxistauglichen Untersuchungsmethoden geschaffen, welcher alle relevanten Informationen enthält und mit Schadensprozessen verknüpft wurden. Auch diese Daten liegen in Form von leicht zugänglichen Katalogen oder datenbanktauglichen Rohdaten (EXCEL-Tabellen) vor, die ohne Einschränkung bereits nutzbar sind.

Der Blick auf die rasanten Entwicklungsschritte sei es in der Sensorik in Bezug auf die Datenerfassung, sei es in der KI-gestützten Auswertung lassen erwarten, dass es hier noch viele Entwicklungsfortschritte geben wird. Die geschaffenen Strukturen ermöglichen es dem ASTRA, solche neuen Verfahren einfach in die Kataloge zu integrieren und somit einfach im Erhaltungsmanagement zu integrieren.

EP2 macht hierzu auch interessante Vorschläge, wie dieses laufende Wissen durch das ASTRA bspw. über Social Media weltweit angezapft werden könnte.

13.3.2 Datenqualität

Der Anspruch der Erhaltungsplaner ist, dass Erhaltungsentscheide auf ausreichend abgestützten Daten erfolgen soll. Somit spielt die Datenqualität eine entscheidende Rolle zur Erreichung der übergeordneten Ziele.

Anzustreben ist eine Datenqualität, welche die relevanten Informationen objektiv, effizient, reproduzierbar und verwertbar erheben. Das ist mit den bis heute mehrheitlich angewendeten Inspektionsmethoden nicht bzw. nur teilweise der Fall. Hier besteht gerade mit neuen Untersuchungs- und Auswertemethoden ein grosses Potential für Verbesserungen.

Dazu gehören bspw. Aufnahmen mit Multispektral Lasergeräten, photogrammetrischen Aufnahmemethoden und bildgebenden Verfahren, welche mittlerweile effizient flächenhafte, georeferenzierte 3D-Daten sowohl aus Fahrträumen als auch aus schlecht zugänglichen Räumen ermöglichen. Die Daten sind digital erfasst. Risse können bspw.

heutzutage mit einer Auflösung von 0.1 mm erfasst und dank KI-gestützter Verfahren immer effizienter ausgewertet werden. Dank der digitalen und georeferenzierten Aufnahme lassen sich die Zustandsdaten auch effizient in 3D- bzw. BIM Modelle übertragen und ermöglichen dank Datenfusion und Ko-Registrierung ganz neue Visualisierungen, welche die Zustandsbeurteilung durch Fachleute unterstützen.

Diese Überlegungen zeigen, dass die Wahl der Untersuchungsmethode ein wichtiger Bestandteil der Zielsetzung dieser Forschungsarbeit ist. Damit diese Ziel erreicht wird, müssen die Anforderungen an die Datenqualität durch Werkeigentümer bzw. das ASTRA vorgegeben und eingefordert werden. Dazu sind auch die dazu erforderlichen Rahmenbedingungen zu schaffen (Finanzierung, Entwicklung, Beschaffung, Bereitstellung von Auswertetools, etc.). Hierzu ist der Verweis auf die ASFINAG interessant, die für ihre Strassentunnel systematisch Tunnelscanaufnahmen fordern und ein einheitliches Auswertetool zur Verfügung stellt.

13.3.3 Methodik für Vergleichsmethodik

In langgestreckten Tunnelbauwerken und im Wissen der erschwerten Zugänglichkeit sowie der variierenden Einflussfaktoren entlang eines Tunnels kann die Beurteilung der Kosten und Wirksamkeit von Untersuchungsmethoden eine wichtige Rolle spielen. Ein zentraler Punkt bei Untersuchungen ist deren Wirkung, wie sie zur Verringerung von Unsicherheiten bezüglich Zustands und Risiken beitragen. Der Nutzen einer Untersuchung ist, diese Unsicherheit zu verringern, um bspw. unnötig vorgezogene bzw. umfangreiche Erhaltungsentscheidungen zu vermeiden.

Der Beitrag des EP2 ist es, hierzu eine mögliche Vergleichsmethodik vorgestellt zu haben und einen Analogieschluss zum Konzept der Bemessung von Tragwerken und den zugrunde gelegten Beiwerten zu Integration von Risikoüberlegungen gemacht zu haben.

13.4 Erhaltungsmassnahmen

13.4.1 Kataloge von Erhaltungsmassnahmen

Für alle Schadensprozesse wurden von EP3 Standardmassnahmen systematisch erfasst und dokumentiert. Auch hier wurde analog zur Beschreibung in Kap. 13.2.1 ein vollständiger und systematisch strukturierter Katalog geschaffen, welcher alle relevanten Informationen zu Standardmassnahmen enthält und ein gutes Nachschlagewerk bildet. Der Einstieg zur Wahl von Massnahmen erfolgt über Schadensprozesse und Bauwerksteile.

Die Detailinformationen zu den Standardmassnahmen sind vollständig und systematisch erarbeitet. Der Detaillierungsgrad und die Spezifikation kann in Zukunft aus Sicht der Autoren des Syntheseberichts punktuell verbessert werden: So fehlen bspw. zunehmend wichtige Anwendungen mit UHFB Beton oder mit alternativen Schachtdeckel aus Kunststoff neben herkömmlichen Guss, Polymerbeton und Edelstahlvarianten.

Eine weitere wertvolle Grundlage bei der Massnahmenplanung bilden kostenrelevante Informationen pro Grundeinheit (m, m² oder m³) wie bspw. Personalaufwand und Dauer der Massnahmenumsetzung. Diese Informationen sind Inputdaten für das Kostenmodell (Kap. 13.5) und mit diesem verknüpft. Aus Sicht der Autoren des Syntheseberichts wird damit eine transparente und einheitliche Grundlage für Aufwand- bzw. Kostenschätzungen geschaffen, die mit Zugewinn an Erfahrung laufend angepasst und verbessert werden kann.

13.4.2 Einschätzung der Wirkungsweise, Effektivität und Langzeitverhalten

Das übergeordnete Forschungsziel verfolgt den Anspruch, kosteneffiziente Erhaltungsmassnahmen zu schaffen. Richtig ist diesbezüglich der Ansatz im EP₃, dass dies keine isolierte Fragestellung des Kostenaufwands ist, sondern die Massnahmenwirksamkeit (wirkt die Massnahme gegen die relevanten Schadensprozesse und wie effektiv wirkt die Massnahme) und wie nachhaltig bzw. dauerhaft verhindert sie diesen Schadensprozess.

Verdienst der Arbeit von EP₃ ist, diesen Zusammenhang einfach darzulegen und in einer einfachen, idealisierten Zustands- und Alterungsentwicklungskurve zu illustrieren (siehe Abb. 9). Die Alterung des Bauwerks über die Zeit ist gerade ein inhärenter Aspekt der Erhaltungsplanung. EP₃ macht sichtbar, dass Erhaltungsmassnahmen in erster Linie die Versagenswahrscheinlichkeit und damit das Risiko von Sicherheitsproblemen und Einschränkungen der Verfügbarkeit reduzieren. Die Wirkung solcher Massnahmen ist die Verlängerung der Nutzungsdauer durch «Streckung» der Alterungskurve. Der Beitrag von Untersuchungen bei der Massnahmenevaluation wird ebenfalls gut sichtbar: Damit kann die Prognosezuverlässigkeit der Alterungskurve verbessert werden, was genauere Aussagen zulässt, wann Massnahmen ergriffen werden müssen. Dieses Gedankenmodell sollte aus Sicht der Autoren des Syntheseberichts in ein Entscheidungsmodell prominent einfließen.

13.5 Kostenmodell

Traditionellerweise verwenden Erhaltungsplaner bei der Abschätzung der Kosten Erfahrungswerte aus vergangenen Projekten. Solche Erfahrungswerte haben den Nachteil, dass die Rahmenbedingungen, wie diese Kosten zustande gekommen sind, oft nicht bekannt sind oder nicht allgemeingültig auf andere Projekte übertragbar sind.

Ziel von Kostenschätzungen als Entscheidungshilfe zwischen Massnahmenvarianten muss sein, diese nachvollziehbar und vergleichbar zu machen. Dazu eignet sich, ausgehend von einer Massnahmenvariante die reinen aufwandbezogenen Kosten unter Annahme einer plangemässen Umsetzung zu ermitteln, und zwar so, als wenn sie gerade zum Stichtag erstellt würden («Overnight-Cost»); das ergibt die Basiskosten, in welche keine Kosten für Prognoseungenauigkeiten oder Risiken eingepreist werden.

Aus diesem Grund schlägt EP₅ vor, die Kosten ausgehend von einer Einzelmassnahme bzw. Massnahmenvariante über den Aufwand für Personal, Material und Geräte abzuschätzen. In der Kostenermittlung können die objektspezifischen Gegebenheiten (Zugänglichkeit, Installationsbedarf, Nacht- oder Wochenendarbeiten) mitberücksichtigt

werden. EP5 nennt dies den Bottom-Up Ansatz. Die Stärke dieses Ansatzes liegt in der Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit sowie in der Möglichkeit mit Diskontierungsmodellen auf unterschiedliche Zeitpunkte zu übertragen. Ein weiterer Vorteil ist, dass neue oder weitere Massnahmen in das Kostenmodell integriert werden können, ohne dieses anzupassen. Allein der Aufwand pro Grundeinheit als Bestandteil der Massnahmenkataloge in EP3 müssen ergänzt werden. Darauf aufbauend können dann auch Prognoseungenauigkeiten oder mögliche Risikokosten analysiert oder Vergleiche angestellt werden.

Zur Plausibilisierung dieses Kostenmodell hat EP5 auch Kostenkennwerte aus ausgeführten Projekten herangezogen. Statistische Analysen führen kaum zu tiefergreifenden Erkenntnissen, zumal die Streuung sehr gross ist. Die von EP5 für die Auswertung von Kostenkennwerten verwendete Struktur könnte eine Grundlage für die Erhaltungsplaner sein, systematisch über alle Filialen Kostenkennwerte aus ausgeführten Projekten zu sammeln.

13.6 Entscheidungsmodell

Die anspruchsvollen Ziele an die Entwicklung eines Entscheidungsmodell, welches auf die besonderen Rahmenbedingungen von Tunnel ausgelegt ist, konnten nicht erreicht werden, weil sich die derzeitigen Vorschläge als nicht ausreichend nachvollziehbar und praxistauglich erwiesen.

Anstelle des Entscheidungsmodell haben die Autoren des Syntheseberichts Themen identifiziert, welche zumindest punktuell einen Beitrag zur Systematisierung und Standardisierung von Erhaltungsentscheiden bei Strassentunnel beitragen könnten. Ausgehend vom heutigen traditionellen Vorgehen der Zustandserfassung, Zustandsbeurteilung und Entscheidungsfindung für Strassentunnel des ASTRA würden bspw. Präzisierungen der Kriterien zur Einteilung in Zustandsklassen bereits wesentliche Fortschritte erlauben. Grundsätzlich erachten die Autoren die Methode der Zustandsklassen weiterhin als zweckmässig.

Es wurden auch Hinweise gegeben, wo das ASTRA bereits inhaltliche Präzisierungen zur Verfügung gestellt hat, ohne dass diese für den Zweck der Entscheidungsfindung breit angewendet wird.

14 Empfehlungen

14.1 Allgemeine Empfehlung

Die in diesem Forschungsprojekt erarbeiteten Kataloge und Tools (Kostenmodell, Vergleichsmethodik) bilden durch die Wahl einer untereinander abgestimmten, systematischen und miteinander verknüpften Gliederung eine wertvolle Grundlage zur Standardisierung und Systematisierung des operativen Erhaltungsmanagements mit Fokus auf Strassentunnel.

Es wird empfohlen, die substanziell guten Ergebnisse der Forschungsarbeiten bei allen Bearbeitungsschritten, von der Inspektion bis zur Projektgenerierung, anzuwenden und den entstehenden Nutzen zu ziehen.

Der Einsatz neuer Technologien für die Überwachung von Strassentunnel, wie Sensor-Online-Monitoring-, Scanning- und Bilderkennungsmethoden sowie Automatisierung von Aufnahmen, die Digitalisierung der KI-gestützten Auswertung sind voranzutreiben unter Einbezug laufender Pilotversuche.

Es 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 bereits jetzt zu antizipieren und es ist darauf hinzuwirken. Da der volkswirtschaftliche Nutzen der BIM-Methodik im Erhaltungsprozess / Betrieb liegt, sollen die Anforderungen und die Informationen, welche für den Erhaltungsprozess relevant sind, massgeblich durch die Erhaltungsverantwortlichen und bereits ab der Projektierungsphase vorgegeben werden.

Weiterhin sollen praxistaugliche Lösungen im Vordergrund stehen und weniger theoretische und statistische Überlegungen. Die Nachvollziehbarkeit der Entscheide ist wichtig und muss transparent dargelegt sein.

Des Weiteren wird hier auf die themenspezifischen Empfehlungen der einzelnen EPs in den entsprechenden Schlussberichten verwiesen, welche zur besseren Übersicht im XIV (Seite 145) zusammengefasst wurde.

14.2 Konkrete Empfehlungen

Ausgehend von den Erkenntnissen und Folgerungen in Kap. 13 und mit Blick auf die Zielsetzung des Forschungsauftrages gemäss Kap. 2.1.1 machen die Autoren des Syntheseberichts nachfolgend 5 konkrete Empfehlungen:

Empfehlung 1: Tunnelspezifische Richtlinie zum operativen Erhaltungsmanagement:

In der Schweiz bzw. beim ASTRA liegen keine tunnelspezifischen Richtlinien zum operativen Erhaltungsmanagement vor. Zudem sind die vorhandenen Richtlinien alt (2005) und sehr offen bzw. allgemeingültig formuliert. Um systematisierte und standardisierte Grundlagen zu schaffen, sollten schweizweit über alle Filialen präzisere und verbindlichere Vorgaben gemacht werden. Inhaltlich sollten folgende Themen präzisiert werden:

- Präzisierung der Kriterien zur Zuteilung der Zustandsnoten und der daraus geforderten Handlungsoptionen (Hinweise dazu finden sich in Kap. 12.2.4)
- Mindestanforderungen an die Datenqualität (bspw. in digitalisierter Form, flächendeckende Tunnelscanaufnahmen, Vorgaben an die Formate und Datenstrukturierung, Bewertungssoftware); (Hinweise dazu finden sich in Kap. 13.3.2)
- Anforderungen an die Bezugseinheit für Befunde, Schadensprozesse, Zustandsbewertung und Massnahmen (bspw. Bauwerksteil pro Blockelement); (Hinweise dazu finden sich in Kap. 12.2.5);
- Vorgabe von übergeordneten Leistungszielen (bspw. anzustrebende aggregierte Zustandsnote pro Tunnelbauwerk, Optimierungskriterien zur Wahl von Handlungsoptionen bzw. Massnahmen); (Hinweise dazu finden sich in Kap. 13.1)
- Vorgabe, wie eine Gesamtnote pro Tunnelbauwerk nachvollziehbar aggregiert werden soll; (Hinweise dazu finden sich in Kap. 12.2.6)
- Überprüfung der Vorgaben, wie Projektgenerierungsentscheide zu begründen sind (bspw. Einschätzung der Wirksamkeit und Effektivität der vorgeschlagenen Handlungsoption/Massnahmenvariante); (Hinweise dazu finden sich in Kap. 12.2.2 und 13.4.2)
- Vorgaben an Kostenschätzungen (bspw. nachvollziehbare aufwandbasierte Kostenschätzungen auf Stufe Projektgenerierung, Vorgaben an NPK-Strukturierung zur einheitlichen Nachkalkulation und Sammlung von Kostenkennwerten); (Hinweise dazu finden sich in Kap. 13.5 und o)
- Empfehlungen zum Vorgehen von der Zustandserfassung bis zum Entscheid unter Nutzung von Katalogen (bspw. Nutzung von hierarchisch aufeinanderfolgenden Fragestellungen, Identifikation der massgebenden Schadensprozesse und daraus resultierende Gefährdungen); (Hinweise dazu finden sich in Kap. 13.2.4 und 8.4)

Empfehlung 2: Verbindliche Vorgaben an die Datenqualität

Voraussetzung für nachvollziehbare und kosteneffiziente Erhaltungsentscheide (sowohl auf strategischer wie operativer Ebene) sind zuverlässige Informationen über den Zustand und die Zustandsentwicklung sowie deren Auswirkungen auf übergeordnete Leistungsziele von allen Bauwerken. Anzustreben ist eine Datenqualität, welche die relevanten Informationen objektiv, effizient, reproduzierbar und verwertbar erheben. Hier besteht ein grosses Potential für Verbesserungen bspw. in dem:

- Flächendeckende Tunnelscandaten anstelle von visuell-manuell aufgenommenen Befunden Standard werden;
- Tunnelscanauswertungssoftware oder zumindest die Datenstrukturierung vorgegeben werden, so dass diese Daten effizient verwertbar bleiben;
- Das gilt auch in Bezug auf weitere Untersuchungsdaten (bspw. Verformungsmessdaten, Labordaten von Bohrkernen oder Bergwasser)

- Die Chancen von digitalen Zwillingen der Bauwerke (BIM) genutzt werden, sowohl die relevanten Bauwerksgrundlagen als auch die Zustandsdaten digitalisiert und effizient zur Verfügung zu haben
- Dazu sind durch die Betreiber bzw. durch das ASTRA auch die dazu erforderlichen Rahmenbedingungen zu schaffen (Finanzierung, Entwicklung, Beschaffung, Bereitstellen von Auswertetools, Digitalisierung bestehender Daten, ...)
- Fördern der Zusammenarbeit bspw. durch anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung diesbezüglich bspw. im Rahmen des DACH oder andere Partnerorganisationen (Alpenraum)

Empfehlung 3: Leitfaden für Inspektoren von Tunnel

Aufgrund der Komplexität von Tunnelbauwerken und der schlecht einsehbaren Bauwerksteile braucht es weiterhin objektspezifische, periodische Expertenbeurteilungen. Im Hinblick auf den Fachkräftemangel und zur Verbesserung der Objektivität und Reproduzierbarkeit von Zustandsbewertungen (Vergabe von Zustandsnoten) empfehlen wir, in Anlehnung an [23] einen «Leitfaden für Inspektoren von Strassentunnel» zu erstellen oder ersteren zu überarbeiten. Folgende Elemente sind zu ergänzen:

- Mindestanforderungen an die Qualifikation und Erfahrung von Inspektoren
- Entwicklung von Angeboten zur Schulung von Tunnel-Inspektoren
- Zusammenstellung typischer Schadensbilder unterschiedlicher Schweregrade pro Bauwerksteil von Strassentunnel sowie Zuweisung von Zustandsnoten;

Empfehlung 4: Entscheidungsmodell

Überarbeitung oder Fortsetzung der Arbeiten zur Entwicklung eines Entscheidungsmodells, wie es mit dem Einzelprojekt EP4 (Kap. 2.1.2) vorgesehen war.

Empfehlung 5: Prototyp Datenmodell

Fortsetzung der Forschungsarbeit mit der Entwicklung einer Datenbank oder eines Tools zur Unterstützung der Erhaltungsplanung von Strassentunnel. Diese Arbeit entspricht der in diesem Forschungsprojekt zurückgestellten Einzelprojekte EP6 gemäss Initialprojekt [1] (siehe auch Kap. 2.3). Prioritär empfehlen die Autoren des Syntheseberichtes folgende Schritte:

- Formulierung von Anforderungen an diese Tunneldatenbank unter Nutzung der im Rahmen dieser Forschungsarbeit erarbeiteten Ergebnisse
- Entwicklung eines Prototyps (Skizze) dazu.

Literaturverzeichnis

- [1] B. Stempfeler und M. Dell'Antonio, «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln - Initialprojekt,» Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), 2016.
- [2] P. Beeler und R. Weishaupt, «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel: EP1 - Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunnel,» Forschungsprojekt AGT2020-102 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT), 2023.
- [3] S. Matsch, S. Wacker und H. Heller, «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel: EP2 - Diagnostik - Überwachungs- und Inspektionsmethoden,» Forschungsprojekt AGT2020-102 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT), 2023.
- [4] J. Portner und N. Vasic, «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel: EP3 - Festlegung von standardisierten Erhaltungsmassnahmen pro Schadensprozess,» Forschungsprojekt AGT2020-103 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT), 2023.
- [5] B. Stempfeler und B. Schädler, «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln: EP5 - Kostenmodell,» Forschungsprojekt AGT2020-105 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT), 2023.
- [6] Bundesamt für Strassen ASTRA, «Netzzustandsbericht der Nationalstrassen 2023: Ausgabe Stand 2023,» Bern, 2023.
- [7] Emch Berger AG, «Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten- Synthesebericht,» 2010.
- [8] Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute VSS / SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, *Erhaltungsmanagement (EM): Grundnorm, SN 640 900*, 2022.
- [9] Bundesamt für Strassen ASTRA, «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen, Richtlinie ASTRA 12002,» 2005.
- [10] C. Stefan, U. H. Grunicke, V. Prändl-Zika, A. Weninger-Vycudil, A. Hula, A. Van Linn, B. Brozek, D. Prammer und L. D. Mellert, «Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA (OPTIMAL): Forschungsbericht. FFG,» 2020.
- [11] ILF Beratende Ingenieure AG, «Forschungsauftrag AGT2017/002: Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel; Einzelprojekt EP1 - Pflichtenhefte zu Einzelprojekte EP1 bis EP5; Ausschreibung der Dienstleistungen,» 2020.
- [12] Bundesamt für Strassen ASTRA, «KUBA 5.0 Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel: Datenerfassungshandbuch, IT Dokumentation ASTRA 62014.,» 2012.
- [13] AIT Austrian Institute of Technology GmbH, ILF Consulting Engineers Austria GmbH, DIBIT Messtechnik, «AMBITION - Entwicklung eines integrativen

Ansatzes zur Messung und Bewertung von Eisenbahn- und Strassentunnel: Ergebnisbericht Projekt VIF 2015,» 2015.

- [14] DIN Deutsche Institut für Normung, *Grundlagen der Instandhaltung DIN 31051*, 2012.
- [15] Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse Schiene Verkehr (FSV) , *Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Strassentunnel – Bauliche konstruktive Teile: RVS 13.03.31*, 2013.
- [16] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur , *Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)*, 2017.
- [17] B. f. S.- u. Verkehrswesen, *Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING)*, 2017.
- [18] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, *Erhaltung von Tragwerken - Betonbau; Norm SIA 269/2*, 2011.
- [19] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 9: Allgemeine Grundsätze für die Anwendung von Produkten und Systemen», SN EN 1504-9*, 2008.
- [20] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen DAUB, «Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Strassentunnel,» 2018.
- [21] D.A.CH Call, «Innovative Strassen-Tunnelinspektion mit Hilfe von KI-Ansätzen (TUNSPEKT),» 2024.
- [22] F. Sandrone, «Analysis of pathologies and long term behaviour of the swiss national road tunnels,» 2008.
- [23] Bundesamt für Strassen ASTRA , «Leitfaden für Inspektoren von Kunstbauten - IT Dokumentation,» 2021.
- [24] U. Grunicke, «RIBET Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen - Riss-Systematik, Deliverable D2, FFG,» 2019.
- [25] 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/>,» 2023.
- [26] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen DAUB, «Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten - BIM im Untertagebau,» 2019.
- [27] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen DAUB, «Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten, Modellanforderungen - Teil 2 Informationsmanagement: Ergänzung zur DAUB-Empfehlung "BIM im Untertagebau",» 2022.
- [28] Bundesamt für Strassen ASTRA, «Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen Planung und Durchführung des Unterhalts, Richtlinie ASTRA 11002,» 2002.

- [29] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, *Erhaltung von Bauwerken*“, Norm SIA 469, 1997.
- [30] L. Zang, X. Wu, M. Skibniewski, J. Zhong und Y. Lu, «Bayesian-network-based safety risk analysis in construction projects,» 2014.
- [31] ITA Working Group 6 Maintenance and Repair of Underground structures, «Study of methods for repair of tunnel linings,» 2001.
- [32] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, *Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken*, Norm SIA 269, 2011.
- [33] Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute VSS / SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, *Erhaltungsmanagement (EM): Grundlagen zur Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement*, Norm SN 640 907, 2013.
- [34] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, «Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr – Grundnorm, SN 641 820,» 2018.
- [35] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, *Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Externe Kosten*, 2009.
- [36] Schweizerischer Baumeisterverband SBV, «Kalkulationshilfen: Kalkulationsschema SBV Formular 400,» 2021.
- [37] Swiss Academic Software, *CITAVI Literaturverwaltungsprogramm, Version 7.00 (20.11.2024)*, proprietär, 1995.
- [38] Federal Highway Administration, «Tunnel operations, maintenance, inspection and evaluation (tomie) manual: FHWA-HIF-15-005,» Federal Highway Administration, USA, 2015.

Datenverwendung

Dieser Synthesebericht stützt sich auf die Daten und Informationen, welche in den Schlussberichten zu den Einzelprojekten EP1, EP2 EP3 und EP5 zusammengestellt und erarbeitet wurden. Dabei handelt es sich um folgende Datenarten:

- Literatur inkl. Normen und Richtlinien
- Fallbeispiele basierend auf firmeneigene Projektinformationen
- Befragungsdaten aus Interview (nur EP2 und EP5)
- Kostenkennwerte (nur EP5).

Die Normen, Richtlinien und Literatur basieren auf öffentlich zugänglichen Quellen. Sie sind themenspezifisch pro Einzelprojekt kompiliert, ausgewertet und jeweils im Kapitel 1.3 «Stand der Praxis und Forschung» zusammengefasst worden. Die im vorliegenden Synthesebericht referenzierte Literatur, gemäss dem Literaturverzeichnis im Anhang, ist Bestandteil der strukturierten Literaturdatenbank in Citavi (CITAVI [37]) und steht dem Gesamtprojekt zur Verfügung.

In gemeinsamer Zusammenarbeit dokumentierten die vier Einzelprojekte neun Erhaltungsprojekte von bergmännischen Strassentunnel in der Schweiz in strukturierter Art und Weise. Als Datenquelle verwendeten die Forschungsstellen publizierte und firmeneigene Projektdaten und -informationen. Diese Fallbeispiele wurden für die Beurteilung der Vollständigkeit und der Relevanz der Schadensprozesse und Gefährdungsbilder (EP1) sowie auch die Anwendung von Untersuchungsmethoden (EP2) und Instandsetzungsmassnahmen (EP3) verwendet. Dieser Synthesebericht geht im Kap. 0 auf die Fallbeispiele ein und bildet in Anhang I das Fallbeispiel Nr. 4 «Gotschnatunnel» exemplarisch ab. Die vollständigen Datenblätter aller Fallbeispiele finden sich jeweils im Anhang I der Schlussberichte zu den Einzelprojekten.

Im Rahmen EP2 wurde eine telefonische Befragung bei fünf Prüflaboren und Vermessungsbüros durchgeführt. Im Rahmen EP5 fand ebenfalls eine Befragung bei ausgewählten Erhaltungsplanern ASTRA, SBB und kantonalen Tiefbauämtern in Bezug auf Bedürfnisse und Erfahrungen mit Tools (z.B. KUBA) im Hinblick auf die Entwicklung eines Kostentools statt. Beide Befragungen stehen nur als Zusammenfassung der Rückmeldungen im jeweiligen Schlussbericht zur Verfügung.

Einheitliche Kostenkennwerte bspw. heruntergebrochen auf Bauwerksteile liegen i.d.R. nicht vor. Für die Budgetierung werden Erfahrungswerte verwendet. Eine systematische Nachkalkulation von ausgeführten Bauwerken und Rückführung in Kostenkennwerte existieren mit Ausnahme bei der SBB nicht. Die Kostenstruktur ausgeführter Bauwerke beim ASTRA basieren in aller Regel auf dem NPK. KUBA-MS wird für Kostenermittlung nicht verwendet, da es sich als zu aufwendig bzw. komplex erweist. Als Erfolgsfaktor für ein Kostenmodell in der Erhaltungsplanung von Tunnel wird vor allem die Einfachheit des Werkzeuges betont.

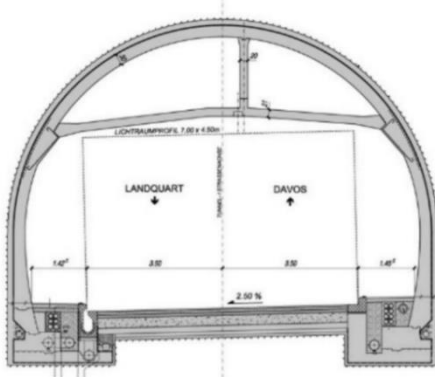
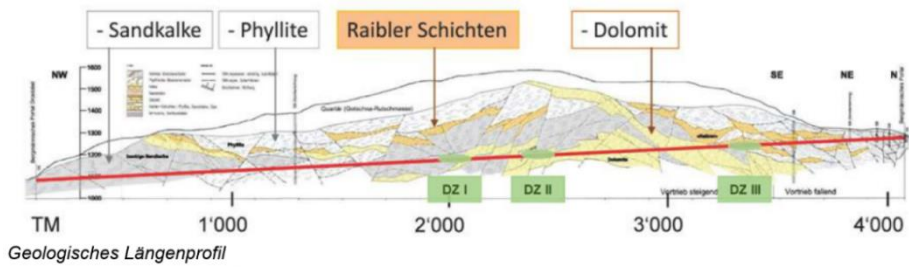
Anhänge

I	Fallbeispiel Nr. 4 Gotschnatunnel.....	114
II	Liste der Schadensprozesse (S.-Katalog).....	118
III	Liste der Befunde (BE-Katalog).....	119
IV	Informationsbereich S.-Katalog	120
V	Beispiel Katalogblatt Schadensprozess	122
VI	Liste der Gefährdungsbilder (GB. Katalog).....	126
VII	Beispiel Katalogblatt Gefährdungsbild.....	127
VIII	Beispiel Beziehungsstruktur GB-23 «Betonabplatzung auf Fahrbahn».....	129
IX	Liste der Untersuchungsmethoden (U.-Katalog)	130
X	Informationsbereiche U.-Katalog.....	134
XI	Bsp. Katalogblatt Untersuchungsmethoden.....	137
XII	Liste der Erhaltungsmassnahmen (M.-Katalog)	139
XIII	Beispiel Katalogblatt Erhaltungsmassnahmen.....	142
XIV	Zusammenfassung der Empfehlungen aus den Einzelprojekten.....	145
XII	Glossar	148

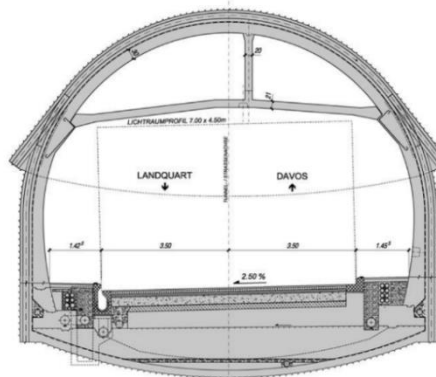
I Fallbeispiel Nr. 4 Gotschnatunnel

FALLBEISPIEL NR. 4 Gotschnatunnel

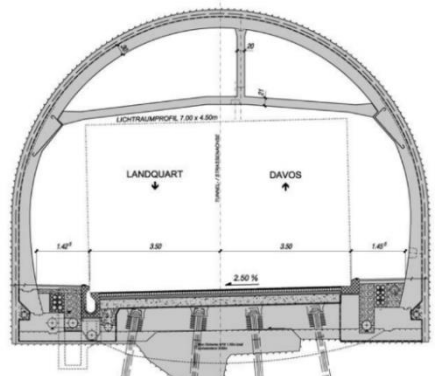
Steckbrief Tunnelobjekt



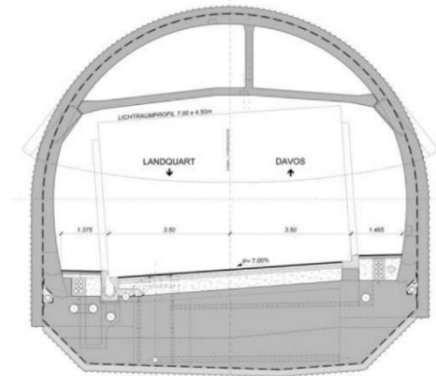
NP bergmännischer Tunnel ohne Sohlgewölbe (Deformationszone I, II, III)



NP bergmännischer Tunnel mit Sohlgewölbe (Deformationszone I)



NP bergmännischer Tunnel mit Sohlverankerung (Deformationszone II)



NP bergmännischer Tunnel mit verstärktem Sohlgewölbe (Deformationszone III)

(Quelle Planausschnitte: Massnahmenprojekt N28 UH TU Gotschna, INGE GOST, 29.03.2017)

Tunneltyp	Bergmännischer Strassentunnel
Nationalstrasse / Kanton	N28, GR
Charakteristik	<ul style="list-style-type: none"> • 1x2-spuriger NS-Tunnel, Gegenverkehr • alpin, klimatisch ausgeprägte Zonen Portalbereich / Tunnelinneres • DTV ca. 15'000 – 20'000, ausgeprägte jahreszeitliche Schwankungen (Tourismus)
Länge	4.2 km
Jahr Inbetriebsetzung; Gesamterneuerung	2005; (2019 - 2020)
Mittlere Höhe	ca. 1'170 m.ü.M.

a

FALLBEISPIEL NR. 4 Gotschnatunnel

Überdeckung	max. Überdeckung 400 m
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> • Geologische Einheiten / Lithologien: <ul style="list-style-type: none"> • Bündnerschiefer (Sandkalke, Phyllite) • Mélange (Dolomit, verschuppte Phyllite, Sandkalke, Dolomitbreccien, Gips, Anhydrit, Kalk, Kalkschiefer, Quarzit, Sandsteine, Kalksandstein, Granit) • Deformationszone I (TM 2020 – TM 2190): <ul style="list-style-type: none"> • Übergangszone von Bündnerschiefer zu Mélange • Dolomit verschuppt mit Phylliten und Sandkalcken, Scherzone, Kakirit • Tropfwasser und Wasserzutritte (bis ca. 3 l/s) • stark mit Sulfat übersättigtes Bergwasser • Deformationszone II (TM 2420 – TM 2580): <ul style="list-style-type: none"> • Mélange • Dolomit, wenig verschuppte Phyllite, lokal Gips, Anhydrit • Tropfwasser und Wasserzutritte (bis ca. 1 l/min) • Deformationszone III (TM 3270 – TM 3440): <ul style="list-style-type: none"> • Mélange • Dolomit, bunte Schiefer, Sandstein, Gips, Anhydrit, Kalkschiefer • Vortrieb weitgehend trocken • Hydrogeologie <ul style="list-style-type: none"> • Im Bündnerschiefer traten Tropf- und Quellwasser mit Schüttungen zwischen 2 – 10 l/s lokal relativ häufig auf • Vortrieb in Mélange mit Ausnahme von Portalbereich Selfranga nahezu trocken • nach Fertigstellung des Tunnels über ganze Länge gemessene Wasserschüttmengen in Rigolen und Drainageleitungen korrelieren gut mit bei Bau festgestellten Wasserzutritten.
Tunnelanlage Typ, Verkehrsregime	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Röhre à 2 Spuren • Gegenverkehr • Paralleler Sicherheitsstollen • Querverbindungen ca. alle 300m
Zwischendecke / Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Querlüftung mit Portalzentralen • Tragsystem Zwischendecke: Zweifeldträger mit seitlichen Auflagern und mittiger Aufhängung (an Trennwand Zu-/Abluftkanal)
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> • Trennsystem • Bergwasser: Gewölbedrainage / Bergwasserleitung, in Instandsetzungsbereichen zusätzlich Sohlrainage • Strassenabwasser: Schlitzrinne / Planumsentwässerung / Strassenwasserleitung
Bauweise bergm. Tunnel	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbruchverfahren: <ul style="list-style-type: none"> • Sprengvortrieb (SPV) steigender Vortrieb • Deutsche Bauweise fallend (600 m von Portal Selfranga) • Profilform: generell Hufeisenprofil / lokal Maulprofil • Bauart Verkleidung: <ul style="list-style-type: none"> • Gewölbe Beton unbewehrt (30 cm) • Fundament (Sohlgewölbe) Beton unbewehrt (50 - 90 cm) • Fundament (Platte Sohlverankerung) Stahlbeton (60 cm) • Fundament (Sohlgewölbe verstärkt) Stahlbeton (180 – 240 cm) • Abdichtungskonzept: Ableitkonzept (drainierend)
Längsneigung	<ul style="list-style-type: none"> • bergmännische Strecke: max. 4.8%
Eignung als Fallbeispiel	<ul style="list-style-type: none"> • unterschiedliche Schädigungsmechanismen / Schäden • verschiedene Einwirkungen aus Baugrund (Quellen, sehr aggressives Bergwasser, Ausfällungen) • ausführliche Überwachungs- und Zustandsdaten (durchgehend von Bauphase über quasi ganze Lebensdauer) • div. ausgeführte SOMA, EP (Neubau Sohlgewölbe, Knautschzone, Verstärkung best. Gewölbe, Paramentersatz)

FALLBEISPIEL NR. 4 Gotschnatunnel

	<ul style="list-style-type: none"> etappierte Instandsetzung inkl. Provisorien in Zwischenphasen während 3 Bauzeitfenstern mit Vollsperrung
Objektspezifische Erhaltungsplanung	
Visuelle Befunde (EP1; ID visuelle Befunde)	<ul style="list-style-type: none"> Mechanische Integrität: Gewölbeverformungen, Gewölbekonvergenzen, Sohlhebungen, Längs- / Querrisse, Abplatzungen, Belagsrisse, Spurrinnen, Unebenheiten, vereinzelt klaffende Diagonalrisse Kabelschächten <ul style="list-style-type: none"> Setzungen, Verschiebungen, Verformungen, Hebungen (BE-1100) Risse (BE-1300) Abplatzungen (BE-1400) Belagsschäden (BE-1500) Chemische Integrität: Korrosionsflecken <ul style="list-style-type: none"> Korrosion (BE-2100) Undichtigkeiten: Feuchte Stellen, Nasse Stellen, Kalkausscheidung, Ausblühungen <ul style="list-style-type: none"> Undichtigkeit (BE-3000) Funktionsstörung: Verformungen Entwässerungsleitungen, Deformationen und Versätze Kabelschutzrohre <ul style="list-style-type: none"> Querschnittsverluste in Drainage- / Entwässerungssystem (BE-4100)
Erkannte Schadensprozesse (EP1; ID Schadensprozesse)	<ul style="list-style-type: none"> Schadensprozess Stahlbeton: Bewehrungskorrosion <ul style="list-style-type: none"> Bewehrungskorrosion (S-11) Schadensprozess Baustahl: verrostete Schachtrahmen / -deckel <ul style="list-style-type: none"> Metallkorrosion (S-21) Schadensprozess Baugrund: starke Auflockerung / Verwitterung in kakiritisierten Tunnelabschnitten, Sulfatquellen / Quellprozess in Anhydrit <ul style="list-style-type: none"> Belastungsänderung Baugrund (S-31)
Mögliche Gefährdungsbilder (EP1; ID Gefährdungsbilder)	<ul style="list-style-type: none"> Tragwerksversagen <ul style="list-style-type: none"> Versagen Gewölbe (GB-11) Versagen Fundation (GB-12) Betriebssicherheit <ul style="list-style-type: none"> unzulässige Verformungen Tragwerk (GB-21) ungenügender Fahrkomfort / Ablenkung (GB-22) Betonabplatzung auf Fahrbahn (GB-23) Feuchtigkeit / Eisbildung (GB-24)
Durchgeführte Untersuchungen (EP2; ID Untersuchungsmethoden)	<ul style="list-style-type: none"> Visuelle Untersuchung: Inspektionen, Hauptinspektion (2009, 2015), Rissaufnahmen, Kanal-TV <ul style="list-style-type: none"> Sichtkontrolle (Betrieb / Unterhalt) (U-1-110) Hauptinspektion visuell (U-1-121) Visuelle Inspektion Fach-Spezialist (U-1-123) Sichtkontrolle detailliert, lokal (U-1-131) visuelle Aufnahmen, Einzelbilder (U-1-211) Kanal-TV (U-1-214) Einsehen Kontrollöffnungen und Schächte (U-1-221) Messtechnische Untersuchung am Bauwerk: Rissaufnahmen, Nivellement, Gleitmikrometer, Extensometer, Messung Ankerkräfte, Distometermessungen, Aufnahme Gewölbestärken mit Georadar, Ebenheitsmessungen Fahrbahn <ul style="list-style-type: none"> Händische Messung (U-2-111) Nivellement (U-2-121) Gleitmikrometer / Gleitdeformeter (U-2-131) Stangenextensometer (U-2-136) Zugprüfungen Anker und Zugstangen (U-2-231) Automatische Belags- und Strassenzustandsprüfung (U-2-265) Georadar (U-2-451) Laborprüfung: Betondruckfestigkeit, Chloridgehalt, Quelldruckmessung, Triaxialversuche für vorkommende Petrologien, geol. Dünnschliffanalysen <ul style="list-style-type: none"> Chloridanalyse (U-3-111) Druckfestigkeit Beton (U-3-211)

FALLBEISPIEL NR. 4 Gotschnatunnel

	<ul style="list-style-type: none"> • Quelldruckmessung (U-3-213) • Triaxialversuche (U-3-214) • Rohdichte Beton (U-3-311) • Mikroskopische Untersuchung am Dünnschliff (U-4-421) • Statische, Geodätische und konstruktive Untersuchungen: Rückrechnung Ausbauwiderstände, Schlitzpressenmessungen <ul style="list-style-type: none"> • Nachrechnungen Bauwerk / Bauwerksteil (U-4-110) • Überprüfung / Aktualisierung Statik (U-4-120) • Schlitzpressenmessungen (U-4-341)
Wirksamkeit der Untersuchungen (EP2)	<ul style="list-style-type: none"> • eindeutige Identifizierung des relevanten Schadensprozesses • Rückrechnung der vorherrschenden Ausbauwiderstände • Abschätzung des vorliegenden Quelpotentials sowie der zu erwartenden Hebungsraten in Abhängigkeit des Ausbauwiderstands • Schaffung der Grundlage für örtliche Eingrenzung der Instandsetzungsabschnitte unter Berücksichtigung der vorgängig definierten Instandsetzungsstrategie
Durchgeführte Massnahmen (EP3, ID Massnahmen)	<ul style="list-style-type: none"> • Gewölbe: Paramentersatz, Vorbetonieren, Beschichtung, Rissinjektionen in Paramenten <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Beschichtung (M-1350) • Rissinjektionen mit Klebepackern (M-1410) • Teilersatz Abdichtung (M-1490) • Ersatz und Verstärkung Innengewölbe (M-1510) • Fahrbahn / Fahrbahnfundation: Ersatz der Fahrbahn in Zusammenhang mit Neubau Sohlgewölbe <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Fundationsschicht, Belagersatz (M-5440) • Bankett: Bankettersatz in Zusammenhang mit Neubau Gewölbewiderlager / Sohlgewölbe <ul style="list-style-type: none"> • Deckbelagersatz (M-6220) • Bankettersatz (M-6320) • Leitungen / Schächte: Ersatz Löschwasserleitung, Ersatz Gewölbedrainage, Ersatz Berg- / Strassenabwasserleitung, Ersatz Planumsentwässerung, Neubau Sohl drainage, Ersatz Kabelschutzrohre, Ersatz Randsteine / Schlitzrinnen, Ersatz Kontroll- / Siphonschächte in Zusammenhang mit Neubau Gewölbewiderlager / Sohlgewölbe <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Löschwasserleitung, Kabelschutzrohre, Strassenwasser- / Bergwasserleitung im Bankett (M-7110, M-7140) • Ersatz Entwässerungsleitungen, Kabelschutzrohre unter der Fahrbahn (M-7330) • Ersatz Randsteine, Schlitzrinne (M-7430, M-7440) • Totalersatz Siphon- / Kontroll- / Einlauf- und Kabelschächte (M-7520, M-7530, M-7540) • Ersatz Gewölbedrainage-Leitung, Einbau Sohl drainage (M-7630) • weitere Bauwerksteile: Ersatz SOS- / Hydrantennischen und Gewölbedrainage-Nischen in Zusammenhang mit Gewölbeverstärkung / Sohlgewölbe • Umgestaltungsmassnahmen und Massnahmen aufgrund von Erweiterungen, Ergänzungen, Grundnutzungs- oder Normänderungen⁴: <ul style="list-style-type: none"> • Einbau bewehrtes Sohlgewölbe inkl. Vollabdichtung • Einbau Knautschzone
Wirksamkeit der bisherigen Massnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> • Gewährleistung der Tragsicherheit (Erhöhung Ausbauwiderstand) und der Gebrauchstauglichkeit (Ausgleich bisheriger Sohlhebungen, Reduktion Hebungsgeschwindigkeit) • Erhöhung Betriebssicherheit (Gewährleistung normkonformes Quergefälle / Fahrbahnenentwässerung, Ersatz beschädigter Fahrbahnabschnitte)
Weitere geplante Instandsetzungsmassnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> • keine, Instandsetzung abgeschlossen • Überwachung Instandsetzungsstrecken

II Liste der Schadensprozesse (S.-Katalog)

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 Beschädigung / Alterung Kunststoff
S-51	Beschädigung / Alterung Kunststoff
S-51.1	Beschädigung / Alterung Abdichtung
S-6	Schadensprozess Strassenoberbau
S-61	Beschädigung Strassenoberbau
S-61.1	Belagsverformungen
S-61.2	Belagsschäden
S-61.3	Strukturelle Schäden

III Liste der Befunde (BE-Katalog)

BE. visuelle Befunde			
			BE-Bezeichnung nicht in KUBA vorhanden
			unterschiedliche Gliederung best. KUBA-Eintrag
			Matching-KUBA
ID	Befunde (BE) bergm. Tunnel / Tagbautunnel	Eintrag Nr.	H-Code KUBA-Bezeichnung
BE-1000	Mechanische Integrität	1000	1 Mechanische Integrität
BE-1100	Setzungen, Verschiebungen, Verformungen, Hebungen	1100	10 Setzungen, Verschiebungen
BE-1101	Setzungen	1101	1002 Setzungen
BE-1102	Verschiebungen	1102	1004 Verschiebungen
BE-1103	Verformungen	1103	11 Verformungen
BE-1104	Hebungen	1104	k. E. k. E.
BE-1200	Fugenversätze, Fugenöffnungen, Kantenausbrüche	1200	1200 k. E.
BE-1201	Fugenversätze / Fugenabsätze	1201	k. E. k. E.
BE-1202	Fugenöffnungen	1202	k. E. k. E.
BE-1203	Kantenausbrüche	1203	k. E. k. E.
BE-1300	Risse	1300	12 Risse
BE-1301	Netzrisse	1301	1206 Netzrisse
BE-1302	Längsrisse	1302	1210 Längsrisse
BE-1303	Querrisse	1303	1211 Querrisse
BE-1400	Abplatzungen	1400	13 Abplatzungen, Brüche und lose Teilstücke
BE-1500	Belagsschäden	1500	k. E. k. E.
BE-1501	Belagsrisse	1501	k. E. k. E.
BE-1502	Ausbrüche	1502	1313 Ausbrüche
BE-1503	Kornausbrüche	1503	1314 Kornausbrüche
BE-1504	Schlaglöcher	1504	1316 Schlaglöcher
BE-1505	Spurrinnen	1505	1101 Spurrinnen
BE-1506	Unebenheiten	1506	1102 Unebenheiten
BE-1600	Absanden der Betonoberfläche	1600	144 Absanden
BE-2000	Chemische Integrität und Zusammensetzung	2000	2 Chemische Integrität und Zusammensetzung
BE-2100	Korrosion	2100	22 Korrosion
BE-2101	Rostfahnen/-flecken	2101	2203 Rostflecken
BE-2102	Lokale Korrosion	2102	2212 Lokale Korrosion
BE-2103	Flächenhafte Korrosion	2103	2213 Flächenhafte Korrosion
BE-3000	Undichtigkeit	3000	3 Dichtigkeit, Verschmutzungen
BE-3001	Feuchtstellen	3001	k. E. k. E.
BE-3002	Lokale Nassstellen	3002	302 Lokale Nassstellen
BE-3003	Flächenhafte Nassstellen	3003	303 Flächenhafte Nassstellen
BE-3004	Wasserzutritte (tropfend / fließend)	3004	304 Wasserführung
BE-3005	Eisbildung	3005	307 Eisbildung Platten
BE-3006	Mineralische Ausblühungen / Sinter	3006	310 Aussinterung
BE-4000	Funktionsstörungen	4000	4 Funktionsstörungen
BE-4100	Querschnittsverluste in Drainage- / Entwässerungssystem	4100	410 Verstopfte Leitungen
BE-4200	Ausfällungen, Versinterungen	4200	k. E. k. E.
BE-4201	Ausfällungen	4201	k. E. k. E.
BE-4202	Versinterungen	4202	k. E. k. E.

IV Informationsbereich S.-Katalog

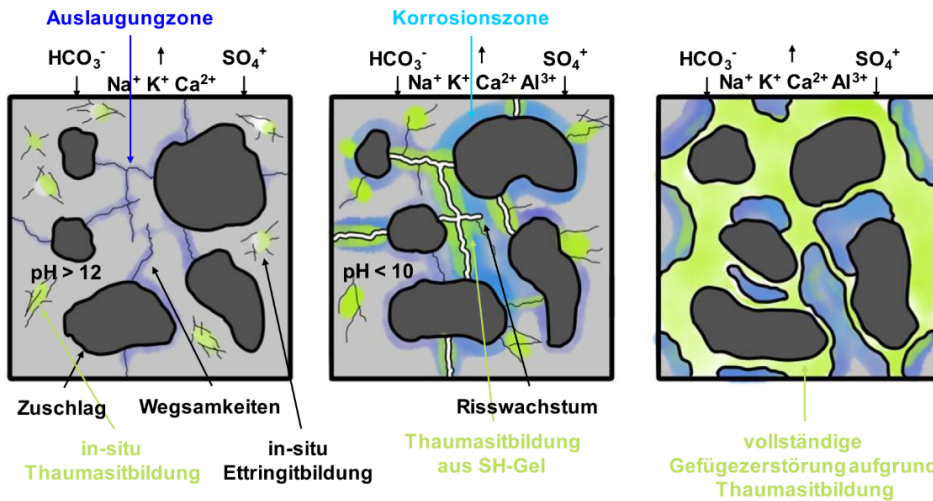
Tab. 1 Übersicht Informationsbereich S.-Katalog

Information (Attribut)	Beschrieb Attribut	Art der Daten
Strukturierung Schadensprozesse		
ID S.	Eindeutige ID (gemäss Gliederung S, siehe Kap.)	Nummerierung S-##.# (obligatorisch)
S. Nummer	Fortlaufende Nummerierung gem. Gliederungsstruktur EP1 (siehe Kap.)	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.) Eindeutige Bezeichnung des Schadensmedium	Werteliste (Text) (obligatorisch)
S. Bezeichnung	Schadensprozessstyp gem. Gliederungsstruktur EP1 (siehe Kap.) Eindeutige Bezeichnung des Schadensprozessstyps	Freitext (obligatorisch)
Beschreibung	Beschrieb der S. Enthält: <ul style="list-style-type: none"> • 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. (Mehrfachzuweisung)
BE. Befund	Zuweisung zu visuellen Befunden, welche eine Folge des Schadensprozesses sein können	Werteliste «ID Befunde» (siehe Kap.) (Mehrfachzuweisung)
Auslöser / Ursachen und begünstigende Faktoren		
Auslöser / Ursachen	Auflistung der Auslöser / Ursachen die erfüllt sein müssen damit Schadensprozess ablaufen kann. <ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • Zuweisung zu Gefährdungsbildern, welche die kurzfristige Konsequenz des Schadensprozesses sein können • Kurzfristige Konsequenzen sind Gefährdungen mit kurzer Vorwarnzeit. 	Werteliste «ID Gefährdungsbild» gem. Kap. (Mehrfachzuweisung)

	Als Vorwarnzeit wird die Zeitdauer zwischen Auftreten der ersten Befunde bis zum Eintreten der Gefährdung verstanden.	
Konsequenz langfristig	Zuweisung zu Gefährdungsbildern, welche die kurzfristige Konsequenz des Schadensprozesses sein können <ul style="list-style-type: none"> 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. (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

V Beispiel Katalogblatt Schadensprozess

Betonangriff / Gefügezerstörung:	ID-S-Code: S-12:	Blatt 06
• Sulfatangriff extern	• S-12.3	



Quelle: Prozessskizze Sulfatangriff extern (Lombardi AG)

Beschreibung Schadensprozess:

Sulfatangriff allgemein: Der Sulfatangriff auf den Beton ist ein komplexer Vorgang, der sowohl chemische als auch physikalische Prozesse miteinander verbindet und ebenso treibend wie auch lösend wirken kann. Der treibende Angriff führt zu einer Volumenzunahme des Betons. Je nach Sulfatquelle wird zwischen externem und internem Sulfatangriff unterschieden. Der Sulfatangriff wird oftmals von einer Auslaugung des Zementsteins (siehe S-11.4) überlagert, welche primär entlang von Inhomogenitäten (Risse, Fugen, Kiesnester, Kontaktflächen, etc.) auftritt. Die Inhomogenitäten dienen als Wegsamkeiten für das zirkulierende sulfathaltige Wasser und begünstigen den Angriff. Zu erwähnen ist, dass die primäre Ettringitbildung während der Erhärtung des Frischbetons schadlos erfolgt und somit kein Schadensprozess ist bzw. als Sulfatangriff gilt. Die verschiedenen Erscheinungsformen des Sulfatangriffs sind nachfolgend aufgelistet.

Angriffsart	Betonschädigender Stoff	Vorkommen	Wirkung
Treibender externer Sulfatangriff	Sulfatlösungen	Grundwasser, Böden	Reaktion gelöster Sulfationen mit C3A-Phase des Zementsteins unter Volumenzunahme zu Ettringit und anderen Sulfatphasen
Lösender externer Sulfatangriff	Sulfatlösungen	Grundwasser, Böden	Reaktion gelöster Sulfationen mit den CSH-Phasen zu Thaumasisit und anderen Sulfatphasen verbunden mit einem lösenden Angriff
Treibender interner Sulfatangriff	Sulfate, Sulfide (Gips, Anhydrit, Pyrit, Pyrrhotin)	Gesteinskörnung, Verunreinigungen in Gesteinskörnung oder Zugabewasser	Reaktion gelöster Sulfationen mit C3A-Phase des Zementsteines unter Volumenzunahme zu Ettringit
	Sulfatphasen im Zementstein	Beton, der hohen Temperaturen während der Erhärtung ausgesetzt ist (hohe Hydratationswärme, Wärmebehandlung)	Umwandlung von Monosulfat und -carbonat im erhärteten Zementstein unter Volumenzunahme zu Ettringit

Sulfatangriffe können durch nachfolgende Schadensbilder charakterisiert werden:

- Sulfatkristallisation und Absanden der Oberfläche
- Ausblühungen
- Rissbildung und Abplatzungen an der Oberfläche
- Risse im Innern des Betongefüges
- Zerstörung des Betongefüges
- vollständiger Festigkeitsverlust
- Verbundverlust

Betonangriff / Gefügezerstörung:	ID-S-Code: S-12:	Blatt 06
• Sulfatangriff extern	• S-12.3	

Auslaugung Zementstein: Der externe Sulfatangriff ist in der Regel vergesellschaftet mit einer vorgängigen oder parallel ablaufenden Auslaugung des Zementsteins. Die Auslaugung des Zementsteins vergrössert dessen Permeabilität, was wiederum die Wassermigration und den Abtransport der gelösten Stoffe begünstigt. In der Tunnelumgebung mit fliessendem Bergwasser kann dies – im Gegensatz zum statischen Milieu bei Staudämmen, wo sich der Konzentrationsgradient mit der Zeit ausgleicht und die Auslaugungsfront zunehmend verlangsamt – zur vollständigen Auslaugung des Bauteils führen. Die Auslaugung des Zementsteins läuft in drei Phasen ab.

- Phase 1 – Auslaugung von Alkalien, Auflösung Portlandit: In dieser Phase wird der Zementstein ausgelaut. Dabei werden Bestandteile der Zementmatrix aufgelöst und abtransportiert. Die Auslaugung erfolgt einerseits durch Diffusion (langsam) andererseits auch durch Advektion (schnell) entlang der Wasserwegigkeiten im Beton (Risse, etc.). Die Auslaugungszone schreitet stetig voran. Obschon in dieser Phase bereits alle Alkalien aus der Auslaugungszone wegtransportiert werden können, wird der hohe pH-Wert dank der CA-Pufferung durch den Portlandit noch aufrechterhalten, was für die Stabilität von Ettringit und der CSH-Phasen wichtig ist.
- Phase 2 – Übergangsphase: Als Folge der teilweisen Auflösung des Portlandits in der Phase 1 erhöht sich die Porosität des Zementsteins. Der Austausch von Wasser zwischen der Auslaugungszone und den Wasserwegigkeiten bzw. die Advektion wird verstärkt, was sowohl eine Intensivierung als auch eine räumliche Ausweitung der Auslaugung nach sich zieht. Sobald der Portlandit vollständig aufgebraucht ist, kommt es zu einem chemischen Milieuwechsel, da Calcium nicht mehr durch die Portlanditlöslichkeit gepuffert werden kann. Der pH-Wert in der Porenlösung verringert sich, was zu einer Destabilisierung des Ettringits und der CSH-Phasen führt.
- Phase 3 – Umwandlung von C-S-H zu S-H: Aufgrund der in Phase 2 erschöpften Pufferkapazität der Ca-Konzentrationen, kommt es in der Phase 3 zu einer Umwandlung der C-S-H-Phasen zu einem amorphen S-H-Gel (Kieselgel). Es bildet sich eine sehr permeable Korrosionszone zwischen den Wasserwegigkeiten und der fortschreitenden Auslaugungszone aus, welche fast nur noch aus Siliciumoxid und Wasser besteht.

Externer Sulfatangriff: Beim externen Sulfatangriff kann das Sulfat aus verschiedenen Quellen (Grundwasser, Böden, Gebirge, etc.) stammen. Die daraus entstehenden Sulfatschäden sind in ihren Abläufen sehr unterschiedlich und können in Sekundäre Ettringitbildung, Gipsbildung und Thaumasitbildung unterteilt werden. Ettringitbildung ist häufig auf der Gewölbeinnenseite der hauptsächlich Sulfatangriff, wo der Beton nicht in direktem Kontakt zu hochmineralisierten Bergwässern steht und auch nicht zwischen dem Gebirge und Gewölbe eingespannt ist.

Bei der sekundären Ettringitbildung reagieren die eindringenden Sulfate mit dem Calciumaluminiumhydrat des Zements zum sehr voluminösen Ettringit ($3\text{CaSO}_4 + 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O} + 26\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Der sich bildende Ettringit kann bis zum 8-fachen Volumen seiner Ausgangsstoffe expandieren. Anfänglich führt die Reaktion zu einer Gefügeverdichtung des Betons und damit verbunden einem Anstieg der Druckfestigkeit. Der weiter ansteigende Kristallisationsdruck führt letztlich aber zu Rissen resp. zur Gefügezerstörung des Beton. Wichtige Faktoren für die sekundäre Ettringitbildung bei externem Sulfatangriff sind:

- unterschiedlicher Angriffsgrad der Sulfationen in absteigender Folge: MgSO_4 , Na_2SO_4 , K_2SO_4 , CaSO_4
- Sulfatbeständigkeit nimmt mit zunehmendem C3A-Gehalt des Portlandzementklinkers ab
- Hohe Kapillarporosität des Betons fördert das Eindringen von Sulfatlösungen und schwächt dessen Sulfatwiderstand

Gipsbildung oder Gipstreiben in Beton kann vor allem bei sehr hohen Sulfatkonzentrationen (SO_3 -Gehalt > 20%) stattfinden. Bei dieser Art des Sulfattreibens reagiert das Calciumhydroxid des Zementsteins mit den Sulfationen der eindringenden Lösung unter Bildung von Gips, was mit einer Volumenzunahme verbunden ist. Das Gipstreiben ist im Tunnelbau nicht relevant und kommt nur in bereits durch Ettringit und Thaumasit stark beschädigten Bereichen im unmittelbaren Kontaktbereich zum umgebenden Gebirge vor.

Bei Sulfatangriff aufgrund sulfathaltigem Bergwasser in Tunneln tritt aufgrund der Bergwasserchemie hauptsächlich die Thaumasitbildung ($\text{Ca}_6[\text{Si}(\text{OH})_6]_2\cdot 24\text{H}_2\text{O}\cdot ([\text{CO}_3]_2\cdot [\text{SO}_4]_2)$) in Erscheinung. Dies ist insbesondere auf der Gewölbeaussen-seite der Fall, wo der Beton in direktem Kontakt zu hochmineralisierten Bergwässern steht und die Rissbildung / Abplatzungen aufgrund der Einspannung zwischen Gebirge und Gewölbe verhindert wird. Die sekundäre Ettringitbildung tritt auf der Aussenseite nur untergeordnet auf. Für die Thaumasitbildung müssen lediglich Sulfat- und Karbonationen und z.T. Calcium durch das zirkulierende Bergwasser zugeführt werden. Thaumasitbildung ist bereits bei tiefen Sulfatkonzentrationen möglich. Tiefe Temperaturen (< 15 °C) begünstigen die Bildung von Thaumasit gegenüber Ettringit. Thaumasit bleibt zudem bis zu Temperaturen > 100 °C und auch bei tiefen pH-Werten stabil. Im Gegensatz zu Ettringit kann Thaumasit daher auch in der Auslaugungs- und Korrosionszone gebildet werden. Im Tunnelmilieu wird die Thaumasitbildung differenziert in die in-situ Thaumasit-Bildung, sowie in die Thaumasit-Bildung in der Auslaugungs- und Korrosionszone. Bei der in-situ Thaumasitbildung bildet sich der Thaumasit im noch kaum alterierten Zementstein in-situ aus. Der gesunde Zementstein weist noch keine Auslaugungsphänomene auf und das Milieu ist noch alkalisch. Bei externer Sulfatzufuhr bildet sich aufgrund des noch genügend vorhandenen Aluminiums im Zementstein zunächst Ettringit, verbunden mit einer Gefügeauflockerung und

Betonangriff / Gefügezerstörung:	ID-S-Code: S-12:	Blatt 06
• Sulfatangriff extern	• S-12.3	

Rissbildung. Dies wiederum begünstigt die Nachfuhr von sulfatreichem Wasser. Die expansive Ettringitbildung ist somit häufig eine Vorstufe der in-situ-Thaumasitbildung. Da stark mineralisierte Bergwasser in den meisten Fällen neben Sulfat auch Hydrogenkarbonat und andere betonaggressive Stoffe enthält, verläuft der Sulfatangriff nicht nur über die Ettringitbildung wie beispielsweise bei Laborprüfungen. Durch die Zufuhr von Kohlensäure (HCO_3^-), welche in den meisten natürlichen Wässern enthalten ist, scheint die Bildung von Thaumasit auch im alkalischen Milieu bevorzugt zu werden. Dabei kann sich der Thaumasit entweder direkt durch die Reaktion der Sulfatlösung mit den C-S-H-Phasen des Zementsteins in Anwesenheit von Calciumcarbonat (Gesteinskörnung, Kalksteinmehl, karbonatisierter Zementstein) und Calciumsilicat (Zementstein) oder indirekt bei der Umwandlung von Ettringit bilden. Bei der indirekten Thaumasitbildung, ausgehend von Ettringit, wird Aluminium im Kristallgitter von Ettringit durch Silicium substituiert und zusätzlich Karbonat eingebaut.

In der stark ausgelaugten Korrosionszone ist der verbleibende Zementstein sehr porös und besteht fast ausschliesslich aus einem amorphen S-H-Gel. Durch die pH-Reduktion, welche in der Übergangsphase einsetzt, wird auch der Ettringit instabil und das darin angereicherte Aluminium abtransportiert. In der Korrosionszone verbleibt daher nur noch Silicium als interner Reaktionspartner für extern zugeführte Stoffe, wodurch sich das S-H-Gel zu Thaumasit umwandelt. Der limitierende Faktor ist dabei nicht das intern vorhandene Silicium sondern die Menge an extern zugeführtem Sulfat, Karbonat und insbesondere Calcium. Der Eintrag dieser Stoffe hängt sowohl von der Konzentration im Bergwasser wie auch von der Durchflussrate ab. Da die Korrosionszone eine sehr hohe Permeabilität aufweist und der Stoffeintrag während einer längeren Dauer bzw. Nutzungsdauer des Tunnels erfolgt, kann sich bereits bei einem niedrigen Mineralisationsgrad Thaumasit bilden. Es hat sich zudem gezeigt, dass bereits in mässig ausgelaugten Bereichen, in welchen Ettringit und andere aluminiumhaltige Phasen noch stabil sind (Übergangszone), viele Bergwässer bereits ausreichend Sulfat und Karbonat enthalten, um grosse Mengen an Thaumasit zu bilden.

Da der hydratisierte Portlandzement über 70% C-S-H-Phasen enthält, kann sich praktisch der ganze Zementstein bei idealen Bedingungen direkt in Thaumasit umwandeln. Um die gesamte SiO_2 -Reserve aus der C-S-H-Phase umzusetzen, muss allerdings mit dem Bergwasser neben Karbonat und Sulfat auch eine gewisse Menge Calcium zugeführt werden. Wenn rund 20 – 50% des Zementsteins in Thaumasit umgewandelt wird, kommt es zu einem vollständigen Festigkeitsverlust, da Thaumasit kein Bindevermögen aufweist. Auch die Thaumasitbildung ist – verglichen mit der Ettringitbildung jedoch einer kleineren – Volumenänderung (1.5 – 4-fache Volumenzunahme) verbunden.

Auslöser / Ursachen: Damit der externe Sulfatangriff auftreten kann, müssen die nachfolgenden Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

- Sulfat aus externen Quellen
- Verfügbarkeit von Feuchtigkeit

Konsequenzen: Der externe Sulfatangriff kann zu einer zunehmenden Zerstörung und Aufweichung des Betongefüges führen. Neben dem damit verbundenen Festigkeits- und Querschnittsverlust können aufgrund der intensiven Rissbildung auch weitere Schadensprozesse wie Bewehrungskorrosion (siehe S-11) oder Betonangriff (siehe S-12) infolge AAR, Betonkorrosion oder Frost- / Tausalzschäden ausgelöst oder verstärkt werden. Der Sulfatangriff stellt insbesondere bei einschaliger Spritzbetonauskleidung eine erhebliche Gefährdung dar. Aufgrund des Verbundverlustes kann die Haftung zum Felsuntergrund grossflächig verlorengehen und ganze Teile der Spritzbetonauskleidung vom Tunnelgewölbe herunterbrechen. Zudem ist der Spritzbeton aufgrund seines mehrschichtigen Aufbaus und der erhöhten Durchlässigkeit anfälliger auf Sulfatangriffe als Ortbeton- oder Fertigbetonbauteile. Bei Ortbeton- oder Fertigteilbauteilen treten massive Sulfatschäden eher lokal auf. Die Betonschädigung infolge Sulfatangriff und der damit verbundenen Folgeschäden haben einen direkten Einfluss auf die Tragsicherheit des Bauteils und die Betriebssicherheit des Tunnels. Betroffen vom Sulfatangriff sind auch nicht tragende zementöse Bauteile die über längere Zeiträume mit dem Bergwasser in Kontakt stehen (z.B. Rigolen, Schächte, etc.). Es kann auch hier zu einer tiefgreifenden Aufweichung und zum vollständigen Festigkeitsverlust des Zementsteins und somit zur Einschränkung der Betriebssicherheit kommen.

Typ Schadensprozess	Auftretende visuelle Befunden	
Schadensprozess Stahlbeton	ID-BE-Code:	
	• BE-1100	Setzungen, Verschiebungen, Verformungen, Hebungen
	• BE-1300	Risse
	• BE-1400	Abplatzungen
	• BE-1600	Absanden der Betonoberfläche

Betonangriff / Gefügezerstörung: • Sulfatangriff extern	ID-S-Code: S-12: • S-12.3	Blatt 06
Auftreten abhängig von Bauwerksteil: nein	Auftreten abhängig von Bauart: Ja	
Auftreten bei Bauwerksteilen ID-BWT-Code: • BWT-XX BWT unabhängig	Auftreten bei Bauarten ID-BA-Code: • BA-BK-01 Betonkonstruktionen • BA-BK-03 Stahlbetonkonstruktion • BA-BK-05 Spannbetonkonstruktion • BA-SBK-01 Unarmierte Spritzbetonkonstruktion • BA-SBK-02 armierte Spritzbetonkonstruktion • BA-SBK-03 faserarmierte Spritzbetonkonstruktion	
Auslöser / Ursachen: • Sulfat aus externen Quellen • Verfügbarkeit von Feuchtigkeit	Begünstigender Faktor: • hohe Sulfatkonzentration / Aggressivität Sulfationen • geringe Sulfatbeständigkeit Zementklinker / hoher Zementanteil im Klinker • hohe Kapillarporosität im Beton (Auslaugung) / unzureichende Betonqualität • Temperaturen < 15°C (Thaumasitbildung) • ständige Zufuhr von Sulfatlösung • Anwesenheit von Calciumcarbonaten / -silikaten • Bergwasser unter Druck • Vorschädigung Beton (Tragwerkskonzept, Eigenspannungen, Rissbildung / -verteilung)	
Konsequenz kurzfristig⁶: ID-GB-Code: • GB-23 Betonabplatzung auf Fahrbahn	Konsequenz langfristig: ID-GB-Code: • GB-11 Versagen Gewölbe • GB-12 Versagen Foundation • GB-13 Versagen Zwischendecke • GB-14 Versagen Werkleitungskanal / Fahrbahnplatte • GB-15 Versagen Aufhängung • GB-21 Unzulässige Verformungen Tragwerk	
Normen und Literatur: • Betonpraxis [6] • Schadensmechanismen [26] • Schädigungsmechanismen der Betonkorrosion in Tunnelbauwerken [18] • Analysis of concrete in a vertical ventilation shaft exposed to sulfate-containing groundwater for 45 years [15]	Fallbeispiele: • Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre • Nr. 5 Gubristunnel • Nr. 6 Tunnel Belchen	
Verfallsfunktionen: • MAINLINE Deliverable 2.2: Degradation an intervention modelling techniques; Kap. 9.3.3 [8] • Analysis of pathologies an long term behaviour of the swiss national road tunnels, Kap. 2.2.2 und Kap. 2.4 Tab. 2.7 [21]		

⁶ Kurzfristige Konsequenzen sind Gefährdungen mit kurzer Vorwarnzeit. Langfristige Konsequenzen sind Gefährdungen mit langer Vorwarnzeit. Als Vorwarnzeit wird die Zeitdauer zwischen Auftreten der ersten Befunde bis zum Eintreten der Gefährdungen verstanden.

VI Liste der Gefährdungsbilder (GB. Katalog)

GB-1: Tragsicherheit

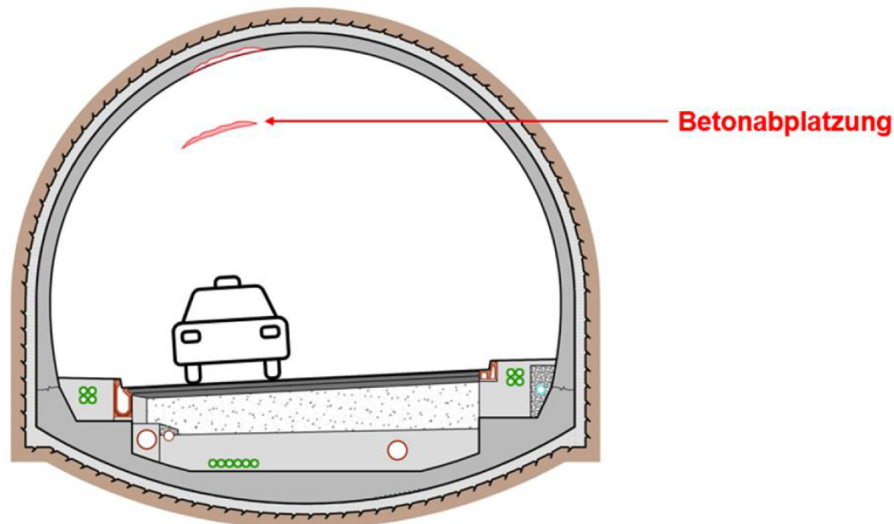
GB-11	Versagen Gewölbe
GB-111	Versagen Gewölbe aufgrund Bewehrungskorrosion
GB-112	Versagen Gewölbe aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung
GB-113	Versagen Gewölbe aufgrund Überlastung
GB-12	Versagen Fundation
GB-121	Versagen Fundation aufgrund Bewehrungskorrosion
GB-122	Versagen Fundation aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung
GB-123	Versagen Fundation 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-141	Versagen Aufhängungen aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung
GB-142	Versagen Aufhängungen aufgrund Metallkorrosion
GB-144	Versagen Aufhängungen aufgrund Ermüdung

GB-2: Betriebssicherheit

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

VII Beispiel Katalogblatt Gefährdungsbild

Betriebssicherheit:	ID-GB-Code: GB-2:	Blatt 08
• Betonabplatzung auf Fahrbahn	• GB-23	



Quelle: Skizze Gefährdungsbild Betonabplatzung auf Fahrbahn (Lombardi AG)

Beschreibung Gefährdungsbild:

Betonabplatzung auf Fahrbahn: Die Gefügespannungen im Beton nehmen ein Ausmass an, dass diese Zugfestigkeit des Betons überschreiten und dieser schichtweise abplatzt. Die Zunahme der Gefügespannungen kann entweder eine Folge der Volumenausdehnung bei der Umwandlung von Bewehrungsstahl zu Rost («S 11 Bewehrungskorrosion» meistens aufgrund der flächigen Korrosion infolge Karbonatisierung) und bei treibenden Betonangriffen («S 12 Betonangriff / Gefügezerstörung») oder der Zunahme der Auswirkung (Erhöhung Ed aufgrund «S 31 Belastungsänderung Baugrund» oder «S-41 Belastungsänderung Berg- / Grundwasser») sein. Das Gefährdungsbild wird basierend auf den zugrundeliegenden Schadensprozesse untergliedert in:

Untergliederung Gefährdungsbild		Zugrundeliegende Schadensprozess	
GB-231	Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Bewehrungskorrosion	S-11	Bewehrungskorrosion
GB-232	Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung	S-12	Betonangriff / Gefügezerstörung
GB-233	Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Zusatzbelastung / Zwängung	S-31	Belastungsänderung Baugrund
		S-41	Belastungsänderung Berg- / Grundwasser

Vom Gefährdungsbild «GB-23 Betonabplatzung auf Fahrbahn» sind alle Tragwerksbestandteile oberhalb der Fahrbahn bzw. das Gewölbe («BWT-Gew-TTW-3 Gewölbe») und die Zwischendecke («BWT-ZWD-NTW-1 Zwischendecke») potentiell gefährdet.

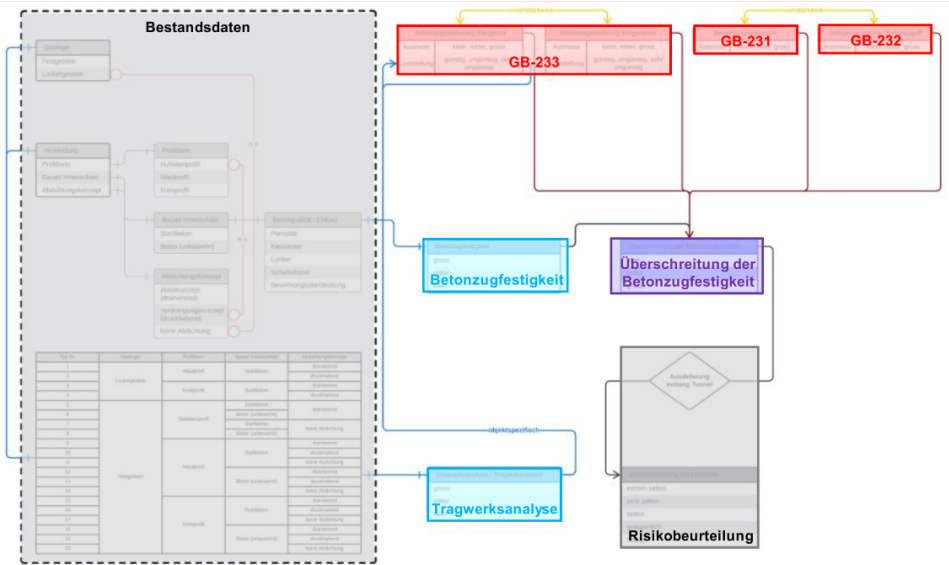
Typ Gefährdungsbild:	Konsequenz aufgrund Schadensprozess:
Betriebssicherheit	ID-S-Code:
	• S-11 Bewehrungskorrosion
	• S-12 Betonangriff / Gefügezerstörung
	• S-31 Belastungsänderung Baugrund
	• S-41 Belastungsänderung Berg- / Grundwasser

Beziehungsstruktur der Einflussfaktoren:

Die Traglastreserve wie auch die effektive Betonzugfestigkeit (unter Berücksichtigung von lokalen Schwachstellen) lassen sich aus den Bestandsdaten des Tunnels abschätzen. Die Erhöhung der äusseren Einwirkungen (GB-233) und Volumenausdehnung im Betongefüge aufgrund von Bewehrungskorrosion (GB-231) und Betonangriff / Gefügezerstörung (GB-232) führen zu einer Erhöhung der Gefügespannungen im Beton. Überschreiten die Gefügespannungen die effektiven Betonzugfestigkeiten kommt es zu

Betriebssicherheit: ID-GB-Code: **GB-2:** Blatt 08
 • **Betonabplatzung auf Fahrbahn** • **GB-23**

Betonabplatzungen. Fallen diese Betonabplatzungen auf die Fahrbahn, dann ist die Betriebssicherheit nicht mehr gewährleistet.



Quelle: Schema Beziehungsstruktur der Einflussfaktoren GB-23 Betonabplatzung auf Fahrbahn (Lombardi AG)

Zuordnung Bauteilart (BWT x BA):

GB-231 Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Bewehrungskorrosion

Auftreten bei Bauwerksteilen:		Auftreten bei Bauarten:	
ID-BWT-Code:		ID-BA-Code:	
• BWT-Gew-AS-102	Aussenschale	• BA-BK-03	Stahlbetonkonstruktion
• BWT-Gew-AS-105	Tübbing	• BA-BK-05	Spannbetonkonstruktion
• BWT-Gew-TTW-3	Gewölbe	• BA-SBK-02	armierte Spritzbetonkonstruktion
• BWT-ZWD-NTW-1	Zwischendecke	• BA-SBK-03	faserarmierte Spritzbetonkonstruktion

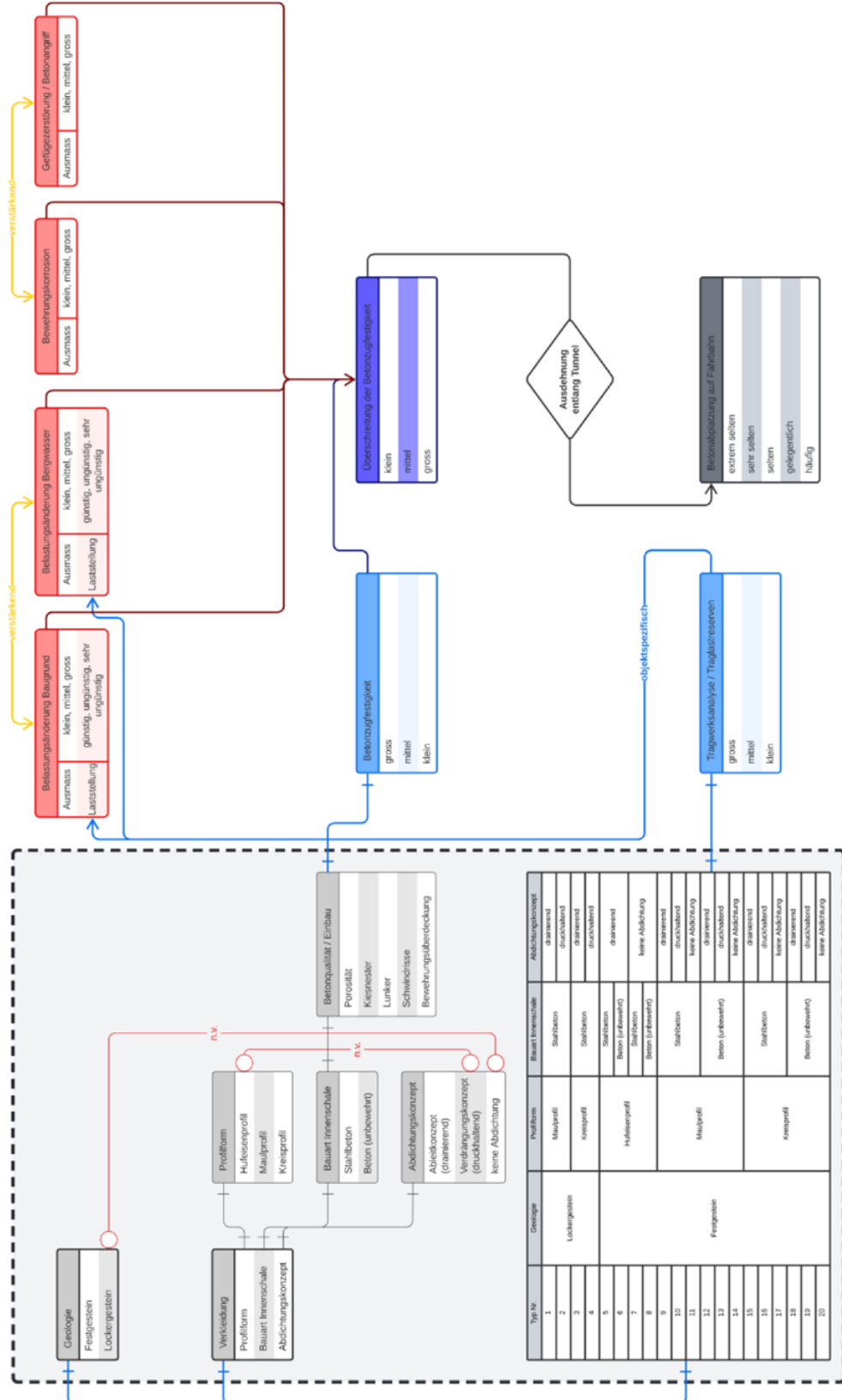
GB-232 Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Betonangriff / Gefügezerstörung

Auftreten bei Bauwerksteilen:		Auftreten bei Bauarten:	
ID-BWT-Code:		ID-BA-Code:	
• BWT-Gew-AS-102	Aussenschale	• BA-BK-01	Betonkonstruktion
• BWT-Gew-AS-105	Tübbing	• BA-BK-03	Stahlbetonkonstruktion
• BWT-Gew-TTW-3	Gewölbe	• BA-BK-05	Spannbetonkonstruktion
• BWT-ZWD-NTW-1	Zwischendecke	• BA-SBK-01	Unarmierte Spritzbetonkonstruktion
		• BA-SBK-02	armierte Spritzbetonkonstruktion
		• BA-SBK-03	faserarmierte Spritzbetonkonstruktion

GB-233 Betonabplatzung fällt auf Fahrbahn aufgrund Zusatzbelastung / Zwängung

Auftreten bei Bauwerksteilen:		Auftreten bei Bauarten:	
ID-BWT-Code:		ID-BA-Code:	
• BWT-Gew-AS-102	Aussenschale	• BA-BK-01	Betonkonstruktion
• BWT-Gew-AS-105	Tübbing	• BA-BK-03	Stahlbetonkonstruktion
• BWT-Gew-TTW-3	Gewölbe	• BA-BK-05	Spannbetonkonstruktion
• BWT-ZWD-NTW-1	Zwischendecke	• BA-SBK-01	Unarmierte Spritzbetonkonstruktion
		• BA-SBK-02	armierte Spritzbetonkonstruktion
		• BA-SBK-03	faserarmierte Spritzbetonkonstruktion

VIII Beispiel Beziehungsstruktur GB-23 «Betonabplatzung auf Fahrbahn»



IX Liste der Untersuchungsmethoden (U.-Katalog)

Tab. 1 Übersicht U.-Katalog

ID U.	U. Bezeichnung	Katalogblatt (Anhang A3)
U-1-000	VISUELLE UNTERSUCHUNG	
U-1-100	Visuelle Inspektionen	Katalogblatt 01
U-1-110	Sichtkontrolle (Betrieb / Unterhalt)	Katalogblatt 01
U-1-121	Hauptinspektion visuell	Katalogblatt 01
U-1-122	Zwischeninspektion visuell	Katalogblatt 01
U-1-123	Visuelle Inspektion Fach-Spezialist/in	Katalogblatt 01
U-1-131	Sichtkontrolle detailliert, lokal	Katalogblatt 01
U-1-200	Visuelle Untersuchungen, technisch	
U-1-210	Visuelle Aufnahmen Bildaufnahmen	
U-1-211	Visuelle Aufnahmen; Einzelbilder	Katalogblatt 02
U-1-212	Visuelle Aufnahmen; Video	
U-1-213	Automatisierte Bilddatenerfassung (hochauflösend, u.a. Mobil / Scanning)	
U-1-214	Kanal-TV	Katalogblatt 03
U-1-221	Einsehen Kontrollöffnungen und Schächte	Katalogblatt 03
U-1-231	Endoskopie / Glasfaseroptik	
U-1-241	Färbversuch	
U-2-000	MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG AM BAUWERK	
U-2-100	Vermessung	
U-2-111	Händische Messung	Katalogblatt 04
U-2-121	Nivellement	Katalogblatt 04
U-2-131	Gleitmikrometer / Gleitdeformeter	Katalogblatt 05
U-2-132	Dehnungsmessstreifen	Katalogblatt 05
U-2-133	Durchbiegungsmessung mit Wegsensoren	
U-2-134	Laserextensometer	Katalogblatt 05
U-2-135	Vibrating Wire Extensometer	
U-2-136	Stangenextensometer	
U-2-137	Weisslichtinterferometrie (WLI)	
U-2-138	Faser-Bragg-Gitter (FBG)	
U-2-139	Nahbereichsphotogrammetrie	
U-2-141	Inklinometer	Katalogblatt 05
U-2-150	Laserscanning	
U-2-151	Laserscanning (ohne KI)	Katalogblatt 06
U-2-152	Laserscanning (mit KI)	
U-2-161	Invardrahtmessung	Katalogblatt 04
U-2-162	Rissmessungen, Kontrolle Gipssiegel	Katalogblatt 04
U-2-163	Erfassung Rissweitenänderungen mittels Wegsensoren (Wegaufnehmer)	Katalogblatt 05
U-2-200	Mechanische Überprüfungen	
U-2-211	Abklopfen	Katalogblatt 07
U-2-212	Rückprallhammer (Schmidt-Hammer)	
U-2-220	Kontrolle Befestigungen	
U-2-221	Prüfung mechanischer Sicherungen	Katalogblatt 08
U-2-222	Prüfung Nietverbindungen	
U-2-230	Zugprüfungen / Kraftmessungen	

Tab. 1 Übersicht U.-Katalog

ID U.	U. Bezeichnung	Katalogblatt (Anhang A3)
U-2-231	Zugprüfungen Anker und Zugstangen	
U-2-232	Ankerkraftmessung	
U-2-241	Abreissprüfung	
U-2-251	Widerstandsmessung	
U-2-261	Griffigkeitsmessung SKM	
U-2-262	Deflektionsmessung	
U-2-263	Ebenheitsmessung mittels Latte	
U-2-264	Messung Längsebenheit mit Goniograph	
U-2-265	Automatische Belags- und Strassenzustandsprüfung	Katalogblatt 09
U-2-271	Druckprüfung von Leitungen	
U-2-300	Messung Wassermengen, Hydraulik	
U-2-311	Messung Wasserstand bzw. Freibord	
U-2-321	Messung Wasserdruck mit Piezometer	
U-2-322	Messung Porenwasserdruck mit Kleinpiezometer	
U-2-331	Messung Wasseranfall / Durchflussmenge händisch	
U-2-332	Messung Durchflussmenge mit Ultraschallgerät	
U-2-400	Materialtechnologische Untersuchungen	
U-2-411	Karbonatisierungsmessung am Bauwerk	Katalogblatt 10
U-2-421	Sondieröffnung/Bewehrungsfenster: Bestimmung Korrosionsgrad Bewehrung	Katalogblatt 11
U-2-422	Belagsfenster: Beurteilung Belag und Abdichtung	
U-2-430	Prüfung Oberflächenschutz	
U-2-431	Gitterschnittprüfung	
U-2-432	Keilschnittverfahren	
U-2-433	Prüfung Haftzugfestigkeit	Katalogblatt 12
U-2-434	Schälzugversuch	
U-2-435	Penetrationsverfahren	
U-2-441	Potenzialfeldmessung (Bewehrung)	Katalogblatt 13
U-2-442	Streustrommessungen	
U-2-443	Messung Schutzpotential bzw. Schutzstrom	
U-2-444	Messung elektrischer Widerstand (Beton)	
U-2-445	Impedanzmessung Spannglieder	
U-2-446	Korrosionsmonitoring mittels Probekörpern mit spezifischer Sensoren	
U-2-451	Georadar	Katalogblatt 14
U-2-452	Ultraschallprüfung	
U-2-453	Impact-Echo-Verfahren	
U-2-454	Magnetisches Wechselfeldverfahren (Betonüberdeckungsmessung)	
U-2-455	Wirbelstromverfahren (Betonüberdeckungsmessung)	Katalogblatt 15
U-2-456	Streifeldmethode / Streifeldmessung	
U-2-457	Durchstrahlungsverfahren / Radiographie	
U-2-458	Fehlstellenprüfung mit Hochspannung	
U-2-459	Röntgenfluoreszenzspektrometrie	
U-2-461	Infrarot-Thermographie	
U-2-471	Messung Baustofffeuchtigkeit mit CM-Gerät	
U-2-472	Messung Wasseraufnahme mit Karstenröhrchen	
U-2-481	Eindringprüfung	

Tab. 1 Übersicht U.-Katalog

ID U.	U. Bezeichnung	Katalogblatt (Anhang A3)
U-2-482	Magnetpulverprüfung	
U-2-500	Klimatische Untersuchungen	
U-2-511	Messung Umgebungstemperatur	Katalogblatt 16
U-2-521	Messung Luftfeuchtigkeit	Katalogblatt 17
U-2-522	Taupunkt-Messung	
U-2-531	Messung Luftpermeabilität (nach Torrent)	
U-2-540	Messung Zusammensetzung Luft	
U-3-000	LABORPRÜFUNGEN	
U-3-100	Prüfungen chemische Kennwerte	
U-3-111	Chloridanalyse	Katalogblatt 18
U-3-112	Prüfung Sulfatgehalt (bez. Zementgewicht)	
U-3-113	Prüfung Nitratgehalt (bez. Zementgewicht)	
U-3-121	Karbonatisierungstiefe am Bohrkern	
U-3-131	pH-Wert Messung	
U-3-141	Differential-Thermo-Analyse (DTA) Thermogravimetrische Analyse	
U-3-151	Gravimetrie	
U-3-161	Prüfung Weichmachergehalt bei polymeren Werkstoffen	
U-3-162	Infrarot-Spektroskopie bei polymeren Werkstoffen	
U-3-163	Chemische Analysen bei polymeren Werkstoffen (<i>ergänzend</i>)	
U-3-200	Prüfungen mechanische Kennwerte	
U-3-211	Druckfestigkeit	Katalogblatt 19
U-3-212	Stempeldruckfestigkeit	
U-3-213	Quelldruckmessung	
U-3-214	Triaxialversuch	
U-3-221	Zugfestigkeit und Haftzugfestigkeit	
U-3-222	Biegezugfestigkeit	
U-3-223	E-Modul-Bestimmung von Beton / Belag	
U-3-231	Prüfung Zugeigenschaften an Kunststoffdichtungsbahnen	
U-3-241	Zugversuche metallische Werkstoffe	
U-3-242	Prüfung mechanischer Eigenschaften von Stahl	
U-3-243	Kerbschlagversuch	
U-3-251	Abriebverhalten	
U-3-261	Dauerschwingversuch (Wöhlerversuch)	
U-3-271	Mechanische Prüfung von polymeren Werkstoffen	
U-3-300	Prüfungen physikalischer Kennwerte	
U-3-311	Rohdichte	
U-3-321	Zementgehalt von Beton	
U-3-331	Ausmessung und Schichtbestimmung	
U-3-332	Mischgutanalyse Belag	
U-3-333	Siebkurve	
U-3-341	Frostwiderstand (Frostwechslerverhalten)	
U-3-342	Frost-Tausalzwiderstand (Frostwechslerverhalten)	
U-3-342	Chloridwiderstand	
U-3-343	Karbonatisierungswiderstand	

Tab. 1 Übersicht U.-Katalog		
ID U.	U. Bezeichnung	Katalogblatt (Anhang A3)
U-3-344	Sulfatwiderstand	
U-3-351	Wasserleitfähigkeit bzw.-dichtigkeit	
U-3-352	Porenkennwerte bzw. Wasserleitfähigkeit	
U-3-361	Alkali-Aggregat-Reaktionswiderstand (AAR): Bohrkern-Restquellmass-Bestimmung	
U-3-400	Mikroskopische Untersuchungen	
U-3-411	Elektronenmikroskop	
U-3-412	Lichtmikroskop	
U-3-421	Mikroskopische Untersuchung am Dünnschliff	Katalogblatt 20
U-3-431	Schichtdickenmessung mikroskopisch am Anschliff	
U-3-500	Chemische Untersuchungen Einwirkungen	
U-3-510	Chem. Zusammensetzung Luft	
U-3-520	Chem. Zusammensetzung Wasser	Katalogblatt 21
U-3-530	Zusammensetzung Staub (Wischproben)	
U-3-531	Feinanteile	
U-3-540	Zusammensetzung Schadstoffe	Katalogblatt 22
U-3-541	Russ, kanzerogene Stoffe	Katalogblatt 22
U-3-542	Asbest	Katalogblatt 22
U-3-543	PAK	Katalogblatt 22
U-3-600	Weitere Laboruntersuchungen	
U-3-611	Messung Wasseraufnahme mit Karstenröhrchen	
U-3-621	Bestimmung Wasserdichtheit von Kunststoffdichtungsbahnen	
U-3-631	Rissmessung am Bohrkern	
U-3-641	Wischprobe bei metallischen Werkstoffen	Katalogblatt 23
U-3-651	Biologische Untersuchung	
U-3-661	Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS)	
U-4-000	STATISCHE, GEODÄTISCHE UND KONSTRUKTIVE UNTERSUCHUNGEN UND ALLENFALLS BELASTUNGSVERSUCHE	
U-4-100	Statische Untersuchungen	
U-4-110	Nachrechnungen Bauwerk / Bauwerksteil	Katalogblatt 24
U-4-120	Überprüfung / Aktualisierung Statik	
U-4-200	Konstruktive Untersuchungen	
U-4-210	Sondierungen am Bauwerk	Katalogblatt 25
U-4-221	Funktionsprüfung von Entwässerungseinrichtungen	
U-4-222	Absenk-, Anstiegs- und Versickerungsversuche	
U-4-300	Belastungsversuche	
U-4-311	Schwingungsanalyse	
U-4-321	Dynamischer Lastwechsel	
U-4-331	Erschütterungsmessungen	
U-4-341	Schlitzpressenmessungen	
U-4-400	Geodätische Untersuchungen	

X Informationsbereiche U.-Katalog

Tab. 2 Übersicht Informations-Bereiche U.-Katalog (EP2)

Information (Attribut)	Beschrieb Attribut	Art der Daten ⁶	Spalte Katalog
Strukturierung Untersuchungsmethoden			
ID U.	Eindeutige ID (gemäss Gliederung USM, siehe Kapitel)	Nummerierung U-#-### (obligatorisch)	A
Typ USM	Gemäss Gliederungsstruktur EP2 (siehe Kapitel)	Werteliste (obligatorisch)	B
U. Typ	Typ-Nr. zur thematischen Strukturierung	Nummerierung (obligatorisch)	C
Herkunft (Katalog)	Verweis / Herkunft identifizierte Methode: u.a. KUBA Katalog: USM = Untersuchungsmethoden; MEGR = Messgrössen;	Freitext (obligatorisch)	D
H Code	Verweis Nr. KUBA Kataloge USM bzw. MEGR	Werteliste (Nummer) (Mehrfachzuweisung)	E
USM-Code (Struktur)	Nummer generiert durch Strukturierung EP2	Werteliste (Nummer) (obligatorisch)	F
U. Bezeichnung	Eindeutige Bezeichnung der Untersuchungsmethode (kurz)	Freitext (obligatorisch)	G
Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis)	Beschrieb der USM. Enthält: <ul style="list-style-type: none"> • alternative Bezeichnungen / Geräte / Methode • grobe Funktionsweise • Ziel/Motivation der Untersuchungsmethode • besondere Merkmale / Abgrenzung zu Alternativen • evtl. Hinweise Untervarianten und deren Ausprägungen 	Freitext (obligatorisch)	H
Zerstörungsfrei	Information, ob USM ohne Schädigung des Bauwerks durchgeführt werden kann oder nicht. Sobald eine, wenn auch nur lokale, Schädigung erfolgt, wie z.B. lokale Freilegung der Bewehrung oder Entfernung der Beschichtung, wird die USM als zerstörend eingestuft.	Werteliste: - Ja - Bedingt (+Freitext) - Nein	I
USM Phase Überwachung	Information, ob USM für Phase Überwachung eingesetzt werden kann.	Auswahl (x = ja)	J
Bewährte USM	Information, ob USM zu den bewährten, relevanten USM gezählt wird (siehe Kapitel)	Auswahl (x = ja)	K
Zuordnung BWT x BA / Befunde (BE.) / Schäden (S.) (Schnittstellen zu EP1)			
BWT x BA	Zuweisung zu Bauteilarten, an welcher die USM sinnvollerweise angewendet wird	Werteliste «ID Bauteilarten» (EP1) (Mehrfachzuweisung)	L
BE. Befund	Zuweisung zu Befunden, bei welcher die USM möglicherweise Erkenntnisse bringt	Werteliste «ID Befunde» (EP1) (Mehrfachzuweisung)	M

⁶ Es werden nur die obligatorischen Einträge und die Mehrfachzuweisungen speziell erwähnt.

Tab. 2 Übersicht Informations-Bereiche U.-Katalog (EP2)

Information (Attribut)	Beschrieb Attribut	Art der Daten⁶	Spalte Katalog
S. Schadensprozesse	Zuweisung zu Schadens-mechanismen, zu welchen die USM zusätzliche Erkenntnisse bringt	Werteliste «ID Schäden» (EP1) (<i>Mehrfachzuweisung</i>)	N
Kontext USM			
Überwachung / Monitoring (Onlinemessung)	Information, ob die USM dauerhaft installiert werden und automatisiert Resultate liefern kann im Sinne eines Monitorings.	Werteliste: - Ja - Bedingt (+Freitext) - Nein	O
Ergänzende USM	Auswahl von USM, welche möglicherweise sinnvoll ergänzend eingesetzt werden	Werteliste «ID USM» (<i>Mehrfachzuweisung</i>)	P
Verwandte USM	Ergänzende Spezialmethoden, mit geringerer Relevanz; Hinweis auf Methode, die selbst jedoch nicht im Katalog aufgeführt ist.	Freitext (<i>Mehrfachzuweisung</i>)	Q
Ergebnisse (Resultate)			
Messgrösse	Beschreibung der bestimmten Messgrösse, welche die Methode bestimmt, z.B. Rissbreite	Freitext (wo passend, wurden Werte aus Kubakatalog MEGR übernommen) (<i>obligatorisch</i>)	R
Erfasste Masseinheit (LE)	Die Masseinheit, in der die Messgrösse quantifiziert / qualifiziert wird (z.B. mm oder Schadensklassen), bzw. mit welchen die Messgrösse umgerechnet wird.	Freitext	S
Aussagekraft und Zuverlässigkeit	Qualitative Information zu den erwartbaren Aussagen und der Zuverlässigkeit der Resultate des Untersuchs. Aussage zum Resultat Wahrscheinlichkeit oder ob quantitativ bzw. qualitativ.	Freitext	T
Genauigkeit und Grenzen	Information, ob wichtige Anmerkungen zu normativen Werken, Kenn- oder Grenzwerten zu dieser USM zu beachten sind und welches die Grenzen der Methoden bzw. begrenzenden Faktoren sind.	Freitext	U
Normierung	Bezeichnung einschlägiger (Prüf-) Normen	Freitext	V
Attribute für Aufwand und Kostenschätzung			
Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand	Hinweise zu betrieblichen Randbedingungen für Durchführung der Untersuchung und zum Aufwand der Methode, u.a. für Probenahmen	Freitext	W
Preisklasse (Grössenordnung in CHF)	Abgeschätzte Grössenordnung der Kosten für Untersuchungsmethode (<i>siehe Kapitel</i>)	Preisklasse mit Grössenordnung der Kosten in CHF / MQ	X
Erläuterungen zu Kostenschätzung	Getroffene Abgrenzung und Annahmen für Kostenschätzung	Freitext	Y
Anbieter			

Tab. 2 Übersicht Informations-Bereiche U.-Katalog (EP2)

Information (Attribut)	Beschrieb Attribut	Art der Daten⁶	Spalte Katalog
Anbieter	Hinweis, welche Art von Anbieter diese Untersuchung durchführen	Freitext	Z
Verweise / Referenzen			
Katalogblatt	Katalogblätter für bewährte USM als Anhang des Schlussberichts EP2 (siehe Anhang A3)	Nr. Katalogblatt	AA
Referenz Faktenblatt Fallbeispiel	Aufzählung der Fallbeispiele, bei welchen diese Untersuchungsmethode angewendet wurde.	Nr. und Objekt Fallbeispiel	AB

XI Bsp. Katalogblatt Untersuchungsmethoden

Tab. 1 Katalogblatt 06

Laserscanning (ohne KI)

ID-U-Code: U-2-151



Abb. 1 Quelle: Abluftkanal Gubristtunnel 2014 (Basler & Hofmann AG)

Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):

Zeilen- oder rasterartige Überstreichen von Oberflächen oder Körpern mit einem Laserstrahl, um diese zu vermessen, zu bearbeiten oder um ein Bild zu erzeugen;
(zukünftig ergänzt mit elektronischer Auswertung (Künstliche Intelligenz (KI) siehe U-2-152)

Zerstörungsfrei: Ja

Typ Untersuchungsmethode:

Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)

Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:

Alle Bauarten

USM geeignet für Phase Überwachung:

ja

Eignung als Monitoring (Onlinemessung):

Bedingt (grundsätzlich möglich)

Einsatz bei Befunden wie:

ID-BE-Code:

- BE-1000 Mechanische Integrität
- BE-2100 Korrosion
- BE-3001 Feuchtstellen
- BE-3002 Lokale Nassstellen
- BE-3003 Flächenhafte Nassstellen
- BE-4200 Mineralische Ausblühungen / Sinter

ID-S-Code:

- S-11 Bewehrungskorrosion
- S-12 Betonangriff / Gefügezerstörung
- S-21 Stahlkorrosion
- S-3 Schadensprozess Baugrund
- S-4 Schadensprozess Berg-/ Grundwasser
- S-5 Schadensprozess Abdichtung
- S-6 Schadensprozess Fahrbahn

Messgrösse (vgl. Katalog MEGR):

Abmessungen;
Visuell: Unregelmässigkeit, Vorhandensein und grobes Ausmass von Schäden

Erfasste Masseinheit (LE): m;

Zustandskategorie
ZK1: in gutem Zustand
ZK2: in annehmbarem Zustand
ZK3: in schadhaftem Zustand
ZK4: in schlechtem Zustand
ZK5: in alarmierendem Zustand

Aussagekraft und Zuverlässigkeit:

qualitativ (Zuweisung Zustandskategorie);
Erfassung der Tunneloberfläche auch in Dunkelheit

Genauigkeit und Grenzen:

Visuelle Auswertung stark abhängig von der beurteilenden Person; Vermessung von Rissen ist nicht möglich

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:

Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:

- Örtliche RBs (z.B. Abluftkanal: Abschaltung Tunnellüftung; Fahrraum: Sperrungen)

Kosten:

- Preisklasse PK2 (100 - 499 CHF/MQ)¹

Normen und Literatur:

- Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen RIBET [3]

Fallbeispiele:

- Nr. 3 Kerenzertunnel
- Nr. 5 Gubristtunnel

Anbieter:

Vermessungsbüros, teilweise auch Ingenieurbüros

Verwandte USM:

- U-2-137 Weisslichtinterferometrie (WLI)
- U-2-152 Laserscanning (mit KI)

¹ (= Gesamtquerschnitt über Länge von 5m)

Grössenordnung unter Annahme, dass ganze Tunnellänge aufgenommen wird.

Normen und Literatur:

- Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen RIBET [3]

Fallbeispiele:

- Nr. 3 Kerenzertunnel
- Nr. 5 Gubristtunnel

Anbieter:

Vermessungsbüros, teilweise auch Ingenieurbüros

Verwandte USM:

- U-2-137 Weisslichtinterferometrie (WLI)
 - U-2-152 Laserscanning (mit KI)
-

XII Liste der Erhaltungsmassnahmen (M.-Katalog)

Tab. 1 Massnahmenkatalog der Erhaltungsmassnahmen für bergmännische Strassentunnel

1000	Gewölbe	2000	Sohlgewölbe
1100	Reinigung	2100	Reinigung (zugängliche Flächen)
	1110 Abklopfen		2110 Abklopfen
1200	Betoninstandsetzung	2200	Betoninstandsetzung (zugängliche Flächen)
	1210 Lokale Betoninstandsetzung		2210 Lokale Betoninstandsetzung
	1220 Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz		2220 Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz
	1230 Reprofilierung mit Bewehrungs- instandsetzung		2230 Reprofilierung mit Bewehrungs- instandsetzung
	1240 Reprofilierung mit Bewehrungsersatz /- zulage		2240 Reprofilierung mit Bewehrungsersatz /- zulage
	1250 Reprofilierung mit Querschnitts- ergänzung ohne Bewehrungsersatz		2250 Reprofilierung mit Querschnitts- ergänzung ohne Bewehrungsersatz
	1260 Reprofilierung mit Querschnittsergänz- ung mit Bewehrungsinstandsetzung		2260 Reprofilierung mit Querschnittsergänz- ung mit Bewehrungsinstandsetzung
	1270 Reprofilierung mit Querschnittsergänz- ung mit Bewehrungsersatz /-zulage		2270 Reprofilierung mit Querschnittsergänz- ung mit Bewehrungsersatz /-zulage
1300	Oberflächenschutzsysteme für Beton	2300	Betoninstandsetzung (unzugängliche Flächen)
	1310 Hydrophobierende Imprägnierung (H)		2310 Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz
	1320 Erneuerung Imprägnierung (I)		2320 Reprofilierung mit Bewehrungs- instandsetzung
	1330 Ersatz Imprägnierung (I)		2330 Reprofilierung mit Bewehrungsersatz /- zulage
	1340 Erneuerung Beschichtung (C)		2340 Reprofilierung mit Querschnitts- ergänzung ohne Bewehrungsersatz
	1350 Ersatz Beschichtung (C)		2350 Reprofilierung mit Querschnittsergänz- ung mit Bewehrungsinstandsetzung
			2360 Reprofilierung mit Querschnittsergänz- ung mit Bewehrungsersatz /-zulage
1400	Abdichtung	2400	Abdichtung (zugängliche Flächen)
	1410 Rissinjektion mit Klebepackern		2410 Rissinjektion mit Klebepackern
	1420 Rissinjektion mit Bohrpäckern		2420 Rissinjektion mit Bohrpäckern
	1430 Entwässerungsschlitz einfach		2430 Entwässerungsschlitz einfach
	1440 Entwässerungsschlitz erweitert		2440 Entwässerungsschlitz erweitert
	1450 Blockfugen abdichten einfach		2450 Blockfugen abdichten einfach
	1460 Blockfugen abdichten erweitert		2460 Blockfugen abdichten erweitert
	1470 Abdichtungsinjektion		2470 Abdichtungsinjektion
	1480 Instandsetzung Abdichtung		2480 Instandsetzung Abdichtung
	1490 Ersatz Teilabdichtung		2490 Ersatz Teilabdichtung
1500	Ersatzmassnahmen	2500	(Abdichtung unzugängliche Flächen)
	1510 Ersatz Innengewölbe		2510 Rissinjektion mit Klebepackern
			2520 Rissinjektion mit Bohrpäckern
			2530 Entwässerungsschlitz einfach
			2540 Entwässerungsschlitz erweitert
			2550 Blockfugen abdichten einfach
			2560 Blockfugen abdichten erweitert

	2570 Abdichtungsinjektion
	2580 Instandsetzung Abdichtung
	2590 Ersatz Teilabdichtung
	2600 Ersatzmassnahmen
	2610 Ersatz Sohlgewölbe (Tunnel ohne WELK)
	2620 Ersatz Sohlgewölbe (Tunnel mit WELK)
3000 Zwischendecke	4000 Werkleitungskanal
3100 Reinigung	4100 Reinigung
3110 Abklopfen	4110 Abklopfen
3200 Betoninstandsetzung	4200 Betoninstandsetzung
3210 Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz	4210 Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz
3220 Reprofilierung mit Bewehrungs- instandsetzung	4220 Reprofilierung mit Bewehrungs- instandsetzung
3300 Betoninstandsetzung Zwischenwände	4230 Reprofilierung mit Bewehrungsersatz /- zulage
3310 Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz	4300 Abdichtung auf Fahrbahnplatte oder WELK (Elementbau)
3320 Reprofilierung mit Bewehrungs- instandsetzung	4310 Ersatz PBD-Abdichtung
3330 Reprofilierung mit Bewehrungsersatz /- zulage	4320 Ersatz FLK-Abdichtung
3400 Oberflächenschutzsysteme für Beton	4330 Ersatz Gussasphalt-Abdichtung
3410 Hydrophobierende Imprägnierung (H)	4400 Ersatzmassnahmen
3420 Erneuerung Imprägnierung (I)	4410 Ersatz Fahrbahnplatte inkl. Wände
3430 Ersatz Imprägnierung (I)	4420 Ersatz WELK (Elementbau)
3440 Erneuerung Beschichtung (C)	
3450 Ersatz Beschichtung (C)	
3500 Sicherungsmassnahmen	
3510 Sicherung durch Aufhängungen (Zuganker resp. Schweizer Riegel)	
3520 Ersatz der Aufhängungen (Zuganker resp. Schweizer Riegel)	
3600 Ersatzmassnahmen	
3610 Ersatz Zwischendecke	
5000 Fahrbahn / Fahrbahnfundation	6000 Bankett
5100 Reinigung	6100 Reinigung
5110 Wiederherstellung Griffigkeit	6110 -
5200 Instandsetzung	6200 Belag und Abdichtung
5210 Belagsrisse vergiessen	6210 Ersatz Randfugen
5220 Ersatz Randfugen	6220 Ersatz Deckbelag
5300 Belagsersatz (Gussasphalt)	6300 Ersatzmassnahmen
5310 Ersatz Deckbelag	6310 Ersatz Bankett ohne Leitungen resp. KSR im Bankett
5320 Ersatz Binderschicht	6320 Ersatz Bankett mit Leitungen resp. KSR im Bankett
5330 Ersatz Tragschicht	
5400 Belagsersatz (Walzasphalt)	
5410 Ersatz Deckbelag	
5420 Ersatz Binderschicht	

5430 Ersatz Tragschicht
5440 Ersatz Foundationsschicht
5500 Instandsetzung Betonfahrbahnplatte
5510 Oberflächenerneuerung mit Deckschicht Walzasphalt
5520 Ersatz Betonfahrbahnplatte
7000 Leitungen / Schächte
8000 -
7100 Leitungen resp. Kabelschutzrohre im Bankett
7110 Leitungen spülen und Ablagerungen entfernen (Löschwasser-/ Entwässerungsleitung)
7120 Inlining (Löschwasser-/ Entwässerungsleitung)
7130 Ersatz (Löschwasser-/ Entwässerungsleitung)
7140 Ersatz Kabelrohre
7200 Leitungen im WELK
7210 Leitungen spülen und Ablagerungen entfernen (Löschwasser-/ Entwässerungsleitung)
7220 Inlining (Löschwasser-/ Entwässerungsleitung)
7230 Ersatz (Löschwasser-/ Entwässerungsleitung)
7300 Entwässerungsleitungen unter der Fahrbahn
7310 Leitungen spülen und Ablagerungen entfernen (Entwässerungsleitung)
7320 Inlining (Entwässerungsleitung)
7330 Ersatz (Entwässerungsleitung)
7400 Randelemente
7410 Randsteine instandsetzen
7420 Schlitzrinne instandsetzen
7430 Ersatz Randsteine
7440 Ersatz Schlitzrinne
7500 Schächte
7510 Ersatz Siphonschacht-Abdeckung
7520 Ersatz Siphonschacht
7530 Ersatz Kontroll-/ Einlaufschacht
7540 Ersatz Kabelschacht
7600 Gebirgsdrainage
7610 Leitungen spülen und Ablagerungen Entfernen (Drainageleitung)
7620 Inlining (Drainageleitung)

XIII Beispiel Katalogblatt Erhaltungsmassnahmen

Tab. 3 Katalogblatt 3: Erhaltungsmassnahme: Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz

ID-M-Code:	M-1220
	M-2220
	M-2310
	M-3210
	M-3310
	M-4210

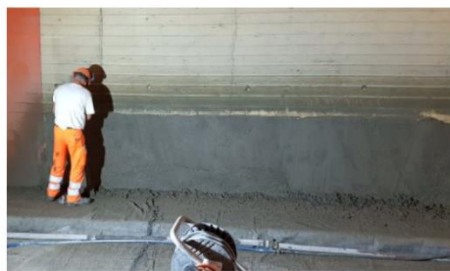


Abb. 3 Quelle: Gubristtunnel, Repr. ohne Bewehrungsersatz, Abtrag mit HDW-Roboter, Gewölbe (EBP Schweiz AG)

Erhaltungsmassnahme geeignet für folgende Bauwerksteile:	Gewölbe (inkl. Abdichtung und Felssicherung)	ID-M-Code: M-1000
	Sohlgewölbe	M-2000
	Zwischendecke	M-3000
	Werkleitungskanal	M-4000
Massnahmen-Art:	Betoninstandsetzung (Gewölbe)	M-1200
	Betoninstandsetzung (zugängliches Sohlgewölbe)	M-2200
	Betoninstandsetzung (unzugängliches Sohlgewölbe)	M-2300
	Betoninstandsetzung (Zwischendecke)	M-3200
	Betoninstandsetzung (Zwischendecke, Trennwand)	M-3300
	Betoninstandsetzung (Werkleitungskanal)	M-4200
Massnahmen-Typ¹:	lokale / punktuelle Instandsetzung	M-xxx1
	Instandsetzung in Teilflächen / örtlich systematisch	M-xxx2
	systematische / grossflächige Instandsetzung / Teilersatz	M-xxx3

Bauliche Abhängigkeit zu anderen Erhaltungsmassnahmen²:

M-2310 bedingt eine der folgenden weiteren Erhaltungsmassnahmen:

- M-5300ff Belagsersatz (Gussasphalt)
- M-5400ff Belagsersatz (Walzasphalt)
- M-5520 Gesamtersatz Betonfahrbahnplatte

¹ Massnahmenausdehnung und -umfang

² Die bauliche Ausführung der betroffenen Erhaltungsmassnahme bedingt die vorgängige Ausführung einer anderen Erhaltungsmassnahme z.B. bedingt die Erhaltungsmassnahme «Binderschicht ersetzen» per se die Erhaltungsmassnahme «Deckbelag ersetzen»

Tab. 3 Katalogblatt 3: *Erhaltungsmassnahme: Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz*

ID-M-Code:				M-1220
				M-2220
				M-2310
				M-3210
				M-3310
				M-4210
Beschreibung Erhaltungsmassnahme:		Anwendung bei Bauwerksteilen aus:		
<ul style="list-style-type: none"> Betonabtrag (z.B. mit HDW) Betonersatz (z.B. Mörtelauftrag, Spritzmörtel/ -betonauftrag) 		<ul style="list-style-type: none"> Beton unbewehrt Beton bewehrt 		
M-2310 beinhaltet noch zusätzlich:				
<ul style="list-style-type: none"> Rückbau der Sohlauffüllung Sohlauffüllung (nach Reprofilierung der Fläche) 				
Chancen:		Gefahren / Unsicherheiten³:		
<ul style="list-style-type: none"> Ersatz des schadhafte Betons Erhöhung Schutz der Bewehrung durch Repassivierung des Stahls durch erneuerte / ggf. grössere Betonüberdeckung 		<ul style="list-style-type: none"> Schäden in der Tiefe werden nicht behoben; ungenügende Abtragstiefe 		
Massnahmenziel und Wirkungsweise:				
<ul style="list-style-type: none"> Abtrag des chlorid- resp. sulfatkontaminierten oder spröden Betons Reprofilierung der Oberfläche und Wiederherstellung des passiven Korrosionsschutzes in der Umgebung der Bewehrung (Repassivierung bzw. Realkalisierung) Erhöhung resp. Wiederherstellung Querschnitt ursprüngliche Druckfestigkeit 				
Erhaltungsmassnahme geeignet für folgende repräsentative Strassentunneltypen⁴:			Geeignet für folgende Schadensprozesse:	
ID-M-Code:	Typ 1	Typ 2a	Typ 2b	ID-S-Code:
• M-1220	x	x	x	• S-11 Bewehrungskorrosion
• M-2220		x		• S-12 Betonangriff / Gefügezerstörung
• M-2310	x			• S-19 Ermüdung Stahlbeton
• M-3210	x	x		
• M-3310	x	x		
• M-4210		x	x	
Effektivität und Langzeitverhalten⁵:				
Sofortwirkung (Veränderung der Zustandsklasse):				
lokale/punktueller Instandsetzung:		ZK --> -2, deutliche Zustandsverbesserung		
Instandsetzung in Teilflächen / örtlich systematisch:		ZK --> -2, deutliche Zustandsverbesserung		
systematische / grossflächige Instandsetzung / Teilersatz:		ZK --> -2, deutliche Zustandsverbesserung		
Langzeitwirkung (Verlängerung der (Rest)Nutzungsdauer):				
lokale/punktueller Instandsetzung:		+15 Jahre, deutliche Zustandsverbesserung		
Instandsetzung in Teilflächen / örtlich systematisch:		+15 Jahre, deutliche Zustandsverbesserung		
systematische / grossflächige Instandsetzung / Teilersatz:		+25 Jahre, Verlängerung um mind. eine Instandsetzungsperiode		

³ Nicht berücksichtigt werden Gefahren / Unsicherheiten in Folge von: nicht sachgemässer Anwendung und/oder Verarbeitung des Materials gemäss Produktdatenblatt, falscher Lagerung des Materials, nicht Beachtung der Aussentemperatur bei der Auftragung des Materials, fehlende oder unzureichende Behandlung der Kontaktfläche, fehlende oder unzureichende Vor- und Nachbehandlung des aufgetragenen Materials

⁴ **Typ 1:** Hufeisenprofil, **Typ 2a:** Kreisprofil (WELK ohne Hinterfüllung), **Typ 2b:** Kreisprofil (WELK mit Hinterfüllung)

⁵ Bezogen auf Bauwerksteil

Tab. 3 Katalogblatt 3: Erhaltungsmassnahme: Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz

ID-M-Code:	M-1220
	M-2220
	M-2310
	M-3210
	M-3310
	M-4210

Attribute für Kostenermittlung:

• Personal (MA):	2 (4 für M-2310)		
• Dauer (Stunden pro GrE) ⁶ :	0.283 (0.567 für M-2310)		
• Grundeinheit (GrE):	m ²		
	ID-M-Code: M-1220	M-2220 M-2310	M-3210 M-3310 M-4210
• lokale / punktuelle Instandsetzung:	5 m ² ▶ 1.42 h	2 m ² ▶ 0.57 h (1.13 h für M-2310)	5 m ² ▶ 1.42 h
• Instandsetzung in Teilflächen / örtlich systematisch:	25 m ² ▶ 7.08 h	5 m ² ▶ 1.42 h (2.83 h für M-2310)	10 m ² ▶ 2.83 h
• systematische / grossflächige Instandsetzung / Teilersatz:	50 m ² ▶ 14.17 h	20 m ² ▶ 5.67 h (11.33 h für M-2310)	20 m ² ▶ 5.67 h

Qualitative Angaben zum theoretischen Ausführungsaufwand⁷:

ID-M-Code:	Material	Maschinen und Geräte	Baulogistik / Zugang	Installationsgrad	temp. Verkehrsführung und Betrieb
M-1220	1.50	1.10	1.00	1.05	1-Spur-Sperrung
M-2220	1.50	1.10	1.20	1.05	unter Betrieb
M-2310	1.50	1.10	1.00	1.05	Röhren-Sperrung
M-3210	1.50	1.10	1.20	1.05	Röhren-Sperrung
M-3310	1.50	1.10	1.20	1.05	Röhren-Sperrung
M-4210	1.50	1.10	1.20	1.05	unter Betrieb

Fallbeispiele⁸:

- Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre
- Nr. 5 Gubristtunnel

⁶ Beinhaltet nur die effektiven Arbeitsstunden vor Ort, ohne Versetzungszuschlag zum Arbeitsort, bei mehreren Arbeitsschritten wurde der Durchschnittswert verwendet

⁷ **Anteile als Kostenzuschlag:**

Materialkosten und -aufwand: kein (0%) > 1.0, klein (+10%) > 1.1, mittel (+50%) > 1.5, gross (+100%) > 2.0

Massnahmenspezifische Gerätkosten: kein (0%) > 1.0, klein (+10%) > 1.1, mittel (+50%) > 1.5, gross (+100%) > 2.0

Baulogistik / Zugang: normal > 1.0, erschwerte Zugänglichkeit > 1.2 (z.B. Arbeiten auf Zwischendecke oder im WELK etc.)

Installationsgrad: klein > 1.05, mittel > 1.15, gross > 1.25

TESI / Betrieb: es ist festzulegen, ob die Arbeiten unter Betrieb (ausserhalb der Fahrbahn), bei einer 1-Spur-Sperrung oder nur unter Röhren-Sperrung ausgeführt werden können. Darauf basierend wird der Kostenanteil TESI und Betrieb errechnet. Die minimale Randbedingung ist angegeben.

⁸ Gemäss Anhang I, Schlussberichte EP1/EP2/EP3

XIV Zusammenfassung der Empfehlungen aus den Einzelprojekten

Nachfolgend werden die wesentlichen Empfehlungen aus den Schlussberichten von EP1 [2], EP2 [3], EP3 [4] und EP5 [5] zusammengefasst:

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.

Verbesserung der Datenqualität

Die Datensammlung ist zu homogenisieren und zu intensivieren. Die digitale Ablage aller relevanten Daten soll in einer strukturierten und umfassenden Bauwerksdatenbank erfolgen. Dafür sind klare, übergeordnete und tunnelspezifische Vorgaben bzgl. der Datenerfassung zu formulieren.

Vorgaben für Hauptinspektionen anpassen

Für die Hauptinspektionen und deren Berichte gibt es detaillierte Vorgaben bezüglich Aufbau und Inhalt. Es wird vorgeschlagen, dass die Strukturierung, die Befunde und die vom Inspektor identifizierten Schadensprozesse und vorgeschlagenen Massnahmen auf die von den Forschungsprojekten EP1 bis EP3 definierten Grundlagenkataloge und Bauwerksteil-Ebenen bezogen werden.

Forschungsbedarf einer tunnelspezifischen Entscheidungsmethodik

Ohne periodische Überwachungsmessungen ist es heute nicht möglich, das Langzeitverhalten von Tunnel auf Objektebene mit hinreichender Sicherheit zu prognostizieren. In der Schnittstelle Befund, Zustandsbeurteilung und Prognose der Gefährdung besteht weiterer Forschungsbedarf zur Entwicklung einer tunnelspezifischen Systematik/Methodik. 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.

Umsetzung Teilprozess Überwachung im Hinblick auf BIM-Methodik

Es 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 bereits jetzt zu antizipieren und darauf hinzuarbeiten. Da der grosse volkswirtschaftliche Nutzen der BIM-Methodik im Erhaltungsprozess / Betrieb liegt, sollen die Anforderungen und die Informationen, welche für den Erhaltungsprozess relevant sind, massgeblich durch die Erhaltungsverantwortlichen und bereits ab der Projektierungsphase vorgegeben werden.

Web-basierter Zugang zu Grundlagenkatalogen

Interessierten Personen sollen die Grundlagenkataloge in geeignetem digitalem Format und in PDF-Format als einfache Web-basierte Datenbank auf einer öffentlich zugänglichen Website des ASTRA zur Verfügung gestellt werden (vgl. NDI-Toolbox

FHWA, [38]). Mit einer zusätzlichen Feedbackfunktion für Anwenderinnen und Anwender können Rückmeldungen oder Korrekturvorschläge eingebracht werden, die nach inhaltlicher Prüfung, z.B. im Halbjahresturnus (analog den Fachhandbüchern des Projektmanagements ASTRA) in die kleine Datenbankanwendung und so auch in den Katalog aufgenommen werden können

Pilotversuche für neue Methoden

Der Einsatz neuer Technologien für die Überwachung von Strassentunnel, wie Sensor-, Monitoring-, Scanning- und Bilderkennungsmethoden sowie automatisierte Auswertung sind wie in Nachbarländern auch in der Schweiz z.B. in Form von Pilotversuchen zu testen und zu fördern.

Verifizierung der Attribute für die Kostenermittlung

Die gemäss der Bottom-Up-Methode geschätzten Attribute für den Personalaufwand und den theoretischen Ausführungsaufwand soll von Experten (z.B. von Bauunternehmen) überprüft bzw. periodisch überprüft und aktualisiert werden. Ausgeführte Erhaltungsprojekten sollen nach dem Top-Down-Ansatz ausgewertet und mit den Kostenmodellen abgeglichen werden. Die Kostenmodelle sollen basierend auf diesen Aktualisierungen periodisch (z.B. alle zwei Jahre) aktualisiert werden.

Beurteilung der Wirkung der vorgeschlagenen Systematik

Die Wirkung der Anwendung der vorgeschlagenen Grundlagenkataloge und Methoden gemäss Forschungsprojekt sollen überprüft werden. Dies muss in zwei Phasen erfolgen. In der ersten Phase muss geprüft werden, ob die Methoden korrekt angewendet werden und wie gross die Akzeptanz bei den Anwendern ist. In der zweiten Phase ist die Wirkung der Massnahmen zu überprüfen bspw. wie die unmittelbaren Kosten und Auswirkungen auf den Betrieb von vorgeschlagenen Massnahmen sind und wie die längerfristige Wirkung der Massnahme ist.

Einführung und Anwendung des Kostentools

Die schweizweite Anwendung in verschiedenen Filialen (allenfalls im Rahmen einer Pilotphase parallel zur heutigen Projektgenerierung) könnte Hinweise auf die Akzeptanz und Wirkung des Kostentools geben. Die Abteilung Erhaltungsplanung der Zentrale fungiert als Prozesseigner und Koordinator. Die Abteilungen EP der Filialen können in eigener Regie festlegen, für welche Projektgenerierungen das Kostenmodell Anwendung findet. Bei der Projektübergabe an das Projektmanagement soll bspw. mit Hilfe des Dokumentes Projektantrag (ASTRA-D-A33C3401/308) festgelegt werden, ob bei Projekt-ende die Kosten in das Kostentool rückzuführen sind.

Kostenstruktur nach Bauwerksteilen und Massnahmentypen

Um mit vertretbarem Aufwand Kostenkennwerte aus abgeschlossenen Erhaltungsprojekten gewinnen zu können, schlägt EP5 vor, die NPK Positionen mittels der Objektgliederung den Bauwerksteile, Teilobjekte und Massnahmentypen gemäss Kostenmodell-Struktur zuzuweisen. Dies würde eine einfache Aggregierung der Kosten und damit Verifikation der Kostenkennwerte ermöglichen.

Durchgängige, phasenübergreifende Kostenstruktur

Die vorgeschlagene Kostenstruktur soll ab der Phase Projektgenerierung bis zum Projektabschluss konsequent angewendet werden. Damit werden Voraussetzungen ge-

schaffen, dass einheitliche Kostenkennwerte definiert werden können und dass auf effiziente Art und Weise phasenübergreifende Kostenvergleiche angestellt, sowie Rückführungen ausgeführter Massnahmen in das Kostentool und auch in die KUBA-Datenbank vollzogen werden können.

Anregungen zu Händen Expertenkommission SN 640 907

Ausgehend von Vergleichsbetrachtungen zum Einfluss von Strassennutzerkosten (SD) und Kosten Dritter (DK) auf die Gesamtkosten von objektbezogenen Tunnelerhaltungsprojekten wurden verschiedene Erkenntnisse gewonnen. Daraus wurden Empfehlungen zu Händen der Expertenkommission zur Norm SN 640 907 formuliert. Beispielsweise soll ergänzend das Kriterium «betroffene Verkehrsmenge pro 24h» eingeführt werden, um verschiedene Erhaltungsvarianten mit unterschiedlichen Bauzeitfenstern zuverlässiger untersuchen zu können. Es wird empfohlen, mit der Expertenkommission SN 640 907 [33] in Kontakt zu treten betreffend den Umgang der an sie gerichteten Anregungen.

XII Glossar

Begriff	Bedeutung
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 der bauspezifische Teil der der Bauwerksbewirtschaftung. Sie beginnt nach erfolgter Inbetriebnahme eines Bauwerks und erstreckt sich über dessen gesamte Nutzungsdauer. Nicht zur Bauwerkserhaltung gehören 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.
Bewährte USM	In der Erhaltungsplanung von Strassentunnel oft genutzte USM
Beziehungsstruktur	Schema von Einflussfaktoren und ihre Abhängigkeit zueinander als Grundlage für die qualitative Risikobeurteilung eines Gefährdungsbildes (siehe 8.3.2)
BIM	Building Information Modeling: Methode zur digitalen Planung und dem Betreiben von Bauwerken
BSA / EMA / EES	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA); in Literatur auch als Elektromaschinelle Ausrüstung (EMA) bezeichnet. <i>Französisch</i> : équipements d'exploitation et de sécurité (EES)
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.
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 Forschungsauftrags / auch: Fachbereich Erhaltungsplanung des ASTRA
Erhaltungsplanung	Ausarbeiten eines Erhaltungskonzeptes für einen festgelegten Zeitabschnitt (mittels Optimierung von Erhaltungsvarianten). Beim ASTRA organisatorisch getrennt von Erhaltungsmanagement beim gleichnamigen Fachbereich der 5 ASTRA-Filialen
Erhaltungsmanagement	Das Erhaltungsmanagement erfolgt entlang eines Kreisprozesses bestehend aus Erfassung und Pflege der Bestands- und Zustandsdaten, Ermittlung und

	Prognose des Erhaltungsbedarfs, Entwicklung des Erhaltungsprogramms, Planung und Umsetzung der Erhaltungsmaßnahmen sowie Controlling. Beim ASTRA organisatorisch getrennt von Erhaltungsplanung bei Abteilung N Strassennetze: Strategie für das Erhaltungsmanagement
FaS	Fachspezialistin / Fachspezialist ASTRA, u.a. für die Erhaltungsplanung
Gefährdung	Die Tragsicherheit oder Betriebssicherheit infrage steller Umstand.
Gefährdungsbild	Durch eine Leitgefahrdung und Begleitumstände charakterisierte kritische Situation
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
Medium	Ausbreitungsmedium einer physikalischen Erscheinung
Monitoring	Einsatz von geeigneten Untersuchungsmethoden für die Überwachung der Zustandsentwicklung durch regelmässige oder ständige Datenerfassung, die weitgehend automatisiert ist.
OS	Oberflächenschutz gemäss Grundlagenkatalog EP1
PoF	Probability of Failure (siehe auch Eintretenswahrscheinlichkeit)
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: <ul style="list-style-type: none"> • 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 Teilprozesseses Überwachung gemäss Grundnorm.
Unterhalt	Bewahren oder Wiederherstellen eines Bauwerks ohne wesentliche Änderung der Anforderungen
U.-Katalog	Grundlagenkatalog Untersuchungsmethoden (USM / Diagnostik)
Untersuchungsmethode	Methoden, Prüfverfahren zur Untersuchung am Bauwerk, d.h. für die Überwachung und Überprüfung des Bauwerkszustands (EP2: USM, im Teilprozess Überwachung)
USM	Untersuchungsmethode
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
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

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: 04.05.2025

Grunddaten

Projekt-Nr.: AGT 2017/002
 Projekttitel: Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunnel: Synthesebericht
 Enddatum: 30.06.2025

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden 5 Einzelprojekte ausgelöst mit dem Hauptziel, die Grundlagen für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunneln zu verbessern und zu systematisieren, um stabile Erhaltungsentscheidungen und kosteneffiziente Erhaltungsmaßnahmen zu gewährleisten. Dieser Synthesebericht fasst die wichtigsten Ergebnisse des Forschungsprojekts zusammen. Die nachfolgenden 5 Einzelprojekte wurden in Anlehnung an die Teilprozesse des operativen Erhaltungsmanagement unterteilt bzw. definiert, so dass eine gesamtheitliche Systematik für bergmännische Tunnel entwickelt wurde:

EP1 Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunneln (VSS 1781)

EP2 Diagnostik - Überwachungs- und Inspektionsmethoden (VSS 1784)

EP3 Festlegung von standardisierten Erhaltungsmaßnahmen pro Schadensprozess (VSS 1779)

EP4 Entwicklung eines Entscheidungsmodells (nicht publiziert)

EP5 Kostenmodell (VSS 1774)

Der Schlussbericht zu EP4 «Entwicklung eines Entscheidungsmodells» wurde auf Antrag der Begleitkommission (BK) und Gesamtprojektleitung (GPL) sowie Entscheid des ASTRA nicht publiziert, weshalb diese Forschungsergebnisse im Synthesebericht nicht dokumentiert sind.

Als wesentliches Resultat liegen den Anhängen der Schlussberichte der Einzelprojekte strukturierte, einfach zu verwendende Kataloge oder Werkzeuge (v.a. Kostenmodell) bei. Die Gliederungsstruktur der Kataloge erlaubt die Erweiterung von zukünftigen Schadensprozessen, Untersuchungsmethoden oder Massnahmen. In den Katalogen werden zudem mittels Attribute Bezüge zwischen Befunden und Schadensprozessen, Untersuchungsmethoden, Bauwerksteilen, Konsequenzen in Form von Gefährdungsbildern sowie Erhaltungsmaßnahmen und deren Kostenfolgen geschaffen. Damit werden auch alle relevanten Informationen im Erhaltungsprozess systematisch miteinander verknüpft.

Auf eine vollständige Darstellung der Kataloge und Modelle sowie der Begründung, Herleitung und Plausibilisierung der Daten wird mit Verweis auf die Schlussberichte der Einzelprojekte verzichtet. Im Synthesebericht wird ein Überblick über die wichtigsten Ergebnisse aus den Einzelprojekten gegeben.

Sämtliche Ergebnisse wurden anhand von 9 systematisch dokumentierten Fallbeispielen in allen EPs zur Plausibilisierung der Kataloge und Kostenmodelle verwendet.

Als eigener Beitrag ohne direkten Bezug zu den Einzelprojekten enthält der Synthesebericht auch ein Kapitel zur aktuellen Praxis der Zustandsbeurteilung und Entscheidungsfindung im operativen Erhaltungsmanagement von Strassentunnel. Basierend auf einer Analyse der heutigen Praxis werden Vorschläge gemacht, wie im Rahmen bestehender Prozesse Erhaltungsentscheide systematisiert und standardisiert werden könnten.



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 Forschungsprojekte EP1, EP2, EP3 und EP5 gemäss Pflichtenhefte wurden vollständig und gut erfüllt. Die Ergebnisse werden grundsätzlich als vollständig, nützlich, zweckmässig und up to date beurteilt. Der vorliegende Synthesebericht dokumentiert alle Ergebnisse beispielhaft und fasst diese so zusammen, dass eine Übersicht über alle Forschungsprojekte vor allem in Bezug auf die Teilprozesse des operativen Erhaltungsmanagement möglich bleibt. Für die vollständige und detaillierte Dokumentation der Resultate wird aber auf die Schlussberichte verwiesen.

Im Synthesebericht wird der Stand der Praxis und Forschung zusammenfassend wiedergegeben und die wesentlichen Erkenntnisse und Folgerungen sowie Empfehlungen für das operative Erhaltungsmanagement von Tunnel aus übergeordneter Sicht zusammengefasst.

Somit ermöglicht der Synthesebericht den Einstieg in die Ergebnisse des Forschungsprojektes und erlaubt, je nach Fragestellung den raschen Bezug zum relevanten Einzelprojekt.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die in diesem Forschungsprojekt erarbeiteten Kataloge und Tools bilden durch die Wahl einer untereinander abgestimmten, systematischen und miteinander verknüpften Gliederung eine wertvolle Grundlage zur Standardisierung und Systematisierung des operativen Erhaltungsmanagements mit Fokus auf Strassentunnel. Es wird empfohlen, die substanziiell guten Ergebnisse der Forschungsarbeiten bei allen Bearbeitungsschritten von der Inspektion bis zur Projektgenerierung anzuwenden und den entstehenden Nutzen zu ziehen.

Der Einsatz neuer digitaler Technologien für die Überwachung von Strassentunnel sind voranzutreiben. BIM dürften auch die Datenbankstrukturen für das Erhaltungsmanagement von Strassentunnel vorgeben, weshalb diese bereits jetzt zu antizipieren sind. Ein wesentlicher volkswirtschaftliche Nutzen der BIM-Methodik liegt im Erhaltungsmanagement / Betrieb liegen, weshalb deren Bedürfnisse bereits ab der Projektierungsphase vorgegeben werden sollten. Weiterhin sollen praxistaugliche Lösungen im Vordergrund stehen und weniger theoretische und statistische Überlegungen. Die Nachvollziehbarkeit der Entscheide ist wichtig und muss transparent dargelegt sein.

Im Synthesebericht werden zudem 5 konkrete Empfehlungen in Bezug auf tunnelspezifische Richtlinien, verbindliche Vorgaben an die Datenqualität, Leitfaden für Inspektoren von Tunnel, Fortsetzung Entwicklung Entscheidungsmodell und Prototyp Datenmodell formuliert, welche einen Beitrag zum übergeordneten Ziel zur Systematisierung und Standardisierung des operativen Erhaltungsmanagement von Tunnel leisten können.

Publikationen:

Fries, T.; Blank, K.; Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln, Dokumentation SIA D 0253, 2024

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Blank

Vorname: Konrad

Amt, Firma, Institut: ILF Beratende Ingenieure AG, Zürich

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Blank K.



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 Synthesebericht zum Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunnel ist klar strukturiert und gut formuliert. Er fasst die im Rahmen des Forschungsprojekts erstellten Forschungsergebnisse der Einzelprojekte EP1 bis EP3 und EP5 gut zusammen.

Die Gesamtleitung (GPL) hat im Forschungsprojekt grossen Wert darauf gelegt, dass die einzelnen Projekte gut aufeinander abgestimmt und klar strukturiert sind und dass die Ergebnisse auch praxisbezogen angewendet werden können. Dies ist gut gelungen.

Im Synthesebericht werden die wichtigsten Erkenntnisse zum Stand der Praxis und aus der Forschung wiedergegeben. Zudem ist im Synthesebericht dargelegt, was in der künftigen Anwendung berücksichtigt und wie der Ausbau und Gewinn an Erfahrungen und Entwicklungen eingebaut werden soll. Dies sind wertvolle Informationen für das Astra (Zentrale und Filialen) und die eingesetzten Planer.

Die Gesamtleitung hat wesentlich dazu beigetragen, dass das Forschungspaket mit den EP1 bis EP3 und EP5 erfolgreich abgeschlossen werden konnten. Die Ergebnisse sind im Synthesebericht zusammengefasst.

Der Synthesebericht erfüllt die Erwartungen an die Zielerreichung gut.

Umsetzung:

Der Synthesebericht legt den Schwerpunkt auf die Beschreibung der erarbeiteten Resultate und deren Verknüpfungen untereinander. Damit wird der Einstieg in die Einzelprojekte erleichtert. Als Beitrag zum Verständnis der Einzelprojekte sind relevante Resultate in Form von Anhängen beigelegt.

Die über alle Einzelprojekte einheitliche Bauwerksgliederung erleichtert die künftige Nutzung und Anwendung der Forschungsergebnisse. Die Entwicklung in den Einzelprojekten von Katalogen zu Schadensprozessen, Überwachungs- und Inspektionsmethoden sowie standardisierten Erhaltungsmaßnahmen liefert eine Fülle von Wissen und Erfahrungen, die sehr wertvoll für das Erhaltungsmanagement sind. Die zugehörigen Schnittstellen wurden festgelegt und gesamtheitlich eingehalten.

Zum Thema Entscheidungsfindung hat die GPL das aktuelle Vorgehen aufgezeigt und Empfehlungen formuliert, wie die Grundlagen zur Entscheidungsfindung ausgehend von der heutigen Praxis verbessert werden können. Dies bspw. auch zur präzisierenden Definition der Zustandsklassen nach Astra RL.

In einem eigenen Kapitel sind die Erkenntnisse und Folgerungen für das operative Erhaltungsmanagement zusammenfassend dokumentiert.

Das in einem Einzelprojekt entwickelte Kostenmodell mit Kostenkennwerten liefert wertvolle Informationen, um zu einer zuverlässigen und nachvollziehbaren Kostenschätzung zu kommen. Die Anwendung ist mit den anderen Einzelprojekten abgestimmt und stellt eine gute, systematisch aufgebaute, Grundlage für die Erhaltungsplaner dar.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die in diesem Forschungspaket erarbeiteten Kataloge und Werkzeuge bilden durch die Wahl einer untereinander abgestimmten, systematischen und miteinander verknüpften Gliederung eine wertvolle Grundlage zur Standardisierung und Systematisierung des operativen Erhaltungsmanagements von Strassentunnel. Eine künftige Implementierung und Weiterentwicklung in Datenmodelle ist anzustreben. Der Einsatz neuer Technologien für die Überwachung von Strassentunnel (Sensor-Online-Monitoring-, Scanning- und Bilderkennungsverfahren, Automatisierung von Aufnahmen, Digitalisierung KI-gestützter Auswertung) sind voranzutreiben. Die BK teilt die Meinung, dass weiterhin praxistaugliche Lösungen im Vordergrund stehen und weniger theoretische und statistische Überlegungen. Die Nachvollziehbarkeit der Entscheide ist wichtig und muss transparent dargelegt sein.

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 AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: