



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Erhaltungsmanagement Tunnel Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden

**Gestion constructive de la maintenance en tunnel
Diagnostic: méthodes de surveillance et d'inspection**

**Maintenance management of tunnels
Diagnostics: Monitoring and Inspection Methods**

EBP Schweiz AG
Stefan Matsch, Dr. sc. techn., Dipl. Werkstoffing. ETHZ/SIA
Sonja Wacker, Dipl. Bauing. ETHZ/SIA
Hannes Heller, MSc Bauing. ETHZ

Forschungsprojekt AST_2020_102 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

Juni 2025

1784

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

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

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

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

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

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.
Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Erhaltungsmanagement Tunnel Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden

**Gestion constructive de la maintenance en tunnel
Diagnostic: méthodes de surveillance et d'inspection**

**Maintenance management of tunnels
Diagnostics: Monitoring and Inspection Methods**

EBP Schweiz AG
Stefan Matsch, Dr. sc. techn., Dipl. Werkstoffing. ETHZ/SIA
Sonja Wacker, Dipl. Bauing. ETHZ/SIA
Hannes Heller, MSc Bauing. ETHZ

Forschungsprojekt AST_2020_102 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Stefan Matsch, EBP Schweiz AG, Zürich

Mitglieder

Sonja Wacker, EBP Schweiz AG, Zürich
Hannes Heller, EBP Schweiz AG, Zürich

Begleitkommission

Präsident

Heinz Ehrbar, Heinz Ehrbar Partners GmbH, Herrliberg

Mitglieder

Raffaele Filippini, Filippini & Partner Ingegneria SA, Biasca
Christian Gammeter, ASTRA, Ittigen
Federica Sandrone, SBB, Bern
Bastian Otto, AXPO Power AG, Baden
Urs Vollmer, ASTRA, Zofingen
Martin Wyss, ASTRA, Ittingen

Antragsteller

Arbeitsgruppe für Tunnelforschung (AGT)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé.....	10
Summary	13
1 Einleitung.....	17
1.1 Anlass.....	17
1.1.1 Ausgangslage und Kontext.....	17
1.1.2 Übergeordnete Fragestellungen im Forschungsprojekt.....	18
1.1.3 Fragestellung auf Einzelprojekt bezogen	19
1.2 Grundlagen und Datenbasis	20
1.2.1 Normen und Richtlinien	20
1.2.2 Literaturrecherche	20
1.2.3 Fallbeispiele	20
1.2.4 Interviewrecherche	21
1.3 Stand der Praxis und Forschung (State of the Art)	22
1.3.1 Stand der Praxis und Forschung Erhaltungsmanagement Tunnel	23
1.3.2 Neue Entwicklungen bei der Zustandserfassung	29
1.3.3 Relevanz der Entwicklungen für das Forschungsprojekt	32
1.4 Zweck und Ziel des Einzelprojekts	34
1.4.1 Übergeordnetes Hauptziel des Forschungsprojektes.....	34
1.4.2 Beitrag des Einzelprojektes zum Hauptziel	34
1.5 Erwartete Resultate und Nutzniessung	36
1.6 Definition Erhaltungsprozess und Abgrenzung	37
1.6.1 Erhaltungsprozess und Projektgenerierung	37
1.6.2 Abgrenzung Forschungsprojekt	42
1.7 Methodik der Forschungsarbeit.....	43
1.8 Ablauf und Organisation des Forschungsprojekts.....	46
1.8.1 Organisation und Beauftragter	46
1.8.2 Ablauf und Bearbeitungszeitraum	46
1.9 Bauwerksgliederung unter Berücksichtigung der Anforderungen des ASTRA	47
2 Ergebnisse des Einzelprojekts EP2	49
2.1 Bauwerksgliederung des Forschungsprojekts	49
2.1.1 Relevanz der Bauwerksgliederung für Forschungsprojekt.....	49
2.1.2 Datengrundlage der Bauwerksgliederung	49
2.1.3 Struktur der Bauwerksgliederung im Forschungsprojekt	49
2.1.4 Umsetzung der Bauwerksgliederung in den Katalogen EP1/EP2/EP3	52
2.1.5 Implementierung in bestehende und neue Datenmodelle / -banken.....	53
2.2 Katalog Untersuchungsmethoden	54
2.2.1 Anforderungen an den Katalog der Untersuchungsmethoden	54
2.2.2 Abgrenzungen beim Katalog Untersuchungsmethoden	54
2.2.3 Systematisierung und Aufbau Katalog Untersuchungsmethoden.....	55
2.2.4 Informationen zu Untersuchungsmethoden und Art der Daten	59
2.2.5 Vollständigkeitsnachweis Katalog Untersuchungsmethoden	62
2.2.6 Aussagekraft und Grenzen bei Untersuchungsmethoden	65
2.2.7 Aufwand- und Kostenangaben für Untersuchungsmethoden.....	66
2.2.8 Bewährte Untersuchungsmethoden	68
2.3 Konzeptvorschlag Vergleichsmethodik	72
2.3.1 Vergleich von Methoden im Teilprozess Überwachung	72
2.3.2 Konzeptüberlegungen zu einer Vergleichsmethodik USM	73
3 Erkenntnisse und Folgerungen.....	77
3.1 Grundsätzliches	77
3.2 Kompatibilität Grundlagen mit bestehenden Daten und Methoden.....	77

3.3	Anwendung.....	79
3.3.1	Anwendung des Katalogs	79
3.3.2	Hinweise zur Anwendung einer Vergleichsmethodik	80
3.3.3	Auswertung Fallbeispiele für Untersuchungsmethoden-Katalog.....	81
3.4	Plausibilität und Zuverlässigkeit der Angaben.....	81
3.5	Praktischer Nutzen	82
4	Empfehlungen	85
5	Datengrundlage.....	87
5.1	Kompilation der Literatur	87
5.2	Kompilation Fallbeispiele	87
	Anhänge	89
	Glossar.....	209
	Literaturverzeichnis	213
	Projektabchluss.....	217

Zusammenfassung

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

Darauf aufbauend wurde das vorliegende Forschungspaket mit den Einzelprojekten initiiert, welches das Hauptziel verfolgt, die Grundlagen für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunneln zu verbessern und zu systematisieren, um stabile Erhaltungsentscheidungen und kosteneffiziente Erhaltungsmassnahmen zu gewährleisten. Das vorliegende Forschungsprojekt EP2 «Einzelprojekt EP2 – Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden» behandelt dabei die Untersuchungsmethoden, welche bei der Überwachung und Überprüfung von bergmännischen Strassentunneln zum Einsatz kommen.

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

Der vorliegende Schlussbericht EP2 ist einer von fünf Forschungsberichten, welche im Rahmen des Forschungsprojekts «*Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln*» erstellt worden sind. Des Weiteren werden die Forschungsergebnisse auch in einem Synthesebericht [49] zusammengefasst.

Die Literaturrecherche und 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 die meisten Publikationen zum Thema Überwachung von Tunneln entweder Vorgaben und Handlungsanweisungen u.a. für Inspektionen enthalten oder neue technologische Entwicklungen für die Untersuchungen beschreiben. Übersichten zu tunnelspezifischen Untersuchungsmassnahmen, welche mit Bezug u.a. auf Befunde und Bauwerksteile detaillierte Informationen liefern, sind in der Literatur nicht umfassend zu finden.

Die Ergebnisse aus dem im Einzelprojekt EP2 behandelten Teilprozess Überwachung müssen Informationen liefern, welche im Rahmen des Erhaltungsmanagement-Prozesses die Basis für stabile, relevante Massnahmenentscheide bilden. Der aus dem EP2 resultierende Grundlagenkatalog von Untersuchungsmethoden (U.-Katalog) umfasst alle im Teilprozess Überwachung anwendbaren Untersuchungen bei bergmännischen Tunneln. Bei der Auswahl von zweckmässigen, aussagekräftigen Untersuchungsmethoden wurde gemäss Zielsetzung fürs EP2 aus dem Initialprojekt eine «Good Practice» verfolgt.

Der U.-Katalog wurde von Grund auf komplett neu erarbeitet und strukturiert aufgebaut. Der Ansatz für die Systematisierung der Untersuchungsmethoden verfolgt das Ziel, die einzelnen Methoden in übergeordneten Einheiten zu gliedern, was der Übersichtlichkeit, Lesbarkeit und somit der Praxistauglichkeit dient. Zudem bezieht sich die Struktur des Katalogs auf die gemäss dem EP1 definierten visuellen detektierbaren Befunde, die Schadensprozesse sowie auf die Bauteilart, welche die Bauwerksteile eines Tunnels sowie dessen Materialisierung umfasst.

Die Gliederung nach Untersuchungstypen (vgl. nachfolgende Abbildung) oder die Suche z.B. nach den zugeordneten Befunden oder spezifischen Bauwerksteilen, unterstützen die Auswahl einer geeigneten Untersuchungsmethode für eine spezifische Anwendung im Tunnel.

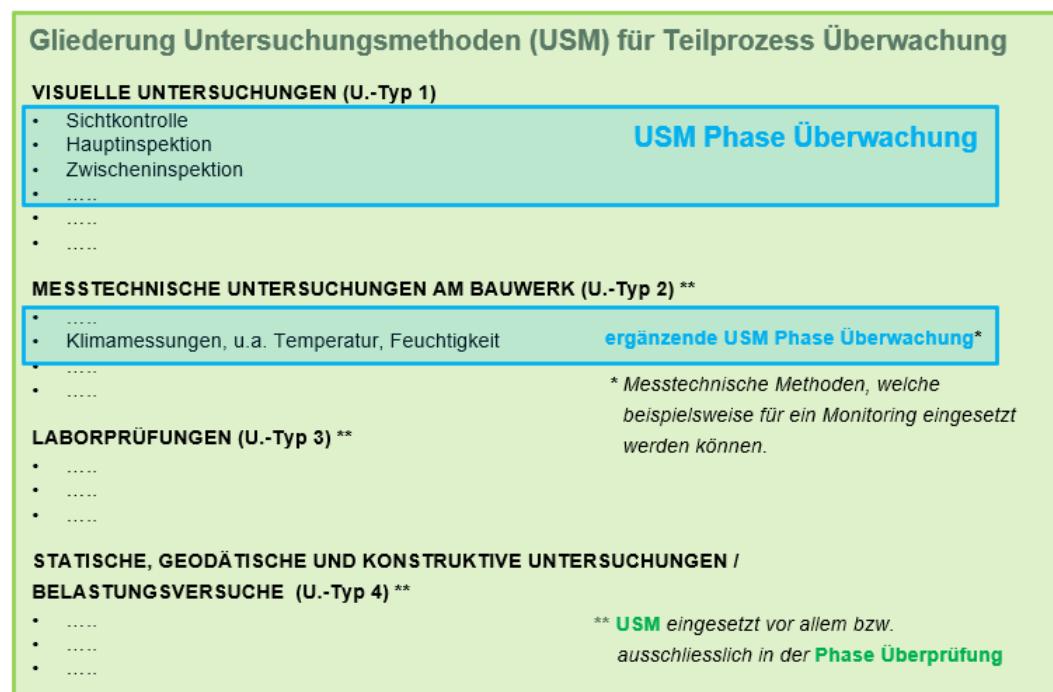


Abb. 1 Abbildung der Struktur des Katalogs «U.-Untersuchungsmethoden» des Teilprozesses Überwachung, mit Gliederung nach Typ Untersuchungsmethode (USM)

Der U.-Katalog enthält folgende Informations-Bereiche mit «Attributen» zur Beschreibung von Eigenschaften der einzelnen Untersuchungsmethoden:

- Strukturierung der Untersuchungsmethoden;
 - Zuordnung Bauwerksgliederung / Befunde / Schäden;
 - Kontext Untersuchungsmethoden;
 - Erwartbare Ergebnisse;
 - Attribute für Aufwand und Kostenschätzung;
 - Verweise / Referenzen, Informationen zu Anbietern.

Für die bessere und praxisnähere Anwendbarkeit des Kataloges, welcher über 140 Untersuchungsmethoden enthält, werden 41 typische, oft genutzte USM als bewährte Untersuchungsmethoden speziell ausgewiesen. Für diese Methoden wurden spezifische Katalogblätter generiert, welche auf ein bis zwei A4-Seiten alle Informationen aus dem Katalog zur Methode einheitlich strukturiert und gut lesbar darstellen.

Es hat sich gezeigt, dass für die Verifizierung vieler Schadensprozesse und Befunde bei den meisten Bauarten mehrere Untersuchungsmethoden in Frage kommen. Es gilt dann, die verschiedenen Methoden miteinander zu vergleichen.

Neben dem strukturierten Katalog wurde im EP2 dazu auch ein Konzeptvorschlag für eine Vergleichsmethodik erarbeitet, welche Risikobetrachtungen beim Einsatz von USM miteinbezieht. Dieses Konzept zeigt, dass dem Thema Risiko auch beim Teilprozess Überwachung Rechnung getragen werden muss. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass die Praxistauglichkeit einer solchen Methodik noch nicht geben ist.

Mit der Darlegung der Ergebnisse wird auch der praktische Nutzen des U.-Katalogs und der Katalogblätter der bewährten Methoden für die Anwendergruppen des Erhaltungsmanagements von Tunneln aufgezeigt.

Aus den Erkenntnissen der Erarbeitung dieses Forschungsprojekts zum Teilprozess Überwachung wurden u.a. nachfolgender Handlungsbedarf bzw. Forschungsbedarf für die Weiterentwicklung des Erhaltungsmanagements abgeleitet.

Einheitlichkeit Begrifflichkeiten im Erhaltungsmanagement-Prozess:

- Für die schweizweite Umsetzung des Erhaltungsmanagement für Strassentunnel wird empfohlen, eine einheitliche Begrifflichkeit festzulegen und anzuwenden. Das gilt besonders für den Teilprozess Überwachung.

Verlässliche Datengrundlagen für Erhaltungsmanagement-Prozess:

- Netzweite Erfassung und Auswertung von Erhaltungsprojekten mit durchgeföhrten Überwachungs- und Überprüfungsmassnahmen;
- Zur Verfügungstellung der zusammengestellten Daten u.a. als wertvolle Hinweise zur aktuellen «Good Practice» für andere Projekte und Bereichen;
- Als kleine «Pilotanwendung» zur Verfügungstellung U.-Katalog als einfache Webdatenbank auf einer öffentlich zugänglichen Website (z.B. Standards für Nationalstrassen, 4. Tunnel und Geotechnik);
- Weiterer Forschungsbedarf besteht im Zusammenhang mit der Ermittlung der Einflussfaktoren auf die Risikobeurteilung von Gefährdungsszenarien. Dabei gilt es den Einsatz von und die Verantwortlichkeiten für die Risikobetrachtungen im Gesamtprozess abschliessend zu klären.

Vorbereitung der Umsetzung des Erhaltungsmanagements-Prozesses mit BIM:

- Mitwirkung bzw. Begleitung der Erhaltungsplanung bei der Entwicklung der BIM-Standards für Tunnel und Bauten im Bestand;
- Pilotprojekte für die Erstellung von digitalen Zwillingen bestehender Tunnel als Vorbereitung für die Abbildung von Zustandsdaten in BIM;
- Sicherstellung, dass aktuelle und zukünftige Datenbestände so aufgebaut sind, dass sie einfach in neue Datenbanken migriert werden können.

Pilotversuche für praxisnahe Anwendung neuer u.a. automatisierter Untersuchungen:

- 1:1-Praxistests in Strassentunneln z.B. von Scanning-Methoden mit kinematischen sowie automatisierten Monitoring-Systemen;
- Auswertung der Praxistests, wenn möglich mit automatisierten Auswertungen, wie z.B. mit Bilderkennungsmethoden.

Résumé

En 2014 l'OFROU a lancé la première phase d'un projet de recherche sur la gestion constructive de la maintenance en tunnel creusé qui s'est achevé en 2016 par la production d'un rapport sur le projet initial [67]. Il en ressort que les processus de la gestion constructive de la maintenance des tunnels creusés ne sont pas suffisamment pris en compte par rapport aux ouvrages d'art et qu'ils ne sont pas standardisés. C'est sur cette base que le présent projet de recherche a été déclenché, avec pour objectif principal l'amélioration et la systématisation des bases de la gestion de la maintenance des tunnels routiers creusés, avec pour but de prendre des décisions d'entretien cohérentes et des mesures efficaces en termes de coûts.

Le projet de recherche EP2 "Diagnostic: méthodes de surveillance et d'inspection" traite à cet égard des méthodes d'examen utilisées pour la surveillance et le contrôle des tunnels routiers. Il prend exclusivement en compte les structures constructives du tunnel creusé et composées de la voûte extérieure et intérieure, de la chaussée, y compris la structure de la chaussée ou le canal des conduites de l'ouvrage, de la dalle intermédiaire et du système de drainage. Les équipements d'exploitation et de sécurité (EES) ne font pas partie du présent projet de recherche.

Le présent rapport final EP2 est l'un des cinq rapports de sous-projets qui a été élaboré dans le cadre du projet de recherche "Gestion de la maintenance en tunnel creusé". Les résultats de la recherche sont également présentés dans un rapport de synthèse.

Les projets partiels EP1 à EP3 et EP5 ont été élaborés simultanément. Une grande importance a été accordée à la compatibilité des données (structuration des ouvrages, terminologie des dégradations, mesures, etc.)

L'analyse de la littérature existante a montré, que la plupart des publications au sujet de la surveillance des tunnels contiennent soit des directives et des instructions d'action, entre autres pour les inspections, soit décrivent de nouveaux développements technologiques pour les examens. On ne trouve pas dans la littérature de vue d'ensemble des mesures d'inspection spécifiques aux tunnels, qui fournissent des informations détaillées sur les constatations et les éléments de construction.

Les résultats du sous-processus de surveillance traité dans le projet EP2 doivent fournir des informations qui, dans le cadre du processus de gestion de la maintenance, constituent la base de décisions de mesures pertinentes. Le catalogue de base des méthodes d'analyse résultant du projet EP2 comprend toutes les analyses applicables aux tunnels creusés dans le cadre du sous-processus surveillance. Conformément aux objectifs fixés pour le EP2 dans le projet initial, une "bonne pratique" a été suivie lors de la sélection de méthodes d'investigation appropriées et pertinentes.

Le catalogue a été entièrement rédigé et structuré à partir de zéro. L'approche adoptée pour la systématisation des méthodes d'analyse a pour objectif de regrouper les différentes méthodes en unités supérieures, ce qui permet de les rendre plus claires, plus lisibles et donc plus pratiques. La structure du catalogue se réfère aux résultats visuels détectables définis dans le sous-projet EP1, aux processus de détérioration ainsi qu'au type d'élément de construction, qui comprend les parties de l'ouvrage d'un tunnel ainsi que sa matérialisation.

L'organisation par types d'examens (voir illustration ci-dessous), la recherche par exemple des résultats attribués ou d'éléments de construction spécifiques, aident à choisir une méthode d'examen appropriée pour l'application dans le tunnel.

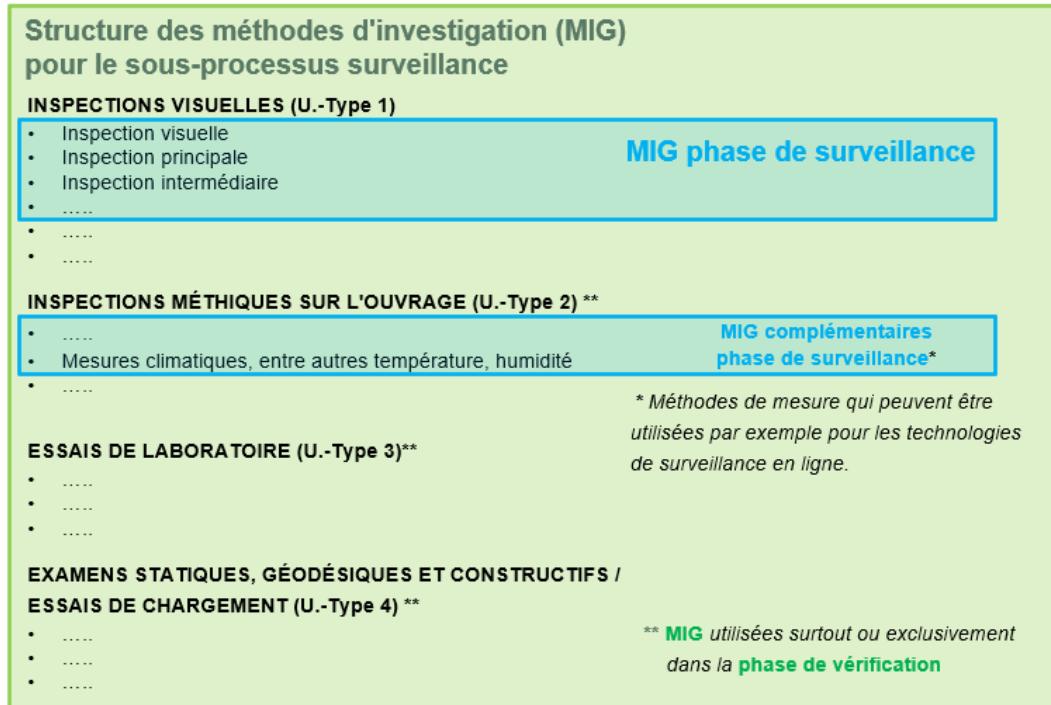


Abb. 2 Illustration de la structure du catalogue "Méthodes d'investigation" pour le sous-processus surveillance, avec la structuration selon le type de méthodes d'investigation.

Le catalogue contient les domaines d'information suivants avec des "attributs" pour décrire les propriétés des différentes méthodes :

- Structuration des méthodes d'investigation;
- Attribution structure de l'ouvrage / constatations / dommages;
- Contexte des méthodes d'investigation;
- Résultats attendus;
- Attributs pour l'effort et l'estimation des coûts;
- Références, informations sur les prestataires.

Afin d'améliorer l'applicabilité pratique du catalogue, qui contient plus de 140 méthodes d'examen, 41 méthodes établies et souvent utilisées ont été spécialement mises en évidence. Pour ces méthodes éprouvées, des fiches de catalogue spécifiques ont été générées, qui présentent toutes les informations du catalogue relatives à la méthode de manière structurée et uniforme et de façon bien lisible.

Il s'est avéré que plusieurs méthodes d'investigation entrent en ligne de compte pour la vérification de nombreux processus de détérioration et de constats pour la plupart des types de construction. Ces méthodes doivent être comparées entre elles.

En complément du catalogue structuré, une proposition de concept pour une méthode de comparaison des méthodes d'investigation a été élaborée, qui intègre les considérations de risque. Ce concept montre que le thème du risque doit également être pris en compte dans le processus partiel de surveillance. Cependant, il s'est également avéré qu'une telle méthode de comparaison n'était pas adaptée à la pratique. L'intégration des considérations relatives aux risques doit être clarifiée de manière générale dans le cadre d'un futur modèle de décision.

Lors de la discussion des résultats dans le rapport final, l'utilité pratique du catalogue et des fiches de catalogue des méthodes éprouvées pour les groupes d'utilisateurs de la gestion de la maintenance des tunnels routiers est mise en évidence. Les conclusions tirées de l'élaboration de ce projet de recherche concernant le sous-processus surveillance ont

permis de formuler ci-après les besoins d'action ou de recherche supplémentaires suivantes pour le développement de la gestion de la maintenance.

Les conclusions tirées de l'élaboration de ce projet de recherche concernant le sous-processus Surveillance ont permis de formuler ci-après des recommandations pour le développement de la gestion de la maintenance :

- Uniformité de la terminologie dans le futur processus de gestion de la maintenance, en particulier pour le sous-processus de surveillance.

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

- Mise à disposition des données évaluées, entre autres sous forme d'indications sur les "bonnes pratiques" actuelles;
- Mise à disposition du catalogue des mesures d'analyse sous la forme d'une simple base de données interactive sur un site Internet accessible au public (p. ex. celui de l'OFROU);
- Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer les facteurs d'influence sur l'évaluation des risques des scénarios de danger. Clarification finale de l'intégration de l'évaluation des risques dans le processus général.

Préparation de la mise en œuvre du processus de gestion de la maintenance avec BIM :

- Participation ou accompagnement de la "gestion de la maintenance" dans le développement des normes BIM pour les tunnels et les ouvrages existants;
- Projets pilotes pour la création de jumeaux numériques de tunnels existants comme préparation à la représentation des données d'état dans le BIM;
- S'assurer que les bases de données actuelles et futures sont structurées de manière à pouvoir être facilement migrées vers de nouvelles bases de données.

Essais pilotes pour l'application de méthodes d'investigation nouvelles et automatisées :

- Tests pratiques 1:1 dans des tunnels routiers, par exemple de méthodes de balayage avec des systèmes cinématiques ou de nouvelles technologies de surveillance;
- Evaluation des tests pratiques si possible avec des évaluations automatisées, comme par exemple avec des méthodes de reconnaissance d'images .

Summary

FEDRO initiated a research assignment in 2014, regarding maintenance management of underground mined tunnels, which resulted in a report on the initial project [67] in 2016. The report states that the maintenance processes for tunnels, in comparison to other civil engineering structures, are not given enough consideration and are not standardised. Based on this, the current research project was initiated with the main objective of improving and systematising the basis for the maintenance management of underground mined road tunnels, in order to ensure stable maintenance decisions and cost-efficient maintenance measures.

The research project EP2 "Diagnostics: Monitoring and Inspection Methods" deals with the test methods used in the monitoring and inspection of road tunnels. It exclusively considers the mined tunnel structures, consisting of the outer and inner lining, the carriageway incl. carriageway structure or service duct, the intermediate ceiling and the drainage system. The subject matter does not include the operating and safety equipment of a tunnel.

This final report EP2 is one of the five research reports which were produced as part of the research project "Maintenance management of mined tunnels". Furthermore, the research results are also summarized in a synthesis report.

The literature research as well as the current state of practice and research regarding maintenance management have shown that most publications about monitoring tunnels either contain specifications and instructions for action such as inspections or describe new technological developments for the investigations. Overviews of tunnel-specific investigation measures, which provide detailed information with reference to findings and parts of the structure, are not to be found comprehensively in the literature.

The results from the monitoring sub-process dealt with in sub-project EP2 should provide information that forms the basis for reliable decisions on measures within the framework of the maintenance management process. The basic catalog of test methods resulting from EP2 comprises all tests applicable to mined tunnels in the monitoring sub-process. In accordance with the objectives set for EP2 in the initial project, good practice was followed in the selection of appropriate, meaningful test methods.

The catalog was revised completely and structured from scratch. The approach for the systematization of the test methods pursues the goal of structuring the individual methods in superordinate units, which serves the clarity, readability and thus the practicality. The structure of the catalog refers to the visual detectable findings defined in EP1, the damage processes as well as the component type, which comprises the structural parts of a tunnel as well as its built of materials.

The structure according to test method types (see figure below), for example searching for the assigned findings or specific structural parts, support the selection of a suitable test method for the application in the tunnel.

Test Methods (TM) for Monitoring Sub-Process

VISUAL INSPECTION (U.-Type 1)

- Visual inspection
- Main inspection
- Intermediate inspection
-
-
-

TM of the phase monitoring

TESTS AT THE CONSTRUCTION (U.-Type 2) **

-
- Climatic measurements, including temperature, humidity
-
-
-

Supplementary TM phase monitoring *

* Measurement methods, which can be used for online-monitoring technologies, for example.

LABORATORY TESTS (U.-Type 3) **

-
-
-

STATIC, SURVEYING AND CONSTRUCTIVE INVESTIGATIONS / LOADING TESTS (U.-Type 4) **

-
-
-

** TM used mainly or exclusively in the verification phase

Abb. 3 Illustration of the structure of the "Test Methods" catalog for the monitoring sub-process of tunnels

The catalog contains the following information areas with "attributes" for describing properties of the individual methods:

- Structuring of the test methods;
- Assignment of building structure / findings / damages;
- Context of test methods;
- Expected results;
- Attributes for effort and cost estimation;
- References, information about providers.

For better and practical applicability of the catalog, which contains more than 140 test methods, 41 commonly used and established methods are highlighted as special. Specific catalog sheets were generated for these established methods, which present all the information from the catalog on the method in a uniformly structured and easy-to-read manner.

It has been become apparent that multiple test methods can be used to verify various damage processes and findings for most types of construction. These methods are to be compared with each other.

In addition to the structured catalog, a concept proposal for a comparison methodology for test methods was developed, which includes risk considerations. This concept shows that the issue of risk also be taken into account in the monitoring sub-process. However, it has also been shown that the practical suitability of such a comparison methodology is not given. The integration of risk considerations must be clarified on a higher level in connection with a future decision model.

In the discussion of the results in the final report the practical use of the catalog and the catalog sheets of the proven methods will be demonstrated for the user groups of the maintenance management of road tunnels .

The following needs for research or action for the further development of maintenance management were derived from the findings of the development of this research project on the monitoring sub-process:

- Consistency of terminology in the future maintenance management process, especially for the monitoring sub-process.

Reliable data basis for the maintenance management process:

- Network-wide recording and evaluation of, among other things, monitoring and review measures carried out;
- Provision of the evaluated data, among other things, as information on current "good practice";
- To make available catalog investigation measures as a simple interactive web database on a publicly accessible website, e.g. of FEDRO;
- Further research is needed in connection with the identification of factors influencing the risk assessment of hazard scenarios. Final clarification of the integration of risk assessments in the overarching process.

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

- Participation or support of "Maintenance Planning" in the development of BIM standards for tunnels and structures in existing building;
- Pilot projects to create digital twins of existing tunnels in preparation for mapping condition data in BIM;
- Ensure that current and future datasets are built in a way that they can be easily migrated to new databases.

Pilot testing for application of new and automated test methods in Switzerland:

- 1:1 practice tests in road tunnels of e.g. scanning methods with kinematic systems or new monitoring technologies;
- Evaluation of the practical tests if possible, with automated evaluations, e.g. with image recognition methods.

1 Einleitung

1.1 Anlass

1.1.1 Ausgangslage und Kontext

Nationalstrassen sind all jene Strassen, bei denen der Bund für Finanzierung, Betrieb, Unterhalt und Ausbau aufkommt. Zuständig ist das Bundesamt für Strassen («ASTRA»). Je nach Ausbaustand gehören dazu nationale Autobahnen, nationale Autostrassen und nationale Hauptstrassen. Ende 2021 mass das Schweizer Nationalstrassennetz insgesamt 2'254.5 Kilometer. Als Folge des 2017 vom Volk angenommenen Fonds für die Nationalstrassen und den Agglomerationsverkehr (NAF) wurden per 2020 über 400 km kantonale Strassen (i.d.R. für Gemischtverkehr) neu in das Nationalstrassennetz aufgenommen. Im Vergleich zum Autobahnbeschluss von 1960 verkehrt heute rund fünfmal so viel Strassenverkehr auf dem Strassennetz. Viele Strecken werden an der Kapazitätsgrenze betrieben (Anzahl Staustunden in 2021: 32'481 h).

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

Das ASTRA schätzt den mittleren jährlichen Erhaltungsbedarf im langfristigen Mittel für die gesamte Nationalstrasseninfrastruktur auf 1'144 Mio. CHF [30]. Das entspricht ungefähr jährlichen Ausgaben von 1.2% des Wiederbeschaffungswerts (WBW)¹. Tunnelanlagen stellen mit einem Wiederbeschaffungswert (WBW) von 31.5 Mrd. CHF rund 1/3 des WBW des gesamten Nationalstrassennetzes dar.

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

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

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

Der Zustand der Infrastrukturen fasst das ASTRA mit einer Zustandsbenotung mit Zustandsklassen zusammen (siehe Abb. 4). Der mittlere Zustand aller per 2021 zustandsbewerteten Tunnelanlagen beträgt 2.17 gemäss Netzzustandsbericht 2021 [31]. Damit ist der Gesamtzustand schlechter als die vom ASTRA als Zielvorgabe gesetzte mittlere Zustandsnote von 1.90. Der grösste Teil davon ist in einem guten und akzeptablen Zustand (Zustandsklasse 1 und 2). Rund 20% weisen mittelschwere Schäden auf und müssen verstärkt überwacht werden. Nur einzelne Tunnelbauwerke sind in einem schlechten Zustand und müssen mittelfristig saniert werden.

¹ Gemäss SN 640 907 [19] entspricht der Wiederbeschaffungswert den Kosten, welche erforderlich sind, ein aus dem Betrieb ausgeschiedenes Objekt zu ersetzen.

Kurzbezeichnung Zustandsnote					
Zustandsklasse	Fahrbahnen	Kunstbauten, 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 verschärzte Überwachung
3	ausreichend	beschädigt	ungenügend	ungenügend	Mittelschwere Schäden ohne Auswirkung auf die Sicherheit; bedingen eine verschärzte 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 Einzellementen, Montage von provisorischen Abstützungen oder Einführung einer Gewichtsbeschränkung.

Abb. 4 Kurzbezeichnung der Zustandsnoten für die verschiedenen Infrastrukturobjekte und Beschreibung der Qualität in Worten aus [31]

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

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

Das Initialprojekt schreibt in der Einleitung, dass «zum Thema Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen bereits umfassende Forschungsarbeiten durchgeführt wurden. Zum einen wurden Konzepte erarbeitet, welche die Strassenverkehrsanlagen als Gesamtsystem berücksichtigen und zum 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» [44,18].

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

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

1.1.2 Übergeordnete Fragestellungen im Forschungsprojekt

Im Initialprojekt [67] ist dargelegt, dass die Erhaltungsprozesse für Tunnel, 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

² Das ASTRA will in Zukunft vermehrt digitale Technologien nutzen. Bedeutende Anwendungsgebiete sind die Gewinnung und Verwaltung von Informationen sowie die Überwachung von Bauwerken, Naturgefahren und des Verkehrsgeschehens. Durch eine integrale Erhaltungsplanung kann diese damit in verschiedenen Bereichen optimiert werden (siehe auch [30], Seite 44).

Steuerungsinstrument zur langfristigen Erhaltungsplanung und Erhaltungsentscheiden, sowohl für die präventiven als auch für die korrektriven Massnahmen, erwartet.

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

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

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

1.1.3 Fragestellung auf Einzelprojekt bezogen

Die Zustandsüberwachung ist ein relevanter Bestandteil des Erhaltungsmanagements auch bei den Tunnelbauwerken, wie das generell u.a. in der VSS-Norm SN EN 640 900 «Erhaltungsmanagement von Bauwerken» [20] oder in entsprechenden Richtlinien (u.a. [2,3]) festgehalten ist.

Neuere technische Entwicklungen mit neuen Mess- und Monitoring-Technologien führen zu einer zunehmenden Anzahl an Untersuchungsmethoden und daraus abgeleiteten Ergebnissen, welche zwar technisch interessant sind, jedoch nicht zwingend einen Mehrwert fürs Erhaltungsmanagement von Tunnelbauwerken bringen. So fehlt es an einer verständlichen, systematischen Übersicht der für bergmännische Tunnel geeigneten Untersuchungsmethoden, mit u.a. Hinweisen zu deren Aussagekraft für typische Schadensprozesse.

Die Ergebnisse aus dem Teilprozess der Überwachung müssen Informationen liefern, welche im Rahmen des Erhaltungsmanagement-Prozesses die Basis für stabile, relevante Massnahmenentscheide bilden. Für die Auswahl von zweckmässigen, aussagekräftigen Untersuchungsmethoden bei der Überwachung von bergmännischen Tunneln, wäre eine «Good Practice» wünschenswert, wie im Initialprojekt «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln» [67] festgehalten.

Nicht nur die baulichen Erhaltungsmassnahmen sind, wie im Einzelprojekt EP3 [60] beschrieben, mit erheblichen Kosten verbunden, sondern auch die Zustandserfassung und

- auswertung im Rahmen der Überwachung können aufwändig werden. Untersuchungsmaßnahmen sind gerade bei Tunnels personalintensiv, wirken sich auf den Betrieb bzw. den Verkehr aus. Zudem sollten sie in regelmässigen Abständen stattfinden, um eine Aussage über die Zustandsentwicklung zu ermöglichen, was den Einsatz von Monitoring-Systemen zur Fernüberwachung begünstigt.

Da stets Unsicherheiten bestehen bleiben, sind Risiko- und Kostenbetrachtungen auch im Zuge der Überwachung, wie nachfolgend bei der weiteren Planung der Erhaltungsmaßnahmen angezeigt.

Als Basis des Teilprozesses Überwachung und Gegenstand des Einzelprojekts EP2 «Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden» ist eine Systematisierung und Typisierung der bekannten Untersuchungsmethoden unabdinglich. Dies mit Bezug auf Schadensprozesse und Bauwerksgliederung für eine verbesserte Übersicht sowie die Einbindung in die übergeordnete Systematisierung des Erhaltungsprozesses. Das wird auch im Hinblick auf die angestrebte Digitalisierung in der Erhaltungsplanung, wie sie u.a. vom ASTRA angestrebt wird, von Interesse ([30], p.44).

1.2 Grundlagen und Datenbasis

1.2.1 Normen und Richtlinien

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

- SN EN 640 900 (2022) – Erhaltungsmanagement (EM): Grundnorm [20];
- SIA 469 (1997) – Erhaltung von Bauwerken [15];
- SIA 269 (2011) – Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken [17];
- Richtlinien Bundesamt für Strassen ASTRA (2005) – Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten [2].

Diese und weitere für dieses Forschungsprojekt relevante Normen und Richtlinien sind Bestandteil der Literaturrecherche und sind im Literaturverzeichnis erfasst.

1.2.2 Literaturrecherche

Im Rahmen des EP2 wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, welche die Zusammenstellung der Literatur des Initialprojekts [67] spezifisch für das EP2 «Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden» aktualisiert und ergänzt. Die Erkenntnisse aus der Literatur sind insbesondere in Kapitel 1.3 des vorliegenden Berichts enthalten.

Auf Basis dieser Recherche wurde die ergänzte Literaturliste EP2 in elektronischer Form als CITAVI-Literatur-Datenbank für die weitere Verwendung der Literaturquellen erstellt. Diese ist Teil des Projekts bzw. der Schlussberichterstattung.

Das EP2-spezifische Literaturverzeichnis, gemäss Kapitel 5.1, befindet sich im entsprechenden Anhang des vorliegenden Schlussberichts.

1.2.3 Fallbeispiele

Aufgrund der Wissenslücken, wie übergeordnet in Kapitel 1.1.2 aufgelistet, wurden neun Tunnelobjekte als Fallbeispiele für die Einzelprojekte EP1 - EP3 herangezogen, welche teilweise seit Jahrzehnten von den Partnern der INGE «Lombardi-EBP» betreut werden.

Es handelt sich dabei ausschliesslich um bergmännische Strassentunnel, welche im Zuständigkeitsbereich einzelner ASTRA-Filialen bzw. deren Bereiche Erhaltungsplanung und Projektmanagement liegen.

Die verwendeten Fallbeispiele / Tunnelobjekte sind:

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

Mit diesen neun Fallbeispielen wird das Tunnelportfolio des ASTRA gemäss Kapitel 1.1.1 gut repräsentiert. 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 «Settings» ab, welche massgeblich die Zustandsentwicklung der Anlagen mitbestimmen: Von hochfrequentierten innerstädtischen, richtungsgtrennten Tunneln bis zum Alpenquerenden Autobahntunnel mit Gegenverkehrsbetrieb auf über 1'000 Meter Höhe.

Auch bezüglich der Betriebsjahre decken diese neun Beispiele mit einem Alter von 21 bis 53 Jahren praktisch die gesamte Bandbreite ab. Wie in Kapitel 1.1.1 beschrieben, ist der grösste Teil der Tunnel des ASTRA nicht älter als 50 Jahre alt. Entsprechend wurden sie 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.

Um die Ziele gemäss Kapitel 1.1.2 zu erreichen, nämlich die Systematisierung und Katalogisierung von Schadensprozessen, Untersuchungsmethoden sowie Erhaltungsmassnahmen, wurden die Fallbeispiele bezüglich der objektspezifischen Erhaltungsplanung ausgewertet, analysiert und im Hinblick auf das Einzelprojekt dokumentiert.

Die Beschreibung der Tunnelobjekte, die als Fallbeispiele verwendet wurden, sind in Form von objektweisen Faktenblättern als Anhang A1 dem vorliegenden Schlussbericht EP2 angefügt.

1.2.4 Interviewrecherche

Zusammen der Auswertung der Fallbeispiele und dem Zusammentragen der Untersuchungsmethoden (Kapitel 2.2) wurde eine Interviewrecherche mit Befragungen von verschiedenen Prüflabors und Vermessungsbüros durchgeführt. Das Ziel der telefonischen Befragungen war, einerseits die heute etablierten Untersuchungsmethoden in bergmännischen Strassentunnel gemäss Kapitel 2.2.8 zu verifizieren und andererseits eine Einschätzung zu zukunftsträchtigen Prüfverfahren und Auswertungen zu erhalten.

Folgende Prüflabore und Vermessungsbüros haben sich in unterschiedlichem Umfang telefonisch u.a. zu den Fragestellungen geäussert:

- Tecnotest AG, CH-8803 Rüschlikon (www.tecnotest.ch);
- Consultest AG, CH-8472 Ohringen (consultest.ch);
- Terra Vermessungen AG, CH-8006 Zürich (terra.ch);
- TFB – Technik und Forschung im Betonbau AG, CH-5103 Wildegg (www.tfb.ch);
- Amberg Infra 7D, CH-8105 Regensdorf-Watt (amberggroup.com/infra-7d/).

Folgende Erkenntnisse können aus den Interviews gezogen werden:

Bewährte, nachgefragte Untersuchungsmethoden

Die durch die Fallbeispiele zusammengetragenen Methoden gehören unbestritten zu den oft eingesetzten Untersuchungen bei Strassentunneln. Mehrfach genannt wurden Untersuchungen vor Ort, wie Potenzialfeldmessungen inkl. den entsprechenden Probenahmen und Sondierfenster oder Georadar-Untersuchungen für Schichtdicken-Bestimmungen, sowie Laborprüfungen mit Probenahmen von Beton und Belag.

Oft wurden weitere viel gefragte Messungen und Prüfungen genannt, welche jedoch vor allem beim Bau von Tunneln, u.a. für Vorerkundungen und Vortriebskontrollen, zur Anwendung kommen. Da diese für die Zustandsüberwachung und -überprüfung von geringer Bedeutung sind, haben sie keinen Eingang in den Katalog der Untersuchungsmethoden gefunden.

Untersuchungsmethoden mit Potenzial für die Zukunft

Als bereits heute viel verbreitete Methode – auch bereits während des Tunnelvortriebs – kann die (Profil-)Aufnahme mittels Laserscanning genannt werden. Hier wird teilweise ein grosses Potenzial für digitalisierte Inspektionen mit automatisierter Auswertung gesehen. Aufgrund fehlender Normvorgaben, u.a. in Bezug auf die Auflösung und des Umstands, dass die Auswertung mit künstlicher Intelligenz noch «in den Kinderschuhen» steckt, wird eine Beurteilung der Messdaten / -ergebnisse durch Fachpersonal auch mittelfristig immer noch als zwingend erachtet.

Ebenfalls als zukünftig vermehrt angewendete Untersuchungen werden von einzelnen Laborunternehmungen permanente Monitoring-Aufnahmen mittels eingebauter bzw. an Bauwerksteilen angebrachter Sensoren genannt. Dies mit regelmässiger u.a. automatisierter Datenauswertung. Als Pilotprojekt einer solchen Anwendung kann das seit gut 15 Jahren im Gotthard-Strassentunnel im Einsatz stehende Korrosionsmonitoring an der Zwischendecke gelten [64,65].

In Bezug auf Automatisierung wurde auch der Einsatz von Robotern für Aufnahmen genannt, wie z.B. dem Potenzialmessungs-Roboter.

Zusammenfassend kann ein Trend zur automatisierten Erfassung und Auswertung von Zustandsdaten erkannt werden. Entsprechend ist das auch aktueller Forschungsschwerpunkt im Fachbereich Überwachung (vgl. dazu auch das nachfolgende Kapitel 1.3)

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

Dieses Kapitel gibt in einem ersten Teil (Kapitel 1.3.1) einen Überblick zum aktuellen Stand der Praxis der Bauwerkserhaltung bzw. des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln, dies auch international. In einem zweiten Teil, Kapitel 1.3.2, wird auf neue Entwicklungen im Bereich der Untersuchungsmethoden eingegangen.

Das Kapitel 1.3.3 fasst die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Literaturstudium themenmässig zusammen. Pro Thema wird ein Fazit aus Sicht EP2 gezogen, welche Aspekte als weiterer Forschungsbedarf zu betrachten sind.

1.3.1 Stand der Praxis und Forschung Erhaltungsmanagement Tunnel

Stand der Praxis und deren Weiterentwicklung in der Schweiz

In der **Schweiz** sind zentrale Aspekte des Erhaltungsprozesses von Ingenieurbauten bzw. Kunstbauten (inklusive Tunnelbauwerke) in entsprechenden Normen [15,17] und Richtlinien vor allem der Infrastrukturbesitzer und -betreiber festgehalten (siehe dazu Kapitel 1.2.1).

Die Normenreihe zur «Erhaltung von Tragwerken» mit der Grundnorm SIA 269 (2011; [17]), und den zugehörigen bauartspezifischen Normen 269/2 bis 269/6 enthalten wesentliche Vorgaben des Erhaltungsprozesses, u.a. zu Überwachung und Überprüfung. Für bergmännische Tunnel hat die SIA 269/2 «Erhaltung von Tragwerken - Betonbau» (2011; [16]) besondere Relevanz. In Kapitel 5 «Zustandserfassung» sind Untersuchungsmethoden für Betonbauten, Stand 2011, aufgelistet. Im nachfolgenden Kapitel 6 sind Vorgaben und Hinweise zur «Prognose der Zustandsbeurteilung» festgehalten.

Das Bundesamt für Strassen ASTRA, als grösster Betreiber von bergmännischen Strassentunneln in der Schweiz, hat bereits 2005 seine Vorgaben für den Erhaltungsplanungs-Prozess in der Richtlinie «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten» [2] aus früheren Versionen der Erhaltungsnormen abgeleitet. Der darin beschriebene Prozess, welcher auch für Tunnel gilt, wird im nachfolgenden Kapitel 1.6.1 «Erhaltungsprozess und Projektgenerierung» ausführlich beschrieben. Diese Richtlinie legt die Grundsätze für die Überwachung und den Unterhalt der Kunstbauten und Tunnel auf den Nationalstrassen fest. Für den in der Grundnorm Erhaltungsmanagement [20] definierten «Teilprozess Überwachung» sieht die ASTRA-Richtlinie [2] folgende zwei Phasen und deren Regelung vor (siehe auch Kapitel 1.6.1):

- Überwachung: Beobachtung – Inspektionen – Kontrollmessungen sowie *nachfolgend:*
- Überprüfung: generelle Überprüfung – detaillierte Überprüfung

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

In der Praxis wurden in den letzten Jahrzehnten regelmässig Kontrollmessungen, Inspektionen und Überprüfungen durchgeführt, um die sichere weitere Nutzung der Strassentunnel zu gewährleisten. Dies wird u.a. auch mit den neun Fallbeispielen dieses Forschungsprojekt aufgezeigt (Kapitel 1.2.3; Anhang A1). Diese bestätigen, dass die Erhaltung und Überwachung von bergmännischen Tunneln in der Schweiz eher projektbezogen und nicht standardisiert behandelt wird (vgl. Initialprojekt [67]).

Mangels ausführlicher Vorgaben und Empfehlungen zeigen z.B. Schulungsunterlagen von «Bau und Wissen» 2007 [59] sowie zu «Zielorientierte Bauwerksuntersuchungen mit neuen zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP)» [53] von 2010 den bisherigen Praxisstand etablierter Untersuchungsmethoden auf, welche auch bei Tunneln anzuwenden sind.

Das Ende 2016 abgeschlossene «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln - Initialprojekt» [67] hält u.a. fest, dass für Strassentunnel im heutigen Erhaltungsprozess die Anforderungen an deren Erhaltung nicht gebührend berücksichtigt werden. Zukünftig sollen die Erhaltungsmassnahmen tunnelspezifisch in Abhängigkeit ihrer Wirkung, ihrer Kosten und ihres Ausführungsaufwandes systematisiert werden. Dies gilt auch für das EP2 mit dem Teilprozess Überwachung (vgl. Pflichtenheft EP2).

Stand der Praxis und deren Weiterentwicklung in Österreich und Deutschland

Die nationalen Normierungen und Richtlinien zur Erhaltungsplanung von Tunnelbauwerken bilden einen Stand der Praxis der verschiedener Länder ab, der in den Grundzügen des zugrundeliegenden Prozesses sehr ähnlich ist. Dies zeigt sich u.a. bei der logischen Abfolge der Teilprozesse, wie sie den übergeordneten Normen (z.B. DIN 30151 [11] oder SN EN 640 900 [20]) definiert sind. Die verschiedenen nationalen Normen und Richtlinien gehen von vergleichbaren Prozessschritten aus, die jedoch z.T. anders abgegrenzt und benannt werden. In der konkreten Umsetzung des Erhaltungsprozesses werden bei der Ausführung die Unterschiede grösser, auch abhängig von den in den einzelnen Ländern geforderten Zielsetzungen fürs Erhaltungsmanagement.

In **Österreich** wurden im Forschungsprojekt AMBITION von 2015 [21] nationale Normen, Richtlinien und Handlungsvorgaben fürs Erhaltungsmanagement von Tunnelbauwerken von insgesamt 11 Ländern zusammengetragen und ausgewertet. Als Beispiel einer der Auswertungen zeigt die nachfolgende Abbildung den Verwendungszweck von Tunnelzustandsdaten in den elf untersuchten Ländern auf:

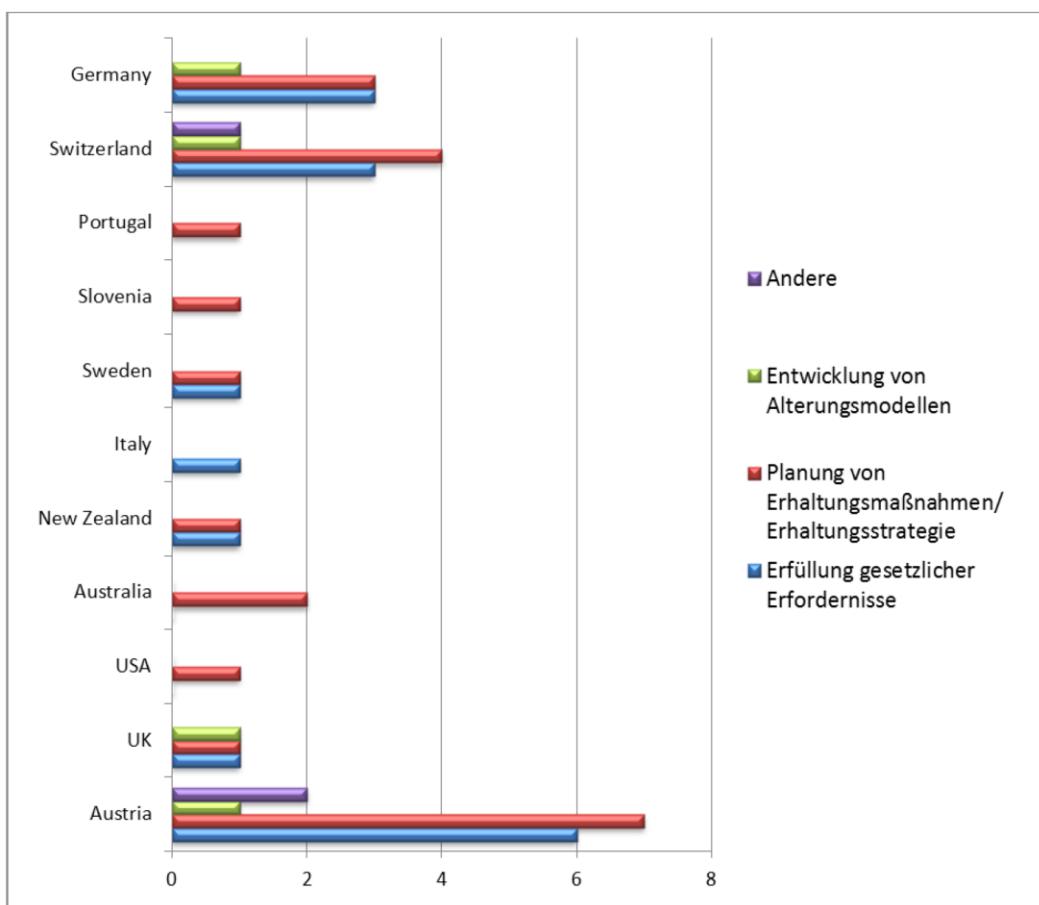


Abb. 5 Art und Anzahl nationaler Regelungen in Bezug aufs Tunnel Asset Management, gegliedert nach Ländern [21]

Ein Fazit des Projekts AMBITION 2015 nach der Auswertung dieser Regulierungen der Zustandsbewertung von Tunneln ist, 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» (gemäss [21]).

Dass weiterer Handlungsbedarf für die Optimierung des Erhaltungsmanagements von Tunnels besteht, zeigt sich in den Zielsetzungen von Forschungsprojekten, wie zum Beispiel im bereits erwähnten Projekt AMBITION [21], dem Projekt OPTimAL [35] oder dem Initialprojekt [67].

In den letzten Jahren wurden wenige Forschungsarbeiten im Bereich der Erhaltungsprozesse bergmännischer Strassentunnel veröffentlicht. In Österreich wurde 2020 mit dem Projekt OPTimAL [35] ein interessantes Forschungsprojekt mit vergleichbarer Zielsetzung publiziert. Darin wurden Regellebenszyklen für die bauliche Infrastruktur sowie sehr ausführlich für die Elektromaschinelle Ausrüstung³ von Tunnelanlagen bereitgestellt. Damit sollen Investitionen bei Tunnelbauprojekten über den gesamten Lebenszyklus evaluiert und optimiert werden können, wobei alle Kosten, von der Erstellung, über den Betrieb, die Instandhaltung und Instandsetzung berücksichtigt werden. Beim Projekt OPTimAL wurden für die Alterungsmodelle typischer Bauteile von Strassentunneln auf historische Zustandsdaten zurückgegriffen.

Dabei wird auf die österreichische Richtline «RVS 13.03.31 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstdämmen, Strassentunnel – Bauliche konstruktive Teile» von 2013 [14] verwiesen. Diese ist die Grundlage für die «Bestandsprüfung von Tunnels» und ist somit für die laufende Überwachung und Kontrolle sowie die Prüfung von Strassentunneln und vergleichbaren Bauwerken anzuwenden. Diese Tätigkeiten beschränken sich auf baulich konstruktive Teile des Tunnels und der zugehörigen baulichen Anlagen, in gesamtheitlicher Betrachtung mit den Einwirkungen auf das Bauwerk. Diese RVS enthält ein standardisiertes Bewertungssystem für Tunnel, das auf der Erfahrung und damit subjektiven Einschätzung der jeweiligen beurteilenden Person z.B. eines Bauingenieurs beruht. Der in dieser RVS beschriebene Ablauf des Erhaltungsplanungsprozesses mit «Laufende Überwachung», «Kontrolle», «Prüfung» ist mit den schweizerischen Vorgaben gemäss Richtline [2] vergleichbar.

Im Projekt OPTimAL [35] sind keine konkreten Angaben zur Überwachung bzw. zu Untersuchungsmethoden zu finden. Neben der RVS 13.03.31 wird jedoch für die Bewertung der Zustandsentwicklung auf das erwähnte Forschungsprojekt «AMBITION» [21] verwiesen, welche u.a. die Entwicklung von realitätsnahen zustandsbasierten Alterungsmodellen bzw. -kurven zum Ziel hat. Im ersten Teil des Projekts AMBITION wird zudem auf die gängigsten Schadensbilder und Messarten und -methoden eingegangen. In Kurzbeschrieben werden die Einsatzmöglichkeiten der Messmethoden evaluiert, mit dem Hauptaugenmerk auf die Detektion von Rissen, Abplatzungen Hohlräumen, Oberflächenänderungen und Nassstellen, wobei diese Beschriebe sehr knappgehalten sind.

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

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

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

Beim OPTimAL-Forschungsprojekt [35] sind die risikobasierten Überlegungen im Rahmen des ganzen Erhaltungsmanagement-Prozesses von Interesse, wobei hier neben der Wahl der geeigneten Inspektionsmethode (Bezug zum EP2) auch die Priorisierung der gefährlichen Bauteile sowie das Inspektionsintervall in Bezug auf die Regellebenszyklen betrachtet werden. Auf den in OPTimAL berücksichtigten Aspekt der Wechselwirkungen des Erneuerungsbedarfs verschiedener Bauteile und Komponenten als «Täter-Opfer-Gegenerüberstellung» wird auch in der Publikation [57] Bezug genommen. Als Projekt mit Praxisbezug, beruht der OPTimAL-Risikoansatz auf der Auswertung historischer Zustandsdaten und Zustandsbeurteilungen von Tunnelinspektionen (u.a. gemäss [21]), wobei eine konsequente Erfassung der Zustandsnoten nicht über den gesamten Betrachtungszeitraum gegeben war. Der Ansatz der Konfidenzfaktoren zu den risikobasierten Inspektionen wurde im vorliegenden Forschungsprojekt EP2 als möglicher Ansatz für die Vergleichsmethodik (vgl. Kapitel 2.3) herangezogen.

In **Deutschland** kommt der DIN 1076 «Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen» [12] eine zentrale Rolle zu. Diese Norm ist jedoch sehr allgemein gehalten, gilt für diverse Ingenieurbauten und geht zudem nicht auf spezifische Untersuchungsmethoden ein. Die zugehörige Richtlinie «RI-ERH-ING» [6] regelt die einheitliche Erfassung, Bewertung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076.

In der «Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Strassentunnel» des Deutschen Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) [39] spielt die Betriebs- und vor allem auch Erhaltungsphase eine wesentlich Rolle für die Ermittlung der Life Cycle Costs (LCC). Die Empfehlung enthält jedoch keine weitergehenden Angaben zur Überwachung und Zustandsbeurteilung. Es geht jedoch daraus hervor, dass beim Erhaltungsmanagement der Tunnelanlagen die Auswirkungen der kürzeren Lebenszyklen der Ausrüstung (EMA/BSA), mit dem mehrfachen Ersatz dieser Komponenten, nicht unterschätzt werden sollte (vergleichbar mit den Überlegungen im Projekt OPTimAL [35]).

2020 wurde von der deutschen «Bundesanstalt für Straßenwesen» (BASt) mit dem «Untersuchungsbericht zur Strategischen Planung von Erhaltungsmassnahmen an Ingenieurbauwerken» [32] die Grundlage für die entsprechende Richtlinie RPE-ING [4] publiziert. Die dort erarbeiteten Grundsätze zur strategischen Planung der Erhaltungsmassnahmen, u.a. mit Überlegungen zu Zustandsnotenverläufen und zu optimalen Eingriffszeiträumen für Erhaltungsmassnahmen, gelten (nur) für Brücken. Sie könnten sinngemäss für Tunnel auch angewandt werden, da diese Richtlinie auch auf der DIN 1076 basiert, welche explizit auch bei Tunneln anzuwenden ist.

Die aktuellen Publikationen bzw. Empfehlungen der DAUB zum Thema «Building Information Modeling» (BIM; vgl. www.daub-ita.de/publikationen/empfehlungen/ [38]) zeigen diesen zukünftigen Schwerpunkt auch beim unterirdischen Bauen auf [40,41]. Auch wenn die für BIM notwendigen Standardisierungen aller Daten und Prozesse für Tunnel erst später vorliegen werden, ist BIM für die Weiterentwicklung des Erhaltungsmanagements ein zentrales Zukunftsthema. Die vorliegenden Publikationen, u.a. zu den BIM Modellanforderungen / Informationsmodell [40,41], zeigen auf, dass mit dem Betriebsmodell als digitaler Zwilling auch die Asset Management-Aufgaben zukünftig Bestandteil des BIM-Prozesses sein werden, zu den auch Inspektionen und Überprüfungen gehören.

Ebenfalls vom BASt wurde 2022 das Forschungsprojekt «FE 15.0666 - Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter / virtueller Realität» als Bericht [51] veröffentlicht und in einem Webinar vorgestellt. Es untersucht die Unterstützung der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 durch BIM in Kombination mit den Technologien Virtual und Augmented Reality. Für die Umsetzung der Durchführung, inkl. Vor- und Nachbereitung der Bauwerksprüfung wurde ein Demonstrator auf Basis dieser Technologien entwickelt. Es zeigt sich, dass die Technologien, technischen Möglichkeiten und Potenziale zur Entwicklung einer Anwendung zur digitalen Bauwerksprüfung vorhanden sind. Das im Webinar gezeigte Anwendungsbeispiel, die Untersuchung u.a. eines Hohlkastens einer grossen Brücke, zeigt auf, dass diese technologische Umsetzung auch in Tunneln angewendet werden kann, auch wenn dies im Forschungsprojekt nicht im Fokus stand.

Bei der Evaluation wurden von den Teilnehmenden folgende Erwartungen an die Weiterentwicklungen dieser Technologie für den täglichen Gebrauch formuliert:

- die Vereinfachung der Schadenserfassung (mit Skizzen);
- Arbeitserleichterung durch den Wegfall von Papierplänen;
- automatische, optische Risserkennung wie beispielsweise bei Tunnel-Scans;
- digitales Hilfsmittel für Bauwerksprüfer, um auf Basis von Bildern Schäden erfassen, beschreiben und abspeichern zu können.

Eine weitere Folgerung ist, dass mit diesen neuen Technologien die Bauwerksprüfung mit qualifiziertem Personal weiter an Bedeutung gewinnt. So wurde im Projekt erkannt, dass die Begeisterung und Motivation zur Nutzung digitaler Anwendungen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 auch an die Prüfenden übertragen werden konnten. Eine zentrale Voraussetzung für diese Umsetzung ist jedoch, dass möglichst genaue, BIM-fähige 3D-Modelle der zu untersuchenden Objekte und ihrer relevanten Bauwerksteile vorliegen.

Dieser Forschungsbericht enthält eine gute Übersicht zum Stand der aktuellen Technologien wie BIM im Bestand, Kollaborationsplattformen (CDE, Common Data Environment), Inspektionen mit Augmented Reality (AR/VR) sowie deren Anwendung und Geräte.

Stand der Praxis in weiteren Ländern ausserhalb D-A-CH

Wie andernorts aufgezeigt (AMBITION [21]), existieren in verschiedenen Ländern mit grösseren Tunnelinfrastrukturen Normen und Publikationen, welche die Praxis der Zustandsuntersuchungen bzw. Untersuchungsmethoden von Tunnelbauten regeln bzw. beschreiben. Als Beispiele dafür wird nachfolgend kurz auf den länderspezifischen Stand der Praxis in Frankreich und in den USA eingegangen:

In **Frankreich** kommen bezüglich der Erhaltungsplanung / Instandhaltung Empfehlungen und Publikationen u.a. der AFTES (www.aftes.fr) und der staatlichen CETU (www.cetu.developpement-durable.gouv.fr) zur Anwendung. Die AFTES beschreibt Untersuchungsmethoden für Tunnel in der Empfehlung «Les méthodes de diagnostic pour les tunnels revêtus» (AFTES GT14R4F2; [5]). Die CETU macht u.a. übergeordnete Vorgaben für das Erhaltungsmanagement von Tunneln, u.a. mit LCC-Betrachtungen. Zudem publiziert sie auch die zweiteilige Richtlinie / Anleitung zur Inspektion und Zustandsbewertung von Strassentunnel: «Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers»: Teil 1: «Livre 1 - Du désordre à l'analyse, de l'analyse à la cotation» (2015; [8]) Teil 2: «Livre 2: Catalogue des désordres» (2015; [9]). Die Überwachung von Tunneln ist zudem beschrieben in der Anleitung: «Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, fascicule 40: Tunnel» (2012; [7]), welche auch die Installationen im Tunnel (EMA/BSA) umfasst, jedoch inhaltlich nicht sehr in die Details geht.

Gemäss eigenen Aussagen auf der Homepage [34], führt die CETU selbst detaillierte Inspektionen von Tunneln aus oder trägt zu deren Durchführung zumindest indirekt durch seine technische Dokumentationen bei. Eine Erkenntnis der CETU ist, dass es immer schwieriger wird, den Verkehr für die Durchführung von Inspektionen auch nur vorübergehend einzuschränken. Das führt auch in Frankreich zur Forderung nach neuen Überwachungsinstrumenten. Die Forschung zur Teilautomatisierung von Inspektionen ist gemäss CETU im Gange.

Als Beispiel aus Übersee, werden in den **Vereinigten Staaten (USA)** der Betrieb, der Unterhalt, sowie auch die Inspektionen und die Überprüfung von Tunneln von der «Federal Highway Administration» (FHWA; www.fhwa.dot.gov/infrastructure/) vorgegeben. Die Vorgaben dazu sind im Gesetz der «National Tunnel Inspection Standards (NTIS)» (2015; [10]) festgehalten. Dazu gibt es das Manual «Tunnel operations, maintenance, inspection and evaluation (TOMIE) manual» 2013; [13], das als Hilfe für die Abwicklung des Tunnelbetriebs, -unterhalts, der Inspektionen und Überprüfungen zu einheitlichen, konsistenten Vorgaben bei der Umsetzung führen soll. In Kapitel 4 und 5 sind die Inspektionen und die Überprüfung (Zustandsbewertung) von Tunneln im Detail beschrieben.

In Kapitel 4 des Manuals werden bei den Inspektionen auch auf Schäden aufgrund von besonderen Ereignissen wie Unfälle, Feuer, Erbeben oder Wasserfluten eingegangen. In diesem Kapitel wird auch der Arbeitssicherheit bei Inspektionen längere Abschnitte gewidmet. Bei der Aufstellung von nicht destruktiven Untersuchungsmethoden (NDT) wird als ergänzende Information auf eine NDT-Toolbox-Website verwiesen, welche den beauftragten Prüfern als zusätzliche Informationsquelle zur Verfügung steht (kein externer Zugriff). Es wird auch der Einsatz von ROVs (remotely operated vehicles) in Strassentunnel beschrieben. Bestückt mit Sensoren, Kameras, Licht etc. soll der Einsatz so ausgerüsteter ROVs die Qualität und Verlässlichkeit der Zustandsaufnahmen verbessern. Dies besonders für Risse, Feuchtstellen und Abplatzungen, abhängig von den eingesetzten Sensoren und von der erforderlichen Kalibrierung. Zudem werden auch diverse Schadensbilder / Befunde dokumentiert, dies immer im Zusammenhang mit den Materialisierungen (Bauart). Dieser Beschrieb umfasst ebenfalls Schäden an der Elektromaschinellen Ausrüstung (EMA). Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit der Anleitung für die systematische Dokumentation der vorgefundenen Schäden.

Ein weiteres Kapitel zur Phase «Überprüfung» beschreibt diverse Untersuchungsmethoden, inklusive Prüfungen am Bauwerk und Laborprüfungen, mit der Angabe der zugehörigen amerikanischen Prüfnormen (ASTM). Im zweiten Teil des Kapitels wird auf die Zustandsbewertung und diverse Aspekte des Erhaltungsmanagements für Tunnel eingegangen, wie auf Zustandsentwicklungen, Instandhaltungsstrategien, LCC-Überlegungen u.a. für verschiedene Bauteile / Komponenten des Tunnels.

Auch bei der FHWA ist BIM ein aktuelles Thema. Dass dies auch für die Weiterentwicklung des Asset Management der Highways gelten soll, zeigt sich bei den Erläuterungsgrafiken zu BIM auf der FHWA-Homepage «Building Information Modeling (BIM) for Infrastructure». Gemäss der untenstehenden Abbildung Abb. 6 wird der Bereich «Operations & Maintenance», zu dem das ganze Erhaltungsmanagement gehört, zukünftig ein relevanter Teil des BIM-Prozesszyklus [46]. Und das dürfte nicht nur für Brücken, sondern auch für Tunnel in Zukunft gelten.

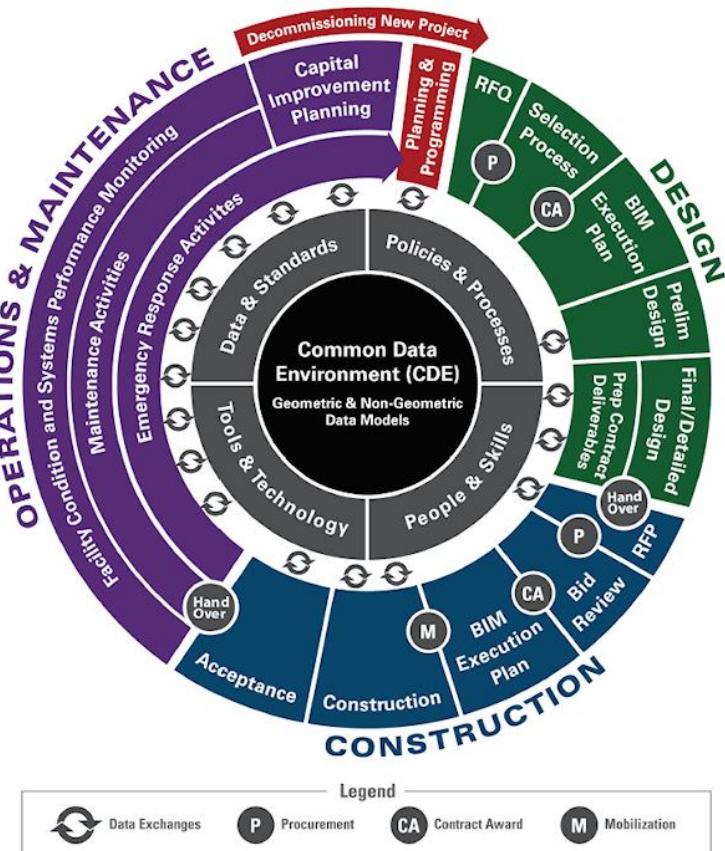


Abb. 6 Grafik der Federal Highway Administration (USA) zu BIM. «Operations & Maintenance» sind zukünftig ein wesentlicher Teil des BIM-Lebenszyklus [46]

1.3.2 Neue Entwicklungen bei der Zustandserfassung

Weiterentwickelte und neue Untersuchungsmethoden

In Publikationen, u.a. von Forschungsprojekten, finden sich neue Ansätze und Technologien für Untersuchungen, welche sich bei der Überwachung von Tunneln einsetzen lassen. Eine Auswahl solcher neuer oder weiterentwickelter Methoden für die Zustandserfassung bzw. für Untersuchungen werden nachfolgend beschrieben.

Die Publikationen zu Untersuchungsmethoden in Tunneln der letzten Jahre zeigen zwei klare Trends auf: Zum einen die Automatisierung der Aufnahmen, zum anderen die Automatisierung der Datenauswertung.

Automatisierung Aufnahmen

Für visuelle Inspektionen kommen vermehrt Scanning-Aufnahmen zum Einsatz, die eine Automation und Objektivierung der eigentlichen Zustandsaufnahme erlauben (z.B. [21,61,62]). Diese können - vergleichbar wie bei Aufnahmen in Eisenbahntunneln, wo sie auf Messwagen montiert sind [62] - für Strassentunnel auf Fahrzeugen (LKW, PKW) installiert werden [27].

Als zukunftsähnliche Scanning-Methoden für Tunnel werden oft kinematische Systeme für die flächenhafte Inspektionen beschrieben, welche für 3D-Laser-Scans (Geometrie), mit Kameras (optische Bilderfassung), wie auch für thermographische Aufnahmen (IR-Scans, Temperaturdifferenzen) bestückt werden. Oft werden gleichzeitig zwei Scanning-Systeme, z.B. Laser und Kamera, eingesetzt, was zur Effizienz beiträgt.

Während für qualitativ gute Zustandsnahmen die maximale Geschwindigkeit solcher kinematischen Systeme anfänglich auf max. 4 km/h begrenzt war [21,62], stehen nun Systeme in der Entwicklung, die mit deutlich höheren Geschwindigkeiten eingesetzt werden können. Beim Einsatz im Fahrraum von Eisenbahntunneln [14] wie auch von Strassentunneln werden neben der besseren Dokumentationsmöglichkeit auch die grosse Zeitsparnis beim Einsatz dieser Systeme hervorgehoben, welche Betriebseinschränkungen bzw. Sperrungen minimiert. Die gegenüber der «manuellen» Aufnahme durch fachkundige Inspektions-teams verbesserte Dokumentation der Befunde der Zustandsaufnahme ergibt sich durch die automatische Datenerfassung mittels Datenlogger, mit welchen die Aufnahmen der eingesetzten Kameras und Sensoren [13] sofort digital gespeichert und allenfalls direkt übertragen werden. Dies alles führt zu einer höheren Zuverlässigkeit, geringeren Kosten, ist zwar mit grösseren Datenmengen verbunden, die jedoch mit entsprechender Auswertung, mehr auswertbare Informationen liefern als «händische» Aufnahmen. Diese Form der Automatisierung findet immer mehr Anwendung, denn durch die Weiterentwicklung der Sensoren sind die Instrumente kleiner, präziser und günstiger geworden [26].

Die andere Form von Automatisierung der Aufnahmen ist die Nutzung von Drohnen und Robotern (vgl. ROVs «remotely operated vehicles» in [13]; Abb. 7). Diese können sich durch ihren Aufbau auch bei reduzierter Zugänglichkeit (evtl. unter Betrieb) und mit geringeren Kosten und Risiken durch Tunnel bewegen. Sie werden mit Kameras und Sensoren ausgerüstet, welche mögliche Schäden visuell detektieren können.

Diese Technologien werden sich weiterentwickeln, denn kosteneffektiv sind solche Systeme besonders dann, wenn sie nicht ferngesteuert werden müssen, sondern sich autonom im Tunnel bewegen können. Entsprechende Anstrengungen werden bereits gemacht sowohl für bodenbasierte [42,56], als auch für fliegende Systeme [43,71].

Bei Strassentunneln gibt es jedoch Einschränkungen für den Einsatz kinematischer Systeme, inkl. ROVs, da es neben dem Fahrraum mit Zu- und Abluftkanälen, Schächten, Werkeleitungskanälen weitere u.a. für den Betrieb relevante Bauwerksbereiche gibt, die nicht alle gleich gut befahren und auf die gleiche «automatische» Art inspiert werden können. Erfahrenes Fachpersonal muss auch mit diesen Systemen weiter vor Ort sein.



Abb. 7 ROBO-SPECT: Robotic System for tunnel structural inspection & evaluation [56]

Automatisierung Auswertung

Bei der Automatisierung der Auswertung von aufgenommenen Zustandsdaten, insbesondere Bild- bzw. Scanning-Aufnahmen, kommen vermehrt Bilderkennungsmethoden zum Einsatz. Diese Technologien ermöglichen bereits heute die automatisierte Auswertung von Kanal-TV-Aufnahmen und in Bahntunnel wird bereits vermehrt, basierend auf automatisierten Prozessen, auf Bilderkennung gesetzt. Der Einsatz von Bilderkennungsmethoden werden zusammen mit Beispielen zur praktischen Anwendung in verschiedenen, z.T. erwähnten Publikationen [61,62,69,74] beschrieben.

Zunehmend kommen «maschinelles Lernen» und die Deep Learning-Methoden bei der Auswertung von grossen Datenmengen zum Einsatz (Künstliche Intelligenz KI/AI). Es ist naheliegend, dass in Zukunft auch Daten aus automatisierten Tunnelinspektionen mit KI ausgewertet werden können. Dazu müssen zuerst solche Neuronale Netzwerke mittels Beispieldaten trainiert werden, damit sie eine bestimmte Aufgabe an vorher nie gesehenen Daten mit hoher Zuverlässigkeit richtig interpretieren können.

Wird die Auswertung der Daten mit automatisierten Aufnahmen kombiniert, können den regelmässig aufgenommenen Bild- und Positionsdaten 3D-Modelle erzeugt werden [73]. Das ist für die Organisation und Auswertung der Inspektionsdaten hilfreich und andererseits im Hinblick auf die BIM-Methode interessant, da für die zukünftige Erhaltungsplanung präzise, detaillierte Bestandsmodelle (Digitaler Zwilling) benötigt werden.

Mit dem Vorhandensein eines BIM-Modells ergeben sich neue Möglichkeiten für die visuelle Zustandserfassung bei Inspektionen, wie das im bereits erwähnten BASt Forschungsprojekt «Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter / virtueller Realität» ([51], vgl. Kapitel 1.3.1) aufgezeigt wird. Dabei werden Fachkräfte bei der Bauwerksprüfung durch das BIM in Kombination mit den Technologien Virtual und Augmented Reality unterstützt, was sich bei der Qualität und Effizienz der Inspektion und deren Dokumentation positiv auswirken soll.

Zerstörungsfreie Prüfmethoden

Zerstörungsfreie Prüfmethoden haben sich in den vergangenen Jahren weiterentwickelt und an Bedeutung und Aussagekraft gewonnen (z.B. [21,13]). Da zerstörungsfrei, sind sie für den bergmännischen Tunnel besonders interessant, da zeit- und kostenintensive Reparatur- bzw. Reprofilierungsarbeiten entfallen, und somit auch Sperrzeiten beim Tunnelbetrieb reduziert werden können. Die gezielte Kombination verschiedener Methoden (inkl. weiterhin erforderlichen zerstörenden Verfahren), birgt zudem Potential bezüglich verbesselter Aussagekraft und Kostenreduktion von Untersuchungen über alle Phasen.

Der Bauwerksscanner OSSCAR (OnSiteSCAnneR), entwickelt u.a. vom Fraunhofer-«Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)» [48], kombiniert die drei Messprinzipien Ultraschallecho, Radar und Wirbelstromprüfung. Durch Automatisierung sollen die Messzeiten gegenüber Handmessungen verkürzt und die Datenqualität verbessert werden. Mit

einer Vorortauswertung und der bildgebenden Darstellung der Konstruktion, u.a. Bauteilgeometrie, schlaffe Bewehrung, Spannstahl, kann der Scanner direkt Resultate vor Ort aufzeigen. Der Bauwerksscanner kann wahlweise mit Saugfüßen oder Verdübelung am Bauwerk gehalten werden und ist dadurch auch für vertikale Flächen, Über-Kopf-Einsatz und unter beengten räumlichen Verhältnissen einsetzbar.

Publikationen zu spezifischen Untersuchungs- und Monitoring-Methoden

Im Rahmen des Forschungsauftrags «Die zerstörungsfreie Untersuchung von Leckstellen in zweischaligen Untertagsbauwerken» [23] wurde die Aussagekraft der Thermographie mittels tragbaren Wärmebildkameras für die Ortung von Leckstellen in zweischaligen Tunnelabdichtungen untersucht. Daraus geht u.a. hervor, dass die Ortung von Anomalien in der Tunnelschale mittels thermographischer Messungen nur beim Vorhandensein eines genügenden Temperaturgradienten zwischen Luft und Fels möglich ist.

Die Publikation «Fiber Optic Sensors for Transportation Infrastructural Health Monitoring» [36] beschreibt detailliert, wie «Fiber optic sensors» angewendet werden können beim Monitoring von Tunnelanlagen. In «Tunnel Asset Management (TAM) Program Application for High Risk Structural Components» [75] wird im Abschnitt 5 kurz ebenfalls auf «Fiber optic sensors» eingegangen.

In «Sensing solutions for assessing and monitoring tunnels» [52] wird auf die gängigsten Sensoren eingegangen, die fürs Monitoring von Tunneln eingesetzt werden können. Dabei werden verschiedene Anwendungsfälle unterschieden, u.a. auch «in-service- and long-term monitoring». In [25] «Wireless sensor networks for underground railway applications: case studies in Prague and London» werden kabellose Sensoren behandelt, wie sie z.B. in Bahn- / U-Bahntunnel im Einsatz stehen. Dabei wird auf kritische Faktoren für diese Einsätze eingegangen. In [66] wird beschrieben, wie solche kabellose Sensor-Netzwerke praktisch in die Infrastruktur integriert werden können.

In «Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen RIBET» [33] werden verschiedenen Messverfahren für das Monitoring von Rissen ausgewertet und verglichen.

Detaillierte Angaben zu Linienweiser Messungen von Verschiebungs- und Verformungsprofilen in der Geotechnik finden sich in der Dokumentation «Trivec – Gleitmikrometer – Gleitdeformeter» [78].

In der Publikation «Messung der Betondeckung und Ortung der Bewehrung» [58] werden verschiedene Verfahren zur zerstörungsfreien Ortung der Bewehrung und die Messung der Betondeckung in Stahl- oder Spannbetonbauwerken analysiert.

In den beiden Forschungsberichten «Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an bestehenden Stahlbetonbauwerken» von 2016 [22] und «Critical chloride content in concrete: realistic determination and influence of air voids» von 2021 [28] wird das Ziel verfolgt, mit der Bestimmung des bauwerksspezifischen Chloridgehaltes eine Verbesserung der Quantifizierung des Korrosionsrisikos zu erreichen. Dies für eine Verbesserung der Laborprüfmethode, welche für detaillierte Chlorid-Untersuchungen von bewehrten Tunnelbauteilen Anwendung findet.

Risikobasierte Zustandserfassung (Risk-Based Inspection)

Zum Thema RBI (risk-based inspection) im Brücken- und Metallbau sind diverse Publikationen mit Informationen zu finden [37,45,55], die auch für Tunnel adaptiert werden können. In «Risk-based inspection: The framework» [45] werden die theoretischen Grundlagen dargelegt, während im Rahmen eines internationalen Workshops «Risk based inspection and maintenance planning» [55] die konkretere Umsetzung dazu behandelt wird.

Auf Risikoüberlegungen spezifisch für das Asset Management (Erhaltungsmanagement) von bergmännischen Tunneln wird im Projekt AMBITION ([21]; vgl. dazu auch Kapitel 1.3.1) kurz eingegangen, ohne weitere Bezüge zu Risk-based Inspection (RBI).

Darauf aufbauend wird im nachfolgenden Projekt OPtimAL [35] das Thema RBI detailliert aufgenommen. Das Projekt liefert die Grundlagen für ein risikobasiertes Entscheidungsmodell für Tunnelbauwerke unter Berücksichtigung sowohl der baulichen Anlageteile als auch der elektromaschinellen Ausrüstung (BSA/EMA). Auf Basis von Degradationskurven und Ausfallskonsequenzen werden Risikomatrizen für die verschiedenen Tunnel (Galerien, offene, geschlossene Bauweisen) definiert, um festzustellen, welche Risiken im akzeptablen und welche im inakzeptablen Bereich liegen. Grundbaustein der Risikobewertung von Tunnelbauwerken sind Degradationskurven zur Abschätzung der künftigen (Substanz-)Abnutzung. Der OPtimAL-Risikoansatz beruht auf der Auswertung gemessener / erhobener Zustandsdaten und Zustandsbeurteilungen im Zuge von Tunnelinspektionen. Dazu werden, getrennt nach baulichen Anlagen und EMA-Gewerke, die Daten zusammengefasst, um zu generellen Aussagen über den Tunnelbestand zu gelangen.

Ähnliche Ansätze zu Risikoüberlegungen beim Erhaltungsmanagement von Tunnels finden sich in auch in anderen Publikationen, wie «Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Strassentunnel» [39].

Für Überlegungen zu einer Vergleichsmethodik, vgl. Anhang A4, wurde die Publikation «Probability of Detection of Potential Mapping and its Impact on Service Life Prediction» [70] herangezogen. Dies im Zusammenhang mit Berechnungen von Wahrscheinlichkeiten für Bewehrungskorrosion, u.a. als Beispiel für einen möglichen Einflussfaktor auf eine Untersuchungsmethode.

1.3.3 Relevanz der Entwicklungen für das Forschungsprojekt

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

Fazit fürs Forschungsprojekt EP2:

Für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunneln braucht es auch zukünftig die Überwachung mit der zugehörigen «Diagnostik». D.h. der Teilprozess Überwachung mit den Untersuchungsmethoden muss den neuen aktuellen Stand der Technik abbilden. Die dafür zu entwickelnde Systematik eines Katalogs der Untersuchungsmethoden muss neue, zukünftige Entwicklungen adaptieren können.

Es existieren Richtlinien, Publikationen, Auflistungen, Tabellen und Beschreibungen mit z.T. unvollständigen Übersichten von typischen Untersuchungsmethoden für Tunnel. Dabei werden, je nach Aufstellung, «destruktive» bzw. «nicht destruktive» Untersuchungsmethoden unterschieden, oder Bezüge zu typischen Bauwerksteilen oder zu den zu untersuchenden Schädigungen (Befunde) gemacht.

Fazit fürs Forschungsprojekt EP2:

Es fehlt eine aktuelle, möglichst vollständige Übersicht aller im Tunnel einsetzbaren Untersuchungsmethoden. Eine solche Zusammenstellung sollte die relevanten Informationen zu jeder erfassten Methode enthalten sowie deren Verknüpfung zu Befunden, zu Schadensprozessen und zur Bauwerksgliederung von Tunnels aufzeigen. Dies als strukturierter Grundlagenkatalog «Untersuchungsmethoden» (USM) zur systematischen Darstellung der einzelnen Methoden für alle Phasen des Teilprozesses Überwachung.

Die bisher in der Praxis eingesetzten Untersuchungs- und Inspektionsmethoden für bergmännische Tunnel, u.a. in nationalen Normen und Richtlinien aufgeführt, sind weitgehend auch international im Bauwesen etabliert. Dies lässt sich durch die vergleichbaren Materialisierungen bzw. Bauarten bergmännischer Tunnel sowie durch den generellen Stand der Technik und Technologie von Bauwerksuntersuchungen erklären. Da sich die grundlegenden Messprinzipien nicht komplett verändern werden, kommen diese etablierten Untersuchungsmethoden auch zukünftig zum Einsatz.

Fazit fürs Forschungsprojekt EP2:

Als Ergebnis des EP2 sollen die etabliertesten Untersuchungsmethoden für Tunnel vollständig und strukturiert gemäss Grundlagenkatalog zusammengestellt werden. Zusätzlich sollen sie einheitlich und einfach lesbar, als Hilfestellung für Praxis, dokumentiert werden.

Als Trends bezüglich Weiter- und Neuentwicklungen von Untersuchungsmethoden können die weitere Optimierung von Scanning-Aufnahmen, allgemein die Automatisierung von Aufnahmen (inkl. zukünftiger Einsatz autonomer Messroboter), sowie die Automatisierung bzw. Digitalisierung der Auswertung genannt werden. Das Scanning, mittels diverser u.a. kombinierter Methoden / Technologien, sowie mit z.T. automatischer Auswertung, kommt bei Strassentunneln v.a. im Ausland, mittlerweile zum Einsatz. Auch neuartige Sensoren (z.B. Fiberoptics) für den Einsatz als Online-Monitoring gehört zu diesen Trends.

Diverse erstmals publizierte Methoden sind oftmals noch in der Entwicklungsphase mit ersten Testanwendungen. D.h. sie sind noch nicht uneingeschränkt Praxis-tauglich. Die fortschreitende technologische Entwicklung bei Mikroelektronik und Digitalisierung wird in den kommenden Jahren für einen weiteren Entwicklungsschub bei solchen Untersuchungsmethoden für die Zustandserfassung sorgen.

Fazit fürs Forschungsprojekt EP2:

Im vorgesehenen Grundlagenkatalog der Untersuchungsmethoden sind alle, auch neue Methoden aufzuführen, welche in der Überwachungs-Praxis von Tunneln heute eingesetzt werden. Geeignete Methoden fürs Monitoring (und der damit einhergehenden Automatisierung) sollen im Katalog besonders gekennzeichnet werden. Neue automatisierte Methoden für Scanning und Monitoring bauen mit ihren Technologien auf die gleichen physikalischen Messprinzipien auf, wie etablierte Untersuchungsmethoden, die im Katalog im erfasst sind.

Methoden in Entwicklung werden noch nicht erfasst. Auf neue Entwicklungen, welche u.a. für die Überwachung von Schweizer Strassentunneln interessant werden können, wird in diesem Bericht im vorangehenden Literaturteil hingewiesen.

Aktuelle Entwicklungen beim Erhaltungsmanagement / Asset Management von Tunneln benötigen entsprechende Datenbanken (CDE etc.) für die verschiedensten Daten. Das sind u.a. detaillierte Objektdaten der Tunnelanlagen, deren effektiv vorhandene Bauwerksgliederung, Zustandsdaten z.B. aus der Überwachung und auch Angaben zu ausgeführten Instandsetzungsmassnahmen. In der Schweiz ist aktuell beim ASTRA dafür aktuell KUBA [3] im Einsatz. In Österreich werden für das gemäss Forschungsprojekt OPTimAL [35] angedachte Asset Management auch zahlreiche Daten bzw. entsprechende Datenapplikationen benötigt. Beim allgemeinen Trend zur Digitalisierung beim Bauen - auch unterirdisch ist BIM das zentrale Thema. BIM ist in der Praxis des Tunnelbaus, u.a. bei den SBB, bereits aktuell. BIM-Prozesse und CDEs werden zukünftig auch die Daten des Betriebs und der Instandhaltung umfassen, als Teil eines umfassenden Erhaltungsmanagements / Asset Managements. Dies ist bei BIM@ASTRA [29] bis 2030 so als Ziel vorgegeben. Auch neue, effiziente Zustandserfassungs- bzw. Dokumentationslösungen [7] bauen zukünftig auf bestehende BIM/3D-Bauwerksmodelle auf.

Fazit fürs Forschungsprojekt EP2:

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

Risikoüberlegungen spielen für das Erhaltungsmanagement bei der Optimierung der Ressourcen für Überwachungs- und Instandsetzungsprozesse eine relevante Rolle. Dabei wird, wie in der produzierenden Industrie bereits seit Jahren umgesetzt, die Anwendung von «Risk-based inspection» (RBI) ins Spiel gebracht. Aktuelle Publikationen aus Projekten u.a. aus Österreich und Deutschland [35,39] zeigen Umsetzungen auf, wie Risikoabschätzungen zentral in den Asset Management-Prozess von Tunneln einbezogen werden können. Bezuglich Risiko-Überlegungen bei der Überwachung stehen nicht die Untersuchungsmethoden selbst im Zentrum, sondern eher die Fragestellung, wann welche Untersuchung optimalerweise eingesetzt werden soll, um Risiken richtig einschätzen bzw. erkennen zu können.

Fazit fürs Forschungsprojekt EP2:

Resultate aus geeigneten Untersuchungsmethoden liefern wichtige Informationen zur Zustandsbewertung von Tunneln. Es ist mit dem zu erstellenden Grundlagenkatalog der Untersuchungsmethoden sicherzustellen, dass Praxis-relevante Untersuchungsmethoden für sämtliche möglichen Schädigungs-prozesse im Tunnel (gemäß EP1) zur Verfügung stehen, um Zustandsentwicklungen abzubilden und allfällige Risiken erkennen zu können. Zudem soll ein Konzept für eine Vergleichsmethodik zur Auswahl von Kosten-optimierten Untersuchungsmethoden mit einem risikobasierten Ansatz vorgeschlagen werden.

1.4 Zweck und Ziel des Einzelprojekts

1.4.1 Übergeordnetes Hauptziel des Forschungsprojektes

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

Die Erhaltungsplaner erhoffen sich im Rahmen der integralen Erhaltungsplanung Instrumente nutzen zu können, um Erhaltungsentscheide systematischer und nach vereinheitlichten Vorgehen treffen zu können. Diese Erhaltungsentscheide beziehen sich primär auf den Verfahrensschritt «Projektgenerierung» (siehe auch Kapitel 1.6.1). Die Systematisierung des Erhaltungsprozesses bzw. des Entscheidungsprozesses dient auch der Transparenz der Entscheide. Damit soll erreicht werden, dass sowohl die Erhaltungsentscheide als auch die dazugehörenden Kostenbudgets im weiteren Projektierungsverlauf stabil bleiben.

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

Zudem sollen die Voraussetzungen verbessert werden, die Möglichkeiten der digitalen Technologien im Rahmen des Erhaltungsmanagements in Zukunft optimal und vermehrt nutzen zu können, sei es zur Gewinnung, Verwaltung und Auswertung von Informationen oder sei es durch den Einsatz von Sensoren und Lasertechnologien zur Ergänzung von Bauwerksinspektionen.

1.4.2 Beitrag des Einzelprojektes zum Hauptziel

Das EP2 leistet einen relevanten Beitrag an das übergeordnete Ziel zur Verbesserung der Systematisierung des Erhaltungsmanagements. Dies mit der zur Verfügungstellung von

zweckmässigen, aussagekräftigen Untersuchungsmethoden, welche zur Sicherstellung von stabilen Erhaltungsentscheiden und kostenwirksamen Massnahmen beitragen. Ziel ist es, dass die systematisch in einem Katalog zusammengestellten Untersuchungsmassnahmen, den gesamten Teilprozess Überwachung (gemäss Norm [20]) des Erhaltungsplanungsprozesses abdecken. Diese strukturierten Informationen zur «Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden» (gemäss offiziellem Titel des Einzelprojekts EP2) sollen als Grundlage der Erhaltungsplanung zur Verfügung gestellt werden. Dies als Unterstützung bei der Auswahl einer bezüglich Bauteil- und Materialisierung-, Befund- und Schadensprozess-spezifischen Untersuchungsmethode und zur Beurteilung deren objekt-spezifischen Relevanz.

Wichtig zu erwähnen ist, dass es sich um ein praxisorientiertes Forschungsprojekt handelt. Im Katalog der Untersuchungsmethoden (USM) wird der bekannte, aktuelle Stand der Technik für die Anwendung in heutigen Strassentunnel abgebildet. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts EP2 werden keine neuen Messmethoden (weiter-) entwickelt. Die zukünftigen Anwenderinnen und Anwender der zu erarbeitenden Systematik (FaS Erhaltungsplanung, Ingenieurinnen, Inspektoren, Sachverständige) werden von Anfang an in das Zentrum gerückt. Um trotz der Vielzahl an Nutzerinnen und Nutzer mit unterschiedlichen Fachkenntnissen stabile, nachvollziehbare und wiederholbare Entscheidungen zu gewährleisten, ist es notwendig, die Komplexität des Katalogs zu verringern. Dazu sind für die Praxis-orientierte Strukturierung der USM, die in Strassentunnel vorkommenden Bauwerksteile und Bauarten sowie die möglichen Schadensprozesse, als in allen Tunneln gleich und objektiv beurteilbare Grundlagendaten und Attribute zu verwenden.

Das Einzelprojekt EP2 hat, gemäss vorgegebenen Pflichtenheft [54], folgende Ziele:

- Die Überwachungs- und Inspektionsmethoden sollen systematisiert und in Abhängigkeit der detektierten Befunde und den damit verknüpften Schadensprozessen katalogisiert werden, um damit einen Beitrag zum übergeordneten Hauptforschungsziel, gemäss Kapitel 1.4.1, zu leisten;
- Der Katalog von Überwachungs- und Inspektionsmethoden soll vollständig sein, d.h. es sollen alle Typen von Überwachungsmethoden dargestellt werden bzw. für jeden Schadensprozess soll mindestens eine wirkungsvolle Diagnostikmethodik vorgeschlagen werden;
- Es sollen jene bestehenden Überwachungs- und Inspektionsmethoden – aus der Vielzahl von Möglichkeiten – bewertet werden, die aussagkräftige Resultate liefern und wirtschaftlich ausgeführt werden können. Die zweckmässige Kombination von Schadensprozessen ist zu berücksichtigen. Ziel ist, dass dazu für das ASTRA geeignete «Werkzeuge» geschaffen werden;
- Der Katalog an Überwachungs- und Inspektionsmethoden soll die relevanten Informationen für eine zielgerichtete Inspektionsplanung umfassen. Zu den relevanten Informationen gehören zum Beispiel:
 - Korrekte bzw. anerkannte Bezeichnung;
 - Beschreibung der Methode;
 - detektierbare Befunde bzw. Schadensinformationen und damit verknüpfte Schadensprozesse;
 - für Anwendung geeignete Bauelement-, Bauwerksteiltyp;
 - Betriebsrandbedingungen zur Anwendung der Methode;
 - Genauigkeit, Grenzen der Diagnosemethode;
 - Aussagekraft und Zuverlässigkeit je Bauwerksteil;
 - Hinweise zum Aufwand (Sperren, Zeitbedarf für Installation etc.);
 - Fallbeispiele (werden vom ASTRA soweit möglich zusammen und zur Verfügung gestellt);
 - Literatur, Produktdokumentation, Anbieterlisten;
 - Weitere oder methodenspezifische Informationen gemäss Vorschlag Auftragnehmer.
 - Die Methoden sollen in Bezug auf die Aussagekraft der nachfolgenden Zustandsbeurteilung (im EP4) von bergmännischen Tunneln miteinander verglichen und bewertet werden.

tet werden können. Dies mit dem Ziel, jeweils eine gute, zweckmässige Überwachungs- und Inspektionsmethode evaluieren zu können. Dazu soll eine Vergleichsmethodik vorgeschlagen werden, welche es ermöglicht, die bestehenden Methoden zu evaluieren;

- Es ist eine praxisbezogene Methodik für die Optimierung der Überwachungsprogramme von bergmännischen Tunneln unter Berücksichtigung von Risiken zu erarbeiten. (Bemerkung: Aktuell fehlt oft eine Integration des Risikomanagements in den Prozess der Überwachung und der damit verbundenen Anforderungen an die vorhandenen Inspektionsmethoden);
- Ein Tool zur Quantifizierung der Schadensaufnahmen (z.B. Risse) soll aufgezeigt werden, mit dem sich abzeichnende Schadensprozesse erkannt werden können.

Die Ergebnisse durchgeföhrter, zweckmässiger Untersuchungen im Rahmen des Erhaltungsplanungs-Prozesses liefern relevante Informationen für die nachfolgenden Massnahmenentscheide.

Wie im übergeordneten Teil des Kapitel 1.7 Methodik der Forschungsarbeit in Abb. 13 dargestellt, fliesst jedoch der Inhalt des zu erstellenden Katalogs der Untersuchungsmethoden nur indirekt, als Ergebnisse der USM (Nebenschnittstelle gemäss Abbildung) in die nachfolgenden Teilprozesse des EP4 «Entscheidungsmodell» und EP5 «Kostenmodell» mit ein.

Der Untersuchungsmethoden-Katalog des EP2 soll in einer mit dem EP1 und EP3-kompatiblen Form vorliegen, dass er später bei Bedarf einfach in bestehende oder neue Datenmodelle und Datenbanken implementiert und weiterentwickelt bzw. weiterverwendet werden kann (z.B. für späteres Anwendungs-Tool).

1.5 Erwartete Resultate und Nutzniessung

Als Resultat der vorliegenden Forschungsarbeit EP2 liegt ein systematischer Katalog von Untersuchungsmethoden vor, welcher einen guten Überblick über Methoden schafft, welche in bergmännischen Tunneln eingesetzt werden können. Die Gliederungsstruktur dieses einfach anzuwendenden Katalogs erlaubt die problemlose Erweiterung von zukünftigen Untersuchungsmethoden. Im Katalog wird zudem mittels Attribute ein Bezug zwischen den Untersuchungsmethoden und Bauwerksteilen, Befunde oder Schadensprozesse geschaffen, als relevante verknüpfte Informationen für den Erhaltungsprozess. Der Katalog des EP2 bildet somit die Grundlage zur Auswahl von Untersuchungsmethoden für aussagekräftige Zustandsbeurteilungen, welche massgeblich über Kosten und Wirksamkeit der nachfolgenden Erhaltungsmassnahmen mitbestimmen.

Nutzniesser des übergeordneten, gesamten Forschungsprojekts ist zur Hauptsache das operative Erhaltungsmanagement der Tunnelanlagen, namentlich die Fachspezialistinnen und Fachspezialisten (FaS) Erhaltungsplanung (EP) der einzelnen ASTRA-Filialen, sowie ihre Inspektionsteams bzw. beauftragten Ingenieurbüros. Das Forschungsprojekt enthält für diese Inspektionsteams eine Bestandsaufnahme der Inspektions- und Überwachungsmethoden. Der entsprechende Katalog wird ergänzt durch die verknüpfte detaillierte Aufstellung aller in der Schweiz erprobten Erhaltungsmassnahmen für bergmännische Tunnel des EP3, welche bisher so umfassend als Fachkataloge nicht zur Verfügung stehen.

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. Das Forschungsprojekt kann damit auch Grundlagen für die netz- und systemübergreifende Zustandsbewertung und das strategische Erhaltungsmanagement liefern.

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

1.6 Definition Erhaltungsprozess und Abgrenzung

1.6.1 Erhaltungsprozess und Projektgenerierung

Erhaltungsprozess und Projektgenerierung übergeordnet

Die Prozesse des Erhaltungsmanagements des ASTRA sind in den Richtlinien 11002 «Planung und Durchführung des Unterhalts» [1] und 12002 «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen» [2] geregelt. Bergmännische Tunnel sind dem Teilsystem Kunstbauten angegliedert. Das Erhaltungsmanagement stützt sich u.a. auf die SIA Normen 469 «Erhaltung von Bauwerken» [15] oder die «Grundnorm Erhaltungsmanagement» SN 640 900 [20]. Die Abb. 8 zeigt den Prozess des Erhaltungsmanagements aus dieser Grundnorm.

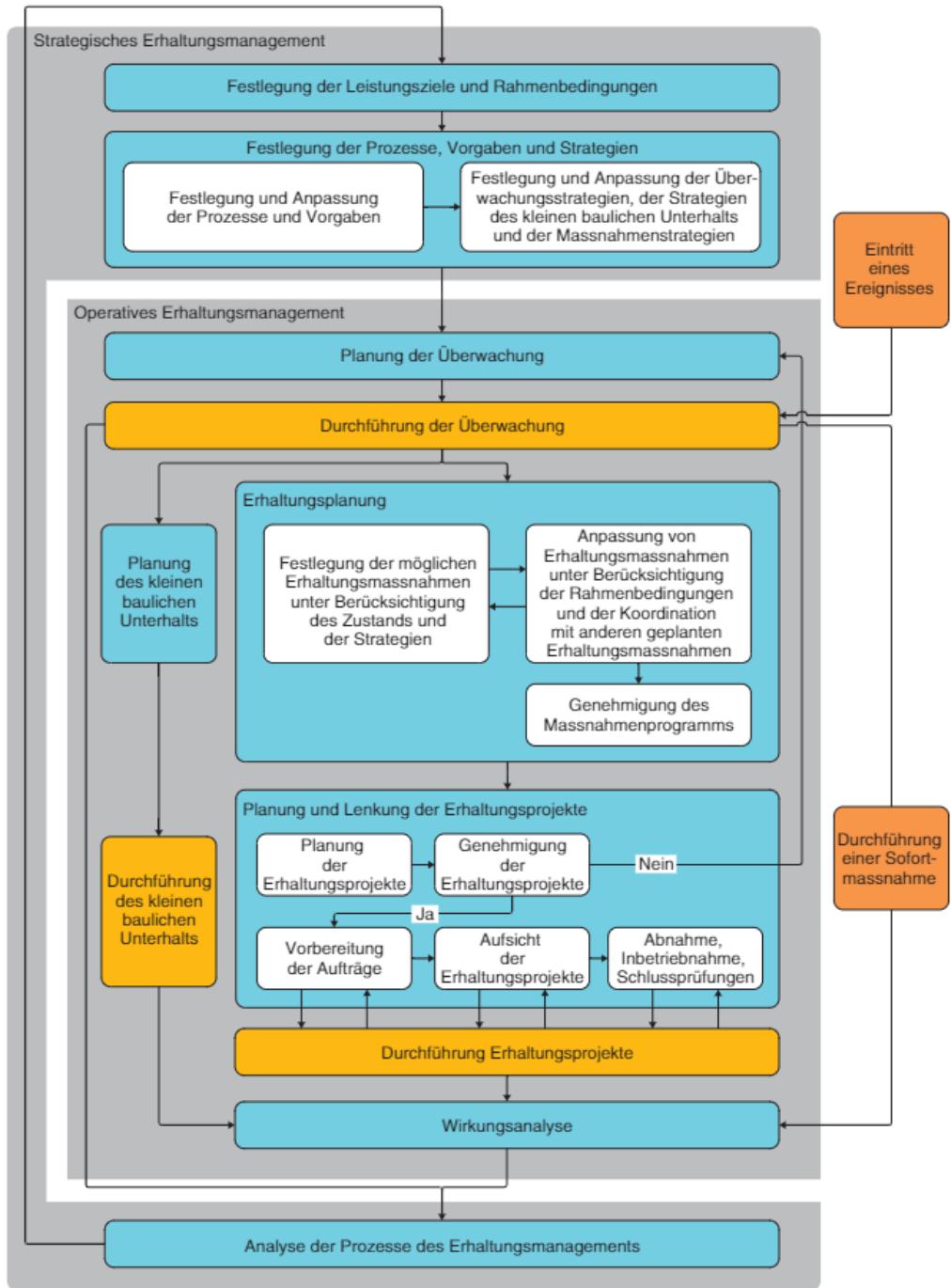


Abb. 8 Prozesse des Erhaltungsmanagements gemäss SN 640 900 [20]

Im Rahmen des übergeordneten Forschungsprojektes wird der nachfolgende Erhaltungsprozess gemäss Abb. 9 zugrunde gelegt, welcher auf einem Vorschlag des Einzelprojekt EP4 basiert und auf ASTRA Kunstbauten ausgelegt ist.

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

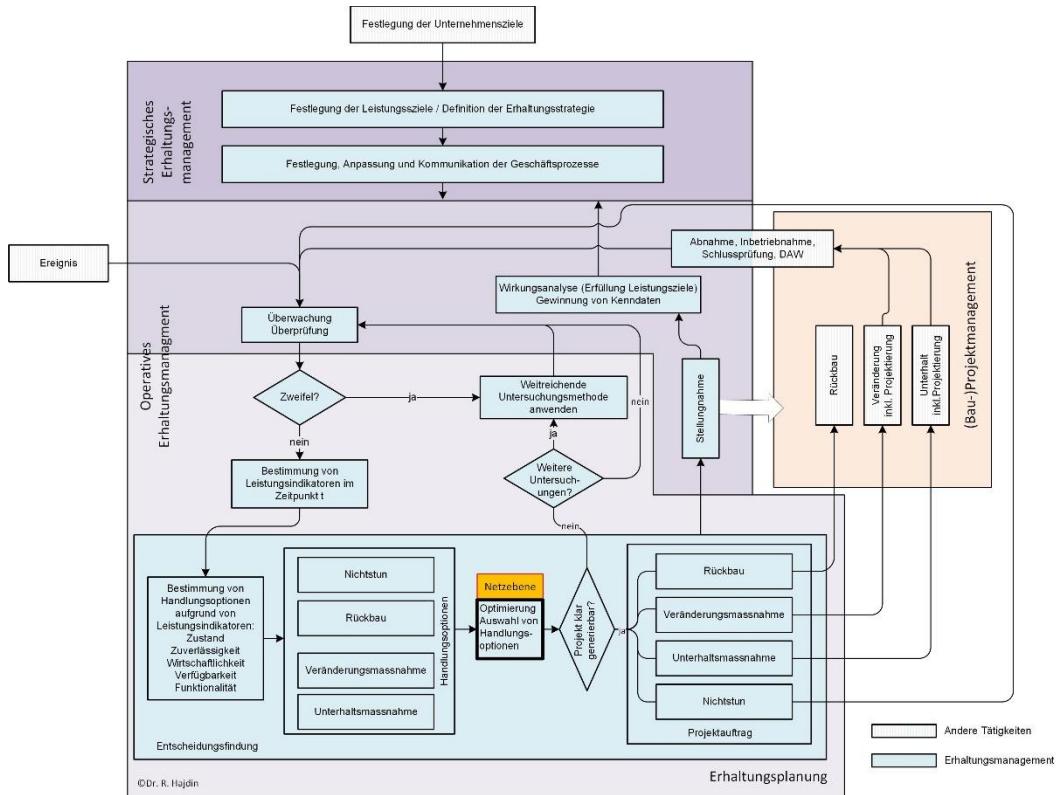


Abb. 9 Aufgaben im Erhaltungsprozess gemäss Vorschlag Einzelprojekt EP4

Eine zentrale Aufgabe im systematischen Erhaltungsmanagement bildet die Vorbereitung der Entscheidungsfindung zur Projektgenerierung. Teil der Projektgenerierung ist auch der Vorschlag der gewählten Handlungsoption. Im Rahmen des übergeordneten Forschungsprojektes wird der Entscheidungsfindungsprozess gemäss Abb. 10 zugrunde gelegt, welcher auf einem Vorschlag des EP4 [50] basiert.

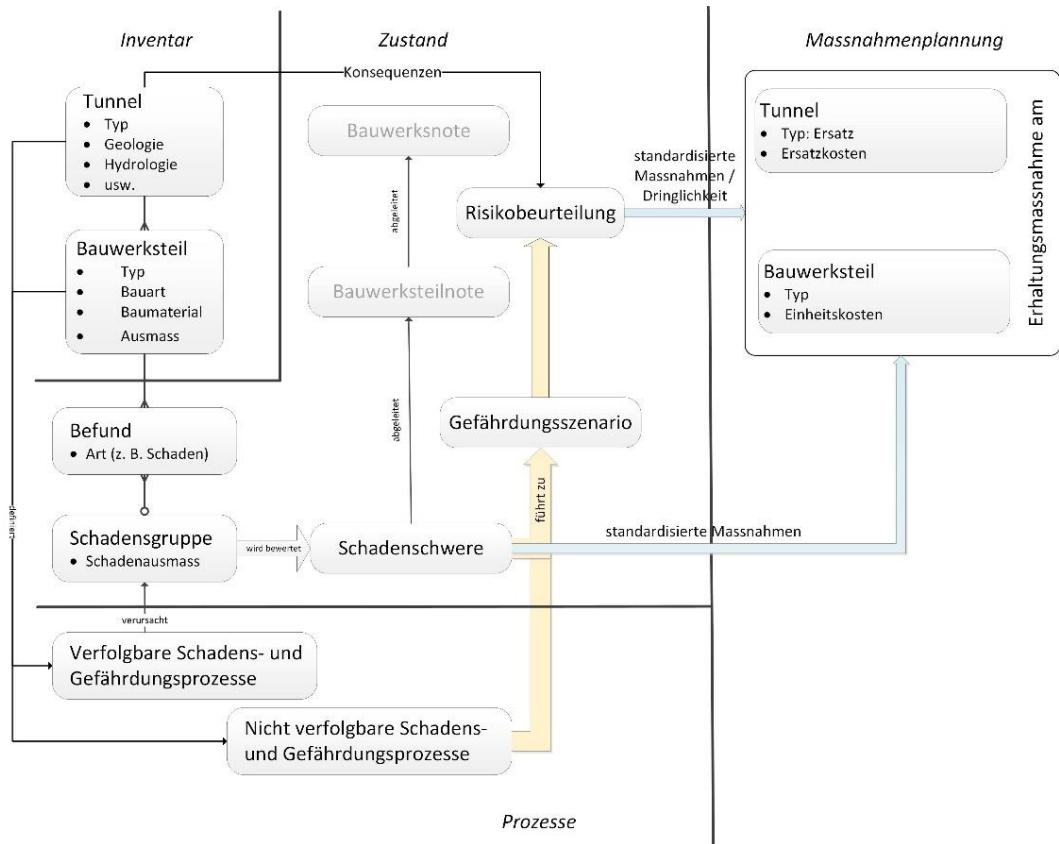


Abb. 10 Entscheidungsfindungsprozess in der Erhaltungsplanung von bergmännischen Strassentunneln (Quelle: Einzelprojekt EP4 [50]).

Definitionen und verwendete Terminologie im Teilprozess Überwachung EP2

Das Einzelprojekt EP2 «Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden» umfasst im Rahmen des Erhaltungsmanagements, wie in der Grundnorm SN 640 900 definiert, den «**Teilprozess Überwachung**».

In dieser Grundnorm ([20]; vgl. Abb. 8) wird beim operativen Erhaltungsmanagement von der «**Planung der Überwachung**» und «**Durchführung der Überwachung**» gesprochen.

Unter «**2. Geltungsbereich**» ist festgehalten, dass in dieser Richtlinie die bergmännischen Tunnel den Kunstbauten angegliedert sind.

In der ASTRA-Richtlinie 12002 «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen» [2] Kapitel 3.3 werden als erste zwei Phasen der Bauwerkserhaltung folgende Überwachungstätigkeiten festgehalten:

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

Unter dem Kapitel 5. «**Überprüfung**» ist u.a. festgehalten: Die Überprüfung – generell, detailliert – umfasst immer eine:

- Zustandserfassung (mit ergänzenden Zustandsaufnahmen);
- Zustandsbeurteilung;
- Empfehlungen für das weitere Vorgehen.

Auch statische Überprüfungen sind gemäss dieser ASTRA-Richtlinie bei Bedarf vorzusehen.

Im Anhang A4.2 dieser Richtlinie ist der ganze Ablauf mit den beiden Phasen «Überwachung» und «Überprüfung» abgebildet. Die beiden Phasen sind, als Auszug dieses Anhangs, in der nachfolgenden Abbildung grafisch dargestellt:

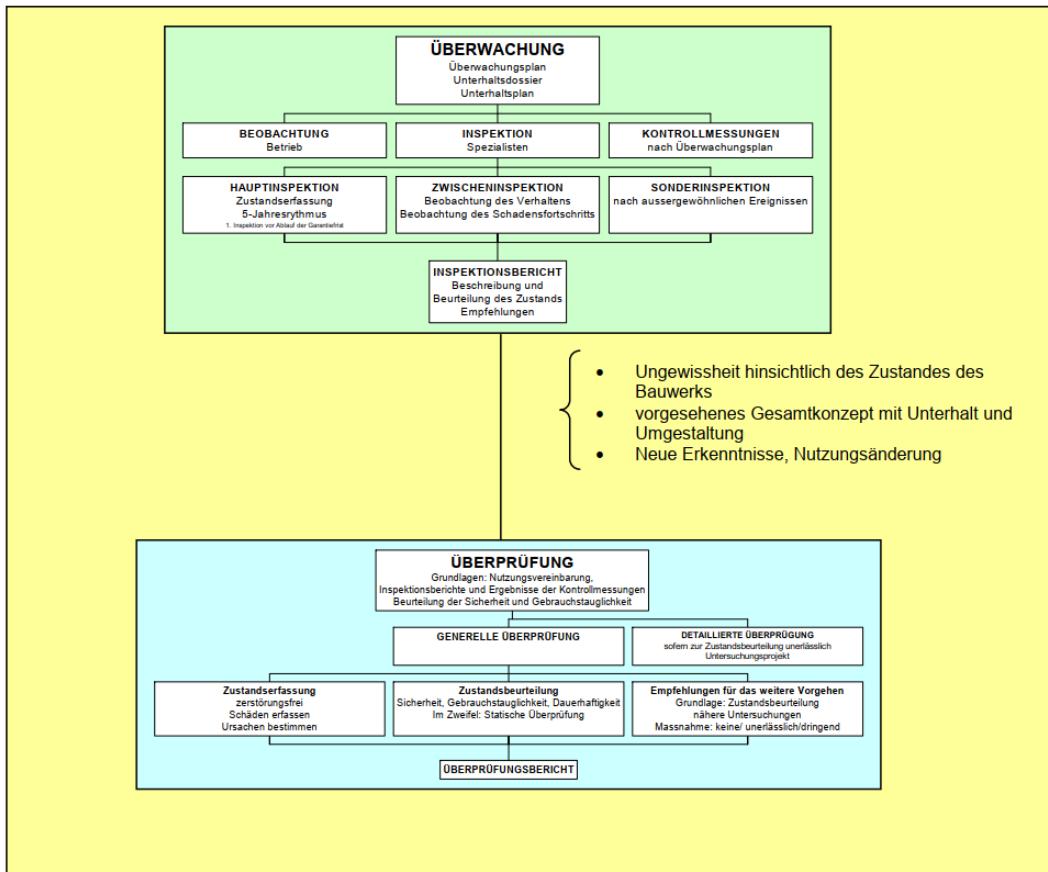


Abb. 11 Auszug Flussdiagramm Anhang A4.2 aus der Richtlinie ASTRA 12002 «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten» [2]

Gemäss diesen Vorgaben findet die Überwachung und Überprüfung vorgelagert zur Massnahmenplanung statt, welche im Rahmen des Forschungs-Gesamtprojektes [49] in den EP3 bis EP5 behandelt wird. Das ist in Übereinstimmung mit dem vorgängig aufgezeigten Erhaltungsprozess (gemäss Abb. 9; EP4).

In dieser Grafik lassen sich die Planung und die Durchführung von Untersuchungen, d.h. die konkrete Anwendung von Untersuchungsmethoden (USM) für die Überwachung und die Überprüfung von bergmännischen Tunneln eindeutig im Prozess abbilden (vgl. Abb. 12). Die Auswahl geeigneter Untersuchungsmethoden findet ebenfalls in diesem Teilprozess statt. (siehe dazu auch Kapitel 2.3 Konzeptvorschlag Vergleichsmethodik)

Da die Verwendung der Begriffe in den diversen Normen und Richtlinien nicht konsistent ist, werden die Begrifflichkeiten für den vorliegenden Bericht EP2 wie folgt definiert:

- Übereinstimmend mit der Grundnorm SN 640 900 wird der ganze Teilprozess, welcher das EP2 umfasst, übergeordnet als «**Teilprozess Überwachung**» bezeichnet;
- Dieser Teilprozess Überwachung ist in zwei Phasen unterteilt, die «**Phase Überwachung**» und die «**Phase Überprüfung**» (vgl. Kapitel 1.3.1);
- Sämtliche Inspektionsmethoden, Prüfverfahren, Überprüfungsmethoden etc., welche im «Teilprozess Überwachung» für Überwachung und Überprüfung zum Einsatz kommen, werden als «**Untersuchungsmethoden** (USM) bezeichnet.

Der Begriff «Überwachung», wird so aufgrund der Vorgaben aus Norm und Richtlinie doppelt belegt, einerseits als übergeordneter Teilprozess und andererseits als erste Phase

dieses Teilprozesses. Ein Widerspruch erfolgt dabei nicht. So können Untersuchungsmethoden im Rahmen der Überwachung oder bei einer Überprüfung eingesetzt werden, dienen dabei in jedem Fall der Zustandsbeurteilung des Bauwerks, im übergeordneten Teilprozess Überwachung.

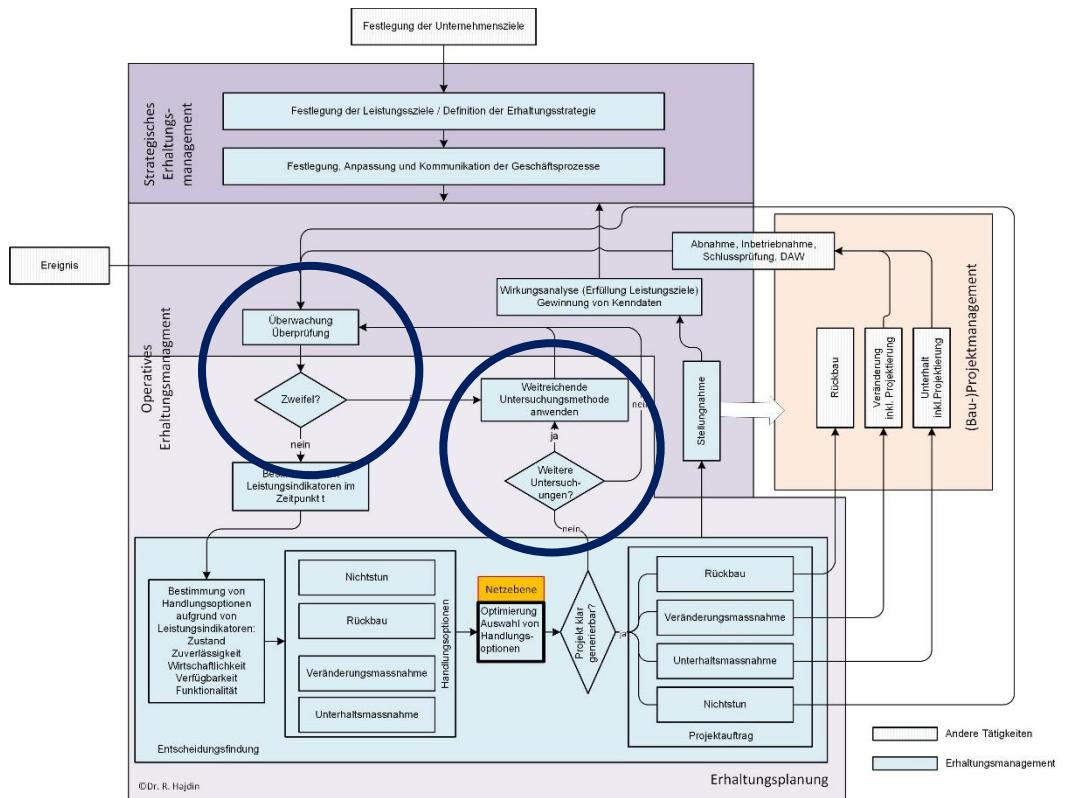


Abb. 12 Einbettung Teilprozess «Überwachung und Überprüfung» (EP2) im vorgesehenen Erhaltungsprozess gemäss EP4.

1.6.2 Abgrenzung Forschungsprojekt

Abgrenzung übergeordnet:

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

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

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

Der Fokus des Forschungsprojektes gilt dem operativem Erhaltungsmanagement auf Stufe des einzelnen Tunnelobjekts (d.h. Objektebene) und nicht der strategischen Netzebene. Unter Netzebene wird gemäss Begriffsdefinition SN 640 900 [20] die Gesamtheit der Strassenabschnitte des Nationalstrassennetzes verstanden. Letzteres schliesst aber nicht aus, dass die Forschungsergebnisse auch von Nutzen für das strategische Erhaltungsmanagement auf Netzebene sein kann.

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

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

Ergänzende Abgrenzungen beim Forschungsprojekt EP2:

Entsprechend der übergeordneten Abgrenzungen werden nur Untersuchungsmethoden zum Feststellen des Zustandes von Bauelementen von bergmännischen Strassentunneln katalogisiert. Methoden für Untersuchungen von technischen BSA-Installationen (exkl. Befestigungen) sind nicht Gegenstand des EP2 und werden nicht im Katalog aufgeführt.

Die Anwendung der Ergebnisse der Einzelprojekte mittels BIM ist nicht die primäre Zielsetzung. Durch die systematische Aufarbeitung der Forschungsinhalte in Katalogen mit spezifischen Attributen ist jedoch die Möglichkeit der Überführung der Erkenntnisse und Ergebnisse des EP2 in ein BIM-Projekt bzw. -Umfeld zu einem späteren Zeitpunkt gegeben.

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden, gemäss Projektauftrag, keine neuen, noch nicht erprobten Methoden getestet bzw. entwickelt. Neue Forschungserkenntnisse zu erfolgsversprechenden Methoden bzw. erweiterte Lösungsansätze, wie z.B. automatisierte Scanning-Aufnahmen, die bereits in Tunnels vereinzelt oder regelmäßig angewendet werden, können im Untersuchungsmethoden-Katalog des EP2 aufgenommen werden.

1.7 Methodik der Forschungsarbeit

Generelles Vorgehen Gesamtprojekt:

Auf Basis des Erhaltungsprozesses von bergmännischen Tunneln (vgl. Kapitel 1.6) wurden im Rahmen des Initialprojektes [67] Teilprozesse identifiziert, für welche spezifische Grundlagen zu erarbeiten sind. Auf dieser Basis wurde im Initialprojekt eine Untergliederung des Forschungsvorhabens in folgende 6 Einzelprojekte (EP) vorgeschlagen:

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

Ausgehend vom Erhaltungsprozess bestehen mehr oder weniger bedeutende Schnittstellen zwischen den Einzelprojekten, welche in der Abb. 13 dargestellt sind. In der Abbildung wird zwischen Haupt- und Nebenschnittstellen unterschieden. In der Leseart bedeuten Hauptschnittstellen in Pfeilrichtung, dass die Angaben des Vorgänger-Einzelprojektes ein notwendiger (aber nicht hinreichender) Input für das Folge-Einzelprojekt ist. Nebenschnittstellen zeigen mögliche weitere Inputdaten, die aber nicht zwingend für das Folge-Einzelprojekt sind.

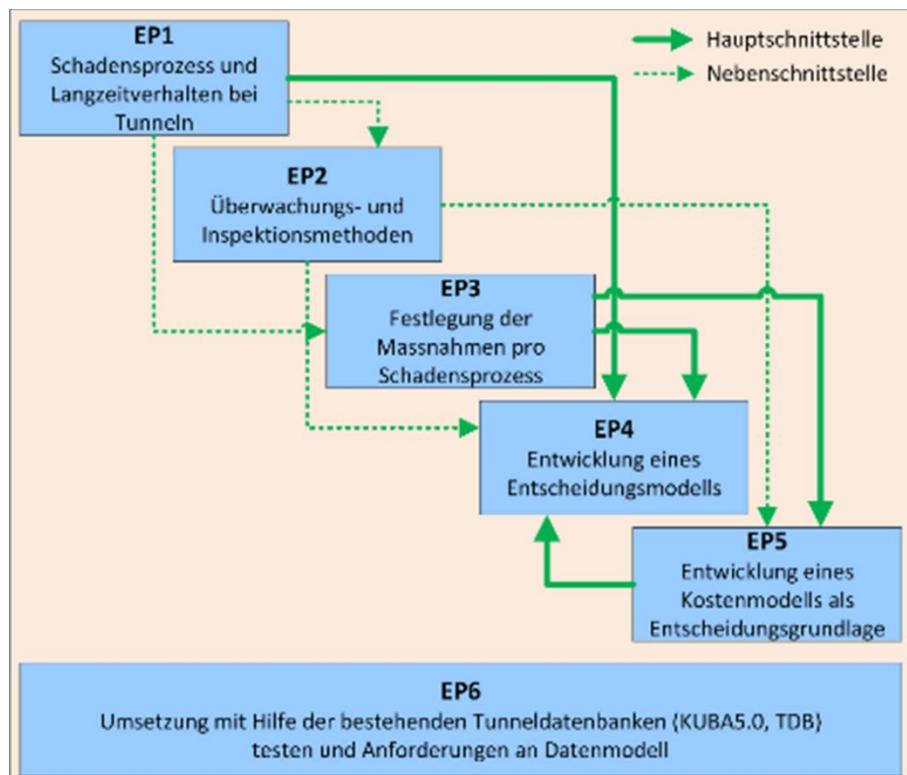


Abb. 13 Hauptschnittstellen Einzelprojekte und Datenlieferung (durch GPL revidierte Grafik; ursprünglich aus Pflichtenheft [54])

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

Generelles Vorgehen Methodik EP1 / EP2 / EP3:

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 des vorliegenden Schlussberichts objektiv nachvollziehbar erläutert. Die verwendeten Quellen werden spezifisch in jedem Einzelprojekt offengelegt (siehe u.a. Kapitel 1.2.2) 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. [67]). Die Vorarbeit in Form der Formulierung der Forschungsfragen, der Gliederung der wissenschaftlichen Arbeit und die Literaturrecherche wurden im Rahmen des Initialprojekts bereits weitestgehend abgeschlossen. Sie wird im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts stellenweise mit themenspezifischen Punkten und neuen Erkenntnissen ergänzt.

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

Dies erfolgt über eine einheitliche Gliederung der Bauwerksteile und Bauarten für bergmännische Strassentunnel durch das EP1 (vgl. Kapitel 1.9 und 2.1), welche allen EPs als

Bezugsgrösse dient, die unterschiedlichen Detaillierungsgrade der einzelnen EPs berücksichtigt und somit die spätere Vernetzung der Informationen der einzelnen Kataloge in der Datenbank einfach zulässt. Die erarbeitete Gliederung baut auf der bestehenden Struktur von KUBA 5.0 [3] auf, wobei diese wo nötig ergänzt wurde, sodass die 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 erarbeitenden Kataloge wurden zu Beginn des Forschungsprojekts an mehreren Workshops u.a. mit dem Datenmanager EP4 festgelegt und unter Berücksichtigung der Inputs und Erfordernisse der restlichen EPs umgesetzt. Die Katalogisierung der Informationen und Daten erfolgt mittels Excel. Dies ermöglicht ein Export in ein offenes und weiterverwendbares Dateiformat und kann bei Bedarf durch Plugins und grafische Programmiersoftware ergänzt werden.

Spezifisches Vorgehen / Methodik beim EP2:

Für den zukünftigen Teilprozess Überwachung im Rahmen des Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunneln wird der Katalog der Untersuchungsmethoden durch das EP2 komplett neu erarbeitet und aufgebaut.

Dabei werden die bestehenden KUBA-Kataloge «Messgrössen» und «Untersuchungsmethoden» [3], welche insbesondere für bergmännische Tunnel ungenügend d.h. unvollständig sind, deutlich erweitert. Alle neu zusammengestellten Untersuchungsmethoden (USM) sind dafür einheitlich zu strukturieren. Für die Ergänzung, die Vervollständigung und Überprüfung des Katalogs der Untersuchungsmethoden (EP2; U.-Katalog) dienen die Praxiserfahrung von aktuellen Fallbeispielen (vgl. Kapitel 1.2.3), sowie Informationen aus diversen Publikationen, u.a. aus der Literaturrecherche. Der Katalog wird ergänzt - soweit für bergmännische Tunnel sinnvoll - durch Prüfungen aus aktuellen Prüfkatalogen von akkreditierten Prüfinstituten, welche Untersuchungs- und Prüfmethoden im Bauwerksumfeld gemäss dem aktuellen Stand der Technik / Normierung anbieten. Die Erarbeitung des Katalog EP2 erfolgt zudem in enger Abstimmung mit EP1, welche u.a. parallel die Informationen zu den möglichen Schadensprozessen erarbeitet.

Der Ergebnis vom EP2 ist ein Untersuchungsmethoden-Katalog (U.-Katalog), welcher die Verknüpfung der erfassten und beschriebenen Methoden mit der Bauwerksgliederung, den Befunden den zugehörigen Schadensprozessen umfasst. Des Weiteren wird vom EP2 ein Konzeptvorschlag für die Beurteilung und Evaluierung von Untersuchungsmethoden erarbeitet, worin die Risikobetrachtung, unter Berücksichtigung von Kosten, als massgeblich berücksichtigt werden soll.

Da es sich um ein praxisorientiertes Forschungsprojekt handelt, sind den zukünftigen Anwenderinnen und Anwendern, zusätzlich zum Datenbank-mässigen U.-Katalog, auch einfach lesbare, illustrierte Katalogblätter der bewährtesten Untersuchungsmethoden zur Verfügung zu stellen. Die Informationen zur Beschreibung der Methoden sind aus dem U.-Katalog zu generieren und haben alle relevanten Angaben zu den Praxis-erprobten Untersuchungsmethoden zu liefern, welche im Rahmen der Katalogentwicklung vorgängig bestimmt wurden. Dies ganze Entwicklung hat in enger Abstimmung mit der Erhaltungsplanungs-Praxis und gemeinsam mit den anderen Einzelprojekten EP1 und EP3 zu erfolgen.

Die Ergebnisse und Produkte des EP2 sind im (vorliegenden) Schlussbericht vollständig zu dokumentieren und dabei auch die Vollständigkeit und den Nutzen aufzuzeigen. Mit den neuen Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt sollen zum Schluss auch konkrete Empfehlungen zur Weiterentwicklung des Teilprozesses Überwachung abgeleitet werden.

1.8 Ablauf und Organisation des Forschungsprojekts

1.8.1 Organisation und Beauftragter

Organisation Forschungsprojekt

Basierend auf den Empfehlungen des Initialprojektes [67] beauftragte das ASTRA für die Gesamtprojektleitung die Firma ILF Beratende Ingenieure AG. Die Gesamtprojektleitung (GPL) war für die organisatorisch Koordination des gesamten Forschungspaketes und der übergreifenden fachlichen Einbettung der erarbeiteten Ergebnisse in den Einzelprojekten zuständig. Zudem erstellt die Gesamtprojektleitung einen Synthesebericht «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln» [49], in welchem die Untersuchungen und Ergebnisse aller fünf Forschungsvorhaben EP1 bis EP5 zusammenfassend dargestellt werden.

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

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

Beauftragung, Organisation und Koordination beim Einzelprojekt EP2

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

Innerhalb der INGE war die EBP Schweiz AG (EBP) verantwortlich für das EP2 «Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden». Die vorliegende Forschungsarbeit vom EP2 wurde durch Stefan Matsch (PL), Sonja Wacker und Hannes Heller der EBP Schweiz AG erarbeitet.

Die Koordination der Projektleitung EP2 mit der GPL, der BK sowie den EP4 und EP5 übergeordnet in Abstimmung mit Projektleitung der INGE «Lombardi – EBP» wahrgenommen. Die Koordination des EP2 mit den EP1 und dem EP3 erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Reto Weishaupt und Patrick Beeler (EP1, Lombardi AG) sowie Nikola Vasic und Jürg Portner (EP3, EBP Schweiz AG).

1.8.2 Ablauf und Bearbeitungszeitraum

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

Tab. 1 Projektplan

Projektstart:	Januar 2021
Arbeitspakete 1 (Grundlagenstudium) und 2 (Katalogerstellung):	März 2021 bis April 2022
Arbeitspaket 3 (Dokumentation Vorabzug 1):	Februar bis Juni 2022
Bereinigung Rückmeldung BK + GPL zu Vorabzug 1:	Juli bis September 2022
Bereinigung Schlussbericht und Abgabe:	Oktober 2022 bis März 2023
Schlussprüfung Rückmeldung zu Abschluss:	März bis April 2023
Abschluss Schlussbericht und Forschungsprojekt EP3:	Mai bis Juni 2023

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

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

1.9 Bauwerksgliederung unter Berücksichtigung der Anforderungen des ASTRA

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

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

Die zu erarbeitenden Kataloge sind daher gemäss dem Forschungsauftrag so zu strukturieren, dass sie in bestehende (KUBA) Datenmodelle und -banken implementiert werden

können. Die aktuellen Entwicklungen im Bereich BIM sind wo möglich mitzuberücksichtigen damit die Forschungsergebnisse später bei Bedarf einfach in neue Datenmodelle und -banken überführt werden können. So soll gewährleistet werden, dass das über die Jahre angesammelte Wissen in KUBA und die Ergebnisse der Forschungsarbeit weiterhin genutzt und zukünftige Entwicklungen insbesondere im Bereich BIM einfach antizipiert werden können. Die Herausforderung besteht darin, eine Bauwerksgliederung zu erstellen, welche diese Anforderungen erfüllt und gleichzeitig den Belangen des Forschungsprojekts resp. den einzelnen EPs hinsichtlich Detaillierung und Praktikabilität gerecht wird. Um diesen Anspruch zu erfüllen, wurde daher durch EP1 in enger Absprache mit den weiteren EPs eine Bauwerksgliederung für das Forschungsprojekt erarbeitet. Diese Bauwerksgliederung stellt eine gemeinsame Bezugsgroßesse aller EPs dar und bildet die Basis für die Datenverknüpfung zwischen den einzelnen EPs. Die erarbeitete Bauwerksgliederung und deren Umsetzung in den Katalogen von EP1, EP2 und EP3 ist in Kapitel 2.1 erläutert.

2 Ergebnisse des Einzelprojekts EP2

2.1 Bauwerksgliederung des Forschungsprojekts

2.1.1 Relevanz der Bauwerksgliederung für Forschungsprojekt

Eine Infrastrukturanlage besteht aus einer Vielzahl an unterschiedlichen Elementen resp. Infrastrukturobjekten, die in ihrer Kombination das Gesamtsystem bilden. Die einzelnen Infrastrukturobjekte werden alle einerseits durch ihren Zweck im Gesamtsystem und andererseits durch ihre Materialisierung charakterisiert. Dies ist sowohl in KUBA als auch in BIM der Fall. Durch die Verknüpfung der zu erarbeitenden Kataloge resp. den darin enthaltenen Informationen mit den einzelnen Infrastrukturobjekten bzw. deren Bauteile, sowie deren jeweiligen Materialisierung lässt sich daher die Implementierung in bestehende und zukünftige Datenmodelle / -banken sicherstellen. Gleichzeitig ist mit einer übergeordneten allgemeingültigen Bauwerksgliederung die Durchgängigkeit der Datenstruktur zwischen den einzelnen EPs gewährleistet (vgl. Abb. 13 in Kapitel 1.7).

2.1.2 Datengrundlage der Bauwerksgliederung

Die Bauwerksgliederung für das Forschungsprojekt baut auf der bestehenden Kunstbauten-Datenbank KUBA 5.0 auf bzw. berücksichtigt diese insoweit, dass eine einfache Implementierung der zu erarbeitenden Kataloge auch in die bestehende Datenbank gewährleistet ist. Details zu der Implementierung dieser Datengrundlage in die Bauwerksgliederung des Forschungsprojekts sind im EP1 [24] in Kapitel 2.1.2 beschrieben.

2.1.3 Struktur der Bauwerksgliederung im Forschungsprojekt

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

Das Forschungsprojekt ist, wie in Kapitel 1.7 erwähnt, in sechs verschiedene Einzelprojekte bzw. EPs unterteilt. Im Rahmen der Forschungsarbeit stellte sich heraus, dass für die einzelnen EPs unterschiedliche Detailierungsstufen der Tunnelbauwerke relevant sind. So werden z.B. die Schäden und Befunde der Inspektionen zur eindeutigen Lokalisierung entlang des Tunnelbauwerks in KUBA der untersten Hierarchiestufe bzw. den Bauwerksteilen (BWT) zugeordnet. Das Bauwerksteil (in Kombination mit dessen Materialisierung; BA) ist folglich für das EP2 die Hierarchiestufe in der Bauwerksgliederung, welche für die Zuordnung geeigneter Untersuchungsmethoden und deren Ergebnisse massgebend ist, wobei für die Untersuchungen die Materialisierung, also die Bauart (BA) im Vordergrund steht. Für das Kostenmodell vom EP5 sind hingegen nur die wesentlichen, kostenrelevanten Elemente eines Tunnelblocks massgebend. Die Baueinheit als nächst grösitere, bereits bestehende Gliederungsebene in KUBA ist hierfür bereits zu grob. Deshalb wurde im Rahmen des Forschungsprojekts eine neue Gliederungsstufe eingeführt, welche die Gruppierung der für die Kostenermittlung massgebenden Bauwerksteile je Tunnelblock zulässt. Es handelt sich hierbei um die Bauwerksteil-Ebene (BWT-Ebene), welche in Abb. 14 dargestellt ist.

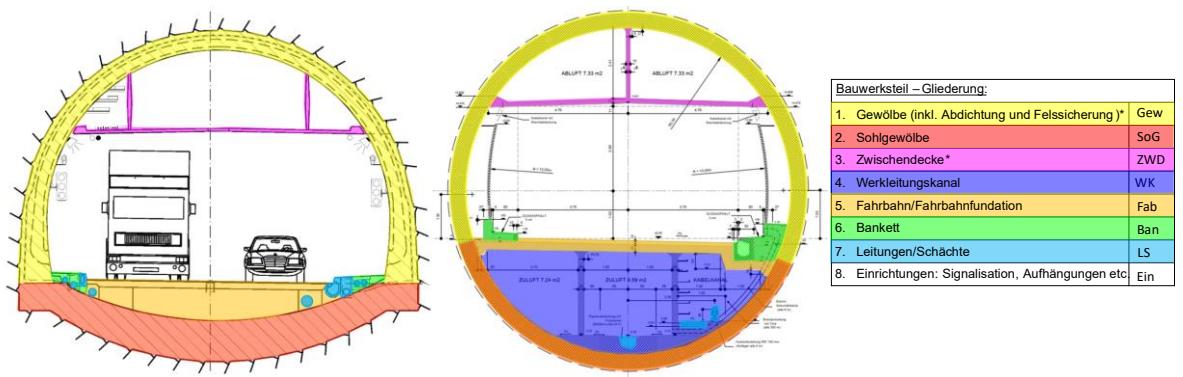


Abb. 14 Bauwerksteil-Ebene (BWT-Ebene) gemäss EP5

Die sich daraus ergebende Gliederungsstruktur des Forschungsprojekts im Kontext zur bestehenden Gliederung in KUBA ist nachfolgend in Tab. 2 ersichtlich. Die für das Forschungsprojekt neu ergänzte BWT-Ebene ist grau hinterlegt und so hervorgehoben.

Tab. 2 Bauwerksgliederung des Forschungsprojekt im Kontext zu KUBA

Ebene	Bezeichnung
Bauanlage (BA)	Infrastrukturobjekte, die auf der obersten Hierarchiestufe mehrere Bauwerke zu einer Einheit zusammenfassen. [3]
Bauwerk (BW)	Infrastrukturobjekte, die ein komplettes klar abgrenzbares Infrastrukturobjekt abbilden. [3]
Baueinheit (BE)	Infrastrukturobjekte, die unterhalb der Bauwerksebene mehrere Bauwerksteile zu einer Einheit zusammenfassen. [3]
Bauwerksteil-Ebene (BWT-Ebene)	Gruppierung der für die Kostenmodellierung (EP5) massgebenden Bauwerksteile je Tunnelblock.
Bauwerksteil (BWT)	Infrastrukturobjekte, untergeordneter Ebenen, die einzelne nicht weiter unterteilbare Elemente des Bauwerks abbilden. [3]
Oberflächenschutz (OS)	Infrastrukturobjekte, die den Oberflächenschutz eines Bauwerksteils abbilden und daher einem Infrastrukturobjekt dieser Gruppe zugeordnet sind. [3]

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

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

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

Die dem vorliegenden Forschungsprojekt zugrundeliegende Bauwerksteilgliederung ist im Anhang: «Übersicht Katalog Bauwerksteil (BWT)» des Schlussberichts EP1 [24] ersichtlich, auf den im Katalog «Untersuchungsmethoden» des EP2 verwiesen wird.

Bauart (BA)

Die Bauart bezeichnet gemäss [3] die Art und Weise, wie ein Baustoff verwendet wird. Die Bauart steuert die Materialisierung der Bauwerksteile und ist somit neben den Bauwerksteilen der zweite wichtige Parameter zur Charakterisierung der Tunnelelemente im Gesamtsystem (siehe Kapitel 2.1.1). Analog zu den Bauwerksteilen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts die bestehenden Einträge der Bauarten in KUBA analysiert und hinsichtlich der anerkannten Bezeichnungen der Bauarten eines bergmännischen Strassentunnels überarbeitet. Jeder im entsprechenden Grundlagenkatalog aufgelisteten Bauart (BA) wurde eine eindeutige ID zugewiesen. Die Strukturierung der Bauart und die entsprechende Codierung der zugehörigen ID wird am Beispiel der Stahlbetonkonstruktion erläutert.

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

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

Die dem vorliegenden Forschungsprojekt zugrundeliegende Bauartgliederung ist im Anhang A5: «Übersicht Katalog Bauart (BA)» des Schlussberichts EP1 [24] ersichtlich.

Bauteilart (BWT x BA)

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

BWT-ZWD-NTW-101 – BA-BK-03
= Zwischendecke aus Stahlbetonkonstruktion

Die dem vorliegenden Forschungsprojekt zugrundeliegende Bauteilarten sind in Beilage B7: «Katalog Bauteilart (BWTxBA)» im Tabellenblatt «BWTxBA Auswahl» des Schlussberichts EP1 [24] ersichtlich, auf den im Katalog «Untersuchungsmethoden» des EP2 referenziert wird.

Bei der Bauteilart handelt es sich nicht um einen eigenständigen Katalog, sondern lediglich um ein Hilfsmittel zur Sicherstellung von eindeutigen Verknüpfungen zwischen den Katalogen EP1, EP2 und EP3 resp. zur Vermeidung von unlogischen Verknüpfungen mit in der Realität nicht vorkommenden Bauwerksteil-Bauart-Kombinationen bei einer späteren Implementierung der Kataloge in eine Datenbank. Die Kompatibilität der für die Verknüpfun-

gen verwendeten Bauteilart mit zukünftigen Entwicklungen ist daher gewährleistet. Zukünftige neue Bauwerksteile oder Bauarten können weiterhin unabhängig voneinander in den dafür vorgesehenen, eigenständigen Katalogen angepasst und ergänzt werden.

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

Wie vorgängig in Kapitel 1.9 beschrieben, war der Anspruch, eine als gemeinsame Bezugsgrösse benutzbare Bauwerksgliederung fürs gesamte Forschungsprojekt zu entwickeln. Die bestehende Bauwerksstrukturierung in KUBA 5.0 wurde hierfür durch EP1, EP2 und EP3 für das Forschungsprojekt erweitert, weiterentwickelt und EP-übergreifend festgelegt. Bei der Erarbeitung der Kataloge der drei Einzelprojekte wurde diese neue Bauwerksgliederung laufend weiter optimiert und vervollständigt. Ein Abgleich erfolgte auch im Austausch mit den Einzelprojekten EP4 und EP5, gemäss dem Ablauf des Erhaltungsprozesses, wie er übergeordnet in Kapitel 1.6.1 detailliert beschrieben und in der Abb. 9 vom EP4 dargestellt ist.

Die beschriebene Bauwerksgliederung des Forschungsprojekts ist die wesentliche Grundlage für die (Daten-)Verknüpfung zwischen den fünf Einzelprojekten. Diese erfolgt zwischen den Katalogen der EP1, EP2 und EP3 wie vorgängig beschrieben über die Bauteilart. Eine Verknüpfung zwischen den Katalogen des EP1, EP2 und EP3 ist sinngemäss in Abb. 15 schematisch dargestellt. Das Beispiel wird nachfolgend kurz erläutert.

In einem bergmännischen Strassentunnel werden Schäden bzw. Befunde an einem bestimmten Bauwerksteil mit einer bestimmten Bauart bzw. einer Bauteilart festgestellt und dokumentiert. Über die Datenverknüpfungen der Bauteilart und der visuellen Befunde mit den Schadensprozessen im Katalog von EP1 lässt sich in einer Datenbank nun eine Auswahl der möglichen Schadensprozesse und der daraus folgenden Konsequenzen bzw. Gefährdungsbilder generieren. Da die Kataloge von EP2 und EP3 wiederum über die Bauteilart mit dem Bestand bzw. über die Schadensprozesse mit EP1 verknüpft sind, lassen sich basierend auf der Auswahl der vermuteten Schadensprozesse auch direkt eine Auswahl der zweckmässigen möglichen Untersuchungs- und Instandsetzungsmethoden generieren. Die Datenverknüpfungen funktionieren grundsätzlich in beide Richtungen. Das heisst, man kann auch eine Auswahlliste generieren lassen, welche alle mit einer bestimmten Methode an einer Bauteilart untersuchbaren Schadensprozesse auflistet, falls dies von Interesse sein sollte.

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

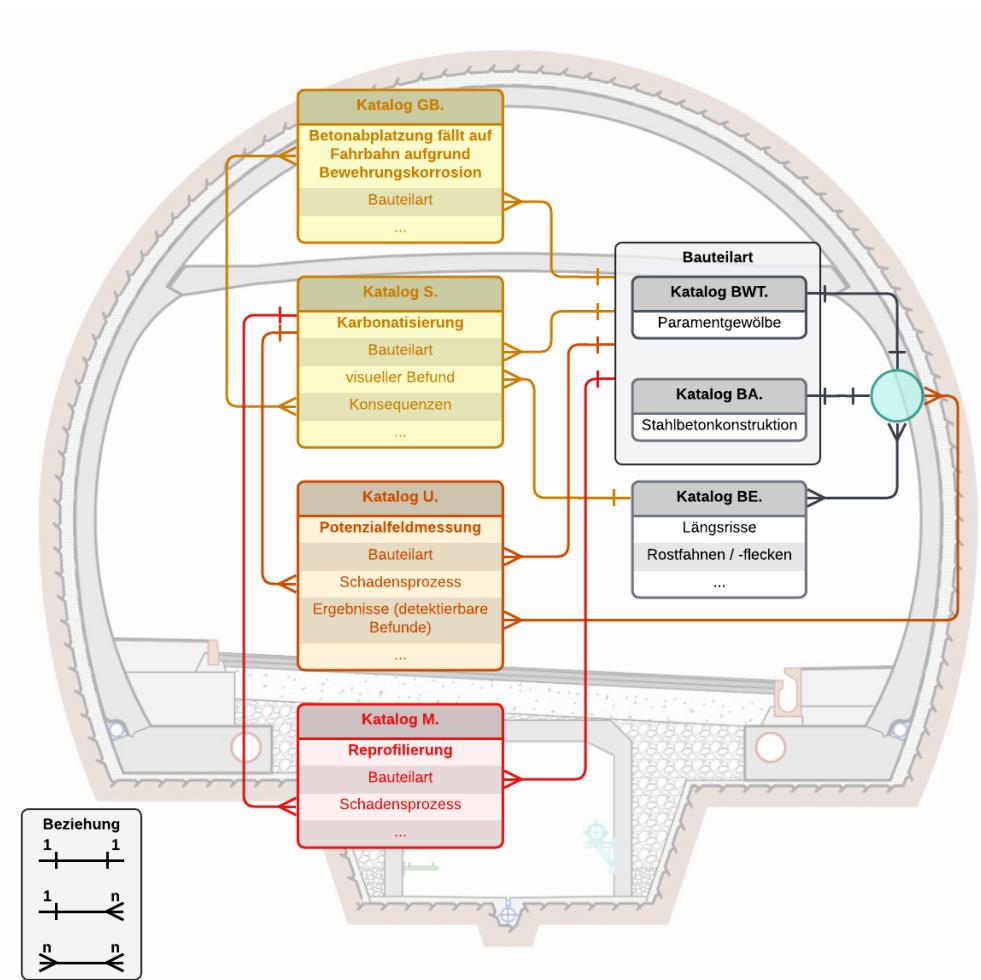


Abb. 15 Beispiel für die Verknüpfungen der Kataloge der EP1 bis EP3 mit Hilfe der übergeordnet definierten Bauwerksgliederung

2.1.5 Implementierung in bestehende und neue Datenmodelle / -banken

Die Bauwerksgliederung des Forschungsprojekts verknüpft sämtliche in den Katalogen von EP 1 – 3 enthaltenen Informationen mit den in bergmännischen Strassentunneln vorkommenden Bauteilarten bzw. einer eindeutigen Kombination aus Bauwerksteil (Zweck) und Bauart (Materialisierung) gemäss Kapitel 2.1.3. Durch diese Verknüpfung lässt sich daher die Implementierung der Kataloge in bestehende und zukünftige Datenmodelle / -banken im Grundsatz sicherstellen. Gleichzeitig ist mit einer übergeordneten allgemeingültigen Bauwerksgliederung die Durchgängigkeit der Datenstruktur zwischen den einzelnen EPs gewährleistet (vgl. Kapitel 1.7).

Bestehende und neue Datenmodelle

Im Schlussbericht EP1, Kapitel 2.1.5, sind ergänzende Ausführungen zu den Zusammenhängen und zur Kompatibilität der vorliegenden Bauwerksgliederung einerseits zu bestehenden Datenmodellen (KUBA; [3]), andererseits auch zu neuen Datenmodellen (z.B. BIM / IFC Tunnel, FDK SBB [63]) zu finden.

2.2 Katalog Untersuchungsmethoden

2.2.1 Anforderungen an den Katalog der Untersuchungsmethoden

Der Katalog der Untersuchungsmethoden hat, abgeleitet aus dem Pflichtenheft des Einzelprojekts EP2, folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Systematische Erfassung der Untersuchungsmethoden für die Phase Überwachung (Beobachtung, Inspektionen, Kontrollmessungen) inkl. Monitoring sowie für die Phase der Überprüfung (generelle Überprüfung, detaillierte Überprüfung)
- Beschreibung der erfassten Methoden u.a. mit ihrer korrekten bzw. anerkannten Bezeichnung.
- Hinweise zu Grundlagen der Methoden sofern vorhanden, wie z.B. Prüfnormen, Publikationen, Anbieter oder der Bezug zur Anwendung in den Fallbeispielen.
- Bezug der Methoden zu den Befunden und Schädigungsprozessen gemäss den Grundlagenkatalogen EP1 [24]; d.h. ermöglichen einer Auswahl von Untersuchungsmethoden für alle bekannten Befunde oder Schadensprozesse.
- Bezug der Methoden zur Bauwerksgliederung, wie beschrieben in Kapitel 2.1, und daraus abgeleitet zu Bauwerksteil und Bauart (Materialisierung); d.h. ermöglichen einer Auswahl von Untersuchungsmethoden für Bauteilarten oder Bauarten.
- Erwartbare Ergebnisse der Untersuchungsmethode, u.a. mit Angaben zu Messgrößen, zu qualitativen bzw. quantitativen Resultaten oder einem Kurzbeschrieb der erwartbaren Aussagen.
- Hinweise zum finanziellen Aufwand für die Prüfungen, u.a. abgeleitet aus Überlegungen zur den Betriebsrandbedingungen für die Ausführung der Untersuchungen.
- Durchgängige Kompatibilität mit den Forschungsprojekten EP1 und EP3 [24,60]
- Einfache Anwendung und problemlose Erweiterung mit zukünftigen, heute noch nicht erfassten neuen Untersuchungsmethoden.
- Saubere einheitliche Strukturierung der Informationen bzw. Daten pro Untersuchungsmethode, so dass diese Informationen zukünftig in anderen Datenbanken zur Verfügung gestellt werden können.

2.2.2 Abgrenzungen beim Katalog Untersuchungsmethoden

Abgrenzungen bei den zu erfassenden Untersuchungsmethoden

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden gemäss der übergeordneten Abgrenzung (vgl. Kapitel 1.6.2) die Untersuchungsmethoden im Grundlagenkatalog (U.-Katalog) aufgeführt, welche ausschliesslich beim baulichen Teil von bergmännischen Tunneln im Teilprozess Überwachung (vgl. Abb. 8 in Kapitel 1.6.1) eingesetzt werden können.

Entsprechend nicht erfasst und behandelt werden Methoden, welche:

- für die Ausrüstung der Betriebs- und Sicherheitsanlagen (BSA) / Elektromaschinelle Ausrüstung (EMA) verwendet werden;
- ausschliesslich nur bei Tagbautunneln oder nur beim Neubau von Tunneln eingesetzt werden;
- sich noch in Entwicklung befinden und trotz Beschrieb in Publikationen noch nicht in der Praxisanwendung mehrfach erprobt sind bzw. produktiv eingesetzt werden.

Aufgeführt und somit im U.-Katalog beschrieben werden zudem Methoden, welche im Normalfall vor allem bei Kunstdämmen, z.B. an Brücken, oder beim Neubau von Tunneln eingesetzt werden. Diese Untersuchungsmethoden wurden jedoch nur aufgenommen, wenn sie für bergmännische Tunnel bzw. ihre Bauwerksteile oder Bauarten (Materialisierungen) relevant sind und in der Phase Überprüfung ergänzende Informationen und damit einen Mehrwert für die Zustandsbeurteilung und die nachfolgende Massnahmenempfehlung liefern können.

Abgrenzungen bei den Daten bezüglich Schnittstellen zu EP4 und EP5

Der U.-Katalog (Aufbau vgl. nachfolgendes Kapitel 2.2.3) stellt Informationen zu den Untersuchungsmethoden (vgl. Kapitel 2.2.4) zusammen. Diese Informationen sollen die Auswahl einer geeigneten Methode ermöglichen, z.B. aufgrund vorgefundener Befunde oder aufgrund von schadhaften Bauwerksteilen. Die Ergebnisse der so ausgewählten und durchgeführten Untersuchungen, liefern Informationen für die Zustandsbeurteilung als einen wichtigen Input für die nachfolgende Massnahmenempfehlung.

Im Rahmen des Gesamtprojektes soll im Einzelprojekt EP4 [71] ein «Entscheidungsmodell» für die optimierte Massnahmenempfehlung entwickelt werden. Darin fließen die Informationen aus den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen bzw. der Zustandsbeurteilung mit ein. Der Inhalt des U.-Katalogs fließen nicht direkt ins Modell des EP4 ein, weshalb im Katalog des EP2 keine spezifischen Attribute für EP4 geführt werden. Deshalb wird im übergeordneten Pflichtenheft in der Abb. 13 (siehe Kapitel 1.7) die Verbindung zum EP4 wie die auch zum EP5 lediglich als Nebenschnittstelle bezeichnet.

Gemäß erfolgter Absprache mit dem EP5 «Kostenmodell» [68] sind für Untersuchungsmassnahmen keine Kostendaten vom EP2 ans EP5 zu liefern. D.h. es sind keine Attribute vorzusehen, welche spezifische Informationen für diese Schnittstelle enthalten. Das EP5 hat für ihr Kostenmodell selbst Standard-Kosten für Untersuchungen bestimmt, die oft nur ein kleiner Prozentsatz der gesamten Massnahmen-Kosten ausmachen. Die vom EP2 bestimmten Kosteninformationen zu den einzelnen Untersuchungsmethoden (vgl. Kapitel 2.2.7) sind als Hilfestellung zur Aufwandabschätzung für die Fachpersonen gedacht, welche die Daten des U.-Katalogs nutzen.

2.2.3 Systematisierung und Aufbau Katalog Untersuchungsmethoden

Der Katalog EP2 «U. Untersuchungsmethoden» (U.-Katalog) stellt die Untersuchungsmethoden für bergmännische Tunnel strukturiert zusammen (siehe Anhang A2).

Der Ansatz für die Systematisierung der Untersuchungsmethoden verfolgt das Ziel, die einzelnen Methoden in übergeordneten Einheiten zu gliedern, was der Übersichtlichkeit, Lesbarkeit und somit der Praxistauglichkeit dient. Zudem soll sich die Struktur des U.-Katalogs auf die gemäß EP1 definierten visuellen Befunde, Schadensprozesse und auf die Bauteilart beziehen.

Gliederung Typ Untersuchungsmethoden

Sämtliche im U.-Katalog aufgeführten Untersuchungsmethoden (USM) werden in folgende Typen (U.-Typ) unterteilt:

- U.-Typ 1: Visuelle Untersuchungen;
- U.-Typ 2: Messtechnische Untersuchungen am Bauwerk;
- U.-Typ 3: Laborprüfungen;
- U.-Typ 4: Statische, geodätische und konstruktive Untersuchungen und allenfalls Belastungsversuche.

Diese Unterteilung der Untersuchungsmethoden 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.

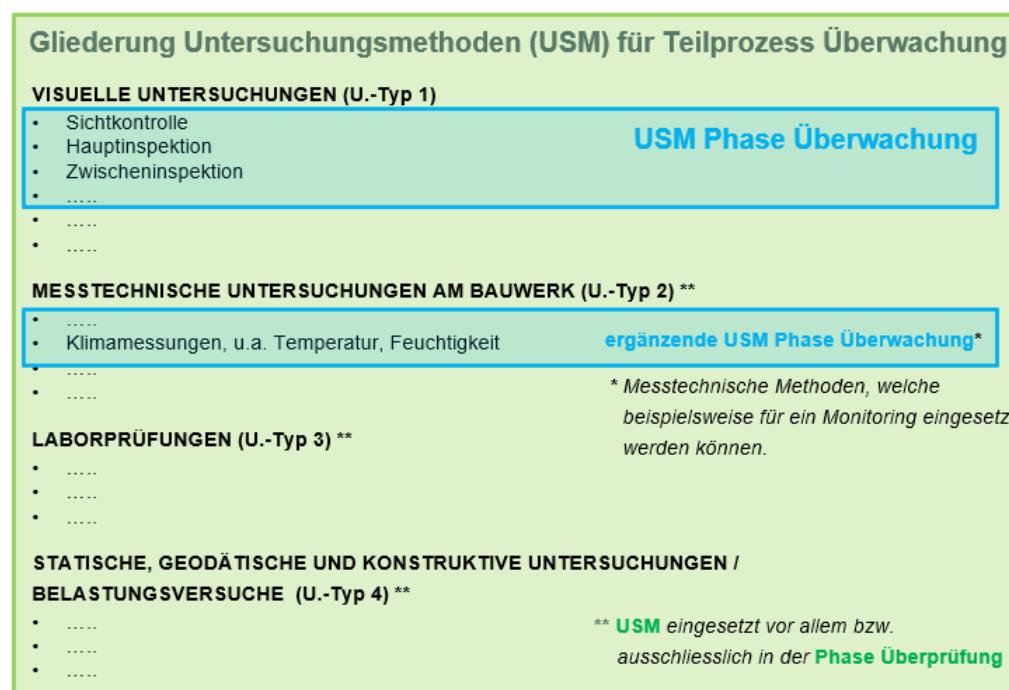


Abb. 16 Struktur des Katalogs «U.-Untersuchungsmethoden» des Teilprozesses Überwachung, mit Gliederung nach Typ Untersuchungsmethode (USM)

U.-Typ 1: Visuelle Untersuchungen

Zu den visuellen Untersuchungen gehören die *visuellen Inspektionen (U-1-100)*, mit unterschiedlichem Fokus von der Sichtkontrolle, welcher i.d.R. durch den Unterhalt / Betrieb durchgeführt wird, bis hin zur visuellen Inspektion durch Fach-Spezialist/in. Ebenfalls zum U.-Typ 1 gehören die technischen visuellen Untersuchungen (U-1-200) 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 folgende Arten von Untersuchungen:

- Vermessung (U-2-100):
 - Riss-, Dehnungs-, Verformungsmessungen mit diversen Gerätschaften, Sensoren und Hilfsmitteln;
 - Aufnahme mittels Scanner.
- Mechanische Überprüfungen (U-2-200):
 - Abklopfen;
 - Kontrolle von Befestigungen;
 - Zugprüfungen / Kraftmessungen;
 - Belagsüberprüfungen wie Ebenheits- und Griffigkeitsmessung;
 - Druckprüfungen von Leitungen.
- Messung Wassermengen, Hydraulik (U-2-300):
 - Wasserstand und -druck;
 - Durchflussmengen.
- Materialtechnologische Untersuchungen (U-2-400):
 - Untersuchungen am Stahlbeton (u.a. Karbonatisierungstiefe, Betonüberdeckungsmessung, elektrischer Widerstand);
 - Beurteilung des Belags und der Abdichtung innerhalb Belagsfenster (u.a. optisch, Fehlstellenprüfung mit Hochspannung);

- Prüfungen des Oberflächenschutzes (u.a. Gitterschnittpfprüfung, Haftzugfestigkeit, Penetrationsverfahren);
- Untersuchungen der Bewehrung (u.a. Potenzialfeldmessung, Sondieröffnung, Korrosionsmonitoring);
- Untersuchungen der Vorspannung (u.a. Streufeldmessungen);
- Ermittlung von Schichtdicken, Bauteilstärken (u.a. Georadar, Ultraschallprüfung, Impact-Echo-Verfahren);
- Konzentrationsbestimmung von Stoffen/Elementen (z.B. mit Röntgenfluoreszenzspektrometrie);
- Baustofffeuchtigkeit (u.a. mit CM-Gerät, Infrarot-Thermographie).
- Klimatische Untersuchungen (U-2-500):
 - Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit;
 - Messung Zusammensetzung der Luft.

U-Typ 3: Laborprüfungen

Die Laborprüfungen beinhalten folgende Arten von Untersuchungen, wobei die Proben/Probekörper vor Ort entnommen werden müssen:

- Prüfung chemische Kennwerte (U-3-100):
 - Chlorid-, Sulfat- oder Nitratgehalt von Beton;
 - Karbonatisierungstiefe am Bohrkern;
 - pH-Wert von Beton und Mörtel, Betonfeuchte;
 - Prüfung Weichmachergehalt und stoffliche Zusammensetzung von polymeren Werkstoffen.
- Prüfung mechanischer Kennwerte (U-3-200):
 - Druck-, Stempeldruck-, Zug-, Haftzug-, Biegezugfestigkeit, E-Modul von Beton und Mörtel;
 - Gestein/Fels: Quelldruckmessung, Triaxialversuch;
 - Mechanische Prüfungen von metallischen Werkstoffen (u.a. Zugversuche, Kerbschlagversuch);
 - Mechanische Prüfungen von polymeren Werkstoffen (u.a. Zugeigenschaften).
- Prüfung physikalischer Kennwerte (U-3-300):
 - Von Beton (u.a. Rohdichte, Zementgehalt, Frost-Tausalzwiderstand, Chloridwiderstand, Alkali-Aggregat-Reaktionswiderstand (AAR), Porenkennwert);
 - Von Belag (u.a. Ausmessung und Schichtbestimmung, Mischgutanalyse);
 - Siebkurve Kieskoffer.
- Mikroskopische Untersuchungen (U-3-400):
 - Gefügeuntersuchungen von Beton und Belägen (u.a. zur Überprüfung Gefügestruktur und -schädigung, Porosität);
 - Korrosionsuntersuchungen;
 - Schichtdickenmessung.
- Chem. Untersuchungen Einwirkungen (U-3-500):
 - Chemische Zusammensetzung Luft;
 - Chemische Zusammensetzung Wasser;
 - Zusammensetzung Staub (Wischproben);
 - Zusammensetzung Schadstoffe (u.a. Russ, PAK, Asbest).
- Weitere Laboruntersuchungen (U-3-600):
 - Wasseraufnahme;
 - Wasserdichtheit von Kunststoffdichtungsbahnen;
 - Rissmessung am Bohrkern;
 - Wischprobe bei metallischen Werkstoffen;
 - Biologische Untersuchungen;

- Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS).

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

Diese spezialisierten Methoden beinhalten folgende Arten von Untersuchungen:

- Statische Untersuchungen (U-4-100):
 - Nachrechnung Bauwerk / Bauwerksteil;
 - Überprüfung / Aktualisierung Statik.
- Konstruktive Untersuchungen (U-4-200):
 - Sondierungen am Bauwerk;
 - Funktionsprüfung von Entwässerungseinrichtungen;
 - Absenk-, Anstiegs- und Versickerungsversuche.
- Belastungsversuche (U-4-300):
 - Schwingungsanalyse;
 - Dynamischer Lastwechsel;
 - Erschütterungsmessung;
 - Schlitzpressenmessung.
- Geodätische Untersuchungen (U-4-400).

Zudem werden bestimmte Methoden im Katalog ergänzend, durch spezifische Attribute (vgl. auch Kapitel 2.2.4) gekennzeichnet, u.a. als:

- USM der Phase Überwachung, u.a. geeignet für Inspektionen;
- Zerstörungsfreie Untersuchungen (Unterscheidung von destruktiven und nicht destruktiven Methoden);
- USM geeignet für Monitoring, d.h. Langzeit-Messungen u.a. fürs Verfolgen von spezifischen Zustandsentwicklungen bzw. Schadensfortschritten (vermehrt auch online), sowie als;
- Bewährte, häufig bei Tunnelbauwerken angewendete Methoden (vgl. Kapitel 2.2.8).

Die zusammengetragenen **144 Untersuchungsmethoden (USM)** gliedern sich gemäss erläuterter Struktur wie folgt:

- U.-Typ 1: 12 USM;
- U.-Typ 2: 69 USM;
- U.-Typ 3: 53 USM;
- U.-Typ 4: 10 USM,

davon sind:

- USM Phase Überwachung / Inspektionen: 9;
- Zerstörungsfrei: 79 (+ 6 bedingt⁴);
- USM geeignet für Monitoring: 31 (+ 11 USM bedingt geeignet⁵);
- Bewährte USM: 41.

⁴ Einzelne messtechnische Untersuchungen am Bauwerk sind bedingt zerstörungsfrei, sofern z.B. Sensoren schon bei der Erstellung des Bauwerks eingebaut wurden oder wenn ein Probekörper/ Bauwerksteil aus- und vollständig wieder eingebaut werden kann bei Laborprüfungen.

⁵ Messeinrichtungen bzw. -methoden, welche ebenfalls für permanente Aufnahmen installiert werden können, z.B. auch Videokameras, Messsonden, jedoch für den Einsatz als Monitoring (noch) nicht in der Praxis etabliert sind.

Abb. 17 Bildauszug aus U.-Katalog mit Markierung der Katalogstruktur bzw. Informationsbereiche gemäss Kapitel 2.2.4

Die Informationen zu den einzelnen Untersuchungsmethoden werden im folgenden Kapitel 2.2.4 erläutert. Zu finden sind diese im Katalog und für die bewährten Methoden in den Katalogblättern (siehe Anhang A3).

2.2.4 Informationen zu Untersuchungsmethoden und Art der Daten

Im Katalog finden sich als gruppierte Spalten folgende Informations-Bereiche mit «Attributen» zur Beschreibung von Eigenschaften der einzelnen Untersuchungsmethoden, welche als Zeilen aufgeführt sind (gegliedert gemäss Kapitel 2.2.3):

Übersicht der Informationsbereiche des U.-Katalogs:

- 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.

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

In der nachfolgenden Tabelle sind die diesen Informationsbereichen zugeordneten Attribute der Untersuchungsmethoden (Informationen), zu finden in den Spalten A bis AB des U.-Katalogs aufgeführt:

Tab. 3 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 2.2.3)	Nummerierung U-#-####	A
Typ USM	Gemäss Gliederungsstruktur EP2 (siehe Kapitel 2.2.3)	Werteliste (obligatorisch)	B
U. Typ	Typ-Nr. zur thematischen Strukturierung	Nummerierung	C

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

Tab. 3 Übersicht Informations-Bereiche U.-Katalog (EP2)

Information (Attribut)	Beschrieb Attribut	Art der Daten ⁶	Spalte Katalog
(obligatorisch)			
Herkunft (Katalog)	Verweis / Herkunft identifizierte Methode: Freitext u.a. KUBA Katalog: USM = Untersuchungsmethoden; MEGR = Messgrößen;		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	H
Zerstörungsfrei	Information, ob USM ohne Schädigung des Bauwerks durchgeführt werden kann oder nicht. Sobald eine, wenn auch nurlokale, Schädigung erfolgt, wie z.B. lokale Freilegung der Bewehrung oder Entfernung der Beschichtung, wird die USM als zerstörend eingestuft.	Werteliste: <ul style="list-style-type: none"> - 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 2.2.8)	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
S. Schadensprozesse	Zuweisung zu Schadens-mechanismen, zu welchen die USM zusätzliche Erkenntnisse bringt	Werteliste «ID Schäden» (EP1) (Mehrfachzuweisung)	N
Kontext USM			
Überwachung / Monitoring (Onlinemessung)	Information, ob die USM dauerhaft installiert werden und automatisiert Resultate liefern kann im Sinne eines Monitorings.	Werteliste: <ul style="list-style-type: none"> - Ja - Bedingt (+Freitext) - Nein 	O
Ergänzende USM	Auswahl von USM, welche möglicherweise sinnvoll ergänzend eingesetzt werden	Werteliste «ID USM» (Mehrfachzuweisung)	P
Verwandte USM	Ergänzende Spezialmethoden, mit geringerer Relevanz; Hinweis auf Methode, die selbst jedoch nicht im Katalog aufgeführt ist.	Freitext (Mehrfachzuweisung)	Q

Tab. 3 Übersicht Informations-Bereiche U.-Katalog (EP2)

Information (Attribut)	Beschrieb Attribut	Art der Daten ⁶	Spalte Katalog
Ergebnisse (Resultate)			
Messgrösse	Beschreibung der bestimmten Messgrösse, welche die Methode bestimmt, z.B. Rissbreite	Freitext (wo passend, wurdet Werte aus Kuba-Katalog MEGR übernommen) (obligatorisch)	
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 (siehe Kapitel 2.2.7)	Preisklasse mit Größenordnung der Kosten in CHF / MQ	X
Erläuterungen zu Kostenschätzung	Getroffene Abgrenzung und Annahmen für Kostenschätzung	Freitext	Y
Anbieter			
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

Im diesem komplett neu erstellten und strukturierten U.-Katalogs wird, wo möglich, der Bezug zu den beiden KUBA-Katalogen USM und MEGR aufgezeigt (siehe Spalten «Herkunft» und «H Code»).

2.2.5 Vollständigkeitsnachweis Katalog Untersuchungsmethoden

Das Ziel des Forschungsauftrags EP2 ist unter anderem, eine vollständige Übersicht des Stands der Praxis der Untersuchungsmethoden für Überwachung (u.a. Inspektionsmethoden) und Überprüfung zusammenzustellen. Einerseits sollen damit alle Typen von Untersuchungsmethoden dargestellt werden und andererseits sämtliche möglichen Schadensprozesse bei Tunneln abgedeckt werden können (siehe Kapitel 1.4.2), wie sie im Grundlagenkatalog EP1 festgehalten sind.

Die Vollständigkeit des U.-Katalogs wird unter den nachfolgend aufgeführten Aspekten aufgezeigt.

Datenbasis / Fallbeispiele

Der U.-Katalog wurde auf den entsprechenden Fachdaten-Katalogen aus der Anwendung KUBA 5.0 für Kunstbauten aufgebaut. Als massgebender Teil bei der Vervollständigung wurden die neun Fallbeispiele gemäss Kapitel 1.2.3 bzgl. der bei diesen Tunneln durchgeführten Untersuchungen ausgewertet und diese in den U.-Katalog aufgenommen. Bei diesem Schritt kamen bereits 65 Untersuchungsmethoden zusammen, wobei es sich dabei mehrheitlich um die bewährten Methoden handelt (siehe Kapitel 2.2.8).

Gemäss Vorgehen Methodik EP2 wurden unter Einbezug verschiedener Quellen weitere USM ergänzt und in den Katalog aufgenommen. Dabei wurde auch laufend geprüft, ob alle relevanten Methoden bzw. Verfahren aus Zusammenstellungen vergleichbarer Publikationen / Forschungsprojekte, wie z.B. in Abb. 18 («AMBITION»; [21]), im Katalog abgebildet sind.

	Bohr-kern	Impuls-Echo	Impact-Echo	Luft-GPR	Boden-GPR	IR	3D-Laser	Elektro-Statisch	Elektro-Magnetisch
Zerstörungsfrei	N	J	J	J	J	J	J	J	J
Berührungslos	N	N	N	J	N	J	J	N	N
Oberfläche	J	N	N	N	N	J	J	J	J
Wenige cm	J	J	J	J	J	J	J	J	J
Tiefe	J	J	J	J	J	N	N	N	N
Risse	J	N	N	N	N	J	J	J	J
Abplatzung	J	J	J	N	N	J	J	N	N
Hohlraum	J	J	J	J	J	J	N	N	J
Oberflächenänderung	N	N	N	N	N	J	J	N	N
Nassstellen	N	N	N	N	N	N	N	J	N

Abb. 18 Tabelle der gängigsten Messmethoden in Bezug auf detektierbare Schadensbilder / Eigenschaften gemäss Projekt AMBITION [21]⁷

Der U.-Katalog wurde danach noch mit Prüfungen und Untersuchungen aus aktuellen Prüfkatalogen von akkreditierten Baulabore, Vermessungsbüros und Geotechnische Laboren abgeglichen, mit Ergänzung einzelner Angaben im Katalog durch konkrete Rückfragen bei Anbietern (vgl. dazu auch Kapitel 1.2.2 Literaturrecherche).

So umfasst der aktuell vorliegende U.-Katalog, mit nach diversen Ergänzungen und Abgleichen, über 140 Massnahmen, welche im Teilprozess Überwachung im Tunnel zum Einsatz kommen können.

⁷ Die Abbildung / Tabelle bildet den Wissensstand des Projekts AMBITION aus dem Jahr 2015 ab. Gemäss aktuellem Stand der Technik kann die (Nicht-)Eignung einzelner Methoden (nein/ja) heute anders eingeschätzt werden.

Vollständigkeit bezogen auf die Gliederung

Die Vollständigkeit des U.-Katalogs kann auch damit aufgezeigt werden, dass für alle vier Typen von Untersuchungsmethoden gemäss Kapitel 2.2.3 mehrere unterschiedliche Methoden im Katalog zu finden sind.

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 Untersuchungsmethoden in den Katalog aufzunehmen.

Vollständigkeit bezüglich Schadensprozesse und Befunde

Der U.-Katalog gibt einen umfassenden Überblick über die in bergmännischen Tunneln anwendbaren Untersuchungsmethoden (siehe Überblick U.-Katalog, Anhang A2). Zu jedem Schadensprozess aus dem EP1 kann, gemäss nachfolgender Aufstellung (siehe Tab. 4), mindestens eine Untersuchungsmethode zusätzliche Erkenntnisse bringen. Die Tabelleninträge der zu einem Schadensprozess aufgeführten USM ist nicht abschliessend:

Tab. 4 Untersuchungsmethoden zu jedem Schadensprozess

ID S.	Bezeichnung Schadensprozess	ID U. (mögliche Untersuchungsmethoden) ⁸
S-1	Schadensprozess Stahlbeton	
S-11	Bewehrungskorrosion	
S-11.1	Karbonatisierung	U-2-411 , U-3-121, U-3-343,
S-11.2	Lochfrasskorrosion / Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion	U-2-211 , U-2-421 , U-2-441 , U-2-455 , U-2-521 , U-3-111, U-3-411, U-3-412
S-11.3	Spannungsrißkorrosion, interkristallin, transkristalline Korrosion	U-2-421 , U-3-411, U-3-412
S-12	Betonangriff / Gefügezerstörung	
S-12.1	Alkali Aggregat Reaktion (AAR)	U-3-361; U-3-413, U-3-421
S-12.2	Sulfatangriff intern	U-3-112, U-3-211 , U-3-344
S-12.3	Sulfatangriff extern	U-3-520
S-12.4	Chemisch lösender Angriff / Betonkorrosion	U-2-211 , U-2-137, U-2-138, U-2-411 , U-3-113, U-3-211, U-3-351, U-3-352, U-3-520
S-12.5	Frost- / Tausalzschäden	U-2-137, U-2-138, U-3-211 , U-3-341, U-3-342, U-3-351, U-3-520
S-19	Ermüdung Stahlbeton	
S-19.1	Ermüdung Stahlbeton	U-2-230, U-2-421 , U-2-481, U-3-241, U-3-242, U-3-261, U-4-110
S-2	Schadensprozess Metall	
S-21	Metallkorrosion	
S-21.1	Flächenkorrosion (Rost)	U-3-411, U-3-531, U-3-641
S-21.2	Kontaktkorrosion / Spaltkorrosion	U-2-481, U-3-411, U-3-412
S-21.3	Spannungsrißkorrosion, interkristallin / transkristalline Korrosion	U-3-411, U-3-412
S-29	Ermüdung Metall	
S-29.1	Ermüdung Metall	U-2-221 , U-2-222, U-2-231, U-3-411, U-3-412

⁸ **Fett:** bewährte Methoden gemäss Kapitel 2.2.8

Tab. 4 Untersuchungsmethoden zu jedem Schadensprozess

ID S.	Bezeichnung Schadensprozess	ID U. (mögliche Untersuchungsmethoden) ⁸
S-3	Schadensprozess Baugrund	
S-31	Belastungsänderung Baugrund	
S-31.1	Auflockerung	U-2-121, U-2-131, U-2-132, U-2-134, U-2-141, U-2-137, U-2-163
S-31.2	Druckhaftes Gebirge	U-2-121, U-2-131, U-2-132, U-2-134, U-2-141, U-2-137, U-2-163
S-31.3	(diff.) Setzungen / Konsolidation	U-2-121, U-2-131, U-2-132, U-2-134, U-2-141, U-2-137, U-2-163
S-31.4	Tonquellen / Quellprozesse in Tonmine- ralien	U-2-121, U-3-213, U-4-341
S-31.5	Sulfatquellen / Quellprozesse in An- hydrit	U-2-121, U-3-213, U-4-341
S-4	Schadensprozess Berg- / Grundwasser	
S-41	Belastungsänderung Berg- / Grundwas- ser	
S-41.1	Wasserdruckaufbau	U-1-214, U-1-241
S-41.2	Fortschreitender Verlust Abflusskapazi- tät	U-2-122, U-1-214, U-1-221, U-1-241, U-4-221
S-5	Schadensprozess Kunststoff	
S-51	Beschädigung / Alterung Kunststoff	
S-51.1	Beschädigung / Alterung Kunststoff	U-2-422, U-2-444, U-2-461, U-2-471, U-3-271, U-3-431, U-3-621, U-4-210
S-6	Schadensprozess Strassenoberbau	
S-61	Beschädigung Strassenoberbau	
S-61.1	Belagsverformungen	U-2-110, U-1-121, U-1-123, U-2-263, U-2-265, U-2-422, U-3-223, U-3-331
S-61.2	Belagsschäden	U-2-110, U-1-121, U-1-123, U-1-131, U-2-265, U-2-422, U-3-331
S-61.3	Strukturelle Schäden	U-1-121, U-1-123, U-2-263, U-2-265, U-2-422, U-3-331

Zum Beispiel haben die Untersuchungsmethoden «U-2-441: Potenzialfeldmessung», «U-3-111: Chloridanalyse» sowie «U-2-421: Sondierungs-/Bewehrungsfenster: Bestimmung Korrosionsgrad» alle zum Ziel, den Schadensprozess «S-11: Bewehrungskorrosion» zu untersuchen. Die drei verschiedenen Methoden haben andere Messgrößen und können und sollen auch ergänzend zueinander eingesetzt werden, wie dies z.B. im Fallbeispiel an der Fahrbahnplatte im Gubristtunnel (siehe Anhang A1, Fallbeispiel Nr. 5) erfolgreich ausgeführt wurde.

Wie oben aufgezeigt, wird im Katalog 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. Gibt es bei einer USM keine visuellen Befunde, bleibt diese Spalte L entsprechend leer.

Neben den visuell erfassten Befunden, können - wie auch am Beispiel der Bewehrungskorrosion gezeigt - mit ergänzenden bzw. anderen Untersuchungsmethoden allfällige Schadensprozesse ermittelt werden, bevor diese als visueller Befund sichtbar werden. Werden USM mit nicht visuellen Befunden / Ergebnissen wiederholt eingesetzt, z.B. als Monitoring, können so auch sonst nicht visuell erkennbare Schadensprozesse bezüglich ihrer Zustandsentwicklung verfolgt werden.

Ausserdem wurde im U.-Katalog des EP2 auch ein klarer Bezug zu den Bauwerksteilen geschaffen. So ist ebenfalls sichergestellt, dass alle relevanten Bauwerksteile- und -arten mit den im Katalog aufgeführten USM untersucht werden können.

2.2.6 Aussagekraft und Grenzen bei Untersuchungsmethoden

Wie in den vorangehenden Kapiteln 2.2.1. ff erläutert, müssen die im Katalog erfassten Untersuchungsmethoden verschiedenste, für die Zustandsbeurteilung von bergmännischen Tunneln relevante Aspekte abdecken.

Entsprechend unterschiedlich sind diese Methoden und ihre Ergebnisse, abhängig u.a. von Messart (visuell, messtechnisch etc.), Messort (Bauwerk, Labor), Zuordnung Bauwerksart (z.B. Art und Homogenität Materialien), Einfluss Messtechnik und Umfeld (Geräte, Zugänglichkeit, Mensch, Auswertung).

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, z.B. in Bezug auf den Messbereich. Ebenso relevant sind die Grenzen bezüglich der Auswertung und Interpretation. Bei qualitativen Messmethoden ist es der Faktor Mensch, welcher massgeblich zum Resultat beiträgt.

Beispielsweise hängt die Genauigkeit bei visuellen Methoden stark von der eindeutigen, konsequenten Zuordnung der Befunde (Schadensbilder) zu den Zustandskategorien ab. Bei messtechnischen USM (physikalische / chemische Messwerte) hängen die Genauigkeit und Grenzen von der eingesetzten Technologie, dem exakten Prüfverfahren, der Umgebungsbedingungen und von weiteren Einflussfaktoren ab, die sich im Katalog nicht ausreichend eindeutig abbilden lassen. Müssen solche Ergebnisse - z.B. für die Abbildung des Zustandes in Modellberechnungen - in eine Zustandsklassen «übersetzt» werden, wird durch die grobe Klassenbildung die Ungenauigkeit grösser. In beiden Fällen (visuelle / messtechnische Auswertungen) wird, vor allem bei fehlenden standardisierter Vorgaben für die Auswertung, der Einfluss des Faktors «Mensch» auf die Ungenauigkeit / Unsicherheit der Messresultate 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 Untersuchungsmethoden nicht isoliert betrachtet werden können, sondern auch das übergeordnete Untersuchungsprogramm und -konzept einen massgebenden Einfluss auf das Resultat der Zustandsbeurteilung ausübt.

Wie im nachfolgenden Kapitel 2.2.8 zu den bewährten Methoden erläutert, liefern die erprobten Untersuchungsmethoden ein gut definiertes Mass an Aussagekraft und Zuverlässigkeit. Bei der Anwendungsbeispiel der Vergleichsmethodik (siehe Kapitel 2.3) werden die Aspekte Zuverlässigkeit und Genauigkeit objektspezifisch bei der Risikobeurteilung mitberücksichtigt.

Dem Monitoring kommt bei Zustandsuntersuchungen bezüglich Aussagekraft besondere Bedeutung zu. Ein gezielt eingerichtetes Monitoring erlaubt die Entwicklung eines Gefährdungsszenarios besser zu erfassen, indem z.B. ein spezifischer Schadensmechanismus oder dessen massgebliche Einflussfaktoren über einen längeren Zeitraum «vor Ort» im Tunnel verfolgt werden können. 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 (Kapitel 2.3) kann mit einem optimal eingerichteten Monitoring die Unsicherheit bezüglich Risiko 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.

2.2.7 Aufwand- und Kostenangaben für Untersuchungsmethoden

Der Aufwand und die Kosten von Untersuchungen sind nicht einzig von der Methode abhängig, sondern leiten sich vielmehr aus dem Umfang der Untersuchung und der örtlichen Lage am Bauwerksteil, sowie der dortigen lokalen Gegebenheiten ab.

Die Kosten von Untersuchungen setzen sich u.a. zusammen aus:

- Aufwand Inspektor/-in (Untersuchungskonzept, Untersuchungen am Bauwerk, Auswertung und allenfalls Berechnungen inkl. Einbezug Resultate Laborbericht);
- Aufwand Prüflabor (u.a. Probenahmen und Auswertung);
- Leistungen Tunnelbetrieb (Sperrungen, Hilfsmittel wie Hebebühne, Licht etc.; u.a. durch Gebietseinheit erbracht).

Der Aufwand z.B. für ein Prüflabor und die Leistungen des Tunnelbetriebs ist direkt vom Ausmass der Untersuchungen und der Örtlichkeit abhängig. Bezuglich des Ausmasses kann das Spektrum von einzelnen Stichproben bis hin zu systematischen Messquerschnitten verteilt über die ganzen Tunnellänge reichen, von einmaligen Messungen bis zum langfristigen Monitoring. Bei den betrieblichen Aufwänden und Kosten spielt es eine Rolle, ob die Bauwerksteile während des Tunnelbetriebs zugänglich sind, bestehende Tunnelsperrungen genutzt werden oder extra Tunnelsperrungen nötig werden. Für Arbeiten im Fahrraum sowie in Anlagen der Tunnellüftung, müssen bei Nationalstrassentunnel i.d.R. Nachtzuschläge einkalkuliert werden. Einzurechnende zusätzliche Hilfsmittel und Installationen, Nutzung von Hebebühnen, Betriebspersonal extra für Tunnellüftung oder Schachtlfite, Bauunternehmer für das zeitgerechte «Öffnen» und «Verschliessen» von zerstörenden Probenahmen und -flächen, tragen ebenfalls spezifisch zu höheren Kosten für Untersuchungen bei.

Zur Illustration dieses Sachverhalts folgt hier ein praktisches Beispiel für den Einfluss verschiedener zu untersuchender Bauwerksteile.

Die Betriebsrandbedingungen und somit die Kosten für Beton-Druckfestigkeitsprüfungen an Bohrkernen werden für folgende Bauwerksteile sehr stark variieren:

- Serien-Prüfungen über mehrere Abschnitte an Innengewölbe im Abluftkanal: Abhängigkeit von der Tunnellüftung, d.h. i.d.R. nur während Tunnelsperrungen in der Nacht möglich, Zugänglichkeit meist nur mit Hebebühne gegeben;
- Lokale Untersuchung Wände Werkleitungskanal: Grundsätzlich während normalem Tunnelbetrieb möglich, Zugänglichkeit meist über Tunnelzentralen ohne Hilfsmittel gegeben;
- Zwischendecke: mind. Spusperrung nötig, Entnahme Bohrkerne überkopf von Hebebühne im Fahrraum aus.

Es gibt für diese beispielhaften USM kein Betriebsrandbedingungs- und Kosten-Attribut, welche alle Fälle korrekt abdecken würde, erst recht nicht für die unterschiedlichsten Tunnelbauwerke und Messorte.

Im U.-Katalog wurden in der Spalte V (siehe Kapitel 2.2.4) USM-spezifischen Informationen zu Betriebsrandbedingungen im Tunnel aufgenommen, um auf die oben beschriebenen Aspekte einzugehen. Wie unter Kapitel 2.2.2 jedoch beschrieben, finden diese Informationen keinen Eingang ins Kostenmodell des EP5.

Aus den Erfahrungen der Fallbeispiele, sowie diversen weiteren Instandsetzungsprojekten und Leistungsverzeichnissen von akkreditierten Prüflabors lassen sich dennoch grobe Größenordnungen der Kosten für die einzelnen Untersuchungsmethoden abschätzen. Als vergleichbare Einheit wurden dabei die Kosten pro Messquerschnitt (MQ) abgeschätzt. Der Messquerschnitt wird dabei definiert als Gesamtquerschnitt des Tunnels mit den drei Ebenen Abluftkanal, Fahrraum und Werkleitungskanal, in einem Abschnitt von 5 Metern (ca. Blocklänge). Diese Annahme ist v.a. für Untersuchungsmethoden von Bedeutung, welche zur Erfassung des Gesamtzustands dienen, wie z.B. der Hauptinspektion oder Aufnahmen mittels Laserscanning. Bei Methoden mit lokalen Untersuchungen wird unterschieden zwischen Aufnahmen von Schadstellen oder Erfassung eines repräsentativen Querschnitts. Bei ersterem wird grundsätzlich eine Messung pro Messquerschnitt angenommen, wie z.B. bei der Karbonatisierungsmessung am Bauwerk. Für die Untersuchung eines repräsentativen Querschnitts soll dieser, möglichst ganzheitlich aufgenommen werden. Dies z.B. bei der Chloridanalyse mittels mehrerer Proben am Innengewölbe über die Höhe verteilt und zusätzlichen Proben von der Zwischendecke mit Auswertung von mehreren Tiefenstufen.

Die Kosten werden im Katalog in abgestufte Preisklassen in CHF pro Messquerschnitt (MQ) angegeben:

- PK1: 10 - 99 CHF pro MQ;
- PK2: 100 - 499 CHF pro MQ;
- PK3: 500 - 999 CHF pro MQ;
- PK4: 1'000 - 5'000 CHF pro MQ;
- PK5: > 5'000 CHF pro MQ.

Als Randbedingungen für die Grobkostenschätzung wird folgendes gewählt:

- Preisbasis 2022, exkl. MWSt.;
- inkl. Zuschläge für USM-Installation und Aufbereitung Resultate (z.B. Laborbericht);
- inkl. Aufwand für Probenahmen vor Ort unter Annahme, dass jeweils mehrere Proben entnommen werde;
- exkl. Nachzuschlag;
- exkl. objektspezifischer übergeordneter Kosten für Sperrungen, Abschaltung der Lüftung etc.

Mit der Zuweisung von Preisklassen soll erreicht werden, dass die Methoden bzgl. des finanziellen Aufwands, heruntergebrochen auf einen Messquerschnitt, grob verglichen werden können. Ein effektiver Vergleich kann aber dennoch erst erfolgen, wenn die objektspezifischen Randbedingungen berücksichtigt werden. So ist bereits die Tunnellänge für den Aufwand von visuellen Aufnahmen ein zentraler Faktor. Entsprechend wird im Katalog auf die Betriebsrandbedingungen hingewiesen. Zudem werden die Annahmen bzgl. Festlegung der Preisklassen unter den Erläuterungen zu Kostenschätzung im Katalog in Spalte X (siehe Kapitel 2.2.4) festgehalten.

Zur Abschätzung der Preisklassen der einzelnen Untersuchungsmethoden wurden auch Informationen aus Dienstleistungs- und Preiskatalogen sowie über telefonische Anfragen bekannter Schweizer Baulabore und Prüfinstitute (u.a. [76,77,79,80]) herangezogen.

Für die Erreichung von Kosteneffizienz ist ein abgestuftes Vorgehen bei der Untersuchung sinnvoll und wichtig. Mit kostengünstigen Methoden, wie u.a. den visuellen Inspektionen, wird der Gesamtzustand flächendeckend aufgenommen. Durch die Zustandsbeurteilung wird eine erste Triage gemacht, wo vertiefte Untersuchungen nötig sind. Dies bedingt eine örtlich differenzierte Zustandsbeurteilung pro Bauwerksteil.

Wie mit dem EP5 diskutiert, steuern die eigentlichen Untersuchungskosten im ganzen langjährigen Erhaltungsprozess mit Einbezug des Aufwands von baulichen Massnahmenumsetzungen, einen verhältnismässig kleinen Beitrag an die Erhaltungskosten bei (ohne Berücksichtigung allfälliger Staukosten aufgrund Sperrungen). Unterschiede spezifischer Kosten typischer Untersuchungsmethoden haben bei den Kosten im Gesamtprozess EHP eine geringe Relevanz. Entsprechend ist das Vorsehen eines fixen, prozentualen Kostenanteils für die Umsetzung von Überwachungs- und Überprüfungsmassnahmen in frühen Erhaltungsphasen - wie ursprünglich auch vom EP5 vorgeschlagen - bei der Erhaltungsplanung als frühe Projektphase zweckmässig.

Losgelöst vom Gesamtprozess der Erhaltungsplanung liefert der U.-Katalog mit den Attribut «Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand», «Preisklasse» und «Erläuterungen zu Kostenschätzung» (Spalten V, W und X) wertvolle Informationen zu den Untersuchungsmethoden.

2.2.8 Bewährte Untersuchungsmethoden

Für die bessere und praxisnähere Anwendbarkeit des Kataloges, der über 140 Untersuchungsmethoden enthält, werden einzelne typische, oft genutzte USM als bewährte Untersuchungsmethoden ausgewiesen (vgl. U.-Katalog: Spalte «Bewährte USM»). Dabei handelt es sich um Methoden, mit welchen Rückschlüsse auf die relevantesten Schadensprozesse in bergmännischen Tunnel gemacht werden können, die sich entsprechend etabliert haben und aus der Praxiserfahrung als «wirtschaftlich» eingestuft werden können. Die detaillierte Auswertung der Fallbeispiele (gemäß Kapitel 1.2.3) bezüglich durchgeföhrter Untersuchungen bestätigt dies. Diese etablierten Methoden wurden jeweils bei mehreren dieser Tunnel im Rahmen des Erhaltungsprozesses angewendet.

Diese etablierten Untersuchungsmethoden sind zentraler Bestandteil des U.-Katalog und werden im Katalog speziell hervorgehoben (siehe Abb. 19). Für jede dieser Methode wurde ein spezifisches Katalogblatt generiert, welche dem Bericht als Anhang A3 angefügt sind. Der einheitlich strukturierte und dargestellte Inhalt der Katalogblätter entspricht den Informationen aus dem U.-Katalog. Zusätzlich enthaltene Informationen sind die Bilddokumentation und die Verweise auf methodenspezifische Literatur.

Die nachfolgende Tab. 5 gibt eine Übersicht zu den bewährten USM mit dem Verweis auf das zugehörige Katalogblatt.

Abb. 19 Bildauszug aus U-Katalog mit Hervorhebung einer bewährten Methode (im Grundlagenkatalog gelb eingefärbt)

Tab. 5 Bewährte Untersuchungsmethoden

ID U.	U. Bezeichnung	Katalogblatt (Anhang A3)
U-1-000 VISUELLE UNTERSUCHUNG		
U-1-110	Sichtkontrolle (Betrieb / Unterhalt)	01
U-1-121	Hauptinspektion visuell	01
U-1-122	Zwischeninspektion visuell	01
U-1-123	Visuelle Inspektion Fach-Spezialist/in	01
U-1-131	Sichtkontrolle detailliert, lokal	01
U-1-211	Visuelle Aufnahmen; Einzelbilder	02
U-1-214	Kanal-TV	03
U-1-221	Einsehen Kontrollöffnungen und Schächte	03
U-2-000 MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG AM BAUWERK		
U-2-111	Händische Messung	04
U-2-121	Nivellement	04
U-2-131	Gleitmikrometer / Gleitdeformeter	05
U-2-132	Dehnungsmessstreifen	05
U-2-134	Laserextensometer	05
U-2-141	Inklinometer	05
U-2-151	Laserscanning (ohne KI)	06
U-2-161	Invardrahtmessung	04
U-2-162	Rissmessungen, Kontrolle Gipssiegel	04
U-2-163	Erfassung Rissweitenänderungen mittels Wegsensoren (Wegaufnehmer)	05
U-2-211	Abklopfen	07
U-2-221	Prüfung mechanischer Sicherungen	08
U-2-265	Automatische Belags- und Strassenzustandsprüfung	09
U-2-411	Karbonatisierungsmessung am Bauwerk	10
U-2-421	Sondieröffnung/Bewehrungsfenster: Bestimmung Korrosionsgrad Bewehrung	11
U-2-433	Prüfung Haftzugfestigkeit	12
U-2-441	Potenzialfeldmessung (Bewehrung)	13
U-2-451	Georadar	14
U-2-455	Wirbelstromverfahren (Betonüberdeckungsmessung)	15
U-2-511	Messung Umgebungstemperatur	16
U-2-521	Messung Luftfeuchtigkeit	17
U-3-000 LABORPRÜFUNGEN		
U-3-111	Chloridanalyse	18
U-3-211	Druckfestigkeit	19
U-3-421	Mikroskopische Untersuchung am Dünnenschliff	20
U-3-520	Chem. Zusammensetzung Wasser	21
U-3-540	Zusammensetzung Schadstoffe	22
U-3-541	Russ, kanzerogene Stoffe	22
U-3-542	Asbest	22

U-3-543	PAK	22
U-3-641	Wischprobe bei metallischen Werkstoffen	23
U-4-000	STATISCHE, GEODÄTISCHE UND KONSTRUKTIVE UNTERSUCHUNGEN UND ALLENFALLS BELASTUNGSGESETZ	
U-4-110	Nachrechnungen Bauwerk / Bauwerksteil	24
U-4-210	Sondierungen am Bauwerk	25

Am Beispiel der Untersuchungsmethode U-2-451 Georadar (Katalogblatt 14) wird der Aufbau und Inhalt der Katalogblätter erläutert.

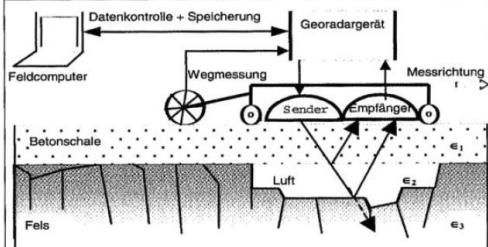
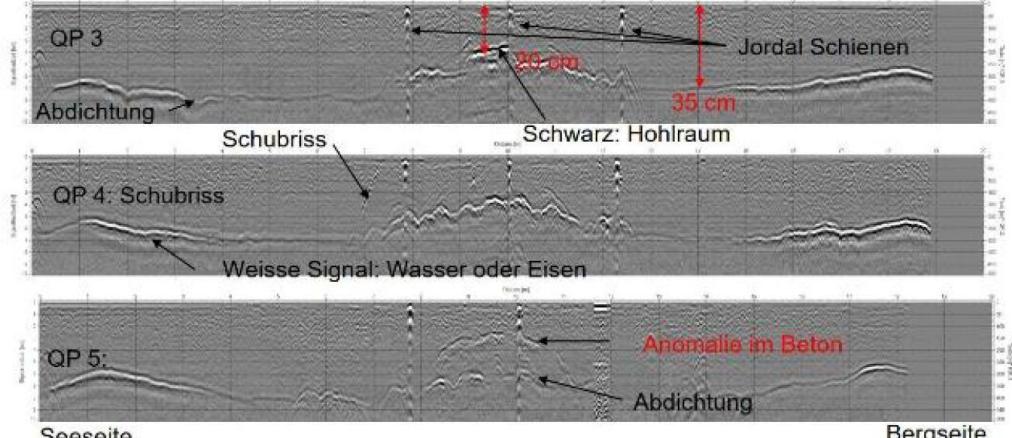
Georadar	ID-U-Code: U-2-451
 <p>Quelle: Messprinzip des Georadarverfahrens [1], Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau)</p>	 <p>Quelle: Innengewölbe Gubristunnel 2014 (EBP Schweiz AG)</p>
 <p>Quelle: Tunnel Ofenegg, Auswertung Georadar Innengewölbe 2022 (GEOTEST AG)</p>	<p>Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis): Ermittlung von Schichtaufbau des Untergrunds, Bestimmung Bauteilstärken wie z.B. Innengewölbe, Bestimmung Bewehrungsüberdeckung oder Betonüberdeckung der Vorspannung, Detektion von Hohlräumen/Hohlstellen hinter Gewölbe</p> <p>Zerstörungsfrei: Ja</p>

Abb. 20 Auszug aus dem Katalogblatt 14 – Abschnitt 1

Im ersten Abschnitt wird die Untersuchungsmethode beschrieben, illustriert mit Grafiken und Bildern. Wenn möglich wird mit einer schematischen Darstellung die Funktionsweise der Methode erklärt. Anhand eines Fotos beim Einsatz im Tunnel wird aufgezeigt, wie gross der Aufwand für die Aufnahme ist und welches Equipment benötigt wird. Mit einem Beispiel der Auswertung der Untersuchungsresultate wird gezeigt, welche Resultate erwartet werden können.

Es wird hier zudem aufgezeigt, ob es sich um eine zerstörungsfreie Untersuchungsmethode handelt.

Typ Untersuchungsmethode: Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Beton
USM geeignet für Phase Überwachung: nein	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): nein
Einsatz bei Befunden wie: -	Geeignet für Schadensprozesse wie: ID-S-Code: - S-11 Bewehrungskorrosion

Abb. 21 Auszug aus dem Katalogblatt 14 – Abschnitt 2

Im zweiten Abschnitt wird angegeben, zu welchem U.-Typ die Untersuchungsmethode gehört (siehe Gliederungsstruktur, Kapitel 2.2.3) und wann und wie sie zum Einsatz kommt. Einerseits wird angegeben, bei welchen Bauarten (gemäss Kapitel 2.1.3) die Methode angewendet werden kann und andererseits für welche Befunde und Schadensprozessen deren Einsatz geeignet ist. Zudem wird hier aufgezeigt, ob diese Methode in der Phase Überwachung gemäss Kapitel 1.6.2 zum Einsatz kommt und ob die Eignung für ein Monitoring besteht.

Messgröße (vgl. Katalog MEGR): Bauteil- und Schichtstärke	Erfasste Masseinheit (LE): cm / mm
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: quantitativ	Genauigkeit und Grenzen: sehr gute Resultate bis 30-40 cm

Abb. 22 Auszug aus dem Katalogblatt 14 – Abschnitt 3

Der dritte Abschnitt widmet sich den Ergebnissen der Untersuchungsmethoden, dazu gehören die Messgrössen, die erfasste Masseinheit und Hinweise zu Aussagekraft und Grenzen der Methode, gemäss Kapitel 2.2.6.

Ergänzende USM / Kombinationen von USM: ID-U-Code: -	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand: - Bauteilspezifische RBs (z.B. Innengewölbe Fahrraum: Spalten und Bedarf an Hebebühne) Kosten: Preisklasse PK2 (100 - 499 CHF/MQ) ¹⁹
-------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abb. 23 Auszug aus dem Katalogblatt 14 – Abschnitt 4

Im vierten Abschnitt wird einerseits auf ergänzende Untersuchungsmethoden verwiesen und andererseits werden Hinweise zu Betriebsrandbedingungen und Aufwand gegeben. Ebenfalls wird die Grössenordnung der Kosten für die Untersuchung (inkl. Auswertung) pro Messquerschnitt in Form von Preisklassen gemäss Kapitel 2.2.7 angegeben mit Erläuterungen bzgl. Annahmen zur Grobkostenschätzung in der Fusszeile.

Normen und Literatur: - Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1] - Georadar [10] - Zielorientierte Bauwerksuntersuchungen mit neueren zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) [5]	Fallbeispiele: - Nr. 3 Kerenzerbergtunnel - Nr. 4 Gotschnatunnel - Nr. 5 Gubristtunnel - Nr. 6 Tunnel Belchen - Nr. 9 Reussporttunnel
Anbieter Akkreditierte Prüflabore, Vermessungsbüro	Verwandte USM: ID-U-Code: - U-2-452 Ultraschallprüfung - U-2-453 Impact-Echo-Verfahren

Abb. 24 Auszug aus dem Katalogblatt 14 – Abschnitt 5

Der fünfte und letzte Abschnitt beinhaltet Verweise auf Normen, Literatur und Fallbeispiele, sowie mögliche Anbieter und alternative bzw. verwandte Untersuchungsmethoden.

2.3 Konzeptvorschlag Vergleichsmethodik

2.3.1 Vergleich von Methoden im Teilprozess Überwachung

Gemäss Kapitel 1.4.2 ist es eines der Ziele des vorliegenden Einzelprojekts «... jeweils eine gute, zweckmässige Überwachungs- und Inspektionsmethode evaluieren zu können. Dazu soll eine Vergleichsmethodik vorgeschlagen werden, welche es ermöglicht, die bestehenden Methoden zu evaluieren.»

Das Vergleichen verschiedener Methoden kommt beim Teilprozess Überwachung des Erhaltungsprozesses dann zur Anwendung, wenn unklar ist, welche Untersuchung z.B. für konkrete Befunde eingesetzt werden soll. Im vorliegenden U.-Katalog gemäss Kapitel 2.2, sind bereits rund 150 Methoden abgebildet, die heute bei Tunnelbauwerken angewendet werden können. Zusammen mit diversen Weiter- und Neuentwicklungen aus der aktuellen Forschung (vgl. u.a. Kapitel 1.3) wird die Palette möglicher USM zukünftig noch grösser.

Eine erste wichtige Hilfe für Praxisumsetzung der Bestimmung von geeigneten USM liegt mit dem strukturiert aufgebauten und mit diversen, verknüpften Attributen versehenen U.-Katalog bereits vor.

Die systematische Zusammenstellung der verschiedenen Methoden im U.-Katalog, u.a. mit den jeweiligen Angaben zu:

- Befunden (BE-);
 - Schadensprozesse (S-);
 - Bauwerksteilen / Bauarten (BWT-; BA-);
 - Erfasste Masseinheiten;
 - Eignung z.B. für Monitoring;
 - Angaben zu Preisklasse (vgl. dazu Kapitel 2.2.7),
- erlauben auf eine schnelle, praxisnahe Art, die unterschiedlichen Methoden schnell und spezifisch auszuwählen und allenfalls zu vergleichen.

Den aufgeführten Methoden sind als zusätzliche, verknüpfte Attribute weitergehende Informationen aus den Katalogen des EP1 und des EP3 zugeordnet, wie z.B. «Bauwerksteile» oder «Schadensprozesse». Dies erlaubt auch Angaben zu «Gefährdungsbilder» oder «mögliche Instandsetzungsmassnahmen» für einen weitergehenden Vergleich heranzuziehen.

Insbesondere die Katalogblätter mit dem Beschrieb der für Strassentunnel etablierten, bewährten Untersuchungsmethoden (Kapitel 2.2.8 / Anhang A3) dienen ebenfalls als praktische Hilfe für ein schnelles, einfaches Vergleichen von Methoden.

Weitergehende Informationen zur praktischen Anwendung und Nutzung des U.-Katalogs sind in Kapitel 3.3 und 3.5 zu finden.

2.3.2 Konzeptüberlegungen zu einer Vergleichsmethodik USM

Parallel zur Erarbeitung des Katalogs der Untersuchungsmethoden wurden mit Beteiligung der EP1 - EP3 und EP4 der Zusammenhang (Verknüpfung) von Informationen und Daten der Kataloge der Einzelprojekte aufgezeigt.

Die Themen «Gefährdungsszenarien», «Schadensprozesse» sowie «Zustandsentwicklung» sind von besonderer Bedeutung, denn sie haben einen entscheidenden Einfluss auf die Bestimmung der Erhaltungsmassnahmen (gemäß EP3 [60]), sowie auf die Entwicklung eines Entscheidungsmodells (gemäß EP4 [50]) bei der Erhaltungsplanung. Ein zentraler Punkt bei Untersuchungen wie auch bei Entscheidungsmodellen ist der systematische Umgang mit Unsicherheiten bezüglich Zustand und Risiken.

In Anlehnung an diese Diskussionen wurden seitens EP2 konzeptionelle Überlegungen gemacht, wie Risikobetrachtungen u.a. für eine Vergleichsmethodik von Untersuchungsmethoden einbezogen werden könnten. Daraus wurde das nachfolgend skizzierte Konzept «Vergleichsmethodik mittels Unsicherheitsbeiwert» entwickelt.

Konzept «Vergleichsmethodik mittels Unsicherheitsbeiwert»

(Ausführliche Version der Vergleichsmethodik, Stand Juni 2022, siehe Anhang A4)

Eine durchgeführte Untersuchung bzw. deren Ergebnis 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 resultiert. Der Nutzen einer Untersuchung ist, die Unsicherheit und damit das angenommene Betriebsrisiko zu verringern.

Da die Vergleichsmethodik einen Entscheid zur Wahl einer optimalen Untersuchungsmethode bezieht, muss eine mögliche Verringerung der Unsicherheit vor der Durchführung des Untersuchs abgeschätzt werden.

Um diese quantifizieren zu können, wird als Sicherheitsfaktor der Unsicherheitsbeiwert UB eingeführt. Die Definition dieses Beiwerts lehnt sich an den in OPTimAL 2020 verwendeten Konfidenzfaktor (Confidence Factor oder CF) [35] und den Begriff des Beiwerts aus der Dimensionierung von Tragwerken an. Die Begriffsänderung wird vorgeschlagen, da ein höherer Konfidenzfaktor mit einer grösseren Unsicherheit einhergeht, was kontraintuitiv ist. Zudem wird der Confidence Factor in der Literatur teilweise unterschiedlich definiert [47,72]. Weiter wird der vorgeschlagene UB im Gegensatz zum CF als ≥ 1.0 definiert.

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.; wie z.B. im EP1 [24] beschrieben) auf ein Entscheidungsniveau PoF_d .

$$PoF_d = PoF_k \cdot UB$$

Der *UB* besteht aus Teilstufen, welche nach den unterschiedlichen Ursachen der Unsicherheit gegliedert sind.

Für die Anwendung zum Vergleich von Untersuchungsmethoden wurden die Teilstufen vereinfacht wie folgt festgelegt:

$$UB = (UB_S \cdot UB_{SE}) \cdot UB_B \cdot (UB_U \cdot UB_{UE})$$

Wobei folgendes gilt:

- $(UB_S \cdot UB_{SE})$ ist gleich der Unsicherheit S aufgrund der Streuung des dem beobachteten Gefährdungsszenarios zugrundeliegenden Schadensprozesses;
- UB_S entspricht der eigentlichen **Streuung** des zugrundeliegenden Schadensprozesses. Ist von Untersuchung unabhängig;
- UB_{SE} ist der Anteil des Unsicherheitsbeiwerts aus **unsicherer erster Beurteilung** (Diagnose Typ Schadensprozess) sowie aus beschränkten Kenntnissen über die den Schadensprozess bestimmenden **Einflussfaktoren** (z.B. Feuchtigkeit, Chloride etc.). Dieser Anteil soll durch Untersuchung reduziert werden.
- UB_B ist gleich der **Unsicherheit B** aufgrund der konkreten **Situation des Bauwerks** bzw. Ort der Untersuchung: **Unsicherheit aus der Variabilität vor Ort z.B. von Geometrie** (örtliche Variabilität von Geologie, Abmessungen, etc.), **Ausführungskontrolle** (Detailmaterialisierung, u.a. Festigkeitsentwicklungen), **Verlauf bzw. Intensität Einwirkungen** (Bauwerks- bzw. Betriebs-«Geschichte», u.a. mit unbekannten Instandsetzungsmassnahmen, Ereignissen bzw. Einwirkungen), **Modellunsicherheit** (z.B. bei statischen Annahmen);
- $(UB_U \cdot UB_{UE})$ ist gleich der Unsicherheit U aufgrund der Streuung / Ungenauigkeit der Resultate abhängig von den eingesetzten Untersuchungsmethoden für die zugrundeliegenden Schadenprozesse.
- UB_U entspricht der **Unsicherheit**, welche direkt mit **der Untersuchungsmethode** zusammenhängt, mit der das Gefährdungsszenario, respektive der zugrundeliegende Schadensprozess bestimmt wurde. Eine erste Einschätzung ist erforderlich, wie gut sich die angewandte Methode selbst zur Untersuchung des Schadensprozess bezüglich Genauigkeit eignet.
- UB_{UE} ist der Anteil des Unsicherheitsbeiwerts aufgrund der **Variabilität der konkreten örtlichen Einflussfaktoren auf die Untersuchungsmethode bzw. -resultate**, wie z.B. Beschaffenheit Bauteil (Oberflächenbeschaffenheit, Zugänglichkeit für exakte Messung), Umwelteinflüsse auf Inspektion (Licht, Feuchtigkeit, ...), Inspektor (Erfahrung, Kompetenz, Faktor Mensch), Probenumfang, Probenlokalisierung, Messintervall (bei online Messungen)

Es wird jeweils der UB und das resultierende Risiko für den aktuellen Zustand $R_{0,d}$ und nach Anwendung jeder zu vergleichenden Untersuchungsmethode 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 $\Delta R_{i,d} = R_{i,d} - R_{0,d}$ 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.

Dieser Ansatz mit Unsicherheitsbeiwerten für eine Vergleichsmethodik von Untersuchungsmethoden wurde für die Anwendung eines einfachen Fallbeispiels weiter verfeinert und durchgespielt. Die dafür verwendete Herleitung, u.a. der detaillierteren Unsicherheits-Teilfaktoren UB_x , sind im Anhang A4: «Vergleichsmethodik, Value of Information» (Stand v1 2022-06) ausführlicher dokumentiert.

Diskussion Konzeptvorschlag Vergleichsmethodik Untersuchungsmethoden

Nach Vorstellung und Weitergabe des Konzepts EP2 «Vergleichsmethodik mittels Unsicherheitsbeiwert» (Entwurf v1 2022-06) wurde dieses Projektteam- und INGE-intern intensiv diskutiert, auch im Austausch mit dem EP4. Abschliessend sind auch diverse kritische Rückmeldungen von der GPL und der Begleitkommission dazu eingetroffen, dies im Rahmen der Prüfung des 1. Entwurf des Schlussberichts EP2 vom Juni 2022.

Erkenntnisse aus den Diskussionen und Rückmeldungen:

- Es ist unbestritten, dass Unsicherheiten und Risikoüberlegungen eine wichtige Rolle spielen bei der Zustandsentwicklung, den damit verbundenen Gefährdungsszenarien, wie auch bei der Interpretation der Ergebnisse aus Untersuchungen;
- Die Vergleichsmethodik USM integriert einfache Risikoüberlegungen und erlaubt systematische Vergleiche, ist jedoch aufgrund der noch konzeptuellen Reife nur kompliziert und unter vielen Annahmen anzuwenden. Das macht die Veranschaulichung anhand eines praxisnahen Beispiels auch für erfahrene Ingenieurinnen und Ingenieure schwierig. Das Konzept muss für die Anwendung in der Praxis weiterentwickelt werden;
- Entsprechend können auch die Stimmen aus der BK beim Nachvollziehen des Fallbeispiels gedeutet werden: Es wurde u.a. zurückgemeldet, dass dazu entweder Top-Experten, «Allwissende» oder ausführliche Datenvorgaben für die Bestimmung von diversen Unsicherheitsbeiwerten benötigt werden;
- Gemäss Absicht EP2 dient das Fallbeispiel (im Anhang 3) ausschliesslich der Veranschaulichung der Konzeptumsetzung und nicht der inhaltlichen Diskussion ermittelter Zahlen. So werden Möglichkeiten, Schwachpunkte und weiterer Entwicklungsbedarf dieser Methodik auf Konzeptstufe aufgezeigt. Um verlässliche Vergleiche in der Praxis durchführen zu können, wird weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit benötigt;
- Seitens EP4 wurde der Einbezug von Risikoüberlegungen in den Teilprozess prinzipiell gutgeheissen. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass ein Nutzen solcher Risikoüberlegungen bzw. -Informationen erst voll zum Tragen kommt, wenn der ganze Erhaltungsprozess darauf aufbaut. Dabei wurde auf den «Value of Information» hingewiesen, welcher dafür eingesetzt werden könnte. Hinweise vom EP2 dazu sind ebenfalls im Anhang A4: «Vergleichsmethodik, Value of Information» zu finden.

Als Fazit des EP2 zu den diversen Rückmeldungen zur «Vergleichsmethodik USM» kann festgehalten werden, dass damit der Wichtigkeit von Risikoüberlegungen im Teilprozess Überwachung Rechnung getragen wurde, sie jedoch im jetzigen frühen Konzeptstand nicht praktikabel ist.

Für eine praxistaugliche Umsetzung der Methodik müssen erst Daten gesammelt, zusammengestellt, respektive Normen bzw. Vorgaben entwickelt werden, die weitgehend unabhängig von den Anwenderinnen und Anwendern stabile, aussagekräftige Resultate liefern.

Die Vergleichsmethodik ist noch zu theoretisch und kann im Rahmen dieses praxisorientierten Einzelprojekts noch nicht auf die nötige Reife gebracht werden. Die Machbarkeit des Konzepts mit Unsicherheitsbeiwerten ist unseres Erachtens jedoch gegeben, wie das zum Beispiel die Analogie zu vergleichbaren Überlegungen aus den Tragwerksnormen aufzeigt.

Bei der Bemessung von Tragwerken wird die Risikoüberlegung auch mittels Beiwerten 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.

3 Erkenntnisse und Folgerungen

3.1 Grundsätzliches

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

- Die Prozesse des Erhaltungsmanagements / der Erhaltungsplanung / des Asset Managements von Infrastrukturbauten sind international vergleichbar aufgebaut (vgl. Kapitel 1.3.3). Jedoch gibt es Unterschiede, u.a. auch im deutschen Sprachraum (D-A-CH), bezüglich den Abgrenzungen der Prozesse und vor allem bei den Bezeichnungen;
- Der in diesem Forschungsprojekt behandelte «Teilprozess Überwachung» und seine Phasen / Teilgebiete, werden je nach Herkunft, z.B. Land, Norm / Richtlinie oder Organisation / Betreiber, unterschiedlich bezeichnet;
- Häufig werden im deutschen Sprachraum die Begriffe Zustandsaufnahmen, Zustandserfassung, auch Inspektionen für ähnliche oder gleiche Tätigkeiten verwendet, ohne das klar wird, ob damit immer das Gleiche gemeint ist. Ähnliches gilt u.a. auch für die Begriffe Zustandsbeurteilung, Zustandsbewertung, Ermittlung Bauwerkszustand;
- Ähnliches gilt auch für die aktuelle Situation in der Schweiz. Dies kann an einzelnen Begriffen, die Gegenstand des EP2 sind, veranschaulicht werden:
 - Überwachung = Teilprozess des Erhaltungsmanagements gemäss Grundnorm [20]; in der geltenden ASTRA Richtlinie [1,2] zu Überwachung und Unterhalt, wird bei diesem Teilprozess zwischen den Phasen «Überwachung» und «Überprüfung» unterschieden (siehe Kapitel 1.6.1). In beiden Phasen kommen Untersuchungsmethoden zum Einsatz;
 - Die Begriffe «Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden» im vorgegebenen Titel des EP2 sind etwas verwirrend. Der Begriff Diagnostik, hier als Überbegriff verwendet, wird im Kontext Erhaltungsplanung selten gebraucht. Zudem sind Inspektionsmethoden Teil der Überwachungsmethoden, vgl. dazu auch die Erläuterungen zu den im EP2 verwendeten Definitionen der Begrifflichkeiten gemäss Kapitel 1.6.1. Aufgrund der zweifachen Bedeutung von «Überwachung» ist nicht sofort klar, ob damit auch die Untersuchungsmethoden mitgemeint sind, die in der Phase Überprüfung zum Einsatz kommen;
 - Gemäss Projektvorgaben und der Grundnorm geht es um die Aufgabe / den Prozess des Erhaltungsmanagements [20] (u.a. in Österreich in vergleichbaren Projekten [35] als «Asset Management» bezeichnet). Gleichzeitig wird jedoch in der heutigen Praxis des ASTRA der Begriff «Erhaltungsplanung» verwendet, welcher sich z.B. im System KUBA nur auf die Massnahmenplanung beschränkt [3]. Die Fachbereiche Erhaltungsplanung des ASTRA, in der Verantwortung für die Instandhaltung der Tunnel, sind auch für den Teilprozess Überwachung und fürs «Asset Management» zuständig.

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

3.2 Kompatibilität Grundlagen mit bestehenden Daten und Methoden

Für den Teilprozess Überwachung mit den dafür vorgesehenen, geeigneten Untersuchungsmethoden weisen die bisher verfügbaren Daten, u.a. aus KUBA [3], Ergänzungspotential auf, welches durch das vorliegende Forschungsprojekt aufgenommen wurde:

- Die im KUBA-Katalog «Untersuchungsmethoden» aufgeführten Daten decken die in der Praxis angewendeten Untersuchungsmethoden ungenügend ab. Es handelt sich

dabei meist nur um Sammelbegriffe für Untersuchungen wie «Laboruntersuchung» (HCode: 13) oder «Untersuchung am Bauwerk» (HCode: 23), welche im neuen Grundlagenkatalog der USM (U.-Katalog) eher dem übergeordneten Typ der Untersuchungsmethoden (U.-Typ) entsprechen;

- Der KUBA-Katalog «Messgrössen», welche die Art der Resultate aus den Zustandsaufnahmen dokumentieren soll, ist unvollständig und nicht zwingend logisch aufgebaut. In den vorliegenden KUBA-Katalogen sind in den Datensätzen drin keine Verknüpfung zwischen Methoden und Messgrössen zu erkennen;
- Die Umsetzung der Überwachung hat einen entscheidenden Einfluss auf die dabei erfassten Zustandsdaten und den ganzen Erhaltungsmanagement-Prozess:
 - Die Umsetzung des Teilprozesses Überwachung bei den Strassentunneln des ASTRA zeigt bezüglich Durchführung und Detaillierung Unterschiede auf, welche sich auf die Ergebnisse und vorhandenen Daten der Zustandsbeurteilungen auswirken. Dies zeigt die Praxiserfahrung aus verschiedenen Erhaltungsprojekten (u.a. auch der Fallbeispiele), wie auch bei den z.T. unvollständigen Daten in der heutigen KUBA-Datenbank. Diese röhren vom oft projektspezifischen Vorgehen her (vgl. Folgerungen Initialprojekt [67]), oder auch von der unterschiedlichen Handhabung der Überwachung durch die zuständigen Fachbereiche Erhaltungsplanung der ASTRA-Filialen;
 - Mit Ausnahme rudimentärer Angaben in allgemeinen Normen (u.a. SIA 269/2 [16]) oder Informationen zusammengestellt in Schulungsunterlagen (vgl. Kapitel 1.3.1), gibt es in offiziellen Schweizer Richtlinien und Vorgaben keine umfassenden Vorgaben zu geeigneten Inspektions- bzw. Untersuchungsmethoden, welche für Tunnel anzuwenden sind. Nur mit einer einheitlichen Erfassung und Dokumentation von Zustandsdaten können entsprechende Ergebnisse auch für die übergeordnete Netzsicht ausgewertet werden. Zudem liefern solche strukturierten Zustandsdaten verlässliche objektweise Inputdaten, die für ein Entscheidungsmodell erforderlich sind (vgl. EP4, [50]);
 - Der Auswertung und Darstellung der Resultate von USM (vgl. Kapitel 2.2.6) kommt ein hoher Stellenwert zu, besonders falls bei der Zustandsbeurteilung und beim Entscheidungsprozess gemäss Modell EP4 ausschliesslich auf die zu ermittelnden Zustandskategorien zurückgegriffen werden soll. Ohne klare, standardisierte Vorgaben für die Zuordnung von visuell detektierbaren Befunden zu Zustandskategorien (evtl. auch von messtechnischen Resultaten; vgl. nächster Abschnitt) können die Zustandsbeurteilungsdaten verschiedener Tunnelobjekte uneinheitlich und ungenau ausfallen. Eine gute Datengrundlage dient letztlich der Qualität der nachfolgenden Entscheide für die Massnahmenfestlegung im Erhaltungsmanagement-Prozess;
 - Ungeklärt ist unseres Erachtens die systematische «Übersetzung» der objektspezifisch ermittelten USM-Resultate als Inputdaten für die Identifikation von Schadensprozessen (vgl. EP1) und die Formulierung der objektspezifischen Gefährdungsszenarien (vgl. EP4). Hier zeigt sich ein weiterer Entwicklungs- / Forschungsbedarf in der Schnittstelle EP1 / EP2 und dem Entscheidungsmodell von EP4. Heute stellen projekt- und objektspezifisch Fachpersonen diese Übersetzung sicher, was weder systematisch noch in jeden Fall nachvollziehbar ist. Dabei hat der «Faktor Mensch» besonders bei der Risikoeinschätzung der Gefährdungsbilder einen grossen, nicht einschätzbar Einfluss.
 - Es sind keine Auswertungen von Kostenangaben zu durchgeföhrten Untersuchungsmethoden als Teil des finanziellen Aufwands der Überwachung von Tunneln bekannt. Grundsätzlich sollten beim ASTRA, als grösste Betreiberin von bergmännischen Strassentunneln in der Schweiz, solche Angaben aus den vergangenen 15 Jahren zusammengetragen werden können. Eine aktuelle übergeordnete Auswertung dieser Kostenangaben wäre ein wertvoller Input für zukünftige Datenbankanwendungen bzw. für Entscheid- und Kostenmodelle des Erhaltungsmanagements (vgl. dazu auch Ergebnisse des EP5 [68] und Erläuterungen in Kapitel 2.2.7).

Das vorliegende Forschungsprojekt liefert mit dem U.-Katalog ergänzende, weiterführende Daten und Informationen (auch im Sinne eines «Fachkataloges» gemäss KUBA), welche

der Weiterentwicklung der praktischen Umsetzung des gesamten Erhaltungsmanagement-Prozesses für Tunnel zugutekommt.

3.3 Anwendung

3.3.1 Anwendung des Katalogs

Mit dem Fokus auf die verständliche, nachvollziehbare Darstellung der klar strukturierten Informationen, wurde der Grundlagenkatalog «Untersuchungsmethoden» (U.-Katalog) erstellt.

Dieser U.-Katalog macht Anwenderinnen und Anwendern, auch ohne vertiefte Spezialkenntnisse, detaillierte Informationen zu den diversen Untersuchungsmethoden zugänglich und gibt ihnen einen Überblick, welche Methoden spezifisch bei bergmännischen Tunneln eingesetzt werden können.

Die praktische Anwendung des Katalogs wird durch die Gliederung und durch Such- und Filterfunktionen für den Vergleich und die Bestimmung geeigneter Methoden massgeblich unterstützt. Diese Funktionalitäten stehen bereits bei der aktuell vorliegenden einfachen Excel-Lösung zur Verfügung. Mehr Details dazu sind in Kapitel 3.5 «Praktischer Nutzen» beschrieben.

Die Einbindung des U.-Katalogs in die übergeordnet festgelegte Bauwerksgliederung, sowie die Verknüpfung mit den Schadensprozessen stellt die Kompatibilität dieses Grundlagenkatalogs mit dem ganzen Erhaltungsprozess (gemäß EP1 bis EP5) sicher.

Darstellung der Informationen des Grundlagenkatalogs für die Anwendung

Der U.-Katalog als zentrales inhaltliches Ergebnis des EP2 wurde, wie die verknüpften Grundlagenkatalogen von EP1 und von EP3, als Exceltabelle erstellt, in der die gemäß Kapitel 2.2 strukturierten Informationen erfasst sind. Digital, d.h. in der Excel-Applikation drin, lassen sich im Katalog Informationen suchen und darstellen. In der umfassenden Tabelle können Untersuchungsmethoden nach bestimmten Kriterien vorhandener Attribute gefiltert, d.h. spezifisch angezeigt und ausgewählt werden.

Die Entwicklung einer Anwendung bzw. Applikation für die anwenderfreundliche Nutzung dieses Katalogs ist nicht Gegenstand des EP2. Dies ist für die praktische Anwendung als Bestandteil eines Nachfolgeprojekts angedacht, basierend auf den Ergebnissen aller fünf Einzelprojekte EP1 bis EP5 (vgl. dazu auch Kapitel 1.7). Zum jetzigen Zeitpunkt ist noch nicht bestimmt, auf welche Art und zu welchem Zeitpunkt die Daten zu den Untersuchungsmethoden über eine Applikation anwenderfreundlich zur Verfügung gestellt werden können.

Darstellung der Untersuchungsmethoden als Katalogblätter

Der Ausdruck des umfangreichen U.-Katalogs auf Papier ist weder bezüglich des Format praktikabel noch bezüglich Lesbarkeit anwenderfreundlich. Aus diesem Grund wurde vorgeschlagen, sämtliche Informationen der bewährten Untersuchungsmethoden (gemäß Kapitel 2.2.8) in «Katalogblättern» abzubilden. Diese enthalten pro Untersuchungsmethode sämtliche Informationen aus dem Katalog, sowie zur Visualisierung typische Fotos bzw. Abbildungen. Diese USM-Katalogblätter liegen dem vorliegenden Schlussbericht EP2 bei (Anhang A3).

Aktualisierung des Grundlagenkatalogs mit neuen Methoden und Informationen

Durch den strukturierten Aufbau des Katalogs kann dieser als Tabelle oder dann in einer Anwendung als Applikation / Datenbank einfach mit aktualisierten Daten ergänzt werden. Das unabhängig davon, ob bereits erfasste Informationen zu aktualisieren sind oder neue Untersuchungsmethoden ergänzt werden sollen. Der systematische Aufbau der USM-Datensätze mit ihren Attributen macht möglich, dass auch zukünftig komplett neue Methoden auf die gleiche Weise vollständig erfasst werden können.

Datenformat für Migration und späteren Einsatz in einer Datenbank / Applikation

Der vollständige digitale Katalog wird als Exceldatei, inkl. den verknüpften Grundlagendaten des Katalogs EP1, abgegeben. Das dafür verwendete Microsoft Excel-Format ist eine zwar sehr einfache, aber auch flexible Lösung, welche bezüglich zukünftigem Datenformat keine Präjudizien schafft. Es ermöglicht die Datenmigration genauso in eine KUBA- bzw. EP4-Entscheidungsmodell-Lösung [3,50], wie in ein zukünftiges BIM-Common Data Environment (CDE). Die Übersicht sämtlicher darin erfasster Untersuchungsmethoden ist dem Anhang A2 zu entnehmen.

Die aktuellen, im U.-Katalog verwendeten Bezeichnungen für die Codierung der Strukturierung u.a. mit alphanumerischen Zeichen, welche auch für die Verknüpfungen verwendet werden, sind nicht für jedes zukünftige Datenmodell optimal. Solange das zukünftige Zielsystem nicht definiert ist, bringt zum jetzigen Zeitpunkt eine Anpassung keinen Mehrwert. Ist das Datenmodell des neuen Zielsystems bekannt, so ist es dank den logisch aufgebauten Codes einfach, diese Daten bei der Migration für die neue Anwendung entsprechend anzupassen bzw. zu mappen.

Vergleichbare Überlegungen zu späteren Anpassungen bei den Datenformaten der Kata-loginhalte gelten auch für die vorhandenen Freitexteingaben. Es gilt dabei zu beachten, dass die so gespeicherten Daten vor allem Informationszwecken dienen (Nachschlagewerk), die vor allem nur angezeigt werden. Es ist aktuell nicht vorgesehen, dass diese Daten z.B. direkt in Modellberechnungen des EP4 verwendet werden.

3.3.2 Hinweise zur Anwendung einer Vergleichsmethodik

Hinweise zur Vergleichbarkeit von Untersuchungsmethoden

Für die Bestimmung einer optimalen Untersuchungsmethode erlaubt der U.-Katalog eine effiziente Vorauswahl der in Frage kommenden USM, wie im vorangehenden Kapitel 3.3.1 erläutert. Für den weitergehenden Vergleich geeigneter USM bietet der Katalog, mit den für alle Methoden einheitlichen Eigenschafts-Attributen, ebenfalls eine gute Grundlage für die spezifische Auswahl von Methoden.

Kommen bei der oben beschriebenen 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. Wie in Kapitel 2.3 erläutert, ist ein zentraler Punkt bei Untersuchungen deren Wirkung, wie sie zur Verringerung von Unsicherheiten bezüglich Zustand und Risiken beitragen. Solche Risikoüberlegungen, auch im Zusammenhang mit den Kosten, wurden ausführlich in Kapitel 2.3 «Konzeptvorschlag Vergleichsmethodik» für Untersuchungsmassnahmen beschrieben.

Anwendbarkeit des Konzeptentwurfs Vergleichsmethodik

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, gemäss Anhang A4, hat aufgezeigt, dass die praxistaugliche Umsetzung noch nicht gegeben ist.

Die Vergleichsmethodik ist noch zu theoretisch und kann im Rahmen dieses praxisorientierten Forschungsprojekts nicht auf die nötige Reife für die Anwendung gebracht werden.

Weitere Details zur Vergleichsmethodik für die Untersuchungsmethoden sind in Kapitel 2.3 u.a. mit der Diskussion des Konzeptvorschlags im abschliessenden Abschnitt festgehalten.

In aktuellen praxisorientierten Publikationen zum Erhaltungsmanagement (u.a. [35,39]) spielen Risikoüberlegungen vor allem bei der Ermittlung der Modelle für die Zustandsentwicklung bzw. Zustandsprognosen der Bauwerke eine Rolle. Der relevante Einfluss der Risikobetrachtungen fürs Erhaltungsmanagement wird vor allem beim Alterungsverhalten,

u.a. mit den tunnelspezifischen Schädigungsprozessen der Bauwerksteile verortet und dort entsprechend in den dafür entwickelten Modellen berücksichtigt. Auch wenn die Überwachungsmethoden vor allem Daten für den ganzen Prozess zu liefern haben (vgl. [35]), ist auch im Teilprozess Überwachung den Risikoüberlegungen durch die Beteiligten Rechnung zu tragen. So können Kenntnisse standardisierter bauteilspezifischer Risikoinformationen für Tunnel z.B. Hinweise für einen optimierten Einsatz von Überwachungsmassnahmen liefern (vgl. dazu Kapitel 1.3, u.a. zu «Riskbased inspection (RBI)»).

3.3.3 Auswertung Fallbeispiele für Untersuchungsmethoden-Katalog

Wie in Kapitel 2.2.5 erläutert, sind die im Projekt ausgewerteten und dokumentierten Fallbeispiele bzw. die dabei eingesetzten Untersuchungsmethoden im U.-Katalog enthalten. Dies ist in den Faktenblättern der Fallbeispiele (Anhang A1) und im U.-Katalog als Referenz dokumentiert. Die Auswertung der Fallbeispiele wurde zur Plausibilisierung der Bestimmung der etablierten, d.h. der als «bewährte Untersuchungsmethoden» gekennzeichneten Methoden verwendet.

Zudem wurden die Fallbeispiele für das «gedankliche Durchspielen» der Anwendung des U.-Katalogs herangezogen, um einerseits die Praxistauglichkeit zu prüfen und andererseits auch um die Ergebnisse zu veranschaulichen.

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

3.4 Plausibilität und Zuverlässigkeit der Angaben

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

- Erstellung der grundlegenden Strukturierung des U.-Katalogs mit sämtlichen erforderlichen Attributen/Eigenschaften pro USM, der Verknüpfung mit dem Grundlagenkatalog des EP1 sowie der Gliederung der Untersuchungstypen des Teilprozesses Überwachung;
- Auswertung der Fallbeispiele bezüglich der USM 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 beiden Fachdatenkatalogen von KUBA und deren vollständige Integration in die neue Struktur des U.-Katalogs (vgl. Attribute/Spalten «Herkunft» und «H Code» im U.-Katalog);
- Zusammentragen und Ergänzen diverser weiterer USM für die vier Untersuchungstypen, u.a. aus:
 - aktuellen Lehr- und Schulungsunterlagen für allgemeine Bauwerküberprüfungen, v.a. Betonbau;
 - Untersuchungen aus der Geotechnik sowie dem Tunnelbau;
 - Prüfkatalogen und Publikationen von Prüfinstituten und Labors.
- Laufender Quervergleich erfasster und neuer Methoden, auch bezüglich ihrer Beschreibung und der Logik der Strukturierung der USM im Katalog;
- Interviews mit diversen Fachleuten und Anbietern von Untersuchungsmethoden, zum Stand der Technik, zu neuen Entwicklungen oder bezüglich fehlender Angaben u.a. zu Aufwand und Kosten, welche in den Katalog integriert wurden;
- Verifikation, dass sämtliche bekannten Schadensprozesse durch die aufgeführten USM abgedeckt werden können (vgl. Kapitel 2.2.5);
- Spiegeln der erfassten USM mit Angaben aus Richtlinien sowie aus vergleichbaren Projekten und Publikationen.

Beim zuletzt genannten Schritt wurde der vorliegende U.-Katalog u.a. anhand den in der Norm SIA 269/2 und Empfehlung SIA 162/5 beschriebenen Methoden und Messprinzipien kontrolliert, analog wie beim Abgleich u.a. mit dem Forschungsprojekt AMBITION ([21]; vgl. Kapitel 2.2.5).

Die Prüfung der Praxistauglichkeit und der Relevanz für Tunnel, insbesondere bei den bewährten Untersuchungsmethoden im Katalog, erfolgte ebenfalls durch die Auswertung der Fallbeispiele, wie im vorangehenden Kapitel erläutert.

3.5 Praktischer Nutzen

Der praktische Nutzen der vorliegenden Ergebnisse des EP2 sollen den folgenden Anwenderkreisen zugutekommen:

- Mitarbeitende des ASTRA, insbesondere der Abteilung Erhaltungsplanung, bei der Planung und Bestellung von Leistungen für die Überwachung und Überprüfung von bergmännischen Strassentunneln, wie auch bei der Beurteilung der Zweckmässigkeit der durch Auftragnehmende vorgeschlagenen Untersuchungsmethoden im Rahmen des Teilprozesses Überwachung;
- Beauftragte Planende bzw. Ingenieurbüros, welche Vorschläge für die Überwachung und Überprüfung ausarbeiten müssen mit der Wahl optimaler Untersuchungsmethoden bei angetroffenen Befunden, vermuteter Schadensprozesse oder betroffener Bauwerksteile. Dies mit dem Fokus auf belastbare Ergebnisse für die nachfolgende Massnahmenempfehlung;
- Ingenieurinnen und Ingenieure, welche dank den aussagekräftigen Ergebnissen aus den ausgewählten und durchgeführten Untersuchungen zuverlässige Ergebnisse für eine kosten- und risikooptimierte Massnahmenplanung erhalten. Dies zukünftig auch unterstützt durch das «Entscheidungsmodell» des EP4 [50];
- Übergeordnete Stellen von Tunnelbetreibern / -besitzern, wie z.B. die Erhaltungsplanung Zentrale des ASTRA, welche auch aus Netzsicht eine projektübergreifende Vereinheitlichung des Erhaltungsmanagement-Prozesses anstreben, um bessere Datengrundlagen fürs aktuelle und für ein optimiertes, zukünftiges «Asset Management» von Tunneln zu erhalten.

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

Der Grundlagenkatalog Untersuchungsmethoden liefert auch als Nachschlagewerk den Anwenderinnen und Anwendern einheitlich strukturierte Informationen für jede der aktuell rund 150 aufgeführten Untersuchungsmethoden. Diese können damit bezüglich ihrer Eigenschaften gut miteinander verglichen werden. Die aufgearbeiteten digitalen Daten bzw. Informationen können vollständig und flexibel u.a. am Bildschirm dargestellt werden.

Für die am häufigsten verwendeten Untersuchungsmethoden stehen den Interessierten zusätzlich die USM-Katalogblätter (pdf, druckbar) zur Verfügung. Diese immer gleich aufgebauten Katalogblätter stellen alle Angaben auf ein bis zwei A4-Seiten zusammen, so dass sie ausgedruckt oder auch als pdf schnell zur Hand sind bzw. auf einem beliebigen pdf-fähigen Mobilgerät angezeigt werden können. Die Katalogblätter können so direkt von den Inspektorinnen und Inspektoren zur Hand genommen werden, u.a. zur Unterstützung bei der Wahl von Untersuchungsmethoden. Sie decken alle bewährten Methoden und alle Schadensmechanismen ab. Zudem wird in den Katalogblättern auf ergänzende Untersuchungen hingewiesen.

Die einfache Suchmöglichkeit einer geeigneten Methode im U.-Katalog wird massgeblich dadurch unterstützt, dass die Untersuchungsmethoden:

- welche für die Überwachung, d.h. für Inspektionen und / oder Monitoring, geeignet sind, speziell gekennzeichnet sind und sich so schnell finden lassen;
- nach den vier Untersuchungstypen (gemäss Kapitel 2.2.3) gegliedert sind, was eine schnelle Vorauswahl möglicher Methoden erlaubt;

- direkt mit den beiden Grundlagenkatalogen des EP1 [24] verknüpft sind, was die Suche bezüglich Eignung für den Einsatz bei spezifischen Befunden und / oder Schadensprozessen ermöglicht;
- den Bauwerksteilen und /oder den Bauarten zugeordnet sind, was die Suche nach der Einsetzbarkeit an spezifischen konstruktiven Elementen oder an Bauwerksteilen mit spezifischen Materialisierungen erlaubt.

Die Einbindung des U.-Katalogs in die übergeordnet festgelegte Bauwerksgliederung (EP1 [24]), sowie die Verknüpfung mit den Schadensprozessen stellt die Kompatibilität dieses Grundlagenkatalogs mit dem ganzen übergeordneten Erhaltungsprozess, d.h. auch mit den nachfolgenden Teilprozessen sicher. Diese sind abgebildet in den Ergebnissen der Forschungsprojekte EP3 bis EP5 [50,60,68].

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

Der Beitrag des Forschungsprojekts EP2, mit dem neuen umfassenden U.-Katalog aller möglichen Untersuchungsmethoden, sowie den daraus abgeleiteten Katalogblättern, kann auch ungeachtet des übergeordneten Gesamtprojekts einen Beitrag zur Erzielung eines gesamtheitlich effizienteren Erhaltungsmanagements von bergmännischen Tunnels leisten.

Nach abschliessender Freigabe und Publikation des Schlussberichts könnten der U.-Katalog und die Katalogblätter mit den relevanten Informationen zu den Untersuchungsmethoden interessierten Personen bereits zur Verfügung gestellt werden. Das zeitnah und unabhängig davon, wie lange die Entwicklung einer Erhaltungsplanungs-Applikation für Tunnel noch auf sich warten lässt.

4 Empfehlungen

Basierend auf den Erkenntnissen und Folgerungen aus der Erarbeitung des Projekts EP2 haben sich folgende Empfehlungen ergeben:

Grundlagen Prozess Erhaltungsmanagement inkl. Überwachung

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

Für verlässliche Datengrundlagen im Erhaltungsmanagement-Prozess, d.h. für stabile objektspezifische Entscheide in einem Erhaltungsplanungsprojekt oder einheitlich erfasste und ausgewertete Kennwerte für die Netzsicht, braucht es klare übergeordnete Vorgaben und Hilfsmittel, z.B. den technischen Fachhandbüchern des Projektmanagements. (vgl. Kapitel 3.2). Beim Teilprozess Überwachung wird empfohlen, für die Auswertung und Dokumentation der Resultate von Untersuchungen (USM; u.a. für Inspektionen) systematische Vorgaben spezifisch für bergmännische Tunnel zu erstellen. Ziel muss es sein, dass visuell und messtechnisch detektierbare Befunde (Ergebnisse USM) als Input für die Bestimmung von Einflussfaktoren der Risikobeurteilung von Gefährdungsszenarien verwendet werden können. Die dafür notwendige tunnelspezifische «Systematik/Methodik» ist Gegenstand des weiteren Forschungsbedarfs im Zusammenhang mit einem Entscheidungsmodell, wie im EP4 vorgesehen. Zu diesem weiteren Forschungsbedarf sind auch entsprechende Empfehlungen des EP1 zu beachten.

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

Die laufende, netzweite Erfassung durchgeföhrter Erhaltungsprojekte mit Überwachungs- und Überprüfungsmassnahmen an zentraler Stelle und deren Auswertung wird aus folgenden Gründen empfohlen:

- Liefert übergeordnet Informationen zur Umsetzung und Wirkung des Erhaltungsmanagement-Prozesses für die Weiterentwicklung und tunnelspezifische Optimierung der Prozessabläufe;
- Diese Daten können ausgewertet und digital zur Verfügung gestellt werden, so dass sie den Beteiligten auch anderen EP-Bereichen oder Projekten wertvolle Hinweise zur aktuellen «Good Practice» oder zur erfolgversprechenden Umsetzung von neuen Untersuchungsmethoden in anderen Projekten liefern;
- Die so ausgewerteten Daten sollten auch die Kosten umfassen, welche wertvolle Information u.a. für Massnahmenvergleiche sind;
- Zudem können so neue USM in den U.-Katalog aufgenommen und bei Bedarf entsprechende Katalogblätter dazu erstellt werden.

Umsetzung Teilprozess Überwachung

Für die digitale Dokumentation der Ergebnisse der Zustandserfassung ist heute die KUBA-Anwendung vorgesehen. Auch wenn diese Plattform vorerst weiterbetrieben wird, wird zukünftig BIM mit seinen CDEs der Ort sein, wo das Erhaltungsmanagement von Strassen-tunneln digital beheimatet sein wird. Dies ist in Übereinstimmung mit der Umsetzung der Teilstrategie BIM des ASTRA für 2030 [29]. Daher wird empfohlen für die zukünftige Umsetzung der Dokumentation der objektweisen Zustandsdaten u.a. aus dem Teilprozess Überwachung bewusst und schon jetzt auf die Implementation im BIM hinzuarbeiten. Erste mögliche Schritte dazu sind:

- Sicherstellung, dass aktuelle und zukünftige Datenbestände fürs Erhaltungsmanagement der Tunnel so aufgebaut sind, dass sie einfach in neue Datenbanken migriert werden können, so wie das bereits in diesem Projekt gefordert wurde;
- Mitwirkung bzw. aktives Verfolgen der Entwicklung der BIM-Standards, u.a. zu Tunnel (IFC Tunnel) und zu zukünftigen Implementierungen des Betriebs bzw. des Erhaltungsmanagements durch Vertreter des ASTRA bzw. des Bereichs Erhaltungsplanung Tunnel;
- Aufgleisen der Erstellung von Digitalen Zwillingen (BIM-fähige 3D-Modelle) von bestehenden bergmännischen Tunneln (BIM im Bestand), z.B. als Pilotprojekt beim Abschluss einer Gesamterneuerung in der Phase 53 parallel zur Erstellung der Dokumente des ausgeführten Werkes. Der Lead für die Vorgaben der Erstellung der Digitalen Zwillinge für die Bauwerkerhaltung sollte in der Pilotprojekt-Phase zentral beim Bereich Erhaltungsplanung liegen.

Der Einsatz von neuen Technologien bei den Methoden für die Überwachung von Strassentunneln in der Schweiz sollte bewusst geprüft und gefördert werden. Dies zum Beispiel mit Evaluationen erfolgversprechender Technologien und Anbietern in 1:1-Praxistests als Pilotversuche. Dabei stehen Scanning-Methoden mit kinematischen Systemen und verschiedenen Sensor-Technologien sowie automatisierte Monitoring-Methoden im Vordergrund. Dabei kann auf die Erfahrung von Versuchen in Nachbarländern zurückgegriffen werden (vgl. Literatur Kapitel 1.3).

Zusammen mit den oben erwähnten neuen Technologien sind auch die automatisierten Auswertungen, wie z.B. mit Bilderkennungsmethoden zu erwähnen. Es wird empfohlen, bei der Auswertung der Zustandsdaten der vorgeschlagenen Pilotversuche die neuen Möglichkeiten der automatisierten Auswertung ebenfalls praxisnah zu testen und zu evaluieren. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die Technologien zu richten, welche den zukünftigen Einsatz von BIM antizipieren (vgl. dazu BAST [51]).

Anwendung Grundlagenkatalog Untersuchungsmethoden (U.-Katalog)

Wie in Kapitel 3.5 zur praktischen Nutzung erwähnt, könnten die Informationen des U.-Katalogs zu den Untersuchungsmethoden, zusammen mit den zugehörigen Daten aus den Grundlagenkatalogen des EP1, in geeigneter digitaler Form interessierten Personen zur Verfügung gestellt werden. Das ist z.B. als einfache Webdatenbank (vgl. NDI-Toolbox FHWA, [13]), auf einer öffentlich zugänglichen Website des ASTRA denkbar. Beispielsweise kann unter Standards für Nationalstrassen, 4. Tunnel und Geotechnik in einer zusätzlichen Kategorie «IT-Dokumentation» in Anlehnung an KUBA unter 2. Kunstbauten. Bei einer Umsetzung dieses Vorschlags wird zudem empfohlen, dass eine Feedback-Möglichkeit es den Anwenderinnen und Anwendern erlaubt, Rückmeldungen oder Korrekturvorschläge einzubringen, 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. Parallel dazu können auch die Katalogblätter, als pdf-Dateien, an gleicher Stelle veröffentlicht und durch eine zentrale Stelle aktualisiert werden. Damit würde die laufende Aktualisierung des U.-Katalog sicher gestellt, auch wenn dieser noch nicht in eine neue Fachapplikation integriert ist.

5 Datengrundlage

5.1 Kompilation der Literatur

Die im vorliegenden Schlussbericht EP2 verwendete Literatur, gemäss dem Literaturverzeichnis im Anhang, ist Bestandteil der strukturierten Literaturdatenbank des EP2 in Citavi und steht dem Gesamtprojekt zur Verfügung.

5.2 Kompilation Fallbeispiele

Die als Fallbeispiele für die Anwendung von Untersuchungsmethoden (EP2) sowie auch von Befunden und Schadensprozessen (EP1) und Instandsetzungsmassnahmen (EP3) verwendeten Tunnelobjekte, ausgewählt gemäss Kapitel 1.2.3 «Fallbeispiele», sind ausführlich und systematisch im Anhang A1 dokumentiert.

Anhänge

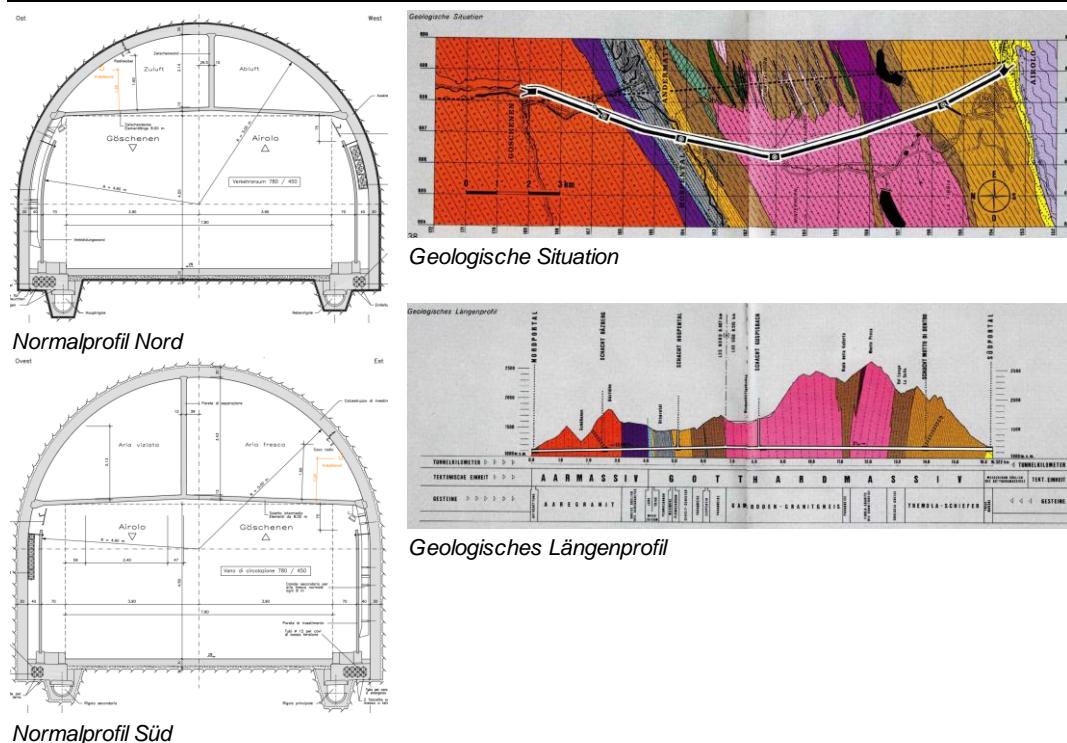
I	Fallbeispiele: Faktenblätter Tunnel	91
II	Übersicht U.-Katalog.....	133
III	Katalogblätter bewährter Untersuchungsmethoden (USM)	137
IV	Vergleichsmethodik, Value of Information	191

| Fallbeispiele: Faktenblätter Tunnel

Als Fallbeispiele liegen angefügt die neun Faktenblätter zu folgenden untersuchten Tunnelanlagen gemäss Kapitel 1.2.3 vor:

Tab. 1 Übersicht Tunnelanlagen

Bauwerk	Nationalstrasse / Länge Kanton	Baujahr / Inbetriebsetzung letzte Gesamterneuerung
Gotthard Strassentunnel, 1.Röhre	A2, TI / UR	16.9 km 1980
Seelisbergtunnel	A2, NW / UR	9.2 km 1980
Kerenzerbergtunnekl	A3, GL / SG	5.5 km 1986
Gotschnatunnel	A28, GR	4.2 km 2004, 2019 - 2020
Gubristtunnel	A1, ZH	3.3 km 1985, (ab 2023)
Tunnel Belchen	A2, SO / BL	3.2 km 1963-1970, (ab 2023)
Tunnel Girsberg	A7, TG	1.8 km 2002
Sonnenbergtunnel	A2, LU	1.6 km 1976, 2009-2013
Reussporttunnel	A2, LU	0.8 km 1979, 2009-2013

Tab. 2 FALLBEISPIEL NR. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre**Steckbrief Tunnelobjekt****Abb. 1** Quelle: Planausschnitte: Berichte der Erhaltungsplanung Gotthard-Strassentunnel, ASTRA Filiale Zofingen

Tunneltyp	Bergmännischer Strassentunnel
Nationalstrasse / Kanton	A2, TI / UR
Charakteristik	<ul style="list-style-type: none"> alpin; klimatisch ausgeprägte Zonen Portalbereiche + Tunnelinneres DTV ca. 5'000 – 23'000, ausgeprägte jahreszeitliche Schwankungen (Tourismus)
Länge	16.9 km
Jahr Inbetriebsetzung; Erneuerungen/ Gesamterneuerung	<p>1980 laufende Instandsetzungen und Erneuerungen bzw. kleiner baulicher Unterhalt (KBU) in Rahmen von Nachtsperrungen (während 6 Wochen pro Jahr); Gesamterneuerung geplant: 2030 bis 2032</p>
Mittlere Höhe Überdeckung	<p>ca. 1'100 m.ü.M. max. Überdeckung >1'000 m</p>
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> Ab Nordportal: <ul style="list-style-type: none"> Aarmassiv (vorwiegend Granit, Granitgneis und Gneis) Urseren Zone (Metasediment: Störzone Nord (Mesozoikum)) Gotthardmassiv (vorwiegend Granit, Granitgneis, (Para-) Gneise, Schiefer) Nufenen-Zone (Metasediment: Sörzone Süd) Grosser Bergwasseranfall, Fassung via Rigolen unter Bankett im Freispiegel
Tunnelanlage	
Typ, Verkehrsregime	<ul style="list-style-type: none"> 1 Röhre à 2 Spuren Gegenverkehr Paralleler Sicherheitsstollen (SISto) Schutzräume (QV zu SISto) ca. alle 250 m

Tab. 2 FALLBEISPIEL NR. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre

	<ul style="list-style-type: none"> • Beidseitige Ausstellbuchten ca. alle 300 m
Zwischendecke / Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Halbquerlüftung • Zwischendecke für Abluft (Brandklappen) + Zuluft mit Lüftungsschächten (bis 543 m Höhe bzw. 896 m Länge) • Tragsystem Zwischendecke: Zweifeldträger mit seitlichen Auflagern und mittiger Aufhängung (an Trennwand Zu-/Abluftkanal) • 6 Lüftungszentralen
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> • Mischsystem: beidseitige Rigolen unter Fahrbahn
Bauweise bergm. Tunnel:	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbruchverfahren: <ul style="list-style-type: none"> • Sprengvortrieb, grösstenteils im Vollausbruch • Profilform: Hufeisenprofil • Bauart Verkleidung: <ul style="list-style-type: none"> • Aussengewölbe: Betonschale (30 cm) (regelmässig unterbrochen im standfesten Felsen) • Innengewölbe: vorgestellten Wandplatten aus vorfabriziertem Stahlbeton • Gewölbe-Abdichtung (Ableitkonzept)
Längsneigung	<ul style="list-style-type: none"> • bergmännische Strecke: 1.4 bis 3%
Eignung als Fallbeispiel	<ul style="list-style-type: none"> • unterschiedliche Schädigungsmechanismen / Schäden • ausführliche Zustandsdaten • ausführliche Zustandsdaten inkl. Informationen zu ausgeführten Erhaltungsmassnahmen (SOMA und ÜMA) • Informationen von > 20 Jahren
Objektspezifische Erhaltungsplanung	
Visuelle Befunde (EP1; ID visuelle Befunde)	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Integrität: Kantenausbrüche und Fugenöffnungen, Risse und Abplatzungen in den Tunnelgewölbe, der Zwischendecke, der Trennwand, den Wandplatten, im Bankett und den Randsteinen <ul style="list-style-type: none"> • Fugenversätze, Fugenöffnungen, Kantenausbrüche (BE-1200) • Risse (BE-1300) • Abplatzungen (BE-1400) • Chemische Integrität: Korrosion und sichtbare Bewehrung an Zwischendecke, Wandplatten und Wandplattenhalterungen <ul style="list-style-type: none"> • Korrosion (BE-1100) • Undichtigkeiten: Feuchte Stellen, lokale / flächenhafte Nassstellen, vereinzelt Wasserzutritte, Mineralische Ausblühungen / Sinter <ul style="list-style-type: none"> • Undichtigkeit (BE-3000)
Erkannte Schadensprozesse (EP1; ID Schadensprozesse)	<ul style="list-style-type: none"> • Schadensprozess Stahlbeton: Bewehrungskorrosion Tunnelwände, Zwischendecke und Wandplatten, Betonangriff / Gefügezerstörung in Ringfugen, Wandplatten und Randsteinen <ul style="list-style-type: none"> • Bewehrungskorrosion (S-11) • Betonangriff / Gefügezerstörung (S-12) • Schadensprozess Baustahl: Korrosion Wandplattenhalterungen / -abstützungen, Schachtdeckungen <ul style="list-style-type: none"> • Metallkorrosion (S-21) • Schadensprozess Baugrund: Risse und Deformationen in der Kalotte, der Trennwand und der Zwischendecke <ul style="list-style-type: none"> • Belastungsänderung Baugrund (S-31) • Schadensprozess Strassenoberbau: Abnutzung Belag <ul style="list-style-type: none"> • Beschädigung Strassenoberbau (S-61)
Mögliche Gefährdungsbilder (EP1; ID Gefährdungsbilder)	<ul style="list-style-type: none"> • Tragwerksversagen <ul style="list-style-type: none"> • Versagen Gewölbe (GB-11) • Versagen Zwischendecke (GB-13) • Versagen Aufhängungen (GB-15)

Tab. 2 FALLBEISPIEL NR. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre

Durchgeführte Untersuchungen (EP2; ID Untersuchungsmethoden)	<ul style="list-style-type: none"> • 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) • Visuelle Untersuchungen: Inspektionen, Hauptinspektion, Detaillierte visuelle Untersuchungen, Kanal-TV (Entwässerungsleitungen und Hydrantenleitung) <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 Untersuchungen am Bauwerk: Deformations- und Konvergenzmessungen im Zu- und Abluftkanal (Zwischendecke) und im SIS (Bereich Mesozoikum); Abklopfen, Bewehrungsüberdeckungs-messungen (lokal); Potenzialfeldmessung, Sondagefenster zur Bestimmung Korrosionsgrad Zwischendecke, Wandplatten, Schachtfussbereiche der Lüftungsschächte; Korrosionsmonitoring Zwischendecke (Überwachung Korrosionsfortschritt mittels Korrosionssensoren und Feuchtehaushalt); Materialtechnologische (u.a. metallographische) Untersuchungen Aufhängungen Zwischendecke und Wandplattenverankerungen, Zustandserfassung Fahrbahneigenschaften, <ul style="list-style-type: none"> • Händische Messung (U-2-111) • Gleitmikrometer / Gleitdeformeter (U-2-131) • Abklopfen (U-2-211) • Automatische Belags- und Strassenzustandsprüfung (U-2-265) • Karbonatisierungsmessung am Bauwerk (U-2-411) • Sondierungs-/Bewehrungsfenster: Bestimmung Korrosionsgrad Bewehrung (U-2-421) • Potenzialfeldmessung (Bewehrung) (U-2-441) • Messung elektrischer Widerstand (Beton) (U-2-444) • Korrosionsmonitoring mittels Probekörpern mit spezifischer Sensoren (U-2-446) • Wirbelstromverfahren (Betonüberdeckungsmessung) (U-2-455) • Röntgenfluoreszenzspektrometrie (U-2-459) • Messung Umgebungstemperatur (U-2-511) • Messung Luftfeuchtigkeit (U-2-521) • Laborprüfungen: Mikroskopische Untersuchungen Betonbruchstücke Randstein, Untersuchung Beton: Zwischendecke, Wandplatten; Chemische Untersuchungen Baustoffe, Einwirkungen und Schadstoffe; Untersuchung Wasserproben Bergwasser (im Mesozoikum) und Brauchwasser (Hydrantenleitung), Untersuchungen Ermüdung der Bewehrung Zwischendecke mittels Zugversuchen und Dehnungsmessungen; Vortunnel: Untersuchung Wirksamkeit KKS u.a. mit laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIBS), Mikroskopischer Untersuchung am Dünnschliff, Bestimmung Haftzugfestigkeit der Grenzfläche zwischen Mörtel und Beton
------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

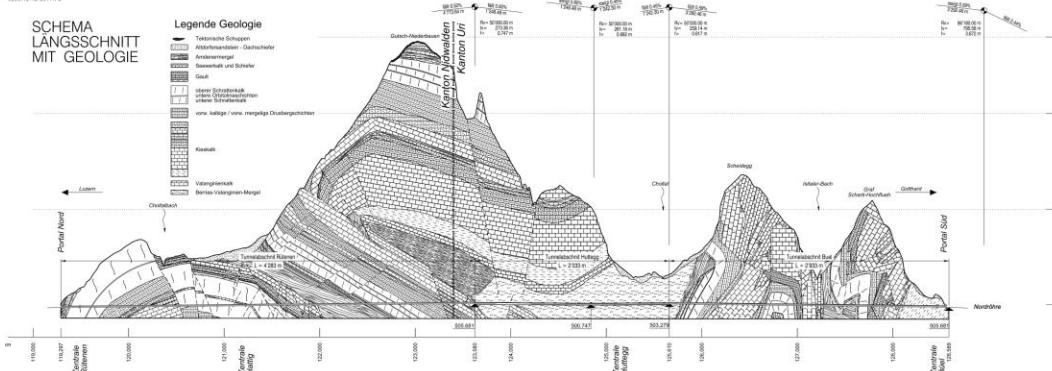
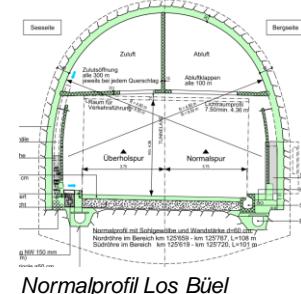
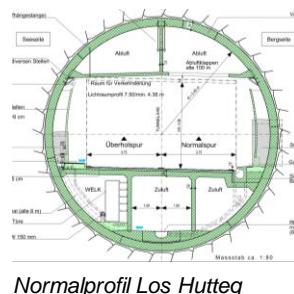
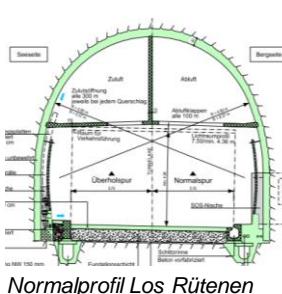
Tab. 2 FALLBEISPIEL NR. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre

	<ul style="list-style-type: none"> • Chloridanalyse (U-3-111) • Zugfestigkeit und Haftzugfestigkeit (U-3-221) • Zugversuche metallische Werkstoffe (U-3-241) • Elektronenmikroskop (U-3-411) • Lichtmikroskop (U-3-412) • Mikroskopische Untersuchung am Dünnschliff (U-3-421) • Chem. Zusammensetzung Wasser (U-3-520) • Asbest (U-3-542) • Wischprobe bei metallischen Werkstoffen (U-3-641) • Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) (U-3-661) • Statische, Geodätische und konstruktive Untersuchungen: Statische Nachrechnung Tragsicherheit, Schwingungs- und Erschütterungsmessungen an der Zwischendecke, Druckmessungen für Wandplatten • Nachrechnungen Bauwerk / Bauwerksteil (U-4-110) • Belastungsversuche (U-4-300), u.a. • Schwingungsanalyse (U-4-311)
Wirksamkeit der Untersuchungen (EP2)	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherstellung, dass mit dem kleinen baulichen Unterhalt (KBU) sowie SOMA, ÜMA und VOMA die Trag- und Betriebssicherheit bis zur Gesamterneuerung (ab 2030) gewährleistet ist. • Sicherstellung Tragsicherheit der Zwischendecke u.a. durch Überwachung Aufhängungen Zwischendecke • Visuelle Inspektionen und detaillierte Untersuchungen lieferten relevante Inputs für Festlegung Eingriffstiefe und Ausmass der Instandsetzungsmassnahmen, welche im Rahmen der Gesamterneuerung (ab 2030) ausgeführt werden • Zusätzlich haben u.a. Schadstoffuntersuchungen den Handlungsbedarf im Zusammenhang mit dem Bau der 2. Röhre aufgezeigt
Durchgeführte Massnahmen (EP3, ID Massnahmen)	<ul style="list-style-type: none"> • Gewölbe: Ersatz Wandplatten Portalbereich Airolo, Ersatz Befestigungen Bauwerksverkleidung / Wandplatten, zusätzliche Sicherung der Wandplatten mit korrosionsbeständigen Ankern, Abklopfen lose Betonteile, lokale Betoninstandsetzung, Abdichten von Wassereintritten, Fugensanierungen, Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz Tunnelwände Tagbau, Erneuerung Beschichtung Tunnelwände Tagbau und einzelne Blöcke Innengewölbe <ul style="list-style-type: none"> • Abklopfen (M-1110) • Lokale Betoninstandsetzung (M-1210) • Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz (M-1220) • Ersatz Innengewölbe (M-1510) • Blockfugen abdichten einfach (M-1450) • Zwischendecke: Erneuerung Hydrophobierung, Abklopfen, Ersatz und Ergänzung Aufhängestangen <ul style="list-style-type: none"> • Abklopfen (M-3110) • Hydrophobierende Imprägnierung (M-3410) • Sicherung durch Aufhängungen (Zuganker resp. Schweizer Riegel) (M-3510) • Ersatz der Aufhängungen (Zuganker resp. Schweizer Riegel) (M-3520) • Randelemente: Reprofilierung Bankett <ul style="list-style-type: none"> • Randsteine instandsetzen / reprofilieren (M-7420) • Leitungen resp. Kabelschutzrohre und Einlaufschächte im Bankett Ersatz und Instandsetzung von Einlaufschächten / Rigolenschächten, Instandsetzung Kabelzugsschächte inkl. Ersatz Schachtabdeckungen <ul style="list-style-type: none"> • Kabelschächte Instandgesetzt bez. Totalersatz (M-7540) • Ersatz Kontroll-/Einlaufschacht (M-7530) • Entwässerungsleitungen unter Fahrbahn: Entfernen Ablagerungen Rigolen (Bereich Mesozoikum)

Tab. 2 FALLBEISPIEL NR. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre

	<ul style="list-style-type: none"> • Leitungen spülen und Ablagerungen entfernen (M-7310) • Umgestaltungsmassnahmen und Massnahmen aufgrund von Erweiterungen, Ergänzungen, Grundnutzungs- oder Normänderungen¹: <ul style="list-style-type: none"> • Zubetonieren der alten DWL-Schächte • Neuer DWL in SISto • Ersatz Betonsturz bei Schutzraumeingängen • Schliessung der Zwischenwand im Vortunnel (VOMA für Bau 2. Röhre) • Versuch Härestabilisatoren Bergwasser Mesozoikum
Wirksamkeit der bisherigen Massnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherstellung Tragsicherheit, u.a. der Zwischendecke durch Ersatz und Einbau neuer Aufhängestangen • Gewährleistung Betriebssicherheit u.a. durch Ersatz von Schachtabdeckungen und Einbau neuer DWL im SISto • Verringelter Chlorid- und Feuchtigkeitseintrag Wände Tagbau durch KKS, Betoninstandsetzung, Verlangsamung Bewehrungskorrosion und Vermeidung von Betonabplatzungen auf Bankett • Verringelter Feuchtigkeitseintrag in Zwischendecke durch Erneuerung Hydrophobierung -> Verlangsamung Bewehrungskorrosion
Weitere geplante Instandsetzungsmassnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamterneuerung u.a. mit Ersatz Zwischendecke und Fahrbahn (eingeschütteter WELK anstelle Fahrbahnplatte) sowie div. Betoninstandsetzungen u.a. am Innengewölbe (2030 – 2032)

¹ Gemäss Abgrenzung Instandsetzungsmassnahmen im Schlussbericht EP3, Kap. 1.6.2 [EP3]

Tab. 3 FALLBEISPIEL NR. 2 Seelisbergtunnel**Steckbrief Tunnelobjekt**Faltprospekt erstellt durch Ingenieurbüro A. Aegeuter & Dr. O. Bosshardt
12.12.2017 (F1)**Geologisches Längenprofil****Abb. 2 Quelle Planausschnitte: Faltprospekt A. Aegeuter & Dr. O. Bosshardt, 12.12.2017**

Tunneltyp	Bergmännischer Strassentunnel
Nationalstrasse / Kanton	A2, NW / UR
Charakteristik	<ul style="list-style-type: none"> • Zentralschweiz • DTV ca. 20'000
Länge	9.2 km
Jahr Inbetriebsetzung; Erneuerungen/ Gesamterneuerung	<p>1980 Verstärkung verankerte Längsträger unter Fahrbahnplatte in Hebungszone 2000 Instandsetzung Hebungszone 2004 / 2017 Instandsetzung geplant: 2025 - 2030 Gesamterneuerung geplant: 2035 – 2045</p>
Mittlere Höhe Überdeckung	<p>ca. 500 m.ü.M. max. Überdeckung 1'400 m</p>
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> • Geologische Einheiten / Lithologien: <ul style="list-style-type: none"> • grösstenteils Sedimente des in der Kreide und im Tertiär abgelagerten Helvetikums der Drusberg-Decke im Norden und Axen-Decke im Süden (Wechsellegerung aus i. A. standfestem Kalk und weniger standfesten Mergeln) • Hydrogeologie <ul style="list-style-type: none"> • Karstphänomene im Schrattenkalk in der nördlichen Drusberg-Decke • während Tunnelvortrieb festgestellte Wasserführung in drei Tunnellosen stark von Niederschlägen abhängig mit Maximum während Schneeschmelze (Los Rüteten 50 – 1000 l/s, Los Hutegg 1 – 4 l/s, Los Büel 5 – 10 l/s) • Amdenermergel erwies sich während Vortrieb als absolut trocken. In Valanginienmergeln war Wasserführung vernachlässigbar klein. • betonaggressives Bergwasser infolge hoher Sulfidgehalt, • TA Rüteten (km 119.300 – ca. km 123.600)

Tab. 3 FALLBEISPIEL NR. 2 Seelisbergtunnel

<ul style="list-style-type: none"> • Gault, obere / untere Orbitolinaschichten, Schrattenkalk, kalkige / mergelige Drusbergschichten, Altmannschichten, Kieselkalk, Kieselkalkschiefer, Seewerkalk, Seewerschiefer, Amdenermergel, Valanginienkalk • Karst • lokale, sich ausbreitende grosse Wasserzutritte (fliessend) Block 185 – 205 (Südröhre) resp. 185 – 210 (Nordröhre) • TA Huttegg (ca. km 123.600 – ca. km 125.640) <ul style="list-style-type: none"> • Valanginienkalk, Valanginienmergel • TA Büel (ca. km 125.640 – 128.590) <ul style="list-style-type: none"> • Valanginienmergel, Valanginienkalk, Alttertiäre Schiefer / Nummulitenkalke / Sandsteine, Schrattenkalk, obere Orbitolinaschichten, kalkige / mergelige Drusbergschichten, Altmannschichten, Kieselkalk, Echinodermenbrekzie des Kieselkalkes, Ultrahelvetischer Flysch, Altdorfer Sandstein-Gruppe • lokale Hebungszone zwischen ca. km 128.140 bis 128.200 (stärker ausgeprägt in Südröhre) in parautochthone Schächentaler Flysch (Wechsellsagerung aus Altdorfer Sandsteinen und Schiefern), stark tektonisch gestört und zerschert, Felsüberdeckung ca. 120 m, kleinere bekannte Störungen / Störzonen („Ruschelzonen“) vorhanden, leichte Wasserzutritte jedoch unter Druck 	
Tunnelanlage	<ul style="list-style-type: none"> • 2 Röhren à 2 Spuren
Typ, Verkehrsregime	<ul style="list-style-type: none"> • Richtungsverkehr • Begehbar und befahrbare Querverbindungen
Zwischendecke / Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Zu- und Abluftkanäle (mit Umleitbauwerke bei Profilwechsel) • Tragsystem Zwischendecke: Zweifeldträger mit seitlichen Auflagern und mittiger Aufhängung (an Trennwand Zu-/Abluftkanal) • 4 Lüftungsbauwerke (Rütenen / Hattig / Huttegg / Büel)
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> • Bergwasservia Bergwasserrigole oder Bergwasserfassung via Viadukt • Mischwasser via Schlitzrinnen / Ölabscheider • "Trennsystem" auf rund 2/3 der Tunnellänge; Abschnitt Büel im Mischsystem
Bauweise bergm. Tunnel:	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbruchverfahren: <ul style="list-style-type: none"> • Los Rütenen, 2 x 4'300 m konventioneller Sprengvortrieb • Los Huttegg, 2 x 2'000 m mechanischer Vortrieb • Los Büel, 2 x 2'900 m konventioneller Sprengvortrieb • Profilform: <ul style="list-style-type: none"> • Los Rütenen und Büel: Hufeisenprofil • Los Huttegg: Kreisprofil • Bauart Verkleidung: <ul style="list-style-type: none"> • Aussengewölbe: Ortbetonschale <ul style="list-style-type: none"> • Los Rütenen und Büel: 30 cm • Los Huttegg: 50 cm • Innengewölbe: vorgestellten Wandplatten aus vorfabriziertem Stahlbeton • Abdichtungskonzept: keine Abdichtung • Verankerte Längsträger als Auflager für Fahrbahnplatte in Hebungszone / Amdenermergelstrecke
Längsneigung	<ul style="list-style-type: none"> • bergmännische Strecke: 0.50 – 0.60%
Eignung als Fallbeispiel	<ul style="list-style-type: none"> • unterschiedliche Schädigungsmechanismen / Schäden • verschiedene Einwirkungen aus Baugrund (u.a. Quellen, Bergwasser, Karst) • ausführliche Überwachungs- und Zustandsdaten • div. ausgeführte SOMA, ÜMA, EP (u.a. Sicherung Zwischendecke für Normkonformität, div. Reprofilierungen, Wasserfassung / -

Tab. 3 FALLBEISPIEL NR. 2 Seelisbergtunnel

	<p>ableitung, Ersatz defekte Schieber Löschwasserleitung, Belagsersatz)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hinterfüllung Tübbinge zur Mängelbehebung Ausführung
Objektspezifische Erhaltungsplanung	
Visuelle Befunde (EP1; ID visuelle Befunde)	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Integrität: Verschiebungen und Fugenversätze Tübbinge, Sohlhebungen / Hebungen Fahrbahnplatte, Unebenheiten Fahrbahn, Längs- / Querrisse in Fahrbahnplatte und Betonbelag, Abplatzungen <ul style="list-style-type: none"> • Setzungen, Verschiebungen, Verformungen, Hebungen (BE-1100) • Fugenversätze, Fugenöffnungen, Kantenausbrüche (BE-1200) • Risse (BE-1300) • Abplatzungen (BE-1400) • Belagsschäden (BE-1500) • Chemische Integrität: Korrosionsflecken <ul style="list-style-type: none"> • Korrosion (BE-2100) • Undichtigkeiten: sich ausbreitende Wasserzutritte (fliessend) oberhalb Zwischendecke, Wasserzutritte / Tropfstelle in Fahrraum über undichte Stellen Zwischendecke, Feuchtstellen / feuchte Blockfugen, Versinterungen <ul style="list-style-type: none"> • Undichtigkeit (BE-3000) • Funktionsstörung: verformte, zerdrückte Schlitzrinne infolge Hebung Fahrbahnplatte <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) • Betonangriff / Gefügezerstörung (S-12) • Ermüdung Stahlbeton (S-19) • Schadensprozess Baustahl: verrostete Schachtrahmen / -deckel <ul style="list-style-type: none"> • Metallkorrosion (S-21) • Schadensprozess Baugrund: druckhaftes Gebirge, starke Auflockerung / Verwitterung infolge „Gebirgsdurchnässung“ <ul style="list-style-type: none"> • Belastungsänderung Baugrund (S-31) • Schadensprozess Berg- / Grundwasser: Veränderung der Wasserwegigkeiten, fortschreitende sich ausbreitende Wasserzutritte <ul style="list-style-type: none"> • Belastungsänderung Berg- / Grundwasser (S-41) • Schadensprozess Strassenoberbau: Risse / Netzerisse und Materialausbrüche in Fahrbahnbelag, Risse in Betonbelag / Fahrbahnplatte <ul style="list-style-type: none"> • Beschädigung Strassenoberbau (S-61)
Mögliche Gefährzungsbilder (EP1; ID Gefährzungsbilder)	<ul style="list-style-type: none"> • Tragwerksversagen <ul style="list-style-type: none"> • Versagen Gewölbe (GB-11) • 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 Untersuchungen: Inspektionen, Hauptinspektion, Detaillierte visuelle Untersuchungen <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) • Einsehen Kontrollöffnungen und Schächte (U-1-221) • Messtechnische Untersuchung am Bauwerk: Deformationsmessungen Fahrbahn / Fahrbahnplatte, Aufnahme Gewölbestärken mit Ultraschall, Ankerkraftmessungen,

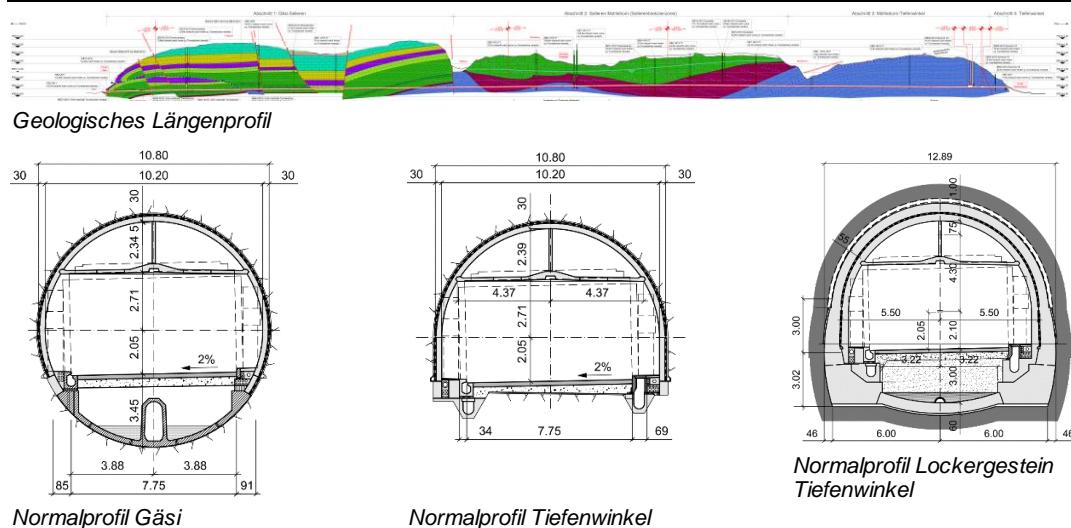
Tab. 3 FALLBEISPIEL NR. 2 Seelisbergtunnel

	<p>Gleitmikrometer und Inklinometer in Hebungszone, Klimamessungen (Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit sowie vereinzelt Oberflächentemperaturen der Zwischendecke)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Händische Messung (U-2-111) • Nivellement (U-2-121) • Gleitmikrometer / Gleitdeformeter (U-2-131) • Inklinometer (U-2-141) • Ankerkraftmessung (U-2-232) • Ultraschallprüfung (U-2-452) • Messung Umgebungstemperatur (U-2-511) • Messung Luftfeuchtigkeit (U-2-521) • Laborprüfungen: Untersuchung Wasserproben Bergwasser, Untersuchung Ablagerung Bergwasser <ul style="list-style-type: none"> • Chem. Zusammensetzung Wasser (U-3-520) • Feinanteile (U-3-531) • Statische, Geodätische und konstruktive Untersuchungen: Statische Nachrechnung Tragsicherheit Zwischendecke, Kontrollbohrungen zur Erfolgskontrolle Tübbinghinterfüllung <ul style="list-style-type: none"> • Nachrechnungen Bauwerk / Bauwerksteil (U-4-110) • Sondierung am Bauwerk (U-4-210)
Wirksamkeit der Untersuchungen (EP2)	<ul style="list-style-type: none"> • Ultraschallaufnahmen zur Erfolgskontrolle Tübbinghinterfüllung haben sich nicht bewährt unter lokalen Gegebenheiten Seelisbergtunnel • Kontrollbohrungen zur Erfolgskontrolle Tübbinghinterfüllung haben sich bewährt. • Feststoffproben an Ablagerungen aus Bergwasser liessen auf 100% Calciumcarbonat (Kalk) schliessen • Die chem. Analyse des Bergwassers liess auf eine unauffällige Zusammensetzung schliessen. Es gibt keine Hinweise, dass das Wasser zu Kalkausscheidungen neigt. Es ist jedoch denkbar, dass das Wasser infolge einer Erhöhung des pH-Werts zu Kalkausfällungen neigen würde. • Durchgeführte Untersuchungen ermöglichen umfassendes Bild des Zustands der verschiedenen Bauwerksteile und Eingrenzung des Instandsetzungsumfangs (lokale Instandsetzungen)
Durchgeführte Massnahmen (EP3, ID Massnahmen)	<ul style="list-style-type: none"> • Gewölbe: lokale Massnahmen / Installation Blechwannen zur Ableitung der Wasserzutritte (Auffangwannen, Ableitbleche) <ul style="list-style-type: none"> • Entwässerungsschlitz erweitert (M-1440) • Zwischendecke: Sicherung und Ersatz der Zwischendeckenaufhängung / Schweizerriegel für Wiederherstellung Normkonformität <ul style="list-style-type: none"> • Sicherung durch Aufhängungen (M-3510) • Ersatz der Aufhängungen (M-3520) • Fahrbahnplatte: Ersatz Fahrbahnplatte, Einbau stärkerer, neuer Fahrbahnplatte <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Fahrbahnplatte inkl. Wände (M-4400) • Fahrbahn: Ersatz Fundationsschicht, Reprofilierung Fahrbahn, Ersatz Betonbelag/Gussasphalt mit Walzasphalt in Hebungszone zur Vereinfachung zukünftiger Instandsetzungsmassnahmen <ul style="list-style-type: none"> • Belagsersatz Walzasphalt (M-5400) • Ersatz Fundationsschicht (M-5440) • Leitungen / Schächte: Instandsetzung Schlitzrinne <ul style="list-style-type: none"> • Schlitzrinne instandsetzen / reprofilieren (M-7420) • Injektion / Hinterfüllung Tübbinge (Mangelbeseitigung aus Bau) <ul style="list-style-type: none"> • Abdichtungsinjektionen (M-1470) • Umgestaltungsmassnahmen und Massnahmen aufgrund von Erweiterungen, Ergänzungen, Grundnutzungs- oder Normänderungen²: <ul style="list-style-type: none"> • Entlastungsbohrungen Fassung Bergwasserzutritte im Fels

² Gemäss Abgrenzung Instandsetzungsmassnahmen im Schlussbericht EP3, Kap. 1.6.2 [EP3]

Tab. 3 FALLBEISPIEL NR. 2 Seelisbergtunnel

	<ul style="list-style-type: none"> lokale Verstärkung Zwischendecke mit Klebelamellen bei zusätzlichen Aussparungen für Brandluftabsaugen für Wiederherstellung Normkonformität / Tunnelsicherheit
Wirksamkeit der bisherigen Massnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> Hinterfüllung Tübbinge in Südröhre zeigte gute Ergebnisse. Auf dieser Grundlage wurde entschieden auch die Tübbinge der Nordröhre zu hinterfüllen. Entlastungsbohrungen brachten Erkenntnisse hinsichtlich Gewölbestärke (i.d.R. 50–100 cm anstatt plangemäß 30 cm), Betonqualität (bei einzelnen Bohrungen markante Kiesnester vorhanden) und Geologie (Schrattenkalk mit beachtlichen Lehmeinschlüssen) Entlastungsbohrungen und Ableitung Wasserzutritte verhindern Wasserzutritte auf Fahrbahn
Weitere geplante Instandsetzungsmassnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> div. Instandsetzungsmassnahmen geplant zwischen 2025 - 2030 Gesamterneuerung geplant (ggf. mit Einbau von Sohlgewölbe in Hebungszonen oder Sohlverankerung): 2035–2045 Interventionszeitpunkt / VOMA abhängig von Hebungsverlauf

Tab. 4 FALLBEISPIEL NR. 3 Kerenzerbergtunnel**Steckbrief Tunnelobjekt****Abb. 3 Quelle Planausschnitte: Massnahmen- / Detailprojekt N03/70 Kerenzerbergtunnel, INGE K2, 26.02.2016**

Tunneltyp	Bergmännischer Strassentunnel
Nationalstrasse / Kanton	A3, GL / SG
Charakteristik	<ul style="list-style-type: none"> Ostschweiz DTV ca. 18'000
Länge	5.5 km
Jahr Inbetriebsetzung; Erneuerungen/ Gesamterneuerung	<p>1986 Keine grösseren Instandsetzungen seit Inbetriebnahme Gesamterneuerung: 2020 bis 2026</p>
Mittlere Höhe Überdeckung	<p>ca. 450 m.ü.M. max. Überdeckung 300 m</p>
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> Geologische Einheiten / Lithologien: <ul style="list-style-type: none"> Sedimente der im späten Jura- und der frühen Kreideformation abgelagerten Helvetischen Decken der Alpen (Mürtschendecke im Westen und Glarner-Decke im Osten) Gäsi - Salleren <ul style="list-style-type: none"> Betlis Formation (Valanginienkalk), Öhrli Formation (oberer / mittlerer / unterer Öhrlikalk, Öhrlimergel), Zementstein Formation (Zementsteinschichten), Quinten Formation (Troskalk, Quintnerkalk) Mürtschendecke aus unterschiedlich stark gebankten, kompakten Kalken mit dazwischenliegenden dünnmächtigen Mergeln. Sallerenbrekzienzone <ul style="list-style-type: none"> Quinten Formation-Brekzie (Troskalk, Quintnerkalk), Zementstein Formation-Brekzie (Zementsteinschichten) tektonisch unterschiedlich stark beanspruchter Bereich der östlichen Mürtschendecke bestehend aus kataklastisch überprägte bis kakiritisierte Gesteine. Mühlenhorn - Tiefenwinkel <ul style="list-style-type: none"> Quinten Formation Glarnerdecke (Troskalk, Quintnerkalk), Lockergestein im Portalbereich (Seebodenablagerungen, Bachschutt, Moräne) mehrheitlich massive, grobgebankte ziemlich intakte Kalke teilweise stark zerrüttet und intensiv zerklüfteter Kalk mit verlehmt in verschiedene Richtungen laufenden Klüften (insb. Störzone Tiefenwinkel) Hydrogeologie

Tab. 4 FALLBEISPIEL NR. 3 Kerenzerbergtunnel

<ul style="list-style-type: none"> Kluftwasserzutritte, starke Wasserzutritte insb. in Sallerenbrekziezone und in wenigen stark zerklüfteten Zonen in Quinten-Formation Karstphänomene (ins. stark wasserführende Gäßihöhle) Totale Bergwasserschüttmenge im ausgebauten Kerenzerbergtunnel ca. 10 (Portal Tiefenwinkel) bis 60 l/s (Portal Gäßi). Abflussmengen reagieren stark auf Niederschläge. 	
Tunnelanlage Typ, Verkehrsregime	<ul style="list-style-type: none"> 1 Röhre à 2 Spuren Richtungsverkehr 6 einseitige Ausstellbuchten ca. alle 700 m ausser Lüftungsstollen Hofwald zurzeit keine Notausgänge aus Tunnel
Zwischendecke / Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> Längslüftung mit Portalzentralen punktuelle Absaugung im Ereignisfall über Rauchabzugsklappen mit seitlichen Auflagern und mittiger Aufhängung (an Trennwand Zu-/Abluftkanal) drei Lüftungszentralen Portal Gäßi, Hofwald (ca. Tunnelmitte) und Portal Tiefenwinkel
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> zurzeit Mischsystem (wird mit Instandsetzung umgebaut zu Trennsystem) Fassung Bergwasser über Gewölbedrainage (in Instandsetzungsbereich zusätzlich über Sohldrainage)
Bauweise bergm. Tunnel:	<ul style="list-style-type: none"> Ausbruchverfahren: <ul style="list-style-type: none"> Los Gäßi: mechanischer Vortrieb mit Pilotstollen und nachträger Aufweitung in zwei Stufen Los Tiefenwinkel: konventioneller Sprengvortrieb in Felsstrecke, Deutsche Kernbauweise (Messervortrieb) in Lockergesteinsstrecke Profilform: <ul style="list-style-type: none"> Los Gäßi: Kreisprofil Los Tiefenwinkel: Hufeisenprofil (mit massiven Aussengewölbe im Lockergestein) Bauart Verkleidung: <ul style="list-style-type: none"> Aussengewölbe Fels: <ul style="list-style-type: none"> Spritzbeton, Netzarmierung, Anker, vereinzelt Stahlbogen in Los Tiefenwinkel Aussengewölbe Lockergestein: <ul style="list-style-type: none"> Stahleinbau mit Ortbetongewölbe 55 cm (100 – 200 cm im Widerlagerbereich) Innengewölbe: <ul style="list-style-type: none"> Los Gäßi: Ortbeton unbewehrt, 30 cm, Sohle mit Tübbingausbau Los Tiefenwinkel: Ortbeton unbewehrt, 30 cm Abdichtungskonzept: Ableitkonzept (drainierend)
Längsneigung	<ul style="list-style-type: none"> bergmännische Strecke: <ul style="list-style-type: none"> 1.05 % Portal Gäßi – Hochpunkt, 0.67 % Hochpunkt – Portal Tiefenwinkel
Eignung als Fallbeispiel	
<ul style="list-style-type: none"> altersbedingte Schädigungsmechanismen / Schäden Instandsetzung aufgrund unzureichender Tunnelsicherheit (u.a. Sicherung Zwischendecke infolge Anpassung Lüftung, Umbau Löschwasserleitung) div. ausgeführte SOMA, ÜMA, EP (u.a. Belagsersatz) Instandsetzung mit geringen Verkehrsbehinderungen 	

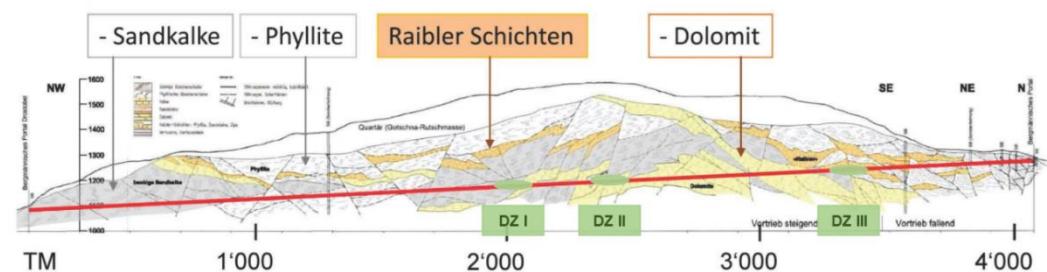
Tab. 4 FALLBEISPIEL NR. 3 Kerenzerbergtunnel

Objektspezifische Erhaltungsplanung	
Visuelle Befunde (EP1; ID visuelle Befunde)	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Integrität: offene Längsrisse im Gewölbe Lüftungskanal, örtlich Vertikallrisse in Trennwand Lüftungskanal, Lüftungskanal und Trennwand, (Mörtel-)Abplatzungen im Auflagerbereich Zwischendecke, Abplatzungen Schlitzrinne und Randsteine, breiter Belagsriss infolge differentieller Setzung zwischen Tunnel und Gallerie <ul style="list-style-type: none"> • Setzungen, Verschiebungen, Verformungen, Hebungen (BE-1100) • Risse (BE-1300) • Abplatzungen (BE-1400) • Belagsschäden (BE-1500) • Chemische Integrität: Korrosionsflecken: Korrosion von freiliegender Bewehrung im Lüftungskanal und Fluchtstollen <ul style="list-style-type: none"> • Korrosion (BE-2100) • Undichtigkeiten: Wassereintritte in Fahrraum im Bereich der Blockfugen, Kondenswasser in Lüftungskanal <ul style="list-style-type: none"> • Undichtigkeit (BE-3000) • Funktionsstörung: beschädigte Schlitzrinne, kleinere Kalkablagerungen in Sammelkanal, tlg. Risse und Ausbrüche in Sickerleitung und Sohldrainage <ul style="list-style-type: none"> • Querschnittsverluste in Drainage- / Entwässerungssystem (BE-4100) • Ausfällungen, Versinterungen (BE-4200)
Erkannte Schadensprozesse (EP1; ID Schadensprozesse)	<ul style="list-style-type: none"> • Schadensprozess Stahlbeton: Bewehrungskorrosion <ul style="list-style-type: none"> • Bewehrungskorrosion (S-11) • Schadensprozess Baugrund: differentielle Setzungen <ul style="list-style-type: none"> • Belastungsänderung Baugrund (S-31) • Schadensprozess Berg- / Grundwasser: Wasserzutritte in Fahrraum, mangelhafte Wasserableitung aus Karsthöhle bei Starkniederschlägen, Versinterungen <ul style="list-style-type: none"> • Belastungsänderung Berg- / Grundwasser (S-41) • Schadensprozess Strassenoberbau: Belagsrisse infolge differentieller Setzungen <ul style="list-style-type: none"> • Beschädigung Strassenoberbau (S-61)
Mögliche Gefährdungsbilder (EP1; ID Gefährdungsbilder)	<ul style="list-style-type: none"> • Tragwerksversagen <ul style="list-style-type: none"> • Versagen Gewölbe (GB-11) • Betriebssicherheit <ul style="list-style-type: none"> • unzulässige Verformungen Tragwerk (GB-21) • ungenügender Fahrkomfort / Ablenkung (GB-22) • Feuchtigkeit / Eisbildung (GB-24)
Durchgeführte Untersuchungen (EP2; ID Untersuchungsmethoden)	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Untersuchungen: Inspektionen, Hauptinspektion, Detaillierte visuelle Untersuchungen / 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 Untersuchungen am Bauwerk: Scanneraufnahmen Risse, Messung Bewehrungsüberdeckung, Potentialfeldmessung, Entnahme Bewehrungsseisen, Sondierfenster für Korrosion, Ultraschallmessungen, Querebenheits- / Deflektions- / Tragfähigkeitsmessung Fahrbahn, Bohrkerne Belag, Belagsbohrung für Abklärung eventueller Belagsabsenkung, <ul style="list-style-type: none"> • Laserscanning (U-2-151) • Automatische Belags- und Strassenzustandsprüfung (U-2-265) • Sondieröffnung/Bewehrungsfenster (U-2-421) • Belagsfenster (U-2-422)

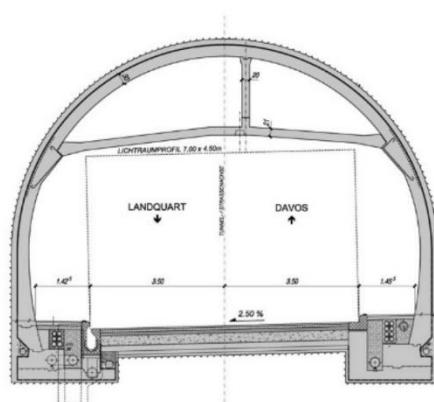
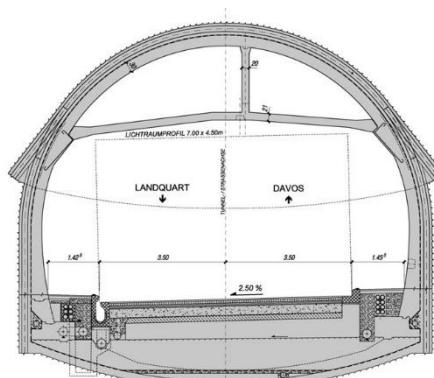
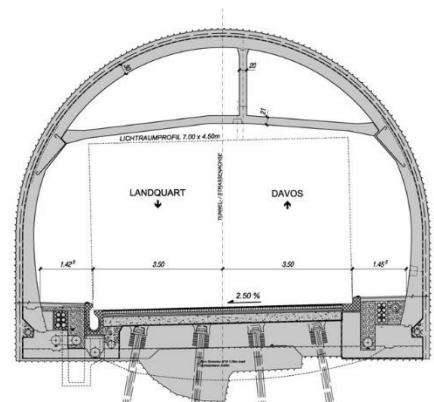
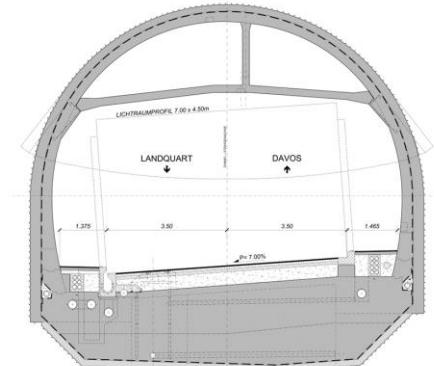
Tab. 4 FALLBEISPIEL NR. 3 Kerenzerbergtunnel

	<ul style="list-style-type: none"> • Potenzialfeldmessung (Bewehrung) (U-2-441) • Georadar (U-2-451) • Ultraschallprüfung (U-2-452) • Laborprüfungen: Entnahme Bohrkerne für Druckfestigkeit und Karbonatisierung, Cl-Entnahme von Bohrmehlproben für Chloridprüfung, Überprüfung Belagsaufbau und Asbestgehalt, Mischgutuntersuchungen, Entnahme Bergwasserproben, Rissbohrung <ul style="list-style-type: none"> • Chloridanalyse (U-3-111) • Karbonatisierungstiefe am Bohrkern (U-3-121) • Druckfestigkeit (U-3-211) • Chem. Zusammensetzung Wasser (U-3-520) • Asbest (U-3-542) • PAK (U-3-543) • Rissmessung am Bohrkern (U-3-631) • Statische, Geodätische und konstruktive Untersuchungen: Statische Nachrechnung Tragsicherheit Zwischendecke, Sondierfenster <ul style="list-style-type: none"> • Nachrechnungen Bauwerk / Bauwerksteil (U-4-110) • Überprüfung / Aktualisierung Statik (U-4-120) • Sondierungen am Bauwerk (U-4-210)
Wirksamkeit der Untersuchungen (EP2)	<ul style="list-style-type: none"> • Durchgeführte Untersuchungen ermöglichen umfassendes Bild des Zustands der verschiedenen Bauwerksteile und Eingrenzung des Instandsetzungsumfangs (lokale Instandsetzungen) • Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der bestehenden Zwischendecke konnte mit statischer Überprüfung nachgewiesen werden. Es sind keine baulichen Massnahmen nötig.
Durchgeführte Massnahmen (EP3, ID Massnahmen)	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrbahn / Fahrbahnfundation: Teilersatz des Belages <ul style="list-style-type: none"> • Belagsersatz (Walzaspalt) (M-5400) • Entwässerungsleitungen unter der Fahrbahn: punktuelle Instandsetzungsmassnahmen an Sammelleitung und Gewölbedrainageleitung zur Gewährleistung Abflusskapazität <ul style="list-style-type: none"> • Leitungen spülen und Ablagerungen entfernen (M-7310) • Rissverpressung Tunnelgewölbe im Bereich der Lüftungskanäle mit Epoxid-Harzinjektion <ul style="list-style-type: none"> • Rissinjektionen mit Bohrpackern (M-1420) • Aufbringen Oberflächenschutz <ul style="list-style-type: none"> • Erneuerung Beschichtung (C) (M-1340) • Umgestaltungsmassnahmen und Massnahmen aufgrund von Erweiterungen, Ergänzungen, Grundnutzungs- oder Normänderungen³: <ul style="list-style-type: none"> • Lokale Verstärkung / Sicherung Zwischendecke im Bereich von vorgesehenen Öffnungen für Einstieg in Lüftungskanal
Wirksamkeit der bisherigen Massnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> • durchgeführte UeMa betreffen im Wesentlichen bauliche Massnahmen zur Anpassung der Lüftung • lokale Instandsetzungsmassnahmen am Gewölbe (Rissverpressung) und im Bereich Galerie Gäsi (Beschichtung Wände, Anpassung Belag) garantieren sicheren Tunnelbetrieb bis Gesamterneuerung Tunnel nach Fertigstellung SISto
Weitere geplante Instandsetzungsmassnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> • lokale Instandsetzung Tunnelgewölbe Fahrraum, Aufhellung Tunnelwände mittels Oberflächenschutzsystem • lokale Instandsetzung Gewölbedrainage • Bankettersatz inkl. Ersatz Kabelschutzrohre, Randelemente, Löschwasserleitung • Umbau Mischsystem zu Trennsystem • Teilersatz Fahrbahnbelag

³ Gemäss Abgrenzung Instandsetzungsmassnahmen im Schlussbericht EP3, Kap. 1.6.2 [EP3]

Tab. 5 FALLBEISPIEL NR. 4 Gotschnatunnel**Steckbrief Tunnelobjekt**

Geologisches Längenprofil

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)**Abb. 4** 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)

Tab. 5 FALLBEISPIEL NR. 4 Gotschnatunnel

Mittlere Höhe	ca. 1'170 m.ü.M.
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 Sandkalken, 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 300 m
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 Sohldrainage 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 Sohilverankerung) 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%

Tab. 5 FALLBEISPIEL NR. 4 Gotschnatunnel

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) 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, Nivellelement, Gleitmikrometer, Extensometer, Messung Ankerkräfte, Distometermessungen, Aufnahme Gewölbestärken mit Georadar, Ebenheitsmessungen Fahrbahn <ul style="list-style-type: none"> Händische Messung (U-2-111)

Tab. 5 FALLBEISPIEL NR. 4 Gotschnatunnel

	<ul style="list-style-type: none"> • 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) • 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 Quellpotentials sowie der zu erwartenden Hebungsralten 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 Klebeplastern (M-1410) • Teilersatz Abdichtung (M-1490) • Ersatz Innengewölbe (M-1510) • Fahrbahn / Fahrbahnfundation: Ersatz der Fahrbahn in Zusammenhang mit Neubau Sohlgewölbe <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Fundationsschicht, Belagsersatz (M-5440) • Bankett: Bankettersatz in Zusammenhang mit Neubau Gewölbewiderlager / Sohlgewölbe <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Deckbelag (M-6220) • Ersatz Bankett mit Leitungen bzw. KSR im Bankett (M-6320) • Leitungen / Schächte: Ersatz Löschwasserleitung, Ersatz Gewölbefrainage, Ersatz Berg- / Strassenabwasserleitung, Ersatz Planumsentwässerung, Neubau Sohldrainage, Ersatz Kabelschutzrohre, Ersatz Randsteine / Schlitzrinnen, Ersatz Kontroll- / Siphonschächte in Zusammenhang mit Neubau Gewölbewiderlager / Sohlgewölbe <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Lösch- und Entwässerungsleitung, Kabelschutzrohre im Bankett (M-7130, 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) • weitere Bauwerksteile: Ersatz SOS- / Hydrantennischen und Gewölbefrainage-Nischen in Zusammenhang mit Gewölbeverstärkung / Sohlgewölbe

Tab. 5 FALLBEISPIEL NR. 4 Gotschnatunnel

	<ul style="list-style-type: none"> 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 / Fahrbahnentwässerung, Ersatz beschädigter Fahrbahnabschnitte)
Weitere geplante Instandsetzungsmassnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> keine, Instandsetzung abgeschlossen Überwachung Instandsetzungsstrecken

⁴ Gemäss Abgrenzung Instandsetzungsmassnahmen im Schlussbericht EP3, Kap. 1.6.2 [EP3]

Tab. 6 FALLBEISPIEL NR. 5 Gubristtunnel

Steckbrief Tunnelobjekt

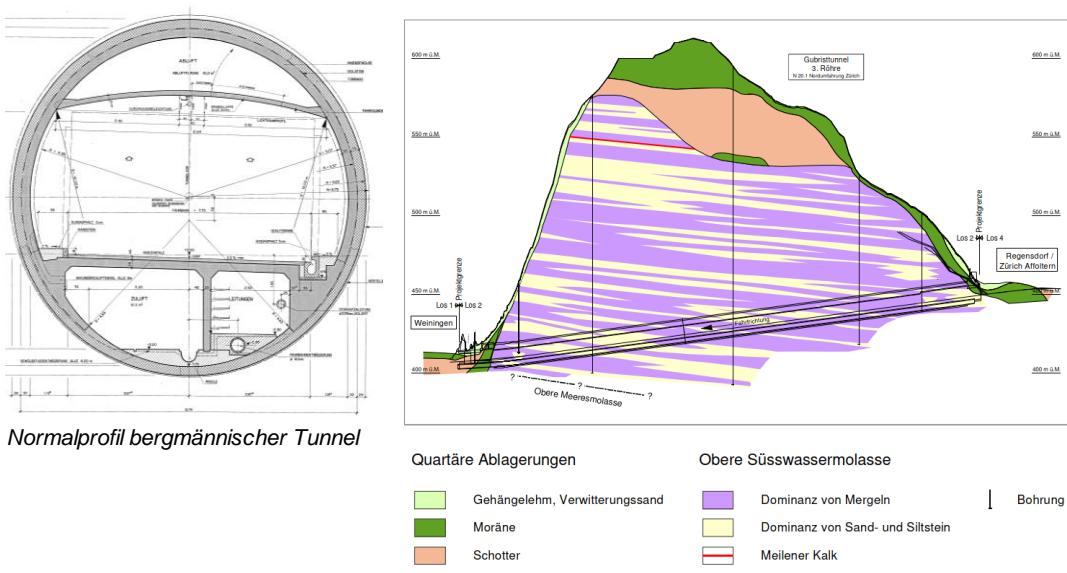


Abb. 5 Quelle: Planarchiv
ASTRA Filiale Winterthur

Abb. 6 Quelle: Wildberger, 1985, aus Bericht
Gubristtunnel, Geologie / Hydrologie / Geotechnik,
Dr. Heinrich Jäckli AG, 28.02.2013

Tunneltyp	Bergmännischer Strassentunnel
Nationalstrasse / Kanton	A1, ZH
Charakteristik	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelland (Molasse) • höchste Beanspruchung durch Verkehr DTV > 110'000
Länge	3.3 km
Jahr Inbetriebsetzung; Erneuerungen/ Gesamterneuerung	<p>1985 2009-2012 Erneuerung BSA, Umstellung Lüftungssystem; Gesamterneuerung geplant: 2023 bis 2027</p>
Mittlere Höhe Überdeckung	<p>ca. 435 m.ü.M. max. Überdeckung 180 m</p>
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> • Bergmännischer Tunnel vollständig im Gestein der Oberen Süsswassermolasse (Wechsellagerungen von Sand-, Siltsteinen und Mergel) • Grundwasser in Form von Hangwasser direkt über Molasseoberfläche und allenfalls im Bereich der stark verwitterten und geklüfteten Molasse • Bergwasser nur in Form von Hangwasser direkt über Molasseoberfläche und teilweise im Bereich stark verwitterter und geklüfteter Molasse • Bergwasseranfall im Tunnel: max. 0.8 l/s (pro Röhre)
Tunnelanlage Typ, Verkehrsregime	<ul style="list-style-type: none"> • 2 Röhren à 2 Spuren • Richtungsverkehr • Begehbarer und befahrbarer Querverbindungen • Portalzentralen (Tagbaubereich) sowie Unter-/Oberirdische Lüftungszentrale mit Abluftschacht in Tunnelmitte
Zwischendecke / Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Längslüftung mit punktueller Absaugung im Ereignisfall über Rauchabzugsklappen mit Abzug via mittigem Abluftkamin • Tragsystem Zwischendecke: Druckbogen mit seitlichen Auflagern
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> • Mischsystem: Fahrbahnentwässerung mittels Schlitzrinnen, Schmutzwasserleitung • Bergwasser gesammelt in Rigole WELK/e

Tab. 6 FALLBEISPIEL NR. 5 Gubristtunnel

Bauweise bergm. Tunnel:	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbruchverfahren: <ul style="list-style-type: none"> • Maschineller Vortrieb (TBM) • Profilform: Kreisprofil • Bauart Verkleidung: <ul style="list-style-type: none"> • Aussengewölbe: Tübbing (28 cm) • Innengewölbe: Beton unbewehrt (Im Bereich der QV bewehrt) (30 cm, gem. Messungen: 28 - 42 cm +/- 5cm) • Abdichtungskonzept: Gewölbe-Abdichtung (Ableitkonzept)
Längsneigung	<ul style="list-style-type: none"> • bergmännische Strecke: max. 1.29%
Eignung als Fallbeispiel	
	<ul style="list-style-type: none"> • ausführliche Zustandsdaten inkl. Informationen zu ausgeführten Erhaltungsmassnahmen seit 2003 (SOMA, ÜMA, VOMA) • massive Schäden u.a. durch Betrieb (v.a. Chloride) und notwendige Ertüchtigungsmassnahmen; • projektierte Massnahmen Gesamterneuerung auf Basis diverser Zustandsuntersuchungen u.a. im Rahmen Erhaltungsplanung.
Objektspezifische Erhaltungsplanung	
Visuelle Befunde (EP1; ID visuelle Befunde)	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Integrität: Risse im Innengewölbe (v.a. im Abluftkanal) und in Fahrbahnplatte (über ganze Tunnellänge von 3 km verteilt) <ul style="list-style-type: none"> • Risse (BE-1300) • Chemische Integrität: Abplatzungen und sichtbare Bewehrung an Tunnelwänden Tagbau, WELK-Auflager und Schlitzrinnen <ul style="list-style-type: none"> • Korrosion (BE-1100) • Undichtigkeiten: Wassereintritte und Versinterungen im WELK (div. Stellen über ganze Tunnellänge von 3 km verteilt), Versinterungen der Rigolen im WELK (Entwässerung Bergwasser) <ul style="list-style-type: none"> • Undichtigkeit (BE-3000)
Erkannte Schadensprozesse (EP1; ID Schadensprozesse)	<ul style="list-style-type: none"> • Schadensprozess Stahlbeton: Abplatzungen, Bewehrungskorrosion Tunnelwände Tagbau, WELK-Auflager und Schlitzrinnen <ul style="list-style-type: none"> • Bewehrungskorrosion (S-11) • Betonangriff / Gefügezerstörung (S-12) • Schadensprozess Baugrund: Risse im Innengewölbe (v.a. im Abluftkanal) und in Fahrbahnplatte: <ul style="list-style-type: none"> • Belastungsänderung Baugrund (S-31) • Schadensprozess Strassenoberbau: Abnutzung Belag <ul style="list-style-type: none"> • Beschädigung Strassenoberbau (S-61)
Mögliche Gefährdungsbilder (EP1; ID Gefährdungsbilder)	<ul style="list-style-type: none"> • Tragwerksversagen <ul style="list-style-type: none"> • Versagen Gewölbe (GB-11) • 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 Untersuchungen: Inspektionen, Hauptinspektion, Detaillierte visuelle Untersuchungen, Rissaufnahmen, Kanal-TV <ul style="list-style-type: none"> • Sichtkontrolle (Betrieb / Unterhalt) (U-1-110) • Hauptinspektion visuell (U-1-121) • Zwischeninspektion visuell (U-1-122) • 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 Untersuchungen am Bauwerk: Rissmessungen Innengewölbe und Fahrbahnplatte, Rissmonitoring Innengewölbe Abluftkanal bei grossen Rissen und Abplatzungen; Abklopfen

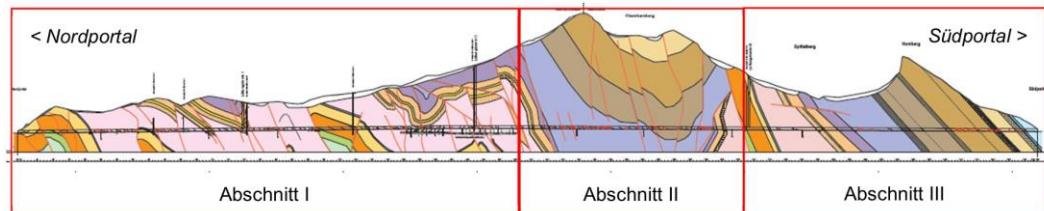
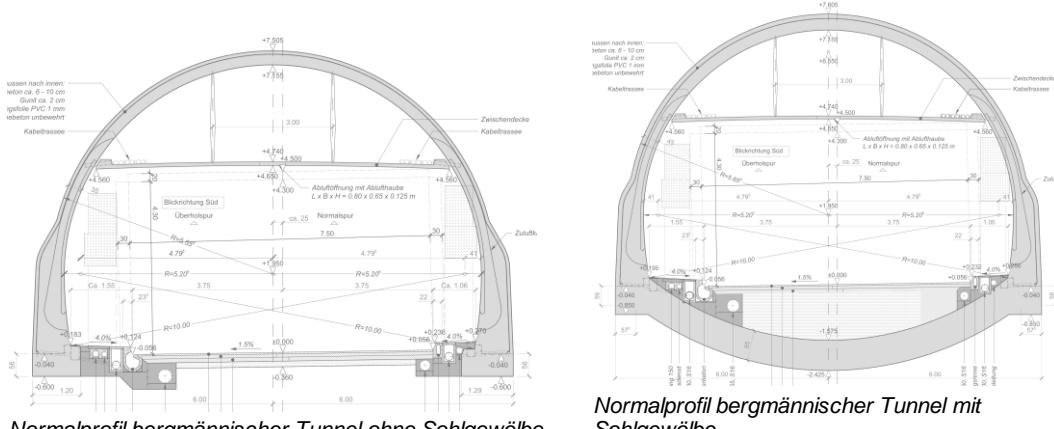
Tab. 6 FALLBEISPIEL NR. 5 Gubristtunnel

	<p>Wände Tagbau; Bewehrungsüberdeckungsmessungen (lokal); Potenzialfeldmessung Wände Tagbau, Zwischendecke, Sondagefenster zur Bestimmung Korrosionsgrad Wände Tagbau, Fahrbahnplatte, Zwischendecke, Messung Innengewölbestärke, Belagsfenster zur Beurteilung der Abdichtung, Haftzugfestigkeit Beschichtung Wände Tagbau, Aufnahme Geometrie mittels Laserscanning; Inspektion Sicherung ZwD (Schweizerriegel)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Händische Messung (U-2-111) • Laserscanning (ohne KI) (U-2-151) • Invardrahtmessung (U-2-161) • Rissmessungen, Kontrolle Gipssiegel (U-2-162) • Erfassung Rissweitenänderungen mittels Wegsensoren (Wegaufnehmer) (U-2-163) • Abklopfen (U-2-211) • Prüfung mechanischer Sicherungen (U-2-221) • Karbonatisierungsmessung am Bauwerk (U-2-411) • Sondierungs-/Bewehrungsfenster: Bestimmung Korrosionsgrad Bewehrung (U-2-421) • Belagsfenster: Beurteilung Belag und Abdichtung (U-2-422) • Haftzugfestigkeit (U-2-433) • Potenzialfeldmessung (Bewehrung) (U-2-441) • Georadar (U-2-451) • Wirbelstromverfahren (Betonüberdeckungsmessung) (U-2-455) • Laborprüfungen: Untersuchung Beton: Wände Tagbau, Innengewölbe, WELK-Auflager, Fahrbahnplatte; Untersuchung Belag auf PAK; Chemische Untersuchungen Einwirkungen und Schadstoffe <ul style="list-style-type: none"> • Chloridanalyse (U-3-111) • Karbonatisierungstiefe am Bohrkern (U-3-121) • Frost-Tausalzwiderstand (Frostwechselverhalten) (U-3-342) • Mikroskopische Untersuchung am Dünnschliff (U-3-421) • Chem. Zusammensetzung Wasser (U-3-520) • Russ, kanzerogene Stoffe (U-3-541) • Asbest (U-3-542) • PAK (U-3-543) • Statische, Geodätische und konstruktive Untersuchungen: Statische Nachrechnung Tragsicherheit Zwischendecke <ul style="list-style-type: none"> • Nachrechnungen Bauwerk / Bauwerksteil (U-4-110)
Wirksamkeit der Untersuchungen (EP2)	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherstellung, dass mit ÜMA und VOMA die Trag- und Betriebssicherheit bis zur Gesamterneuerung (ab 2023) gewährleistet ist. • Detaillierte Untersuchungen (Beton-, Bewehrungsüberprüfung, Rissmessungen) haben gezeigt, dass SOMA nötig waren, aber allg. Tragsicherheit Fahrbahnplatte gegeben ist. • Festlegung Massnahmen zur Sicherung der Zwischendecke • Visuelle Inspektionen und detaillierte Untersuchungen lieferten relevante Inputs für Festlegung Eingriffstiefe und Ausmass der Instandsetzungsmassnahmen, welche im Rahmen der Gesamterneuerung (ab 2023) ausgeführt werden • Aufnahme der Tunnelgeometrie für Optimierung Instandsetzung u.a. bzgl. Normanforderungen an das Lichtraumprofil (z.B. Bankettbreiten) • Messung der Innengewölbestärke lieferten wichtige Hinweise für Detailplanung der neuen Zwischendeckenauflager, welche im Rahmen der Gesamterneuerung 2023 - 2027 erstellt werden
Durchgeführte Massnahmen (EP3, ID Massnahmen)	<ul style="list-style-type: none"> • Gewölbe: Abklopfen, lokale Betoninstandsetzung, Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz Tunnelwände Tagbau, Erneuerung Beschichtung Tunnelwände Tagbau und einzelne Blöcke Innengewölbe <ul style="list-style-type: none"> • Abklopfen (M-1110) • Lokale Betoninstandsetzung (M-1210) • Reprofilierung ohne Bewehrungsersatz (M-1220)

Tab. 6 FALLBEISPIEL NR. 5 Gubristtunnel

	<ul style="list-style-type: none"> • Erneuerung Beschichtung (M-1340) • Zwischendecke: Sicherungsmassnahmen <ul style="list-style-type: none"> • Sicherung durch Aufhängungen (Zuganker resp. Schweizer Riegel) (M-3510) • Randelemente: Reprofilierung Schlitzrinne <ul style="list-style-type: none"> • Schlitzrinne instandsetzen / reprofilieren (M-7420) • Umgestaltungsmassnahmen und Massnahmen aufgrund von Erweiterungen, Ergänzungen, Grundnutzungs- oder Normänderungen⁵: <ul style="list-style-type: none"> • Instandsetzung Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen inkl. Sanierung Tunnellüftung (2009–2012) • Zubetonieren der Kabelzugsschächte
Wirksamkeit der bisherigen Massnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherstellung Tragsicherheit der Zwischendecke durch Einbau Schweizer Riegel • Erhöhung Betriebssicherheit (Reduktion Gefahr Aufschlitzen Pneus durch beschädigte Schlitzrinnen) • Erhöhung Betriebssicherheit durch Erneuerung sämtlicher BSA inkl. Umstellung Lüftung auf Lüftungssystem mit Absaugung im Ereignisfall • Verringelter Chlorid- und Feuchtigkeitseintrag Wände Tagbau durch Betoninstandsetzung und Erneuerung Beschichtung, Verlangsamung Bewehrungskorrosion und Vermeidung von Betonabplatzungen auf Bankett • Verringelter Chlorideintrag an Stirnflächen der Fahrbahnplatte durch Zubetonieren der Kabelzugsschächte -> Verlangsamung Bewehrungskorrosion
Weitere geplante Instandsetzungsmassnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamterneuerung u.a. mit Ersatz der Zwischendecke und der Fahrbahn (eingeschütteter WELK anstelle Fahrbahnplatte) sowie div. Betoninstandsetzungen u.a. am Innengewölbe (2023–2027)

⁵ Gemäss Abgrenzung Instandsetzungsmassnahmen im Schlussbericht EP3, Kap. 1.6.2 [EP3]

Tab. 7 FALLBEISPIEL NR. 6 Tunnel Belchen**Steckbrief Tunnelobjekt****Geologisches Längenprofil****Abb. 7 Quelle Planausschnitte: Massnahmenprojekt N02 TU Belchen Zweite Instandsetzung, INGE BZI 2.0, 15.02.2016**

Tunneltyp	Bergmännischer Strassentunnel
Nationalstrasse / Kanton	A2, SO / BL
Charakteristik	<ul style="list-style-type: none"> Nordwestschweiz (Juragebirge) DTV ca. 52'000
Länge	3.2 km
Jahr Inbetriebsetzung; Erneuerungen/ Gesamterneuerung	1. und 2. Röhre: 1970 / 3. Röhre: 2022 Gesamterneuerung 1. und 2. Röhre: ab 2023
Mittlere Höhe	ca. 610 m.ü.M.
Überdeckung	max. Überdeckung 330 m
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> Geologische Einheiten / Lithologien: <ul style="list-style-type: none"> Tunnel liegt vollständig in Faltenjura in der alpinen Tethys zwischen des oberen Jura (Malm, Dogger, Lias) bis in die mittlere Trias (Keuper, Muschelkalk) abgelagerte Sedimente überwiegend Sandsteine, Evaporite, Dolomite und Kalke der Trias sowie Kalke, Mergel und Tonsteine des Juras Abschnitt I (Tm 01.5 – Tm 1'555): <ul style="list-style-type: none"> nördlicher Abschnitt in Muschelkalkschuppenzone Störungszonen mit zahlreichen Klüften und zerscherten Zonen, Verfaltungen und Fließstrukturen Abschnitt I grösstenteils im Gipskeuper, durch intensive tektonische Beanspruchung komplex gefaltet Untergeordnet im Portalbereich Nord Unterer Dolomit (Anhydritgruppe) aufgeschlossen Abschnitt II (Tm 1'555 – Tm 2'265): <ul style="list-style-type: none"> Gipskeuper bis Varians-Schichten in grossräumig aufgeschlossener Mulde «Chambersberg» in nördlichen und südlichen Randbereich komplexe Überschiebungen mit Gesteinen von Gipskeuper bis Lias

Tab. 7 FALLBEISPIEL NR. 6 Tunnel Belchen

<ul style="list-style-type: none"> Muldenkern auf Höhe des Belchentunnels wird aus Opalinuston und Unterer Dogger gebildet, in Opalinuston aufgrund tektonischer Beanspruchung zahlreiche Störungsfächen und Rutschharnischflächen Abschnitt III (Tm 2'265 – Tm 3'190): <ul style="list-style-type: none"> ungestörter Sedimentstapel der Südflanke des Faltenjuras Unterer Dolomit (Dolomitzone der Anhydritgruppe), Abfolge von Hauptmuschelkalk bis zu Effingerschichten auf Tunnelhöhe einzelne Störungszonen und Verfaltungen (Gipskeuper, Opalinuston) registriert Hydrogeologie <ul style="list-style-type: none"> bei Bau von Belchentunnel in kalkig-dolomitischen Schichten Wasserzutrittsstellen registriert lokale Wasserzutritte im unteren Dolomit, Liaskalke und Schilfsandsteinen Gipskeuper, Opalinuston, Unterer Dogger und Mergel wirken als Wasserstauer mit (sehr) geringer Durchlässigkeit gemessener Wasserandrang (Pumwassermenge) 45 l/min (Totalabfluss 1999) stark mineralisierte Erdalkali-Sulfat-Hydrogencarbonat-Wässer, untergeordnet Alkali-Sulfatwasser erwartet 	
Tunnelanlage	<ul style="list-style-type: none"> 2 Röhren à 2 Spuren
Typ, Verkehrsregime	<ul style="list-style-type: none"> 3. Röhre: Instandsetzungsröhre Richtungsverkehr Begehbarer und befahrbare Querverbindungen 5 Zentralen (2 bei Portalen, 3 untertag in Querverbindungen in Viertelpunkten des Tunnels)
Zwischendecke / Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> Längslüftung mit 3 Lüftungsabschnitten mit punktueller Absaugung im Ereignisfall über Rauchabzugsklappen seit IBN mehrfach baulich verändert Zwischendecke: <ul style="list-style-type: none"> Fertigbetonelemente im Spannbetonverfahren 4-fach gelagert (2x seitliche Auflager à 3 Auflagerbolzen und 2 Reihen Hängestangen à 3 Hängestangen)
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> Gewölbeabdichtung mit Bergwassersammelleitungen im Paramentfuss (nicht abgedichtete Sohle/Sohlgewölbe) Belchen war einer der ersten Schweizer Tunnel mit Gewölbeabdichtung (1 PVC-Lage als Abdichtungsfolie ohne jegliche Schutzfolien); Einbauqualität und Erhaltungszustand nur punktuell bekannt Mischsystem
Bauweise bergm. Tunnel:	<ul style="list-style-type: none"> 2 Paramentstollen, dann bergmännischer Schildvortrieb zahlreiche Wechsel in Vortriebs- und Bauhilfsmassnahmen (abschnittsweise Spritzbetonmethode, Stahlbogen mit/ohne Verzugsbretter, Spriesse und Anker, mit/ohne Sohlgewölbe etc.) Profilform: <ul style="list-style-type: none"> In nicht quellfähigen Abschnitten: Hufeisenprofil In quellfähigen Abschnitten: 3 unterschiedliche Maulprofile, wobei bewehrtes Sohlgewölbe infolge Quellphänomenen erst während Bau projektiert und nachträglich eingebaut wurde Bauart Verkleidung: <ul style="list-style-type: none"> Aussengewölbe: <ul style="list-style-type: none"> i.d.R. Spritzbeton 6–10 cm Innengewölbe: <ul style="list-style-type: none"> Gewölbe: Ortbeton unbewehrt, 27–33 cm Sohlgewölbe: Ortbeton bewehrt, 45–55 cm bzw. 85 cm Abdichtungskonzept: Ableitkonzept (drainierend)
Längsneigung	<ul style="list-style-type: none"> bergmännische Strecke: 0.5–0.96%

Tab. 7 FALLBEISPIEL NR. 6 Tunnel Belchen

Eignung als Fallbeispiel	
Objektspezifische Erhaltungsplanung	
Visuelle Befunde (EP1; ID visuelle Befunde)	<ul style="list-style-type: none"> unterschiedliche Schädigungsmechanismen / Schäden verschiedene Einwirkungen aus Baugrund (u.a. sehr grosses Quellpotential, Bergwasser) ausführliche Überwachungs- und Zustandsdaten div. ausgeführte SOMA, ÜMA, EP (u.a. Sicherung Zwischendecke, Teilersatz Sohle / Paramente / Bankette, Verstärkung best. Tragwerk, Belagsersatz, Umbau Lüftung)
Erkannte Schadensprozesse (EP1; ID Schadensprozesse)	<ul style="list-style-type: none"> Mechanische Integrität: Gewölbeverformungen, Gewölbekonvergenzen, Sohlhebungen, Längs- / Querrisse, Abscherungen und Versätze, Hohlstellen im Firstbereich, Abplatzungen, Betonauflösung im Abluftkamin <ul style="list-style-type: none"> Setzungen, Verschiebungen, Verformungen, Hebungen (BE-1100) Risse (BE-1300) Abplatzungen (BE-1400) Belagsschäden (BE-1500) Chemische Integrität: Korrosionsflecken, korrodierte freiliegende Bewehrung Zwischendecke, Oberflächenkorrosion Hydranten <ul style="list-style-type: none"> Korrosion (BE-2100) Undichtigkeiten: wenige Risse sind feucht bzw. wasserführend, vereinzelt Wasserzutritte, Verformungen Entwässerungsleitung, Versinterungen <ul style="list-style-type: none"> Undichtigkeit (BE-3000)
Mögliche Gefährzungsbilder (EP1; ID Gefährzungsbilder)	<ul style="list-style-type: none"> Schadensprozess Stahlbeton: Bewehrungskorrosion, Betonkorrosion <ul style="list-style-type: none"> Bewehrungskorrosion (S-11) Betonangriff / Gefügezerstörung (S-12) 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) Schadensprozess Berg- / Grundwasser: verformte Entwässerungsleitungen infolge Sohlhebungen, Versinterungen <ul style="list-style-type: none"> Belastungsänderung Berg- / Grundwasser (S-41) Schadensprozess Abdichtung: aufgrund von Alter und von damals verbautem Standard weist Abdichtung heute keine vollständige Funktionstüchtigkeit mehr auf und gilt als undicht <ul style="list-style-type: none"> Beschädigung / Alterung Kunststoff (S-51)
Durchgeführte Untersuchungen (EP2; ID Untersuchungsmethoden)	<ul style="list-style-type: none"> Tragwerksversagen <ul style="list-style-type: none"> Versagen Gewölbe (GB-11) Versagen Fundation (GB-12) Versagen Zwischendecke (GB-13) 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)
	<ul style="list-style-type: none"> Visuelle Untersuchungen: Inspektionen, Hauptinspektion, Detaillierte visuelle Untersuchungen, Rissaufnahmen <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)

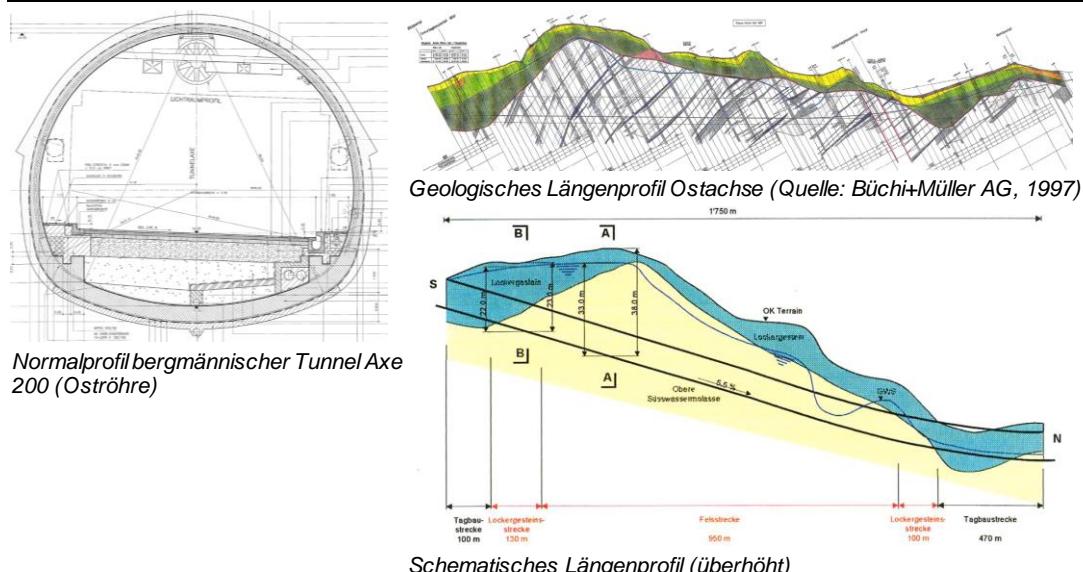
Tab. 7 FALLBEISPIEL NR. 6 Tunnel Belchen

	<ul style="list-style-type: none"> • Messtechnische Untersuchungen am Bauwerk: Gleitmikrometer, Nivellement, Dehmessungen über radial im Gewölbe versetzte Bolzen, Kraftmessdosen, Bohrkerne, Radarmessungen Firstgewölbe, Reibungseigenschaften Abdichtungsfolie • Nivellement (U-2-121) • Gleitmikrometer / Gleitdeformeter (U-2-131) • Ankerkraftmessung (U-2-232) • Sondieröffnung/Bewehrungsfenster (U-2-421) • Georadar (U-2-451) • Laborprüfungen: Druckfestigkeiten und E-Modul Betonproben, <ul style="list-style-type: none"> • Druckfestigkeit (U-3-211) • E-Modul-Bestimmung von Beton (U-3-223) • Statische, Geodätische und konstruktive Untersuchungen: Statische Nachrechnung Tragsicherheit Gewölbe und Sohlgewölbe, Bohrkernanalysen <ul style="list-style-type: none"> • Nachrechnungen Bauwerk / Bauwerksteil (U-4-110) • Sondierungen am Bauwerk (U-4-210)
Wirksamkeit der Untersuchungen (EP2)	<ul style="list-style-type: none"> • Rückrechnung der vorherrschenden Ausbauwiderstände • Abschätzung des vorliegenden Quellpotentials sowie der zu erwartenden Hebungsralten 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"> • erste Instandsetzung (2001–2003): Gesamtersatz von Fahrbahn, Bankett, Schlitzrinne, Werkleitungen und Hydrantenleitung, lokaler Teilersatz Gewölbe, Ersatz einzelner Sohlgewölbe in Hebungszone (halbseitiger Ersatz), Realisierung von Sickerschlitzten zur Unterbindung von Wasserzuflüssen in quellfähige Gebirgsschichten, lokale Betoninstandsetzung beschädigter Parametbereiche, Tunnelbeschichtung der Parameter im Fahrraum • Gewölbe: <ul style="list-style-type: none"> • Lokale Betoninstandsetzung (M-1210) • Ersatz Beschichtung (M-1350) • Entwässerungsschlitz einfach (M-1430) • Ersatz Innengewölbe (M-1510) • Sohlgewölbe: <ul style="list-style-type: none"> • Entwässerungsschlitz einfach (M-2530) • Ersatz Sohlgewölbe (M-2610) • Fahrbahn / Fahrbahnfundation: <ul style="list-style-type: none"> • Belagsersatz (Walzaspalt) (M-5400) • Bankett: <ul style="list-style-type: none"> • Bankettersatz mit Leitungen bzw. KSR im Bankett (M-6320) • Leitungen / Schächte: <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Lösch- und Entwässerungsleitung (M-7130) • Ersatz Kabelrohre (M-7140) • Ersatz Randsteine (M-7430) • Ersatz Schlitzrinne (M-7440) • Ersatz Siphonschacht (M-7520) • Ersatz Kontroll-/ Einlaufschächte (M-7530) • Ersatz Kabelschächte (M-7540) • Umgestaltungsmassnahmen und Massnahmen aufgrund von Erweiterungen, Ergänzungen, Grundnutzungs- oder Normänderungen: Gewährleistung Tunnelsicherheit Belchen (2009–2015)⁶: <ul style="list-style-type: none"> • Erweiterung Portalzentralen • Ersatz Abluftventilatoren

⁶ Gemäss Abgrenzung Instandsetzungsmassnahmen im Schlussbericht EP3, Kap. 1.6.2 [EP3]

Tab. 7 FALLBEISPIEL NR. 6 Tunnel Belchen

	<ul style="list-style-type: none"> Entfernung Zwischendecke in Portalbereiche und Einbau Strahlventilatoren neue Abluftstollen zwischen beiden Tunnelröhren
Wirksamkeit der bisherigen Massnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> fortlaufende lokale SoMa aufgrund bereits während Bau festgestellter Hebungen die trotz div. Instandsetzungsmassnahmen nicht abklingenden Schäden an bestehender Tragstruktur infolge der Quellprozesse machen Instandsetzung der bestehenden Röhren Belchen notwendig
Weitere geplante Instandsetzungsmassnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> Ersatz Zwischendecke, Neubau mit Abluftklappen zur Absaugung alle 100 m, Neubau Auflagerkonsolen für Zwischendecke Ersatz Sohlgewölbe inkl. Widerlager im quellfähigen Gebirge inkl. Übergangsbereich Instandsetzung oder Lokalersatz von kleinräumig, lokal beschädigter Firstbereiche des Gewölbes, Hinterfüllung / Kontaktinjektion von Hohlstellen zwischen Verkleidung und Gebirge, Teil- oder Totalersatz Firstbereich des Kalottengewölbes inkl. Abdichtung im Erneuerungsbereich bei Unterschreitung von Mindestgewölbestärke < 30 cm oder grossflächigen Schäden Instandsetzung oder Lokalersatz von räumig beschädigten Bereichen des Paraments Rückbau und Verfüllung asbesthaltiger Zuluftkanäle Fassung allfälliger Wasserzutritte und Ableitung in die neue Bergwassersammelleitung Ersatz Tunnelbeschichtung inkl. Untergrundvorbereitung Abbruch und Neubau aller Werkleitungen im Bankett- und Sohlbereich, Ausbildung von Trennsystem neue Kabelrohranlage unter Fahrbahn Neubau Fahrbahnaufbau inkl. Belag Herstellung neuer kombinierter SOS-/Hydrantennischen inkl. Leitungssystem, Anschluss befahrbare QV an Röhre BAS, Umbau best. Untertagzentralen, Neubau zusätzlicher begehbarer QV zwischen Röhre BAS und MIT, Rückbau und Aufweitung best. QV zwischen Röhre BAS und MIT, Umbau Portalzentralen Verfüllen des Kaminschachtes und Rückbau der Kopfgebäude Kamine I und III Instandsetzung Abluftstollen

Tab. 8 FALLBEISPIEL NR. 7 Tunnel Girsberg**Steckbrief Tunnelobjekt****Abb. 8** Quelle: Planarchiv ASTRA Filiale Winterthur**Abb. 9** Quelle: Elektrowatt AG, 1997

Tunneltyp	Bergmännischer Strassentunnel
Nationalstrasse / Kanton	A7, TG
Charakteristik	<ul style="list-style-type: none"> Mittelland (Molasse) Ländlich, geringes bis mässiges Verkehrsaufkommen
Länge	1.8 km
Jahr Inbetriebsetzung; Erneuerungen/ Gesamterneuerung	2002
Mittlere Höhe Überdeckung	ca. 455 m.ü.M. max. Überdeckung 30 m
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> Bergmännischer Tunnel hauptsächlich in der Oberen Süsswassermolasse (Wechsellagerungen von Sandsteinen, Mergelsandsteinen, Mergeln, Mergelkalken und Kalken) Lockergesteinsstrecken Nord und Süd (Moräne) Grundwasserspiegel max. 23 m über OK Tunnel Wasserführende Schichten im Molassefels und Lockergestein
Tunnelanlage Typ, Verkehrsregime	<ul style="list-style-type: none"> 2 Röhren à 2 Spuren Richtungsverkehr Begehbarer und befahrbare Querverbindungen Portalzentralen Nord und Süd
Zwischendecke / Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> Keine Zwischendecke Längslüftung mit Strahlventilatoren für Unterhaltsbetrieb und Brandfall
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> Trennsystem
Bauweise bergm. Tunnel:	<ul style="list-style-type: none"> Ausbruchverfahren: Kalottenvortrieb Profilform: Hufeisenprofil mit Sohlgewölbe Bauart Verkleidung: <ul style="list-style-type: none"> Aussengewölbe: Spritzbeton (20–30 cm) Sohlgewölbe: Stahlbeton (50 cm) Innengewölbe: Beton unbewehrt (30 cm) Abdichtungskonzept: Vollabdichtung

Tab. 8 FALLBEISPIEL NR. 7 Tunnel Girsberg

Längsneigung	<ul style="list-style-type: none"> bergmännische Strecke: 3.2–5.5%
Eignung als Fallbeispiel	<ul style="list-style-type: none"> ausführliche Bauwerksdokumentation vorhanden erste ÜMA + SOMA ausgeführt u.a. aufgrund von unkontrollierten Wassereintritten in den Fahrbahnbereich
Objektspezifische Erhaltungsplanung	
Visuelle Befunde (EP1; ID visuelle Befunde)	<ul style="list-style-type: none"> Mechanische Integrität: Risse im Innengewölbe <ul style="list-style-type: none"> Risse (BE-1300) Undichtigkeiten: Wassereintritte und Versinterungen am Innengewölbe durch Risse und Blockfugen <ul style="list-style-type: none"> Undichtigkeit (BE-3000)
Erkannte Schadensprozesse (EP1; ID Schadensprozesse)	<ul style="list-style-type: none"> Schadensprozess Baugrund: Risse im Innengewölbe: <ul style="list-style-type: none"> Belastungsänderung Baugrund (S-31) Schadensprozess Abdichtung: <ul style="list-style-type: none"> Beschädigung / Alterung Kunststoff (S-51)
Mögliche Gefährzungsbilder (EP1; ID Gefährzungsbilder)	<ul style="list-style-type: none"> Tragwerksversagen <ul style="list-style-type: none"> Versagen Gewölbe (GB-11) Betriebssicherheit <ul style="list-style-type: none"> unzulässige Verformungen Tragwerk (GB-21) Feuchtigkeit / Eisbildung (GB-24)
Durchgeführte Untersuchungen (EP2; ID Untersuchungsmethoden)	<ul style="list-style-type: none"> Visuelle Untersuchungen: Inspektionen, Hauptinspektion, Detaillierte visuelle Untersuchungen: <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) Messtechnische Untersuchungen am Bauwerk: Rissmessungen Innengewölbe <ul style="list-style-type: none"> Händische Messung (U-2-111) Statische, Geodätische und konstruktive Untersuchungen: Sondieröffnung und Versickerungsversuch Kieskoffer <ul style="list-style-type: none"> Sondierungen am Bauwerk (U-4-210) Absenk-, Anstiegs- und Versickerungsversuche (U-4-222)
Wirksamkeit der Untersuchungen (EP2)	<ul style="list-style-type: none"> Sicherstellung, dass mit Instandsetzungsmassnahmen die Betriebssicherheit gewährleistet ist. Durch Beobachtung Verifizierung Wirksamkeit der Massnahmen und Eruierung ergänzender Massnahmen
Durchgeführte Massnahmen (EP3; ID Massnahmen)	<ul style="list-style-type: none"> Gewölbe: Aufbringen Fugenbänder bei wasserführenden Rissen und Blockfugen, zus. Begleitheizband und Blechabdeckungen der Blockfugen <ul style="list-style-type: none"> Entwässerungsschlitz einfach (M-1430) Blockfugen abdichten erweitert (M-1460) Umgestaltungsmassnahmen und Massnahmen aufgrund von Erweiterungen, Ergänzungen, Grundnutzungs- oder Normänderungen⁷: <ul style="list-style-type: none"> Einleiten der Wasserfassungen in Schlitzrinne bzw. mittels neu erstellter Querleitung in Fahrraumentwässerung

⁷ Gemäss Abgrenzung Instandsetzungsmassnahmen im Schlussbericht EP3, Kap. 1.6.2 [EP3]

Tab. 8 FALLBEISPIEL NR. 7 Tunnel Girsberg

Wirksamkeit der bisherigen Massnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none">• Sicherstellung Betriebssicherheit durch Vermeidung von Wasser auf der Fahrbahn (Reduktion Risiko für Aquaplaning oder Eisbildung)
Weitere geplante Instandsetzungsmassnahmen (EP3)	-

Tab. 9 FALLBEISPIEL NR. 8 Sonnenbergtunnel

Steckbrief Tunnelobjekt

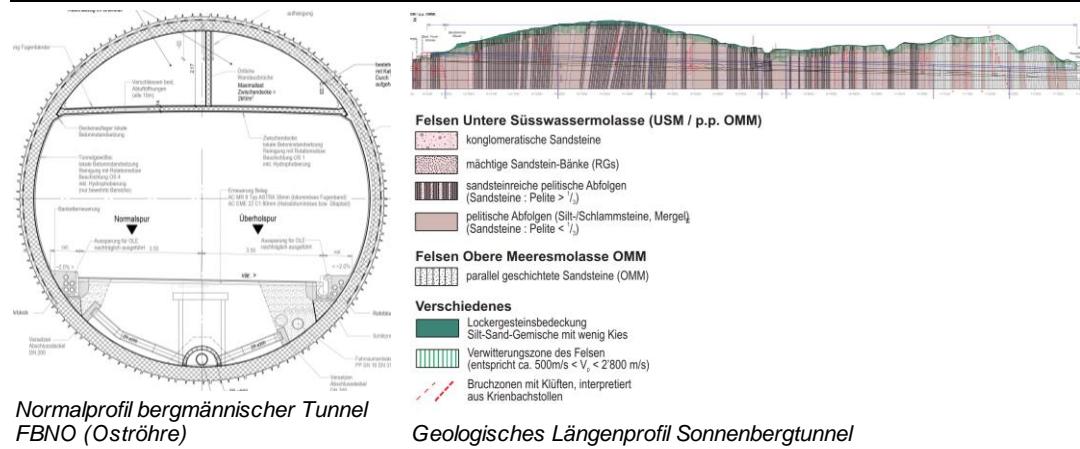


Abb. 10 Quelle: DAW Cityring
Luzern, EBP Schweiz AG

Abb. 11 Quelle: Mengis + Lorenz AG, 2006

Tunneltyp	Bergmännischer Strassentunnel
Nationalstrasse / Kanton	A2, LU
Charakteristik	<ul style="list-style-type: none"> • Voralpin, Molasse • Innerstädtisch, DTV > 60'00
Länge	1.6 km
Jahr Inbetriebsetzung; Erneuerungen/ Gesamterneuerung	1976; Bau neuer Werkleitungsstollen (inkl. Löschwasserleitung) und Querverbindungen, Umbau Tunnellüftung inkl. Zentralen: 2007–2009 / Gesamterneuerung: 2009–2013
Mittlere Höhe Überdeckung	ca. 435 m.ü.M. max. Überdeckung 120 m
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> • Abschnitt Nord (ca. 1.3 km): Unteren Süßwassermolasse (weicher Sandstein, in Wechsellagerung mit Mergel und Kalkmergel; dazwischen Nagelfluhbänke und stellenweise Nester von Glanzkohle) • Abschnitt Süd (ca. 0.3 km): Obere Meeresmolasse (hauptsächlich Luzerner Sandstein mit dünnen Mergelzwischenlagen) • Grundwasserspiegel max. ca. 90 m über OK Tunnel • Bergwasser nur in der Verwitterungszone des Felsens (stark abhängig von Anzahl und Ausmass der Klüfte)
Tunnelanlage Typ, Verkehrsregime	<ul style="list-style-type: none"> • 2 Röhren à 2 Spuren • Richtungsverkehr • Begehbarer und befahrbare Querverbindungen • Tunnelzentralen Nord, Mitte und Süd • Paralleler Werkleitungsstollen mittig über den Tunnelröhren, Verbindung zu den Querverbindungen via Vertikalstollen
Zwischendecke / Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Längslüftung mit punktueller Absaugung im Ereignisfall über Rauchabzugsklappen mit Abzug via mittigem Abluftkamin (nach Gesamterneuerung 2009–2013) • Tragsystem Zwischendecke: Zweifeldträger mit seitlichen Auflagern und mittiger Aufhängung (an Trennwand Zu-/Abluftkanal)
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> • Trennsystem (nach Gesamterneuerung 2009–2013)
Bauweise bergm. Tunnel:	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbruchverfahren: mit Aufweitungsmaschine • Profilform: Kreisprofil • Bauart Verkleidung: <ul style="list-style-type: none"> • Aussengewölbe: Spritzbeton (10 cm)

Tab. 9 FALLBEISPIEL NR. 8 Sonnenbergtunnel

Längsneigung	<ul style="list-style-type: none"> • Innengewölbe: Beton unbewehrt (40 cm), kurze Strecke (35 m) ab Tunnelzentrale Nord bewehrt • Abdichtungskonzept: Gewölbe-Abdichtung (Ableitkonzept)
Eignung als Fallbeispiel	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamterneuerung mit umfassenden Massnahmen 2009–2013 • Instandsetzung unter Betrieb
Objektspezifische Erhaltungsplanung	
Visuelle Befunde (bis 2009) (EP1; ID visuelle Befunde)	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Integrität: Risse im Innengewölbe und Abplatzungen Randstein, Schlitzrinne und Schachtrahmen, sowie der Fugenkanten Innengewölbe; schlechte Korneinbettung und Kornausbrüche im Belag, Belagsausbrüche bei Kontrollschrägen; lose Schachtdeckel <ul style="list-style-type: none"> • Risse (BE-1300) • Abplatzung (BE-1400) • Belagsschäden (BE-1500) • Chemische Integrität und Zusammensetzung: Rostflecken und freiliegende, korrodierte Bewehrung an Trennwand Abluftkanal, Korrosion der Aufhängestangen der Trennwand, korrodierte Schachtdeckel und SOS-Stahlblechkästen <ul style="list-style-type: none"> • Korrosion (BE-2100) • Undichtigkeiten: Wassereintritte und Versinterungen am Innengewölbe durch Risse, Blockfugen sowie Längsfuge der Zwischendecke <ul style="list-style-type: none"> • Undichtigkeit (BE-3000)
Erkannte Schadensprozesse (EP1; ID Schadensprozesse)	<ul style="list-style-type: none"> • Schadensprozess Stahlbeton: Bewehrungskorrosion Trennwand Abluftkanal und Wände Tagbau, Abplatzungen Randstein, Schlitzrinnen und Schachtrahmen, sowie Fugenkanten: <ul style="list-style-type: none"> • Bewehrungskorrosion (S-11) • Betonangriff / Gefügezerstörung (S-12) • Schadensprozess Baustahl: Korrosion Aufhängestangen der Trennwand und korrodierte Schachtdeckel und SOS-Stahlblechkästen: <ul style="list-style-type: none"> • Metallkorrosion (S-21) • Schadensprozess Baugrund: Risse im Innengewölbe: <ul style="list-style-type: none"> • Belastungsänderung Baugrund (S-31) • Schadensprozess Abdichtung: <ul style="list-style-type: none"> • Beschädigung / Alterung Kunststoff (S-51)
Mögliche Gefährdungsbilder (EP1; ID Gefährdungsbilder)	<ul style="list-style-type: none"> • Tragwerksversagen <ul style="list-style-type: none"> • Versagen Gewölbe (GB-11) • Versagen Zwischendecke (GB-13) • Versagen Aufhängungen (GB-15) • 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 Untersuchungen: Inspektionen, Hauptinspektion, Detaillierte visuelle Untersuchungen, 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)

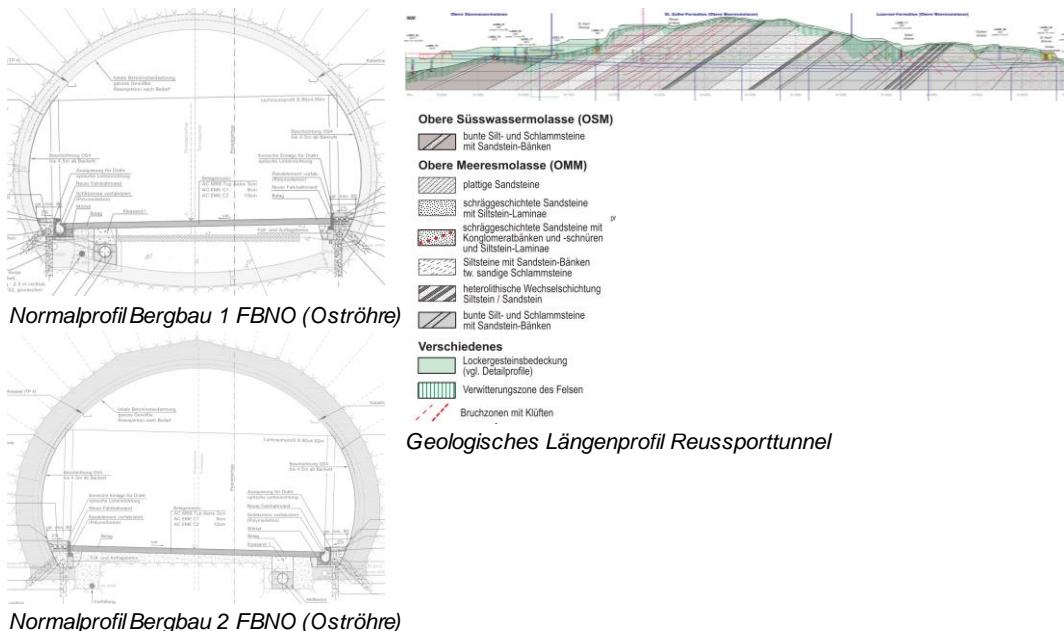
Tab. 9 FALLBEISPIEL NR. 8 Sonnenbergtunnel

	<ul style="list-style-type: none"> • Messtechnische Untersuchungen am Bauwerk: Rissmessungen Innengewölbe; Bewehrungsüberdeckungsmessungen und Messung Karbonatisierungstiefe (lokal), Messung Bergwasseranfall <ul style="list-style-type: none"> • Händische Messung (U-2-111) • Messung Wasseranfall/Durchflussmenge händisch (U-2-331) • Karbonatisierungsmessung am Bauwerk (U-2-411) • Wirbelstromverfahren (Betonüberdeckungsmessung) (U-2-455) • Laborprüfungen: Chloridanalysen Zwischendecke und Wände Tagbau, Druckfestigkeitsprüfung Beton Wände Tagbau, Schadstoffanalyse Belag, Sondierbohrungen für Bestimmung Gesteinskörnung des Kieskoffers <ul style="list-style-type: none"> • Chloridanalyse (U-3-111) • Druckfestigkeit (U-3-211) • Siebkurve (U-3-333) • Asbest (U-3-542) • PAK (U-3-543) • Statische, Geodätische und konstruktive Untersuchungen: Statische Nachrechnung Tragsicherheit Zwischendecke (u.a. bzgl. neuem Lüftungssystem mit neuen Abluftklappen); Sondierung best. Entwässerung <ul style="list-style-type: none"> • Nachrechnungen Bauwerk / Bauwerksteil (U-4-110) • Sondierungen am Bauwerk (U-4-210)
Wirksamkeit der Untersuchungen (EP2)	<ul style="list-style-type: none"> • Festlegung Massnahmen zur Sicherung der Zwischendecke • Visuelle Inspektionen und detaillierte Untersuchungen lieferten relevante Inputs für Festlegung Eingriffstiefe und Ausmass der Instandsetzungsmassnahmen im Rahmen der Gesamterneuerung (2009-2013)
Durchgeführte Massnahmen (EP3, ID Massnahmen)	<p>Massnahmen der Gesamterneuerung 2009–2013:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gewölbe: lokale Betoninstandsetzungen, bereichsweise vollflächige Betoninstandsetzung Wände Tagbau, Erneuerung Tunnelbeschichtung, Ableitung Wassereintritte mittels Abdichtung der Blockfugen <ul style="list-style-type: none"> • Reprof. mit Bew.instandsetzung (M-1230) • Reprof. mit Bew.ersatz /- zulage (M-1240) • Ersatz Beschichtung (C) (M-1350) • Blockfugen abdichten erweitert (M-1460) • Zwischendecke: lokale Betoninstandsetzung, Erneuerung Beschichtung OS1 inkl. Hydrophobierung, Austausch bzw. Ergänzung der Hängestangen und Aufhängung der Trennwand Zwischendecke, lokaler Ersatz Zwischendecke (vor den Panzertorbereichen) <ul style="list-style-type: none"> • Reprof. ohne Bew.ersatz (M-3210) • Erneuerung Imprägnierung (I) (M-3420) • Sicherung durch Aufhängungen (Zuganker resp. Schweizer Riegel) (M-3510) • Ersatz der Aufhängungen (Zuganker resp. Schweizer Riegel) (M-3520) • Ersatz Zwischendecke (M-3610) • Fahrbahn / Fahrbahnfundation: Teilersatz des Belages (Deckschicht und oberste HMT) <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Deckbelag (M-5310) • Ersatz Binderschicht (M-5320) • Bankett: Ersatz Bankett inkl. Randsteine und Schlitzrinnen <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Bankett mit Leitungen resp. KSR im Bankett (M-6320) • Leitungen / Schächte: Ausbau Kontrollsäume Abwasserleitung aus Fahrbahnmitte, Erstellung neue Siphonschächte, neue Kontrollsäume Bergwasserleitung im Bankett und Kabelschächte <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Siphonschacht (M-7520) • Ersatz Kontroll-/ Einlaufschächte (M-7530) • Ersatz Kabelschächte (M-7540)

Tab. 9 FALLBEISPIEL NR. 8 Sonnenbergtunnel

	<ul style="list-style-type: none"> • Umgestaltungsmassnahmen und Massnahmen aufgrund von Erweiterungen, Ergänzungen, Grundnutzungs- oder Normänderungen⁸: <ul style="list-style-type: none"> • Erstellung SOS-Nischen • Erstellung neue Abwasserleitung für das Betriebswasser • Rückbau verschiedener Anlageteile der bisherigen Grossschutzraum-anlage
Wirksamkeit der bisherigen Massnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> • Gewährleistung der Tragsicherheit (Sicherung Aufhängung Zwischendecke, Betoninstandsetzung inkl. wo nötig Bewehrungersatz) und der Gebrauchstauglichkeit (Ableitung eindringendes Bergwasser, Ersatz Bankette und Schachtabdeckungen) • Erhöhung Betriebssicherheit (Ersatz Deckbelag, neue Beschichtung der Tunnelwände, Aufhebung Schächte auf Fahrbahn)
Weitere geplante Instandsetzungsmassnahmen (EP3)	-

⁸ Gemäss Abgrenzung Instandsetzungsmassnahmen im Schlussbericht EP3, Kap. 1.6.2 [EP3]

Tab. 10 FALLBEISPIEL NR. 9 Reussporttunnel**Steckbrief Tunnelobjekt****Abb. 12** Quelle: DAW Cityring Luzern, Locher AG**Abb. 13** Quelle: Mengis + Lorenz AG, 2006

Tunneltyp	Bergmännischer Strassentunnel
Nationalstrasse / Kanton	A2, LU
Charakteristik	<ul style="list-style-type: none"> • Voralpin, Molasse • Innerstädtisch, DTV > 90'00
Länge	0.8 km
Jahr Inbetriebsetzung; Erneuerungen/ Gesamterneuerung	1974; Bau neuer Werkleitungsstollen (inkl. Löschwasserleitung) und Erweiterung und Umgestaltung TZR Süd, Umbau Tunnellüftung: 2007–2009 / Gesamterneuerung: 2009–2013
Mittlere Höhe Überdeckung	ca. 435 m.ü.M. max. Überdeckung 35 m
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> • Bergmännischer Tunnel: Obere Meeressmolasse <ul style="list-style-type: none"> • Südbereich (ca. 200 m): harter Luzerner Sandstein (max. Überdeckung: 10 m) • Nordbereich (ca. 400 m): Wechsellagerung von Mergel und Sandstein (subalpine Masse) (max. Überdeckung 35 m) • Zwischen Süd- und Nordbereich liegt Tagbaubereich Spitalstrasse • Grundwasserspiegel max. ca. 28 m über OK Tunnel • Bergwasser nur in der Verwitterungszone des Felsens (stark abhängig von Anzahl und Ausmass der Klüfte)
Tunnelanlage Typ, Verkehrsregime	<ul style="list-style-type: none"> • 2 Röhren à 3 Spuren • Richtungsverkehr • Begehbarer Querverbindungen • Tunnelzentralen Nord und Süd • Paralleler Werkleitungsstollen mittig unter den Tunnelröhren, Verbindung zu den Querverbindungen via Vertikalstollen
Zwischendecke / Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Zwischendecke • Längslüftung mit Strahlventilatoren für Unterhaltsbetrieb und Brandfall
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> • Trennsystem (nach Gesamterneuerung 2009–2013)

Tab. 10 FALLBEISPIEL NR. 9 Reussporttunnel

Bauweise bergm. Tunnel:	<ul style="list-style-type: none"> Ausbruchverfahren: Stollenvortrieb mit TBM (je Röhre 3x d=3.5 m), anschliessend Aufweitung mittels Sprengvortrieb Profilform: <ul style="list-style-type: none"> Bergbau 1: Maulprofil Bergbau 2: Hufeisenprofil, ohne Sohlgewölbe Bauart Verkleidung: <ul style="list-style-type: none"> Aussengewölbe: bewehrter Spritzbeton (gemäss Aufnahmen: 37–48 cm), teilweise mit Stahleinbaubögen Innengewölbe: Beton unbewehrt (35 cm) Abdichtungskonzept: Gewölbe-Abdichtung (Ableitkonzept)
Längsneigung	<ul style="list-style-type: none"> bergmännische Strecke: ca. 1.2%
Eignung als Fallbeispiel	
	<ul style="list-style-type: none"> Gesamterneuerung mit umfassenden Massnahmen 2009–2013 Instandsetzung unter Betrieb
Objektspezifische Erhaltungsplanung	
Visuelle Befunde (bis 2009) (EP1; ID visuelle Befunde)	<ul style="list-style-type: none"> Mechanische Integrität: Risse im Innengewölbe und Abplatzungen Randstein, Schlitzrinne und Schachtrahmen, sowie der Fugenkanten Innengewölbe; schlechte Korneinbettung und Kornausbrüche im Belag <ul style="list-style-type: none"> Risse (BE-1300) Abplatzung (BE-1400) Belagsschäden (BE-1500) Chemische Integrität und Zusammensetzung: Rostflecken und freiliegende, korrodierte Bewehrung Wände Tagbau, korrodierte Schachtdeckel und SOS-Stahlblechkästen <ul style="list-style-type: none"> Korrosion (BE-2100) Undichtigkeiten: Wassereintritte und Versinterungen am Innengewölbe durch Risse und Blockfugen <ul style="list-style-type: none"> Undichtigkeit (BE-3000)
Erkannte Schadensprozesse (EP1; ID Schadensprozesse)	<ul style="list-style-type: none"> Schadensprozess Stahlbeton: Bewehrungskorrosion Wände Tagbau, Abplatzungen Randstein, Schlitzrinnen und Schachtrahmen, sowie Fugenkanten: <ul style="list-style-type: none"> Bewehrungskorrosion (S-11) Betonangriff / Gefügezerstörung (S-12) Schadensprozess Baustahl: korrodierte Schachtdeckel und SOS-Stahlblechkästen: <ul style="list-style-type: none"> Metallkorrosion (S-21) Schadensprozess Baugrund: Risse im Innengewölbe: <ul style="list-style-type: none"> Belastungsänderung Baugrund (S-31) Schadensprozess Abdichtung: <ul style="list-style-type: none"> Beschädigung / Alterung Kunststoff (S-51)
Mögliche Gefährdungsbilder (EP1; ID Gefährdungsbilder)	<ul style="list-style-type: none"> Tragwerksversagen <ul style="list-style-type: none"> Versagen Gewölbe (GB-11) 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 Untersuchungen: Inspektionen, Hauptinspektion, Detaillierte visuelle Untersuchungen, 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)

Tab. 10 FALLBEISPIEL NR. 9 Reussporttunnel

	<ul style="list-style-type: none"> • Messtechnische Untersuchungen am Bauwerk: Dickenbestimmung Tunnelschale, Rissmessungen Innengewölbe, Bewehrungsüberdeckungs-messungen und Messung Karbonatisierungstiefe (lokal) <ul style="list-style-type: none"> • Händische Messung (U-2-111) • Karbonatisierungsmessung am Bauwerk (U-2-411) • Georadar (U-2-451) • Wirbelstromverfahren (Betonüberdeckungsmessung) (U-2-455) • Laborprüfungen: Chloridanalysen Wände Tagbau, Schadstoffanalyse Belag, Untersuchung Bergwasser <ul style="list-style-type: none"> • Chloridanalyse (U-3-111) • Chem. Zusammensetzung Wasser (U-3-520) • Asbest (U-3-542) • PAK (U-3-543) • Statische, Geodätische und konstruktive Untersuchungen: Statische Überprüfung Tragsicherheit bergmännischer Tunnel <ul style="list-style-type: none"> • Nachrechnungen Bauwerk / Bauwerksteil (U-4-110)
Wirksamkeit der Untersuchungen (EP2)	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektionen und detaillierte Untersuchungen lieferten relevante Inputs für Festlegung Eingriffstiefe und Ausmass der Instandsetzungsmassnahmen im Rahmen der Gesamtemeuerung (2009-2013)
Durchgeführte Massnahmen (EP3, ID Massnahmen)	<p>Massnahmen der Gesamterneuerung 2009-2013:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gewölbe: lokale Betoninstandsetzungen, bereichsweise vollflächige Betoninstandsetzung Wände Tagbau, Erneuerung Tunnelbeschichtung, Ableitung Wassereintritte mittels Abdichtung der Blockfugen <ul style="list-style-type: none"> • Reprof. mit Bew.instandsetzung (M-1230) • Reprof. mit Bew.ersatz /- zulage (M-1240) • Ersatz Beschichtung (C) (M-1350) • Blockfugen abdichten erweitert (M-1460) • Fahrbahn / Fahrbahnfundation: Ersatz Belag <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Deckbelag (M-5310) • Ersatz Binderschicht (M-5320) • Ersatz Tragschicht (M-5330) • Bankett: Ersatz Bankett inkl. Randsteine und Schlitzrinnen <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Bankett mit Leitungen resp. KSR im Bankett (M-6320) • Leitungen / Schächte: Ersatz Abwasserleitung für das Betriebswasser, Ausbau Kontrollschräfte Abwasserleitung aus Fahrbahn, Erstellung neue Siphonschächte, neue Kontrollschräfte Bergwasserleitung im Bankett und Kabelschächte <ul style="list-style-type: none"> • Ersatz Entwässerungsleitung (M-7330) • Ersatz Siphonschacht (M-7520) • Ersatz Kontroll-/ Einlaufschächte (M-7530) • Ersatz Kabelschächte (M-7540) • Umgestaltungsmassnahmen und Massnahmen aufgrund von Erweiterungen, Ergänzungen, Grundnutzungs- oder Normänderungen⁹: <ul style="list-style-type: none"> • Erstellung neues Gewölbedrainagesystem mittels Entlastungsbohrungen und Auffüllung mit Sickerkies • Erstellung SOS-Nischen • Verfüllung Stollen Geschützte Operationsstelle (Rückbau Zivilschutz-anlage)

⁹ Gemäss Abgrenzung Instandsetzungsmassnahmen im Schlussbericht EP3, Kap. 1.6.2 [EP3]

Tab. 10 FALLBEISPIEL NR. 9 Reussporttunnel

Wirksamkeit der bisherigen Massnahmen (EP3)	<ul style="list-style-type: none"> • Gewährleistung der Tragsicherheit (Betoninstandsetzung inkl. wo nötig Bewehrungsersatz und Entlastung Gewölbe durch neue Gewölbedrainage) und der Gebrauchstauglichkeit (Ableitung eindringendes Bergwasser, Ersatz Bankette und Schachtabdeckungen) • Erhöhung Betriebssicherheit (Belagsersatz, neue Beschichtung der Tunnelwände, Aufhebung Schächte auf Fahrbahn)
Weitere geplante Instandsetzungsmassnahmen (EP3)	-

II Übersicht 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 (Weg-aufnehmer)	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 Längsebene 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	Streufeldmethode / Streufeldmessung	
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 Karstenröhren	
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 (ergänzend)	
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 (Wöhlersversuch)	
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 (Frostwechselverhalten)	
U-3-342	Frost-Tausalzwiderstand (Frostwechselverhalten)	
U-3-342	Chloridwiderstand	
U-3-343	Karbonatisierungswiderstand	
U-3-344	Sulfatwiderstand	
U-3-351	Wasserleitfähigkeit bzw.-dichtigkeit	
U-3-352	Porenkennwerte bzw. Wasserleitfähigkeit	

Tab. 1 Übersicht U.-Katalog

ID U.	U. Bezeichnung	Katalogblatt (Anhang A3)
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 Karstenröhren	
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 BELASTUNGSSUCHE	
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	

III Katalogblätter bewährter Untersuchungsmethoden (USM)

Tab. 1 Katalogblatt 01

Visuelle Inspektionen	ID-U-Code: U-1-100:
<ul style="list-style-type: none"> • Sichtkontrolle (Betrieb / Unterhalt) • Hauptinspektion visuell • Zwischeninspektion visuell • Visuelle Inspektion Fachspezialist:in • Sichtkontrolle detailliert, lokal 	<ul style="list-style-type: none"> • U-1-110 • U-1-121 • U-1-122 • U-1-123 • U-1-131

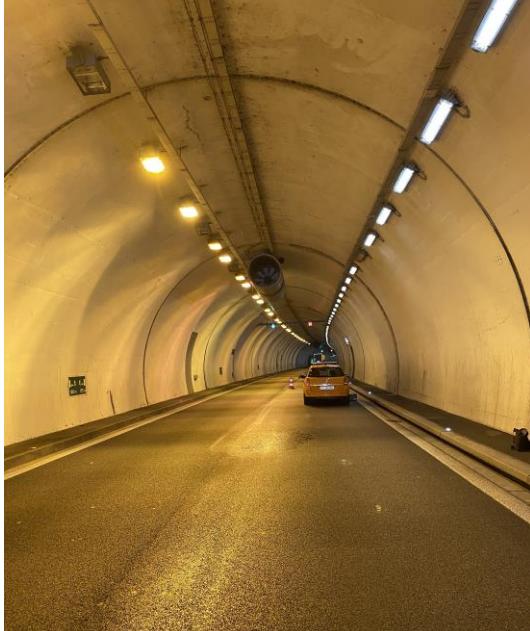



Abb. 1 Quelle links: Tunnel Girsberg 2020 (EBP Schweiz AG), Quelle rechts: Abluftkanal Gubristtunnel 2013 (EBP Schweiz AG)**Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

Systematische optische Aufnahme des Bauwerkzustands, Feststellung von Schäden, gegliedert auf Stufe Bauwerksteil; Intervall und Detaillierungsgrad der Aufnahmen abhängig vom Typ der Inspektion

Zerstörungsfrei: Ja

Typ Untersuchungsmethode: Visuelle Untersuchung (1)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Alle Bauarten
USM geeignet für Phase Überwachung: ja	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): nein
Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
ID-BE-Code: <ul style="list-style-type: none"> • BE-1100 Setzungen /Verschiebungen / Verformungen • BE-1200 Fugenversätzen, -öffnungen, Kantenbrüchen • BE-1300 Risse • BE-1400 Abplatzungen • BE-1500 Belagsschäden • BE-2100 Korrosion • BE-3000 Undichtigkeit • BE-4200 Ausfällung / Versinterung 	ID-S-Code: <ul style="list-style-type: none"> • 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): Unregelmässigkeit, Vorhandensein und Ausmass von Schäden, teilweise fokussiert auf Einzelschäden mit detaillierter Auswertung	Erfasste Masseinheit (LE): 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)	Genauigkeit und Grenzen: Resultat stark abhängig von der inspizierenden Person
Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand: • Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD oben: Abschaltung Tunnellüftung; ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen)
ID-U-Code: • U-1-211 Visuelle Aufnahme; Einzelbilder • U-2-161 Rissmessungen, Distometer • U-2-211 Abklopfen	Kosten: • U-1-110 / U-1-121 / U-1-122: Preisklasse PK1 ¹ (10 - 99 CHF/MQ ²) • U-1-123 / U-1-131: Preisklasse PK2 ³ (100 - 499 CHF/MQ)
Normen und Literatur: • Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1] • Instandsetzung von Betonbauwerken [6]	Fallbeispiele: Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre Nr. 2 Seelisbergtunnel Nr. 3 Kerenzerbergtunnel Nr. 4 Gotschnatunnel Nr. 5 Gubristtunnel Nr. 6 Tunnel Belchen Nr. 7 Tunnel Girsberg Nr. 8 Sonnenbergtunnel Nr. 9 Reussporttunnel
Anbieter: Ingenieurbüros / Unterhaltsdienst (GE)	Verwandte USM: -

¹ Grössenordnung der Kosten unter Annahme, dass ganze Tunnellänge aufgenommen wird² MQ: Messquerschnitt (= Gesamtquerschnitt über Länge von 5 m)³ Annahme, dass nur einzelne Messquerschnitte detailliert aufgenommen werden

Tab. 2 Katalogblatt 02

Visuelle Aufnahmen, Einzelbilder	ID-U-Code: U-1-211
Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis): Fotoaufnahmen	
Zerstörungsfrei: Ja	
Typ Untersuchungsmethode: Visuelle Untersuchung (1)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Alle Bauarten
USM geeignet für Phase Überwachung: ja	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): Bedingt (mit fix installierter Kamera, mit Sicherstellung Stromversorgung)
Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
ID-BE-Code: <ul style="list-style-type: none"> • BE-1000 Mechanische Integrität • BE-1200 Fugenversätzen, -öffnungen, Kantenausbrüchen • BE-1300 Risse • BE-1400 Abplatzungen • BE-1500 Belagsschäden • BE-2100 Korrosion • BE-3000 Undichtigkeit • BE-4200 Ausfällung / Versinterung 	ID-S-Code: <ul style="list-style-type: none"> • 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): Unregelmässigkeit, Vorhandensein und Ausmass von - Schäden	Erfasste Masseinheit (LE):
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: qualitativ	Genauigkeit und Grenzen: Bildaufnahmen von den Lichtverhältnissen und der Auflösung der Kamera, sowie von der inspizierenden Person abhängig
Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:
ID-U-Code: <ul style="list-style-type: none"> • U-2-161 Rissmessungen, Distometer • U-2-211 Abklopfen 	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD oben: Abschaltung Tunnellüftung; ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen) Kosten: <ul style="list-style-type: none"> • vgl. mit Aufwand / Kosten U-1-100 (Tab. 1)
Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1] 	<ul style="list-style-type: none"> Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre Nr. 2 Seelisbergtunnel Nr. 3 Kerenzerbergtunnel Nr. 4 Gotschnatunnel Nr. 5 Gubristtunnel Nr. 6 Tunnel Belchen Nr. 7 Tunnel Girsberg Nr. 8 Sonnenbergtunnel Nr. 9 Reussporttunnel
Anbieter: Ingenieurbüros, Prüflabore	Verwandte USM: -

Tab. 3 Katalogblatt 03

Kanal-TV (inkl. Einsehen Kontrollöffnungen und Schächte)	ID-U-Code: U-1-214 / U-1-221
	
Abb. 2 Quelle links: Gubristtunnel 2019 (Franz Pfister AG), Quelle rechts Gubristtunnel 2019 (Franz Pfister AG)	
Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis): Videoaufnahme von Leitungen inkl. Vermessung der Innenkonturen Visuelle Zustandsaufnahme von Kontrollöffnungen und Schächten inkl. Protokollierung	
Zerstörungsfrei: Ja	
Typ Untersuchungsmethode: Visuelle Untersuchung (1)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Alle Bauarten
USM geeignet für Phase Überwachung: ja	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): Bedingt (mit fix installierter Kamera, mit Sicherstellung Stromversorgung)
Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
ID-BE-Code: <ul style="list-style-type: none"> • BE-1100 Setzungen /Verschiebungen / Verformungen • BE-1300 Risse • BE-1400 Abplatzungen • BE-3000 Undichtigkeit • BE-4100 Querschnittsverluste in Leitungen (Entw.) • BE-4200 Ausfällungen / Versinterungen 	ID-S-Code: <ul style="list-style-type: none"> • S-31 Belastungsänderung Baugrund • S-41 Belastungsänderung Berg-/ Grundwasser • S-5 Schadensprozess Abdichtung
Messgrösse (vgl. Katalog MEGR): Unregelmässigkeit, Vorhandensein von: Schäden (Ablagerungen, Rissen etc.)	Erfasste Masseinheit (LE): Zustandsklassen: ZK0: sehr starke Mängel ZK1: starke Mängel ZK2: Mittlere Mängel ZK3: leichte Mängel ZK4: keine Mängel
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: qualitativ (Zuweisung Zustandsklasse), teilweise quantitativ (z.B. Messung von Risslängen bei Auswertung)	Genauigkeit und Grenzen: lückenlose Aufnahme von Leitungsgeometrie und Schadensausmass (z.B. Versinterungen) abhängig Resultat abhängig von der Zugänglichkeit und Sichtsituation sowie von der inspizierenden Person

Ergänzende USM / Kombinationen von USM: ID-U-Code: -	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand: <ul style="list-style-type: none"> • Zugänglichkeit der Leitungen (evtl. Tunnelsperrungen erforderlich) • Evtl. Leistungen Unterhaltspersonal erforderlich (z.B. für Öffnung der Schächte) Kosten: <ul style="list-style-type: none"> • U-1-214: Preisklasse PK1 (10 - 99 CHF/MQ)⁴ • U-1-221: Preisklasse PK2 (100 - 500 CHF/MQ)⁵
Normen und Literatur: Anbieter: Kanalreinigungsfirmen	Fallbeispiele: Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre Nr. 2 Seelisbergtunnel Nr. 3 Kerenzerbergtunnel Nr. 4 Gotschnatunnel Nr. 5 Gubristtunnel Nr. 8 Sonnenbergtunnel Nr. 9 Reussporttunnel
	Verwandte USM: -

⁴ MQ: Messquerschnitt (= Gesamtquerschnitt über Länge von 5 m)
Annahme: Aufnahme MQ umfasst Bergwasser- und Betriebswasserleitung; Randbedingung Aufwand: ganze Tunnellänge wird aufgenommen

⁵ Aufnahme von einem Schacht pro MQ inkl. Dokumentation; Größenordnung der Kosten unter Annahme, dass ganzer Tunnel, d.h. mehrere Schächte aufgenommen werden

Tab. 4 Katalogblatt 04

Riss- und Deformationsmessungen (Einzelmessungen, u.a. händisch):	ID-U-Code:
<ul style="list-style-type: none"> • Händische Messung • Nivellement • Invardrahtmessung • Rissmessungen, Kontrolle Gipssiegel 	<ul style="list-style-type: none"> • U-2-111 • U-2-121 • U-2-161 • U-2-162
Abb. 3 Quelle links Gubristtunnel 2010 (EBP Schweiz AG), Quelle rechts: Messquerschnitt aus Bericht Deformationsmessung Abluftkanal Gubristtunnel mit Invardrahtmessung (Distometer), 6. Folgemessung, 27.03.2015 (Amberg Technologies AG)	
Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis): Händische Messungen für Überprüfung der Geometrie, Ausmass von Schadstellen wie Rissen, Feuchtstellen, Kiesnestern, Abplatzungen etc.:	
<ul style="list-style-type: none"> • U-2-111: mit Doppelmeter / Massband / Distometer / Rissmassstab / Risslupe • U-2-121: Vermessung Höhenunterschied, Neigung, optisch oder mit Schlauchwaage; bei wiederholter Messung auch vertikale Verschiebungen • U-2-161: Messung von Verschiebungen und Rissweitenänderung; auch Fugenbewegungen messbar; Distometer mit Invardrähten • U-2-162: Rissweite, Rissweitenänderung 	
Zerstörungsfrei: Ja	
Typ Untersuchungsmethode: Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Alle Bauarten
USM geeignet für Phase Überwachung: nein	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): Bedingt, bei wiederholten Messungen
Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
ID-BE-Code: <ul style="list-style-type: none"> • BE-1100: Setzungen / Verschiebungen / Verformungen • BE-1200: Fugenversätzen, -öffnungen, Kantenausbrüchen • BE-1300: Risse • BE-1400: Abplatzungen • BE-1500: Belagsschäden 	ID-S-Code: <ul style="list-style-type: none"> • S-1: Schadensprozess Stahlbeton • S-2: Schadensprozess Baustahl • S-3 Schadensprozess Baugrund • S-6 Schadensprozess Fahrbahn
Messgröße (vgl. Katalog MEGR): Abmessungen, Rissweiten, Risslänge, Fugenbreite, Höhenunterschied, Neigung, Vertikale Verschiebung	Erfasste Masseinheit (LE): m, mm, m.ü.M
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: Quantitativ; Aussagekraft abhängig von Zeitraum bzw. Folgemessungen; Rissweitenänderungen nur mit Folgemessungen bestimmbar	Genauigkeit und Grenzen: Je nach Methode hohe Messgenauigkeit; Messwerte von geringen Abmessungen (z.B. Rissweiten und Fugenbreiten) abhängig von Umgebungs- und Bauteiltemperatur

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:
ID-U-Code: • U-1-211 Visuelle Aufnahme; Einzelbilder • U-2-511 Messung Umgebungstemperatur	• Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD oben: Abschaltung Tunnellüftung; ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen)
	Kosten:
	• U-2-111, U2-121, U-2-162: Preisklasse PK2 (100–499 CHF/MQ) ⁶ • U-2-161: Preisklasse PK5 (> 5'000 CHF/MQ) ⁷
Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
• Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1] • Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen RIBET [3]	Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre Nr. 2 Seelisbergtunnel Nr. 4 Gotschnatunnel Nr. 5 Gubristtunnel Nr. 6 Tunnel Belchen Nr. 7 Tunnel Girsberg Nr. 8 Sonnenbergtunnel Nr. 9 Reussporttunnel
Anbieter:	Verwandte USM:
Ingenieurbüros / Vermessungsbüros / Geotechnische Labors	• U-2-139 Nahbereichsphotogrammetrie • U-2-150 Laserscanning • U-2-161

⁶ MQ: Messquerschnitt (= Gesamtquerschnitt über Länge von 5 m)
 Kosten stark abhängig, was genau aufgenommen wird; Annahme: Messung von Rissen inkl. Dokumentation ca. analog Sichtkontrolle detailliert, lokal, Annahme: ein Riss pro MQ
 Größenordnung der Kosten bei Nivellement unter der Annahme, dass ganze Tunnellänge aufgenommen wird

⁷ Annahme: 1 Messstelle pro Messquerschnitt; Kosten stark abhängig, wo Messstellen sind; Messaufwand 1. Messung inkl. Einrichtung Messstelle

Tab. 5 Katalogblatt 05**Monitoring von Rissen, Deformationen, ID-U-Code:****Verschiebungen:**

- Gleitmikrometer / Gleitdeformeter
- Dehnungsmessstreifen
- Laserextensometer
- Inklinometer
- Erfassung Rissweitenänderungen mittels Wegsensoren (Wegaufnehmer)

- U-2-131
- U-2-132
- U-2-134
- U-2-141
- U-2-163



Abb. 4 Quelle links: Erfassung Rissweitenänderung mittels Wegaufnehmer Gubristunnel 2013 (EBP Schweiz AG), Quelle rechts: Gleitmikrometer Messungen Gotschnatunnel, 1. Folgemessung 30./31. Juli 2014 (Solexperts AG)

Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):

- U-2-131: Regelmässige Messung von Verschiebungen des Bauwerks bzw. von Bauwerksteilen, u.a. bei Durchbiegung, Setzungen bzw. Deformationen im Baugrund/Fels, als vertikale und/oder horizontale Verschiebungen oder auch als Fugen- oder Auflagerbewegungen. Dreidimensionales Erfassen der Verteilung der Verschiebungsvektoren X, Y, und Z entlang einer vertikalen Messlinie. Erfassen von Vertikal- und Horizontalverschiebungen, u.a. Beobachtung der Setzungsmechanismen im städtischen Tunnelbau (Z.B. Trivec (City-Tunnel Leipzig))
- U-2-132: Messeinrichtungen zur Erfassung von dehnenden und stauchenden Verformungen. Sie ändern schon bei geringen Verformungen ihren elektrischen Widerstand und werden als Dehnungssensoren eingesetzt.
- U-2-134: Optisches Messgerät zur berührungslosen Verformungsmessungen am Bauwerk (siehe auch Laserscanning für kontinuierliche Aufnahmen)
- U-2-141: Vermessung von Winkeln z.B. als Neigungen, Verkippungen längs und quer, Fugenrotationen auch mit Slopeindicator
- U-2-163: Erfassung / Monitoring Rissbreite (Rissweite), u.a. mit Relevanz für statische Beurteilung sowie bei Abdichtung. Berührungslose Wegaufnehmer: z.B. Laser, Scanner, Wirbelstrom, Ultraschall Quasi-berührungslose Wegaufnehmer: z.B. LVDT, induktiv (Messtaster) Berührende Wegaufnehmer: Seilzug, Linearpotentiometer

Zerstörungsfrei:

- U-2-131: Nein
- U-2-132: Ja
- U-2-134: Ja
- U-2-141: Nein
- U-2-163: Ja

Typ Untersuchungsmethode:

Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)

Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:

Alle Bauarten

USM geeignet für Phase Überwachung:

Nein

Eignung als Monitoring (Onlinemessung):

Ja

Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:										
<p>ID-BE-Code:</p> <ul style="list-style-type: none"> • BE-1102 Verschiebungen • BE-1103 Verformungen • BE-1104 Hebungen • BE-1201 Fugenversätzen / Fugenabsätze • BE-1202 Fugenöffnungen • BE-1300 Risse 	<p>ID-S-Code:</p> <ul style="list-style-type: none"> • S-1 Schadensprozess Stahlbeton • S-3 Schadensprozess Baugrund • S-6 Schadensprozess Fahrbahn 										
<p>Messgrösse (vgl. Katalog MEGR): Vertikal- und Horizontalverschiebung (u.a. auch Fugenbewegungen), Deformation im Fels, Längenänderung, Verformung, Setzung, Neigung, Verkippung quer und längs</p>	<p>Erfasste Masseinheit (LE): Dehnung in mm/m Längenänderung / Dehnung in mm/m Verschiebung in mm</p>										
<p>Aussagekraft und Zuverlässigkeit: Quantitativ; Aussagekraft abhängig von Zeitraum bzw. Folgemessungen</p>	<p>Genauigkeit und Grenzen: Hoch präzise Messverfahren; Genauigkeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • U-2-131: Trivec: $\Delta x, \Delta y = +/-0.04 \text{ mm/m}$ und $\Delta z = +/-0.02 \text{ mm/m}$ • U-2-132: 1 % und etwa 0,1 % des Messbereichs-Endwerts bis max. 0.005% • U-2-134: je nach Auflösung • U-2-141: $+/-0.03 \text{ mm/m}$ • U-2-163: hochpräzise Messung, jedoch ist Genauigkeit von Temperatur abhängig 										
<p>Ergänzende USM / Kombinationen von USM:</p> <p>ID-U-Code:</p> <ul style="list-style-type: none"> • U-2-511 Messung Umgebungstemperatur 	<p>Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD oben: Abschaltung Tunnellüftung; ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen) • Bedarf von Strom (für Monitoring mittel- bis langfristig) • Teilweise Aufwand für Folgemessungen, wenn keine automatische Datenerfassung erfolgt (d.h. erneute Tunnelsperrungen etc.) <p>Kosten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • U-2-131 / U-2-141: Preisklasse PK5 ($> 5'000 \text{ CHF/MQ}$)⁸ • U-2-132 / U-2-134 / U-2-163: Preisklasse PK4 ($1'000 - 5'000 \text{ CHF/MQ}$)⁹ 										
<p>Normen und Literatur:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen RIBET [3] • Trivec – Gleitmikrometer – Gleitdeformeter [13] 	<p>Fallbeispiele:</p> <table> <tbody> <tr> <td>Nr. 1</td> <td>Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre</td> </tr> <tr> <td>Nr. 2</td> <td>Seelisbergtunnel</td> </tr> <tr> <td>Nr. 4</td> <td>Gotschnatunnel</td> </tr> <tr> <td>Nr. 5</td> <td>Gubristtunnel</td> </tr> <tr> <td>Nr. 6</td> <td>Tunnel Belchen</td> </tr> </tbody> </table>	Nr. 1	Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre	Nr. 2	Seelisbergtunnel	Nr. 4	Gotschnatunnel	Nr. 5	Gubristtunnel	Nr. 6	Tunnel Belchen
Nr. 1	Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre										
Nr. 2	Seelisbergtunnel										
Nr. 4	Gotschnatunnel										
Nr. 5	Gubristtunnel										
Nr. 6	Tunnel Belchen										
<p>Anbieter: Prüflabore / Vermessungsbüros / Geotechnische Labors</p>	<p>Verwandte USM:</p> <ul style="list-style-type: none"> • U-2-139 Nahbereichsphotogrammetrie • U-2-150 Laserscanning • U-2-161 Invardrahtmessung • U-2-163 Erfassung Rissweitenänderungen mittels Wegsensoren 										

⁸ MQ: Messquerschnitt

1 Messstelle pro MQ, Installation (inkl. Bohrung, Schacht, Röhre und Gerät) plus 1. Folgemessung; bei mehr Messungen sind Vorhaltekosten und Berichtserstattung pro Messung zu addieren.

⁹ 1 Messstelle pro MQ, Messung über 1 Jahr inkl. Zwischen- und Schlussbericht und Demontage; exkl. Energiebedarf für Messung; bei Messungen länger al 1 Jahr sind nur Vorhaltekosten und Berichtserstattung pro Jahr zu addieren

Tab. 6 Katalogblatt 06**Laserscanning (ohne KI)****ID-U-Code: U-2-151****Abb. 5 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)

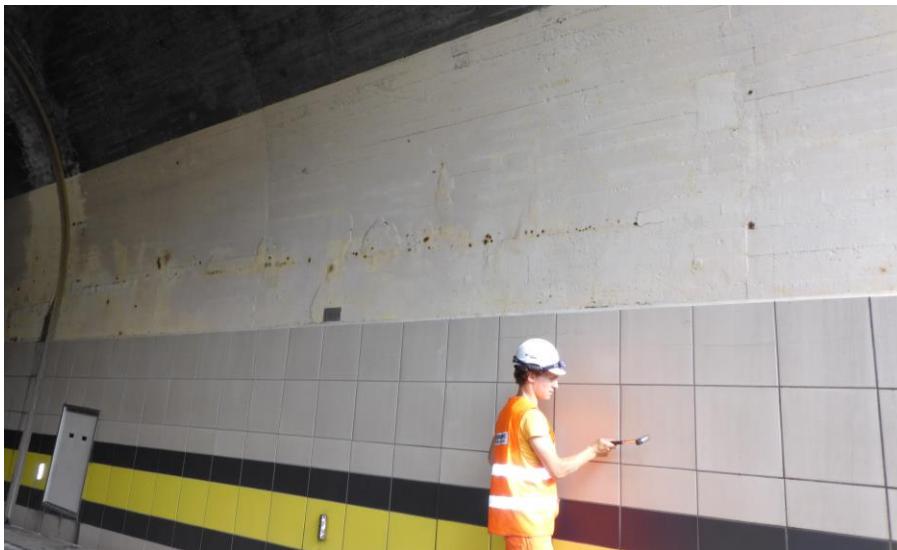
Zerstörungsfrei: Ja

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:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
ID-BE-Code: <ul style="list-style-type: none"> • 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: <ul style="list-style-type: none"> • 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: <ul style="list-style-type: none"> • Örtliche RBs (z.B. Abluftkanal: Abschaltung Tunnellüftung; Fahrraum: Sperrungen) Kosten: <ul style="list-style-type: none"> • Preisklasse PK2 (100 - 499 CHF/MQ)¹⁰

¹⁰ (= Gesamtquerschnitt über Länge von 5m)

Grössenordnung unter Annahme, dass ganze Tunnellänge aufgenommen wird.

Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
<ul style="list-style-type: none">• Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen RIBET [3]	<ul style="list-style-type: none">Nr. 3 KerenzerbergtunnelNr. 5 Gubristtunnel
Anbieter:	Verwandte USM:
Vermessungsbüros, teilweise auch Ingenieurbüros	<ul style="list-style-type: none">• U-2-137 Weisslichtinterferometrie (WLI)• U-2-152 Laserscanning (mit KI)

Tab. 7 Katalogblatt 07**Abklopfen****ID-U-Code: U-2-211****Abb. 6** Quelle: Tunnel Langlauf 2019 (Lombardi AG)**Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

Akustische Aufnahme mit (Spitz-)Hammer, Fäustel etc. zur Prüfung der Betonoberfläche für Feststellung von Hohlstellen und Betonabplatzungen oder Verifizierung Material Innenschale; lokale Stichproben oder systematisch, evtl. vollflächig

Zerstörungsfrei: Ja**Typ Untersuchungsmethode:**

Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)

Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:

Beton / Stahlbeton

USM geeignet für Phase Überwachung:

nein

Eignung als Monitoring (Onlinemessung):

nein

Einsatz bei Befunden wie:**ID-BE-Code:**

- BE-1300 Risse
- BE-1400 Abplatzungen
- BE-2100 Korrosion
- BE-3001 Feuchtstellen

ID-S-Code:

- S-1 Schadensprozess Stahlbeton
- S-3 Schadensprozess Baugrund

Messgröße (vgl. Katalog MEGR):

Hohlstellen, Unregelmässigkeiten

Erfasste Masseinheit (LE):

-

Aussagekraft und Zuverlässigkeit:

qualitativ

Genauigkeit und Grenzen:

Resultat stark abhängig von der inspizierenden Person

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:**ID-U-Code:**

- U-1-10 Inspektion visuell

Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:

- Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD oben: Abschaltung Tunnellüftung; ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen)

Kosten:

- Preisklasse PK1 (10 - 99 CHF/MQ)¹¹

¹¹ (= Gesamtquerschnitt über Länge von 5m)

Größenordnung unter Annahme, dass ganze Tunnellänge aufgenommen wird

Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
<ul style="list-style-type: none">• Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1]• Instandsetzung von Betonbauwerken [6]	<p>Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre Nr. 5 Gubristtunnel</p>
Anbieter: Ingenieurbüros, Prüflabore	Verwandte USM: • U-1-100 Inspektion visuell

Tab. 8 Katalogblatt 08

Prüfung mechanischer Sicherungen	ID-U-Code: U-2-221
	

Abb. 7 Quelle links: Sicherung Zwischendecke Gubristtunnel 2015 (EBP Schweiz AG), Quelle rechts: Sicherung Zwischendecke Gubristtunnel 2018 (EBP Schweiz AG)**Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

z.B. Kontrolle Schraubensicherungen mit Drehmomentschlüssel

Zerstörungsfrei: Ja**Typ Untersuchungsmethode:**

Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)

Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:

Stahl

USM geeignet für Phase Überwachung:

nein

Eignung als Monitoring (Onlinemessung):

nein

Einsatz bei Befunden wie:**Geeignet für Schadensprozesse wie:**

ID-S-Code:

- S-29 Ermüdung Baustahl
- S-3 Schadensprozess Baugrund

Messgröße (vgl. Katalog MEGR):

Drehmoment

Erfasste Masseinheit (LE):

Nm

Aussagekraft und Zuverlässigkeit:

Messung mit Drehmomentschlüssel: quantitativ bzgl. Ist-Wert; Aussagekraft abhängig von Ausgangs- / Referenzwert

Händische Kontrolle: nur Aussage bzgl. Schrauben locker oder nicht

Genauigkeit und Grenzen:

Messung mit Drehmomentschlüssel grundsätzlich genau, abhängig von Ablesung durch kontrollierende Person, rein händische Kontrollen sehr ungenau

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:**Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:**

- Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD oben: Abschaltung Tunnellüftung; ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen)
- Kosten: Preisklasse PK1 (10–99 CHF/MQ)¹²

Normen und Literatur:**Fallbeispiele:**

Nr. 5 Gubristtunnel

Anbieter:

Ingenieurbüros

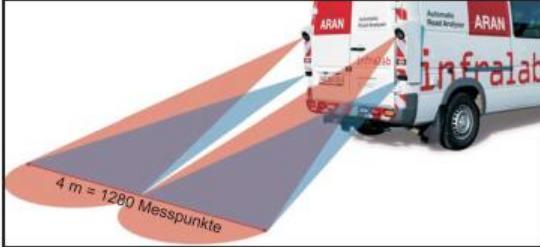
Verwandte USM:

-

¹² (= Gesamtquerschnitt über Länge von 5m)

Annahme: repetitive Prüfungen im Fahrraum; Größenordnung unter Annahme, dass ganze Tunnellänge aufgenommen wird

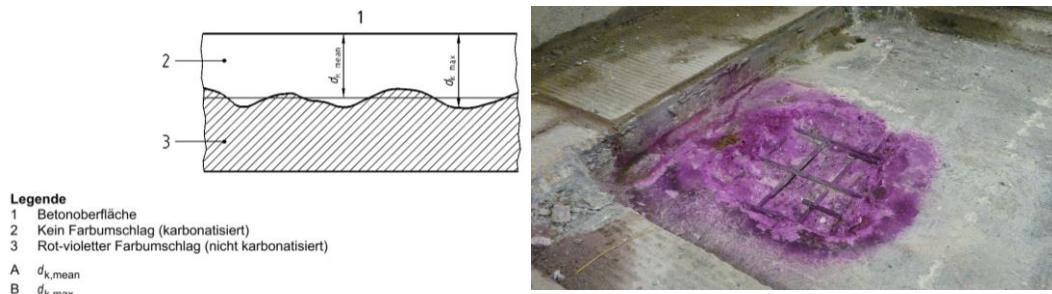
Tab. 9 Katalogblatt 09

Automatische Belags- und Straßen- Zustandsprüfung	ID-U-Code: U-2-265
	Längsebeneheit; Index I_2 Bei jeder Radspur werden alle 12.5 mm Messpunkte registriert. Das digitale Profil (Wellenlängen 0.3 bis 200 m) kann man beliebig auswerten; z. B. nach SN 640 520 (s_w -, W-Werte) oder nach EN 13036-5 (IRI, PSD)
	Querebeneheit; Index I_3 Bei 100 km/h werden Querprofile im Abstand von 5 m registriert. Dank des künstlichen Horizonts können die Spurrinnentiefe T und die theoretische Wassertiefe t berechnet werden.
Abb. 8 Quelle: ARAN (i.m.p. infralab)	
Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis): Messfahrzeug für Erfassung Zustand Belag: Längsebenheitskennwerte, Längsprofilaufzeichnung, Kennwerte der Ebenheit im Querprofil (Spurrinnen- und Wassertiefe), Querprofilaufzeichnung, Füllmengenberechnung, Quantifizierung der Oberflächenschäden, Geometrie der Fahrbahn (Längs- und Querneigung, Kurvenradius). z.B. ARAN	
Zerstörungsfrei: Ja	
Typ Untersuchungsmethode: Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Belag
USM geeignet für Phase Überwachung: nein	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): nein
Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
ID-BE-Code: • BE-1500 Belagsschäden	ID-S-Code: • S-3 Schadensprozess Baugrund • S-5 Schadensprozess Fahrbahn
Messgrösse (vgl. Katalog MEGR): Ebenheit; Schäden; Unregelmässigkeiten	Erfasste Masseinheit (LE): mm
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: Qualitativ, Schnelles Aufnahmeverfahren für die systematische Zustandserfassung	Genauigkeit und Grenzen: lückenlose Aufnahme von Leitungsgeometrie und Schadensausmass (z.B. Versinterungen) abhängig
Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:
	• Grundsätzlich keine Tunnelsperrung nötig da Aufnahme unter fliessendem Verkehr möglich (wobei ohne Stau)
	Kosten:
	• Preisklasse PK1 (10–99 CHF/MQ) ¹³

¹³ (MQ = über Länge von 5 m)

Grössenordnung unter Annahme, dass ganze Tunnellänge aufgenommen wird

Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
• SN 640 520, EN 13036-5	Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre
• VSS-40925B (2003)	Nr. 3 Kerenzerbergtunnel
• Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1]	Nr. 4 Gotschnatunnel
• ARAN – Automatic Road Analyzer [8]	
Anbieter:	Verwandte USM:
Prüflabore, Vermessungsbüros	• U-2-263 Ebenheitsmessung mittels Latte
	• U-2-264 Messung Längsebenheit mit Goniograph

Tab. 10 Katalogblatt 10**Karbonatisierungsmessung
am Bauwerk****ID-U-Code: U-2-411****Abb. 9** Quelle links: SIA 262.495 / SN EN 14630, Bild 1 – Karbonatisierungsgrenze, Quelle rechts: Fahrbahnplatte Gubristtunnel 2013 (EBP Schweiz AG)**Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

Bestimmung der Karbonatisierungstiefe als Mass für die Wahrscheinlichkeit der Depassivierung / Korrosionsgefahr der Bewehrung im Stahlbeton. Prüfung am Bauwerk an einer frisch freigelegten Betonfläche / Spitzöffnung.

Verschiedene Indikatoren

Zerstörungsfrei: Nein

Typ Untersuchungsmethode:

Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)

Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:

Beton / Stahlbeton

USM geeignet für Phase Überwachung:

nein

Eignung als Monitoring (Onlinemessung):

nein

Einsatz bei Befunden wie:**Geeignet für Schadensprozesse wie:****ID-BE-Code:**

- BE-1400 Abplatzungen
- BE-2100 Korrosion («Rostspuren» bei bewehrtem Beton)

ID-S-Code:

- S-11 Bewehrungskorrosion
- S-12.4 Chemisch lösender Angriff / Betonkorrosion

Messgröße (vgl. Katalog MEGR):

Wahrscheinlichkeit Depassivierung / Korrosionsgefahr der Bewehrung

Erfasste Masseinheit (LE):

Karbonatisierungstiefe (mm); Flächenbereiche (m^2)

Aussagekraft und Zuverlässigkeit:

Aussagekraft ist abhängig von Anzahl Proben bzw. statistischer Auswertung; Hinweis für Wahrscheinlichkeit von Bewehrungskorrosion abhängig von Betonüberdeckung.

Genauigkeit und Grenzen:

keine exakte Aussage, Hinweis für Wahrscheinlichkeit von Bewehrungskorrosion; Unterschiedliche Resultate der verschiedenen Indikatoren und je nach Randbedingung (z.B. Betonfeuchte)

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:**ID-U-Code:**

- U-1-211 Visuelle Aufnahmen; Einzelbilder Sondierfenster:
- U-2-421 Bestimmung Korrosionsgrad
- U-2-455 Betonüberdeckungsmessung

Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:

- Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD oben: Abschaltung Tunnellüftung; ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrraum / Fahrbahnplatte: Sperrungen)
- Leistungen Baumeister erforderlich (Spitzarbeiten, Reprofilierungen, Ergänzung Beschichtungen)

Kosten:

- Preisklasse PK2 (100–499 CHF/MQ)¹⁴

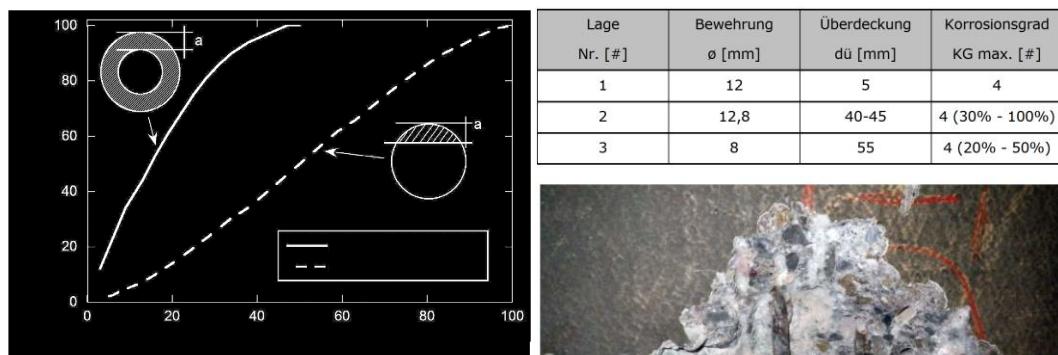
¹⁴ Annahme: 3 Stellen pro MQ (d.h. 1 Stelle pro aufgenommener Fläche mit Pot.Messung)

Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
• SIA 262.495 / SN EN 14630	Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre
• Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1]	Nr. 5 Gubristtunnel
• Instandsetzung von Betonbauwerken [6]	Nr. 8 Sonnenbergtunnel
• Alternative Indikatoren zur Messung der Karbonatisierungstiefe [14]	Nr. 9 Reussporttunnel

Anbieter:	Verwandte USM:
Akkreditierte Prüflabore, teilweise Ingenieurbüros	• U-3-121 Karbonatisierungstiefe am Bohrkern

Tab. 11 Katalogblatt 11

Sondieröffnung/Bewehrungsfenster: ID-U-Code: **U-2-421**
Bestimmung Korrosionsgrad Bewehrung



Figur D.1c:
Querschnittsverlust in Abhängigkeit
vom Korrosionsabtrag in % des Stab-
durchmessers bei allseitigem und
einseitigem Angriff.



Abb. 10 Quelle links: SIA Merkblatt 2006: 2013; Anhang D, Quelle rechts: Sondieröffnung bewehrtes Innengewölbe Gubristtunnel 2010 (SGK)

Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):

Sondierungsöffnung in Stahlbetonwand, -decke, -platte, u.a. zur Bestimmung des Korrosionsgrades, d.h. des Querschnittsverlustes der Bewehrung.

Ermittlung des relevanten Schädigungsausmaßes der Bewehrung.

Zerstörungsfrei: Nein

Typ Untersuchungsmethode: Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:
Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2) Stahlbeton

USM geeignet für Phase Überwachung: Eignung als Monitoring (Onlinemessung):
nein nein

Einsatz bei Befunden wie: **Geeignet für Schadensprozesse wie:**

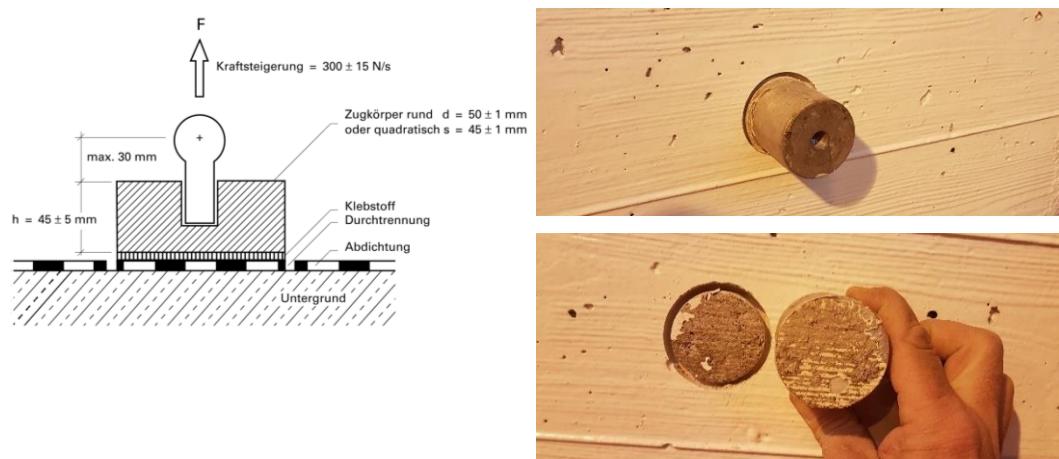
ID-BE-Code:	ID-S-Code:
• BE-1300 Risse	• S-11 Bewehrungskorrosion
• BE-1400 Abplatzungen	• S-12 Betonangriff / Gefügezerstörung
• BE-2100 Korrosion	

Messgröße (vgl. Katalog MEGR): Erfasste Masseinheit (LE):
Korrosionsgrad Bewehrung, Schädigung / Korrosionsgrad; Querschnittsreduktion (%)
Unregelmäßigkeiten Betongefüge Korrosionsgrad der Bewehrung:
KG0: blank
KG1: wenig Rostpunkte
KG2: Rostflecken, lokal geringer Materialabtrag
KG3: vollständig rostig, geringer Materialabtrag
(maximal Rippung abkorrodiert)
KG4: Querschnittsverminderungen; Lochfrass

Aussagekraft und Zuverlässigkeit: Genauigkeit und Grenzen:
punktuelle Aufnahme; Beurteilung Art der Korrosion Beurteilung Befund (z.B. KG) abhängig vom Faktor
möglich Mensch

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:
ID-U-Code:	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD oben: Abschaltung Tunnellüftung; ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen)
<ul style="list-style-type: none"> • U-1-211 Visuelle Aufnahmen, Einzelbilder • U-2-411 Karbonatisierungsmessung am Bauwerk • U-2-441 Potenzialfeldmessung (Bewehrung) • U-2-455 Wirbelstromverfahren (Bewehrungs- Überdeckungsmessung) • U-3-111 Chloridanalyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungen Baumeister erforderlich (Spitzarbeiten, Reprofilierungen, Ergänzung Beschichtungen)
	Kosten:
	<ul style="list-style-type: none"> • Preisklasse PK2 (500 - 999 CHF/MQ)¹⁵
Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
<ul style="list-style-type: none"> • 269/2, Kap. 6.3; • SIA Merkblatt 2006: 2013, Anhang D • Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1] • Instandsetzung von Betonbauwerken [6] 	<p>Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre</p> <p>Nr. 3 Kerenzerbergtunnel</p> <p>Nr. 4 Gotschnatunnel</p> <p>Nr. 5 Gubristtunnel</p> <p>Nr. 6 Tunnel Belchen</p>
Anbieter:	Verwandte USM:
Akkreditierte Prüflabore	

¹⁵ Annahme: 3 Sondieröffnungen pro MQ, inkl. Erstellung und Verschliessung der Sondieröffnungen

Tab. 12 Katalogblatt 12**Prüfung Haftzugfestigkeit****ID-U-Code: U-2-433****Abb. 11** Quelle links: SIA 281/3, Figur 1, Schnitt durch den aufgeklebten Zugkörper mit durchtrennter Abdichtung, Quelle rechts: Haftzugprüfung OS Wand Tagbau Gubristtunnel 2019 (EBP Schweiz AG)**Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

Ermittlung Haftzugfestigkeit zwischen verschiedenen Schichten, Standardverfahren zur Prüfung von Oberflächenschutzsystemen (OS) oder Abdichtungen von Brückenplatten.

Zerstörungsfrei: Nein

Typ Untersuchungsmethode: Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Beton / Stahlbeton
--------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------

USM geeignet für Phase Überwachung: nein	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): nein
----------------------------------------------------	--------------------------------------------------------

Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
----------------------------------	-------------------------------------------

ID-BE-Code:	ID-S-Code: • S-5 Schadensprozess Abdichtung
-------------	------------------------------------------------

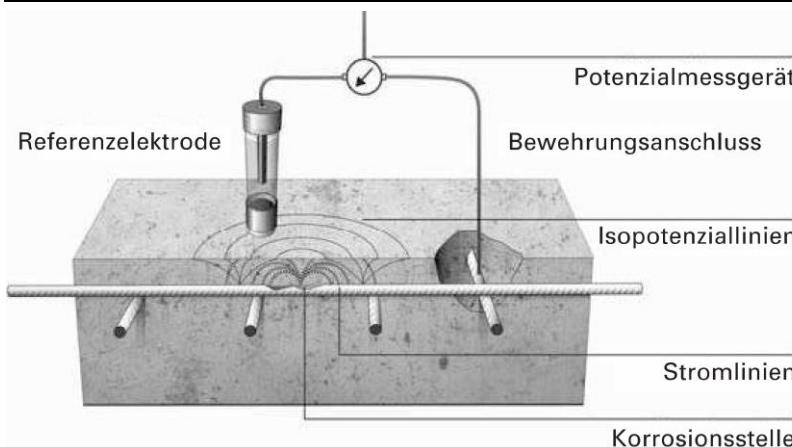
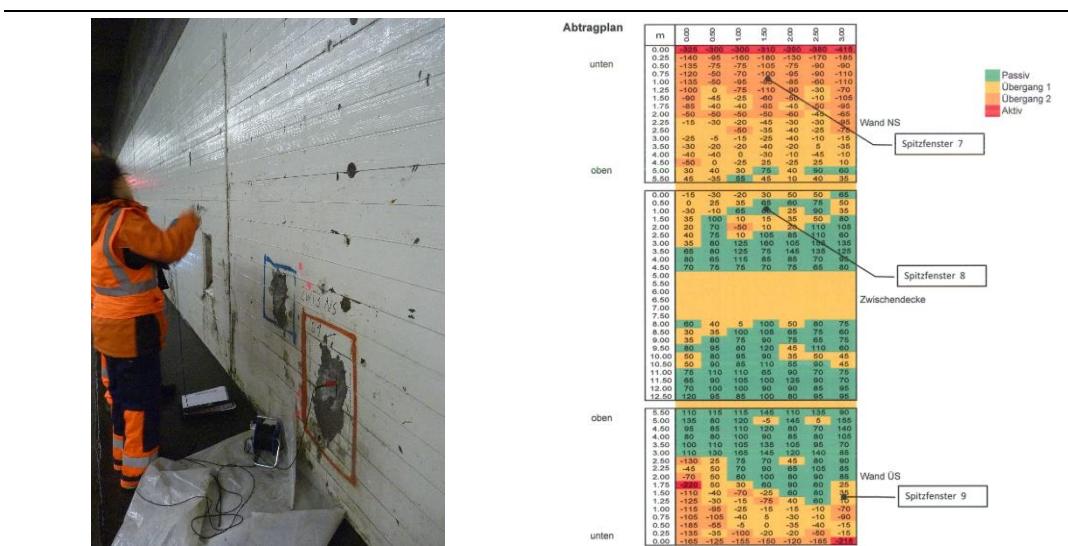
Messgröße (vgl. Katalog MEGR): Haftzugfestigkeit	Erfasste Masseinheit (LE): N/mm ²
------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------

Aussagekraft und Zuverlässigkeit: quantitativ; Hinweis auf Bauwerk (Ausführungsqualität)	Genauigkeit und Grenzen: gem. Normvorgaben, u.a. min. Probenahmen für statistische Auswertung
-------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand: <ul style="list-style-type: none"> • Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen) • Leistungen Baumeister erforderlich (Instandstellung Prüfflächen, u.a. Ergänzung Beschichtungen) Kosten: <ul style="list-style-type: none"> • Preisklasse PK2 (100–499 CHF/MQ)¹⁶
------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

¹⁶ Annahme: 3 Prüfungen pro MQ

Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
<ul style="list-style-type: none">• div. Normen, u.a.:• Abdichtungen: SIA 281/3, Ziff. 2.3.4a;• Schutz und Instandsetzung Beton: SN EN 1542 / SIA 162.421• Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1]	Nr. 5 Gubristtunnel
Anbieter:	Verwandte USM:
Akkreditierte Prüflabore	<ul style="list-style-type: none">• U-2-241 Abreissprüfung• U-2-434 Schälzugversuch

Tab. 13 Katalogblatt 13**Potenzialfeldmessung****ID-U-Code: U-2-441****Abb. 12 Schematische Darstellung des Messprinzips, Quelle: SIA Merkblatt 2006 (2013)****Abb. 13 Quelle links: Potenzialfeldmessung Gubristtunnel 2015 (EBP Schweiz AG / Consultest AG), Quelle rechts: Auswertung Potenzialfeldmessung Gubristtunnel 2015 (Consultest AG)****Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

Flächenmässige Bestimmung und Auswertung Korrosionspotenzial / -wahrscheinlichkeit der oberflächennahen Bewehrung (inkl. ergänzende Untersuchungen u.a. «Bestimmung Korrosionsgrad»)

Zerstörungsfrei: Nein**Typ Untersuchungsmethode:**

Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)

Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:

Stahlbeton

USM geeignet für Phase Überwachung:

nein

Eignung als Monitoring (Onlinemessung):

nur beschränkt; Punktmessungen mit Sensorsonden

Einsatz bei Befunden wie:**ID-BE-Code:**

- BE-1400 Abplatzungen
- BE-2100 Korrosion («Rostspuren» bei bewehrtem Beton)
- BE-3001 Feuchtstellen (u.a. in Bereichen mit Tausalzen)

Geeignet für Schadensprozesse wie:**ID-S-Code:**

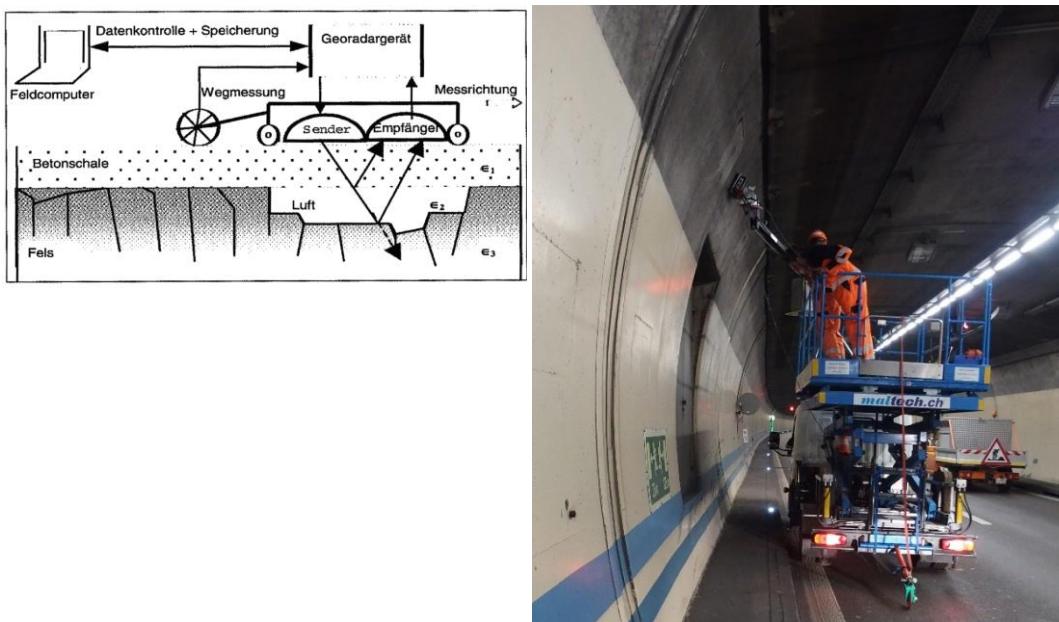
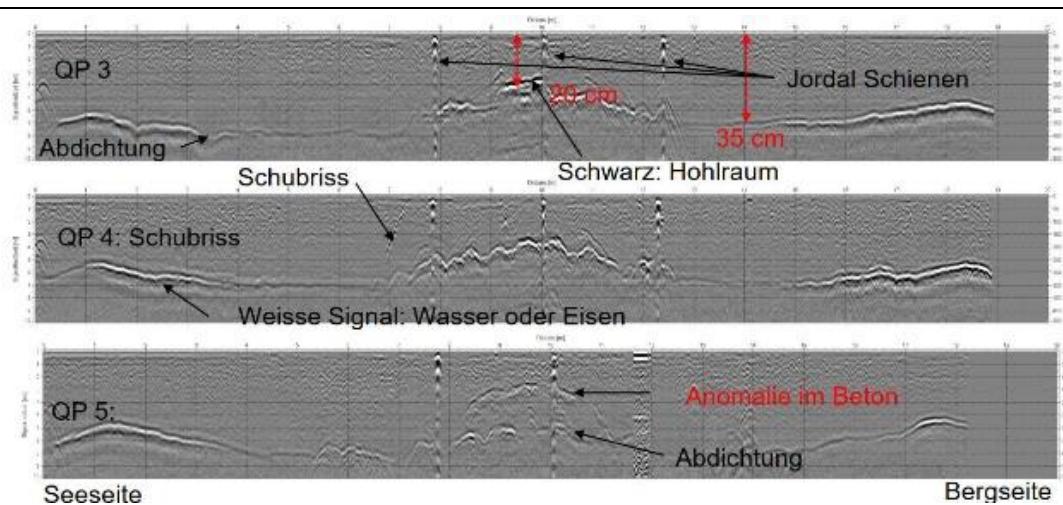
- S-11 Bewehrungskorrosion

Messgröße (vgl. Katalog MEGR): Lokales Korrosionspotenzial der Bewehrung	Erfasste Masseinheit (LE): Flächenbezogene Korrosionswahrscheinlichkeiten (%)
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: Liefert Wahrscheinlichkeiten, mit Kalibrierung durch ergänzende USM zuverlässige Resultate.	Genauigkeit und Grenzen: Durch Kalibrierung hohe Genauigkeit, unter Annahme eines Typs von Korrosion; Störfaktor: Betonfeuchtigkeit, frühere, unbekannte Reprofilierungen
Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:
ID-U-Code: <ul style="list-style-type: none"> • U-1-411 Karbonatisierungsmessung am Bauwerk • U-2-421 Sondierfenster: Bestimmung Korrosionsgrad • U-2-455 Betonüberdeckungsmessung • U-3-111 Chloridanalyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD oben: Abschaltung Tunnellüftung; ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen) • Bedarf von Strom und Wasser • Leistungen Baumeister erforderlich insbesondere mit ergänzenden USM (Spitzarbeiten, Reprofilierungen, Ergänzung Beschichtungen) Kosten: <ul style="list-style-type: none"> • Preisklasse PK5 (>5'000 CHF/MQ)¹⁷
Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
<ul style="list-style-type: none"> • Potenzialmessung an Stahlbetonbauten: SIA Merkblatt 2006 (2013); Korrigenda: 2006-C1:2016 [11] • Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1] • Instandsetzung von Betonbauwerken [6] 	Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre Nr. 3 Kerenzerbergtunnel Nr. 5 Gubristtunnel
Anbieter: Akkreditierte Prüflabore	Verwandte USM: -

¹⁷ (= Abwicklung Tunnelwände (Innengewölbe) und Zwischendecke, b = 5 m)

Tab. 14 Katalogblatt 14**Georadar**

ID-U-Code: U-2-451

**Abb. 14** Quelle links: Messprinzip des Georadarverfahrens [1], Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau, Quelle rechts: Innengewölbe Gubristunnel 2014 (EBP Schweiz AG)**Abb. 15** Quelle: Tunnel Ofenegg, Auswertung Georadar Innengewölbe 2022 (GEOTEST AG)**Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

Ermittlung von Schichtaufbau des Untergrunds, Bestimmung Bauteilstärken wie z.B. Innengewölbe, Bestimmung Bewehrungsüberdeckung oder Betonüberdeckung der Vorspannung, Detektion von Hohlräumen/Hohlstellen hinter Gewölbe

Zerstörungsfrei: Ja**Typ Untersuchungsmethode:**

Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)

Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:

Beton

USM geeignet für Phase Überwachung:

nein

Eignung als Monitoring (Onlinemessung):

nein

Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
-	ID-S-Code: • S-11 Bewehrungskorrosion
Messgrösse (vgl. Katalog MEGR): Bauteil- und Schichtstärke	Erfasste Masseinheit (LE): cm / mm
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: quantitativ	Genauigkeit und Grenzen: sehr gute Resultate bis 30-40 cm
Ergänzende USM / Kombinationen von USM: ID-U-Code:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand: • Bauteilspezifische RBs (z.B. Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen und Bedarf an Hebebühne) Kosten: • Preisklasse PK2 (100–499 CHF/MQ) ¹⁸
Normen und Literatur: • Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1] • Georadar [10] • Zielorientierte Bauwerksuntersuchungen mit neueren zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) [5]	Fallbeispiele: Nr. 3 Kerenzerbergtunnel Nr. 4 Gotschnatunnel Nr. 5 Gubristtunnel Nr. 6 Tunnel Belchen Nr. 9 Reussporttunnel
Anbieter: Akkreditierte Prüflabore, Vermessungsbüro	Verwandte USM: • U-2-452 Ultraschallprüfung • U-2-453 Impact-Echo-Verfahren

¹⁸ (= 4 Punkte im Profil über Länge von 5m) Größenordnung unter Annahme, dass ganze Tunnellänge aufgenommen wird

Tab. 15 Katalogblatt 15

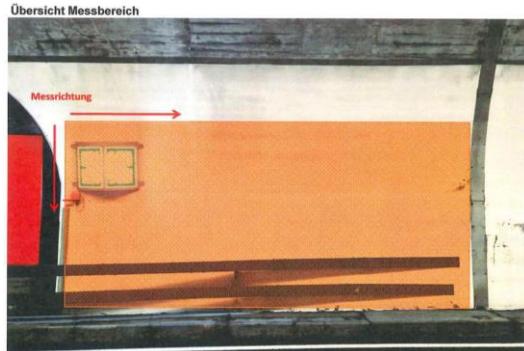
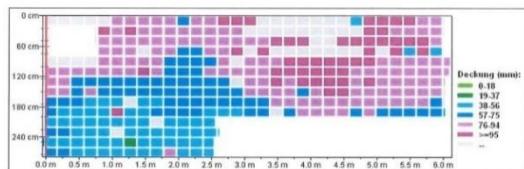
Wirbelstromverfahren (Betonüberdeckungsmessung)	ID-U-Code: U-2-455
  	

Abb. 16 Quelle links: Messung Bewehrungsüberdeckung Fahrbahnplatte Gubristtunnel 2013 (EBP Schweiz AG), Quelle rechts: Auswertung Bewehrungsüberdeckungsmessung Innengewölbe Tunnel Ofenegg 2022 (Consultest AG)

Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):

Messung der Betonüberdeckung und des Stabdurchmessers der Bewehrung mittels induktivem Messverfahren (z.B. mit Profometer).

Induktives Verfahren, unterscheidet sich von magnetischem Wechselfeldverfahren nur durch die Stärke des Magnetfeldes. Es besteht eine starke Abhängigkeit der Bewehrungsdurchmesser u.a. Ermittlung Schichtdicken bis 2 mm auf metallischen Untergründen

Zerstörungsfrei:	Ja
Typ Untersuchungsmethode: Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Stahlbeton
USM geeignet für Phase Überwachung: nein	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): nein
Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
ID-BE-Code: • BE-1300 Risse • BE-1400 Abplatzungen • BE-2100 Korrosion	ID-S-Code: • S-11 Bewehrungskorrosion
Messgrösse (vgl. Katalog MEGR): Betonüberdeckung; Durchmesser Bewehrungseisen	Erfasste Masseinheit (LE): mm
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: quantitativ, punktuelle Messung, d.h. Aussagekraft ist von Anzahl Messungen und statistischer Auswertung abhängig	Genauigkeit und Grenzen: Aussagen nur über oberste Bewehrungslage; Bei bekanntem Durchmesser der Bewehrung ist Genauigkeit sehr hoch; Genauigkeit kann mit Kalibrierung durch Aufspitzen bzw. Anbohren erhöht werden.

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:		Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:
ID-U-Code:		<ul style="list-style-type: none"> • Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD oben: Abschaltung Tunnellüftung; ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrerraum: Sperrungen)
<ul style="list-style-type: none"> • U-2-411 Karbonatisierungsmessung am Bauwerk • U-2-421 Sondieröffnung / Bewehrungsfenster: Bestimmung Korrosionsgrad Bewehrung • U-3-111 Chloridanalyse 		<ul style="list-style-type: none"> • Bei Bedarf an Kalibrierung oder Messungen an Fahrbauplatte Leistungen Baumeister erforderlich (Spitzarbeiten, Reprofilierungen, Ergänzung Beschichtungen / Belag)
Kosten:		<ul style="list-style-type: none"> • Preisklasse PK1 (10–99 CHF/MQ)¹⁹
Normen und Literatur:		Fallbeispiele:
<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1] • Messung der Betondeckung und Ortung der Bewehrung [4] • Instandsetzung von Betonbauwerken [6] 		<p>Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre</p> <p>Nr. 5 Gubristtunnel</p> <p>Nr. 8 Sonnenbergtunnel</p> <p>Nr. 9 Reussporttunnel</p>
Anbieter:		Verwandte USM:
Akkreditierte Prüflabore, Ingenieurbüros		<ul style="list-style-type: none"> • U-2-452 Ultraschallprüfung • U-2-453 Impact-Echo-Verfahren • U-2-454 Magnetisches Wechselfeldverfahren (Betonüberdeckungsmessung) • U-2-457 Durchstrahlungsverfahren / Radiographie

¹⁹ (= Gesamtquerschnitt über Länge von 5m)
Annahme: Abwicklung Wände (Innengewölbe) und Zwischendecke

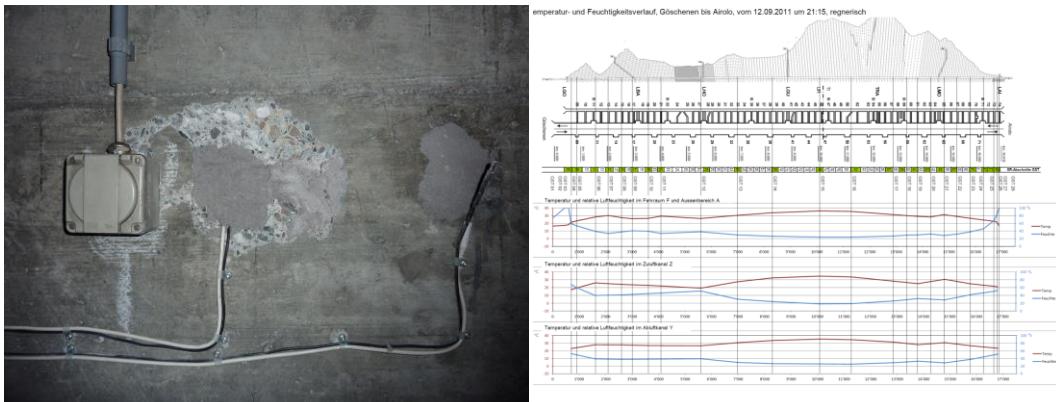
Tab. 16 Katalogblatt 16**Messung Umgebungstemperatur****ID-U-Code: U-2-511**

Abb. 17 Quelle links: Temperaturfühler Gotthard-Strassentunnel 2016 (EBP Schweiz AG), Quelle rechts: Auswertung Messung Temperatur (rot) und Luftfeuchtigkeit (blau) im Gotthard-Strassentunnel, Tagesverlauf eines durchzogenen Tages (12.09.2011) (EBP Schweiz AG)

Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):

Messung Lufttemperatur u.a. mit faseroptischen Sensoren

Zerstörungsfrei:	Ja
Typ Untersuchungsmethode: Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Umgebung aller Bauarten
USM geeignet für Phase Überwachung: nein	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): ja
Einsatz bei Befunden wie: ID-BE-Code:	Geeignet für Schadensprozesse wie: ID-S-Code:
Messgröße (vgl. Katalog MEGR): Umgebungstemperatur	Erfasste Masseinheit (LE): °C
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: Quantitativ; mit einem Monitoring der Umgebungs- temperatur können die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen und somit die Einflüsse auf z.B. Risse beurteilt werden	Genauigkeit und Grenzen: Genaue Messung; Abhängigkeit von lokalen Luftströmen
Ergänzende USM / Kombinationen von USM: ID-U-Code: • U-2-521 Messung Luftfeuchtigkeit	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand: • Anbringen von Temperaturfühlern sowie Anbringen und Auswertung Datenlogger von Bauteilspezifische RBs abhängig (z.B. Abluftkanal: Abschaltung Tunnellüftung; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen und Einsatz von Hebebühnen) Kosten: • Preisklasse PK4 (1'000–5'000 CHF/MQ) ²⁰

²⁰ (= eine Messstelle)

beinhaltet Installation und eine Auslesung bzw. Auswertung der Daten; d.h. bei Messung über mehrere Jahre sind nur Vorhaltekosten und Auswertungskosten pro Jahr zu addieren; ca. gleicher Preis für kombinierte Sensoren Temperatur/Luftfeuchtigkeit

Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
• Monitoring von Bauwerken [12]	Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre Nr. 2 Seelisbergtunnel
Anbieter:	Verwandte USM:
Akkreditierte Prüflabore	• U-2-446 Korrosionsmonitoring mittels Probekörpern spezifischer Sensoren

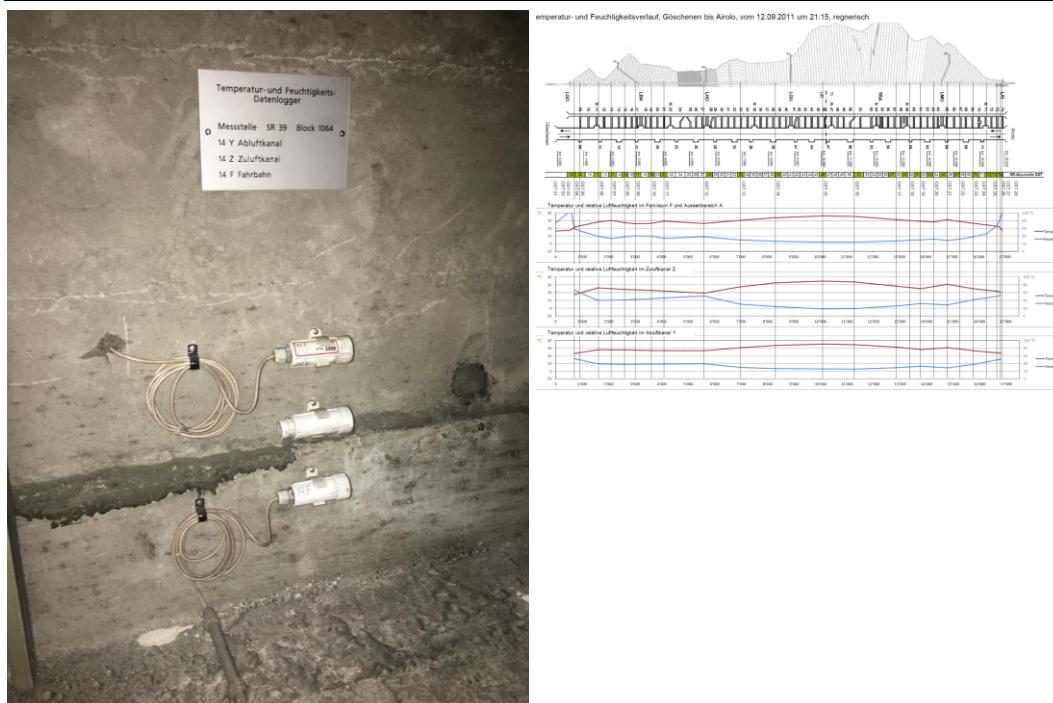
Tab. 17 Katalogblatt 17**Messung Luftfeuchtigkeit****ID-U-Code: U-2-521**

Abb. 18 Quelle links: Temperatur- und Feuchtigkeitsdatenlogger Gotthard-Strassentunnel 2018 (EBP Schweiz AG), Quelle rechts: Auswertung Messung Temperatur (rot) und Luftfeuchtigkeit (blau) im Gotthard-Strassentunnel, Tagesverlauf eines durchzogenen Tages (12.09.2011) (EBP Schweiz AG)

Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):

Messung Luftfeuchtigkeit; verschiedene Messinstrumente u.a. Hygrometer

Zerstörungsfrei: Ja**Typ Untersuchungsmethode:**

Messtechnische Untersuchung am Bauwerk (2)

Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:

Umgebung aller Bauarten

USM geeignet für Phase Überwachung:

nein

Eignung als Monitoring (Onlinemessung):

ja

Einsatz bei Befunden wie:**Geeignet für Schadensprozesse wie:****Messgröße (vgl. Katalog MEGR):**

Luftfeuchtigkeit

Erfasste Masseinheit (LE):

% Luftfeuchtigkeit

Aussagekraft und Zuverlässigkeit:

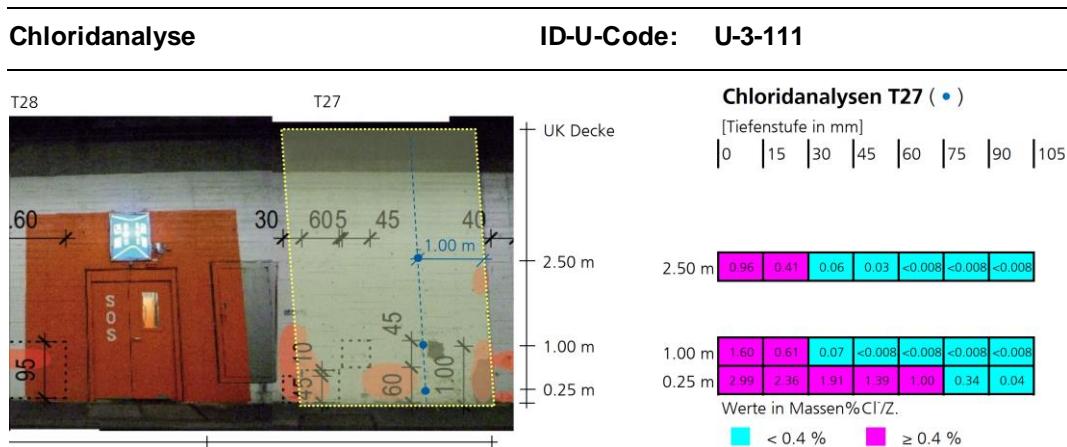
Quantitativ; mit einem Monitoring der Luftfeuchtigkeit können die jahreszeitlichen Schwankungen und somit die Einflüsse auf z.B. auf die Bewehrungskorrosion beurteilt werden

Genauigkeit und Grenzen:

Genaue Messung; Abhängigkeit von lokalen Luftströmen

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:		Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:
ID-U-Code:		<ul style="list-style-type: none"> • Anbringen von Fühlern sowie Anbringen und Auswertung Datenlogger von Bauteilspezifische RBs abhängig (z.B. Abluftkanal: Abschaltung Tunnellüftung; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen und Einsatz von Hebebühnen)
<ul style="list-style-type: none"> • U-2-511 Messung Umgebungstemperatur 		Kosten:
		<ul style="list-style-type: none"> • Preisklasse PK4 (1'000–5'000 CHF/MQ)²¹
Normen und Literatur:		Fallbeispiele:
		<ul style="list-style-type: none"> Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1. Röhre Nr. 2 Seelisbergtunnel
Anbieter:		Verwandte USM:
<ul style="list-style-type: none"> Akkreditierte Prüflabore 		<ul style="list-style-type: none"> • U-2-446 Korrosionsmonitoring mittels Probekörpern spezifischer Sensoren

²¹ (= eine Messstelle); beinhaltet Installation und eine Auslesung bzw. Auswertung der Daten; d.h. bei Messung über mehrere Jahre sind nur Vorhaltekosten und Auswertungskosten pro Jahr zu addieren; ca. gleicher Preis für kombinierte Sensoren Temperatur/Luftfeuchtigkeit

Tab. 18 Katalogblatt 18**Abb. 19** Quelle: Auswertung Chloridanalysen Wände Tagbau Gubristtunnel 2015 (EBP Schweiz AG)**Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

Ermittlung des Chloridgehalts (bez. Zementgewicht) gemäss Prüfnorm SIA 162/2, Salpetersäure-Aufschluss (Referenzverfahren)

XRF-Schnellverfahren. Das Verfahren kann an Pulverproben aus Bohrmehl oder aus Bohrkernproben oder an anderen geeigneten Laborprobekörpern durchgeführt werden.

Zerstörungsfrei:	Nein
Typ Untersuchungsmethode:	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:
Laborprüfung (3)	Stahlbeton
USM geeignet für Phase Überwachung:	Eignung als Monitoring (Onlinemessung):
nein	nein
Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
ID-BE-Code:	ID-S-Code:
<ul style="list-style-type: none"> • BE-1300 Risse • BE-1400 Abplatzungen • BE-2100 Korrosion 	<ul style="list-style-type: none"> • S-11 Bewehrungskorrosion
Messgröße (vgl. Katalog MEGR):	Erfasste Masseinheit (LE):
Chloridgehalt (bez. Zementgewicht)	Chloridgehalte (M% Cl-/Z)
Aussagekraft und Zuverlässigkeit:	Genauigkeit und Grenzen:
quantitativ; Das Korrosionsrisiko wird aufgrund des Gesamtchloridgehalts auf Bewehrungsniveau beurteilt. Für normalen Betonstahl und eine Betonfeuchtigkeit im Bereich der Bewehrung, die maximal etwa 80% relativer Luftfeuchtigkeit entspricht, gilt:	Chloridgehalt abhängig vom Auswertungsverfahren; Hinweis für Wahrscheinlichkeit von Bewehrungskorrosion abhängig von Betonüberdeckung.
<ul style="list-style-type: none"> • Chloridgehalt < 0,4 Massen-%/Zementgehalt: kaum Korrosionsrisiko vorhanden • Chloridgehalt 0,4 bis 1,0 Massen-%/Zementgehalt: Korrosion möglich • Chloridgehalt > 1,5 Massen-%/Zementgehalt: hohes Korrosionsrisiko 	

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:		Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:												
ID-U-Code:		<ul style="list-style-type: none"> • Bauteilspezifische RBs (z.B. ZWD unten: Hebebühne; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen und evtl. Hebebühne) 												
<ul style="list-style-type: none"> • U-2-411 Karbonatisierungsmessung am Bauwerk • U-2-421 Sondieröffnung/Bewehrungsfenster: Bestimmung Korrosionsgrad Bewehrung • U-2-441 Potenzialfeldmessung • U-2-455 Wirbelstromverfahren (Betonüberdeckungsmessung) 		<p>Kosten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Preisklasse PK4 (1'000–5'000 CHF/MQ)²² 												
Normen und Literatur:		Fallbeispiele:												
<ul style="list-style-type: none"> • SIA 162/2 • SN EN 480-10:2009 • Festlegung des bauwerksspezifischen kritischen Chloridgehaltes mit ETH-Methode noch nicht normiert (siehe: Critical chloride content in concrete: realistic determination and influence of air voids [2]) • Instandsetzung von Betonbauwerken [6] 		<table> <tr> <td>Nr. 1</td><td>Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre</td></tr> <tr> <td>Nr. 3</td><td>Kerenzerbergtunnel</td></tr> <tr> <td>Nr. 4</td><td>Gotschnatunnel</td></tr> <tr> <td>Nr. 5</td><td>Gubristtunnel</td></tr> <tr> <td>Nr. 8</td><td>Sonnenbergtunnel</td></tr> <tr> <td>Nr. 9</td><td>Reussporttunnel</td></tr> </table>	Nr. 1	Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre	Nr. 3	Kerenzerbergtunnel	Nr. 4	Gotschnatunnel	Nr. 5	Gubristtunnel	Nr. 8	Sonnenbergtunnel	Nr. 9	Reussporttunnel
Nr. 1	Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre													
Nr. 3	Kerenzerbergtunnel													
Nr. 4	Gotschnatunnel													
Nr. 5	Gubristtunnel													
Nr. 8	Sonnenbergtunnel													
Nr. 9	Reussporttunnel													
Anbieter:		Verwandte USM:												
Akkreditierte Prüflabore		-												

²² Annahme: 6 Bohrmehlproben pro Abwicklung mit 2 Entnahmen an Zwischendecke, Auswertung von 3-4 Tiefenstufen pro Entnahmestelle inkl. Kosten für Probenahmen unter Annahme, dass Proben von mehreren MQ entnommen werden

Tab. 19 Katalogblatt 19

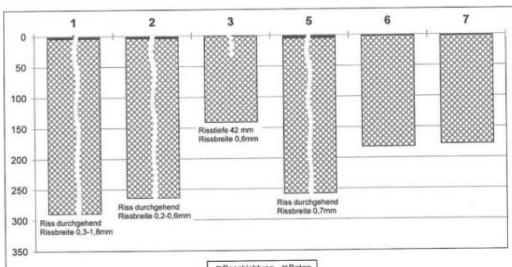
Druckfestigkeit	ID-U-Code: U-3-211																																																	
 	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Bohrkern-Nr.</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Labor-Nr.</td><td>04616/22</td><td>04617/22</td><td>04618/22</td><td>04619/22</td><td>04620/22</td><td>04621/22</td></tr> <tr> <td>Profil [m]</td><td colspan="6">siehe Probenentnahmeplan</td></tr> <tr> <td>Abstand Rand [m]</td><td colspan="6"></td></tr> <tr> <td>Beschichtung</td><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td>5</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr> <td>Beton</td><td>285</td><td>260</td><td>140</td><td>253</td><td>180</td><td>176</td></tr> <tr> <td>Gesamtdicke [mm]</td><td>339</td><td>264</td><td>141</td><td>258</td><td>182</td><td>178</td></tr> </tbody> </table>	Bohrkern-Nr.	1	2	3	5	6	7	Labor-Nr.	04616/22	04617/22	04618/22	04619/22	04620/22	04621/22	Profil [m]	siehe Probenentnahmeplan						Abstand Rand [m]							Beschichtung	4	4	1	5	2	2	Beton	285	260	140	253	180	176	Gesamtdicke [mm]	339	264	141	258	182	178
Bohrkern-Nr.	1	2	3	5	6	7																																												
Labor-Nr.	04616/22	04617/22	04618/22	04619/22	04620/22	04621/22																																												
Profil [m]	siehe Probenentnahmeplan																																																	
Abstand Rand [m]																																																		
Beschichtung	4	4	1	5	2	2																																												
Beton	285	260	140	253	180	176																																												
Gesamtdicke [mm]	339	264	141	258	182	178																																												

Abb. 20 Quelle links: Bohrkernentnahme Tunnel Ofenegg 2022 (Consultest AG), Quelle rechts: Auswertung Druckfestigkeit Tunnel Bohrkerne Tunnel Ofenegg 2022 (Consultest AG)**Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

Messung Druckfestigkeit von Beton oder Belag an Bohrkernen / Prüfkörpern

Zerstörungsfrei: Nein**Typ Untersuchungsmethode:**
Laborprüfung (3)**Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:**
Beton / Stahlbeton, Belag**USM geeignet für Phase Überwachung:**
nein**Eignung als Monitoring (Onlinemessung):**
nein**Einsatz bei Befunden wie:**

ID-BE-Code:

- BE-1300 Risse
- BE-1400 Abplatzungen
- BE-1500 Belagsschäden
- BE-1600 Absanden der Betonoberfläche

ID-S-Code:

- S-12 Betonangriff / Gefügezerstörung
- S-61 Belagsschäden

Messgröße (vgl. Katalog MEGR):
Druckfestigkeit**Erfasste Masseinheit (LE):**
N/mm²**Aussagekraft und Zuverlässigkeit:**
quantitativ;
Aussagekraft abhängig von Anzahl Messungen**Genauigkeit und Grenzen:**
Bestimmung an einzelnen Prüfkörpern; grosse Streubreite Verwendung Messwerte bedingt gewisse Menge an Prüfresultaten für statistische Auswertung (je nach Bohrkerndurchmesser)**Ergänzende USM / Kombinationen von USM:**

ID-U-Code:

- U-2-212 Rückprallhammer (Schmidt-Hammer)

Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:

- Bauteilspezifische RBs für Probenahme (z.B. Innengewölbe Abluftkanal: Abschaltung Tunnellüftung; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen und evtl. Hebebühne)
- Baumeisterarbeiten für Instandsetzung Bohrlöcher für Probenahmen

Kosten:

- Preisklasse PK4 (1'000–5'000 CHF/MQ)²³

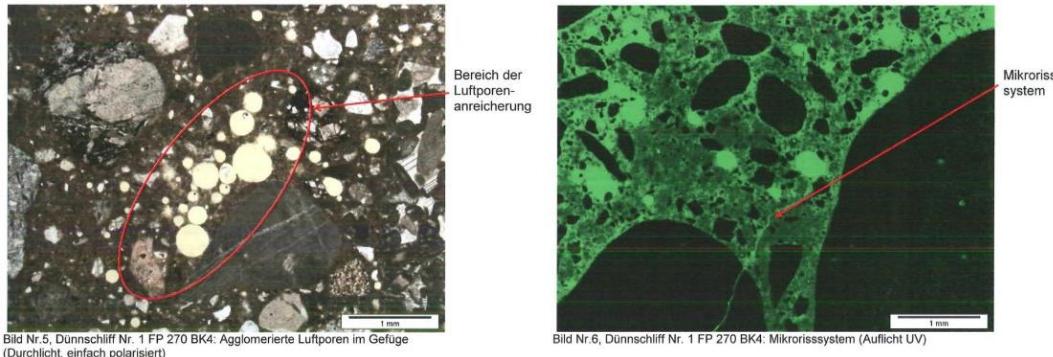
²³ Annahme: 3 Prüfungen pro MQ, inkl. Probenahmen (unter Annahme Entnahme Bohrkerne für mehrere MQ) Verwendung Messwerte bedingt gewisse Menge an Prüfresultaten für statistische Auswertung

Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
• SIA 262.213	Nr. 3 Kerenzerbergtunnel
• SN EN 12504-1	Nr. 4 Gotschnatunnel
• SN EN 13791:2019	Nr. 5 Gubristtunnel
• Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau [1]	Nr. 6 Tunnel Belchen
• Instandsetzung von Betonbauwerken [6]	Nr. 8 Sonnenbergtunnel
• Bewertung der Druckfestigkeit im Bauwerk – die neue SN EN 13791 [9]	

Anbieter:	Verwandte USM:
Akkreditierte Prüflabore	-

Tab. 20 Katalogblatt 20

Mikroskopische Untersuchung am Dünnschliff	ID-U-Code: U-3-421
-------------------------------------------------------	---------------------------

**Abb. 21** Quelle links: Dünnschliff Fahrbahnplatte Gubristtunnel 2012 (TFB AG), Quelle rechts: Dünnschliff Fahrbahnplatte Gubristtunnel 2012 (TFB AG)**Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

Untersuchungen am Dünnschliff von Bohrkernen (v.a. Beton oder Untergrund) zur Überprüfung der Gefügestruktur und -schädigung, Risstiefen, Bestimmung von AAR, Frost-Tausalz-Widerstand, Porosität, Sulfatangriff, Quellen etc.; Untersuchung am Elektronenmikroskop oder Lichtmikroskop

Zerstörungsfrei:	Nein
Typ Untersuchungsmethode: Laborprüfung (3)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Beton / Stahlbeton, Belag
USM geeignet für Phase Überwachung: nein	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): nein
Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
ID-BE-Code: • BE-1300 Risse • BE-1500 Belagsschäden	ID-S-Code: • S-12 Betonangriff / Gefügezerstörung • S-3 Schadensprozess Baugrund • S-61 Belagsschäden
Messgröße (vgl. Katalog MEGR): Unregelmässigkeiten, Gefügestruktur und -schädigung, Risstiefen, Bestimmung von AAR, Frost-Tausalz-Widerstand, Porosität, Sulfatangriff	Erfasste Masseinheit (LE): -
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: qualitativ; neben Diagnose auch Beurteilung der Materialqualität möglich	Genauigkeit und Grenzen: punktuelle Aufnahme; Auswertung und Interpretation abhängig von der beurteilenden Person
Ergänzende USM / Kombinationen von USM: -	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand: • Bauteilspezifische RBs für Probenahme (z.B. Innengewölbe Abluftkanal: Abschaltung Tunnellüftung; Innengewölbe Fahrraum: Sperrungen und evtl. Hebebühne) • Leistungen Baumeister erforderlich für Instandsetzung Bohrlöcher Kosten: • Preisklasse PK4 (1'000–5'000 CHF/MQ) ²⁴

²⁴ Annahme: 1 Dünnschliff pro MQ inkl. Probenahme unter Annahme, dass mehrere Bohrkerne entnommen werden

Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
• Instandsetzung von Betonbauwerken [6]	Nr.1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre
• Mikroskopische Untersuchungen an Beton [7]	Nr.4 Gotschnatunnel Nr.5 Gubristtunnel

Anbieter:	Verwandte USM:
Akkreditierte Prüflabore	-

Tab. 21 Katalogblatt 21**Chemische Zusammensetzung Wasser ID-U-Code: U-3-520**

Probenbezeichnung	FBBW WELK B2-4	FBBW WELK B351			DIN 4030 Klasse XA1 schwach Beton- angreifend	DIN 4030 Klasse XA2 mässig Beton- angreifend
Proben-Nr. Bachema Tag der Probenahme	38367 30.09.15	38368 30.09.15				
Physikalisch-chemische Parameter						
Aussehen		trüb/ Bodensatz bräunlich	trüb/ Bodensatz gräulich			
Farbe		erdig	modrig			
Geruch		230	23			
Trübung nephelometrisch	TE/F	648	1'140			
Leitfähigkeit (25°C)	µS/cm	7.69	8.83			
pH-Wert (Labor)	pH				6.5-5.5	5.5-4.5

Abb. 22 Quelle: Auszug aus Auswertung Wasserproben WELK Gubristtunnel (Bachema AG)**Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

u.a. Bestimmung Wasserhärte, pH-Wert, Sulfatgehalt, Magnesium- und Calciumgehalt für Beurteilung Betonaggressivität

div. weitere Mengenbestimmungen möglich wie z.B. Chloridgehalt

Zerstörungsfrei: Ja

Typ Untersuchungsmethode: Laborprüfung (3)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: -
USM geeignet für Phase Überwachung: nein	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): nein
Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
ID-BE-Code: • BE-3600 Mineralische Ausblühungen / Sinter • BE-4200 Ausfällungen, Versinterungen	ID-S-Code: • S-11 Bewehrungskorrosion • S-12.3 Sulfatangriff extern • S-12.4 Chemisch lösender Angriff / Betonkorrosion • S-12.5 Frost- / Frosttausalzschäden • S-4 Schadensprozess Berg- / Grundwasser • S-51 Alterung / Beschädigung Abdichtung
Messgrösse (vgl. Katalog MEGR): pH-Wert / Gesamthärte, Stoffmengenanteile	Erfasste Masseinheit (LE): pH-Wert / mmol/L Gehalte in mg/L
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: Quantitativ; Beurteilung durch Fachperson nötig	Genauigkeit und Grenzen: punktuelle Aufnahme; Interpretation abhängig von der beurteilenden Person
Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand: • Bauteilspezifische RBs für Probenahme (z.B. Abluftkanal: Abschaltung Tunnellüftung; Fahrraum: Sperrungen und evtl. Hebebühne) Kosten: • Preisklasse PK2 (100–400 CHF/MQ) ²⁵

²⁵ Annahme: 1 Probe pro MQ; Standarduntersuchung bzgl. Betonaggressivität, d.h. Bestimmung Wasserhärte, pH-Wert, Sulfat, Calcium, Grössenordnung der Kosten bei Entnahme und Auswertung von mind. 4 Proben;
Preis abhängig von zu prüfenden Stoffen und Anzahl Proben (Preisabstufung)

Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
	Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre
	Nr. 2 Seelisbergtunnel
	Nr. 3 Kerenzerbergtunnel
	Nr. 5 Gubristtunnel
	Nr. 9 Reussporttunnel
Anbieter:	Verwandte USM:
Akkreditierte Prüflabore	-

Tab. 22 Katalogblatt 22

<p>Zusammensetzung Schadstoffe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Russ, kanzerogene Stoffe • Asbest • PAK 	<p>ID-U-Code: U-3-540:</p> <ul style="list-style-type: none"> • U-3-541 • U-3-542 • U-3-543 <p>Probenbezeichnung</p> <p>Proben-Nr. Bachema Tag der Probenahme</p> <p>Asbest</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Asbest Nachweis</th><th>nicht nachgewiesen</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Asbest</td><td>--</td></tr> <tr> <td>Asbest – Art</td><td>--</td></tr> </tbody> </table> <p>Vor-fabrizierte Ausblas-kanal-elemente in Faserbeton (ca. 1980) 1777 16.01.15</p>	Asbest Nachweis	nicht nachgewiesen	Asbest	--	Asbest – Art	--
Asbest Nachweis	nicht nachgewiesen						
Asbest	--						
Asbest – Art	--						

Abb. 23 Quelle links: Probe Ausblaskanal Gubristtunnel für Prüfung auf Asbest 2015 (EBP Schweiz AG), Quelle rechts: Auswertung Probe Ausblaskanal Gubristtunnel 2015; kein Asbest (Bachema AG)

Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):

Bestimmung Stoffmengenanteilen, (i.d.R. relevant für Ausführung von Instandsetzungen, Erhebung z.B. für Rückbau- und Entsorgungskonzept), u.a.:

- Im Russ
 - Prüfung Vorhandensein von Asbest (mikroskopische Feststellung), u.a. an älteren faserverstärkten Baumaterialien (Eternit) oder Dämmmaterialen
 - Vorhandensein von Asbest oder PAK-Gehalt im Bindemittel von Belag

Zerstörungsfrei:

- U-3-541: Ja
 - U-3-542: Nein
 - U-3-543: Nein

Typ Untersuchungsmethode: Laborprüfung (3)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Alle Bauarten
USM geeignet für Phase Überwachung: nein	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): nein
Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
•	•
Messgrösse (vgl. Katalog MEGR): Stoffmengenanteil / Schadstoffgehalt	Erfasste Masseinheit (LE): mg (Umrechnung auf mg/kg)
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: quantitativ; punktuelle Aufnahme; für repräsentative Aussage mehrere Proben von unterschiedlichen Standorten/Bauetappen zu entnehmen; Bei Asbestanalysen: evtl. Vorreinigung, um Asbest im Staub auszuschliessen	Genauigkeit und Grenzen: Resultat abhängig von Probenahmen: saubere Entnahme und Lagerung, Entnahme an repräsentativen und v.a. mehreren Standorten; PAK: genügende Genauigkeit für Zuordnung Entsorgungskategorie

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:
ID-U-Code:	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteilspezifische RBs für Probenahme (z.B. Abluftkanal: Abschaltung Tunnellüftung; Fahrraum: Sperrungen und evtl. Hebebühne) • Leistungen Baumeister erforderlich für Probenahmen vom Belag (Instandsetzung Bohrlöcher)
<ul style="list-style-type: none"> • U-1-211 Visuelle Aufnahme; Einzelbilder • U-2-161 Rissmessungen, Distometer • U-2-211 Abklopfen 	Kosten: <ul style="list-style-type: none"> • U-3-541 / U-3-542: Preisklasse PK2 (100 - 499 CHF/MQ)²⁶ • U-3-542: Preisklasse PK3 (500 - 999 CHF/MQ)²⁷
Normen und Literatur:	Fallbeispiele:
Akkreditierte Prüflabore	<p>Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre</p> <p>Nr. 3 Kerenzerbergtunnel</p> <p>Nr. 5 Gubristtunnel</p> <p>Nr. 8 Sonnenbergtunnel</p> <p>Nr. 9 Reussporttunnel</p>
Anbieter:	Verwandte USM:
Akkreditierte Prüflabore	<hr/> <hr/> <hr/>

²⁶ Annahme: 1 Probe pro MQ; Bestimmung Schwermetalle und Asbest; Probenahme und Analyse; Preis abhängig von zu prüfenden Stoffen und Anzahl Proben (Preisabstufung)
Asbest: Annahme Probenahme und Laboranalyse von Einzelproben

²⁷ Annahme: 1 Probe pro MQ; Probenahme inkl. Instandsetzung und Laboranalyse

Tab. 23 Katalogblatt 23

Wischprobe bei metallischen Werkstoffen	ID-U-Code: U-3-641																																			
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Probenbezeichnung</th> <th>FBBE WELK B35-75</th> <th>FBBE WELK B35-82</th> <th>FBBE WELK B304 Ausbildung</th> <th>FBBE WELK B304 Beton</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Proben-Nr. Bachema Tag der Probenahme</td><td>38362 30.09.15</td><td>38361 30.09.15</td><td>38363 30.09.15</td><td>38364 30.09.15</td></tr> <tr> <th>Probenparameter</th><th colspan="4"></th></tr> <tr> <td>Angelierte Probemenge kg</td><td><1.5</td><td></td><td><1.5</td><td><1.5</td></tr> <tr> <th>Elemente und Schwermetalle</th><th colspan="4"></th></tr> <tr> <td>Natrium (gesamt) ICP-OES Schwermetalle (semiquantitativ) XRF</td><td>mg/kg TS Na</td><td>5'910 s. Anhang</td><td>307'000 s. Anhang</td><td>370'000 s. Anhang</td></tr> <tr> <td></td><td></td><td>5'150 s. Anhang</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Probenbezeichnung	FBBE WELK B35-75	FBBE WELK B35-82	FBBE WELK B304 Ausbildung	FBBE WELK B304 Beton	Proben-Nr. Bachema Tag der Probenahme	38362 30.09.15	38361 30.09.15	38363 30.09.15	38364 30.09.15	Probenparameter					Angelierte Probemenge kg	<1.5		<1.5	<1.5	Elemente und Schwermetalle					Natrium (gesamt) ICP-OES Schwermetalle (semiquantitativ) XRF	mg/kg TS Na	5'910 s. Anhang	307'000 s. Anhang	370'000 s. Anhang			5'150 s. Anhang		
Probenbezeichnung	FBBE WELK B35-75	FBBE WELK B35-82	FBBE WELK B304 Ausbildung	FBBE WELK B304 Beton																																
Proben-Nr. Bachema Tag der Probenahme	38362 30.09.15	38361 30.09.15	38363 30.09.15	38364 30.09.15																																
Probenparameter																																				
Angelierte Probemenge kg	<1.5		<1.5	<1.5																																
Elemente und Schwermetalle																																				
Natrium (gesamt) ICP-OES Schwermetalle (semiquantitativ) XRF	mg/kg TS Na	5'910 s. Anhang	307'000 s. Anhang	370'000 s. Anhang																																
		5'150 s. Anhang																																		

Abb. 24 Quelle links: Stahlträger Sonnenbergtunnel 2006 (EBP Schweiz AG), Quelle: Auswertung Wischprobe WELK Gubristtunnel 2015 (Bachema AG)

Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):

Laboranalyse zur Feststellung von korrosionsfördernden Produkten bzw. Rückständen u.a. auf Stahlbauteilen des Bauwerks

Zerstörungsfrei:	Ja
Typ Untersuchungsmethode: Laborprüfung (3)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Metall
USM geeignet für Phase Überwachung: nein	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): nein
Einsatz bei Befunden wie: ID-BE-Code: • BE-2100 Korrosion	Geeignet für Schadensprozesse wie: ID-S-Code: • S-21 Stahlkorrosion
Messgrösse (vgl. Katalog MEGR): Korrosionsrückstände, korrosionsfördernde Produkte (z.B. Schwermetalle, Na-/Cl--Gehalte, pH-Wert)	Erfasste Masseinheit (LE): Gehalte in mg/kg pH-Wert
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: Quantitativ; Beurteilung durch Fachperson nötig	Genauigkeit und Grenzen: neben Diagnose auch Beurteilung der Materialqualität möglich; punktuelle Aufnahme; Auswertung und Interpretation abhängig von der beurteilenden Person
Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand: • Bauteilspezifische RBs für Probenahme (z.B. Abluftkanal: Abschaltung Tunnellüftung; Fahrraum: Sperrungen und evtl. Hebebühne) Kosten: • Preisklasse PK2 (100–499 CHF/MQ) ²⁸
Normen und Literatur:	Fallbeispiele: Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.Röhre Nr. 5 Gubristtunnel
Anbieter: Akkreditierte Prüflabore	Verwandte USM: ID-U-Code: • U-3-530 Zusammensetzung Staub (Wischprobe)

²⁸ Annahme: eine Probe pro MQ inkl. Probenahme (unter Annahme, dass mehrere Proben entnommen werden); Kosten stark abhängig von zu untersuchenden Rückständen/Produkten

Tab. 24 Katalogblatt 24

Nachrechnungen Bauwerk / Bauwerksteil	ID-U-Code: U-4-110
Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):	
Statische Überprüfung von Bauwerken bzw. Bauwerksteilen bzw. Gefährdungsbilder, für welche ein veränderter Nutzen vorgesehen ist, eine neue Gefahrensituation erkannt wird oder aufgrund der Zustandsuntersuchung eine Schwächung des Tragwiderstands vermutet wird.	
Zerstörungsfrei:	Ja
Typ Untersuchungsmethode: Statische, geodätische und konstruktive Untersuchungen / Belastungsversuche (4)	Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart: Alle Bauarten
USM geeignet für Phase Überwachung: nein	Eignung als Monitoring (Onlinemessung): nein
Einsatz bei Befunden wie:	Geeignet für Schadensprozesse wie:
ID-BE-Code: <ul style="list-style-type: none">• BE-1100 Setzungen, Verschiebungen, Verformungen, Hebungen• BE-1200 Fugenversätze, Fugenöffnungen, Kantenausbrüche• BE-1300 Risse• BE-1400 Abplatzungen• BE-1500 Belagsschäden• BE-2100 Korrosion	ID-S-Code: <ul style="list-style-type: none">• S-1 Schadensprozess Stahlbeton• S-2 Schadensprozess Baustahl• S-3 Schadensprozess Baugrund• S-6 Schadensprozess Fahrbahn
Messgrösse (vgl. Katalog MEGR): Tragsicherheitsnachweis, Reserve	Erfasste Masseinheit (LE): Flächenbezogene Korrosionswahrscheinlichkeiten (%)
Aussagekraft und Zuverlässigkeit: Liefert Wahrscheinlichkeiten, mit Kalibrierung durch ergänzende USM zuverlässige Resultate.	Genauigkeit und Grenzen: Durch Kalibrierung hohe Genauigkeit, unter Annahme eines Typs von Korrosion; Störfaktor: Betonfeuchtigkeit, frühere, unbekannte Reprofilierungen
Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand: - Kosten: <ul style="list-style-type: none">• Preisklasse PK5 (> 5'000 CHF/MQ)²⁹
Normen und Literatur: <ul style="list-style-type: none">• SIA 269	Fallbeispiele: <ul style="list-style-type: none">Nr. 1 Gotthard-Strassentunnel, 1.RöhreNr. 2 SeelisbergtunnelNr. 3 KerenzerbergtunnelNr. 4 GotschnatunnelNr. 5 GubristtunnelNr. 6 Tunnel BelchenNr. 8 SonnenbergtunnelNr. 9 Reussporttunnel
Anbieter: Ingenieurbüros	Verwandte USM: <ul style="list-style-type: none">• U-4-120 Überprüfung / Aktualisierung Statik

²⁹ Kosten vom Prüfumfang abhängig

Tab. 25 Katalogblatt 25

Sondierungen am Bauwerk	ID-U-Code: U-4-210
	

Abb. 25 Quelle links: Sondieröffnung Sonnenbergtunnel 2010 (EBP Schweiz AG), Quelle rechts: Sondieröffnung Kieskoffer Tunnel Girsberg für Versickerungsversuch 2019 (EBP Schweiz AG)**Beschreibung Diagnostik (Msn. / Zielergebnis):**

Freilegen von Tragwerksteilen oder Entwässerungseinrichtungen

Zerstörungsfrei: Nein**Typ Untersuchungsmethode:**

Statische, geodätische und konstruktive Untersuchungen / Belastungsversuche (4)

Anwendung bei Bauwerksteilen mit Bauart:

Alle Bauarten

USM geeignet für Phase Überwachung:

nein

Eignung als Monitoring (Onlinemessung):

nein

Einsatz bei Befunden wie:

ID-BE-Code:

- BE-1000 Mechanische Integrität
- BE-1500 Belagsschäden
- BE-3000 Undichtigkeit
- BE-4000 Funktionsstörungen

ID-S-Code:

- S-1 Schadensprozess Stahlbeton
- S-2 Schadensprozess Baustahl
- S-3 Schadensprozess Baugrund
- S-5 Schadensprozess Abdichtung
- S-6 Schadensprozess Fahrbahn

Messgröße (vgl. Katalog MEGR):

Abmessungen, Schadstellen

Erfasste Masseinheit (LE):

z.B. Abmessung in m

Aussagekraft und Zuverlässigkeit:

qualitativ und quantitativ, abhängig von Ziel der Sondierung (z.B. nur Prüfung Vorhandensein bzw. Lage einer Leitung, keine genauen Abmessungen erforderlich)

Genauigkeit und Grenzen:

Erfolg von Sondierungen oft abhängig von vorhandenen Grundlagen (Pläne, Untersuchungen)

Ergänzende USM / Kombinationen von USM:	Betriebsrandbedingungen, Hinweise Aufwand:
ID-U-Code: • U-1-211 visuelle Aufnahmen, Einzelbilder	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteilspezifische RBs (z.B. Abluftkanal: Abschaltung Tunnellüftung; Fahrraum: Sperrungen und evtl. Hebebühne) • i.d.R. Aufwand Baumeister für Freilegung von Bauteilen und Instandsetzung • Bei ungenügenden Grundlagen (Plänen, Untersuchungsresultate) kann Aufwand schnell um ein Mehrfaches ansteigen (z.B. grössere Betondeckung bedeutet viel grösserer Spitz-Aufwand)
	Kosten: • Preisklasse PK5 (> 5'000 CHF/MQ) ³⁰
Normen und Literatur: • SIA 269	Fallbeispiele: Nr. 2 Seelisbergtunnel Nr. 3 Kerenzerbergtunnel Nr. 6 Tunnel Belchen Nr. 7 Tunnel Girsberg Nr. 8 Sonnenbergtunnel
Anbieter: Bauunternehmen, Ingenieurbüros, Vermessungsbüros (je nach Bedarf)	Verwandte USM: • U-2-421 Sondier-/Bewehrungsfenster: Bestimmung Korrosionsgrad Bewehrung

³⁰ Kosten vom Sondierumfang abhängig

Literaturverzeichnis Anhang III

Publikationen

-
- [1] Steiger, A. & Stutz, G. (2000), „**Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau: Veranstaltung für Ingenieure, öffentliche Verwaltungen, Unternehmungen**“.
 - [2] Boschmann Käthler, C., Elsener B. & Angst, U. (2021), “**Critical chloride content in concrete: realistic determination and influence of air voids: Bundesamt für Straßen ASTRA, Forschungsbericht November 2021**”.
 - [3] Bundesministerium für Klimaschutz, ÖBB-Infrastruktur AG, Autobahnen- und Schnellstraßen- Finanzierungs-Aktiengesellschaft (2017), „**Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen RIBET: Deliverable D 3 Riss-Monitoring**“, Auftragnehmer: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Technische Universität Graz- Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme. Impulsprogramm Bau - Erhaltung und Erneuerung.
 - [4] Flohrer, C. (1999), „**Fachtagung Bauwerksdiagnose: Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfung**“.
 - [5] Hunkeler, F. (2010), „**Zielorientierte Bauwerksuntersuchungen mit neueren zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP): Fachveranstaltung 894632**“, Bau und Wissen.
 - [6] Mühlau, B. (2007), „**Instandsetzung von Betonbauwerken (Teil 1): Kurzlehrgang für Hochschulabsolventen 864171**“, Bau und Wissen.
-

Firmendokumentation

-
- [7] Bisschop, J. & Klemm, L. (2014), „**Mikroskopische Untersuchungen an Beton**“, TFB-Bulletin Nr. 2, Mai 2014.
 - [8] i.m.p. infralab ARAN, „**Automatic Road Analyzer**“.
 - [9] Jacobs, F. (2021), „**Bewertung der Druckfestigkeit im Bauwerk – die neue SN EN 13791**“, TFB-Bulletin Nr. 1, März 2021.
 - [10] Mühlau, B. (2013), „**Georadar**“, TFB-Bulletin Nr. 2, Juli 2018.
 - [11] Schiegg, Y. (2013), „**Potenzialmessung an Stahlbetonbauten: neues SIA-Merkblatt**“, TFB-Bulletin Nr. 3, September 2013.
 - [12] Schiegg, Y. (2015), „**Monitoring von Bauwerken**“, TFB-Bulletin Nr. 3, August 2015.
 - [13] Solexperts AG, „**Trivec · Gleitmikrometer · Gleitdeformeter: Linienweise Messung von Verschiebungs- und Verformungsprofilen in der Geotechnik**“.
 - [14] v. Greve-Dierfeld, S. & Frey, S. (2022), „**Alternative Indikatoren zur Messung der Karbonatisierungstiefe**“, TFB-Bulletin Nr. 1, August 2022.
-

IV

Vergleichsmethodik von Untersuchungsmassnahmen mittels Unsicherheitsbeiwert, Value of Information

IV.1 Einleitung

Hauptziel des Forschungsprojektes ist es, die Grundlagen für das Erhaltungsmanagement von bergmännischen Strassentunneln zu verbessern und zu standardisieren, damit systematische, transparente und stabile Erhaltungsentscheide und kosteneffiziente Erhaltungsmassnahmen gewährleistet sind.

Im Teilprojekt EP2 sollen die Überwachungs- und Inspektionsmethoden systematisiert und in Abhängigkeit der detektierten Befunde und den damit verknüpften Schadensprozessen katalogisiert werden, um damit einen Beitrag zum übergeordneten Hauptforschungsziel zu leisten. Es beinhaltet gemäss Aufgabenbeschrieb des Forschungsprojekts die «*Identifikation der Methoden und der notwendigen Werkzeuge zur Festlegung der Schadensprozesse sowie Optimierung der Inspektionen und Integration der Risikoanalyse in das Inspektionsprogramm.*» [9].

Das «Hauptprodukt» des Teilprojekts ist der Katalog EP2 der «Überwachungs- und Inspektionsmethoden». Ergänzend zu diesem Katalog soll ein «*Vorschlag zur Vergleichsmethodik und der -kriterien.*» erstellt werden, welcher das «*[...] Vergleichen und bewerten der Methoden gemäss vorgeschlagener Vergleichsmethodik, Vorschlag wie Risikoüberlegungen in den Überwachungsprozess einbezogen werden können [...]*» [9]. Das vorliegende Dokument erläutert einen möglichen Vorschlag einer solchen Vergleichsmethodik und zeigt diese anhand eines konkreten Beispiels auf.

Die Vergleichsmethodik kommt dann im Erhaltungsprozess zum Einsatz, wenn eine Untersuchung für nötig befunden wird und eine geeignete Untersuchungsmethode gewählt werden soll; dies vergleichend aus einer Auswahl von möglichen, für ein entsprechendes Gefährdungsszenario einsetzbaren Diagnostikmethoden z.B. aus dem Katalog EP2. Eine Vergleichsmethodik könnte auch dazu verwendet werden, um Untersuchungen mit (baulichen) Massnahmen in Anbetracht der Unsicherheit und des Risikos zu vergleichen. Der Vergleich erfolgt anhand des Risikos eines konkreten Gefährdungsszenarios in einem Tunnel.

Methoden (ob Untersuchungs- oder bauliche Instandsetzungsmethoden) an sich losgelöst von einem spezifischen Szenario zu vergleichen, wird jedoch nur als bedingt sinnvoll erachtet, da die verschiedenen Technologien ihre Unterschiede und Vor- und Nachteile vor allem im jeweiligen Untersuchungskontext ausspielen.

Es ist wichtig vorwegzunehmen, dass das vorliegende Konzept eine Vergleichsmethodik darstellt, welche an Methoden des Risikomanagements und Betriebssicherheit anknüpfen. Ihr Ziel und Mehrwert ist eine möglichst systematische, standardisierte Bewertung, um einen transparenten Vergleich von Untersuchungsmethoden im Kontext des Erhaltungsprozesses zu ermöglichen. Es soll eine Methode darstellen, welche mögliche Einflussfaktoren bezüglich Unsicherheiten systematisch zu berücksichtigen versucht. Es ist weder Anspruch noch Ziel der Bewertung, Eintretenswahrscheinlichkeiten absolut betrachtet präzise zu bewerten. Es besteht kein Anspruch darauf, dass die Methode vollständig automatisierbar ist, noch durch Laien angewendet werden soll. Es wird darauf hingewiesen, dass das Forschungsprojekt ein Instrument für das übergeordnete Erhaltungsmanagement entwickelt. Entsprechend der frühen Projektphase, in welcher dieser Prozess stattfindet, sind dafür Vergleiche von unterschiedlichen, mit Unsicherheiten behafteten Szenarien nötig. Eine rigorose probabilistische Abhandlung der Gefährdungsszenarien, Untersuchungen und Unsicherheiten wurde für die Vergleichsmethodik als nicht praktikabel erachtet und würde trotz hoher Komplexität bestenfalls zu Scheingenauigkeiten führen, da die dazu nötigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen weder bekannt noch mit vertretbarem Aufwand zu ermitteln wären.

Das wichtige Ziel, dass Entscheide stabil sein sollten, wird mit der vorgeschlagenen semi-quantitativen Methode «*Vergleichsmethodik mittels Unsicherheitsbeiwert*»

(nachfolgend beschrieben in den Kap. IV.3. ff) ebenfalls verfolgt. Diesbezüglich ist jedoch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig, damit das Werkzeug mittels empirischer Methoden kalibriert und weiterentwickelt werden kann, sodass es zu robusten Entscheidungen führt. Dies ist ein grundsätzliches Problem bei risikobasierten Inspektionstechniken (RBI-Methoden), das in der Literatur identifiziert wurde und für das möglichen Lösungsansätze existieren, wie z.B. Inkorporation von Fuzzy-Logik. [1]

Die Vergleichsmethodik von Untersuchungsmassnahmen sowie ihre Integration in den Entscheidungsprozess wurde mit EP4 in Workshops diskutiert (02.09.2021, 04.10.2021). Resultat war die Einigkeit, dass die präsentierte Vergleichsmethodik eine Möglichkeit darstellt, Untersuchungsmethoden unter Einbezug von Risiken zu vergleichen. EP4 beabsichtigte zum Zeitpunkt der Workshops weder die Aufnahme der Untersuchungsmethoden, der Vergleichsmethodik noch des «Value of Information» (Vol, siehe dazu Erläuterungen IV.6) in ihr Entscheidungsmodell.

IV.2 Vergleich Value of Information mit Vergleichsmethodik

Der Value of Information (Vol) ist eine akademisch etablierte Methode zur Bewertung von Untersuchungsmassnahmen (siehe Erläuterungen IV.6 und [3][4][6][7][8]). Die vom EP2 vorgeschlagene Vergleichsmethodik ist dem Vol (wie dieser in den Referenzen ermittelt wird) grundsätzlich sehr ähnlich. Der Hauptunterschied ist, dass bei der Vergleichsmethodik auf den Einbezug von Massnahmen verzichtet wird, denn es werden folgende Nachteile bei der Ermittlung des Vol zum Zweck der Auswahl einer Untersuchungsmethode identifiziert:

1. Praktikabilität der Entscheidungsbäume:

Die Methodik erfordert das Verknüpfen von möglichen Untersuchungsergebnissen mit jeweiligen Massnahmen, für welche wiederum bereits Kosten und Auswirkungen auf das Betriebsrisiko abgeschätzt werden müssen. Das Beispiel zeigt auf, wie schnell eine erhebliche Komplexität erreicht wird bei einem vergleichsweise einfachen und geradlinigen Szenario und dies für nur eine Untersuchungsmethode, eine Massnahme (respektive zwei mit Nichtstun), ein Gefährdungszenario und ohne Einbezug des zeitlichen Aspekts.

2. Unbekannte Wahrscheinlichkeitsverteilungen:

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Untersuchungsmethoden bezüglich ihrer Genauigkeit ist von vielen Faktoren abhängig (siehe Vergleichsmethodik). Je Methode die möglichen Untersuchungsergebnisse in Kategorien einzuteilen und diesen Kategorien jeweils eine Ungenauigkeit zuzuweisen stellt eine grosse Schwierigkeit dar.

Aufgrund der oben erläuterten Nachteile des Vol und zur Verringerung der Komplexität für die Anwendung wurde die nachfolgend beschriebene Vergleichsmethodik mittels Unsicherheitsbeiwert (siehe Kap. IV.3. ff) in Anlehnung an den Confidence Factor [2] und als Vereinfachung des Vol entwickelt.

IV.3 Vergleichsmethodik mittels Unsicherheitsbeiwert

Eine durchgeführte Untersuchung bzw. deren Ergebnis vermag die tatsächliche Eintretenswahrscheinlichkeit (Probability of Failure oder PoF) eines Gefährdungszenarios nicht zu vermindern. Es kann lediglich die Unsicherheit dessen Beurteilung vermindern. Bei hoher Unsicherheit muss die PoF erhöht werden, was in einem höheren Betriebsrisiko resultiert. Der Nutzen einer Untersuchung ist, die Unsicherheit und damit das angenommene Betriebsrisiko zu verringern.

Da die Vergleichsmethodik einen Entscheid zur Wahl einer optimalen Untersuchungsmethode bezieht, muss eine mögliche Verringerung der Unsicherheit vor der Durchführung des Untersuchs abgeschätzt werden.

Um die Verringerung der Unsicherheit quantitativ abschätzen zu können, wird als Sicherheitsfaktor der **Unsicherheitsbeiwert UB** eingeführt. Die Definition dieses Beiwerts lehnt sich an den in OPTimal 2020 verwendeten **Konfidenzfaktor (Confidence Factor oder CF)** [2] und den Begriff des Beiwerts aus der Dimensionierung von Tragwerken an. Die Begriffsänderung wird vorgeschlagen, da ein höherer Konfidenzfaktor mit einer grösseren Unsicherheit einhergeht, was kontraintuitiv ist. Zudem wird der Confidence Factor in der Literatur teilweise unterschiedlich definiert [3][4]. Weiter wird der vorgeschlagene UB im Gegensatz zum CF als ≥ 1.0 definiert.

Der Unsicherheitsbeiwert UB erhöht die PoF von einem charakteristischen Basisniveau PoF_k (z.B. aus Zerfallskurve von EP1, basierend auf Schadensprozess, Bauteilart, dimensionierter Nutzungsdauer etc.) auf ein Entscheidungsniveau PoF_d .

$$PoF_d = PoF_k \cdot UB$$

Der UB besteht aus Teilstücken, welche nach den unterschiedlichen Ursachen der Unsicherheit gegliedert sind. Um die ganze Bandbreite möglicher Quellen der Unsicherheit abzudecken, werden folgende Teilstücke vorgeschlagen:

$$UB = (UB_S \cdot UB_{SE}) \cdot UB_B \cdot (UB_U \cdot UB_{UE})$$

Wobei:

$(UB_S \cdot UB_{SE})$ Unsicherheit S aufgrund der Streuung des dem beobachteten Gefährdungsszenarios zugrundeliegenden Schadensprozesses.

UB_S entspricht der eigentlichen **Streuung** des zugrundeliegenden Schadensprozesses. Ist von Untersuchung unabhängig.

UB_{SE} ist der Anteil des Unsicherheitsbeiwerts aus **unsicherer erster Beurteilung** (Diagnose Typ Schadensprozess) sowie aus beschränkten Kenntnissen über die den Schadensprozess bestimmenden **Einflussfaktoren** (z.B. Feuchtigkeit, Chloride etc.).

Dieser Anteil soll durch Untersuchung reduziert werden.

UB_B Unsicherheit B aufgrund der konkreten **Situation des Bauwerk bzw. Ort der Untersuchung: **Unsicherheit aus der Variabilität vor Ort z.B. von Geometrie** (örtliche Variabilität von Geologie, Abmessungen, etc.), **Ausführungsqualität Bauwerksteil** (Detailmaterialisierung, u.a. Festigkeitsentwicklungen), **Verlauf bzw. Intensität Einwirkungen** (Bauwerks- bzw. Betriebs-«Geschichte», u.a. mit unbekannten Instandsetzungsmassnahmen, Ereignissen bzw. Einwirkungen), **Modellunschärfe** (z.B. bei statischen Annahmen).**

$(UB_U \cdot UB_{UE})$ Unsicherheit U aufgrund der **Streuung / Ungenauigkeit der Resultate abhängig von den **eingesetzten Untersuchungsmethoden** für die zugrundeliegenden Schadenprozesse.**

UB_U entspricht der **Unsicherheit**, welche direkt mit der **Untersuchungsmethode** zusammenhängt, mit der das Gefährdungsszenario, respektive der zugrundeliegende Schadensprozess bestimmt wurde. Eine erste Einschätzung ist erforderlich, wie gut sich die angewandte Methode selbst zur

Untersuchung des Schadensprozess bezüglich Genauigkeit eignet.

UB_{UE} ist der Anteil des Unsicherheitsbeiwerts aufgrund der **Variabilität der konkreten örtlichen Einflüsse auf die Untersuchungsmethode bzw. -resultate**, wie z.B. Beschaffenheit Bauteil (Oberflächenbeschaffenheit, Zugänglichkeit für exakte Messung), Umwelteinflüsse auf Inspektion (Licht, Feuchtigkeit, ...), Inspektor (Erfahrung, Kompetenz, Faktor Mensch), Probenumfang, Probenlokalisierung, Messintervall (bei online Messungen)

Die zu bewertenden Aspekte der Teilstufen sind in **fetter** Schrift aufgelistet.

Es wird jeweils der UB und das resultierende Risiko für den aktuellen Zustand $R_{0,d}$ und nach Anwendung jeder zu vergleichenden Untersuchungsmethode 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 $\Delta R_{i,d} = R_{i,d} - R_{0,d}$ erlaubt den Vergleich verschiedener Untersuchungsmethoden anhand ihrer Wirkung auf die Unsicherheit sowie mit ihrer Effizienz:

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

Wobei C_i die geschätzten Kosten des Untersuchs darstellen.

IV.4 Beispiel für Anwendung der Vergleichsmethodik

IV.4.1 Einleitende Bemerkungen

Als Anwendungsbeispiel wird das Beispiel vom EP4 (Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln – Beispiel Entscheidungsmodell vom 4.8.2021) aufgegriffen. Das Gefährdungszenario «Versagen Gewölbe in den Blöcken 2–6» soll dabei untersucht werden. Dem Szenario liegt der **Schadensprozess Bewehrungskorrosion** zugrunde. Aus der Zerfalls-Standardkurve wird eine charakteristische Eintretenswahrscheinlichkeit von $5 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr abgeleitet und die Konsequenzen eines Versagens der Innenschale in Blöcken 2–6 werden mit 10 Mio. CHF beziffert.

Es werden dazu zwei Untersuchungsmethoden zum Schadenszenario Tragwerksversagen aufgrund von Korrosion verglichen: Die Chloridanalyse und Potentialfeldmessung. Der Unsicherheitsbeiwert UB der Ausgangslage sowie der beiden zu vergleichenden Untersuchungsszenarien muss dabei bestimmt werden. Die Ermittlung der Unsicherheitsbeiwerte (UB) erfolgt zunächst z.B. durch Expertenwissen, u.a. mit den Hinweisen aus dem Katalog Untersuchungsmethoden des EP2 sowie mit Unterstützung von Daten aus Fachpublikationen [5] bzw. Datensammlungen, welche die Zusammenstellung und den Vergleich der Werte methodenübergreifend vereinfacht. Zukünftig könnte die Evaluation der UB durch die Daten basierend auf sämtlichen getätigten Evaluationen innerhalb eines Managementsystems sowie durch eigens zum Zweck der Quantifizierung der UBs durchgeföhrten Studien gestützt beziehungsweise normiert werden. Zudem könnten eine Weiterentwicklung im Sinne einer semi-quantitativen Methode wie Fuzzy-Logik die Evaluation «versprachlichen» und somit stabiler und anwenderfreundlicher gestalten. Dabei dient der Katalog der Untersuchungsmethoden EP2 zur Erfassung der methodenspezifischen Hinweise und Werte (Attribute) zur Ermittlung des UB.

Die Vergleichsmethodik ist bezogen auf den zeitlichen Aspekt flexibel einsetzbar. Das gewählte Beispiel bestimmt die Unsicherheit zum aktuellen Zeitpunkt und vergleicht, wie diese gesenkt werden kann. Sie lässt jedoch zu, die Unterschiede bezüglich der Entwicklung der Unsicherheit bezogen auf einen zukünftigen Zeitpunkt zu vergleichen. Beispielsweise könnte beurteilt werden, ob eine Chloridanalyse oder die Potentialfeldmessung die Unsicherheit bezüglich des Eintretens eines Tragwerksversagens in 20 Jahren besser zu reduzieren vermag.

Dies unterstreicht auch die Wichtigkeit sich bei der Anwendung und Wahl der UBs stets auf den angestrebten Vergleich zu fokussieren: den Vergleich von Untersuchungsmethoden bezüglich eines spezifischen Gefährdungsszenarios und der konkreten Fragestellung. Ist z.B. für einen Entscheid die Entwicklung der kommenden 20 Jahren wichtiger als die aktuelle Versagenswahrscheinlichkeit, ist bei der Wahl der Unsicherheitsbeiwerte insbesondere den Faktoren zu den Einflussfaktoren der zeitlichen Entwicklung des Schadens (Einflussfaktoren UB_{SE}) und der Aussagekraft der verglichenen Untersuchungsmethoden diesbezüglich Beachtung zu schenken (Hinweise im Katalog Untersuchungsmethoden). Eine Senkung der Unsicherheit zum aktuellen Zustand kann dabei weniger ins Gewicht fallen als eine grössere Gewissheit zum weiteren zeitlichen Verlauf. Aufgrund der noch nicht abschliessenden Definition der Faktoren ist ausserdem zu vermeiden, dass Aspekte unwillentlich doppelt gewichtet werden, beispielsweise das Unwissen über die Feuchtigkeit im Bauteil, welche bei der Wahl des UB_{SE} als auch des UB_B berücksichtigt wird.

Zuletzt ist in Erinnerung zu rufen, dass der Vergleich jeweils vor einem Untersuchung geführt wird. Soll nach der Durchführung ein erneuter Vergleich stattfinden, sind nicht nur die UBs zu adjustieren, sondern auch die dem Vergleich zugrundeliegende charakteristische Eintretenswahrscheinlichkeit zu hinterfragen. Deren Höhe und Verlauf kann abweichend von, der mangels besseren Wissens, zur Verfügung gestellten Standardkurve gewählt werden und die UBs entsprechend reduziert werden.

IV.4.2 Unsicherheitsbeiwerte Ausgangslage – aktueller Zustand

Zunächst wird der UB der Ausgangslage bestimmt.

Annahme für Fallbeispiel (gemäß EP4):

Die zu beurteilenden Bauwerksteile sind bewehrte Gewölbeblöcke; Nr. 2 bis 6, d.h. nahe beim Portal (< 100 m Abstand) eines bergmännischen Tunnels. Als Schadensszenario wird die Korrosion der Bewehrung (v.a. chloridinduziert) für den Vergleich angenommen.

Tab. 1 UB-Teilfaktoren der Ausgangslage mit Begründung (Pre-Inspection)

UB_S	1.5	Ist aus der Unschärfe der Zerfallskurve abgeleitet (Streuung des Zerfallsprozesses bzw. Schadensprozesses zum aktuellen Zeitpunkt)
UB_{SE}	3.0	<i>Resultiert aus:</i>
	2.0	Es besteht Unsicherheit bezüglich der Diagnose (des zugrundeliegenden Schadensprozesses). Es könnte dem Gefährdungszenario auch Spaltkorrosion mit einem deutlich ungünstigeren Verlauf zugrunde liegen.
	1.5	Im Schadensprozesskatalog werden die wichtigen Einflussfaktoren wie Feuchtigkeit, CO_2 -Zufuhr, Zusammensetzung und Porosität Beton (Chloride/Dekarbonisierung) abgeleitet der pH des Betons genannt. Es nicht klar, wie dicht der Beton ist und wie weit der Eintrag von Chloriden und Kohlendioxid fortgeschritten ist.
UB_B	1.5	<i>Resultiert aus:</i>
	1.2	Es besteht eine erhebliche Unsicherheit bezüglich der Bewehrungsüberdeckung.
	1.2	Es entsteht eine erhebliche Unsicherheit bezüglich der Ausführungsqualität des Betons auf den Verlauf, da div. Kiesnester und Hohlstellen sichtbar sind.

Tab. 1 UB-Teilfaktoren der Ausgangslage mit Begründung (Pre-Inspection)

	1.05	Geschichtlich sind Probleme aufgrund chloridinduzierter Korrosion auf der Strecke bekannt. Am vorliegenden Tunnel jedoch weniger.
	1.0	Bezüglich des Last-, beziehungsweise Tragwerksmodells wird keine Unsicherheit angenommen.
UB_U	8.0	Die visuelle Inspektion gibt nur ungenügend Aufschluss über das Voranschreiten der Korrosion aufgrund der Karbonatisierung.
UB_{UE}	2.4	<i>Resultiert aus:</i>
	1.0	Die inspizierten Bauteile haben sind gut zugänglich, es wird kein Einfluss auf die Unsicherheit angenommen.
	1.2	Die Beleuchtung des Tunnels ist schlecht und die Tunnelwände waren zum Zeitpunkt der Inspektion in den Portalbereichen verschmutzt.
	2	Der verfassende Inspektor wird als wenig erfahren eingestuft.
	1.0	Der Inspektor hat den ganzen Tunnel und Block abgelaufen. Der Probenumfang stellt keine Unsicherheit dar.
	1.0	Probenlokalisierung: dito
	1.0	Messintervall: die Hauptinspektionen haben regelmässig stattgefunden. Es wird keine Unsicherheit aufgrund von zeitlichen Lücken in den vorhandenen Informationen vermutet.
UB	130	Es resultiert eine Unsicherheit, die das Risiko um 2 Grössenordnungen für den Entscheid erhöht.

Aus dem Katalog der Untersuchungsmethoden lassen sich für den vorliegenden Schadensprozess die in Frage kommenden Methoden anzeigen. Davon werden zwei verglichen: 4.3) **Potentialfeldmessung** und 4.4) **Chloridanalyse**.

IV.4.3 Bestimmung Unsicherheitsbeiwerte Potentialfeldmessung

Die Potentialfeldmessung würde an 2 Blöcken über 20 m² durchgeführt und mit einer Sondage kombiniert (gem. Empfehlung Katalog Untersuchungsmethoden).

Tab. 2 Bestimmung UB-Teilfaktoren der Potentialfeldmessung mit Begründung (Post-Inspection)

UB_S	1.5	Die Untersuchung hat keinen Einfluss auf die dem Schadensprozess inhärente Unschärfe.
UB_{SE}	1.7	<i>Resultiert aus:</i>
	1.2	Die Unsicherheit bezüglich des Typs der Korrosion reduziert sich deutlich dank der ergänzenden Sondage und der Daten über die Verteilung des Potentials.
	1.4	Die Einflussfaktoren sind durch die Potentialfeldmessung nicht besser bekannt.
UB_B	1.3	<i>Resultiert aus:</i>
	1.1	Die Bewehrungsüberdeckung wird dank ergänzenden «Profometer»-Aufnahmen bestimmt. Es verbleibt eine geringere Unsicherheit.
	1.1	Durch die Sondage verringert sich die Ungewissheit bezüglich Qualität.
	1.05	Bezüglich geschichtlicher Unsicherheiten ändert sich durch den Untersuch nichts.
	1.0	Bezüglich des Last-, beziehungsweise Tragwerksmodells wird keine Unsicherheit angenommen.
UB_U	2.0	Aufgrund der Hinweise im Katalog der Untersuchungsmethoden wird der Potentialfeldmessung für den vorliegenden Fall eine klare Reduktion der Unsicherheit im Vergleich zur visuellen Methode zugewiesen.
UB_{UE}	1.6	<i>Resultiert aus:</i>
	1.0	Die inspizierten Bauteile sind gut zugänglich, es wird kein Einfluss auf die Unsicherheit angenommen. (bleibt unverändert)

1.2	Die Wand wird befeuchtet, nicht gereinigt, jedoch ausgeleuchtet für die Arbeiten.
1.2	Es wird davon ausgegangen, dass ein spezialisiertes Unternehmen beauftragt wird.
1.05	Die Prüfposition wird sorgfältig entsprechend Befunde und kritischen Zonen gewählt.
1.05	Probenlokalisierung: leichte Einschränkungen bei Zugänglichkeit für Ausführung.
1.0	Messintervall: hat keine Relevanz, die Messung mittels Potentialfeldanalyse findet erstmalig statt.
UB	11 Die Unsicherheit wird um eine Größenordnung reduziert.

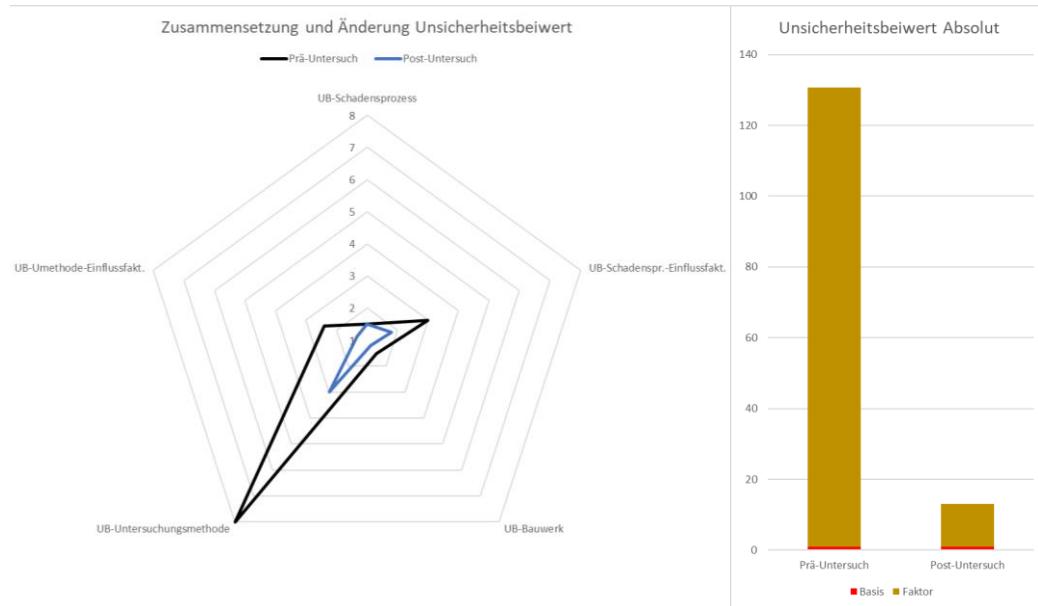


Abb. 1 Veränderung des Unsicherheitsbeiwerts durch Potentialfeldmessung. Links: grafische Auswertung der Veränderung der Zusammensetzung und der Grösse des Unsicherheitsbeiwerts. Rechts: absoluter Vergleich der Faktoren.

IV.4.4 Bestimmung Unsicherheitsbeiwert Chloridanalyse

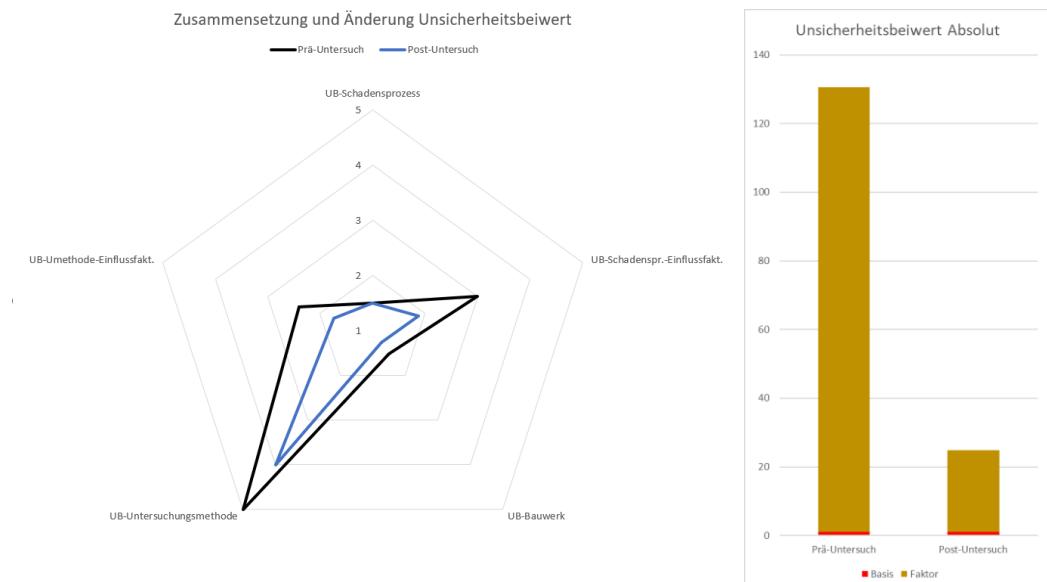
Die Chloridanalyse erfolgt anhand von Bohrkern-Proben an 3 Blöcken mit je 6 Messungen / Tiefenstufe pro Bohrkern. Dabei können auch die Karbonatisierungstiefe und evtl. weitere Messwerte an den Bohrkernen bestimmt und eine grobe visuelle Beurteilung der Betonqualität vorgenommen werden.

Tab. 3 Bestimmung UB-Teilfaktoren der Chloridanalyse anhand Bohrkernen mit Begründung (Post-Inspection)

UB_S	1.5	Die Untersuchung hat keinen Einfluss auf die dem Schadensprozess inhärente Unschärfe.
UB_{SE}	1.9	Resultiert aus:
	1.7	Der Chloridgehalt kann mit hoher Genauigkeit gemessen werden, was jedoch keine absolute Sicherheit bezüglich des Voranschreitens der Korrosion gibt.
	1.1	Die Einflussfaktoren Chloridgehalt und pH aufgrund Dekarbonatisierung können durch die Methode bestimmt werden. Auf die Betondichte kann rückschliessend eine Aussage zum Eintritt von Feuchtigkeit und Sauerstoff gemacht werden, womit eine geringe Unsicherheit bezüglich Einflussfaktoren verbleibt.
UB_B	1.3	Resultiert aus:
	1.1	Die Bewehrungsüberdeckung wird dank der Bohrkernentnahmen punktuell gemessen. Es verbleibt eine geringere Unsicherheit.

Tab. 3 Bestimmung UB-Teilfaktoren der Chloridanalyse anhand Bohrkernen mit Begründung (Post-Inspection)

1.1	Durch die Bohrkernentnahme und der Auswertung der daran ermittelten Messwerte verringert sich die Ungewissheit bezüglich Qualität.
1.05	Bezüglich geschichtlicher Unsicherheiten ändert sich durch den Untersuch nichts.
1.0	Bezüglich des Last-, beziehungsweise Tragwerksmodells wird keine Unsicherheit angenommen.
UB_U	4 Die Chloridanalyse misst Einflussfaktoren der Korrosion und nicht direkt das Ausmass/Voranschreiten. Die Unsicherheit zur Aussage über eine Versagenswahrscheinlichkeit wird dadurch erhöht.
UB_{UE}	1.7 Resultiert aus:
1.0	Die inspizierten Bauteile haben sind gut zugänglich, es wird kein Einfluss auf die Unsicherheit angenommen. (bleibt unverändert)
1.2	Die negativen Umwelteinflüsse werden für die Messung als vernachlässigbar klein angenommen.
1.2	Standardprozess, der wenig Abhängig vom Operator ist.
1.1	Die Prüfposition wird sorgfältig entsprechend Befunde und kritischen Zonen gewählt. Die Position der 3 Bohrkerne sind bezüglich visuellem Zustand gut vergleichbar mit einem Grossteil der inspizierten Flächen. Die Bohrkerne liefern jedoch nur punktuelle Ergebnisse genau dieser Lage (u.a. Höhe über Fahrbahn).
1.1	Probenlokalisierung eindeutig, keine zusätzliche Unsicherheit
1.0	Messintervall: hat keine Relevanz, die Messung mittels Potentialfeldanalyse findet erstmalig statt.
UB	25 Es resultiert ein rund 5x kleinerer Unsicherheitszuschlag.

**Abb. 2** Veränderung des Unsicherheitsbeiwerts durch Chloridanalyse anhand Bohrkernmehl. Links: grafische Auswertung der Veränderung der Zusammensetzung und der Grösse des Unsicherheitsbeiwerts. Rechts: absoluter Vergleich der Faktoren.

IV.4.5 Auswertung

Es erfolgt die Ermittlung der Risiko-Unsafeitsverminderung gemäss (1).

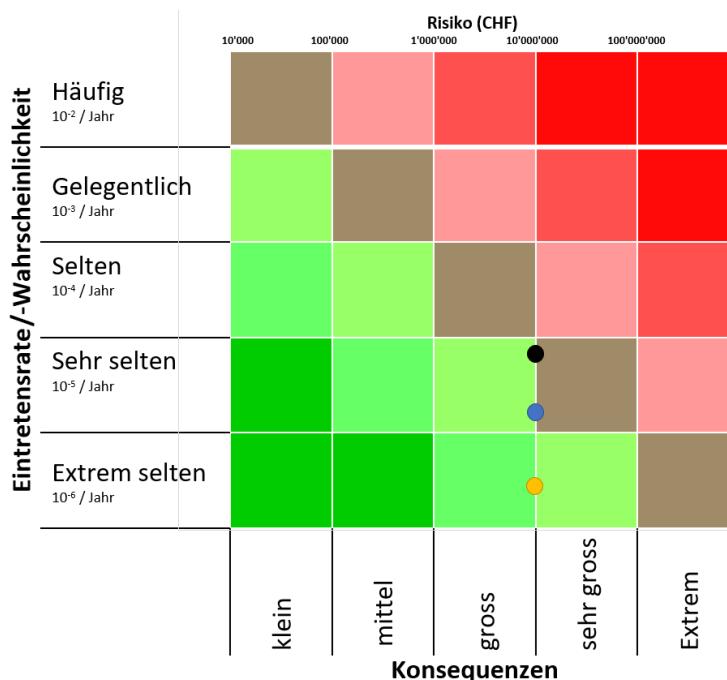
Tab. 4 Ermittlung der Risiko-Unsicherheitsverminderungen und Effizienzfaktoren.

Untersuchung	Char. PoF Wahrsch. Versagen	UB Unsicherheit Kosten Versagen [CHF]	CoF Kosten Versagen [CHF]	Risiko Kosten [CHF]	Risiko- Unsicherheits- verringerung ($\Delta R_{i,d}$)	Kosten USM	Effizienz- faktor USM (E_i)
Voruntersuch	5.00E-06	130	1.00E+07	CHF 6'500	-	-	-
Potentialfeld- messung	5.00E-06	11	1.00E+07	CHF 550	CHF 5'950	CHF 11'000	0.54
Chloridanalyse	5.00E-06	25	1.00E+07	CHF 1'250	CHF 5'250	CHF 4'000	1.31

Ergebnis / Fazit Fallbeispiel:

Der Vergleich zeigt, dass beide Methoden den «Risikozuschlag» ähnlich deutlich vermindern. Mit den Untersuchungskosten, für die Potentialfeldanalyse auf 11'000 CHF und für die Bohrkernmehlentnahme inkl. Analyse auf 4'000 CHF geschätzt, kann die Effizienz gemäss Formel (2) ermittelt werden, die ein Mass dafür ist, wieviel die Reduktion der Unsicherheit durch die entsprechende USM kosten würde. Im Fallbeispiel zeigt sich, dass die Potentialfeldmessung mit einem Effizienzfaktor 0.54 kostenintensiver, d.h. in diesem spezifischen Anwendungsfall weniger kosteneffizient ist als die Chloridanalyse mit einem Faktor von CHF 1.31 Risikoreduktion pro CHF Untersuchungskosten.

Die Vergleichsmethodik, mit plausibel eingesetzten Unsicherheitsbeiwerten, liefert somit klare Hinweise, ob und wie stark sich die Unsicherheit bei Befunden durch konkrete Untersuchungen vermindern lassen und sie erlaubt zudem die Kosteneffizienz unterschiedlicher, in Frage kommender Untersuchungsmethoden systematisch miteinander zu vergleichen.

**Abb. 3** Visualisierung der Vergleichsmethodik: Das charakteristische Risiko (PoF char., gelb), mit den Unsicherheitsbeiwerten vor einer Untersuchung (höherer Wert, schwarz) und nach Untersuchung (tieferer Wert, blau) als Bemessungswert des Betriebsrisikos ohne / mit Untersuchung.

IV.5 Fazit zur Anwendung der Vergleichsmethodik

Die Anwendung der vorgeschlagenen Vergleichsmethodik für Untersuchungsmethoden könnte im Erhaltungsplanungsprozess dem Anwender dabei helfen, aus dem grossen Katalog möglicher Untersuchungen (u.a. Katalog EP2) systematisch die optimale Methode auszuwählen.

Optimal heisst, dass die Untersuchung die grösstmögliche Reduktion des Risikos durch Verminderung der Unsicherheit zu kleinstmöglichen Kosten bringt.

Wie das Erstellen des Fallbeispiels in Kapitel IV.4 mit dem Ermitteln und Auswerten der Unsicherheitsbeiwerten aufzeigt, handelt es sich um einen systematischen Ansatz für die begründete Auswahl von Untersuchungsmethoden, welcher mittels Risikoüberlegungen dem Prozess der Erhaltungsplanung gerecht werden soll. Das Ergebnis des Fallbeispiels mit einfachen, bekannten Untersuchungsmethoden zeigt auf, dass erfahrene Fachspezialisten bei Zustandserfassung diverse Aspekte, wie der Einbezug von Gefährdungsszenarien und Risiken intuitiv ähnlich beurteilen würden, ohne Anwendung einer Vergleichsmethodik (und systematischer Betrachtung von Risiken). Aber gerade diese Intuition, insbesondere wie stark Risiken tatsächlich in Entscheidungen gewichtet werden, ist stark vom Faktor Mensch und seinem Know-how bzw. seiner bisherigen Erfahrung abhängig. Damit kann der bei der Erhaltungsplanung der wichtige Prozessschritt «Überwachung» massgeblich und undokumentiert durch diese Personen beeinflusst werden und die Entscheide werden damit eher zustands- als risikobasiert gefällt.

Die vorgeschlagene Vergleichsmethodik erfordert vom Anwender eine systematische Auseinandersetzung und Bewertung der Unsicherheit des aktuellen Zustandes, sowie der erwarteten Veränderung durch eine in Betracht gezogene Untersuchungsmassnahme. Dies erlaubt eine transparentere Entscheidung, da die Annahmen des Anwenders durch die grafische Aufbereitung auf einen Blick sichtbar gemacht werden können. Die Methode erlaubt nicht nur den Vergleich von Methoden, sondern auch die Optimierung von Messkampagnen, indem die wesentlichen Annahmen bezüglich der Unsicherheit offengelegt werden und so durch Ergänzung und Anpassungen der Kampagne gezielt verbessert werden können.

Die Vergleichsmethodik wurde entwickelt für einen Prozess, bei dem der Entscheid zur Durchführung einer Untersuchung bereits getroffen ist und nur die Auswahl der Untersuchungsmethode unterstützt werden soll. Diese erfolgt unabhängig von möglicherweise resultierenden Massnahmen. Ebenso könnten damit aber auch bauliche Erhaltungsmassnahmen mit Untersuchungsmethoden verglichen werden. Diesbezüglich ist die Methode in den Grundzügen vergleichbar mit jener der Ermittlung des *Vol* [6], welche als Stand der Forschung zum Vergleich herbeigezogen wird (siehe Erläuterungen IV.6). Die vorgeschlagene Vergleichsmethodik macht jedoch die Vereinfachung, den Nutzen nicht mit Einbezug aller möglicherweise aus einer Untersuchung resultierenden Massnahmen zu ermitteln. Denn gemäss dem im aktuellen Forschungsprojekt abzubildenden Prozess der Erhaltungsplanung zielen durchgeführte Untersuchungen auch darauf ab, die Grundlagen-Informationen (u.a. Art und Ausmass der Schädigungen) zu liefern. Dies für die nachfolgende Festlegung optimierter, objektspezifischer Instandsetzungs-Massnahmen, gemäss EP3. Der Einbezug von Massnahmen würde entsprechend den Rahmen des EP2 sprengen. Ein durchgehendes Konzept mit Umsetzung des «Value of Information» im vorliegenden Forschungsprojekt müsste mehrere EPs (EP2 bis EP5) umfassen. Gemäss Projektauftrag und aktuellen Absprachen der Einzelprojekte ist dies so nicht vorgesehen.

Die Definition und Quantifizierung der Unsicherheitsbeiwerte ist analog zu Unsicherheitsbeiwerten bei der Bemessung von Tragwerken aufwändig, aber machbar und mit weiterer Forschung können praxistaugliche Modelle für die Anwendung entwickelt werden. Angaben zu Wertebereichen oder eine Normalisierung muss durch empirische Methoden verbessert werden. Ähnlich wie bei der Wahl der Sicherheitsfaktoren zur Bemessung von Tragwerken eine Aufrechterhaltung der

bewährten Bemessungspraxis angestrebt wurde, könnten auch die UBs entsprechend empirisch ermittelt werden. Während sich die Entscheidungspraxis dadurch nicht radikal ändert, ist der Grundstein gelegt zur Umlagerung von einer projekt-, objekt- und zustandsgetriebenen hin zu einer Denk- und Handlungsweise, welche vermehrt risikoorientiert ist. Diese Denk- und Handlungsweise, und entsprechend auch die Weiterentwicklung einer risikoorientierten Auswahl von optimalen Untersuchungsmethoden, wie in diesem Vorgehensvorschlag aufgezeigt, sollte – als Empfehlung -forschungs- bzw.- entwicklungsmässig weiterverfolgt werden [1].

IV.6 Erläuterungen «Value of Information»

IV.6.1 Einführung Vol

Der Value of Information (Vol) beschreibt den Unterschied des Nutzwerts einer Unterhaltsentscheidung mit und ohne eine Information. Er kann genutzt werden um:

1. Verschiedene Untersuchungsmethoden unter spezifischen Bedingungen zu vergleichen und zu ranken.
2. Die Kosten und Nachteile einer Untersuchung mit ihrem potenziellen Nutzen zu vergleichen.
3. Bauliche mit Untersuchungsmassnahmen zu vergleichen. [7]

Die Effektivität einer Massnahme M wird grundsätzlich mit dem Verhältnis der Kosten C_M gegenüber der Reduktion des Risikos beurteilt: [6]

$$e = \frac{R_{aktuell}(F) - R_{neu}(F|M)}{C_M}$$

Wobei $R_{aktuell}(F)$ das Risiko aktueller Gefährdungsszenarios, $R_{neu}(F|M)$ die Eintretenswahrscheinlichkeit der Gefährdungsszenarios, gegeben dass M durchgeführt wurde.

Ein zerstörungsfreier Untersuch mit möglichen Resultaten I verändert eine Eintretenswahrscheinlichkeit und das Risiko nicht:

$$R(F|test) = \int R(F|I) \cdot P(I) \cdot dI = R(F)$$

Es wird gefolgt, dass ein Untersuch darum erst im Zusammenhang mit einer Massnahme mit Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit sowie den potenziellen Auswirkungen (Consequence of Failure oder CoF) eines Gefährdungsszenarios einen Wert erhält.

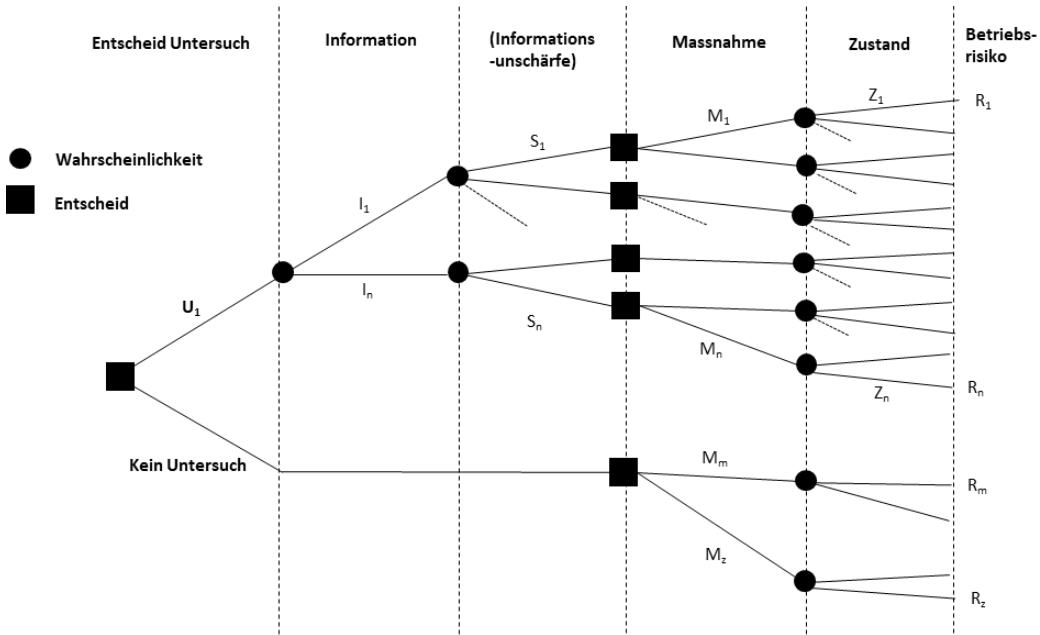


Abb. 4 Entscheidungs-Ereignis-Baum zur Ermittlung des VoI [8]

Diesen Zusammenhang von Untersuch, Entscheidung und Konsequenzen zeigt der Entscheidungs-Ereignisbaum auf. Auf den Entscheid Untersuch U folgt die Information I . Die Verteilung der Wahrscheinlichkeit des Testresultats I wird aufgrund Erfahrungswerte abgeschätzt. Zusätzlich sollte die Unschärfe S der Untersuchungsmethode bekannt sein oder geschätzt werden. Diese ist abhängig von der Methode U . Danach kann eine Massnahme ausgewählt werden, was (wenn ein Untersuch durchgeführt wurde) basierend auf den Testergebnissen I und deren Zuverlässigkeit S erfolgen sollte. Die Massnahme führt mit Wahrscheinlichkeit Z zum Betriebsrisiko R .

Die prognostizierten Kosten $L(P, M)$ sind der (negative) Nutzwert (*expected loss*), bestehend aus Betriebsrisiko und Kosten für Massnahmen mit (1) oder ohne Untersuch (2). Die jeweiligen Kosten der Entscheidungen (Massnahmenkosten und Betriebsrisiko) werden mit den zugehörigen Unsicherheiten gewichtet (Informationsunschärfe, Zustand respektive Erfolgswahrscheinlichkeit der Massnahme) und aufsummiert. Dies als Integral (bei Verteilungen) oder Summenprodukt (diskretisiert, siehe Beispiel):

$$E_{I,P,Z}[L(U_1, I(U_1), S(U_1), M(I, S), R(Z))] \quad (1)$$

$$E_Z[L(M, R(Z))] \quad (2)$$

Der $VoI(U_1)$ ist die Differenz der prognostizierten Kosten mit und ohne Untersuch U_1 .

$$VoI(U_1) = E_{I,P,Z}[L(U_1, I(U_1), S(U_1), M(I, S), R(Z))] - E_Z[L(M, R(Z))]$$

$$= \int_{D_Z} Z \int_{D_I} L(U_1, I(U_1), S(U_1), M(I, S), R(Z)) dI dZ$$

IV.6.2 Beispiel

Dies wird an einem einfachen Beispiel in Anlehnung an [6] erklärt. Es wird ein Tunnel mit einem Gefährdungsszenario betrachtet, das entweder vorhanden (Inakzeptables Risiko oder IR) mit dem Risiko $IR = PoF \cdot C_F$ oder nicht vorhanden, respektive vernachlässigbar klein ist (Akzeptiertes Risiko oder AR). Zur Vereinfachung wird für letzteres $P(F) = 0$ und damit $AR = PoF \cdot CoF = 0$ angenommen.

Es stellt sich die Frage, ob eine Untersuchung durchgeführt werden soll.

Untersuchungsmethoden sind nicht perfekt und im vorliegenden Forschungsprojekt soll die Aussagekraft, Zuverlässigkeit und Genauigkeit berücksichtigt werden. Dafür wird die Wahrscheinlichkeit eines Fehlalarms berücksichtigt, wobei zwei verschiedene Typen Alarne und Fehlalarne unterschieden werden müssen:

Tab. 5 Ereignisse Alarm und Risiko

True Positive	Alarm, IR vorhanden	$P(A IR)$
False Positive	Alarm, AR vorhanden	$P(A AR)$
True Negative	Kein Alarm, AR vorhanden	$P(KA AR)$
False Negative	Kein Alarm, IR vorhanden	$P(KA IR)$

Angenommen die Untersuchungsmethode schlägt entweder Alarm oder nicht $P(KA) = 1 - P(A)$. Wird ein Alarm ausgelöst, folgt automatisch eine Massnahme. Die Entscheidung zur Massnahme (verglichen mit Abb. 4) wird rational gefällt da die Kosten der Massnahme bei gegebenem Alarm kleiner sind als das Risiko nichts zu tun.

$$C_{Massnahme} < P(AR|A) \cdot CoF$$

Wird kein Alarm ausgelöst, erfolgt keine Massnahme (Begründung analog):

$$C_{Massnahme} > P(IR|KA) \cdot CoF$$

Eine perfekte Untersuchungsmethode erzeugt als Befund weder *False Positives* noch *False Negatives*. (siehe roter Pfad in Abb. 5). Eine nichts aussagende Methode liefert mit gleicher Wahrscheinlichkeit einen *False Positive* wie einen *True Positive*.

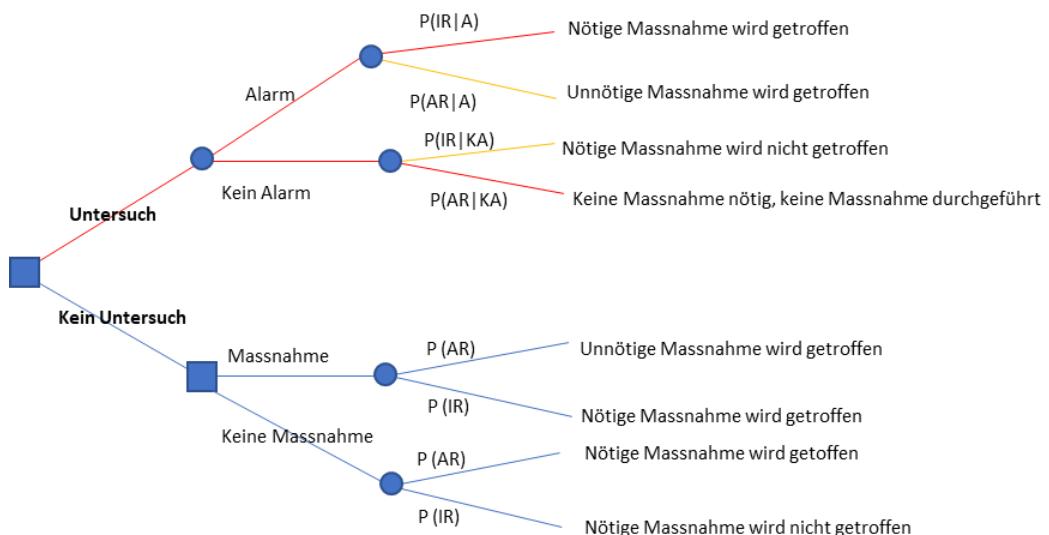


Abb. 5 Entscheidungs-Ereignis-Baum zum Beispiel

Es werden folgende Handlungsoptionen bewertet, wobei die erwarteten Kosten vor der Durchführung des Tests und der Massnahmen ermittelt werden:

Keinen Untersuch durchführen: Die Kosten entsprechen dem Versagensrisiko (bei Nichtstun),

$$C_{NT} = R = P(IR) \cdot CoF$$

respektive den Kosten der Massnahme:

$$C_{Massnahme}$$

Um den *VoI* zu ermitteln muss, die kleinere der beiden Kosten (rationale Variante) gewählt werden. Für das Beispiel gilt die Annahme, dass die Massnahme nicht zu ergreifen ein inakzeptables Risiko darstellt:

$$C_{\text{Massnahme}} < C_{NT}$$

Untersuch durchführen: Die Kosten eines Untersuch durchzuführen setzen sich aus der Summe der Kosten der möglichen Szenarien multipliziert mit ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit zusammen und der Annahme, dass eine Erhaltungsplanerin die günstigste Handlungsvariante aufgrund der Ergebnisse wählt.

Die Variante unterscheidet sich von «Massnahme direkt durchführen» dadurch, dass mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auf die Massnahme verzichtet werden kann. Abgeschwächt wird diese potenzielle Ersparnis durch einen fälschlicherweise ausbleibenden Alarm inkl. Massnahmen und damit behaftete Risiken.

$$C_{\text{Test}} = P(A) \cdot C_{\text{Massnahme}} + P(KA) \cdot P(IR|KA) \cdot CoF$$

Wobei:

$P(A) \cdot C_{\text{Massnahme}}$	Gewichtete Kosten
$P(KA) \cdot P(IR KA) \cdot CoF$	Risiko, dass nötige Massnahme nicht getroffen wird.

Danach ergibt sich die *VoI* des imperfekten Tests durch:

$$VoI = C_{\text{Test}} - C_{\text{Massnahme}}$$

Die Kosten eines Untersuchs $C_{\text{Untersuch}}$ dürfen den *VoI* nicht übersteigen, damit der Entscheid zum Untersuch rational gerechtfertigt wird und ist der *VoI* negativ, ist ein Untersuch nicht gerechtfertigt.

IV.6.3 Fazit zur Anwendung von *VoI* im EP2

Zur Ermittlung des *VoI* sind nebst den Kosten aller Untersuchungen auch die Wahrscheinlichkeiten aller Outcomes zu ermitteln, welche wiederum mit bestimmten Massnahmen geknüpft werden müssen, für welche ebenfalls Kosten und Wirkungen zu ermitteln sind. Dies wird als nicht praxistauglich betrachtet, da die grosse Anzahl benötigter Wahrscheinlichkeitsverteilungen kaum zu ermitteln ist und Scheingenaugkeiten resultieren. Weiter scheint es wenig praktikabel, jeden möglichen Outcome eines Untersuchs gleich auch mit einer bestimmten Massnahme zu knüpfen. Es scheint deshalb naheliegend, in der Praxis den Wert einer Untersuchung allein anhand des Betriebsrisikos und nicht anhand aller möglichen Erhaltungsszenarien zu bemessen.

Literaturverzeichnis Anhang IV

Dokumentation

-
- [1] Khan, F. I., Sadiq, R. & Haddara, M. M. (2004), **“Risk-based inspection and maintenance (RBIM): multi-attribute decision-making with aggregative risk analysis. Process safety and environmental protection”**, 82. Jg., Nr. 6, S. 398-411.
 - [2] Stefan, Ch., Grunicke, U. H., Prändl-Zika, V., Weninger-Vycudil, A., Hula, A., Van Linn, A., Brozek, B., Prammer, D. & Mellert, L. D. (2020), **„Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA (OPtimAL)“**, Forschungsbericht, FFG.
 - [3] Franchin, P., Pinto, P. E. & Rajeev, P. (2010), **“Confidence factor?“**, Journal of Earthquake Engineering, 14. Jg., Nr. 7, S. 989-1007.
 - [4] Det Norske Veritas (2009), **“Integrity management of submarine pipeline systems”**, Article No. DNVRP-F116, DET NORSKE VERITAS.
 - [5] Lindenmann, H. P. et al. (2000), **„Erhaltungsmanagement der Strassenverkehrsanlagen - Generelle Fachkonzepte“**.
 - [6] Pozzi, M. & Der Kiureghian, A. (2011), **“Assessing the value of information for long-term structural health monitoring”**, Health monitoring of structural and biological systems, International Society for Optics and Photonics, S. 79842W.
 - [7] Ali, K., Jianjun Q. & Faber, M. H. (2020), **“On information modeling in structural integrity management”**, Structural Health Monitoring, DOI 1475921720968292.
 - [8] Faber, M. H. (2002), **“Risk-based inspection: The framework.”**, Structural engineering international 12:186-195.
 - [9] Stempfel, B. & Dell'Antonio, M. (2016), **„Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln – Initialprojekt“**, Forschungsprojekt AGT 2014/001 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT).
-

Glossar

Begriff	Bedeutung
Akzeptiertes Risiko	In seiner Grösse bekanntes, durch den Konsens der Beteiligten bewusst hingenommenes Risiko
Bauart	Bauart (BA), beschreibt die Materialisierung z.B. eines Bauwerksteils
BA	Bauart, Materialisierung gemäss Grundlagenkatalog EP1
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 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.
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: équipements d'exploitation et de sécurité (EES)</i>
BWT	Bauwerksteil gemäss Grundlagenkatalog EP1
BWT x BA	Bauteilart gemäss Grundlagenkatalog EP1; ist Kombination von Bauwerksteil und Bauart
Diagnostik	Gesamtheit aller Massnahmen, die zur Erkennung von Schadensbildern aufgrund von unterschiedlichen Schadensprozessen auftreten.
Untersuchungsme- thode	Methoden, Prüfverfahren zur Untersuchung am Bauwerk, d.h. für die Überwachung und Überprüfung des Bauwerkszustands (EP2: USM, im Teilprozess Überwachung)
Eintrittswahrscheinlich- Häufigkeit	Häufigkeit; erwartete Anzahl Ereignisse pro Zeiteinheit, i.d.R. bezogen auf ein Jahr
EM	Erhaltungsmanagement; in Literatur auch als «Asset Management» bezeichnet
EP	Einzelprojekt = Teilprojekt des Forschungsauftrag / auch: Fachbereich Erhaltungsplanung des ASTRA
Erhaltungsplanung	Ausarbeiten eines Erhaltungskonzeptes für einen festgelegten Zeitschnitt (mittels Optimierung von Erhaltungsvarianten). Beim ASTRA Bezeichnung des gleichnamigen Fachbereichs
FaS	Fachspezialistin / Fachspezialist ASTRA, u.a. für die Erhaltungsplanung
Funktionskontrolle	Gezieltes Überprüfen des Funktionierens von technischen Anlagen und anderen Teilen eines Bauwerks.
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.
KI AI	Künstliche Intelligenz <i>englisch: artificial intelligence</i>
Kontrollmessung	Messtechnisches Überwachen ausgewählter Kenngrössen Das Ziel von Kontrollmessungen ist das rechtzeitige Erkennen eines abnormalen Verhaltens oder das Erreichen eines vorgegebenen Grenzwertes im Betrieb.
LCC	Life Cycle Costs
KUBA	Datenbank des ASTRA fürs Erhaltungsmanagement für Kunstbauten und Tunnel
Monitoring	Einsatz von geeigneten Untersuchungsmethoden für die Überwachung der Zustandsentwicklung durch regelmässige oder ständige Datenerfassung, die weitgehend automatisiert ist.
MQ	Messquerschnitt; u.a. Querschnitt / Block im Tunnel in dem Untersuchungen durchgeführt werden. Kann auch die Bewertungseinheit sein für Zustandsbeurteilung
OS	Oberflächenschutz gemäss Grundlagenkatalog EP1
PoF	Probability of Failure (Ausfallwahrscheinlichkeit, hier: Eintrittswahrscheinlichkeit eines Gefährdungsszenarios)
Risiko	Das Risiko ist ein Mass für die Grösse einer Gefahr. Es erfasst die zu erwartenden Schäden und Verluste zahlenmässig. Im Risikobegriff enthalten sind die Häufigkeit und das Schadenausmass im Ereignisfall.
Risiko	Produkt aus der auf eine bestimmte Zeiteinheit bezogenen Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses und der quantifizierten, potenziellen Schadenfolge für Personen, Sachgüter und Umwelt.
Schaden	Negative Konsequenz
S	Schadensprozess (Alterungs- und Zerfallsprozess)
Scanning	Einsatz von geeigneten Untersuchungsmethoden für die flächenhafte Aufnahme von Bauwerksoberflächen, z.B. von Tunnel-Innenschalen, deren Ergebnisse je nach verwendeter Technologie u.a. der Vermessung und/oder der Detektion von Schadstellen (Befunde) dienen.
Schadensprozess	Alterungs- und Zerfallsprozess, welche zu Schädigungen am Bauwerken führen (S)
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 Teilprozesses Überwachung gemäss Grundnorm.
Unterhalt	Bewahren oder Wiederherstellen eines Bauwerks ohne wesentliche Änderung der Anforderungen
U.-Katalog	Grundlagenkatalog Untersuchungsmethoden (USM / Diagnostik)
USM	Untersuchungsmethoden (bei EP2: Methoden angewendet im Teilprozess Überwachung)

Verfolgbare / Nicht ver- visuell, mit einfachen Mitteln erkennbare Schäden bzw. Schadensentwicklung folgbare Schäden	
Verhältnismässigkeit von Massnahmen	Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen von Erhaltungsmassnahmen mit dem Ziel eines effizienten Mitteleinsatzes.
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Norm
WELK	Werkleitungskanal
Wirksamkeit	Mass für die Wirkung einer Massnahme. Die Wirksamkeit einer Massnahme entspricht der erzielbaren Risikominderung.
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung (Untersuchungsmethode)
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 Bauwerksteil

Literaturverzeichnis

Weisungen und Richtlinien des ASTRA

- [1] Bundesamt für Strassen ASTRA (2002), „**Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen Planung und Durchführung des Unterhalts**“, *Richtlinie ASTRA 11002*, Bundesamt für Strassen ASTRA, Abteilung Strassen netze, Standards, Forschung, Sicherheit, 3003 Bern.
- [2] Bundesamt für Strassen ASTRA (2005), „**Überwachung und Unterhalt der Kunstdämmen der Nationalstrassen**“, *Richtlinie ASTRA 12002*, Bundesamt für Strassen ASTRA, Abteilung Strassen netze, Standards, Forschung, Sicherheit, 3003 Bern.
- [3] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012), „**KUBA 5.0 Fachapplikation Kunstdämmen und Tunnel: Datenerfassungshandbuch**“ *Richtlinie ASTRA 62014*, Bundesamt für Strassen ASTRA, Abteilung Strassen netze, Standards, Forschung, Sicherheit, 3003 Bern.

Weisungen und Richtlinien anderer Länder

- [4] Bundesanstalt für Straßenwesen BASt (2020), „**Richtlinien für die strategische Planung von Erhaltungsmassnahmen an Ingenieurbauwerken RPE-ING**“, *RPE-ING*, Bergisch Gladbach, Bundesrepublik Deutschland.
- [5] AFTES GT 14 (1995), « **Les méthodes de diagnostic pour les tunnels revêtus GT14R4F2** », *GT14R4F2*, AFTES, Frankreich.
- [6] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017), „**Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076**“, *RI-EBW-PRÜF*, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bundesrepublik Deutschland.
- [7] CETU (2012), « **Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, fascicule 40: Tunnel** ».
- [8] CETU (2015), « **Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers - Livre 1: Du désordre à l'analyse, de l'analyse à la cotation: Livre 1** », Frankreich.
- [9] CETU (2015), « **Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers - Livre 2: Catalogue des désordres: Livre 2** », Frankreich.
- [10] Department of Transportation Federal Highway Administration (2015), “**National Tunnel Inspection Standards: NTIS**”, Federal Highway Administration, USA.
- [11] DIN Deutsche Institut für Normung (2019), „**Grundlagen der Instandhaltung DIN 31051**“, *DIN 31051*, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin, Bundesrepublik Deutschland.
- [12] DIN Deutsches Institut für Normung (1999), „**Ingenieurbauwerke (Brücken, Tunneln, Durchlässe und sonstige Bauwerke) im Zuge von Strasse und Wegen, Überwachung und Prüfung DIN 1076**“, *DIN 1076*, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin, Bundesrepublik Deutschland.
- [13] Federal Highway Administration (2015), “**Tunnel operations, maintenance, inspection and evaluation (tomie) manual: FHWA-HIF-15-005**”, Federal Highway Administration, USA.
- [14] Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse Schiene Verkehr (FSV) (2013), „**Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Kontrolle und Prüfung von Kunstdämmen, Strassentunnel – Bauliche konstruktive Teile: RVS 13.03.31**“, *RVS 13.03.31*. Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse Schiene Verkehr (FSV), Wien, Österreich.

Normen

- [15] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (1997), „**Norm SIA 469: Erhaltung von Bauwerken**“, *SN 588469:1997*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 8039 Zürich.
- [16] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2011), „**Norm SIA 269/2: Erhaltung von Tragwerken – Betonbau**“, *SN 505269/2:2011*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 8027 Zürich.
- [17] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2011), „**Norm SIA 269: Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken**“, *SN 505269:2011*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 8027 Zürich.
- [18] Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrs fachleute VSS / SNV Schweizerische Normen-Vereinigung (2010), „**Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen**“.
- [19] Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrs fachleute VSS / SNV Schweizerische Normen-Vereinigung (2013), „**Erhaltungsmanagement (EM): Grundlagen zur Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement**“, *SN 640 907*.
- [20] Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrs fachleute VSS / SNV Schweizerische Normen-Vereinigung (2022), „**Erhaltungsmanagement (EM): Grundnorm**“, *SN 640 900*.

Publikationen

- [21] AIT Austrian Institute of Technology GmbH, ILF Consulting Engineers Austria GmbH, DIBIT Messtechnik GmbH (2015), „**AMBITION - Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und Bewertung von Eisenbahn- und Strassentunnel: Ergebnisbericht Projekt VIF 2015**“.
- [22] Angst, U., Wagner, M., Elsener, B., Leemann, A. & van Nygaard, P. (2016), „**Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an bestehenden Stahlbetonbauwerken: Bundesamt für Strassen ASTRA, Forschungsprojekt AGB 2012/010 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB), April 2016**“.
- [23] ASTRA SBT (2008), „**Die zerstörungsfreie Untersuchung von Leckstellen in zweischaligen Untertagsbauwerken: FGU 2004 / 001**“.
- [24] Beeler, P. & Weishaupt, R. (2024), „**Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel: EP1 - Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei Tunnel: Forschungsprojekt AGT2020-101 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)**“.
- [25] Bennett, P.J., Soga, K., Wassell, I., Fidler, P. & Abe, K. (2010), „**Wireless sensor networks for underground railway applications: case studies in Prague and London**“.
- [26] Bilotta, E., Casale, R., Di Prisco, C.G., Miliziano, S., Peila, D., Pigorini, A. & Pizzarotti, E. M. (2022), „**Handbook on Tunnels and Underground Works: Volume 2: Construction - Methods, Equipment, Tools and Materials**“, CRC Press.
- [27] BIM@SBB - Daten (2022), „**BIM@SBB – Fachdatenkatalog**“.
- [28] Boschmann Kähler, C., Elsener, B. & Angst, U. (2021), „**Critical chloride content in concrete: realistic determination and influence of air voids: Bundesamt für Strassen ASTRA, Forschungsbericht November 2021**“.
- [29] Bundesamt für Strassen ASTRA (2021), „**Teilstrategie Building Information Modeling (BIM): Ausgabe 2021 v2**“, Bern.
- [30] Bundesamt für Strassen ASTRA (2021), „**Netzzustandsbericht der Nationalstrassen 2020: Ausgabe Stand 2020**“, Bern.
- [31] Bundesamt für Strassen ASTRA (2022), „**Netzzustandsbericht der Nationalstrassen 2021: Ausgabe Stand 2021**“, Bern.
- [32] Bundesanstalt für Straßenwesen BASt (2020), „**Untersuchungsbericht zur strategischen Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken: RPE-ING**“, Bergisch Gladbach, Bundesrepublik Deutschland.
- [33] Bundesministerium für Klimaschutz, ÖBB-Infrastruktur AG, Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (2017), „**Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen RIBET: Deliverable D 3 Riss-Monitoring**“, Auftragnehmer: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Technische Universität Graz- Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Impulsprogramm Bau - Erhaltung und Erneuerung.
- [34] CETU (2023), « **Centre d’Études des Tunnels / Documentation et logiciels** », www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/genie-civil-a572.html#Les-document-informatifs (accessed on 27.02.2023).
- [35] Stefan, Ch., Grunicke, U.H., Prändl-Zika, V., Weninger-Vycudil, A., Hula, A., Van Linn, A., Brozek, B., Prammer, D. & Mellert, L. D. (2020), „**Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA (OPTimAL): Forschungsbericht**“, FFG.
- [36] Chang, C. & Mehat, R. (2010), „**Fiber Optic Sensors for Transportation Infrastructural Health Monitoring**“, American Journal of Engineering and Applied Sciences.
- [37] Corotis, R.B., Ellis, J.H. & Jiang, M. (2005), „**Modeling of risk-based inspection, maintenance and life-cycle cost with partially observable Markov decision processes**“, Structural and Infrastructure Engineering.
- [38] DAUB (2023), „**Empfehlungen für unterirdisches Bauen: u.a. zu BIM (Building information modeling)**“, <https://www.daub-ita.de/publikationen/empfehlungen/> (accessed on 18.03.2023).
- [39] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (2018), „**Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Strassentunnel**“.
- [40] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (2019), „**Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten - BIM im Untertagebau**“.
- [41] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (2022), „**Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten, Modellanforderungen - Teil 2 Informationsmanagement: Ergänzung zur DAUB-Empfehlung BIM im Untertagebau**“.
- [42] Menendez, E., Victores, J. G., Montero, R., Martínez, S. & Balaguer, C. (2018), „**Tunnel structural inspection and assessment using an autonomous robotic system**“, Automation in Construction 87:117-26.
- [43] Elmokadem, T. & Savkin, A.V. (2022), „**A method for autonomous collision-free navigation of a quadrotor UAV in unknown tunnel-like environments**“, Robotica 40(4):835-61.
- [44] Emch & Berger (2010), „**Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten - Synthesericht**“.

- [45] Faber, M. H. (2002), **“Risk-based inspection: The framework”**, Structural engineering international 12(3):186–95.
- [46] Federal Highway Administration (2023), **“Building Information Modeling (BIM) for Infrastructure: What BIM can look like”**, www.fhwa.dot.gov/infrastructure/bim/ (accessed on 15.03.2023).
- [47] Franchin, P., Pinto, P. E. & Rajeev, P. (2010), **“CONFIDENCE IN THE CONFIDENCE FACTOR”**, Journal of Earthquake Engineering 14(7):989–1007.
- [48] Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP (2023), **“Bauwerksscanner OSSCAR”**, <https://www.vision.fraunhofer.de/de/technologien-anwendungen/technologien/zerstoerungsfreie-pruefung/osscar.html> (accessed on 15.03.2023).
- [49] Fries, T. (2024), **„Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel - Synthesebericht: Forschungsprojekt AGT2020-101 bis -105 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)“**.
- [50] Haydin, R. (2024), **„Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln: EP4 - Entwicklung eines Entscheidungsmodells: Forschungsprojekt AGT2020-104 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)“**.
- [51] Hill, M., Bahlau, S., Butenholz, F., Degener, L., Klein, F., Kukushin, A., Riedlinger, U., Opperman, L., Lambracht, C. & Mertens, M. (2022), **„Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität: BASt-Bericht B 185“**, Bremen, Bundesrepublik Deutschland.
- [52] Hoult, N. A. & Soga, K. (2014), **“Sensing solutions for assessing and monitoring tunnels”**.
- [53] Hunkeler, F. (2010), **„Zielorientierte Bauwerksuntersuchungen mit neuen zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP): Fachveranstaltung 894632“**, Bau und Wissen.
- [54] ILF Beratende Ingenieure AG (2020), **„Forschungsauftrag AGT2017/002: Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel; Einzelprojekt EP2 - Pflichtenheft: EP2: Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionenmethoden; Ausschreibung der Dienstleistungen“**, 3003 Bern.
- [55] International Workshop (2000), **“Risk based inspection and maintenance planning”**.
- [56] Loupus, K., Doulamis, A. D., Stentoumis, C. et. al. (2017), **“Autonomous robotic system for tunnel structural inspection and assessment”**.
- [57] Mellert, L., Van Linn, A., Stefan, C., Grunicke, U. & Weninger-Vycudil, A. (2020), **„Von Tätern und Opfern im Strassentunnel - Erhaltungsplanung mal anders gedacht: Neue Erkenntnisse und Methoden aus der internationalen Verkehrsinfrastrukturforschung“**, Strasse und Verkehr (VSS) 106(10):28–33.
- [58] Flohrer, C. (2000), **„Messung der Betondeckung und Ortung der Bewehrung“**.
- [59] Mühlau, B. (2007), **„Instandsetzung von Betonbauwerken (Teil 1): Kurzlehrgang für Hochschulabsolventen 864171“**, Bau und Wissen.
- [60] Portner, J. & Vasic, N. (2024), **„Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunnel: EP3 - Festlegung von standardisierten Erhaltungsmassnahmen pro Schadensprozess: Forschungsprojekt AGT2020-103 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)“**.
- [61] Sandrone, F. (2013), **“Tunnel conditions assessment based on image analysis a new inspection procedure for railway tunnels”**.
- [62] Sandrone, F. & Wissler, R. (2010), **“Laser scanning images analysis for tunnel inspection”**.
- [63] Schweizerische Bundesbahnen SBB (2021), **„BIM@SBB- Fachdatenkatalog: Fachbereich: Tunnel. 7th ed.“**.
- [64] SGK Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz (2011), **„Gotthard Strassentunnel, Monitoring Zwischendecke, Auswertung Messdaten 2007-2010: Bericht Erhaltungsplanung“**, N02 Gotthard Strassentunnel.
- [65] SGK Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz (2020), **„Gotthard Strassentunnel, Monitoring Zwischendecke, Auswertung Messdaten 2011-2019: Bericht Erhaltungsplanung“**, N02 Gotthard Strassentunnel.
- [66] Stajano, F., Hoult, N., Wassel, I., Bennett, P. & Middleton, C. (2010), **“Smart bridges, smart tunnels: Transforming wireless sensor networks from research prototypes into robust engineering infrastructure”**, Ad Hoc Networks.
- [67] Stempfel, B. & Dell'Antonio, M. (2016), **„Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln - Initiativprojekt: Forschungsprojekt AGT2014/001 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)“**.
- [68] Stempfel, B. & Schädler, B. (2024), **„Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln: EP5 - Kostenmodell: Forschungsprojekt AGT2020-105 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)“**.
- [69] Stent, S., Gherardi, R., Stengery, B., Soga, K. & Cipolla, R. (2013), **“An Image-Based System for Change Detection on Tunnel Linings”**.
- [70] Kessler, S. & Gehlen, C. (2015), **“POD of potential mapping and its impact on service life prediction. 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering”**, ICASP12.
- [71] Tan, C.H., Ng, M., Shaiful, D. S. B., Win, S. K. H., Ang, W. J., Yeung, S. K., Lim, H. B., Do, M. N. & Foong, S. (2018), **“A smart unmanned aerial vehicle (UAV) based imaging system for inspection of deep hazardous tunnels”**, Water Practice and Technology 13(4):991–1000.

-
- [72] Det Norske Veritas (2009), “**Integrity management of submarine pipeline systems**”, Article No. DNVRP-F116, DET NORSKE VERITAS.
 - [73] Xu, X. & Yang, H. (2020), “**Vision measurement of tunnel structures with robust modelling and deep learning algorithms**”, Sensors 20(17):4945.
 - [74] Yu, S.-N., Jang, J.-H. & Han, C.-S. (2007), “**Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel**”, Automation in Construction.
 - [75] Zamenian, H. & Koo, D. (2014), “**Tunnel Asset Management (TAM) Program Application for High Risk Structural Components**”, Journal of Engineering and Architecture.
-

Firmendokumentationen

-
- [76] Bachema AG (2020), „**Dienstleistungsverzeichnis: 21/23 2020**“.
 - [77] Consultest AG (2022), „**Dienstleistungsverzeichnis**“.
 - [78] Solexperts AG, „**Trivec - Gleitmikrometer - Gleitdeformeter: Linienweise Messung von Verschiebungs- und Verformungsprofilen in der Geotechnik**“.
 - [79] tecnotest ag (2020), „**Leistungs- und Preisübersicht: Preisliste ab 01.08.2020**“.
 - [80] VSH VersuchsStollen Hagerbach (2023), „**VSH Baustoff-Prüflabore: Version 2013-02**“.
-

Projektabchluss



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: Projektabchluss

erstellt / geändert am: 30.05.2023 /

Grunddaten

Projekt-Nr.: AST 2020/102
Projekttitel: Forschungspaket Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln:
Einzelprojekt EP2 – Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden
Enddatum: 07.08.2023

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Im Rahmen des übergeordneten Projekts «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln» werden im vorliegenden Forschungsprojekt EP2 «Diagnostik: Überwachungs- und Inspektionsmethoden» die Untersuchungsmethoden im Detail behandelt, welche bei der Überwachung und Überprüfung von bergmännischen Strassentunneln zum Einsatz kommen. Die Ergebnisse aus dem im Einzelprojekt EP2 behandelten Teilprozess Überwachung haben Informationen zu liefern, welche im Rahmen des Erhaltungsmanagement-Prozesses die Basis für stabile, relevante Massnahmenentscheide bilden.

Der aus dem EP2 resultierende Grundlagenkatalog der Untersuchungsmethoden (U.-Katalog) umfasst alle im Teilprozess Überwachung anwendbaren Untersuchungen bei bergmännischen Tunneln. Bei der Auswahl von zweckmässigen, aussagekräftigen Untersuchungsmethoden wurde gemäss Zielsetzung für EP2 eine «Good Practice» verfolgt, wobei neuen Tunnelobjekte als Fallbeispiele herangezogen wurde, welche das Tunnelportfolio des ASTRA weitgehend abdecken. Dies auch basierend auf einer Literaturrecherche, welche den aktuellen Stand der Praxis und Forschung und deren Relevanz für EP2 aufzeigt.

Der datenbankkompatible U.-Katalog - als zentrales «Produkt» des Forschungsprojekts EP2 - wurde von Grund auf komplett neu erarbeitet und strukturiert aufgebaut. Der Ansatz für die Systematisierung der Untersuchungsmethoden verfolgte das Ziel, die einzelnen Methoden in übergeordneten Einheiten zu gliedern, was der Übersichtlichkeit, Lesbarkeit und somit der Praxistauglichkeit dient. Die Informationen im Katalog zu den erfassten Untersuchungsmethoden sind verknüpft u.a. mit den im parallel erarbeiteten Einzelprojekt EP1 definierten visuellen detektierbaren Befunden, den Schadensprozessen sowie mit der Bauteilart, welche die Bauwerksteile eines Tunnels sowie dessen Materialisierung umfasst.

Der Katalog enthält folgende Informations-Bereiche mit Attributen (strukturierte Informationen) zur Beschreibung von Eigenschaften der einzelnen Methoden:

- Strukturierung der Untersuchungsmethoden
- Zuordnung Bauwerksgliederung / Befunde / Schäden
- Kontext Untersuchungsmethoden
- Erwartbare Ergebnisse
- Attribute für Aufwand und Kostenschätzung
- Verweise / Referenzen, Informationen zu Anbietern

Die Gliederung nach Untersuchungstypen sowie die zugeordneten Attribute soll die Auswahl einer geeigneten Untersuchungsmethode für die Anwendung im Tunnel unterstützen. Für die bessere, praxisnahe Anwendbarkeit des Kataloges, welcher über 140 Untersuchungsmethoden umfasst, werden 41 oft genutzte, etablierte Methoden speziell hervorgehoben. Für diese bewährten Methoden wurden spezifische Katalogblätter generiert, welche alle Informationen aus dem Katalog zur Methode einheitlich strukturiert und gut lesbar darstellen.

Ergänzend zum strukturierten Katalog wurde ein Konzeptvorschlag für eine Vergleichsmethodik für Untersuchungsmethoden erarbeitet, welche Risikobetrachtungen miteinbezieht. Dieses Konzept zeigt, dass dem Thema Risiko auch beim Teilprozess Überwachung Rechnung getragen werden muss.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die Anforderungen an die Ergebnisse des Forschungsprojekt EP2 gemäss Pflichtenheft wurden vollständig und gut erfüllt.
Die Ergebnisse werden grundsätzlich als vollständig, nützlich, zweckmäßig und up to date beurteilt.

Im Schlussbericht detailliert dokumentiert ist der umfangreiche, verknüpfte und datenbankfähige Katalog der Untersuchungsmethoden als der zentrale Beitrag des EP2 zum Teilprozess Überwachung fürs Gesamtprojekt «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln».

Dem Ansatz der «Good Practice» bzw. der geforderten Praxistauglichkeit wurde u.a. mit der Erstellung der Katalogblätter der bewährten Untersuchungsmethoden Rechnung getragen. Diese sollen in der Praxis als Nachschlagewerk Anwendung finden. Zudem zeigen die Faktenblätter zu den Fallbeispielen typischer Strassentunnel die Einbettung von Untersuchungen (gemäss U-Katalog EP2) im Teilprozess Überwachung in der Praxis des Erhaltungsmanagements von Tunneln auf.

Im Schlussbericht wird zudem weiterer möglicher Entwicklungs- / Forschungsbedarf aufgezeigt, basierend auf den Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt EP2 sowie aus dem Literaturstudium zum Stand der Technik und Forschung (vgl. nachfolgender Abschnitt).

Folgerungen und Empfehlungen:

Im Forschungsprojekt EP2 wurden in diesen drei Bereichen nachfolgende Empfehlungen abgegeben:

1. Einheitlichkeit + verlässliche Datengrundlagen für Erhaltungsmanagement-Prozess:
 - Netzweite Erfassung, Auswertung von Erhaltungsprojekten als «Good Practice»;
 - Digitale «Pilotanwendung» Kataloge EP1-3 als einfache, aktualisierbare und bewirtschaftete Webdatenbank;
 - Weiterer Forschungsbedarf: Ermittlung Einflussfaktoren auf Risikobeurteilung Gefährdungsszenarien im Gesamtprozess.
2. Vorbereitung der Umsetzung des Erhaltungsmanagements-Prozesses mit BIM:
 - Mitwirkung Erhaltungsplanung bei der Entwicklung der BIM-Standards für Tunnel und Bauten im Bestand;
 - Pilotprojekte für die Erstellung von digitalen Zwillingen von Strassentunneln mit der Abbildung von Zustandsdaten mit BIM;
 - Sicherstellung Migrierbarkeit Daten in neue Datenbanken / Datenmodelle.
3. Pilotversuche praxisnahe Anwendung neuer u.a. automatisierter Untersuchungen:
 - 1:1-Praxistests in Strassentunneln z.B. Scanning-Methoden mit kinematischen und automatisierten Monitoring-Systemen;
 - Auswertung der Praxistests, wenn möglich mit automatisierten Auswertungen, wie z.B. mit Bilderkennungsmethoden.

Publikationen:

- keine -

Die durch das EP2 erstellten Katalogblätter der bewährten Untersuchungsmethoden können den beim Erhaltungsmanagement von Tunneln beteiligten Fachpersonen als Praxishilfe / Nachschlagewerk zur Verfügung gestellt werden. Dies als downloadbare pdf-Dateien z.B. auf der Website des ASTRA.

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

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Matsch Vorname: Stefan

Amt, Firma, Institut: EBP Schweiz AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Der Bericht zur «Diagnostik, Überwachungs- und Inspektionsmethoden» ist verständlich aufgebaut, klar und formell. Die gewählten methodischen und theoretischen Elemente sind konsistent und passen zu den Grundlagen dazu bzw. der geprägten Praxis und dem Stand der Forschung im Bereich. Sie ist gut formuliert und verständlich verfasst. Die erarbeiteten Katalogblätter zu den Untersuchungsmethoden sind detailliert und mit viel Fachwissen erfüllt. Dieser Katalog umfasst die relevanten und bewährten Untersuchungsmethoden vollständig. Er enthält auch Hinweise zu neuen oder zukünftigen Monitoring- und Untersuchungsmethoden. Dank der einheitlichen Gliederung und digitalen Form der Informationen sind diese auch weitgehend datenbank-kompatibel. Bereits die Katalogblätter für sich allein dürfen in der Praxis schnell Anwendung finden. Die Faktenblätter der zu den Fallbeispielen enthalten eine Fülle von projektspezifischen Informationen, welche als Anwendungsfall nützlich für die praxistaugliche Umsetzung sind. Es wird nachvollziehbar aufgezeigt, wie diese Instrumente weiterentwickelt und verbessert werden können, so dass sie als wertvolles Instrument im Erhaltungsmanagement aktuell gehalten werden können.

Der Bezug und die verteilte Kompatibilität zu den übrigen Einzelprojekten innerhalb dieses Forschungsprojekts ist gegeben. Wel die Grundlagen zum EP4 (Entscheidungsmodell) zum Zeitpunkt der Fertigstellung fehlten, war die Prüfung der Kompatibilität zu diesem Einzelprojekt nicht im gleichen Rahmen möglich.

Der Schlussbericht erfüllt die Erwartungen an die Zielerreichung der Forschungsarbeit gut. Die dargelegten Überwachungs- und Inspektionsmethoden dienen mit dem eingebrachten Fachwissen dem systematisierten und standardisierten Erhaltungsmanagement von Tunneln.

Die Anforderungen gemäss Pflichtenheft wurden vollständig und gut erfüllt.

Umsetzung:

Die Forschungsarbeit stellt ein wertvolles Dokument dar für das Astra (Filialen und Zentrale) und die planenden Büros sowie für jene, die Untersuchungsmethoden anbieten bzw. anwenden.

Bei fachgerechter Anwendung entsteht ein deutlicher Mehrwert (schneller, systematischer am Ziel mit zuverlässigen Aussagen bzw. Wahl und Beurteilung der Untersuchungsmethoden).

Die angestrebte Verbesserung des Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln wird aber erst erreicht, wenn es gelingt, den Katalog der Untersuchungsmethoden praxistauglich in das Entscheidungsmodell des EP4 zu integrieren. Die Voraussetzungen dazu sind mit dem vorliegenden Bericht geschaffen worden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Eine künftige Implementierung und Weiterentwicklung in Datenmodellen ist möglich und sollte überlegt werden.

Die künftige Entwicklung neuer und automatisierter Untersuchungen sollte verfolgt werden. Besonderes Augenmerk sollte auf deren Zuverlässigkeit und Praxistauglichkeit gelegt werden.

Die bei der Anwendung gemachten Erfahrungen sollten systematisch zusammengetragen und bei Bedarf in das Erhaltungsmanagement integriert werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Zur Zeit nicht gegeben.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Ehrbar

Vorname: Heinz

Amt, Firma, Institut: Heinz Ehrbar Partners GmbH

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: