

AMBITION

Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und
Bewertung von Eisenbahn- und Straßentunnel

Ergebnisbericht

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2015

Version 0.3

Versionshistorie

Version	Änderung	Bearbeiter
0.1	Berichtsvorlage, Formatvorlagen, Gliederung	STEFAN
0.2	Input ILF	GRUNICKE
0.3	Input AIT	STEFAN

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	3
Ausblick	6

Teil D1 Current Practice & State-of-the-Art der Tunnelzustandsbewertung

**Teil D2 Kriterienkatalog für die Erstellung von bauwerksspezifischen
Alterungsmodellen**

**Teil D3/4 Evaluierung bestehender Methoden der Zustandsbewertung und
deren Weiterentwicklung und Validierung**

**Teil D5 Messmethoden zur Detektion von Innenschalenstärken & Hohlräumen
sowie deren Integration in Bauwerksinformationssysteme – Current
Practice & State-of-the-Art**

Teil D6 Abstimmung mit dem strategischen Asset Management

Einleitung

Die Abschätzung des optimalen Zeitpunktes für Instandsetzungs- bzw. Reinvestitionsmaßnahmen beruht heutzutage in erster Linie auf der Entwicklung von realitätsnahen und zustandsbasierten Alterungs- bzw. Zustandsprognosemodellen. Ziel des Projekts AMBITION ist es, neuartige Technologien und Messverfahren im Tunnel Asset Management zu evaluieren, um eine objekt-spezifische Beurteilung von Tunnelbauwerken (baulich-konstruktive Komponenten) nach objektiven und standardisierten Bewertungskriterien zu ermöglichen und eine Voraussage zur zukünftigen Zustandsentwicklung zu tätigen.

Dazu werden u.a. folgende Themen adressiert

- Erhebung und Evaluierung bestehender Methoden **der Zustandserfassung und -bewertung** (national, international)
- Definition von Kriterien für bauwerkspezifische **Degradationsmodellen** und deren Formulierung für wesentliche Bauteile
- Entwicklung eines **Konzepts** für die Zustandsbewertung und deren Validierung
- **Messmethoden** zur Detektion von Innenschalenstärken und Hohlräumen hinter der Tunnelauskleidung in den Mittelpunkt der Betrachtung.
- Alignment mit dem strategischem **Asset Management**

Die Bearbeitung dieser Themen erfolgte strukturiert in mehreren Arbeitspaketen. Der gegenständliche Ergebnisbericht fasst die Inhalte und Ergebnisse des Projektes AMBITION entsprechend dieser Struktur zusammen:

- **Teil D1 - Current Practice & State-of-the-Art der Tunnelzustandsbewertung**
Hier wurde der internationale Status-quo bei der Zustandserfassung und -bewertung von Straßen- und Bahntunnels recherchiert und zusammengefasst. Die vorhandenen Regelwerke wurden verglichen und die eingesetzten Technologien erhoben. Neben einer internationalen Umfrage zu diesen Themen wurde auch ein Vergleich mit anderen Infrastruktur Asset Klassen (Brücken, Pavement, Verkehrswasserbauten, Siedlungswasserbau) angestellt.
- **Teil D2 - Kriterienkatalog für die Erstellung von bauwerksspezifischen Alterungsmodellen**
Dieses Arbeitspaket beschäftigt sich mit den Alterungsprozessen von Tunnelbauwerken in den jeweiligen Netzen von ASFiNAG und ÖBB. Ziel dieses Arbeitspak-

tes war es, zustandsrelevante Parameter und Umfeldkriterien zu identifizieren, um in weiterer Folge einen Anforderungskatalog für die Erstellung von Alterungsmodellen auf Bauwerksebene zu definieren. Die Fokussierung auf die Alterungsmodelle ist insofern erforderlich, da eine Weiterentwicklung der allgemeinen Zustandsbewertung kompatibel mit der Formulierung solcher Alterungsmodelle sein muss und deren laufende Kalibrierung und Verfeinerung ermöglichen sollte.

Zunächst wurden die vorhandenen historische Zustandsdaten der Bauwerksdatenbank BAUT der ASFiNAG analysiert. Parallel dazu wurden die bisherigen Erfahrungen mit dem Alterungsverhalten von Bahntunnels im Netz der ÖBB über einen Delphi-Prozess abgefragt. Für Straße und Bahn wurden somit grundlegende Degradationsmodelle formuliert. Durch Clusterung wurde versucht, die im österreichischen Kontext zustandsrelevanten Parameter zu identifizieren. Vergleichend wurden die aktuellen vorhandenen Degradationsmodelle auf Baustoffebene diskutiert.

- **Teil D3/4 - Evaluierung bestehender Methoden der Zustandsbewertung und deren Weiterentwicklung und Validierung**

Gemeinsam mit den Auftraggebern ASFiNAG und ÖBB wurde ein „Lastenheft“ für die Zustandserfassung und Zustandsbewertung definiert. Diesem Lastenheft wurde die bisherige Current Practice gegenübergestellt, um Handlungsfelder, welche Ansätze für eine Weiterentwicklung bieten, zu erkennen.

Es wurde schließlich ein Konzept einer möglichen zukünftigen Zustandserfassung und -bewertung vorgestellt, welches eine Weiterentwicklung der Datenakquise, -verarbeitung und -vorhaltung und der Zustandsbewertungssystematik aufzeigt.

Die Systematik wurde an einem realen Tunnelobjektes versuchsweise angewandt und validiert.

- **Teil D5 - Messmethoden zur Detektion von Innenschalenstärken & Hohlräumen sowie deren Integration in Bauwerksinformationssysteme – Current Practice & State-of-the-Art**

Die bestehenden physikalischen Messtechniken und Prüfmethode wurden hinsichtlich ihrer Tauglichkeit und Anwendbarkeit im Kontext österreichischer Bahn- und Straßentunnel einander gegenübergestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf

jene zerstörungsfreien Methoden, welche Informationen zu Schalenstärken und Hohlräumen hinter Schalen bieten können.

Ein Schwerpunkt liegt auf dem Einsatz von Georadar. Dazu wurden auch die Durchführung versuchsweiser Bodenradar-Messungen in einem Straßentunnel, welche mit bereits früher durchgeführten Georadarmessungen mit abweichender Messkonfiguration verglichen wurden. Aus den Erkenntnissen wurden schließlich Empfehlungen für zukünftige Messanordnungen für den Einsatz von Georadar in Tunnel formuliert.

Ein weiterer Teil des Arbeitspaketes beschäftigte sich mit der Integration derartiger Messdaten in Bauwerksinformationssysteme als Vorstufe oder Teilmodul von BIM-Modellen und den Möglichkeiten der automationsgestützten Auswertung überlagerter georeferenzierter Daten und dem daraus erwachsenden Mehrwert für die Zustandsbeurteilung.

- **Teil D6: Abstimmung mit dem strategischen Asset Management**

Während in den vorangegangenen Arbeitspaketen der Fokus auf technischen und technologischen Aspekten der Zustandserfassung und -Zustandsbewertung lag, wird abschließend der organisatorische und strategische Kontext beleuchtet. Neben dem Risikomanagement auf Netzebene und dem Konnex zur ISO 55000 als zukünftigem Industriestandard im Infrastructure Asset Management wird auch auf das Thema Datenmanagement eingegangen.

Der Teil D6 schließt mit Empfehlungen zur Implementierung des im Teil D3/4 und D5 vorgeschlagenen Konzepts der weiterentwickelten Zustandsbewertung.

Ausblick

Die derzeitige Bewertungssystematik fasst den Zustand auf der Ebene Tunnelbauwerke in einer Objektnote zusammen und ist somit ein tauglicher Indikator der Zuverlässigkeit der Gesamtröhre oder der Priorität einer Intervention zur Gewährleistung der Streckenverfügbarkeit (Prioritätswert). Wertvolle Informationen über das Ausmaß der Degradation (Substanzwert) sind jedoch erst später auf Projektebene sichtbar. Die im vorgeschlagenen Konzept vorgenommene Anpassung der Granularität der Zustandsbewertung auf Blockebene liefert Aussagen über den Substanzwert, welcher eine Schärfung von Alterungsmodellen ermöglicht und somit unverzichtbare Grundlage für mittel- bis langfristige Prognosen in der Instandhaltungsplanung auf Netzebene ist. Der Aufwand für Schadenserfassung und -dokumentation steigt dadurch jedoch nicht, da auch bisher jeder Block handnah inspiziert und beurteilt wird. Durch Kombination mit Zustandsmodellen anderer Gewerke (E&M) entsteht ein integriertes Lifecycle-Management für die Asset-Klasse Tunnel, wie es auch bereits bei anderen Assets (z.B. Brücken, Pavement) gelebt wird. Der Reifegrad des Managements der Asset-Klasse Tunnel wird somit auf jenen anderen Infrastrukturen angehoben.

Durch Kombination mit den Zustandsmodellen anderer Gewerke (E&M) wird ein integriertes Lifecyclemanagement ermöglicht.

Das Ausschöpfen der vorhandenen Möglichkeiten objektiverer und effizienter Möglichkeiten der Zustandserfassung unterstützt den Anlagenverantwortlichen dabei, den Blick auf das Wesentliche zu richten. Auf Netzebene ermöglicht das vorgestellte Konzept der Zustandsbewertung die evidenzbasierte Vorausschau auf die Substanzwertentwicklung und den mittel- bis langfristigen Investitionsbedarf, der durch die baulich-konstruktiven Komponenten ausgelöst wird.

Die Technologie des Tunnelscans wird in Zukunft ein integraler Bestandteil der Tunnelprüfung sein. Die hochauflösende Aufnahme der Tunnellaibung im sicht- und unsichtbaren Spektrum ermöglicht eine virtuelle Vorbegehung der Anlage am Büroarbeitsplatz ohne Beeinträchtigung durch Lärm, Müdigkeit, Kälte, schlechte Lichtverhältnisse oder erschwerte Zugänglichkeit. Automatisierte (nicht-qualifizierende) Vorauswertungen wie z.B. die Erkennung von flächigen oder linienförmigen Veränderungen der Oberfläche gegenüber Voraufnahmen weisen den Prüfer auf Bereiche mit möglichen progressivem Degradati-

onsverhalten hin, welchen im Rahmen der anschließenden Prüfung vor Ort entsprechende Aufmerksamkeit geschenkt werden kann.

Durch den Einsatz aktueller Technik in der Datenakquise und Zustandserfassung und in der Datenhaltung (von Bauwerksinformationssystem bis BIM) wird sichergestellt, dass der Fokus des Anlagenverantwortlichen und Prüfsingenieurs auf die wesentlichen Problemstellen gelegt werden kann und nicht mit zusätzlichem Aufwand in der Datenerfassung und Datenpflege belastet wird. Neben wertvollen Tools wie vergleichende Differentialanalyse mehrerer Inspektionsepochen, georeferenzierte Überlagerung von Daten aus anderen Quellen (z.B. Georadar, Geologische Dokumentation des Vortriebs) müssen entsprechende Schnittstellen und offene Datenaustauschformate definiert werden, um die Durchgängigkeit mit anderen Systemen, Datenbanken, BIM u.dgl. sicherzustellen.

AMBITION

Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und
Bewertung von Eisenbahn- und Straßentunnel

Current Practice & State-of-the-Art der Tunnelzustandsbewertung

Deliverable D1

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2015

Version 0.5

Versionshistorie

Version	Änderung	Bearbeiter
0.1	Berichtsvorlage, Formatvorlagen, Gliederung	STEFAN
0.2	Input ILF	GRUNICKE
0.3	Input AIT-Verkehrssicherheit	STEFAN
0.4	Input AIT-Baudynamik	KRIEGISCH
0.5	Review ILF	GRUNICKE
0.6	Input AIT-ERF	JUNG

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	4
1 Begriffsdefinitionen	7
2 Systemabgrenzung.....	11
2.1 Untersuchungsgegenstand (Scope).....	11
2.2 Systemebene (Scale).....	12
3 Messmethoden der zustandserfassung.....	13
3.1 Zerstörende Prüfverfahren	14
3.1.1 Bohrkernentnahmen.....	14
3.2 Zerstörungsfreie Prüfverfahren	15
3.2.1 Ultraschall-Verfahren (Impuls-Echo).....	15
3.2.2 Impact-Echo Verfahren	15
3.2.3 Radar (Ground Penetration Radar).....	16
3.2.4 Infrarot-Verfahren (IR).....	17
3.2.5 3D-Laserscanner.....	18
3.2.6 Elektro-Statistisches Verfahren	19
3.2.7 Elektro-Magnetische Verfahren.....	19
3.3 Geophysikalischen Messverfahren zur Hohlraumdetektion	20
4 Verfahren zur Zustandsbewertung – Current Practice & State-of-the-Art	21
4.1 ASFINAG.....	21
4.2 ÖBB.....	23
4.3 Erhebung internationaler Erfahrungsgrundlagen	25
4.4 Analyse bestehender nationaler/internationaler Normen	32
4.4.1 Deutschland	32
4.4.2 Schweiz.....	39
4.4.3 Australien	42
4.4.4 USA.....	42
4.4.5 Neuseeland	44

4.4.6	Italien.....	47
4.4.7	Vereinigtes Königreich – Straße	48
4.4.8	Schweden	50
5	Vergleich mit State-of-the-Art anderer Infrastrukturen.....	54
5.1	Brücken	54
5.1.1	RVS 13.03.01.....	54
5.1.2	RVS 13.03.11.....	55
5.1.3	RVS 13.05.11.....	55
5.1.4	ONR 24008	56
5.2	Pavement Management System (PMS).....	56
5.3	Verkehrswasserbau.....	59
5.4	Abwassernetze.....	60
6	Zusammenfassung.....	62
7	Anhang	63
7.1	Fragenkatalog für internationale Befragung	63
	Literaturverzeichnis.....	69

Einleitung

Die bisherige Praxis der Tunnelzustandsbewertung ist historisch gewachsen und beruht auf dem hoheitlichen Auftrag einer angemessenen Bauwerksüberwachung. In den vergangenen Jahr(zehnt)en hat der österreichische Anlagenbestand und deren Nutzung beständig zugenommen, sodass eine immer größere Menge an Daten und Informationen zur Verfügung stehen. Allein auf dem heimischen Autobahn- und Schnellstraßennetz sind derzeit rd. 160 Tunnelanlagen in Betrieb, bei den ÖBB sind es ca. 250 Tunnel und tunnelähnliche Bauwerke. Laufend werden neue Röhren eröffnet oder instandgesetzt, um dem wachsenden Verkehrsaufkommen und den gestiegenen gesetzlichen Mindestanforderungen (z.B. Straßentunnelsicherheitsgesetz (STGS), Richtlinie 2004/54/EG „Mindestanforderungen für die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz) Genüge zu tun. Sämtliche im Zuge der Zustandsbewertung gewonnenen Informationen stellen ein großes Potential dar, um strategische und operative Maßnahmenplanungen daten- und evidenzbasiert entwickeln zu können. Hierfür ist es jedoch erforderlich, dass die richtigen Daten objektiv, effizient und verwertbar erhoben werden.

Diesem Umstand wird die heutige Systematik der Zustandsbewertung jedoch nur zum Teil gerecht. Die entsprechenden Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (z.B. RVS 13.03.31 [2]) sehen zwar einheitliche Zustandsnoten für Tunnelbauwerke vor, die Einstufung nach diesen Noten unterliegt jedoch relativ „weichen“ Kriterien, die sehr stark von der subjektiven Einschätzung des meist unter großem Zeitdruck und widrigen Bedingungen prüfenden Ingenieurs abhängig sind.

Ziel des Projekts AMBITION ist es, einen möglichst großen Teil der Datenakquisition zu objektivieren und auf eine vergleichbare und verwertbare Datenbasis zu stellen. Der Ingenieur soll dabei nicht entmündigt, sondern vielmehr unterstützt werden, die Beurteilung von Tunnelbauwerken auf Basis einer objektspezifischen Einschätzung der Anlagenzustände vorzunehmen. Im Pavement Management ist der Grad der objektivierbaren Datenaufnahme dank des Einsatzes zeitgerechter Technologien und moderner Verfahren der Datenauswertungen bereits sehr weit fortgeschritten [1]. Das gegenständliche Projekt strebt auch bei den übrigen baulichen Komponenten von Tunnelbauwerken einen ähnlichen Objektivierungsgrad an.

Das Projekt AMBITION ist in insgesamt acht Arbeitspakete (AP) untergliedert, wobei AP1 für die Projektsteuerung und kontinuierliche Abstimmung mit dem Auftraggeber vorgesehen ist. Das AP2 dient der Klärung und Spezifizierung des Sachverhaltes (Aufgabenstellung, Begriffsbestimmungen, bestehende Verfahren der Zustandsbewertung von Tunnel,

Erhebung des aktuellen Forschungsstandes etc.) und ist die Basis für die Kriteriendefinition (AP3) und die anschließende Evaluierung der bestehenden Methoden der Zustandsbewertung (AP4). Das AP5 fokussiert hingegen auf die Praktikabilitätsprüfung der im vorangegangenen Arbeitsschritt (weiter-) entwickelten Methodik der Zustandsbewertung. Die Validierung erfolgt anhand von Realdaten bestehender Tunnelbauwerke. Stehen keine geeigneten Demodaten zur Verfügung, werden diese anhand unterschiedlicher, miteinander vergleichbarer Tunnelbauwerke generisch erzeugt.

Ein separates Arbeitspaket (AP6) stellt die Messmethoden zur Detektion von Innenschalenstärken und Hohlräumen hinter der Tunnelauskleidung in den Mittelpunkt der Betrachtung. Ein in der Untergrunderkundung bereits erfolgreich eingesetztes Verfahren (Georadar) wird dabei auf seine generelle Eignung zur Detektion von Hohlräumen getestet.

Das abschließende AP7 dient der Synthese der Ergebnisse und der Abstimmung mit dem strategischem Asset Management von ASFINAG und ÖBB.

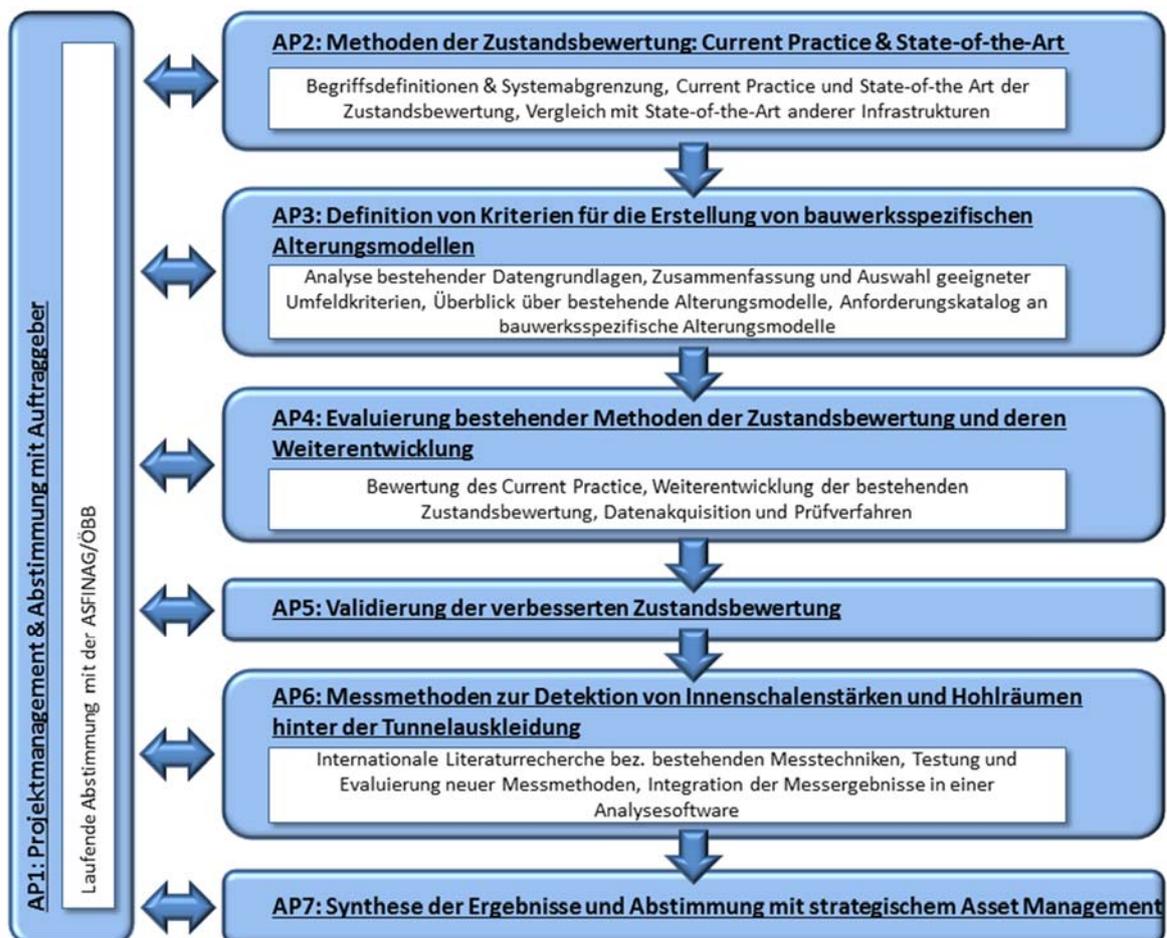


Abbildung 1: Darstellung der Arbeitspakete im zeitlichen Ablauf

Der nun vorliegende Deliverable D1 (Current Practice & State-of-the-Art der Tunnelzustandsbewertung) dient der Vorarbeit für die Identifikation zustandsrelevanter Parameter und Umfeldkriterien (D2) und verfolgt in diesem Kontext folgende Zielsetzungen:

- **Begriffsdefinition und Systemabgrenzung:** Zustandsbewertung, Scoping, Klassifikation von Komponenten (Bauteilebene, Bauwerksebene, Netzebene) sowie die semantischen Koordination der im Asset Management gebräuchlichsten Begriffe (z.B. Zustand, Alterung, Degradation).
- **Internationale Trends und Verfahren** der Zustandserfassung: Im Rahmen des Projekts wird untersucht, inwieweit neuartige Bewertungsverfahren und probabilistische Entscheidungsmodelle bereits verwendet werden bzw. im Zuge von Decision Support Systemen (DSS) in das Instandhaltungsmanagement Eingang gefunden haben.
- Zusammenschau der gängigen Praxis (**Current Practice**) der Zustandsbewertung für Untertagebauwerke für Straße und Schiene sowie der dazugehörigen nationalen und internationalen **Regelwerke und Richtlinien** hinsichtlich Zieldefinitionen, Methoden, Dokumentation, Verarbeitung und Verwertung für das Erhaltungsmanagement und deren Innovationsgehalts gegenüber der in Österreich gängigen Praxis.
- **State-of-the-Art** der Zustandsbewertung und anwendbarer Messmethoden: Im Rahmen des AP1 wird ein umfassendes Literaturscreening existierender Bewertungsverfahren durchgeführt, um unterschiedliche Herangehensweisen an die Thematik aufzuzeigen. Die derzeit verfügbaren geophysikalischen Messverfahren werden auf ihre Einsatzfähigkeit geprüft und die Ergebnisse in einer Evaluierungsmatrix erfasst und bewertet. Aus dieser Matrix werden mögliche Anwendungen bzw. Verbesserungen bestehender Methoden abgeleitet und beschrieben.
- Vergleich mit Current Practice und **State-of-the-Art anderer Infrastruktur Assets** (z.B. Brücken, Kanalsysteme).

1 BEGRIFFSDEFINITIONEN

Um eine einheitliche Vorgehensweise im Rahmen des Projekts AMBITION sicherzustellen, wird es als notwendig erachtet, die maßgebenden Begriffe vorab zu beschreiben bzw. für das gegenständliche Projekt neu zu definieren. Die nachfolgenden Definitionen betreffen die beiden Verkehrsträger „Straße“ und „Schiene“. Bezieht sich ein Begriff ausnahmsweise nur auf einen Teilbereich oder auf eine spezifische Anlage (z.B. Brücke, Tunnel, Kanalnetz), wird dies im Text explizit angeführt.

Die Begriffsdefinitionen für den Bereich Straße sind dem Handbuch Pavement Management in Österreich [1], den entsprechenden RVS-Richtlinien (z.B. RVS 13.03.31 [2]) sowie weiteren Quellen [3], [4], [5] entnommen oder wurden auf deren Grundlage für das vorliegende Projekt adaptiert bzw. neu ausformuliert.

Es wird darauf hingewiesen, dass die verwendeten Begriffsdefinitionen in erster Linie für das gegenständliche Projekt verwendet werden. Daraus können sich gewisse Unterschiede zu bereits bestehenden Begriffsdefinitionen ergeben, die in anderen Projekten oder in anderen Teilbereichen verwendet werden.

Tabelle 1: Begriffsbestimmungen & Definitionen

Begriff	Definition
Abnutzung	Verschleißvorgang, durch den die funktionale und konstruktive Leistungsfähigkeit einzelner Bauteile bzw. der gesamten Tragkonstruktion als Ergebnis aus Verkehrs-, Klima- und Umwelteinflüssen abnimmt.
Alterung	Veränderung der Eigenschaften eines Baustoffes im Laufe der Zeit.
Anlage	Physikalisches Objekt der Straßen- oder Schieneninfrastruktur. Eine Anlage besteht in der Regel aus mehreren Elementen, die individuell bewertet bzw. beurteilt werden können.
Asset Management	Eine umfassende und strukturierte Methode hinsichtlich des gesamten Lebensdauermanagements einer Anlage (Brücken, Tunnel, Bauwerke, Maschinenpark und Geräte sowie menschliche Ressourcen) als Instrument wirksamer und erfolgreicher Dienstleistungen.
Bauliche Erhaltung	Die Bauliche Erhaltung dient der Sicherstellung und periodischen Verbesserung von Bauwerkseigenschaften durch gezielten Einsatz von Erhaltungsmaßnahmen am Bauwerk.

	Der Begriff „Bauliche Erhaltung“ gilt in der obigen Definition für das Erhaltungsmanagement der ASFINAG, bei der ÖBB Infrastruktur AG spricht man sinngemäß von „Instandhaltung“.
Bauliche Erhaltungsmaßnahmen	Bauliche Erhaltungsmaßnahmen sind Aktivitäten im Bereich der Erhaltung, die entweder zu einer Verlangsamung von Schadensentwicklungen führen oder die Infrastruktur nachhaltig verbessern. In Abhängigkeit von der Intensität der baulichen Erhaltungsmaßnahme kann es sich dabei um Instandhaltungsmaßnahmen, Instandsetzungsmaßnahmen oder Erneuerungen handeln.
Bauteil	Physisch unterscheidbarer Teil der Anlage (z. B. Abdichtung/Entwässerung, Erhöhter Seiten-/Mittelstreifen, Portal, Zwischendecke)
Bauwerksprüfung	Feststellung und Bewertung des IST-Zustands einer Konstruktion
Bauwerküberwachung/ Monitoring	Maßnahmen, um Mängel und Schäden an Bauwerken rechtzeitig zu erkennen, sodass ein Versagen ohne Vorankündigung ausgeschlossen werden kann. Überbegriff für alle Arten der unmittelbaren systematischen Erfassung, Beobachtung oder Überwachung eines Vorgangs oder Prozesses mittels technischer Hilfsmittel oder anderer Beobachtungssysteme.
Betriebliche Erhaltungsmaßnahmen	Betriebliche Erhaltungsmaßnahmen sind jene Aktivitäten, die sich ausschließlich auf den Betrieb der jeweiligen Infrastruktur beziehen und in der Regel mit keinen baulichen Aktivitäten verbunden sind. Unter betriebliche Erhaltungsmaßnahmen fallen die Wartung und Pflege der mit der Infrastruktur verbundenen Betriebseinrichtungen und Anlagen sowie jene Dienste, die für eine sichere Benützung der Infrastruktur notwendig sind (z.B. Wartung Tunnelausrüstung, Grünpflege, Winterdienst).
Bewertung	Jede Methode zur Berechnung, Vorhersage, Einschätzung oder Messung der Tragsicherheit/Funktionsfähigkeit eines Bauteils/Bauwerkes hinsichtlich seiner zukünftigen Nutzung
Dauerhaftigkeit	Anforderung an das Bauwerk, um über den geplanten Nutzungszeitraum die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit sicherzustellen.
Degradation/Alterung	Verlust von für die Gebrauchstauglichkeit oder Tragsicherheit relevanten Material- oder Bauteileigenschaften.
Degradationskurve/ Alterungskurve	Vereinfachte Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Degradation/ Alterung eines Bauteils oder eines Bauwerkes
Erhaltung	Unter Erhaltung werden all jene (straßeninfrastrukturellen) Aktivitäten verstanden, die zur Aufrechterhaltung der Funktion der Infrastruktur notwendig sind. Darunter fallen alle Maßnahmen zur

	<p>Sicherung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks bzw. einzelner Bauwerksteile und der Funktionsfähigkeit der BuS</p> <p>Im Rahmen der Österreichischen Eisenbahninfrastruktur spricht man hingegen von Instandhaltung, nicht Erhaltung.</p>
Gebrauchstauglichkeit	Eignung eines Bauwerks oder Bauteils für einen bestimmungsgemäßen Verwendungszweck, die auf objektiv und nicht objektiv feststellbaren Gebrauchseigenschaften beruht und deren Bedeutung sich aus individuellen Bedürfnissen ableitet.
Instandhaltung	Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.
Inspektion	Prüfung eines Bauwerks oder einzelner Bauteile nach besonderen Vorschriften.
Instandsetzung	Teil der Instandhaltung. Physische Maßnahmen, die ausgeführt werden, um die Funktion einer fehlerhaften Einheit wiederherzustellen.
Kontrolle (A), Einfachprüfung (D)	Augenscheinliche Beurteilung der Anlage auf ihren vorgesehenen Zustand. Visuelle Kontrolle ohne Verwendung besonderer Hilfsmittel durch sachkundigen Ingenieur.
Prüfung (A), Hauptprüfung (D), Sonderprüfung	<p>Prüfung zur Feststellung, ob ein Merkmal oder eine Eigenschaft einer Einheit (in der Regel alle baulich-konstruktiven Teile) die festgelegten Anforderungen erfüllt.</p> <p>Der Prüfer muss das Tragverhalten des zu prüfenden Objektes beurteilen und den Einfluss von Schäden auf die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Bauwerks abschätzen können. Die Prüfung erfolgt in der Regel „handnah“.</p>
Schaden	Veränderung der Konstruktion/ Konstruktionselemente, die relevant für die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sind.
Tragfähigkeit	Mechanische Eigenschaften eines Bauteils oder eines Bauteilquerschnitts in Hinblick auf verschiedene Versagensformen (z.B. Biege- widerstand, Knickwiderstand, Zugwiderstand).
Tunnelbauwerk	Konstruktionselemente der Stützmittel, der Tunnelaußen- bzw. -innenschale, der Abdichtung sowie des bautechnischen Innenausbaus (z.B. Zwischendecke, Fahrbahnaufbau, Leitungskanäle, Entwässerungsanlagen, Anstrich).
Tunnelerneuerung	Ersatzneubau d. gesamten Bauwerks oder einzelner Bauwerksteile

Tunnelnachrüstung	Ergänzung des Tunnelbauwerks und/oder der Einbau neuer, zusätzlicher oder modifizierter Komponenten der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausrüstung.
Überwachung	<p>Laufende Beobachtung des Bauwerks zur Feststellung der Funktionsfähigkeit des Bauwerks und der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausrüstung sowie der Verkehrssicherheit im Verkehrsraum.</p> <p>Die Überwachung erstreckt sich auf alle baulich konstruktiven Teile und Einrichtungen, die beim Befahren des Tunnels vom Fahrzeug aus sichtbar sind und findet im Rahmen der allgemeinen Streckenkontrolle des Verkehrsweges statt.</p>
Verkehrssicherheit	Eigenschaften eines Verkehrsbauwerks, seine geplante Funktion auf gefahrlose Weise nutzen zu können. Sie schließt die Sicherheit für Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge sowie die Sicherheit für Personen und Sachen im Umfeld des Bauwerks mit ein.
Wartung	Teil der Instandhaltung. Sämtlichen Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats.
Zuverlässigkeit	Eigenschaften eines Bauwerks, eine festgelegte Funktion unter vorgegebenen Bedingungen während einer festgelegten Zeitdauer mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit zu erfüllen.
Zustandserfassung	Erhebung der objektiv feststellbaren baulich-konstruktiv relevanten Merkmale eines Bauteils.
Zustandsbeurteilung	Baulich-konstruktive Charakterisierung des Bauteil- oder Bauwerkzustandes auf Grundlage der Zustandserfassung und sonstiger relevanter Informationen durch den sachkundigen Ingenieur.
Zustandsbewertung	Zusammenfassende quantitative und/oder qualitative Beschreibung des Zustandes auf Grundlage der Zustandserfassung und Zustandsbeurteilung.
Zustand	Summe aller für die Nutzung des Bauwerkes relevanten baulich-konstruktiven Merkmale zu einem bestimmten Zeitpunkt.
Zustandsnote	Angabe eines Werts bezüglich des funktionalen Zustands eines Bauteils/Bauwerks.
Zuverlässigkeit	Eigenschaft/Fähigkeit eines Tragwerks oder Bauteils, eine festgelegte Funktion unter vorgegebenen Bedingungen innerhalb der geplanten Nutzungszeit mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit zu erfüllen. Die Zuverlässigkeit wird in der Regel mit probabilistischen Größen ausgedrückt.

2 SYSTEMABGRENZUNG

Tunnel als Anlagengattung im Rahmen von Verkehrsinfrastrukturen weisen eine ausgesprochene Vielfalt an Ausprägungen, unterschiedliche Bauarten und Komponenten auf, deren Grenzen an den technischen, funktionellen und räumlichen Schnittstellen zu anderen Anlagengattungen nicht immer scharf gezogen werden können bzw. im Einzelfall je nach Fragestellung zu spezifizieren sind.

Im Projekt AMBITION erfolgte (im Einvernehmen mit den Auftraggebern) eine Systemabgrenzung hinsichtlich der Auswahl der in weiterer Folge zu betrachtenden Tunnelbauweisen und deren Teilkomponenten (Scope) sowie hinsichtlich der Systemebene (Scale), auf der die Zustandsbewertung erfolgen soll.

2.1 Untersuchungsgegenstand (Scope)

Bei der Auswahl der in den Netzen von ASFINAG und ÖBB vielfältig vorhandenen Tunnelbauweisen liegt der Fokus auf möglichst charakteristische Bauweisen, d.h. Typen, welche überwiegend dem Gesamtkollektiv der Tunnelbauten angehören. Zu diesen zählen bergmännische Bauweisen, die konventionell (z.B. in der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise) hergestellt wurden. Auch wenn andere bergmännische Bauweisen (z.B. maschinelle Vortriebe und deren typischen Ausbauten) im Netz bereits vorhanden sind und mittel- bis langfristig v.a. bei Neubauten anteilmäßig zulegen werden, wurden diese im gegenständlichen Projekt ausgeklammert, da sie (bezogen auf die Gesamtpopulation an Tunnelbauwerken) noch auf absehbare Zeit unterrepräsentiert sind.

Bei der Vielzahl an Komponenten einer Tunnelanlage wird im Rahmen von AMBITION auf Tunnelschalen in Ortbeton und auf Mauerwerk fokussiert, wobei aus prozessökonomischen Gründen erstere anhand von Straßentunnel und letztere anhand von Eisenbahntunnel erörtert werden. Als zusätzliche Komponenten werden Zwischendecken und Entwässerungsanlagen behandelt, während andere Komponenten wie z.B. Oberbau/Fahrbahn, elektromaschinelle Ausrüstung, bauliche Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen ausgeklammert werden.

Tabelle 2: Untersuchungsgegenstand (Scope) von AMBITION

Scope	Definition
Bauweise	Bergmännische, konventionelle Bauweisen
Komponenten/ Bauteil	<ul style="list-style-type: none"> • Entwässerung • Tunnelschale • Zwischendecken

2.2 Systemebene (Scale)

Die Frage nach dem Zustand und der einhergehenden Alterung kann auf verschiedenen Systemebenen behandelt werden. So ist je nach Betrachtungsmaßstab einmal der Zustand eines einzelnen Bauteils (z.B. eines Gewölbeblocks) und ein anderes Mal der Zustand der jeweiligen Einzelröhre bzw. des gesamten Tunnelbauwerks („Objekt“) von Interesse. In weiterer Folge kann auch der Zustand einer Tunnelkette, einer Strecke oder des Gesamtkollektivs im Netz Gegenstand der Betrachtungen sein. Je nach Betrachtungsebene sind daher skalengerechte, unterschiedliche Ansätze erforderlich.

Das Projekt AMBITION konzentriert sich im Wesentlichen auf die Bauwerksebene (Objektebene), wobei hierfür teilweise auf Bauteilebene Rückgriff genommen werden muss. Dies entspricht in etwa der Betrachtungsebene der heutigen RVS 13.03.31 [2] und dem ÖBB-Regelwerk 06.01.02 [43] (vgl. unten Abschnitt 4.2).

Da die jeweiligen Betrachtungsebenen naturgemäß untereinander gekoppelt sind, nehmen die Ergebnisse auf Bauwerksebene früher oder später Einfluss auf die höhere Ebene des Korridors oder Gesamtnetzes. Diese Betrachtungsweise ist jedoch nicht Gegenstand des gegenständlichen Projektes.

3 MESSMETHODEN DER ZUSTANDSERFASSUNG

Weltweit werden immer mehr Tunnelkilometer sowohl im Bahn- als auch Straßenbereich gebaut. Als Folge dessen steigt der Anteil älterer Bauwerke stetig an und somit auch die Notwendigkeit für eine objektive und kostengünstige Zustandserfassung respektive -bewertung [28], [35].

Die stete Weiterentwicklung im Bereich der Messtechnik ermöglichen detailliertere Aussagen und dienen dazu, die Instandhaltung zielgerichtet und bedarfsorientiert zu gestalten.

Im Rahmen des Tunnel-Monitoring hat es sich bewährt, mehrere Messmethoden zu kombinieren, um einen größtmöglichen Informationsgewinn zu lukrieren [24], [25], [36]. Durch die Kombination verschiedener Messmethoden bei gleichzeitiger Verwendung eines effizienten Datenmanagements können detaillierte Aussagen zum Tunnel-Zustand getätigt werden und Wartungsarbeiten effizienter gestaltet werden [24].

Ein weiterer Trend ist die zunehmende Automatisierung in der Messtechnik, die es ermöglicht immer mehr Daten über den Tunnel-Zustand zu gewinnen [28]–[30], [37], [38]. Trotz der Automatisierung bei der Datenverarbeitung ist bei der Auswertung meistens noch eine Fachkraft von Nöten, um die Daten-Integrität zu gewährleisten [23]. Neben halb-automatischen Messgeräten sollen in Zukunft sogar komplett autonome Messgeräte zum Einsatz gelangen [29].

Die derzeit gängigsten (geo-)physikalischen Messverfahren werden in Folge kurz vorgestellt und auf ihre Einsatzfähigkeit geprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Gängigste Messmethoden und Schadensbilder

	Bohrkern	Impuls-Echo	Impact-Echo	Luft-GPR	Boden-GPR	IR	3D-Laser	Elektro-Statistisch	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

In Folge werden die Kurzbeschreibungen der gängigsten Prüfverfahren präsentiert und nach Einsatzmöglichkeit evaluiert. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Detektion von Rissen, Abplatzungen, Hohlräume, Oberflächenänderungen und Nassstellen.

Grob sind die Prüfverfahren in zwei Gruppen unterteilbar: zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren.

3.1 Zerstörende Prüfverfahren

3.1.1 Bohrkernentnahmen

Die Probenentnahme erfolgt mit einem Kernbohrgerät und ist u.a. in der DIN EN 12504-1 geregelt [23]. Am Probenkörper kann zum Beispiel für Stahlbeton sowohl die Stahlgüte mittels chemischer Untersuchungen (Chlorid (ÖNORM B 4706), Karbonatisierungstiefe (ÖNORM EN 14630), etc.), als auch die Betongüte über Zug und Druckversuche (Druckfestigkeit z.B. nach DIN EN 12390) im Labor getestet werden.



Abbildung 2: Stahlbeton-Bohrkerne [39]

Bei dieser Methode ist jedoch besondere Vorsicht walten zu lassen: Es kann vorkommen, dass es beim Bohren zu einer Störung der Probe und damit zur Beeinträchtigung der Aussagekraft nachfolgender Untersuchungen am Prüfling kommt [23].

3.2 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

3.2.1 Ultraschall-Verfahren (Impuls-Echo)

Beim Ultraschall-Verfahren oder auch Impuls-Echo-Verfahren wird ein definierter Sendepuls (meist im Frequenzbereich von 20-200kHz) über einen Leistungsverstärker auf einen Ultraschall-Prüfkopf gesendet, wo das elektrische Signal in eine mechanische Welle transformiert wird und in das Bauwerk eingebracht [24].

Die eingebrachte Körperschallwelle wird an Grenzflächen (Beton-Stahl, ...) und Diskontinuitäten (Hohlräume, ...) reflektiert und am Empfangskopf wieder in ein elektrisches Signal rücktransformiert. Über eine zeitaufgelöste Fourier-Zerlegung kann bei bekannten Bauteilparametern eine genaue Verortung erfolgen. Bei Verwendung von mehreren Sensoren kann die Genauigkeit der Verortung drastisch erhöht werden.

3.2.2 Impact-Echo Verfahren

Ähnlich zum Ultraschall-Verfahren wird beim Impact-Echo Verfahren die „Antwort“ des Bauwerks mittels Körperschall-Sensoren aufgenommen. Die Anregung der Bauteile erfolgt durch einen mechanischen Stoß, der eine transiente Druckwelle im Bauwerk erzeugt (zumeist durch einen kleinen Hammer o. Ä.). Die Druckwelle wird an Grenzflächen (wie Stahlbewehrung, Spannkämen, Fehlstellen, Ablösungen, etc.) reflektiert und von zumindest einem Körperschall-Sensor aufgenommen [24]. Über eine zeitaufgelöste Fourier-Zerlegung

kann bei bekannten Bauteilparametern eine genaue Verortung erfolgen. Bei Verwendung von mehreren Sensoren kann die Genauigkeit der Verortung drastisch erhöht werden.

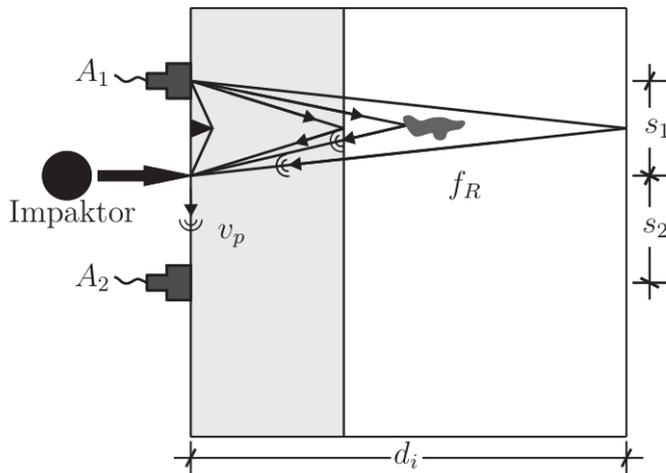


Abbildung 3: Skizze zum Impact-Echo Verfahren [23]

Eine Sonderform des Impact-Echo Verfahrens ist die indirekte Anregung der Tunnelwand mittels eines Massenschwingerregers [25]. Während dieser externen Körperschall-Anregung wird punktweise mit einem Laser-Vibrometer die Auslenkung der Tunnelwand (=Antwortfunktion) gemessen. Das ist sowohl für die Tunnel-Wand (Abplatzen oder Loslösung der Tunnel-Innenverkleidung), als auch für Tunnel-Innenkonstruktionen (Zwischendecken, etc.) anwendbar.

3.2.3 Radar (Ground Penetration Radar)

Beim Radar-Verfahren werden, ähnlich wie beim Ultraschall-Verfahren, zumindest ein Sender und ein oder mehrere Empfänger benötigt. Die Prüfung erfolgt mit elektro-magnetischen Wellen im Frequenzbereich von 20 – 2500 MHz [26], wovon die Eindringtiefe und die erreichbare Auflösung abhängen: Je höher die Frequenz (und damit je niedriger die Wellenlänge), desto geringer ist die Eindringtiefe. Das gesendete Signal wird innerhalb der Tunnelwand durch die unterschiedlichsten Materialien (Beton, Lufteinschlüsse, Hohlräume, Stahl, Wasser, etc.) beeinflusst. Hierbei sind die Leitfähigkeit und die Dielektrizitätskonstante der Materialien die Kontrast gebenden Eigenschaften.

Je nach Aufbau der Antennen spricht man von Luft- oder Boden-gekoppeltem GPR [27]:

a) Luft-gekoppeltes GPR

Bei Luft-gekoppeltem GPR verwendet man zumeist Horn-Antennen und hat einen größeren Abstand zum Prüf-Objekt. Diese Messmethode liefert weniger Tiefeninformation, dafür kann man oberflächlich Aussagen über Risse, (Luft und Wasser gefüllte) Einschlüsse oder

Ablösungen der Tunnel-Oberfläche machen. Diese Messungen liefern Hinweise auf Bereiche, wo Messungen mit mehr Tiefeninformation von Nöten sind [27].

b) Boden-gekoppeltes GPR

Beim Boden-gekoppeltem GPR ist man mit dem Sender und den Antennen sehr nah an der Oberfläche, wodurch man auch mehr Tiefeninformation vom Prüfling erhält. Bei der Verwendung von mehreren Antennen ist es möglich mit geeigneter Software eine 3D-Rekonstruktion des Tunnels durchzuführen [24]. Zur Erhöhung der Auflösung ist es von Vorteil, wenn Probekörper vom verwendeten Material (Bohrkerne oder Materialproben von der Errichtung) vorliegen [27].

Beide GPR-Verfahren haben großes Potential zur Automatisierung und werden zum Großteil schon so eingesetzt [28]–[30].



Abbildung 4: Boden-gekoppeltes Radar zur Messung der Tunnelwand [40]

3.2.4 Infrarot-Verfahren (IR)

Die Thermographie ist eine wirksame Messmethode, um Störungen im Wärmefluss aufzuzeigen. Durch thermisch wechselnde Umgebungen (Tag-Nacht-Wechsel oder durch aktive Aufheizung) der Tunnel-Oberfläche wird der Wärmefluss im Beton verändert, was sich in unterschiedlichen Oberflächen-Temperaturen niederschlägt. Risse, Beton-Abplatzungen, Wasser- und Luft-Einschlüsse verändern den Wärmefluss sehr lokal, wodurch sich an der Oberfläche die Temperatur verändert [26]. Da nur Aussagen über die Oberfläche gemacht werden können zeigt diese Messmethode, wo in die Tiefe gehende Messungen von Nöten sind [26].

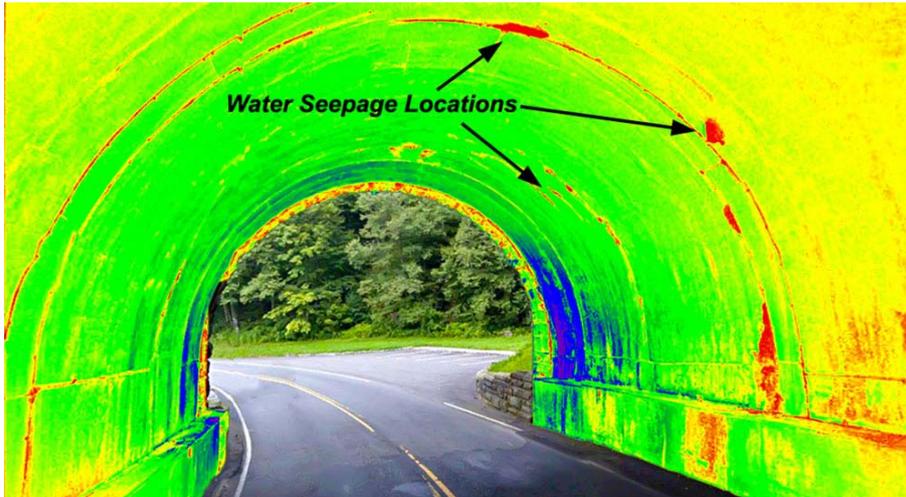


Abbildung 5: Infrarot-Aufnahme eines Tunnelportals [41]

3.2.5 3D-Laserscanner

Im Zuge von Tunnelprüfungen werden Tunnelscanner zur vollflächigen und zerstörungsfreien Dokumentation der Innenschale verwendet. Mittels Laserscanner wird dabei die 3D-Geometrie des Tunnels vollflächig erfasst.

Bei einem schnell um die Tunnel-Achse rotierenden Laser werden die Reflexionen an der Tunneloberfläche gemessen. Dadurch erhält man hochaufgelöste Bilder der Oberfläche der Tunnelinnenschale, die hinsichtlich Risse, Abplatzungen und sonstiger auf der Oberfläche sichtbaren Anomalien ausgewertet werden können [24].

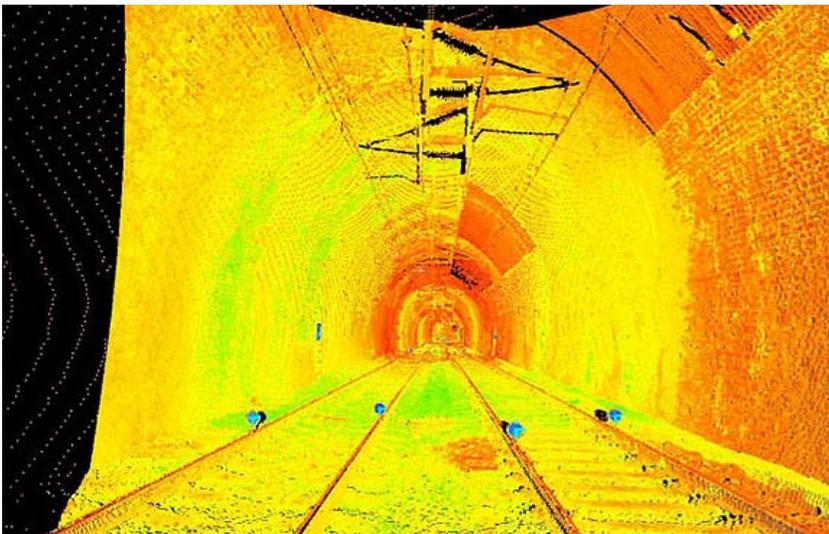


Abbildung 6: 3D-Aufnahme eines Eisenbahntunnels [42]

Durch die Kombination des Laserscanners mit hochauflösenden Digitalkameras ist zusätzlich eine vollständige, farbechte Foto-Dokumentation zur Inspektion des Tunnels gegeben. Schäden wie Risse und Abplatzungen können im 3D-Modell als digitale Objekte erfasst

werden. Die Objektdatenbank umfasst für jedes Objekt weitere Informationen und Attribute, wie z.B. 3D-Koordinaten, Längen- und Flächenangaben, Begehungsbilder oder Schadensreporte.

Bei Folgemessungen kann mittels Laserscanner ein geometrischer Vergleich zur Erstmessung erfolgen. Für einen optischen Vergleich, z.B. um Veränderungen von Schadstellen über die Zeit zu dokumentieren, können neue Fotos auf die ursprüngliche Lasergeometrie gelegt werden.



Abbildung 7: Vergleich 3D-Modell der Null-messung mit der Folgemessung



Abbildung 8: Fototexturiertes 3D-Modell eines Straßentunnels mit erfassten Objekten

3.2.6 Elektro-Statistisches Verfahren

Bei diesem Verfahren werden mehrere Elektroden an die Tunnelwand fixiert und man misst entweder die elektrischen Widerstände oder die Potentiale der Elektroden untereinander [24]. Während ersteres auf Fehler im Material (z.B. Risse oder Wassereinschlüsse) hindeutet, kann die Potentialanalyse auch Rückschlüsse auf die Korrosion von Stahl liefern [28], [31].

3.2.7 Elektro-Magnetische Verfahren

Die Verteilung des magnetischen Flusses wird durch die Präsenz von (magnetischem) Stahl verzerrt, was relativ einfach messbar ist [32], [33]. Durch dieses magnetische Streuflussverfahren ist zwar keine direkte Aussage über eine Tunnel-Schädigung möglich, allerdings kann man damit die Position der Stahlbewehrung innerhalb des Stahlbetons genau detektieren, was für die Korrosions-Kontrolle immens wichtig ist.

An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass dies nur ein kleiner Überblick über die gängigsten Messverfahren im Tunnelbau-Bereich darstellt und es sehr wohl noch weitere Verfahren gibt und diese auch konstant weiterentwickelt werden, allerdings noch keine breite Anwendung finden. Hier sei als Beispiel die Terahertz-Spektroskopie erwähnt, die

Vielversprechendes (Berührungslose Messung der Stahlkorrosion in Stahlbeton) liefern kann, aber derzeit noch in der Labor-Erprobungsphase steckt [34].

3.3 Geophysikalischen Messverfahren zur Hohlraumdetektion

Als zumeist eingesetzte geophysikalische Verfahren zur Hohlraumdetektion werden derzeit seit einigen Jahren vor allem das Ground Penetration Radar eingesetzt, wobei hier auf Grund der einfachen Montage auf ein (Mess-)Fahrzeug und der Unabhängigkeit der Messantenne von Oberflächenrauigkeiten bzw. „kleineren Hindernissen“ auf Grund des sich ergebenden Abstandes der Vorzug gegeben wird [60]. Der Nachteil gegenüber bodengestütztem GPR liegt in der Tatsache, dass zumeist keine Aufzeichnung über den Abstand der Antenne zur Messoberfläche vorliegt und ein konstanter Abstand zumeist nicht gut einhaltbar ist; dieser Abstand ist aber bei der Auswertung der Rohdaten entsprechend zu berücksichtigen und bewirkt entsprechende Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Tiefenlage entsprechender Unstetigkeiten bzw. Anomalien.

Ultraschall-Verfahren, Impact-Echo Verfahren oder PSPA werden derzeit hauptsächlich im Forschungsbereich eingesetzt und weisen gegenüber den GPR-Methoden vor allem im notwendigen Zeit- und Personalaufwand große Nachteile auf. Gemäß [61] eignen sie sich daher nur für die Zusatzüberprüfung lokaler Verdachtsstellen.

4 VERFAHREN ZUR ZUSTANDBEWERTUNG – CURRENT PRACTICE & STATE-OF-THE-ART

4.1 ASFINAG

Als Errichter, Betreiber und Erhaltungsverpflichteter von Bundesstraßen sind im Wirkungsbereich der ASFINAG die Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV) verbindlich anzuwenden. Die RVS 13.03.31 [2] regelt dabei die laufende Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Straßentunnel. Von dieser RVS sind nur die baulich-konstruktiven Teile des Tunnels und der zugehörigen baulichen Anlagen, in gesamtheitlicher Betrachtung mit den Einwirkungen auf das Bauwerk erfasst. Sie dient der bautechnischen Überwachung in Hinblick auf die Zuverlässigkeit (Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit) und Verkehrssicherheit.

Im Sinne der Zustandsüberwachung werden folgende drei Stufen definiert:

1.) Laufende Überwachung

- Inhalt: Ziel ist die Feststellung der Funktionstüchtigkeit und der Verkehrssicherheit.
- Frequenz: im Rahmen des laufenden Streckendienstes, zumindest alle 4 Monate.
- Methode und Umfang: Nur Sichtprüfung des Verkehrsraumes auf Auffälligkeiten, die durch eine einfache Befahrung vom Fahrzeug aus erkennbar sind.
- Durchführung: Mitarbeiter des Streckendienstes.
- Ergebnis: Keine Berichte oder Aufzeichnungen, lediglich schriftliche Meldungen bei Auffälligkeiten an den Erhaltungsverpflichteten und Veranlassung der Beseitigung von Beeinträchtigungen der Verkehrssicherheit.

2.) Kontrolle

- Inhalt: Feststellung, Dokumentation und Beurteilung des Erhaltungszustandes im Vergleich zur vorhergehenden Kontrolle oder Prüfung.
- Frequenz: Zumindest alle 2 Jahre sowie nach außergewöhnlichen Ereignissen (z.B. Brand, Erdbeben)
- Methode und Umfang: Visuelle Kontrolle ohne Verwendung besonderer Geräte und Rüstungen, ggf. allfällige ergänzende Prüfungen oder Messungen gemäß

vorangegangen festgelegten Prüfanweisungen. Die Kontrolle umfasst neben dem Verkehrsraum auch alle anderen zugehörigen baulichen Anlagen wie z.B. Querschläge.

- Durchführung: Sachkundige Ingenieure, geschultes bzw. erfahrenes Fachpersonal (in der Regel betriebseigenes Personal der ASFINAG).
- Ergebnis: Dokumentation von Mängel, Schäden oder auffälligen Veränderungen, gegliedert in definierte Bauteilgruppen; Befund mit Beurteilung des Zustandes verglichen mit dem Vorbefund, Benutzbarkeit, ggf. Veranlassung einer Prüfung. Die Ergebnisse wurden bislang in der Bauwerksdatenbank BAUT erfasst.

Die RVS 13.03.31 sieht für die Kontrolle nicht explizit die Bewertung anhand eines Bewertungssystems vor. In der Praxis werden aber Noten für Bauteile und Gesamtbauwerk analog der Prüfung vergeben.

3.) Prüfung

- Inhalt: Feststellung, Dokumentation und Bewertung des Erhaltungszustandes
- Frequenz: Zumindest alle 12 Jahre
- Methode und Umfang: Handnahe visuelle Prüfung der Tunnelleibung (in der Regel mit Steighilfe/Hebebühne) zur Erfassung aller sichtbaren Schäden wie Risse, Abplatzungen, Wasserzutritte u.dgl. Prüfung aller baulichen Komponenten (Fahrrohre, Querschläge, Nebenanlagen). Zusätzliche Prüfung wie z.B. Chloridgehalt oder Kernbohrungen.
- Durchführung: Leitung durch sachkundigen Ingenieur, in der Regel durch externe Dienstleister (Ziviltechniker)
- Ergebnis: Durchgängige Dokumentation und Befund mit Beurteilung gem. Notenschema der RVS 13.03.31 [2]. Für jede Bauteilgruppe wird eine Note gem. RVS-Bewertungsschema vergeben. Die Einstufung erfolgt anhand einer verbalen Umschreibung der Noten in der RVS (Verkehrssicherheit, Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit etc.). Die tatsächliche Einstufung basiert auf der subjektiven Einschätzung des Prüfers und nicht auf objektivierbaren Eingangsdaten aus der Schadenserhebung.

4.2 ÖBB

Für die Zustandserfassung und -bewertung wurde innerhalb der ÖBB die Richtlinie 06.01.02 „Instandhaltungsplan, Konstruktiver Ingenieurbau“ [43] eingeführt. Das Regelwerk ist auf alle konstruktiven Ingenieurbauwerke anzuwenden, d.h. neben Tunnel sind auch Brücken, Bahnsteigüberdachungen oder größere Durchlässe betroffen. Zielsetzung ist in erster Linie die verkehrs- und betriebssichere Verfügbarkeit von dauerhaften und standsicheren Anlagen. Sie regelt die periodische Prüfung zur Zustandsbeurteilung und zur Sicherung der Funktionssicherheit der Anlage. Die periodische Prüfung erfolgt dabei in zwei Stufen:

1.) Allgemeine Streckenaufsicht

Diese erfolgt in der Regel durch den Bahnmeister in Form von zweimonatlichen Befahrungen und eine jährliche Begehung.

- Inhalt: Feststellung der Freihaltung des Lichtraumes, der augenscheinlichen Funktionstüchtigkeit von Absicherungen, Entwässerungen, Zugänge sowie Identifizierung von Auffälligkeiten.
- Frequenz: Zweimonatliche Befahrung sowie jährliche Begehung
- Methode und Umfang: Sichtprüfung des Verkehrsraumes hinsichtlich Auffälligkeiten, die durch einfache Befahrung und die Begehung vom Gleisniveau aus erkennbar sind.
- Durchführung: In der Regel durch den Bahnmeister
- Ergebnis: Keine Berichte oder Aufzeichnungen, sondern lediglich schriftliche Meldungen bei Auffälligkeiten oder Gefährdungen des Eisenbahnbetriebes an die Regionalleitung.

2.) Inspektion (Untersuchung und Begutachtung)

- Inhalt: Untersuchung mit Schadenserfassung, Feststellung und Dokumentation der Veränderung des Erhaltungszustandes hinsichtlich Verkehrs- und Betriebssicherheit, Standsicherheit und Dauerhaftigkeit; anschließende erfolgt die Begutachtung ggf. unter Verwendung der vorhandenen Bestandsunterlagen.
- Frequenz: Zumindest alle 4 Jahre bei alten Tunneln (vor 1980) bzw. alle 6 Jahre bei neuen Tunnel (ab 1980). Sonderinspektionen nach außergewöhnlichen Ereignissen oder bei auffälligen Bauwerksverhalten.

- Methode und Umfang: Visuelle Kontrolle unter Einsatz geeigneter technischer Geräte und Hilfsmittel (z.B. Tunneluntersuchungsfahrzeug (TUV)). Die Richtlinie sieht optional auch die Aufnahme der Tunnellaibungsfläche mittels Tunnelscanner vor, was von den ÖBB seit einigen Jahren systematisch durchgeführt wird. Die Kontrolle umfasst neben dem Verkehrsraum auch alle anderen zugehörigen baulichen Anlagen wie z.B. Querschläge. Verkleidungen, welche die Sicht auf die dahinterliegenden tragenden Bauteile verhindern, werden für die Inspektion entfernt. Entwässerungsanlagen werden bedarfsweise kamerabefahren und im Zuge der Untersuchung such gewartet.
- Durchführung: Gemeinsam durch Brückenmeister und Bauwerksprüfer (sachkundiger und qualifizierter Ingenieur), in der Regel betriebseigenes Personal der ÖBB.
- Ergebnis: Dokumentation von Mängeln, Schäden oder auffälligen Veränderungen. Befunderstellung mit Zustandsbewertung anhand eines verbalen Bewertungsschemas in den 5 Zustandsklassen der Richtlinie. Jede Klasse kann zusätzlich mit dem Index „S“ zwecks Priorisierung der Mängelbehebung versehen werden.

Die tatsächliche Einstufung der identifizierten Mängel basiert auf einer subjektiven Einschätzung des Prüfers und nicht anhand der objektiven Eingangsdaten der Schadenserhebung.

In Ergänzung zur ÖBB-Richtlinie 06.01.02 werden als Hilfsmittel für die Zustandsbewertung des Tunnelbauwerks meist auch die einzelnen Gewölberinge (Blöcke) auf einer Bewertungsskala (A-E) benotet. Diese Bewertungsskala orientiert sich an den Zustandsklassen. Die Zustandsnote des Bauwerks ergibt sich vom "schlechtesten Ring" und wird in der Bauwerksdatenbank "KISTE" dokumentiert.

4.3 Erhebung internationaler Erfahrungsgrundlagen

AIT und ILF sind Teil eines umfangreichen Netzwerks von Forschungsinstitutionen und Verkehrsnetzbetreibern (FEHRL, FSV, ETSC, ERTRAC, IRTAD/OECD, PIARC etc.). Im Rahmen einer Online-Umfrage wurde bei den Partnern nachgefragt, inwieweit neuartige Bewertungsverfahren und probabilistische Entscheidungsmodelle im Instandsetzungsmanagement bereits verwendet werden bzw. im Zuge von Decision Support Systemen (DSS) in das Instandhaltungsmanagement Eingang gefunden haben.

Die internationale Befragung fand vom 17.01.2017 – 24.02.2017 statt und wurde mittels SurveyMonkey (Software zur Durchführung von Online-Umfragen) durchgeführt. Um die Rücklaufquote zu erhöhen, wurde der Fragenkatalog sowohl in deutscher als auch englischer Sprache ausgearbeitet.

Es wurden insgesamt 79 Personen im Bereich Tunnel Asset Management sowie Tunnelsicherheit in 20 Ländern (Europa, Asien, Amerika) angeschrieben (siehe Anhang).

Von den retournierten 46 Fragebögen waren 23 (50%) vollständig ausgefüllt und wurden für die Analyse des Current Practice herangezogen (siehe Abbildung 9). An dieser Stelle sei jedoch erwähnt, dass es sich hierbei keinesfalls um eine repräsentative Stichprobe handelt – Zielsetzung der Befragung war es vielmehr, internationale Trends aufzuzeigen und bestehende Übereinstimmungen mit nationalen Richtlinien und Vorschriften zu verdeutlichen.

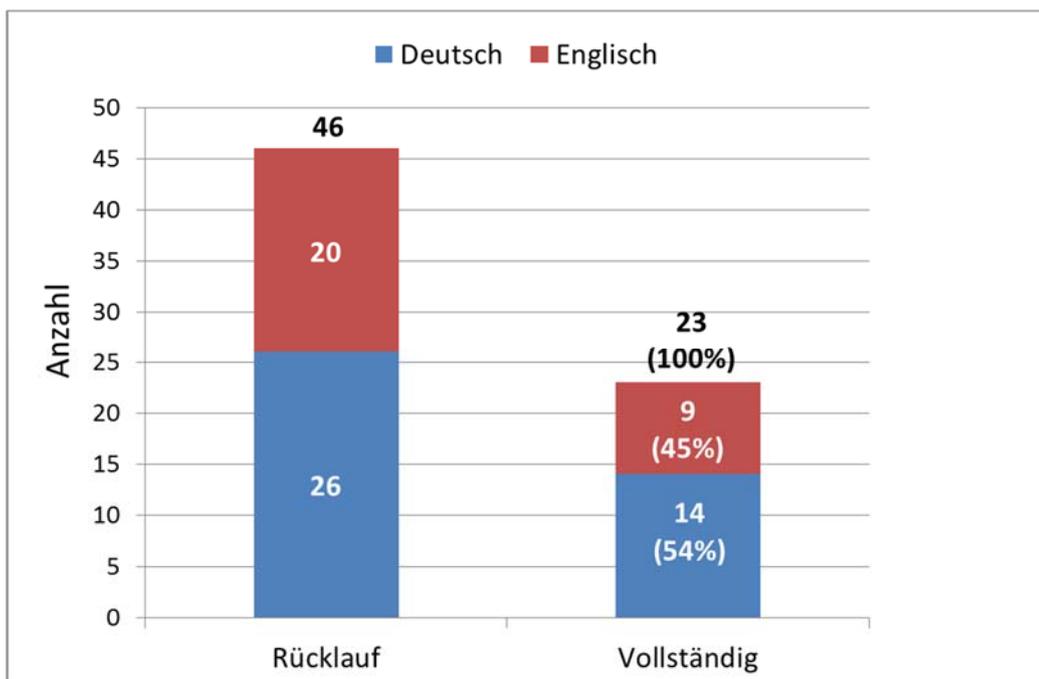


Abbildung 9: Rücklaufquote der internationalen Befragung mittels SurveyMonkey

Wie man Abbildung 10 entnehmen kann, entstammt der Großteil der vollständig ausgefüllten Antworten österreichischen Bundesländern sowie nationalen Stakeholdern. Insgesamt acht Fragebögen wurden von diversen Landesregierungen (Kärnten, Steiermark, Tirol, Vorarlberg) sowie heimischen Infrastrukturträgern (ASFINAG, ÖBB, Wiener Linien) retourniert. Aus dem deutschsprachigen Ausland stammen insgesamt sieben Rückmeldungen. Drei vollständig ausgefüllte Fragebögen aus Deutschland (Bundesanstalt für Straßenwesen, Bundesministerium für Verkehr und digitale Sicherheit, Deutsche Bahn) und vier Antworten aus der Schweiz (Amberg Group, Amstein + Walthert, IMC Infrastructure Management Consultant und die SBB). Das restliche Feedback war allesamt in englischer Sprache und entstammte dem europäischen Festland (Slowenien, Portugal, Schweden, Italien) sowie aus Übersee (USA, UK, Australien und Neuseeland).

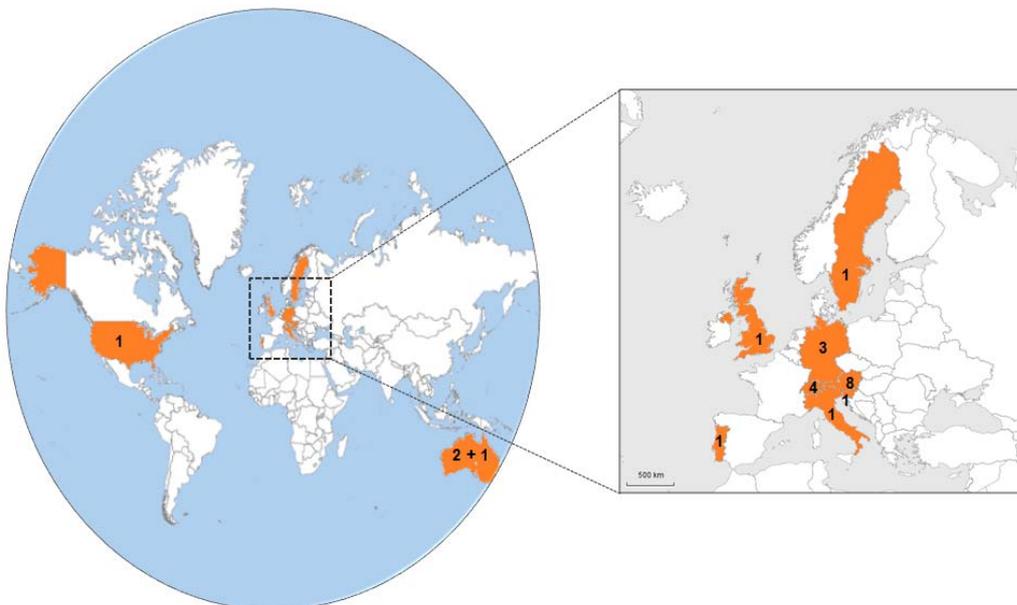


Abbildung 10: Überblick der im Detail untersuchten Länder sowie Anzahl der retournierten (vollständigen) Fragebögen (Zahlenwerte)

In den untersuchten Ländern wurde unter anderem abgefragt, auf welcher (Rechts-)Basis die Zustandsbewertung von Tunnel erfolgt (Fragenkatalog: siehe Anhang). Folgende Antwortmöglichkeiten standen dabei zur Auswahl:

- **Internationale** Richtlinien/technische Standards/Normen
- **Nationale** Richtlinien/technische Standards/Normen
- **Interne** Dokumente/Arbeitspapiere/Handbücher
- **Informelles** Wissen/traditionelle Methoden

Wie man Abbildung 11 entnehmen kann, existieren in 10 der 11 untersuchten Länder zumindest (unternehmens-)interne Dokumente (Arbeitspapiere/Handbücher etc.), welche das Tunnel Asset Management detailliert regeln. Lediglich in Neuseeland wurden seitens der Infrastrukturbetreiber keine eigenen Richtlinien/Handlungsanweisungen erlassen; man verlässt sich diesbezüglich vielmehr auf bestehende nationale/internationale Regelwerke und Normen.

Die Legislative bzw. Ausschusstätigkeit im Rahmen nationaler Gremien spielt in den meisten der untersuchten Ländern (8/11) eine zentrale Rolle für die Zustandsbewertung von Tunnel. Die Analyse der abgegebenen Antworten zeigt auf, dass lediglich in Portugal, Slowenien und den USA keine entsprechenden nationalen Richtlinien/Normen existieren.

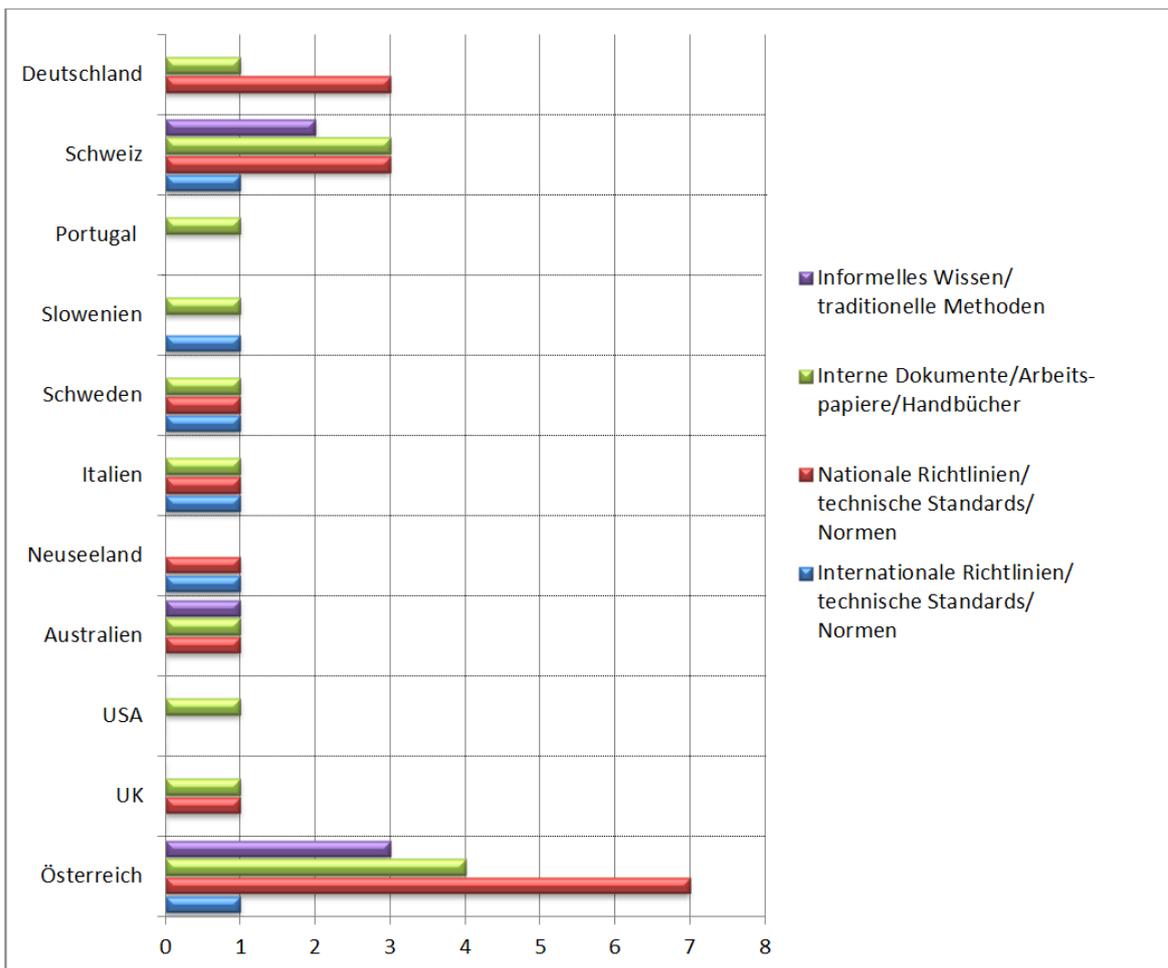


Abbildung 11: Art der Regelung in Bezug auf das Tunnel Asset Management nach Ländern

Es entsteht vielmehr der Eindruck, dass der Regulierungsgrad in Bezug auf Tunnelbauwerke stark mit der Bedeutung des Tunnelbaus im jeweiligen Land korreliert. So gelangen in Staaten mit bedeutender Tunnelbautätigkeit wie z.B. Österreich, Schweiz, Italien, und

Schweden auch eine Vielzahl unterschiedlichen Regelwerken (international, national, Intern) zur Anwendung.

Die nachstehende Tabelle 4 gibt einen Überblick über die in den einzelnen Ländern relevanten Normen und Regelwerke, die im Rahmen der Zustandsbewertung von Tunnel Anwendung finden.

Tabelle 4: Überblick über die wichtigsten Normen und Regelwerke zum Zwecke der Zustandsbewertung von Tunnel

Land	Informelles Wissen/ traditionelle Methoden	Interne Dokumente/ Arbeitspapiere/ Handbücher	Nationale Richtlinien/ technische Standards/Normen	Internationale Richtlinien/ technische Standards/ Normen
Österreich	√	ÖBB Regelwerk 06.01.02 Instandhaltungsplan konstruktiver Ingenieurbau	RVS 13.03.31 RVS 13.03.11 RVS 13.03.41	EU Directive 98/34/EC; UIC-Schadens-katalog
Deutschland		√	RIL 853 DIN 1076, RI-ERH-ING (mit RI-EBW-PRÜF, OSA, RI-WI-BRÜ, RI-ERH-KOR), M-KWPT	
Schweiz	Interne Richtlinien	Fachhandbuch	VSS-Normen; KUBA 5.0 Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel; Norm SIA	√
Portugal		√		
Slowenien				√
Schweden		√	Swedish transport administration publikation 2001:087	√
Italien		√	Decreto 28 ottobre 2015; Decreto 21 ottobre 2015	EU Directive 2004/54/EC
UK		√	BD78/99; BA72/03; 2007/9; BD53	
USA		NTIS		
Australien	√	√	√	
Neuseeland			NZTA S8 Tunnels management and inspection policy; NZ Transport Agency Guide to road tunnels; Austroads Guide to road tunnels	√

Frage 7 des „Questionnaire“ geht der Frage nach, wofür die erhobenen Zustandsdaten in erster Linie verwendet werden.

Zur Auswahl standen folgende Antwortmöglichkeiten:

- Erfüllung gesetzlicher Erfordernisse/Regulierungen
- Planung von Erhaltungsmaßnahmen/Erhaltungsstrategien
- Entwicklung von Alterungsmodellen
- Andere (inkl. Erläuterung)

In 10 von 11 Ländern werden Tunnelzustandsdaten im Rahmen des betrieblichen Erhaltungsmanagements eingesetzt (siehe [Abbildung 12](#)). In vielen Fällen müssen derartige Informationen jedoch auch aufgrund von gesetzlichen Erfordernissen erhoben werden (7/11 Ländern). Es zeigt sich ferner, dass die Entwicklung und Kalibrierung (tunnel-) spezifischer Alterungsmodelle bislang nur in eingeschränktem Maße Anwendung findet. Lediglich in Deutschland, der Schweiz und UK wird ein derartiger Ansatz (seit längerem) verfolgt. In Österreich bestehen zumindest erste Tendenzen/Interessensbekundungen, tunnelspezifische Alterungsmodelle im Rahmen des Asset Management zu entwickeln.

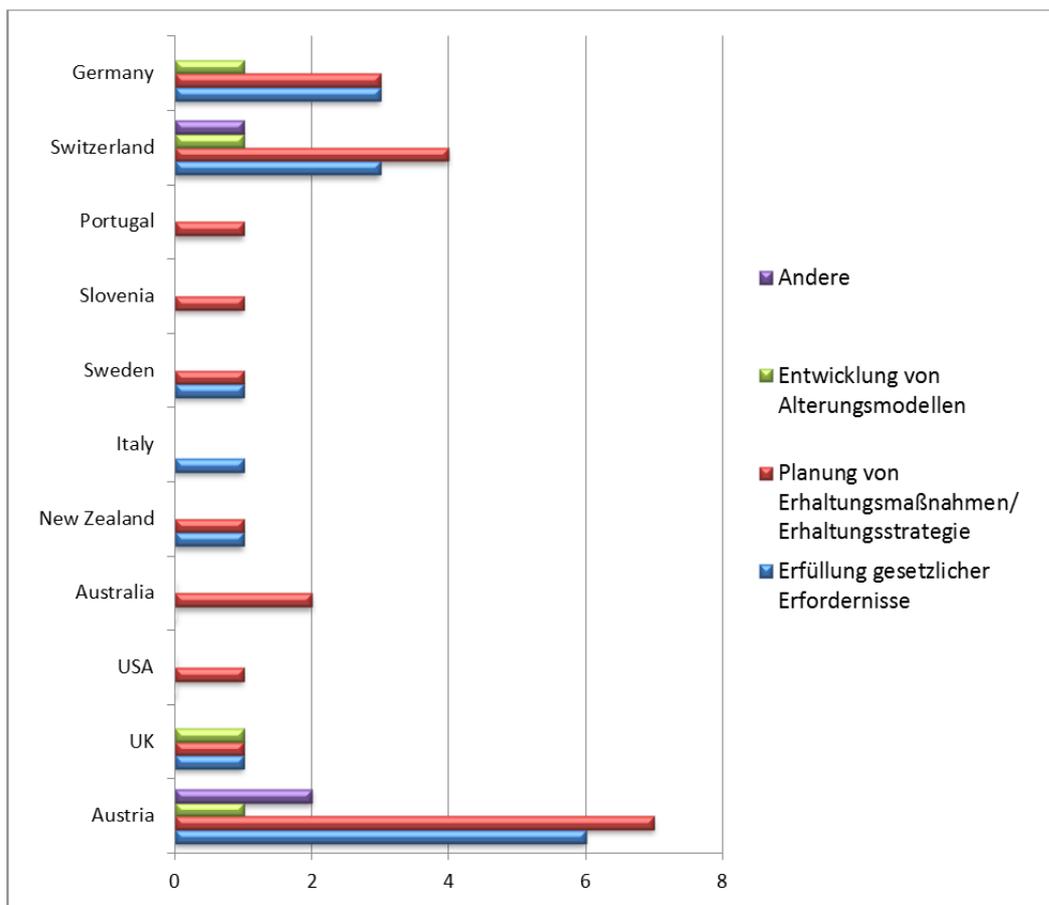


Abbildung 12: Verwendungszweck von Tunnelzustandsdaten nach Ländern

In Deutschland werden am Einzelobjekt anlassbezogenen Alterungsmodelle auf Baustoffebenen (z.B. Chlorideindringung) verwendet.

In der Schweiz sind bei den SBB einfache generische Alterungsmodelle für Tunnelbauwerke in Entwicklung.

Im Vereinigten Königreich werden Alterungsmodelle, welche jedoch nicht spezifisch für Tunnelbauten entwickelt wurden, mitunter für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen über die Restlebensdauer herangezogen. Die Analyse der Antworten auf Frage 9 gibt einen Einblick in die Zufriedenheit der Befragten mit den derzeit existierenden Regelungen. Wie man Abbildung 13 entnehmen kann, sieht mehr als die Hälfte der Fachexperten einen (hohen) Verbesserungsbedarf in Bezug auf „finanzielle Ressourcenausstattung“, „(Inter-) Nationale Regelwerke“ sowie „Datenverfügbarkeit“. Ein „User“ aus Österreich erachtet diesbezüglich das Problem nicht so sehr in der reinen Datenerfassung, als vielmehr in der „Automatisierbarkeit der Auswertungen“.

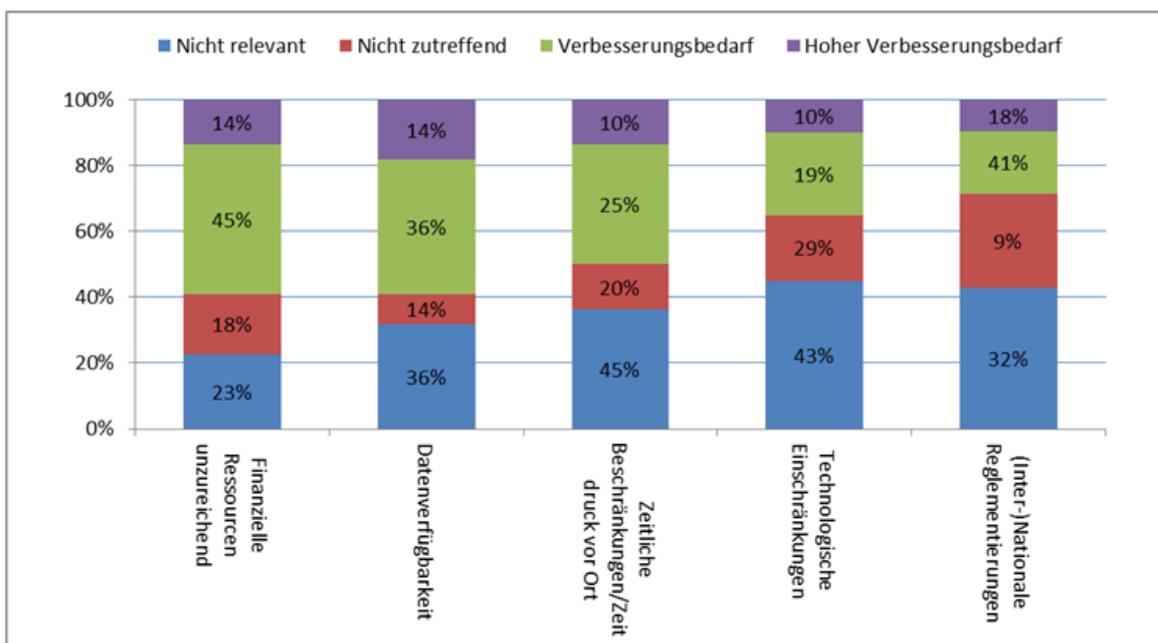


Abbildung 13: Beurteilung des Verbesserungsbedarfs bez. verschiedener tunnelspezifischer Aspekte

Ein Großteil der Tunnelexperten (insbesondere der Österreichischen) ist der Meinung, dass die derzeit aktuellen Richtlinien/Normen ausreichend spezifiziert sind (siehe Abbildung 14). Große Skepsis bez. der Regelwerke herrscht hingegen in der Schweiz (3 negative/1 positive Antwort), Schweden (1/0), Slowenien (1/0), Australien (2/0) und dem Vereinigten Königreich (1/0).

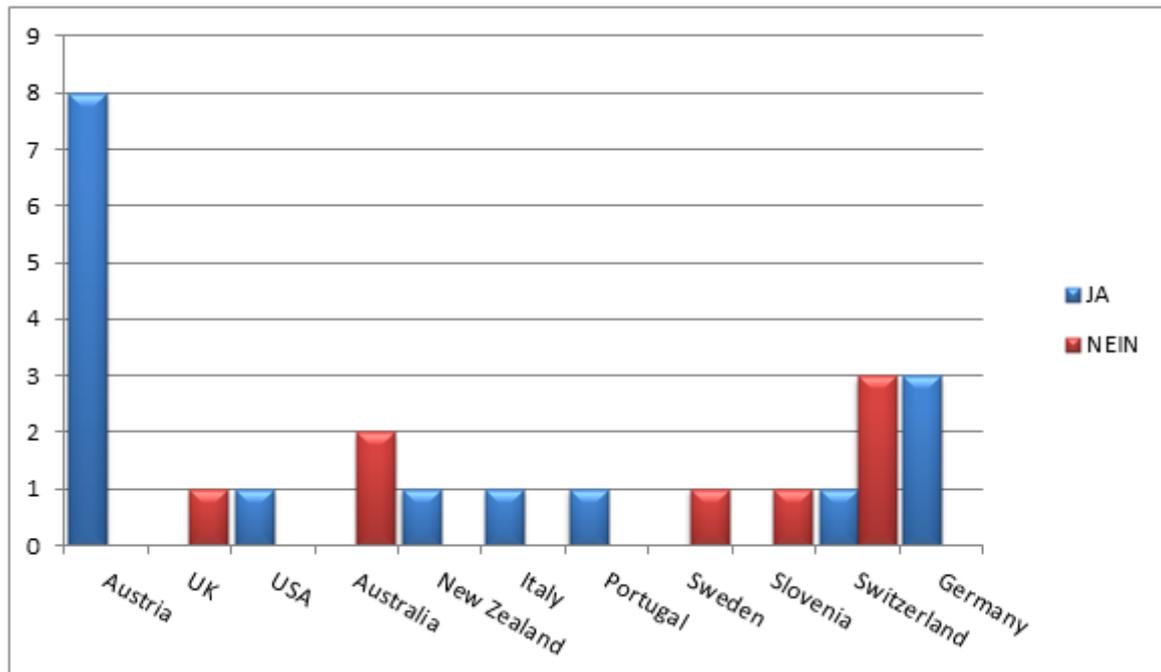


Abbildung 14: Antworten bez. der Fragestellung, ob die aktuellen nationalen Richtlinien/ Normen ausreichend sind

Geht man den Gründen für deren Unzufriedenheit (siehe [Abbildung 15](#): nach, ergibt sich ein relativ eindeutiges Bild. Der überwiegende Teil der negativen Antworten (5 Responses) bezieht sich auf die hohe Subjektivität der bestehenden Prozedere der Tunnelzustandsbewertung und der damit einhergehenden schlechten Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Die österreichische RVS 13.03.31 [2] sieht zwar ein einheitliches Notensystem vor, die Einstufung ist jedoch sehr allgemein gehalten und lässt den einzelnen Prüfengeieuren großen Freiraum an Interpretation. Es bestehen ferner Regelwerke, welche für einzelne Schadensbilder Schwell- und Grenzwerte definieren. Anders als jedoch zum Beispiel im Bereich des Pavement Managements, wo aus objektive Messdaten unmittelbar und nachvollziehbar Zustandswerte und Zustandsklassen abzuleiten sind (vgl. RVS 13.01.16) [22], erfolgt in der bestehenden RVS 13.03.31 eine Einordnung von Bauteilen und des Gesamtbauwerks anhand global formulierter funktionaler Kriterien. Ein einheitlicher Algorithmus zur Ableitung der Gesamtnote des Bauwerks beispielsweise aus den einzelnen Bauteilnoten wird nicht vorgegeben.

Es wird auch angeführt, dass die bestehenden Richtlinien/Normen oft zu generell sind, was eine objektive Bewertung meist stark einschränkt.

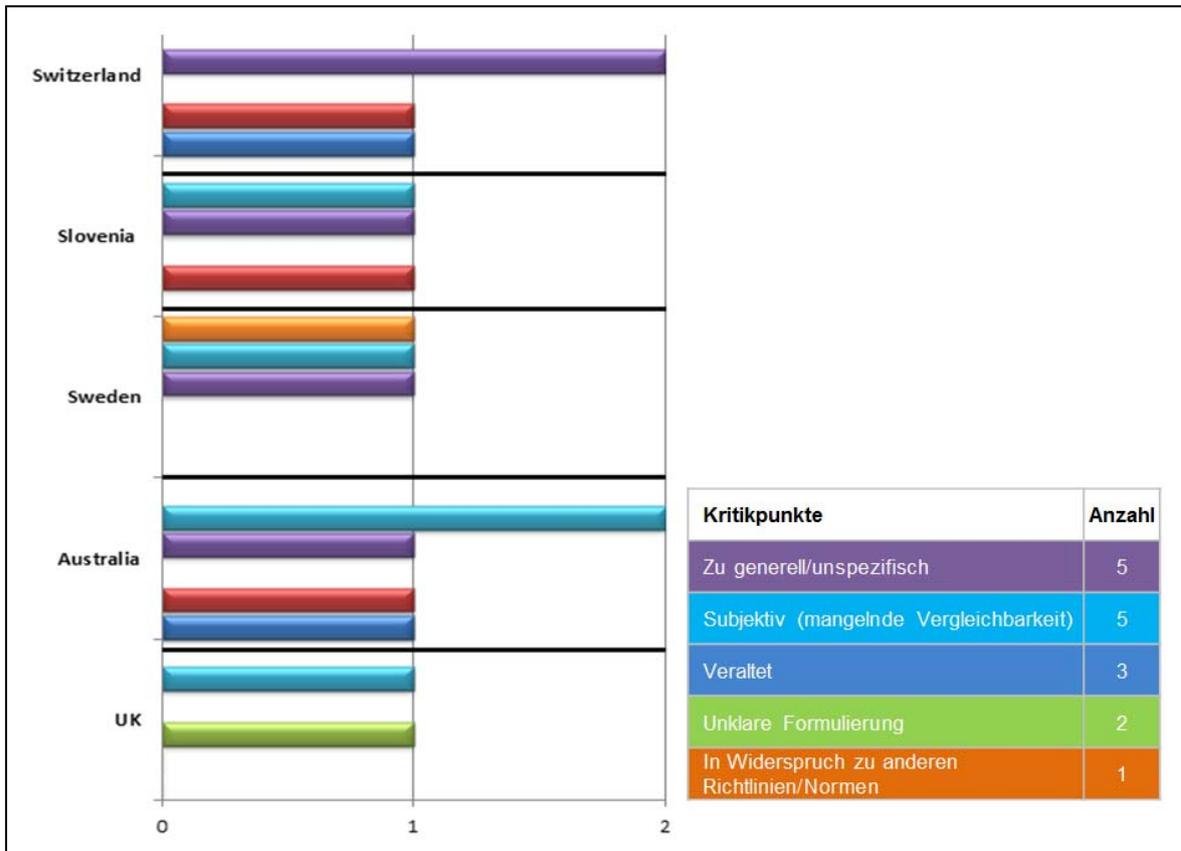


Abbildung 15: Gründe für unzureichende Normen und Regelwerke

4.4 Analyse bestehender nationaler/internationaler Normen

4.4.1 Deutschland

4.4.1.1 Straße

In Deutschland werden die für den Bau, den Betrieb und Instandhaltung der Straßeninfrastruktur verantwortlichen Organisationen als „Baulastträger“ bezeichnet. Diese sind in der Regel Bund, Länder und Gemeinden. Die Prüfung und Überwachung von Ingenieurbauwerken (darunter auch Tunnel) ist in der DIN 1076 [1] geregelt. Weiterführende Regelungen zwecks einer einheitlichen Erfassung, Aufzeichnung/Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen sowie deren Bewertung sind in der Richtlinie RI-EBW-PRÜF [6] enthalten.

Gemäß DIN 1076 wird nach den Prüfungsarten Hauptprüfung (H), einfache Prüfung (E), Prüfungen aus besonderen Anlass (S) und Prüfungen nach besonderen Vorschriften (V) unterschieden. Darüber hinaus sind alle Ingenieurbauwerke kontinuierlich zu überwachen. Zur Bauwerksüberwachung rechnet man die laufende Beobachtung (LB) und die Besichtigung (B).

Tabelle 5: Überblick über Inspektionsintervalle auf deutschen Straßen

Nr.	Art der Zustandsbewertung	Organisation	Inspektionsintervall	Erforderliche Qualifikation	Methode der Datengewinnung
1	Laufende Beobachtung (LB)	Internes Personal/ Mitarbeiter	2 x pro Jahr	Interne Schulung/ Training	Visuelle Inspektion
2	Kontrolle (Besichtigung, B)	Internes Personal/ Mitarbeiter	1 Jahr	Interne Schulung/ Training	Visuelle Inspektion
3	Kontrolle (Einfache Prüfung, E)	Internes Personal/ Mitarbeiter <u>oder</u> Subauftragnehmer/ Externe	3 Jahre	Anerkanntes Zertifikat**	Visuelle Inspektion
4	Prüfung (Hauptprüfung, H)	Internes Personal/ Mitarbeiter <u>oder</u> Subauftragnehmer/ Externe	6 Jahre	Anerkanntes Zertifikat**	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Laserscanner
5	Sonderprüfung (Prüfung aus besonderem Anlass, S)	Subauftragnehmer/ Externe	nach Bedarf*	Anerkanntes Zertifikat**	<ul style="list-style-type: none"> • Akustisch/ Ultraschall • Magnetisch • Stichprobenentnahme & Materialtestung

*Sonderprüfung nach speziellen Ereignissen (z.B. Brand)

**Grundlehrgang für Bauwerksprüfer mit Abschlussprüfung

Ad 1.) Laufende Beobachtung (LB)

- Inhalt: Ziel ist die Feststellung erheblicher bzw. die Stand- und Verkehrssicherheit gefährdende Mängel/Schäden
- Frequenz: Im Zuge der laufenden Streckenkontrolle, 2x jährlich sind alle Bauteile ohne besondere Hilfsmittel von Verkehrsebene und Geländeniveau auf offensichtliche Mängel/Schäden zu beobachten
- Methode und Umfang: Sichtprüfung des Verkehrsraumes hinsichtlich Auffälligkeiten, die durch einfache Befahrung vom Fahrzeug aus erkennbar sind
- Durchführung: Sachkundige Personen
- Ergebnis: Protokollierung der Durchführung und Auffälligkeiten (erhebliche Mängel/Schäden)

Ad 2.) Besichtigung (B)

- Inhalt: Feststellung von außergewöhnlichen Veränderungen am Bauwerk und offensichtlichen erheblichen Mängeln oder Schäden

- Frequenz: Zumindest 1x jährlich (außer in Jahren einer Prüfung) und nach außergewöhnlichen Ereignissen (z.B. Brand, Erdbeben)
- Methode und Umfang: Visuelle Kontrolle ohne Verwendung besonderer Geräte (z.B. Besichtigungsfahrzeuge) und Rüstungen, auch von Nebenanlagen
- Durchführung: Sachkundige Personen
- Ergebnis: Protokollierung der Durchführung und Ergebnisse (Dokumentation von erheblichen und offensichtlichen Mängeln, Schäden oder auffälligen Veränderungen)

Ad 3.) Einfache Prüfung (E)

- Inhalt: Vergleich bzw. Überprüfung der Schäden aus der vorausgegangenen Prüfungen im dort definierten Ausmaß
- Frequenz: Alle 6 Jahre, alternierend mit Hauptprüfung (3 Jahre zeitversetzt)
- Methode und Umfang: Vergleichende erweiterte intensive Sichtprüfung (in der Regel ohne Steighilfe/Hebebühne) und Prüfung der in der vorangegangenen Hauptprüfung ausgewiesenen Schäden
- Durchführung: Leitung durch für Bauwerksprüfung zertifizierten Ingenieur, entweder durch Personal des Baulastträgers oder durch externe Dienstleister
- Ergebnis: Prüfbericht mit Schadensbeschreibung, -bewertung und sich daraus errechneter Zustandsnote des Bauwerks

Einzelschäden sind einem allgemeinen öffentlichen Schadenskatalog zuzuordnen, auf dessen Grundlage der Schaden hinsichtlich Standsicherheit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit nach einem fest vorgegebenen Schema bewertet wird. Über einen Berechnungsalgorithmus errechnet sich für die Bauteilgruppen und in weiterer Folge für das Bauwerk nach einem ebenfalls vorgegebenen Algorithmus eine Zustandsnote.

Ad 4.) Hauptprüfung (H)

- Inhalt: Vollflächige Erfassung und Bewertung von Mängel und Schäden in Hinblick auf Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit
- Frequenz: Alle 6 Jahre, alternierend mit einfacher Prüfung (3 Jahre zeitversetzt)
- Methode und Umfang: Handnahe visuelle Prüfung der Tunnelleibung (in der Regel mittels Steighilfe/Hebebühne) zwecks Erfassung der sichtbaren Schäden wie Risse, Abplatzungen, Wasserzutritte u.dgl. Prüfung aller baulichen Komponenten (Fahrröhre,

Querschläge, Nebenanlagen), Abklopfen, Rissbreitenmessung und ggf. zusätzliche Prüfung wie z.B. Betonfestigkeit, Chloridgehalt und Karbonatisierung.

Die RIL-EBW-PRÜF [6] beschreibt auch automatisierte visuelle Prüfverfahren, vor allem Tunnelscanner mit fotografischer und thermografischer Bildgebung und teilautomatisierter Schadenserkennung.

- Durchführung: Leitung durch für Bauwerksprüfung zertifizierten Ingenieur, entweder durch Personal des Baulastträgers oder durch externe Dienstleister
- Ergebnis: Prüfbericht mit Schadensbeschreibung, -bewertung und sich daraus errechneter Zustandsnote des Bauwerks. Schadensdokumentation ggf. ergänzt durch Fotos und Schadensskizzen (empfohlen).

Um Aufnahme und Bewertung der festgestellten Schäden zu vereinfachen und bundeseinheitlich zu gestalten, wurde im Jahr 1988 die „Richtlinien zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076“ (RI-EBW-PRÜF) eingeführt. Aufgrund der technischen Entwicklungen wurde die Richtlinie bereits mehrfach überarbeitet und Anfang des Jahres als Ausgabe 2017 [6] neu herausgegeben. Die Durchführung der Bauwerksprüfung erfolgt durch einen Bauwerksingenieur, wobei die erhobenen Schäden direkt am Bauwerk mittels Laptop/ Notebook eingegeben werden. Die aufgenommenen Schäden werden mit Ziffern zwischen 1 und 4 getrennt für die Aspekte „Standicherheit“, „Verkehrssicherheit“ und „Dauerhaftigkeit“ entsprechend den Definitionen zur Schadensbewertung nach RI-EBW-PRÜF eingestuft und gemäß der Anweisung Straßeninformationsdatenbank, Teilsystem Bauwerkdaten (ASB-ING) [7] verschlüsselt.

Zur weiteren Vereinheitlichung ist ein umfangreicher Beispielkatalog für typische Schäden und deren Bewertung erstellt worden, der als Anhang zur Neufassung der RI-EBW-PRÜF und im Programmsystem SIB-Bauwerke verfügbar ist. Hierbei handelt es sich um eine Eigenentwicklung der deutschen Straßenbauverwaltungen, welche der Erfassung von Bauwerks- und Zustandsinformationen dient (siehe Abbildung 16).

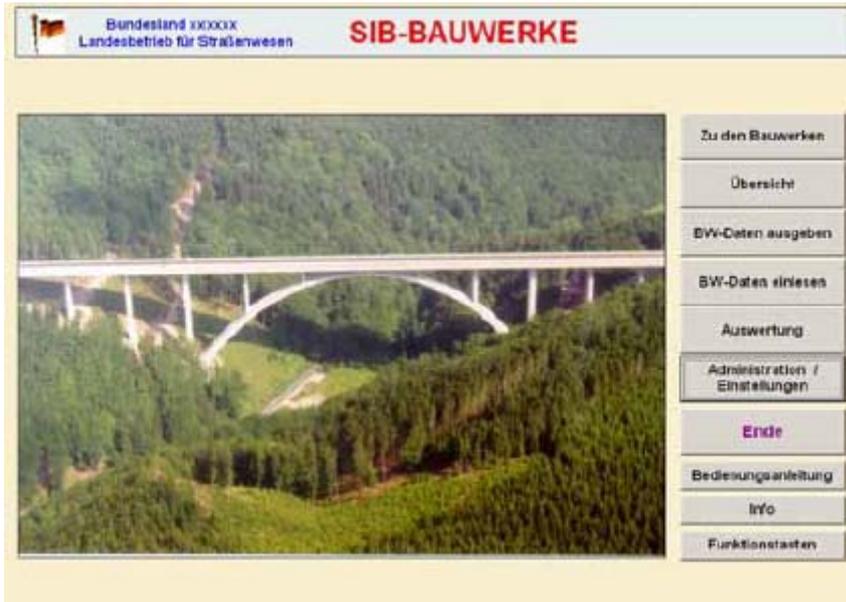


Abbildung 16: Programmsystem SIB-Bauwerke

Im Anschluss an die Schadensbewertung ermittelt das Programmsystem SIB-Bauwerke unter Berücksichtigung aller Einzelschadensbewertungen und der Aspekte „Schadensumfang“ und „Anzahl der Einzelschäden“ die Zustandsnote für das Teilbauwerk. Diese Berechnung erfolgt auf Grundlage eines festgelegten Algorithmus. Mit erfolgter Bewertung des Schadens gibt der Bauwerksprüfingenieur Empfehlungen zu den einzuleitenden Instandsetzungsmaßnahmen ab, die im Programmsystem SIB-Bauwerke für die weitere Auswertung und Planung innerhalb des BMS zu Verfügung stehen.

4.4.1.2 Schiene

Die Prüfung und Überwachung von Eisenbahntunneln ist in der Richtlinie RiL 853.8001 [12] der Deutschen Bahn (DB) geregelt. Alle im Eigentum der DB Netz AG befindliche bzw. an Dritte vermietete Tunnel sowie Tunnel an entwidmeten Strecken sind zur Wahrung der Allgemeinen Verkehrssicherungspflicht in regelmäßigen Intervallen zu überprüfen.

Weitere Regelungen zur Überwachung des Oberbaus sind in der Richtlinie RiL 821.2003 [13], Strecken- und Gleisbegehung, enthalten.

Am Schienennetz der Deutschen Bahn wird nach der Art der Inspektion unterschieden in Überwachung, Untersuchung, Begutachtung und Sonderinspektion (siehe Tabelle 6). Die Ergebnisse werden im EDV-System der DB eingetragen.

Tabelle 6: Überblick über Inspektionsintervalle am deutschen Schienennetz

Nr.	Art der Zustandsbewertung	Organisation	Inspektionsintervall	Erforderliche Qualifikation	Methode der Datengewinnung
1	Überwachung	Internes Personal/Mitarbeiter	≤ 1 Jahr	Externe Weiterbildung	Visuelle Inspektion
2	Untersuchung	Internes Personal/Mitarbeiter	≤ 1 Jahr	Universitätsabschluss	Nach Bedarf
3	Prüfung (Begutachtung)	Internes Personal/Mitarbeiter	3-6 Jahre	Universitätsabschluss, externe Weiterbildung	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Laserscanner
4	Sonderprüfung (Sonderinspektion)	Internes Personal/Mitarbeiter	Nach Bedarf	Universitätsabschluss, externe Weiterbildung	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Laserscanner • Stichprobenentnahme & Materialtestung

Ad 1.) Überwachung

- Inhalt: Feststellung offensichtlicher Mängel und Schäden hinsichtlich der Verkehrssicherheit und Standsicherheit im Rahmen einer Gleisbegehung
- Frequenz: Alle 2-6 Monate bei Hauptgleisen (in Abhängigkeit der planmäßigen Geschwindigkeit), zumindest jedoch 1x jährlich; Nebengleise 1x jährlich; stillgelegte Tunnel alle 3 Jahre
- Methode und Umfang: Sichtprüfung aller vom Gleisbereich aus einsehbaren Bauteile einschließlich der Notausgänge. Die Spurhaltefähigkeit, insbesondere von Holzschwellen, wird mittels Drehmomentschlüssel und/oder Gleiswiderstandsmessgerät geprüft
- Durchführung: Mitarbeiter mit Zusatzausbildung, Planung der Überwachung erfolgt durch den jeweiligen Anlagenverantwortlichen (Alv)
- Ergebnis: Dokumentation der festgestellten Unregelmäßigkeiten und Auffälligkeiten, Abweichungen vom SOLL-Zustand sowie zeitliche Entwicklung bereits identifizierter Schäden einschließlich der Beurteilung

Ad 2.) Untersuchung

- Inhalt: Jene Tunnelanlagen bzw. Tunnelkomponenten mit Mängel und Schäden, von denen keine unmittelbare Betriebsgefahr ausgeht, deren Ausmaß und Entwicklung jedoch in einem kürzeren Turnus als bei Regelinspektion zu beobachten sind
- Frequenz: Nach Bedarf (auf Anordnung des Fachbeauftragten (Fb) für Tunnel)
- Methode und Umfang: Nach Angabe des Fb für Tunnel

- Durchführung: Ingenieur der Fachrichtung Bauingenieurwesen

Ad 3.) Begutachtung (B)

- Inhalt: Vollflächige Erfassung und Bewertung von Mängel/Schäden in Hinblick auf Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit im Bereich des gesamten Tunnelbauwerks sowie sämtlicher Nebenanlagen. Stillgelegte Tunnel werden nur in Hinblick auf ihre Standsicherheit untersucht.
- Frequenz: Alle 3 Jahre, Verlängerung auf 6 Jahre (in Abhängigkeit des baulichen Zustands bzw. für stillgelegte Tunnel) möglich. Eine Auflistung der zu prüfenden Tunnel befindet sich im Jahresinspektionsplan, welcher von Fachbeauftragten (Fb) für Tunnel und Alv erstellt wird.
- Methode und Umfang: Handnahe Überprüfung sowie Einsatz von Scannermessverfahren zur Prüfung des IST-Zustandes. Sichtbare Schäden und Mängel der Leibungsoberfläche werden vollständig und farbig dokumentiert im EDV-System Tunnellinspector bzw. TunnelMap digital erfasst
- Durchführung: Fb für Tunnel, unterstützt durch Prüftrupp
- Ergebnis: Schadensliste mit Einzelschäden, einschließlich einer Bewertung des Sicherheitsrisikos und Einteilung der Einzelschäden der Bauwerkssubstanz in Schadensstufen (0 bis 4). Einfache Parametrisierung (z.B. „Merkschaden“, „geringer Schaden“, „mittlerer Schaden“, „Schaden großen Umfangs“). Objektivierbare Maßgrößen, anhand deren eine Schadensstufe zugeordnet werden kann, finden sich in der RIL 853 [13] jedoch nicht.

Im Gutachten erfolgt eine Bewertung der Zustandskategorie des Tunnels (1 bis 4), welche durch einfache globale Umschreibungen definiert sind und nach denen der Gutachter aufgrund seiner Fachkenntnis und Einschätzung eine Zuordnung vorzunehmen hat. Weiters sind im Gutachten bereits Vorschläge zur Beseitigung der Mängel und Schäden aufzunehmen, über deren Durchführung der Alv entscheidet.

- Ergebnis: Inspektionsliste; in Fällen, in denen eine anschließende Sonderinspektion (U/B) erforderlich ist, sind zusätzlich eine Schadensliste sowie ein Gutachten anzufertigen

Ad 4.) Sonderinspektion

- Inhalt: Erfassung und Bewertung von Mängel und Schäden in Hinblick auf Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit, aus gegebenen Anlass zumeist nur auf einzelne Bauteile bzw. Tunnelkomponenten begrenzt
- Frequenz: Nach Bedarf
- Methode und Umfang: Methode analog „Begutachtung“, Umfang nach Festlegung des Anlagenverantwortlichen (Alv) bzw. des Fb für Tunnel
- Durchführung: Fb für Tunnel
- Ergebnis: Schadensliste und Gutachten

4.4.2 Schweiz

4.4.2.1 Straße (ASTRA)

Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten (u.a. von Tunnel) auf Nationalstraßen ist in der gleichnamigen Richtlinie des Bundesamtes für Straßen, ASTRA Abteilung Straßennetze, geregelt [8]. Als Bauherren für Bau und Unterhaltung der Nationalstraßen agieren die Kantone, als Oberaufsicht das ASTRA. Die Organisation des Bauherrn sieht die Dienststellen „Bau“, „Betrieb“ und „Unterhalt“ vor.

Für bestehende Bauwerke, u.a. auch bestehende Tunnel, gelten die Normen SIA 469 „Erhaltung von Bauwerken“ [44], die SIA 269 „Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken“ [45] und die SIA 269/2 „Erhaltung von Tragwerken - Betonbau“ [46].

Die Kunstbauten sind EDV-technisch in der KUBA-DB, Kunstbautendatenbank der Nationalstraßen, dem KUBA-MS Ticino, Kunstbautenmanagementsystem, und der UH-PERI-NS, Administrative Datenbank des ASTRA mit Objektverzeichnis, erfasst.

Für die Überwachung von Kunstbauten wird unterschieden in Beobachtung, Inspektion (Haupt-, Zwischen-, Sonderinspektion) und Überprüfung (Generelle und Detaillierte Überprüfung).

Tabelle 7: Überblick über Inspektionsintervalle in der Schweiz

Nr.	Art der Zustandsbewertung	Organisation	Inspektionsintervall	Erforderliche Qualifikation	Methode der Datengewinnung
1	Laufende Überwachung (Beobachtung)	Internes Personal/ Mitarbeiter	< 1 Jahr	Interne Schulung/ Training	Visuelle Inspektion
2	Kontrolle (Zwischenprüfung)	Subauftragnehmer/ Externes	1 Jahr	Interne Schulung/ Training	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Laserscanner • Photogrammetrie
3	Prüfung (Hauptprüfung)	Subauftragnehmer/ Externes + Internes Personal/ Mitarbeiter	5 Jahre	Anerkanntes Zertifikat/ Universitätsabschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Laserscanner • Photogrammetrie • Thermographie
4	Sonderprüfung	Subauftragnehmer/ Externes	nach Bedarf	Anerkanntes Zertifikat/ Universitätsabschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Laserscanner • Magnetisch • Photogrammetrie • Thermographie • Stichprobenentnahme & Materialtestung

Ad 1.) Beobachtung

- Inhalt: Feststellung offensichtlicher Mängel und Schäden am Tunnelbauwerk und Nebenanlagen hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und Nutzung der Bauwerke
- Frequenz: Laufend im Rahmen des Betriebs
- Methode und Umfang: Erfassen von objektspezifischen Beobachtungen und besondere Vorkommnisse. Feststellen von offensichtlichen Beschädigungen (z.B. Absprengungen durch Anprall), Funktionsstörungen und vorgenommene Kleinreparaturen. Überprüfung ob die Nutzungs- und Betriebsanweisungen eingehalten werden.
- Durchführung: Dienststelle Betrieb
- Ergebnis: Meldungen an die Dienststelle Unterhalt

Ad 2-4.) Haupt-, Zwischen-, Sonderprüfung

- Inhalt: Gezielte visuelle Zustandserfassung mit anschließender Zustandsbewertung zur Feststellung von offensichtlichen, bedeutenden Mängeln oder Schäden hinsichtlich Tragsicherheit, Verkehrssicherheit, Betriebssicherheit und Umweltverträglichkeit.

Im Rahmen der Hauptinspektion wird das gesamte Tunnelbauwerk behandelt, im Zuge der Zwischeninspektion z.T. nur einzelne Komponenten, um das Verhalten des Bauwerkes und die Schadensentwicklung besser zu verfolgen.

- Frequenz: Hauptinspektion im 5-Jahresrhythmus, Zwischeninspektion auf Veranlassung des Bauherrn, Sonderinspektion auf Veranlassung vom Bauherrn nach besonderen Ereignissen z.B. Hochwasser, Steinschlag, Erdbeben, Unfälle.
- Methode und Umfang: Visuelle Kontrolle und mit einfachen Mitteln (z.B. Feldstecher für nur aus großer Distanz einzusehenden Bauwerksteilen), „zerstörungsfrei“ und ohne Beeinträchtigung des Verkehrs. Kritische Bauteile, z.B. Lager, sind in Hand-distanz zu inspizieren. Im Rahmen der Inspektionen werden die im Überwachungsplan festgelegten Kontrollmessungen ausgewertet
- Durchführung: Dienststelle Unterhalt und beauftragter Ingenieur
- Ergebnis: Inspektionsbericht einschließlich Dokumentation des Zustandes mit Angabe der wesentlichen Schäden und Mängel, Entwicklung/Vergleich zur vorangegangenen Inspektion sowie eine Zustandsbewertung (6 Zustandsklassen) für das gesamte Bauwerk bzw. Bauwerksteile. Empfehlungen für das weitere Vorgehen, sowie allfällig angeordnete Sofortmaßnahmen bzw. dringliche Maßnahmen sind ebenfalls im Inspektionsbericht enthalten. Bei sofort durchgeführten Sanierungsmaßnahmen werden diese in einem Kurzbericht dokumentiert.

Die Ergebnisse werden in die Kunstbautendatenbank KUBA-DB eingepflegt. Einzelschäden werden nach den Fachkatalogen von KUBA-DB identifiziert und beschrieben (je Schaden Schadenprozess, Zustandsklasse, Schadenausmaß). Fotos dienen der eindeutigen Lokalisierung der Schäden und der Schadensdokumentation. Nicht näher untersuchte Bauwerksteile werden im Inspektionsbericht angeführt und eine Abschätzung ihres Gefährdungspotentials vermerkt.

4.4.2.2 Schiene (SBB)

Die laufende und wiederkehrende Überwachung der Eisenbahntunnel der SBB erfolgt im Wesentlichen ähnlich zu jener der ÖBB in Österreich. Die Durchführung eines Tunnel-scans ist Standard. Für das Gesamtbauwerk werden keine Zustandsnoten vergeben, sondern lediglich für die Ringe/Blöcke. Die Bewertung erfolgt anhand eines Histogramms der ringweisen Zustandsnoten. Der Inspektionsbericht beinhaltet darüber hinaus auch eine Zusammenfassung der gravierendsten Schäden, Vorschläge zu Maßnahmen und Überwachung.

4.4.3 Australien

Angaben zu Planung, Betrieb und Erhaltung von Straßentunnel in Australien sind in der Richtlinie „AUSTROADS – Guide to Road Tunnels Parts 1-3“ [9] [10] [11] enthalten.

In der Richtlinie finden sich keine näheren Angaben bez. Umfang, Prüfmethode und Prüfintervalle für Tunnelprüfungen. Diese Angaben werden im jeweiligen Wartungshandbuch („Maintenance Manual“) für Tunnel vermerkt, abhängig von Vorgaben der zuständigen Straßenbehörde („Road Authority“) sowie des Tunnelbaus und des Tunnelbetreibers.

Die Richtlinie enthält auch keine klaren Angaben zwecks Unterscheidung von Zustandsbewertungen. Aus den relevanten Textpassagen lässt sich jedoch eine grobe Einteilung in „Routine Inspection“ (präventive Erhaltungsmaßnahme), „Regular Inspection“ und „Inspection“ (seltener aber ausführlicher als „Regular Inspection“) ableiten. Zusätzlich werden Überprüfungen nach Unfallereignissen im Tunnel (vergleichbar mit Typ „Sonderinspektion“) durchgeführt.

Aufgrund des Rücklaufs der internationalen Befragung konnten für australische Straßen folgende Inspektionsintervalle identifiziert werden:

Tabelle 8: Überblick über Inspektionsintervalle auf australischen Straßen

Nr.	Art der Zustandsbewertung	Organisation	Inspektionsintervall	Erforderliche Qualifikation	Methode der Datengewinnung
1	Laufende Überwachung (Routine Inspection)	Internes Personal/ Mitarbeiter	< 1 Jahr	Interne Schulung/ Training	Visuelle Inspektion
2	Kontrolle (Regular Inspection)	Internes Personal/ Mitarbeiter	1 Jahr	Externe Weiterbildung	Visuelle Inspektion
3	Prüfung (Inspection)	Zertifizierte Prüfstelle, Behörde	5 Jahre oder nach Bedarf	Anerkanntes Zertifikat, Universitätsabschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Laserscanner • Photogrammetrie • Stichprobenentnahme & Materialtestung

Die Ergebnisse der Überprüfungen werden im Asset Management System (AMS) für die jeweilige Tunnelanlage erfasst.

4.4.4 USA

Die Prüfung und Überwachung von Autobahn- und Eisenbahntunnel innerhalb der USA und Puerto Rico ist im Dokument „Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual“, US-

Department of Transportation (DOT) [14] als Richtlinie erläutert. Der Tunneleigentümer ist für die Überwachung und Prüfung der Tunnel verantwortlich.

Es wird zwischen „general inspections“ (tägliche, wöchentliche, monatliche Überwachung) und „up-close inspections“ (Tunnelprüfung) unterschieden. Letztere werden ausführlich im DOT-Dokument beschrieben.

Tabelle 9: Überblick über Inspektionsintervalle in den USA (Straße & Schiene)

Nr.	Art der Zustandsbewertung	Organisation	Inspektionsintervall	Erforderliche Qualifikation	Methode der Datengewinnung
1	Laufende Überwachung (general inspection)	Eigentümer	monatlich	n/a	Begehung
2	Prüfung (up-close inspection)	Eigentümer	2-5 Jahre (empfohlen)	Professional Engineer (vergleichbar mit Ziviltechniker)	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Abklopfen • ggf. unterstützt durch Impact-Echo

Ad 2.) Up-close inspection - Baustruktur

- **Inhalt:** Visuelle, zerstörungsfreie Erhebung der Mängel und Fehlstellen an der Tunnelanlage samt Nebenanlagen
- **Frequenz:** Nach Vorgabe des Tunneleigentümers, von DOT empfohlen wird ein Intervall von 5 Jahren für neue Tunnel und 2 Jahre für ältere Tunnel
- **Methode und Umfang:** Handnahe, visuelle und zerstörungsfreie Untersuchung aller sichtbaren Oberflächen (z.B. Tunnelleibung) unter Zuhilfenahme von Hebebühnen sowie einfacher Hilfsmittel (Fotoapparat, Schublehre, Kreide zum Markieren, Hammer zum Abklopfen der Oberflächen, Rissbreitenschablone zum Messen der Rissbreiten, Rollmessbänder, Lotmessgeräte etc.). Für Beton und Mauerwerk wird als zerstörungsfreie Prüfung und Ortung von Fehlstellen das Impact-Echo Verfahren als Möglichkeit erwähnt.
- **Durchführung:** Team aus zumindest zwei sachkundigen Personen (Ingenieur und Mitarbeiter) mit mehrjähriger einschlägiger Erfahrung
- **Ergebnis:** Jede einzelne Schadstelle wird erhoben, zusätzliche Skizzen und Fotos (inkl. Ortsangaben) dienen der Dokumentation schwerer Schäden und Mängel. Die Ergebnisse werden entweder vor Ort in Papierform gesammelt oder direkt mit dem Tablet PC in eine Datenbank eingetragen.

Für die Bewertung des Bauwerks (Fokus Bauteil Tunnelschale) ist eine Zuordnung zu Zustandsnoten (sog. „condition codes“, 0 - schlechteste bis 9 – beste) vorzunehmen. Für verschiedene Bauweisen und Bauteile erfolgt diese Zuordnung über eine relativ detaillierte Erläuterung der jeweiligen Schadensbilder für verschiedene Bauweisen. Diese enthalten zum Teil auch objektivierbare Attributen (wie Rissanzahl, -länge und -breite). Der Inspektionsbericht enthält u.a. Empfehlungen zu Instandsetzungen. Diese werden nach drei Klassen (critical, priority und routine) kategorisiert.

4.4.5 Neuseeland

Die für bestehende Tunnelanlagen verantwortliche Behörde ist die NZ Transport Agency. Sie ernannt einen Tunnelverantwortlichen („Tunnel Manager“) innerhalb der Behörde, der bei Bau, Betrieb, Inspektion und Sanierung als Berater fungiert und dabei stets Betrachtungen des übergeordneten Straßennetzes miteinbezieht.

Die Durchführung von Tunnelprüfungen auf Autobahnen und übergeordneten Straßen („state highways“) ist in den Richtlinien „S8 - Tunnels management and inspection policy“ (für Tunnellängen > 80 m) [15] bzw. „S6 - Bridges and other highway structures inspection policy“ (für Tunnellängen < 80 m) [16] geregelt.

In der Richtlinie „Inspection manual for highway structures“ [17] sind allgemeine Grundsätze für Tunnelprüfung und Überwachung enthalten. Weiterführende Regelungen, speziell für Tunnel, sind in den Dokumenten BD 53/95 [18] und BA 72/03 [19], beide Highways Agency, United Kingdom, angeführt.

Bei der Zustandsbewertung wird nach den beiden Kategorien „laufende Tunnelüberwachung“ („routine surveillance inspection“) und Tunnelprüfung („general, principal, special inspection“) unterschieden (siehe Tabelle 10).

Für die Durchführung der Tunnelprüfungen ist der Tunnelprüfingenieur für Baukonstruktionen („Tunnel Inspection Engineer (Structures)“) mit mindestens 10-jähriger Erfahrung in den Bereichen Bauwerksprüfung, Statik und Instandhaltung, verantwortlich. Für den Bereich E&M ist ein eigener Tunnelprüfingenieur M&E zuständig.

Die existierende Bauwerks-Datenbank der NZ Transport Agency ist nach den Überprüfungen ggf. mit Strukturangaben zu ergänzen.

Tabelle 10: Überblick über Inspektionsintervalle in Neuseeland (Straße)

Nr.	Art der Zustandsbewertung	Organisation	Inspektionsintervall	Erforderliche Qualifikation	Methode der Datengewinnung
1	Laufende Überwachung (Routine surveillance inspection)	Subauftragnehmer/Externe	< 1 Jahr	Interne Schulung/ Training	Visuelle Inspektion
2	Kontrolle (General inspection)	Subauftragnehmer/ Externe	2 Jahre	Externe Weiterbildung	Visuelle Inspektion
3	Prüfung (Principal inspection)	Subauftragnehmer/Externe	6 Jahre	Externe Weiterbildung	Visuelle Inspektion
4	Sonderprüfung (Special inspection)	Subauftragnehmer/Externe	Nach Bedarf	Externe Weiterbildung	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Akustisch/ Ultraschall • Stichprobenentnahme & Materialtestung
5	Andere	Zertifizierte Prüfstelle	1 Jahr	Anerkanntes Zertifikat	Konformitätsbescheinigung („building warrant of fitness“) für sicherheitsrelevante Systeme

Ad 1.) Routine surveillance inspection

- Inhalt: Feststellung von offensichtlichen Mängeln und Schäden, die zu Unfällen und / oder hohen Instandhaltungskosten führen könnten
- Frequenz: Mindestens. 1x pro Monat
- Methode und Umfang: Zu Fuß oder von einem langsam fahrenden Fahrzeug aus. Untersucht werden u.a. Unfallstellen, Sickerwasserstellen, auffällige Risse in der Tunnelinnenschale oder den Tunnelportalwänden
- Durchführung: Sachkundige Person
- Ergebnis: Formlos, Kurzberichte werden jedoch empfohlen

Ad 2.) General inspection

- Inhalt: Ausführliche, visuelle Feststellung von Mängel und Schäden an den Hauptkonstruktionen des Tunnelbauwerks und seiner Nebenanlagen
- Frequenz: Alle 2 Jahre, außer in den Jahren der „Principal inspection“
- Methode und Umfang: Keine Angabe

- Durchführung: Spezialist (in Abstimmung mit Tunnelprüfingenieur)
- Ergebnis: Bericht abgestimmt mit dem Tunnelverantwortlichen, einschließlich einer Abschätzung des Zustands der Tunnelanlage

Ad 3.) Principal inspection

- Inhalt: Handnahe und ausführliche Prüfung der gesamten Tunnelanlage samt Nebenanlagen
- Frequenz: Alle 6 Jahre
- Methode und Umfang: Alle Bauwerksteile und Nebenanlagen sind handnah und ausführlich zu prüfen. Ausreichende Zugangsmöglichkeiten sind erforderlich, nicht einsehbare Teile sind für die Prüfung zumindest teilweise freizulegen (z.B. Verkleidungen). Für die Prüfung sind u.a. auch die Bestandspläne und Betriebs- und Instandhaltungshandbücher zu berücksichtigen. Weiterführende Prüfungen und Messungen sind oftmals von spezialisierten Firmen durchzuführen.
- Durchführung: Spezialist, in Abstimmung mit dem Tunnelprüfingenieur
- Ergebnis: „Principal inspection report“, bezieht sich auf alle vorliegenden tunnelspezifischen Unterlagen und die Einhaltung aktueller Regelwerke. Empfohlene Instandhaltungsarbeiten werden angeführt, jeweils ergänzt um eine Kostenschätzung.

Ad 4.) Special inspection

- Inhalt: Örtlich begrenzte Inspektion zur Feststellung von Schäden und Mängeln an bestimmten Bauteilen, welche gesondert geprüft werden müssen. Gründe dafür können bereits aus vorherigen Untersuchungen bekannte Problemstellen sein, sowie Bodensetzungen im Tunnel oder an der Oberfläche, Überflutungen sowie nach Unfällen.
- Frequenz: Nach Bedarf, in Abstimmung mit dem Tunnelverantwortlichen
- Methode und Umfang: In Abstimmung mit dem Tunnelverantwortlichen. Weiterführende Prüfungen und Messungen sind oftmals von spezialisierten Firmen durchzuführen.
- Durchführung: Spezialist, in Abstimmung mit dem Tunnelprüfingenieur
- Ergebnis: „Special inspection report“ beinhaltet empfohlene Instandhaltungsarbeiten und dazugehörige Kostenschätzungen.

4.4.6 Italien

4.4.6.1 Straße

Einige generelle Angaben zu Prüfungen von Eisenbahntunneln finden sich im „Decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 28 [20].

Der Anwendungsbereich dieses Dekrets erstreckt sich auf Eisenbahntunnel mit über 1.000 m Länge, nicht jedoch auf U-Bahn-Tunnel und unterirdische Bahnhöfe und Haltestellen.

Der Betreiber ist für die Überprüfungen der Tunnel entlang seiner Strecke verantwortlich und ernennt einen Tunnelverantwortlichen.

Der Betreiber führt periodische Überprüfungen der Tunnelanlage samt Nebenanlagen durch, um festzustellen, ob der Tunnel, die in den Anwendungsbereich des Dekrets fallen, die Vorgaben des Dekrets bzgl. Instandhaltung erfüllt. Der Betreiber legt das Prüfintervall fest, es darf jedoch maximal 3 Jahre betragen. Der Betreiber definiert auch den Umfang und die Vorgehensweise für die jeweilige Prüfung.

Von jeder Prüfung ist ein Bericht anzufertigen und an das Ministerium zu übermitteln. Weiterführende Angaben zu Prüfungen finden sich nicht im Dekret.

Tabelle 11: Überblick über Inspektionsintervalle in Italien (Straße)

Nr.	Art der Zustandsbewertung	Organisation	Inspektionsintervall	Erforderliche Qualifikation	Methode der Datengewinnung
1	Kontrolle	Internes Personal/ Mitarbeiter	nach Bedarf	Interne Schulung/ Training	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Photogrammetrie
2	Prüfung	Behörde	3 Jahre	Universitätsausbildung	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Photogrammetrie
3	Sonderprüfung	Subauftragnehmer/Externe	nach Bedarf	Universitätsausbildung	<ul style="list-style-type: none"> • Visuelle Inspektion • Akustisch/ Ultraschall • Laserscanner • Magnetisch • Photogrammetrie

4.4.6.2 Schiene

Einige generelle Angaben zu Prüfungen von Eisenbahntunneln finden sich im „Decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 28 ottobre 2005 – Sicurezza nelle gallerie ferroviarie“ [20].

Der Anwendungsbereich dieses Dekrets erstreckt sich auf Eisenbahntunnel mit über 1.000 m Länge, nicht jedoch auf U-Bahn-Tunnel und unterirdische Bahnhöfe und Haltestellen. Der Betreiber ist für die Überprüfungen der Tunnel entlang seiner Strecke verantwortlich und ernennt einen Tunnelverantwortlichen. Der Betreiber führt periodische Überprüfungen der Tunnelanlage samt Nebenanlagen durch, um festzustellen, ob der Tunnel, die in den Anwendungsbereich des Dekrets fallen, die Vorgaben des Dekrets bzgl. Instandhaltung erfüllt. Der Betreiber legt das Prüfintervall fest, es darf jedoch maximal 3 Jahre betragen. Der Betreiber legt auch den Umfang und die Vorgehensweise für die jeweilige Prüfung fest. Von jeder Prüfung ist ein Bericht anzufertigen und an das Ministerium zu übermitteln. Weiterführende Angaben zu Prüfungen finden sich nicht im Dekret.

4.4.7 Vereinigtes Königreich – Straße

Die für die Instandhaltung der Straßeninfrastruktur verantwortlichen Behörden sind die Highway Authorities of Central Government for England, Scotland, Wales und Northern Ireland. Die jeweilige Behörde ernennt einen Erhaltungsbeauftragten („Maintaining Agent“ MA) sowie eine Aufsichtsstelle (Overseeing Organisation“ OO). Der vom Erhaltungsbeauftragten bestellte Tunnelbetreiber „Tunnel Operating Authority“ (TOA) ist für die täglichen Erhaltungsmaßnahmen, das Management und den Betrieb des Straßentunnels sowie für die Durchführung der Inspektionen zuständig. Das Programm für Inspektionen wird vorab mit dem Erhaltungsbeauftragten und der Aufsichtsstelle abgestimmt.

Die Prüfung und Überwachung von Straßentunnel auf Autobahnen und übergeordneten Straßen ist im Dokument „Design Manual for Roads and Bridges, Volume 3 Highway Structures: Inspection and Maintenance, Section 1 Inspection, Part 6, BD 53/95, Inspection and Records for Road Tunnels“ [47] geregelt.

Weitere allgemeine Regelungen zu Inspektion, Erhaltung, Betrieb und Messmethoden für Autobahnbauten sind in BD 62 (DMRB 3.2.1, [50]), BD 63 (DMRB 3.1.4, [48]) und BA 63 (DMRB 3.1.5, [49]) enthalten.

Unterschieden wird in vier Prüfungsarten („Superficial“, „general“, „principal“ und „special inspection“).

Ad 1.) „Superficial Inspection“

- Inhalt: Visuelle Feststellung von offensichtlichen Mängeln an Straßentunnelanlagen, welche in weiterer Folge zu Unfällen oder hohen Sanierungskosten führen können.
- Frequenz: Regelmäßig (ohne nähere Angabe).

- Methode und Umfang: Visuelle Beobachtung an Tunnelbauwerken und Nebenanlagen.
- Durchführung: Mitarbeiter TOA.
- Ergebnis: formlos.

Ad 2.) “General Inspection“

- Inhalt: Ausführliche visuelle Feststellung von Mängeln an maßgebenden Bauwerkskomponenten von Straßentunnelanlagen.
- Frequenz: 2 Jahre, außer in Jahren der „Principal Inspection“
- Methode und Umfang: Keine Angabe.
- Durchführung: Keine Angabe.
- Ergebnis: Keine Angabe.

Ad 3.) “Principal Inspection“

- Inhalt: Ausführliche Untersuchung der gesamten Tunnelanlage zur Feststellung von Schäden und Mängeln.
- Frequenz: in der Regel alle 6 Jahre, maximal alle 10 Jahre (in Abstimmung mit der Aufsichtsstelle)
- Methode und Umfang: Alle Bauwerkskomponenten und Nebenanlagen sind handnah und ausführlich zu prüfen. Ausreichende Zugangsmöglichkeiten sind vorab zu schaffen, nicht einsehbare Teile sind für die Prüfung zumindest teilweise freizulegen (z.B. Verkleidungen). Für die Prüfung sind u.a. auch die Bestandspläne und Betriebs- und Instandhaltungsbücher zu berücksichtigen. Weiterführende Prüfungen und Messungen sind oftmals von spezialisierten Firmen durchzuführen.
- Durchführung: Mitarbeiter TOA, spezialisierte Firmen
- Ergebnis: Bericht „Principal Inspection Report“, bezugnehmend auf alle aktuellen Normen und Standards sowie vorliegende Dokumente zu Betrieb, Instandhaltung und Tunnelsicherheit. Weiters sind empfehlende Sanierungsmaßnahmen enthalten einschließlich einer Kostenschätzung.

Ad 4.) “Special Inspection“

- Inhalt: Örtlich begrenzte, handnahe Inspektion zur Feststellung von Schäden und Mängeln an bestimmten Bauteilen, welche gesondert geprüft werden müssen. Gründe

dafür können veränderte Randbedingungen (Lastangaben) sein sowie Bodensetzungen im Tunnel oder an der Oberfläche, Überflutungen und nach Unfällen.

- Frequenz: Nach Bedarf
- Methode und Umfang: Eine erste Überprüfung erfolgt handnah. Weiterführende Prüfungen und Messungen sind oftmals von spezialisierten Firmen durchzuführen.
- Durchführung: Mitarbeiter TOA, spezialisierte Firmen
- Ergebnis: Bericht „Special Inspection Report“, einschließlich empfohlene Sanierungsmaßnahmen samt Kostenschätzung.

4.4.8 Schweden

Die für bestehende Tunnelanlagen sowohl des staatlichen Straßen- als auch Eisenbahnnetzes verantwortliche Behörde ist das „Trafikverket“. Tunnelprüfungen von Ingenieurbauwerken inkl. Tunnelanlagen sind im Regelwerk TRV 2014:95667 „Trafikverket Investering, Stora Projekt: Underhåll Krav på inspektion av byggnadsverk“ geregelt.

Unterschieden wird in „översiktlig inspektion“ (in etwa: laufende Überwachung), „allmän inspektion“ (allgemeine Prüfung), „huvudinspektion“ (Hauptprüfung), und „särskild inspektion“ (Sonderprüfung).

Die översiktlig inspektion wird von sachkundigem Erhaltungspersonal (Kenntnis von Messmethoden und bautechnische Ausbildung) durchgeführt. Die Durchführung der anderen Prüfungen bestehen besondere Anforderungen an die Qualifikation des Prüfers (Ingenieurausbildung, Erfahrung in der Bauwerksprüfung von Trafikverket, Messung und Bewerten von Bauteilen, Wissen über Dauerhaftigkeit und Degradationsprozesse und deren Prognose sowie über Bauwerksinstandsetzung).

Die Ergebnisse der Prüfungen werden in das Bauwerksmanagementsystem BaTMan eingepflegt.

Ad 1.) „Översiktlig inspektion“

- Inhalt: Verifikation der Erfüllung des geforderten Erhaltungszustandes.
- Frequenz: Mind. 1x jährlich
- Methode und Umfang: Keine Festlegung
- Durchführung: Sachkundiges Erhaltungspersonal
- Ergebnis: formlos, Kurzberichte werden jedoch empfohlen

Ad 2.) “Allmän inspektion“

- Inhalt: Feststellung von Mängel und Schäden, welche zu einer Beeinträchtigung der Verkehrs- oder Tragsicherheit oder größeren Interventionen führen würden, sofern sie nicht rechtzeitig bis zur nächsten Hauptprüfung erkannt würden.
- Frequenz: Objektspezifisch
- Methode und Umfang: Visuelle Inspektion sämtlicher Konstruktionselemente
- Durchführung: erfahrener Tunnelprüfingenieur
- Ergebnis: Inspektionsbericht einschließlich Dokumentation des Zustandes mit Angabe der wesentlichen Schäden und Mängel und deren Ursachen. Beschreibung des „Physischen Zustandes“ anhand von standardisierten Schadenstypen und -ausmaßen. Bewertungsschemas für standardisierte Schadenstypen und -ausmaße weisen dabei auf eine Zustandsnote TK0 bis TK3 der Bauteile. Diese Zustandsnote spiegelt den „Funktionellen Zustand“ wider und wird vom Prüfer nach dessen individueller Einschätzung festgelegt. Die Dokumentation wird im Bauwerksmanagementsystem BaTMan eingegeben.

Ad 3.) “Huvud inspektion“

- Inhalt: Feststellung und Bewertung aller Schäden, die auf die Bauwerksfunktion oder Sicherheit innerhalb der nächsten 10 Jahre Auswirkung haben könnte, oder deren weitere Entwicklung zu erhöhten Erhaltungskosten führen.
- Frequenz: Alle 6 Jahre.
- Methode und Umfang: Handnahe visuelle Inspektion sämtlicher Konstruktionselemente, Erfassung von Rissen, Chloridgehalt und Karbonatisierung, Korrosion
- Durchführung: erfahrener Tunnelprüfingenieur
- Ergebnis: Inspektionsbericht einschließlich Dokumentation des Zustandes mit Angabe der wesentlichen Schäden und Mängel und deren Ursachen. Beschreibung des „Physischen Zustandes“ anhand von standardisierten Schadenstypen und -ausmaßen. Bewertungsschemas für standardisierte Schadenstypen und -ausmaße weisen dabei auf eine Zustandsnote TK0 bis TK3 der Bauteile. Diese Zustandsnote spiegelt den „Funktionellen Zustand“ wider und wird vom Prüfer nach dessen individueller Einschätzung festgelegt. Die Dokumentation wird im Bauwerksmanagementsystem BaTMan eingegeben

Ad 4.) “Special inspection“

- Inhalt: Spezifisch nach Bedarf.
- Frequenz: Nach Bedarf, in Abstimmung mit dem Tunnelverantwortlichen
- Methode und Umfang: Einzelne betroffene Konstruktionselemente
- Durchführung: Erfahrener Tunnelprüfingenieur
- Ergebnis: Spezifisch nach Bedarf mit Eingabe in das Bauwerksmanagementsystem BaTMan.

Tabelle 12: Überblick über Inspektionsintervalle nach Länder und Verkehrsträger

Land	Straße	Schiene
Australien	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: ≤ 1Jahr • Kontrolle: 1Jahr • Prüfung: 5 Jahre / nach Bedarf • Sonderprüfung: unbekannt 	
Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: 6 Monate • Kontrolle: 1Jahr • Prüfung: 6 Jahre • Sonderprüfung: nach Bedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: ≤ 1Jahr • Kontrolle: ≤ 1Jahr • Prüfung: 3-6 Jahre • Sonderprüfung: nach Bedarf
Italien	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: unbekannt • Kontrolle: nach Bedarf • Prüfung: 3 Jahre • Sonderprüfung: nach Bedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: unbekannt • Kontrolle: unbekannt • Prüfung: 3 Jahre Sonderprüfung: unbekannt
Neuseeland	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: ≤ 1Jahr • Kontrolle: 2Jahr • Prüfung: 6 Jahre • Sonderprüfung: nach Bedarf 	
Österreich	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: 4 Monate • Kontrolle: 2 Jahre • Prüfung: 12 Jahre • Sonderprüfung: nach Bedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: 2 Monate • Kontrolle: 1 Jahre • Prüfung: 4-6 Jahre • Sonderprüfung: nach Bedarf
Schweiz	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: ≤ 1Jahr • Kontrolle: 1Jahr • Prüfung: 5 Jahre • Sonderprüfung: nach Bedarf 	
Schweden	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: ≤ 1Jahr • Kontrolle: nach Bedarf • Prüfung: 6 Jahre • Sonderprüfung: nach Bedarf 	
USA	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: 1 Monat • Kontrolle: unbekannt • Prüfung: 2-5 Jahre • Sonderprüfung: unbekannt 	
Vereinigtes Königreich	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Überwachung: unbekannt • Kontrolle: 2 Jahre • Prüfung: 6 Jahre • Sonderprüfung: nach Bedarf 	

5 VERGLEICH MIT STATE-OF-THE-ART ANDERER INFRASTRUKTUREN

5.1 Brücken

Zur Zustandsbewertung von Brücken existieren in Österreich diverse Richtlinien. Neben den im Folgenden beschriebenen Richtlinien welche direkt Bezug auf Brücken nehmen können allerdings auch Richtlinien welche Bezug auf den Baustoff nehmen von Relevanz sein.

5.1.1 RVS 13.03.01

Die RVS 13.03.01 (Monitoring von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken) richtet sich sowohl an die Erhaltungsverpflichteten und Bauherren als auch an die Anbieter von Monitoringsystemen und beschreibt die Grundlagen für die Bereiche:

- Messtechnische Erfassung und Bewertung des aktuellen Zustandes
- Beurteilung der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit (z.B. in Bezug auf Ermüdung)
- Einschätzung von Risiken
- Dringlichkeit der Einleitung von Instandsetzungsmaßnahmen sowie
- Durchführung von Lebenszyklusbetrachtungen

an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken auf der Grundlage von Monitoringergebnissen. Bei der Errichtung eines Ingenieurbauwerks und der Bauwerksprüfung kann Monitoring als unterstützende Maßnahme eingesetzt werden. Monitoring ist allerdings kein Ersatz für die Bauwerksprüfung. Durch eine Erfassung des realen Verhaltens kann den Prüfmethoden jedoch ein verlässliches, objektivierendes Verfahren zur Seite gestellt werden.

Die RVS 13.03.11 beschreibt detailliert Ziele, Verfahrensablauf sowie Arten des Monitorings und beinhaltet Informationen zur Monitoringanlage und zum Messsystem im Hinblick auf Gerätespezifikation, Planung und Durchführung der Messung und erfassbare Messgrößen.

Zudem sind einige Beispiele für mögliche Anwendungsfälle für Monitoring aufgelistet und bezugnehmend auf die jeweiligen Fälle, die Ziele, Messgrößen, die Sensorart, die Art der Messung sowie die Messmethode und die Anwendungsgrenzen näher erläutert. Zu finden sind hier Anwendungsbeispiele wie Rissbreiten, Verformungsverhalten, Schwingungsmessungen, Ermüdung usw.

5.1.2 RVS 13.03.11

Die RVS 13.03.11 (Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten - Straßenbrücken) ist für die Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Brücken (lichte Weite > 2,0m) hinsichtlich Zuverlässigkeit und Verkehrssicherheit heranzuziehen. Die laufende Überwachung (alle vier Monate) sowie Kontrollen (alle 2 Jahre) und Prüfungen (alle 6 Jahre) haben in regelmäßigen Abständen zu erfolgen. Bei Kontrollen wird die Veränderung des Erhaltungszustandes im Vergleich zur letzten Prüfung aufgenommen und evaluiert. In der RVS werden die zu untersuchenden Bauteile genau definiert und die festzustellenden Mängel und Veränderungen an den einzelnen Bauteilen (Unterbau, Überbau, Brückenausrüstung) angeführt. Bei Prüfungen wird der Erhaltungszustand erhoben und bewertet.

Der Befund der Prüfung sollte folgende Ergebnisse dokumentieren:

- Zustand des Objekts mit Zustandsnoten für Objekt und Bauteile
- Benutzbarkeit des Verkehrsweges
- festgestellte Mängel bzw. Schäden
- erforderliche und empfohlene Maßnahmen
- Veranlassung einer Prüfung, wenn festgestellte Mängel oder Schäden nicht ausreichend genau ermittelt werden konnten
- Hinweise für die nächste Kontrolle
- Durchzuführende Sonderprüfungen und statische Nachrechnungen
- Zeitpunkt der nächsten Prüfung (Jahr)

Bewertet werden die Objekte und Bauteile anhand eines Notensystems von 1 (sehr guter Zustand) bis 5 (schlechter Zustand mit Einschränkungen der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit)

5.1.3 RVS 13.05.11

Die Erhaltungskosten sind ein wesentlicher Bestandteil der Lebenszykluskosten (bestehend aus Errichtungskosten, Erhaltungskosten und Abbruchkosten) von Tragwerken. Da die Betrachtung der gesamten Lebenszykluskosten immer mehr an Bedeutung zunimmt, beschreibt die RVS 13.05.11 (Lebenszykluskostenermittlung für Brücken) [58] ein Prognosemodell zur Ermittlung der Kosten über die gesamte Lebensdauer eines Bauwerkes. Dieses Prognosemodell ermöglicht unter anderem die Ermittlung des zukünftigen Budgets für Instandhaltung und Erneuerung sowie Kostentransparenz über alle Lebenszyklusphasen.

5.1.4 ONR 24008

Die ONR 24008 (Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahn- und Straßenbrücken) [59] regelt die Evaluierung der Tragfähigkeit bestehender Straßen und Eisenbahnbrücken. In dieser Norm wird definiert unter welchen Umständen die Notwendigkeit zur Bewertung der Tragfähigkeit besteht. Grundsätzlich ist der Ablauf der Bewertung in vier Stufen gegliedert.

Stufe 1: Verlangt die Nachrechnung nach dem letztgültigen Normenstand. Alle dort verlangten Nachweise müssen erbracht werden. Das bedeutet die Vollenwendung der Eurocode Normreihe EN 199x mit den dort festgelegten Nachweisen und Teilsicherheitsbeiwerten.

Stufe 2: Kann der rechnerische Nachweis nach Stufe 1 nicht erbracht werden, kann der Nachweis nach dieser Stufe geführt werden. Hier werden die Einwirkungs- und die Widerstandseite einschließlich der Modellbildung sowie das Sicherheitskonzept mit dem letztgültigen Normenstand nachgerechnet. Jedoch dürfen, unter der Voraussetzung, dass bestimmte Voraussetzungen bezüglich der Lebensdauer des Bauwerks zutreffen, abgeminderte Teilsicherheitswerte verwendet werden.

Stufe 3: Ist der Nachweis bis jetzt nicht erfolgt, besteht ferner die Möglichkeit der Verwendung probabilistischer Methoden. Hier werden die Verteilungsfunktionen der einzelnen Bemessungsvariablen berücksichtigt.

Stufe 4: Liegt nach den ersten 3 Stufen kein zufriedenstellendes Ergebnis vor, gibt es noch die Möglichkeit, nach der Analyse der Schadensfolge die Zuverlässigkeit zu reduzieren. So werden etwa Bauwerksschäden bewusst in Kauf genommen oder eine permanente Überwachung bzw. Inspektionen in kurzen Zeitabständen notwendig werden.

5.2 Pavement Management System (PMS)

Mit der Implementierung eines Pavement Management Systems (PMS) und dem Aufbau der Bauwerksdatenbank BAUT Ende der 90er Jahre, wurden bei der ASFINAG erste Schritte zur Umsetzung eines modernen und zeitgemäßen Erhaltungsmanagementsystems gesetzt. Dies erfolgte in enger Kooperation zwischen ASFINAG, BMVIT, der Technischen Universität Wien (Prof. Litzka und Dr. Weninger-Vycudil) und dem ZT-Büro Petschacher.

Das Erhaltungsmanagementsystem der ASFINAG (ASFINAG-EMS) dient der netzweiten, objektiven Erhaltungsplanung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gesichtspunkte und Anforderungen auf verschiedenen Entscheidungsebenen (Netz- und Projektebene)

und wird auf dem gesamten Autobahnen- und Schnellstraßennetz flächendeckend eingesetzt [21].

Das Hauptziel des Systems besteht in der Bereitstellung einer umfassenden Datengrundlage für eine objektive Erhaltungsplanung folgender Anlagenteile:

- Straßenoberbau
- Brücken
- Tunnel und Galerien
- Durchlässe
- Lärmschutzwände
- Stützmauern
- Wegweiserbrücken

Um eine hohe Verfügbarkeit und Kundenorientierung zu ermöglichen, sind die einzelnen Managementaufgaben in einem koordinierten Prozess optimal zusammengefasst, der schematisch der nachfolgenden Abbildung 17 entnommen werden kann.

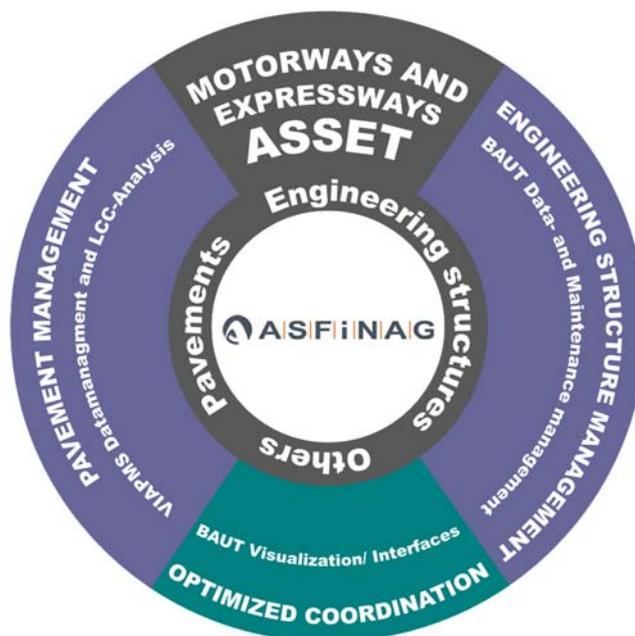


Abbildung 17: Schematische Darstellung des ASFINAG-EMS

Die Hauptelemente des ASFINAG-Erhaltungsmanagementsystems können folgendermaßen definiert werden:

- **Pavement Management System** für die systematische Erhaltungsplanung des Straßenoberbaus (PMS)
- **Managementsystem der Ingenieurbauwerke** für die systematische Erhaltungsplanung von Brücken, Tunnel, Mauern etc. (BAUT)
- **Managementsystem** für die **Koordinierung und Abwicklung** der Baumaßnahmen der einzelnen Anlagenteile der Straßeninfrastruktur

Eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung des ASFINAG-EMS sind Daten, die einerseits den Zustand der einzelnen Anlagen als auch die Bauobjekte selbst beschreiben (Inventardaten). Diese Daten werden seit mehr als 20 Jahren gesammelt und in den Datenbanken der beiden Teilsysteme abgelegt, wobei vor allem im Bereich des PMS eine hohe Datendichte und -genauigkeit vorliegt.

Das Pavement Management System der ASFINAG liefert die wesentlichen Grundlagen für die Festlegung der strategischen Erhaltungsziele auf technischer Ebene sowie die Erstellung des Infrastrukturinvestitionsprogrammes (vormals Bauprogramm). Durch die systematische Anwendung des PMS seit mehr als zehn Jahren ist es möglich, eine relativ genaue Prognose des Straßenzustandes für unterschiedliche RVS-konforme Zustandsmerkmale (Spurrinnen, Längsebenheit, Griffigkeit, Risse und Oberflächenschäden) durchzuführen und unter Verwendung budgetärer Grenzwerte die optimalen Erhaltungsmaßnahmen auf den untersuchten Streckenabschnitt abzuschätzen. Die als Randbedingung definierten jährlichen Erhaltungsbudgets werden im Zuge einer Kostenwirksamkeitsanalyse und einer darauf basierenden heuristischen Optimierung bestmöglich eingesetzt, sodass von einer (betriebs)wirtschaftlich optimierten Lösung gesprochen werden kann.

Methodisch kann bei der Anwendung von VIAPMS-ASFINAG von einer erweiterten Lebenszyklus- bzw. Lebenszykluskostenanalyse (LCCA) gesprochen werden. Das PMS untersucht dabei unterschiedliche Maßnahmenstrategien (für jeden einzelnen Untersuchungsabschnitt) in Form der Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen und versucht unter Berücksichtigung monetärer Vorgaben eine optimale Lösung zu ermitteln. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik kann [1] entnommen werden. Für die praktische Umsetzung des PMS wird auf die kommerzielle, kanadische Software VIAPMS (dTIMS) zurückgegriffen, die in ihrer Struktur so flexibel ist, dass sie auf die österreichischen Verhältnisse angewendet werden kann.

Im Vergleich zum PMS, wo tatsächlich eine Lebenszyklusanalyse mit entsprechender Zustandsprognose und Optimierung vorgenommen wird, liegt der Schwerpunkt bei der BAUT

im Bereich der Datenhaltung sowie der statistischen Auswertung der Bauwerksdaten. Die Bauwerksdatenbank BAUT wurde in ihren Anfängen (1997) als einfache Brückendatenbank erstellt und entwickelte sich mittlerweile zu einer umfangreichen Anlagendatenbank. Die Datenqualität und -quantität für die Ingenieurbauwerke ist dzt. sehr unterschiedlich, wobei im Bereich der Brücken und Tunnel die höchste Datendichte vorzufinden ist.

Die Datenbank besteht aus mehreren Modulen des Erhaltungsmanagements im Bereich der Bauwerke, die gemäß [21] in folgende drei Hauptelemente zusammengefasst werden können:

- **BAUT-Kerndatenbank** zur Speicherung von Informationen zu Objekten (Brücke, Lärmschutzwand, Tunnel etc.) sowie Prüfungen, Fehlstellen und Investitionen an Objekten.
- **BautK** für Informationen zu Fehlstellen
- **EMS** zur Kalkulation und Verwaltung von Baumaßnahmen und Projekten (Verbindung mit dem SAP der ASFINAG).

5.3 Verkehrswasserbau

Verkehrswasserwege weisen mit Tunnelbauwerken u.a. folgende Gemeinsamkeiten auf:

1. Hohe Investitionskosten und oft kritische Infrastruktur.
2. Die Streckenverfügbarkeit ist bei Ausfall zumeist stark beeinträchtigt.
3. Eine Bauwerksprüfung ist oft nur mit Beeinträchtigung des Verkehrs/Betriebes möglich.
4. Die zu prüfenden Bauteile sind oft nicht unmittelbar einsehbar.

In Deutschland ist die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes verpflichtet, die Bauwerksinspektionen von Verkehrswasserbauten durchzuführen. Die Bauwerksinspektion umfasst die Bauwerksprüfung, Überwachung und Besichtigung aller Bauwerke, die in der Unterhaltungslast der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) stehen und wird in der Verwaltungsvorschrift VV-WSV 2101 [52] geregelt und in Merkblättern der Bundesanstalt für Wasserbau konkretisiert.

Die Bauwerksprüfung beinhaltet eine handnahe Untersuchung der Bauwerke alle 6 Jahre unter Benutzung aller erforderlichen Hilfsgeräte durch einen sachkundigen Ingenieur, der auch die statischen, konstruktiven und hydromechanischen Verhältnisse der Bauwerke beurteilen kann.

Schwerpunkte der Bauwerksprüfung sind u.a. die Überprüfung der Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit, Beurteilung des Materialzustandes der Bauwerke-/Bauteiloberfläche oder auch Prüfung aller Fugen und Bauwerksanschlüsse. Hierfür ist eine Trockenlegung des Bauwerks bzw. eine Schleusensperrung und manchmal auch eine Schifffahrtssperre erforderlich. Im Anschluss an der Prüfung wird ein Prüfbericht aufgestellt.

Die Bauwerksüberwachung ist spätestens 3 Jahre nach einer Bauwerksprüfung von einem sachkundigen Ingenieur durchzuführen. Sie ist eine intensive erweiterte Sichtprüfung und es sind alle Bauteile zu überprüfen soweit dies ohne Trockenlegung möglich ist.

Die Besichtigung wird jährlich von einer sachkundigen Person durchgeführt und beinhaltet die Überprüfung der Bauwerke im Hinblick auf die Verkehrssicherheit, den allgemeinen Zustand und sonstige Auffälligkeiten.

Die Abweichungen vom Sollzustand werden in Prüfberichten dokumentiert. Die Schäden werden dabei gem. einem standardisierten Schadenskatalog in Schadensklassen kategorisiert und im Bauwerksmanagementsystem WSVPrüf erfasst. Eine Bauteil- oder Gesamtobjektnote wird vom Prüfer nicht vergeben, da bei der Prüfung/Überwachung nicht alle Teile handnah inspizierbar sind und der Prüfer so nur einen Teil des Bauwerkszustandes beschreiben kann. Die Note automatisiert anhand fester Algorithmen auf Basis der Schadentypen, Schadensausmaß und Schadensklasse vergeben. Die so vom System ermittelte Note dokumentiert damit die Dringlichkeit des Handlungsbedarfes, jedoch nicht den Umfang allfällig erforderlicher Instandsetzungen

5.4 Abwassernetze

Auch Kanäle weisen Analogien zu Verkehrstunnelbauwerken auf:

1. Erdverlegt, somit in der Regel nur von innen bei schlechten Sichtverhältnissen einsehbar.
2. Teil der wesentlichen Basisinfrastruktur zur Dasesvorsorge.
3. Hohe Verfügbarkeit erforderlich.
4. Prüfung oft nur bei Betriebsunterbrechnungen möglich.

Die bauliche Überwachung von Abwasserkanälen wird in Deutschland und Österreich in mehreren Regelwerken behandelt, u.a. EN 13508 [53][55], ÖWAV-RB-043 [55], DWA-M 149 [56].

Als Inspektionsmethode ist eine optische Inspektion Stand der Technik. Diese erfolgt in der Regel indirekt mittels Kamerabefahrung. Ergänzende Systeme wie Laserscanning, Sonar oder Thermographie stellen eher die Ausnahme dar.

In der Regel werden die Kanalnetze in einem 10-jährigen Intervall inspiziert. Die diversen Regelwerke sehen üblicherweise die Schritte „Zustandsbeschreibung“, „Zustandsklassifikation“ und „Zustandsbewertung“ vor. Allen ist gemein, dass sie hinsichtlich der Schadenserkennung im Rahmen der Zustandsbeschreibung auf mehr oder weniger feste Codiersysteme und Schadenskataloge zurückgreifen. Die weitere Zustandsklassifizierung und Zustandsbewertung erfolgt je nach angewandtem System mittels Punktbewertungen und Algorithmen für verschiedene Zielsysteme (z.B. Standsicherheit, Hydraulik und Umwelt/Dichtigkeit). Dadurch wird in der Zustandsbewertung ein hoher Grad an Objektivierbarkeit erreicht. Als Herausforderung bleibt jedoch das grundsätzliche fachmännische Erkennen der Schäden bei der indirekten optischen Inspektion mittels Kamerabefahrung. Dem versucht man, durch Einsatz von zertifiziertem und qualifiziertem Personal beizukommen.

Vor allem in größeren Netzen ist das Einpflegen des Zustandes in ein Kanalmanagementsystem (Kanalkataster, Kanal-GIS, o.ä.) zur Unterhaltsplanung Stand der Technik.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Aus der Zusammenschau der Current Practice für Verkehrstunnel sowie anderer Infrastrukturen kann entnommen werden, dass allen Assets eine wiederkehrende Zustandserfassung gemein ist. Üblich sind verschiedene Intensitätsstufen in der Abstufung von oberflächlicher laufende Überwachung bis hin zur intensiven detaillierten Inspektion („Hauptprüfung“ im Sinne der RVS). Die Intervalle variieren von Land zu Land sowie nach Asset Typen, liegen aber für die detaillierte Inspektion im Bereich von 4 (ÖBB alle 4 Jahre bei Bauwerken mit Inbetriebnahmedatum vor 1980) bis 12 Jahren.

Übliche Inspektionsmethode ist generell die optische/visuelle Inspektion, sowohl durch einen sachkundigen Prüferingenieur, teilweise unterstützt durch optische Aufnahmen wie Tunnel-scans mit Orthofoto. Alternative Methoden wie Georadar, Thermografie kommen in der Regel nur ergänzend im Einzelfall zur Anwendung.

Markante Unterschiede sind bei der Objektivierbarkeit der Schadensansprache und der Dokumentation zu verzeichnen. Dort, wo Bauwerksmanagementsysteme zur Zustandsüberwachung und Instandhaltungsplanung eingesetzt werden, ist ein höherer Grad an festen Schadenskatalogen und Algorithmen zur Zustandsbewertung erkennbar. Durchgängige georeferenzierte Bauwerksinformationssysteme für Tunnelbauwerke zur umfassenden Verwaltung des Datenbestandes auf Bauwerks- und Netzebene kommen vereinzelt zur Anwendung, sind aber international noch nicht durchgängig Stand der Technik.

7 ANHANG

7.1 Fragenkatalog für internationale Befragung

AMBITION: Methoden der Zustandsbewertung Current Practice und State-of-the-Art

Diese Umfrage ist Teil des **österreichischen Forschungsprojekts AMBITION** (Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und Bewertung von Eisenbahn- und Straßentunnel), welches durch Mittel der ASFINAG, FFG und ÖBB im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF) 2015 gefördert wird.

Ziel des Fragebogens ist es, Information über die gängige Praxis sowie den derzeitigen State-of-the-Art der Zustandsbewertung von Tunnel zu erlangen.

Für die Beantwortung der Fragen brauchen Sie ca. **15 Minuten**.

Vielen Dank, dass Sie sich Zeit nehmen, um an dieser Umfrage teilzunehmen.

Ihre Angaben werden streng vertraulich behandelt und nur im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojekts verwendet. Die Auswertung erfolgt in anonymisierter Form durch Mitarbeiter des AIT Austrian Institute of Technology.

1. Arbeiten Sie im Bereich des Tunnel-Asset-Managements und/oder der Zustandsbewertung von Tunnel?

- Ja
 Nein

Falls "Nein", könnten Sie uns einen Kollegen oder einen Experten für die Zustandsbewertung von Tunnel empfehlen?

Weiter

2. Arbeiten Sie im Bereich Straße oder Schiene?

- Straße
 Schiene

3. Aufgrund welcher den nachfolgenden Kriterien wird die Zustandsbewertung von Tunnel in Ihrem Land/Ihrer Organisation durchgeführt:

- Internationale** Richtlinien/technische Standards/Normen
- Nationale** Richtlinien/technische Standards/Normen
- Interne** Dokumente/Arbeitspapiere/Handbücher
- Informelles** Wissen/traditionelle Methoden
- Anderes**

Falls "Anderes" gewählt, bitte erläutern:

4. Nennen Sie bitte die wichtigsten Normen und Regelwerke, die in Ihrem Land für die Zustandsbewertung von Tunnel verwendet werden.

5. Geben Sie bitte die in Ihrem Land gebräuchlichen Arten der Zustandsbewertung von Tunnel an.

Sollte in Ihrem Land eine andere Bezeichnung verwendet werden, nennen Sie diese bitte im Textfeld.

	Art der Zustandsbewertung	Organisation	Intervall (Jahre)	Qualifikation
1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
6	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
7	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
8	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Falls "Andere" gewählt, bitte erläutern:

6. Bitte geben Sie an, welche Methoden der Datengewinnung verwendet werden.

	Laufende Überwachung	Kontrolle	Prüfung	Sonderprüfung	Andere
Visuelle Inspektion	<input type="checkbox"/>				
Stichprobenentnahme/Materialtestung	<input type="checkbox"/>				
Akustisch/Ultraschall	<input type="checkbox"/>				
Magnetisch	<input type="checkbox"/>				
Laserscanner	<input type="checkbox"/>				
Photogrammetrie	<input type="checkbox"/>				
Andere	<input type="checkbox"/>				

Falls "Andere" gewählt, bitte erläutern:

7. Wofür werden die erhobenen Zustandsdaten vordergründig verwendet?

- Erfüllung gesetzlicher Erfordernisse/Regulierungen
- Planung von Erhaltungsmaßnahmen/Erhaltungsstrategie
- Entwicklung von Alterungsmodellen
- Andere

Falls "Andere" gewählt, bitte erläutern:

8. Gelangen Alterungsmodelle in sämtlichen Bereichen der Tunnel Zustandsbewertung zur Anwendung? (z.B. Planung von Erhaltungsmaßnahmen, Berechnung von Indizes der Streckenverfügbarkeit)

- Ja, derartige Alterungsmodelle wurden speziell für Tunnel entwickelt
- Ja, es werden allgemeingültige Alterungsmodelle verwendet, die jedoch nicht speziell für Tunnel entwickelt wurden.
- Nein

Bitte erläutern:

9. Welche der nachfolgenden Aspekte sind Ihrer Meinung nach für den derzeitige Stand der Zustandsbewertung zutreffend?

	Hoher Verbesserungsbedarf	Verbesserungsbedarf	Nicht relevant	Nicht zutreffend
Unzureichende finanzielle Ressourcen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zeitliche Beschränkungen/ Zeitdruck vor Ort	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Technologische Einschränkungen (z.B. Auflösung von Tunnelscanner)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Internationale/nationale Reglementierungen (z.B. Arbeits-/Umweltschutz)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Datenverfügbarkeit für Planung/Vorbereitung /Durchführung von Zustandsbewertungen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Andere	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Falls "Andere" gewählt, bitte erläutern:

* 10. Sind die aktuellen nationalen Richtlinien/Normen Ihrer Meinung nach ausreichend?

- Ja
 Nein

Zurück

Weiter

11. Bitte geben Sie mögliche Gründe an, warum die gängigen Richtlinien/Normen Ihrer Meinung nach nicht ausreichen:

- Unklare Formulierung
- Veraltet
- In Widerspruch zu anderen Richtlinien/Normen
- Zu generell/unspezifisch
- Subjektiv (mangelnde Objektivität, Vergleichbarkeit)
- Andere

Falls "Andere" gewählt, bitte erläutern:

Zurück

Weiter

12. Wenn Sie an den Ergebnissen des Fragebogens interessiert sind, hinterlassen Sie uns bitte Ihre Kontaktdaten:

Name	<input style="width: 100%;" type="text"/>
Firma	<input style="width: 100%;" type="text"/>
Adresse	<input style="width: 100%;" type="text"/>
Land	<input style="width: 50%;" type="text"/>
E-Mail-Adresse	<input style="width: 100%;" type="text"/>
Telefonnummer	<input style="width: 100%;" type="text"/>

Zurück

Fertig

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] WENINGER-VYCUDIL, A.; SIMANEK, P.; ROHRINGER, T.; HABERL, J.: (2009): „Handbuch Pavement Management in Österreich“, Wien, 2009.
- [2] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Tunnelbau, Arbeitsausschuss Leistungsbild Bestandsprüfung von Tunnel: „Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS) 13.03.31, Straßentunnel – baulich konstruktive Teile“, Wien, 2013.
- [3] AUSTRIAN STANDARDS (2010): „ÖNORM EN 13306: Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung“, EN 13306:2010 10 01, Wien.
- [4] AUSTRIAN STANDARDS (2013): „ÖNORM EN 1990: Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung“, EN 1990:2013 03 15, Wien.
- [5] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (1999): DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung, DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), Ausgabe 1999-11.
- [6] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (2017): „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF), Download unter: <http://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Fachthemen/b4-Bauwerkspruefung-RI-EBW-PRUEF/b4-Bauwerkspruefung-RI-EBW-PRUEF.html>, Abfragedatum: 12.07.2017
- [7] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2013): „Anweisung Straßeninformationsdatenbank Segment Bauwerksdaten (ASB-ING)“, Bau- und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Download unter: <http://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Publikationen/Regelwerke/Erhaltung/ASB-ING.html>, Abfragedatum: 13.07.2017
- [8] ASTRA - BUNDESAMT FÜR STRASSEN (2012). „KUBA 5.0 – Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel, Datenerfassungshandbuch“, ASTRA 62014, Ausgabe 2012 V1.00, Bern.
- [9] AUSTRROADS (2010): “Guide to Road Tunnels – Part 1: Introduction to Road Tunnels”, Austroads Publication No. AGRT01/10, ISBN 978-1-921709-27-2, Sydney.
- [10] AUSTRROADS (2015): “Guide to Road Tunnels – Part 2: Planning, Designing and Commissioning”, Austroads Publication No. AGRT02-15, ISBN 978-1-925294-80-4, Sydney.

- [11] AUSTRROADS (2010): „Guide to Road Tunnels – Part 3: Operation and Maintenance“, Austroads Publication No. AGRT03/10, ISBN 978-1-921709-32-6, Sydney.
- [12] DEUTSCHE BAHN (2013): „Richtlinie (Ril) 821.2003 – Oberbau inspizieren“.
- [13] DEUTSCHE BAHN (2011): „Richtlinie (Ril) 853.8001 – Inspektion im EDV-System SAP“, Fachautor: VEC 3, Alfred Meinschmidt.
- [14] DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (2005): „Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual“, Washington. Download unter:
<https://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/inspectman.pdf>, Abfragedatum: 14.07.2017
- [15] NZ Transport Agency (2013): „Tunnels management and inspection policy“, NZTA S8:2017, Wellington.
- [16] NZ Transport Agency (2011): „Bridges and other highway structures inspection policy“, NZTA S6:2011, Wellington.
- [17] HIGHWAYS AGENCY (2007): „Inspection Manual for Highway Structures“, Publisher: TSO, ISBN: 9780115527975.
- [18] HIGHWAYS AGENCY (1995): „Inspection and Records for Road Tunnels“, BD 53/95.
- [19] HIGHWAYS AGENCY (2003): „Maintenance of Road Tunnels“, BA 72/03.
- [20] MINISTRO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI (2005): „Decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 28, Sicurezza nelle gallerie ferroviarie“.
- [21] WENINGER-VYCUDIL, A.; GRAGGER, K.; BROZEK, B.; LITZKA, J; PETSCHACHER, M. (2014): „Asset Management Report 2014“, unveröffentlicht.
- [22] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Straßenoberbau, Arbeitsausschuss Erhaltungsplanung: „Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS) 13.01.16, Bewertung von Oberflächenschäden und Rissen auf Asphalt- und Betondecken“, Wien, 2013.
- [23] KRAWTSCHUK, A. (2014): „Optimierung von Monitoringkonzepten für die Erhaltungsplanung von Bogenbrücken“, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- [24] HOLST, R.; STREICHER, D.; GARDEI, A.; KOHL, C.; WÖSTMANN, J.; WIGGENHAUSER, H. (2006): „Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für Brückenbauwerke“, Bergisch Gladbach, Dezember.

- [25] YAMAMOTO, T.; ACKERMANN, A.W.: „Diagnosis and repair of a subway tunnel 75 years old“, In: Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises, S. 1969–1974.
- [26] RICHARDS, J.A. (1998): „Inspection, maintenance and repair of tunnels: International lessons and practice“, Tunnelling and Underground Space Technology, Bd. 13, Nr. 4, S. 369–375.
- [27] WIMSATT, A. et al. (2012): „Mapping Voids, Debonding, Delaminations, Moisture, and Other Defects Behind or Within Tunnel Linings“, SHRP 2 Renewal Project R06G.
- [28] MONTERO, R.; VICTORES, J. G.; MARTÍNEZ, S.; JARDÓN, A.; BALAGUER, C. (2015): „Past, present and future of robotic tunnel inspection“, Autom. Constr., Bd. 59, S. 99–112.
- [29] BALAGUER, C.; MONTERO, R.; VICTORES, J. G.; MARTÍNEZ, S.; JARDÓN, A. (2014): „Towards Fully Automated Tunnel Inspection: A Survey and Future Trends“, 31st Int. Symp. Autom. Robot. Constr. Min. ISARC 2014, Bd. Keynote Paper.
- [30] VICTORES, J. G.; MARTÍNEZ, S.; JARDÓN, A.; BALAGUER, C. (2011): „Robot-aided tunnel inspection and maintenance system by vision and proximity sensor integration“, Autom. Constr., Bd. 20, Nr. 5, S. 629–636.
- [31] MORISHIMA, H.; ODAKA, T.: „Concrete Structures and Nondestructive Testing.
- [32] MAKAR, J.; DESNOYERS, R. (2001): „Magnetic field techniques for the inspection of steel under concrete cover“, NDT E Int., Bd. 34, Nr. 7, S. 445–456.
- [33] SAWADE, G.; KRAUSE, H.-J. (2007): „Inspection of Prestressed Concrete Members using the Magnetic Leakage Flux Measurement Method — Estimation of Detection Limit“, in Advances in Construction Materials 2007, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 639–649.
- [34] CHOU, S. G. et al. (2017): „Using Terahertz Waves to Identify the Presence of Goethite via Antiferromagnetic Resonance“, Applied Magnetic Resonance, Bd. 48, Nr. 6, S. 559–569.
- [35] NAKAMURA, K.; OHTSU, H.; TAKEUCHI, A. (2006): „Development of a tunnel management system for existing railroad tunnel“, Tunnelling and Underground Space Technology, Bd. 21, Nr. 3–4, S. 312–313.
- [36] WHITE, J. B.; WIEGHAUS, K. T.; KARTHIK, M. M.; SHOKOUHI, P.; HURLEBAUS, S.; WIMSATT, A. (2016): „Nondestructive Testing Methods for Underwater Tunnel

Linings: Practical Application at Chesapeake Channel Tunnel“, J. Infrastruct. Syst., S. B4016011.

- [37] YU, S.-N.; JANG, J.-H.; HAN, C.-S. (2007): „Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel“, *Autom. Constr.*, Bd. 16, Nr. 3, S. 255–261.
- [38] ZAN, Y.; LI, Z.; SU, G.; ZHANG, X. (2016): „An innovative vehicle-mounted GPR technique for fast and efficient monitoring of tunnel lining structural conditions“, *Case Stud. Nondestruct. Test. Eval.*, Bd. 6, S. 63–69.
- [39] <http://www.igs-gmbh.eu/wp-content/uploads/2015/06/Bohrkerne.jpg>, Stand 06/2017
- [40] <http://www.penetradar.com/images/jim-central-park.jpg>. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.penetradar.com/images/jim-central-park.jpg>. [Zugegriffen: 18-Sep-2017].
- [41] <http://www.penetradar.com/images/tunnel-ir.jpg>, Stand 09/2017
- [42] http://www.geographica.hr/site/public/images/content/gradevina_tuneli_3.jpg, Stand 09/2017
- [43] ÖBB-Infrastruktur AG Regelwerk (2012): 06.01.02 Konstruktiver Ingenieurbau: Instandhaltung – Instandhaltungsplan. Stand 21.12.2012
- [44] Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein (1997): Schweizer Norm SN 588 469: SIA 469. Erhaltung von Bauwerken. Ausgabe 1997
- [45] Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein (2011): Schweizer Norm SN 505 269: SIA 269: Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken. Ausgabe 2011.
- [46] Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein (2004): Schweizer Norm SN 505 269/2: SIA 269/2: Erhaltung von Tragwerken – Betonbau. Ausgabe 2004.
- [47] The Highways Agency (1995): „Design Manual for Roads and Bridges, Volume 3 Highway Structures: Inspection and Maintenance, Section 1 Inspection, Part 6, BD 53/95, Inspection and Records for Road Tunnels“. July 1995
- [48] The Highways Agency (2007): „Design Manual for Roads and Bridges, Volume 3 Highway Structures: Inspection and Maintenance, Section 1 Inspection, Part 4, BD 63/07, Inspection of Highway Structures“. February 2007.
- [49] The Highways Agency (2009): „Design Manual for Roads and Bridges, Volume 3 Highway Structures: Inspection and Maintenance, Section 1 Inspection, Part 5, BD 93/09, Inspection of Highway Structures“. February 2009.

- [50] The Highways Agency (2007a): „Design Manual for Roads and Bridges, Volume 3 Highway Structures: Inspection and Maintenance, Section 2 Maintenance, Part 1, BD 62/07, Inspection of Highway Structures“. February 2007.
- [51] Trafikverket (2014): TRV 2014:95667 „Trafikverket Investering, Stora Projekt: Underhåll: Krav på inspektion av byggnadsverk“2014-12-16.
- [52] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009): Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV): Verwaltungsvorschrift VV-WSV 2101: „Bauwerksinspektion“, Einführungserlass: WS 13/5257.15/4 vom 27.02.2009
- [53] Deutsches Institut für Normung e.V. (2013) DIN EN 13508-1 „Beurteilung ovn Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 1: Allgemeine Anforderungen“. 2013-01.
- [54] Deutsches Institut für Normung e.V. (2011) DIN EN 13508-2 „Beurteilung ovn Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion“. 2011-08.
- [55] Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (2013): ÖWAV-Regelblatt 43: „Optische Kanalinspektion“. 2013.
- [56] Deutsches Institut für Normung e.V. (2012) DIN EN 13508-1 „Beurteilung ovn Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 1: Allgemeine Anforderungen“. 2013-01.
- [57] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. – DWA (2017): DWA-Regelwerk Merkblätter DWA-M 149 Teile 1 bis 8. Stand 2017
- [58] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Brückenbau, Arbeitsausschuss Brückenerhaltung und Brückendatenbank: „Lebenszykluskostenermittlung für brücken (RVS) 13.05.11, Wien, 2017.
- [59] AUSTRIAN STANDARDS (2006): „Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahn- und Straßenbrücken“, ONR 24008:2006 12 01, Wien.
- [60] WHITE, J.; et al. (2015): “Nondestructive Testing Methods for Underwater Tunnel Linings”, International Symposium Non-Destructive Test.i.Civ.Eng.(NDT-CE),4p.
- [61] WIMSATT, A. et al.(2013): “Mapping Voids, Debonding, Delaminations, Moisture, and Other Defects Behind or Within Tunnel Linings”, SHRP2,Proj.No.R06,555p.

AMBITION

Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und
Bewertung von Eisenbahn- und Straßentunnel

Kriterienkatalog für die Erstellung von bauwerkspezifischen Alterungs- modellen

Deliverable D2

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2015

Version 0.6

Versionshistorie

Version	Änderung	Bearbeiter
0.1	Berichtsvorlage, Formatvorlagen, Gliederung	STEFAN
0.2	Input AIT-BD	PRAMMER
0.3	Input ILF	GRUNICKE
0.4	Input AIT-VS	STÜTZ
0.5	Review ILF	GRUNICKE
0.6	Review ASFINAG/ÖBB	STEFAN

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	4
1 Analyse bestehender Datengrundlagen	5
1.1 Sichtung des Datenbestands der ASFiNAG.....	5
1.1.1 Baujahr.....	9
1.1.2 Gesamtlänge.....	9
1.1.3 Querschnitt.....	10
1.1.4 Material	10
1.1.5 Clusterung.....	11
1.2 Sichtung des Datenbestands der ÖBB.....	12
1.3 Datenaufbereitung und Ableitung von Degradationskurven für das Autobahn- und Schnellstraßennetz der ASFiNAG.....	14
1.3.1 Ermittlung der durchschnittlichen Verweildauer pro Zustandsnote	16
1.3.2 Ableitung von Degradationskurven	19
1.4 Datenaufbereitung und Ableitung von Degradationskurven für das Schienennetz der ÖBB	30
1.4.1 Ermittlung der durchschnittlichen Verweildauer pro Zustandsnote	30
1.4.2 Ableitung von Degradationskurven	30
1.5 Zusammenfassung der Degradationskurven	38
2 Generische Alterungsmodelle	40
2.1 Allgemeines.....	40
2.2 Bestehende Alterungsmodelle und Verteilungsannahmen auf Werkstoff-, Bauteil- und Bauwerksebene	40
2.2.1 Schadensprozesse.....	40
2.2.2 Modelle für Korrosionsbeginn (Initialphase).....	44
2.2.3 Modelle Korrosionsgeschwindigkeit	45
2.2.4 Modelle Rissbildung und Entwicklung.....	45
2.3 Bewertung der Modelle in Hinblick auf Tunnel Asset Management	47

2.3.1	Allgemeines.....	47
2.3.2	Vergabe der Zustandsnote.....	47
2.3.3	Festlegung der Eingangsparameter unter Chloridbeanspruchung	49
2.3.4	Ergebnisse der Beurteilung unter Chloridbeanspruchung (Straßentunnel) .	52
2.3.5	Festlegung der Eingangsparameter unter Karbonatisierung (Bahntunnel)..	55
2.3.6	Ergebnisse der Beurteilung unter Karbonatisierung (Bahntunnel).....	57
2.3.7	Exkurs Inspektionsintervalle.....	58
3	Auswahl geeigneter Umfeldkriterien.....	59
3.1	Identifikation zustandsrelevanter Parameter	59
3.1.1	Betonkorrosion	59
3.1.2	Mauerwerk	61
3.1.3	Stahl	62
3.1.4	Geomechanik.....	63
3.2	Parametrisierung auf Basis der BAUT-Datenanalyse	63
3.3	Auswahl geeigneter Parameter und Umfeldkriterien.....	68
4	Kriterienkatalog für die Erstellung bauwerksspezifischer Alterungsmodelle	70
	Literaturverzeichnis.....	72

Einleitung

Ziel des VIF-Projekts AMBITION ist es, neuartige Technologien und Messverfahren im Tunnel Asset Management zu evaluieren, um eine objekt-spezifische Beurteilung von Tunnelbauwerken nach objektiven und standardisierten Bewertungskriterien zu ermöglichen. Es wird ferner angestrebt, zustandsrelevante Parameter und Umfeldkriterien zu identifizieren, um in weiterer Folge einen Anforderungskatalog für die Erstellung von Alterungsmodellen auf Bauwerksebene herzuleiten.

Zu diesem Zweck werden bestehende Bauwerksdatenbanken hinsichtlich vorhandener Zustandsdaten und deren Historien analysiert. Für die Zustandsbewertung von Tunnelbauwerken sieht die österreichische RVS 13.03.31 [1] ein einheitliches Notensystem (1 – Sehr guter Gesamtzustand bis 5 – Schlechter Gesamtzustand) vor, wobei die Einstufung Großteils sehr allgemein gehalten ist und den einzelnen Prüflingenieuren einen großen Freiraum hinsichtlich der Interpretation zugesteht. Es bestehen auf nationaler Ebene zwar Regelwerke [29], welche für einzelne Schadensbilder Schwell- und Grenzwerte definieren. Anders als jedoch z.B. im Bereich Pavement Management, wo aus objektive Messdaten unmittelbar und nachvollziehbar Zustandswerte und Zustandsklassen abgeleitet werden können (vgl. RVS 13.01.16 [2]), erfolgt in der bestehenden RVS 13.03.31 die Einordnung von Bauteilen und des Gesamtbauwerks anhand global formulierter funktionaler Kriterien. Ein einheitlicher Algorithmus zwecks Ableitung der Gesamtnote des Bauwerks beispielsweise aus den einzelnen Bauteilnoten wird nicht vorgegeben.

Für die Erstellung eines Kriterienkatalogs wurden nachfolgende Schritte durchgeführt:

1. Erhebung der Datengrundlage bei den Infrastrukturbetreibern (Kapitel 1)
2. Sichtung und Beurteilung der Datenqualität sowie der Vollständigkeit (Kapitel 1.1 und Kapitel 1.2)
3. Ermittlung von Degradationskurven auf Bauteilebene (Kapitel 1.3 und Kapitel 1.4)
4. Analyse generischer Alterungsmodelle (Kapitel 2)
5. Identifikation zustandsrelevanter Parameter und Umfeldkriterien (Kapitel 3)

Auf Grundlage der beiden Meilensteine:

M 3.1: „Abschluss Katalog zustandsrelevanter Parameter und Umfeldkriterien“

M 3.2: „Abschluss Literaturanalyse Alterungsmodelle“

fasst das vorliegende Deliverable D2 (Kriterienkatalog für die Erstellung von bauwerkspezifischen Alterungsmodellen) die im Zuge des Arbeitspakets 3 ausgearbeiteten Ergebnisse zusammen.

1 ANALYSE BESTEHENDER DATENGRUNDLAGEN

Die Abschätzung des optimalen Zeitpunktes für Instandsetzungs- bzw. Reinvestitionsmaßnahmen beruht heutzutage in erster Linie auf der Entwicklung von realitätsnahen, zustandsbasierten Alterungs- bzw. Zustandsprognosemodellen. Deren Ursprung bilden in der Regel die gemessenen Zustandsdaten bzw. die auf objektiven Kriterien beruhenden Zustandsbeurteilungen. In Österreich werden Tunnelbauwerke in periodischen Abständen kontrolliert bzw. inspiziert (siehe Deliverable D1), um detaillierte Informationen über den Zustand eines Bauwerks zu erhalten. Die erhobenen Daten stellen die Basis für das Asset Health Management von ASFiNAG und ÖBB dar und könnten (falls die Datenlage es zulässt) für die Formulierung von Alterungsmodellen herangezogen werden.

1.1 Sichtung des Datenbestands der ASFiNAG

Grundlage für die Erhebung von Tunneldaten auf Bauwerks- bzw. Bauteilebene bildet die RVS 13.04.22 [3]. Diese enthält eine Liste jene Parameter inklusive Ausprägungen (Einheit, Skalenniveau etc.), welche für die Charakterisierung von Straßentunnel in geschlossener Bauweise zwingend erforderlich sind.

Diese Informationen werden in der ASFiNAG in einer eigenen Bauwerksdatenbank (BAUT) gespeichert. Die BAUT (aktuelle Softwareversion 6.5.0) dient dazu, die Zustandsentwicklung von Tunnelbauwerken abzubilden und stellt somit das „Datengerüst“ für die strategischen Entscheidungen des Erhaltungsmanagements im Bereich Tunnel dar. Im Rahmen des gegenständlichen Projekts wurden die nachfolgenden Analysen sowie die Ableitung der Degradationskurven anhand eines BAUT-Auszugs durchgeführt.

Die BAUT-Daten wurden von der Firma PEC – Petschacher Consulting in zwei ARFF-Dateien (Attribute-Relation File Format) exportiert (Stand 03.04.2017). Eine Datei enthält die sogenannte Master-Objekt Tabelle mit den Basisdaten der Tunnelobjekte. Die zweite Datei enthält die Zustandsnoten in einer erweiterten ARFF-Spezifikation. Auf Grund dieser Formaterweiterung musste ein eigener Parser zur Verarbeitung der Daten implementiert werden.

Folgende Angaben zur Tunnelröhre (Systemdaten) wurden im Rahmen von AMBITION ausgewertet:

- **Baujahr** (BJ)
- **Portalhöhe Anfang** (HA)
- **Portalhöhe Ende** (HE)

- **Bauweise (BW)**
 - o Offen
 - o Geschlossen
 - o Gemischt
- **Lichte Höhe (H)**
- **Lichte Breite (B)**
- **Länge Röhre (L)**
- **Länge geschlossene Bauweise (Lg)**
- **Sohlstärke (DSohle)**
- **Blockanzahl (NB)**
- **Querschnitt (QS)**
 - o ohne Zwischendecke (ohne ZD)
 - o mit Zwischendecke (ZD)
 - o Zwischendecke und Luftkanal (ZD_LK)
- **Abdichtung (WP)**
- **Material Innenschale (M)**
 - o Beton (B)
 - o Stahlbeton (StB)
 - o Spritzbeton (Spr)
 - o Stein (Ste)
- **Art der Sohlausbildung**
 - o Offene Sohle (oS)
 - o Sohlplatte (SP)
 - o Sohlgewölbe (SG)
- **Beschichtung (Besch)**
- **Fahrbahntwässerung (EW)**
- **Abgehängte Bauweise (abgBW)**
- **Material Zwischendecke (ZDmat)**
- **Trennwand vorhanden (TW)**

Die Zustandsnoten wurden für verschiedene Bauteile exportiert. Konkret lagen für die Auswertungen folgende Bauteile vor (siehe Tabelle 1):

Tabelle 1: Überblick über Bauteilarten der BAUT-Tunnel Datenbank

ID	Name
201	Tunnelröhre (TUN)
202	Fahrbahnaufbau/Belag (FB/Bel)
203	Erhöhter Seiten-/Mittelstreifen (ErhS/MS)
204	Abdichtung/Entwässerung (ABD/ENTW)
205	Portal/Gesims (POR/GES)
206	Zwischendecke/Trennwand (ZD/TW)
207	Betriebsräume/Nischen (BR/NI)
208	Bauliche Ausrüstung (AUS)
209	Flucht-, Rettungswegbauwerk, Zugangsbauwerk (FLU/Z)
210	Kaverne/Pannenbucht/Umkehrmöglichkeit (KAV)
211	Schacht (SCH)

Der exportierte Datensatz enthält in der Master-Objekt Tabelle insgesamt 854 Datensätze. Durch Wegfiltern der Objekte auf Landesstraßen B und L und anschließender Verschneidung mit den exportierten Zustandsnoten standen 254 Tunnelobjekte für die weiteren Analysen zur Verfügung.

Um einen Überblick über den Datenbestand bzw. fehlender Werte zu erhalten, wurden in einem ersten Schritt verschiedene Visualisierungsmethoden verwendet. Anhand der Abbildung 1 wird ersichtlich, dass nur wenige der genannten Parameter im BAUT-Datensatz (nahezu) vollständig vorhanden sind. Im linken Teil der Abbildung scheinen die metrisch skalierten Variablen auf, im rechten Teil die nominal- bzw. ordinalskalierten Parameter. Die Farben grau steht für fehlende Werte (missing values), d.h. der überwiegende Teil der als relevant erachteten Parameter konnte nicht ausgewertet werden, da diese in der Praxis der Tunnelinspektion nicht erhoben werden.

In weiterer Folge werden daher nur die Parameter **Baujahr**, **Gesamtlänge**, **Querschnitt** und **Material** für weiterführende Analysen herangezogen, da die Datenlage hier als ausreichend erachtet wurde.

Die Ergebnisse werden in Kap. 1.3 dokumentiert und in Kap. 1.5 diskutiert.

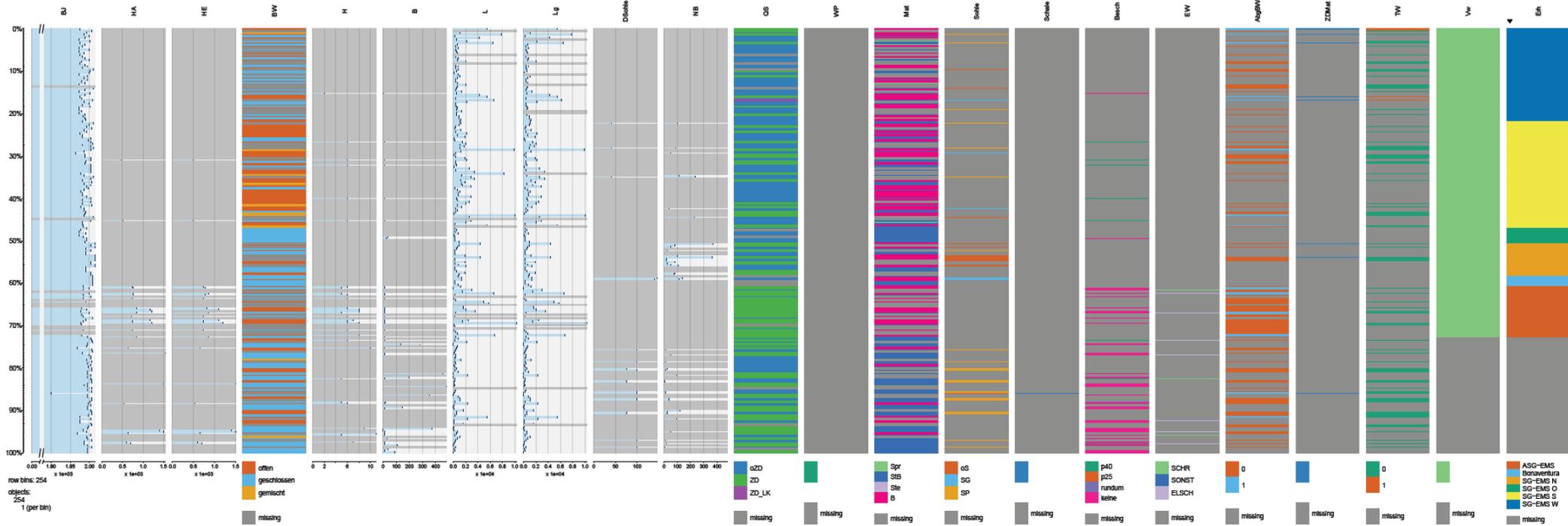


Abbildung 1: Verfügbarkeit relevanter Parameter in der BAUT (fehlende Angaben in grau)

1.1.1 Baujahr

Als Baujahr gilt das Jahr der Fertigstellung. Der Parameter ist im zur Verfügung gestellten BAUT-Datensatzes fast vollständig vorhanden (Befüllungsgrad >95%). Wie man der nachfolgenden Abbildung 2 entnehmen kann, wurde ein Großteil der bestehenden Tunnelröhren (70%) zwischen 1985-2009 errichtet. Insgesamt 186 Tunnelröhren wurden vor dem Jahr 2003 errichtet und weisen daher aufgrund des in der RVS 13.03.31 [1] vorgegebenen 12-jährigen Inspektionsintervalls zumindest eine Prüfnote sowie mehrere Kontrollnoten (Intervall: alle 2 Jahre) auf. Das Baujahr ist ein wichtiger Parameter zur Ableitung von Degradationskurven.

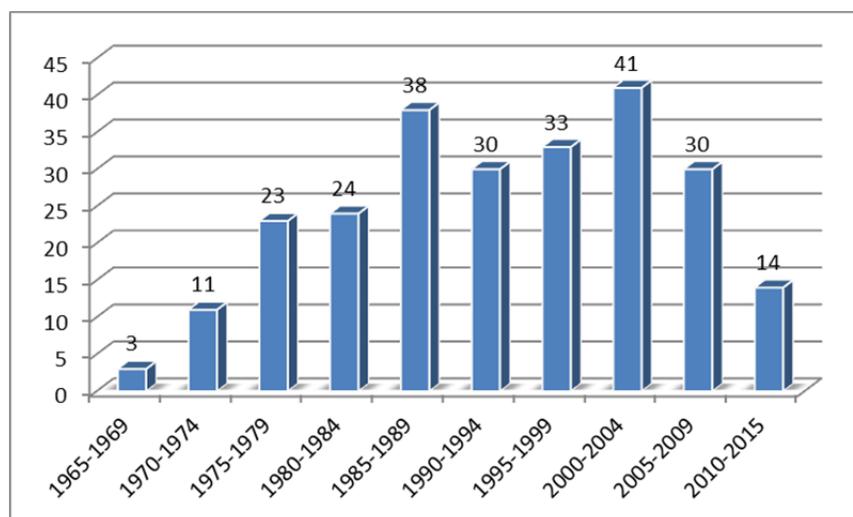


Abbildung 2: Verteilung der bestehenden Tunnelröhren nach Jahren

1.1.2 Gesamtlänge

Die Ermittlung der Tunnellänge erfolgt je Röhre und ergibt sich aus der Länge zwischen den Enden der Firstunterkante in der Konstruktionsachse (siehe Abbildung 3). Im BAUT-Datensatz ist der Parameter fast vollständig vorhanden und weist einen Befüllungsgrad > 95% auf. Die mittlere Tunnellänge beträgt 1.250m, 75% aller untersuchten Tunnel haben jedoch eine Gesamtlänge < 1.400m. Die Tunnellänge wird u.a. zur Clusterung von Degradationskurven verwendet.

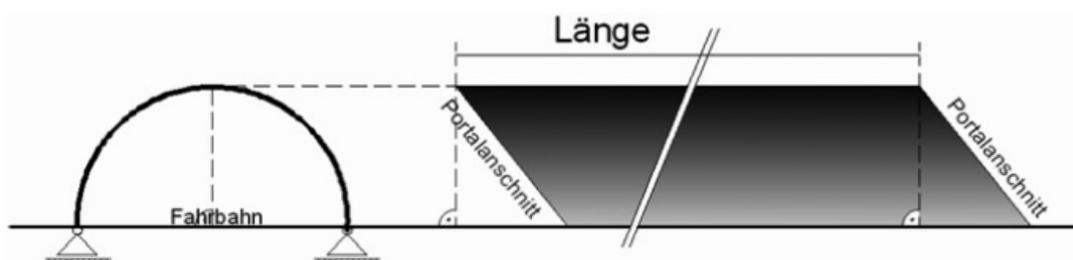


Abbildung 3: Erläuterung der Gesamtlänge gemäß [3]

1.1.3 Querschnitt

Die Querschnittsausbildung erfolgt gemäß RVS 13.04.22 [3] und unterscheidet die drei Kategorien (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5):

- ohne Zwischendecke (ohne ZD)
- mit Zwischendecke (ZD)
- mit Zwischendecke und Luftkanal (ZD+LK)



Abbildung 4: Tunnelquerschnitte gemäß [3]

Tabelle 2: Querschnittskategorien im BAUT-Datensatz

	n	missing	distinct
	242	15	3
Value	oZD	ZD	ZD_LK
Frequency	136	105	1
Proportion	0.562	0.434	0.004

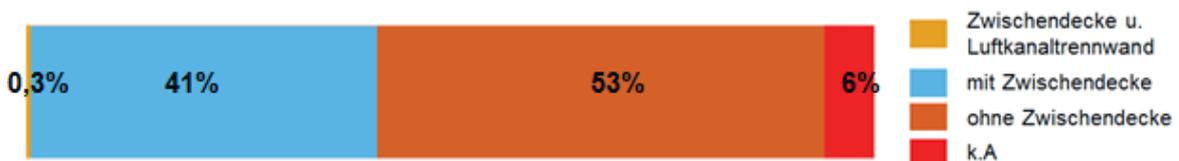


Abbildung 5: Verteilung der bestehenden Tunnelröhren nach Querschnittskategorien

1.1.4 Material

Der Parameter „Material“ ist in rd. 75% der BAUT-Daten ausgefüllt (siehe Tabelle 3). Der Großteil der Innenschalen ist aus Stahlbeton (42%) bez. beton (30%). Spritzbeton spielt mit 3% der Innenschalen nur eine untergeordnete Rolle (siehe Abbildung 6).

Tabelle 3: Material der Innenschale im BAUT-Datensatz

	n	missing	distinct
	192	65	3
Value		Spr	StB B
Frequency		6	109 77
Proportion		0.031	0.568 0.401

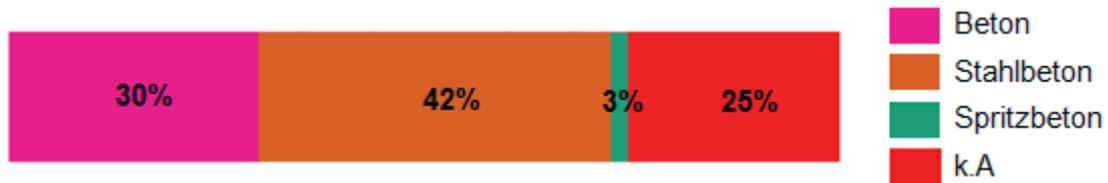


Abbildung 6: Verteilung der Tunnelröhren nach Material der Innenschale

1.1.5 Clustering

Aufgrund des im Deliverable D1 vorgenommenen Scoping (siehe Kapitel 2.1) stehen bergmännische Bauweisen im Mittelpunkt der Betrachtungsweise. Eine Überprüfung der BAUT-Angaben hat jedoch ergeben, dass die vergebenen Attribute oftmals nicht zutreffen, da zahlreiche Tunnel in gemischter Bauweise (Tunnelportal: offener Bauweise, Tunnelröhre: geschlossener Bauweise) errichtet wurden. Aufgrund des zur Verfügung gestellten Datensatzes war daher die Differenzierung in offene, geschlossene und gemischte Bauweise nicht möglich.

In Abstimmung mit der ASFiNAG wurde daher eine Clustering des Tunnelbestands nach:

- Geschlossene/gemischte Bauweise
- Offene Bauweise

vorgenommen (siehe [Abbildung 7](#)). Die Elemente des Cluster 2 (offene Bauweise) wurden anhand einer Plausibilitätsprüfung durch Fachexperten von ASFiNAG und ILF identifiziert und resultieren in einer homogenen Stichprobe, die in weiterer Folge den Mitgliedern des Cluster 1 (geschlossene/gemischte Bauweise) gegenübergestellt wurde.



Abbildung 7: Clusterung der Tunnelröhren nach Bauweise

1.2 Sichtung des Datenbestands der ÖBB

Bei den Bahntunnels wurde nach Abstimmung mit den ÖBB bewusst eine gegenüber den Straßentunneln abweichende Herangehensweise gewählt, welche der vorhandenen Datengrundlage und der Heterogenität an Bauweisen und Altersstruktur gerecht wird. Seitens der ÖBB konnten keine Tunneldaten zur Verfügung gestellt werden. Das Alterungsverhalten von Eisenbahntunneln, im Besonderen jenes des Ausbaus, wurde anhand von Experteninterviews mit Anlageverantwortlichen der ÖBB durchleuchtet. Hierfür kam ein vereinfachter dreistufiger Delphi-Prozess zur Anwendung (vgl. [Abbildung 8](#)).

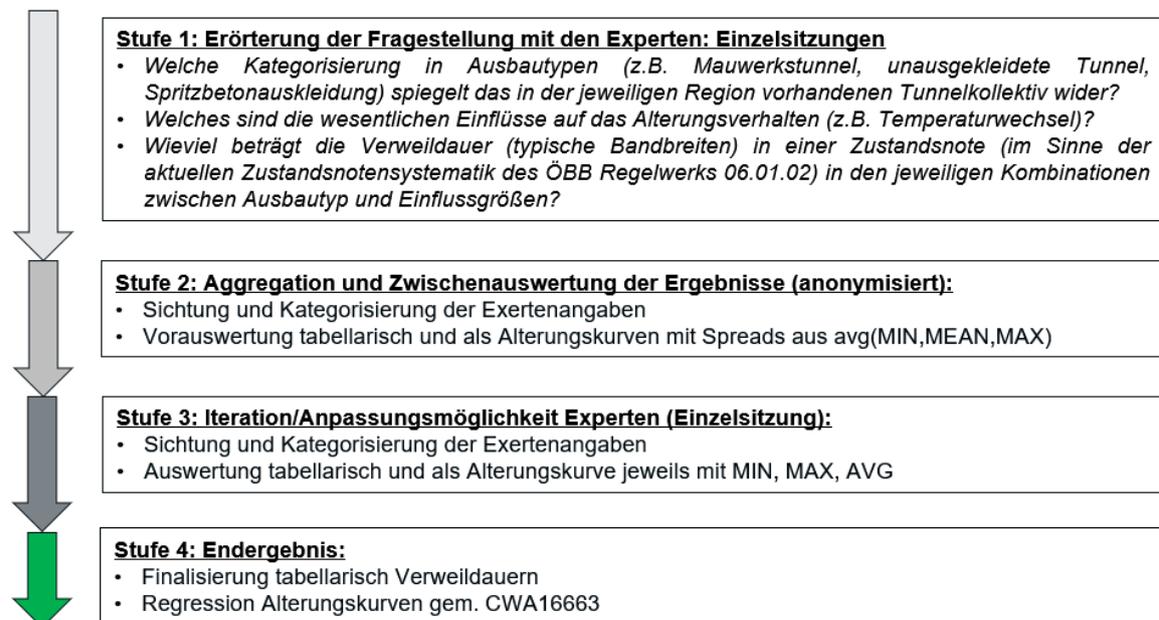


Abbildung 8: Ablauf Delphi-Prozess zur Erfassung von Expertenwissen der Anlageverantwortlichen der ÖBB Bahntunnel

Stufe 1: Erörterung der Fragestellung mit den Experten:

- Welche Kategorisierung in Ausbautypen (z.B. Mauerwerktunnel, unausgekleidete Tunnel, Spritzbetonauskleidung) spiegelt das in der jeweiligen Region vorhandenen Tunnelkollektiv wider?
- Welches sind die wesentlichen Einflüsse auf das Alterungsverhalten (z.B. Temperaturwechsel)?
- Wieviel beträgt die Verweildauer (typische Bandbreiten) in einer Zustandsnote (im Sinne der aktuellen Zustandsnotensystematik des ÖBB Regelwerks 06.01.02 [1]) in den jeweiligen Kombinationen zwischen Ausbautyp und Einflussgrößen?

Die Fragestellung wurde von den beiden Experten alleine, d.h. ohne Diskussion untereinander beantwortet.

Stufe 2: Aggregation und Zwischenauswertung der Ergebnisse

Die Angaben der Experten wurden gesichtet und systematisiert zusammengeführt. Das Alterungsverhalten wurde sowohl tabellarisch als auch in Form von Degradationskurven mit den zunächst von den Experten angegebenen Bandbreiten aufbereitet. Bei den Degradationskurven wurde die Gesamtstreuung anhand der drei Parameter Minima, Maxima und Mittelwert dargestellt.

Stufe 3: Iteration bzw. Anpassungsmöglichkeiten durch Experten

Die Zwischenergebnisse wurden den Experten in Einzelsitzungen vorgelegt, damit diese das Ergebnis aus ihrer Sicht nochmals kritisch bewerten und Feedback (z.B. in Form korrigierter Angaben aus Stufe 1) geben können.

Stufe 4: Endergebnis

Die korrigierten Ergebnisse wurden analog zur Stufe 2 zusammengestellt. Die Bandbreiten der Verweildauern in den jeweiligen Zustandsnoten werden für die relevanten Kombinationen aus Ausbautypen und Einflussgrößen zusammengefasst.

Die Ergebnisse werden in Kap. 1.4 dokumentiert und in Kap. 1.5 diskutiert.

1.3 Datenaufbereitung und Ableitung von Degradationskurven für das Autobahn- und Schnellstraßennetz der ASFINAG

Im Zuge der Verschneidung der Tunnelcharakteristika (Baujahr, Länge, Material) mit den Zustandsnoten wurde für jeden einzelnen Tunnel am ASFINAG-Netz eine objektspezifische Übersicht der durchgeführten Prüfungen bzw. Kontrollen inklusive der vergebenen Zustandsnoten erstellt (siehe Anhang).

In Abbildung 9 ist die gewählte Vorgehensweise exemplarisch anhand des Kienbergtunnels dargestellt. Dieser wurde im Jahr 2003 errichtet und in den Jahren 2004, 2006, 2011 und 2015 gemäß RVS 13.03.31 [1] inspiziert. Im Jahr 2013 fand die erste planmäßige Tunnelprüfung statt. Am graphischen Verlauf der Gesamtnote erkennt man die graduelle Alterung des Tunnels, ersichtlich in der Degradation der Zustandsnote (2004-2010: Zustandsnote 1; 2011-2015: Zustandsnote 2).

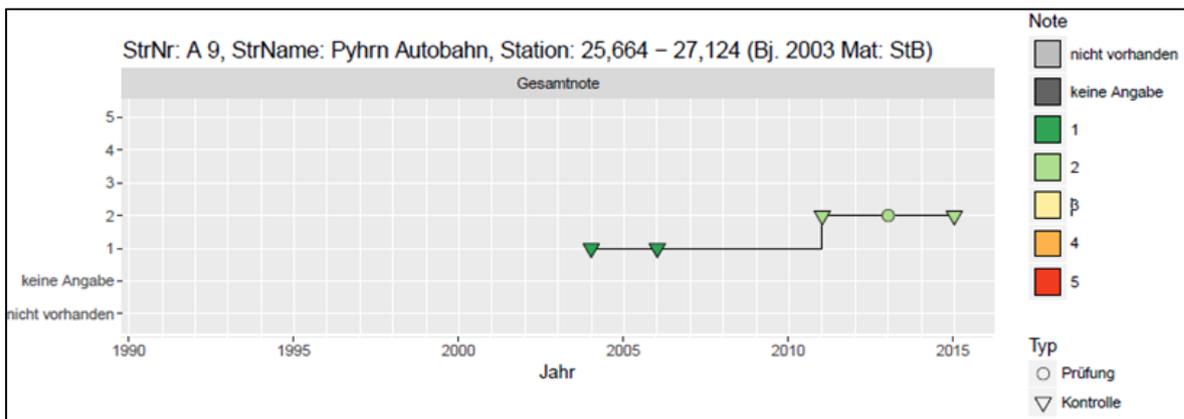


Abbildung 9: Prüf- und Kontrollregime (Gesamtnote) im Kienbergtunnel (A9) von 2004-2015

Visualisiert man die Entwicklung der Zustandsnoten auf Bauteilebene (BT1: Tunnelröhre, BT2: Fahrbahnaufbau/Belag, BT3: Erhöhter Seiten- und Mittelstreifen etc.) wird jedoch ersichtlich, dass nicht alle Bauteile eines Tunnels gleich rasch altern. Insbesondere der erhöhte Seiten-/Mittelstreifen und die Entwässerung weisen (im Fall des Kienbergtunnels) ein markant rasches Alterungsverhalten als die sonstigen inspizierten Bauteile auf (siehe Abbildung 10).

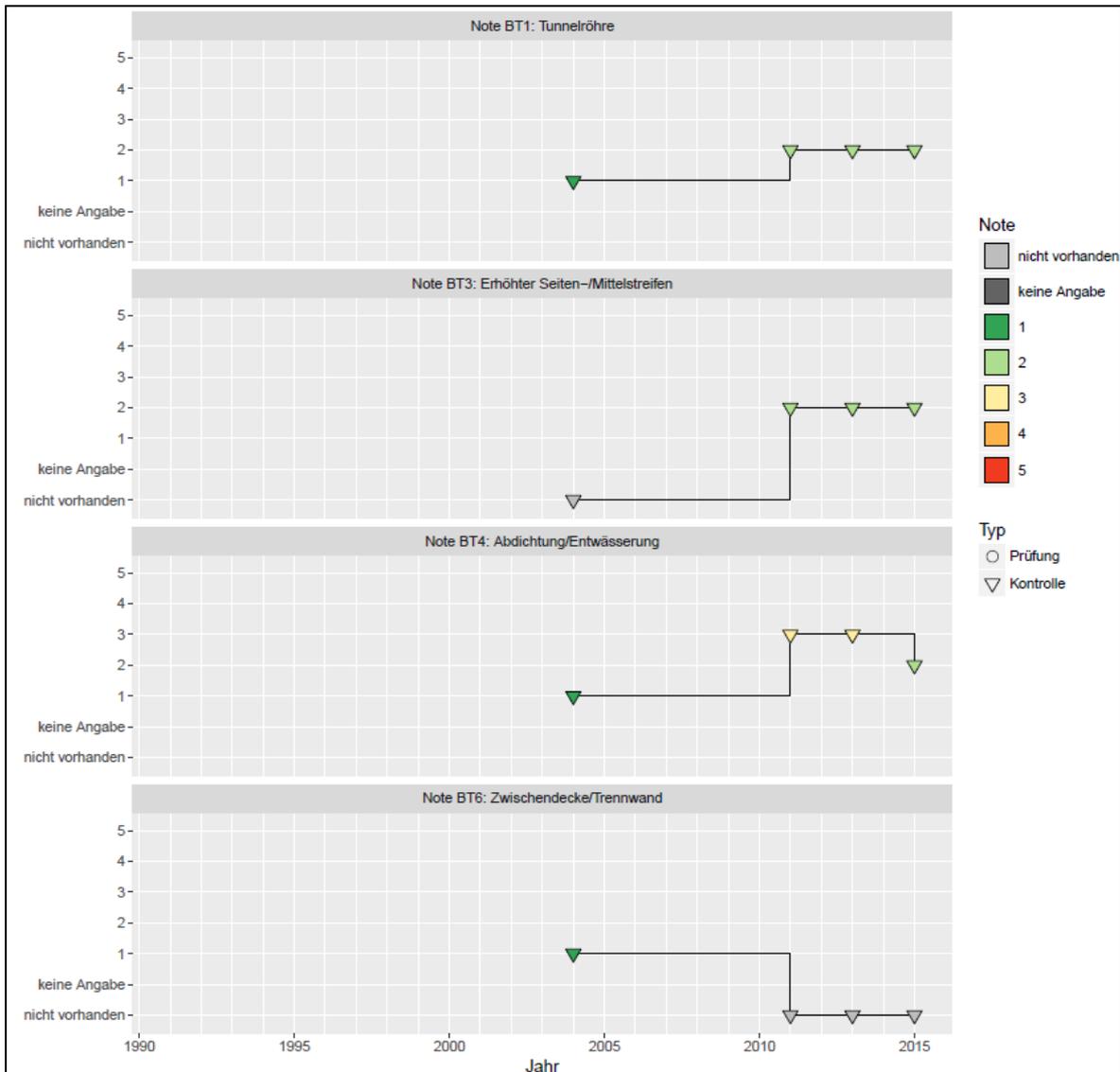


Abbildung 10: Prüf- und Kontrollregime auf Bauteilebene im Kienbergtunnel (A9) von 2004-2015

Um dem unterschiedlichen Degradationsverhalten im Rahmen der Analyse der Zustandsdaten gerecht zu werden, wurden daher zusätzlich zur Gesamtnote Detailuntersuchungen auf folgender Bauteilebene durchgeführt:

- BT1: Tunnelröhre
- BT2: Fahrbahnaufbau/Belag
- BT3: Erhöhter Seiten-/Mittelstreifen
- BT4: Abdichtung/Entwässerung
- BT5: Portal/Gesims
- BT6: Zwischendecke/Trennwand
- BT7: Betriebsräume/Nischen
- BT8: Bauliche Ausrüstung

1.3.1 Ermittlung der durchschnittlichen Verweildauer pro Zustandsnote

Im gegenständlichen Kapitel wird ein Procedere zur Ermittlung der durchschnittlichen Verweildauer der oben angeführten Bauteile pro Zustandsnoten dargestellt. Ein Problem stellt hierbei der große Zeitraum von der Errichtung der Tunnelröhre bis zur erstmaligen Inspektion/Kontrolle dar. Dieser beträgt in manchen Fällen mehrere Jahr(zehnt)e, in welchen die natürliche Alterung des Bauwerks/Bauteils nicht dokumentiert ist. Um diesem Umstand bei der Ermittlung der durchschnittlichen Verweildauer zu berücksichtigen, wurde zwischen dem Fertigstellungsjahr und der ersten Prüfung/Kontrolle eine lineare Alterung angenommen. Diese ist pro Bauwerk unterschiedlich und spiegelt eine Reihe von Einfluss- und Umgebungsfaktoren wider, die sich im Degradationsverlauf ausdrücken.

Bei der Interpolation wurde beim Baujahr immer von der Zustandsnote 1 ausgegangen. Anschließend wurden im Zeitraum vom Baujahr bis zur ersten wirklich vorhandenen Zustandsnote, die Schnittpunkte einer gedachten Gerade mit der ordinalen Zustandsnotenskala ermittelt und durch eine Treppenfunktion approximiert (siehe Abbildung 11). Die so erhaltenen Übergangszeitpunkte wurden anschließend noch auf ganze Jahre abgerundet.

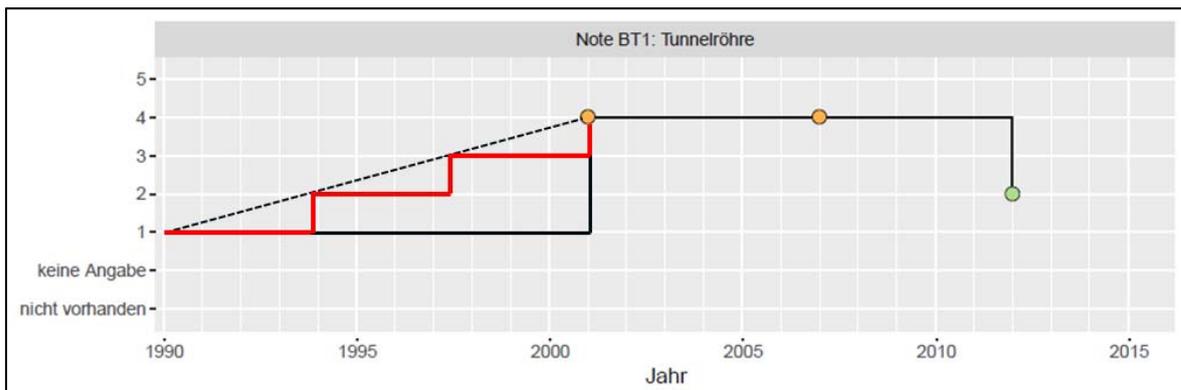


Abbildung 11: Lineare Interpolation zwischen Baujahr und erster Prüfung/Kontrolle

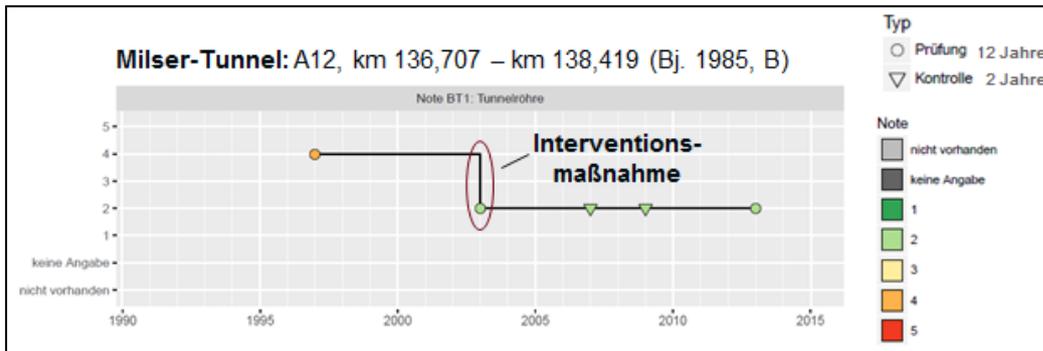


Abbildung 13: Identifikation von Sanierungsmaßnahmen

Auf Basis der erhobenen Zustandsdaten kann für das Tunnelbauwerk als Ganzes (Gesamtnote) sowie auf Bauteilebene die durchschnittliche Verweildauer pro Zustandsnote rechnerisch ermittelt werden. Nachfolgend wird dies exemplarisch anhand Tunnel in gemischter/geschlossener Bauweise (Tabelle 4) bzw. offener Bauweise (Tabelle 5) dargestellt. Für jede Zustandsnote wird der Mittelwert (mean), die Standardabweichung (sd), der Median (median) sowie die Stichprobengröße (n) angegeben.

Tabelle 4: Durchschnittliche Verweildauer der Zustandsnoten (Gesamtbauwerk) bei Tunnel in gemischter/geschlossener Bauweise

Zustandsnote	Mittelwert	Median	Stdabw.	Stichprobe
1	12,072	9,0	9,497	223
2	5,971	5,0	4,159	245
3	5,090	5,0	3,446	134
4	6,077	5,5	3,261	26
5	6,000	6,0	NA	1

Tabelle 5: Durchschnittliche Verweildauer der Zustandsnoten (Gesamtbauwerk) bei Tunnel in offener Bauweise

Zustandsnote	Mittelwert	Median	Stdabw.	Stichprobe
1	9,255	9,0	6,330	51
2	7,327	7,0	4,445	52
3	4,500	5,0	3,219	38
4	2,500	2,5	1,378	6

1.3.2 Ableitung von Degradationskurven

Auf Basis der durchschnittlichen Verweildauer pro Zustandsnote können Degradationskurven abgeleitet werden. Eine mögliche Ausgangsbasis hierfür bietet das CEN-Workshop Agreement CWA 16663 “Ageing behaviour of Structural Components with regard to Integrated Lifetime Assessment and subsequent Asset Management of Constructed Facilities” [27], welches verschiedene Vorschläge für die Formulierung von generischen Alterungskurven enthält (siehe Abbildung 14). Vorteil der dargestellten Kurven ist die grundsätzliche Kompatibilität mit anderen Anlagengattungen wie z.B. Brücken und Stützbauwerken.

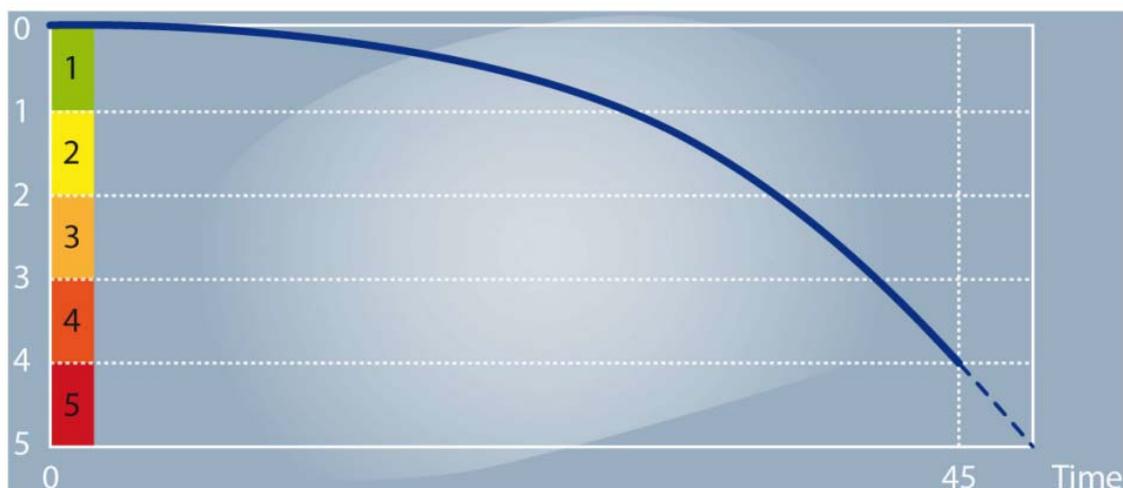


Abbildung 14: Beispiel einer Alterungskurve nach [27]

Um Degradationskurven gemäß CWA 16663 zu ermitteln, wurden die mittlere Verweildauer der Zustandsnoten und deren Standardabweichung aufsummiert. Die Standardabweichung wurde sowohl dem Mittelwert hinzugerechnet als auch von diesem abgezogen (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Berechnung der Zustandsnotenänderung am Beispiel „Gesamtnote – gemischte/geschlossene Bauweise“

Zustandsnote	Summe Mittelwert	Summe Standardabweichung	Mittelwert – Standardabweichung	Mittelwert + Standardabweichung
1	12,072	9,497	2,575	21,569
2	18,043	13,656	4,387	31,699
3	23,133	17,102	6,031	40,235
4	29,21	20,363	8,847	49,573
5	35,21			

Im CEN-Workshop Agreement wird nachfolgende Formel zur Ermittlung der Parameter der Degradationskurven empfohlen:

$$C_i(t) = C_I + a_n \cdot t^c$$

C_I ist dabei der Initial- oder Ausgangszustand, a_n die Degradationsgeschwindigkeit, t die Zeit und c der Degradationsexponent. Um Degradationskurven in diese Form zu transformieren, wurde mit dem Python Paket `scipy.optimize` eine Anpassung an die berechneten Zustandsnotenänderungen vorgenommen. Die Ergebnisse der Anpassung sind in der [Tabelle 7](#) zusammengefasst und in den [Abbildung 15–Abbildung 32](#) dargestellt.

Tabelle 7: Berechnete Parameter für alle betrachteten Bauteile

Name	C_I	a_n (MW)	c (MW)	a_n (+stabw)	c (+stabw)	a_n (-stabw)	c (-stabw)
Gesamt - gemischt/geschlossen	0	0,027189	1,483997	0,4425	1,021691	0,008052	1,593803
Gesamt - offen	0	0,018943	1,679994	0,132199	1,604442	0,007769	1,692247
Tunnelröhre - gemischt/geschlossen	0	0,032235	1,460404	0,75781	0,852035	0,00862	1,592301
Tunnelröhre - offen	0	0,0307	1,520142	0,19363	1,497256	0,014598	1,503461
Fahrbahnaufbau/Belag - gemischt/geschlossen	0	0,012024	1,834643	0,90064	0,879563	0,001927	2,043376
Fahrbahnaufbau/Belag - offen	0	0,018194	1,805419	1	1,555578	0,003839	1,921397
Erhöhter Seiten-/Mittelstreifen - gemischt/geschlossen	0	0,020033	1,66848	1	1,144497	0,002903	1,907059
Erhöhter Seiten-/Mittelstreifen - offen	0	0,002315	2,50366	0,387893	1,309773	0,001	2,337026
Abdichtung/Entwässerung - gemischt/geschlossen	0	0,017905	1,647084	0,716153	0,977233	0,004392	1,764193
Abdichtung/Entwässerung - offen	0	0,025755	1,630258	0,994691	0,767027	0,004481	1,866217
Portal/Gesims - gemischt/geschlossen	0	0,017437	1,573515	0,191577	1,539692	0,007725	1,550375
Portal/Gesims - offen	0	0,018843	1,540474	0,027586	1,970028	0,012774	1,451672
Zwischendecke/Trennwand - gemischt/geschlossen	0	0,014322	1,642473	0,167022	1,327303	0,004662	1,719778
Zwischendecke/Trennwand - offen	0	0,087617	1,017499	0,579775	0,612668	0,031009	1,168395
Betriebsräume/Nischen - gemischt/geschlossen	0	0,027941	1,581796	1	1,0037	0,002192	2,005216
Betriebsräume/Nischen - offen	0	0,012757	1,881884	0,349871	1,687084	0,003796	1,910099
Bauliche Ausrüstung - gemischt/geschlossen	0	0,009588	1,996491	0,914888	2,752929	0,001	2,249036
Bauliche Ausrüstung - offen	0	0,009062	2,024172	1	2,234288	0,002493	2,019319

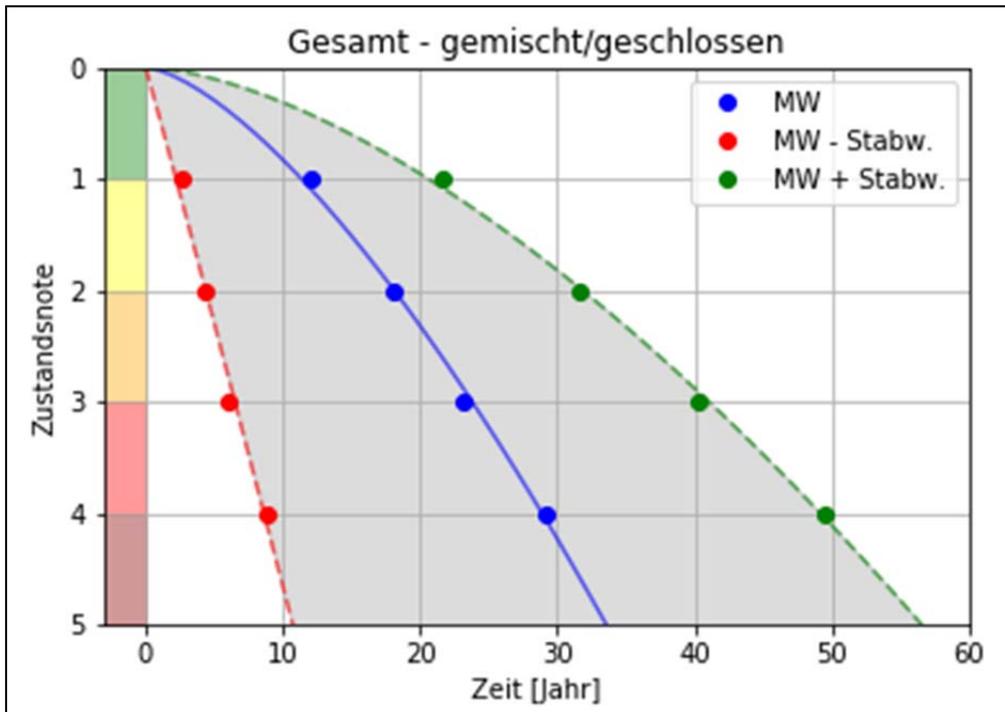


Abbildung 15: Degradationskurve nach CWA 16663 für Tunnel (Gesamtnote) in gemischt/geschlossener Bauweise

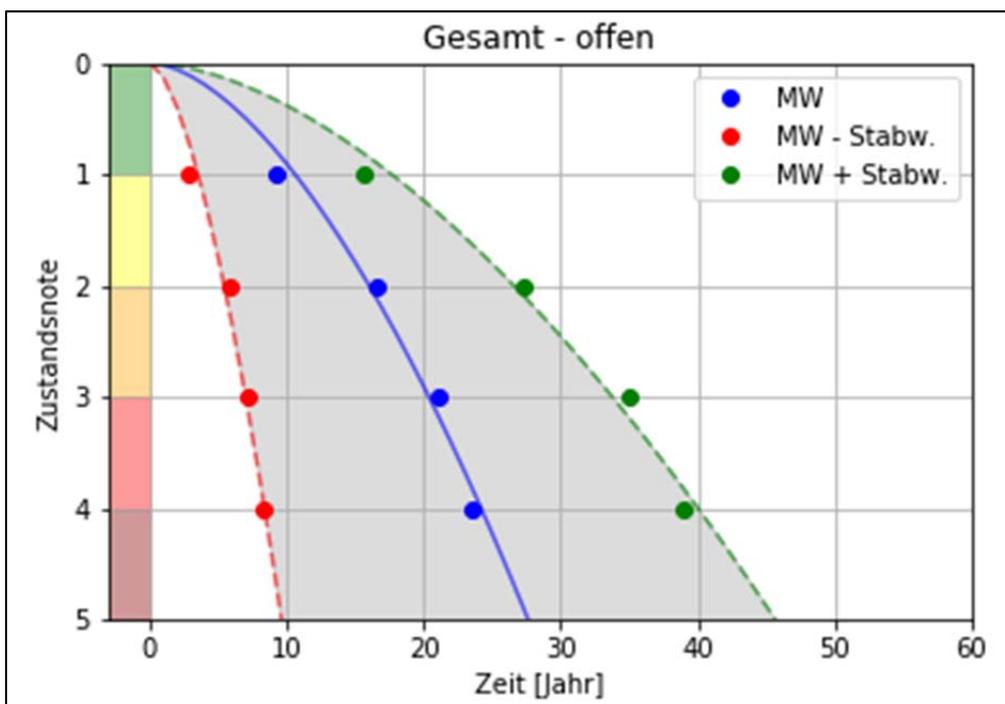


Abbildung 16: Degradationskurve nach CWA 16663 für Tunnel (Gesamtnote) in offener Bauweise

BT1: Tunnelröhre

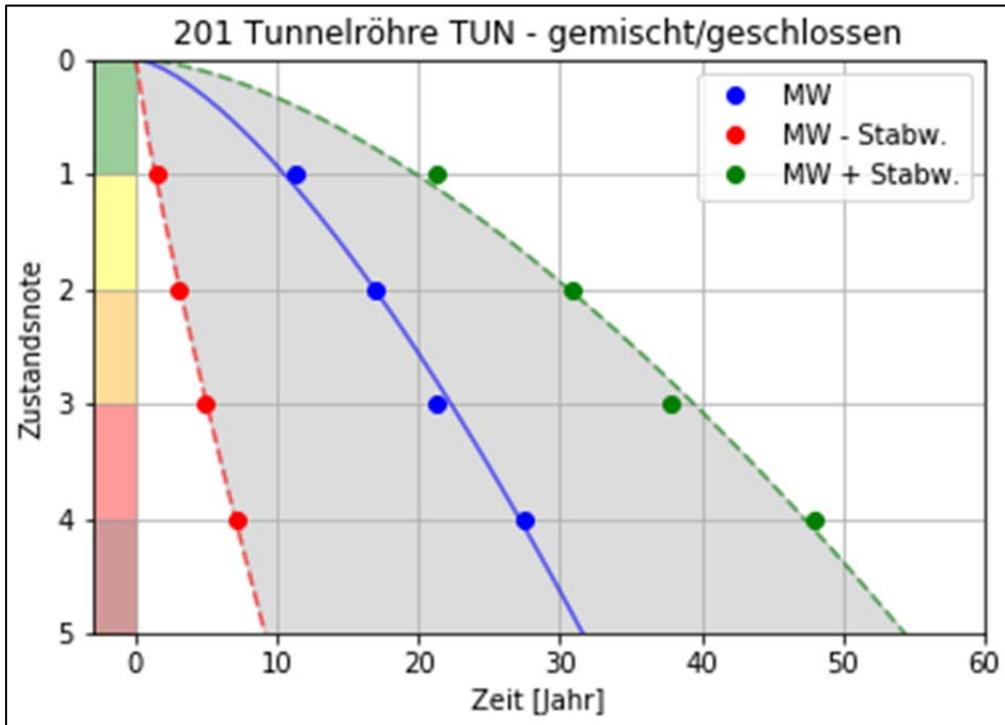


Abbildung 17: Degradationskurve nach CWA 16663 für Tunnelröhren in gemischt/ geschlossener Bauweise

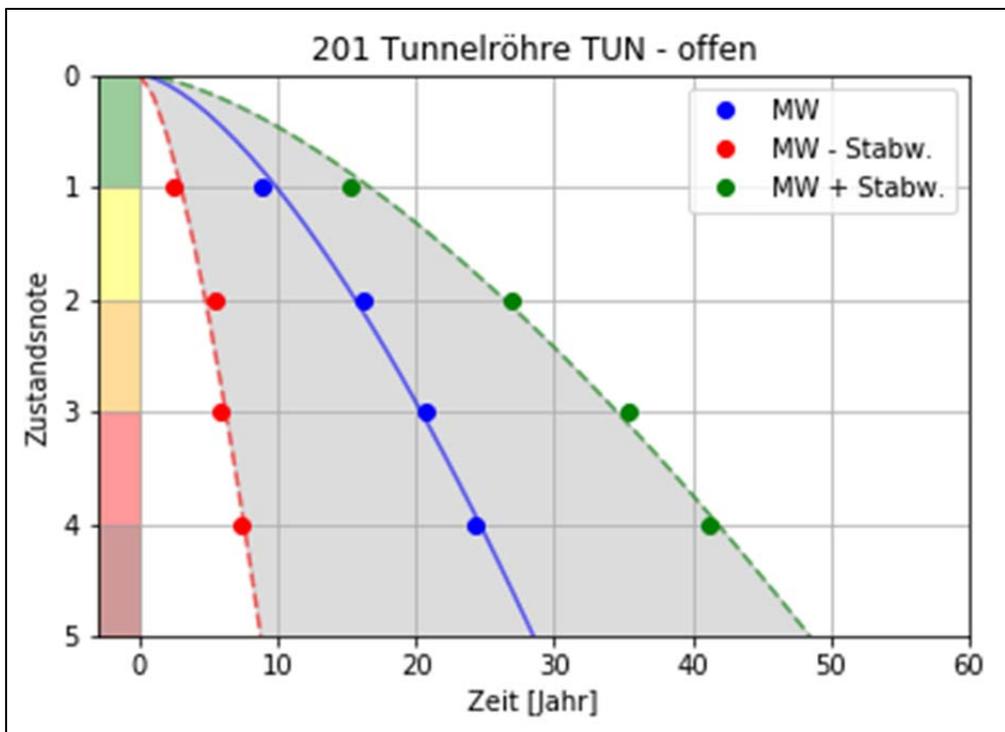


Abbildung 18: Degradationskurve nach CWA 16663 für Tunnelröhren in offener Bauweise

BT2: Fahrbahnaufbau/Belag

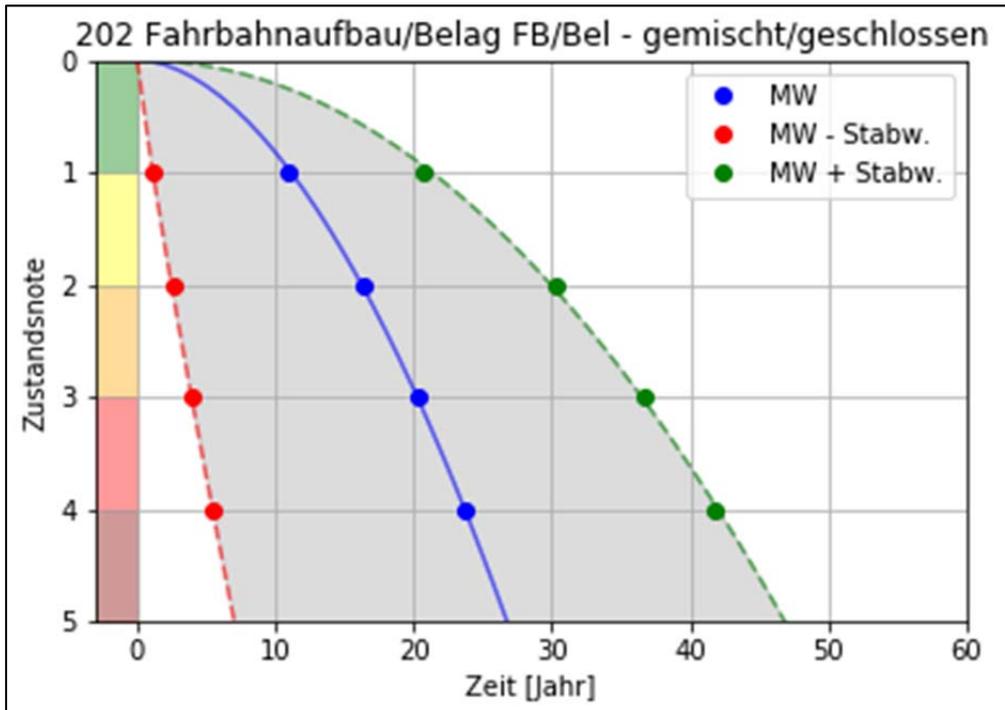


Abbildung 19: Degradationskurve nach CWA 16663 für Fahrbahnaufbau/Belag in gemischter/geschlossenen Bauweise

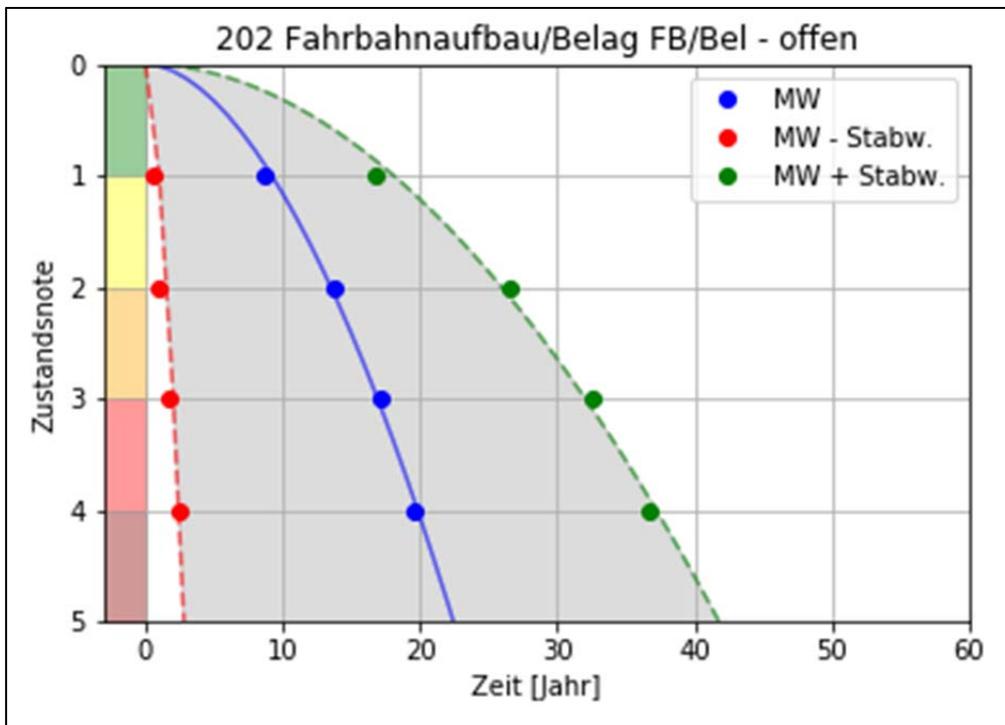


Abbildung 20: Degradationskurve nach CWA 16663 für Fahrbahnaufbau/Belag in offener Bauweise

BT3: Erhöhter Seiten-/Mittelstreifen

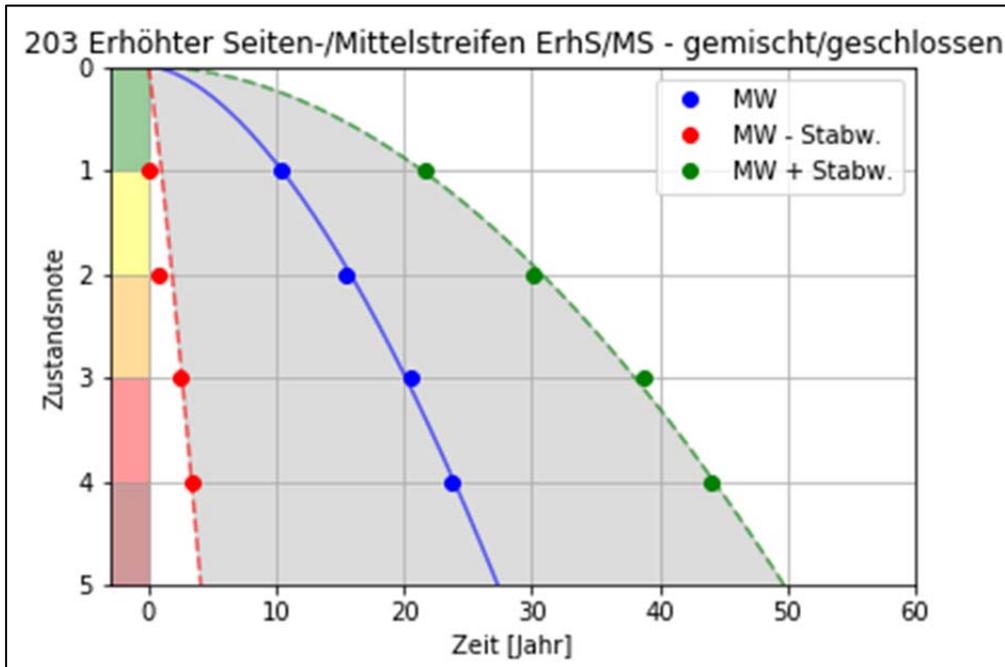


Abbildung 21: Degradationskurve nach CWA 16663 für erhöhten Seiten-/Mittelstreifen in gemischter/geschlossener Bauweise

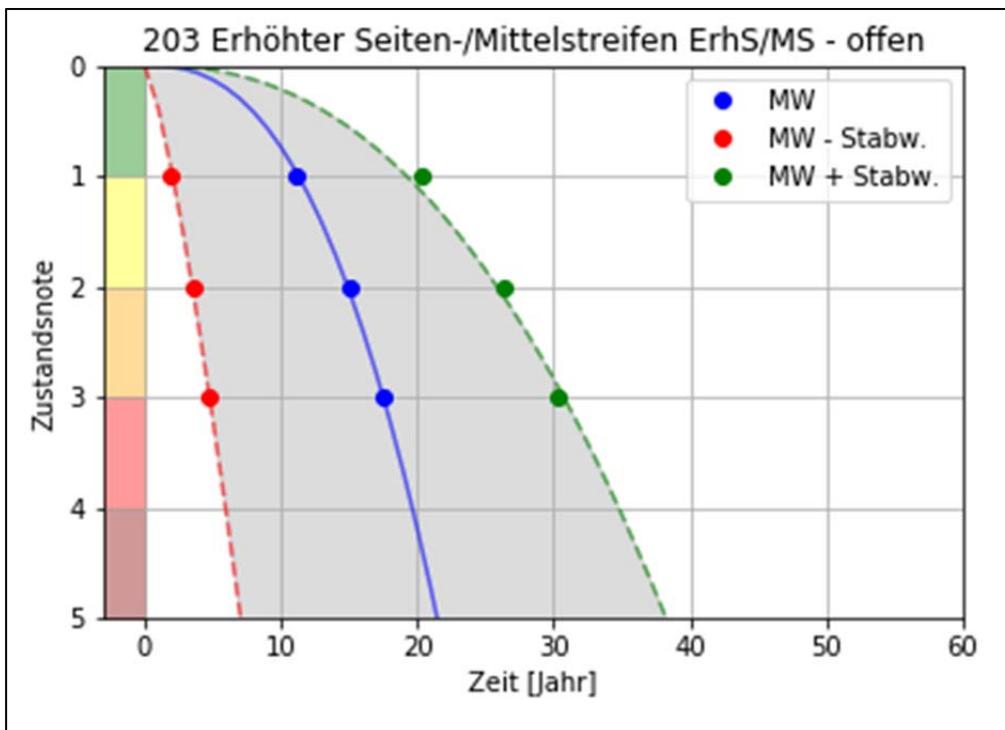


Abbildung 22: Degradationskurve nach CWA 16663 für erhöhten Seiten-/Mittelstreifen in offener Bauweise

BT4: Abdichtung/Entwässerung

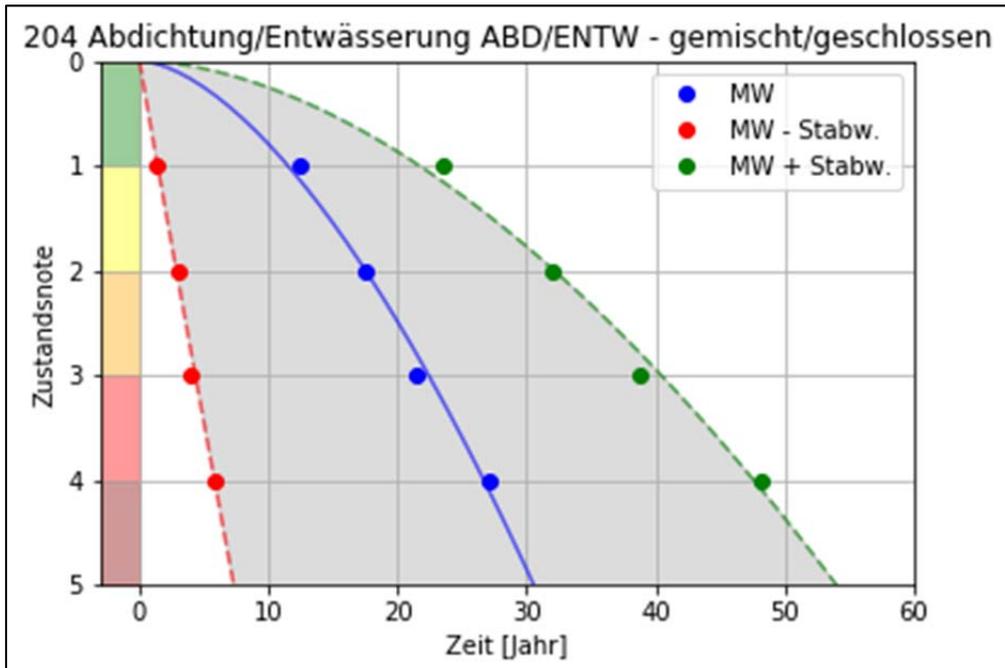


Abbildung 23: Degradationskurve nach CWA 16663 für Abdichtung/Entwässerung in gemischter/geschlossenen Bauweise

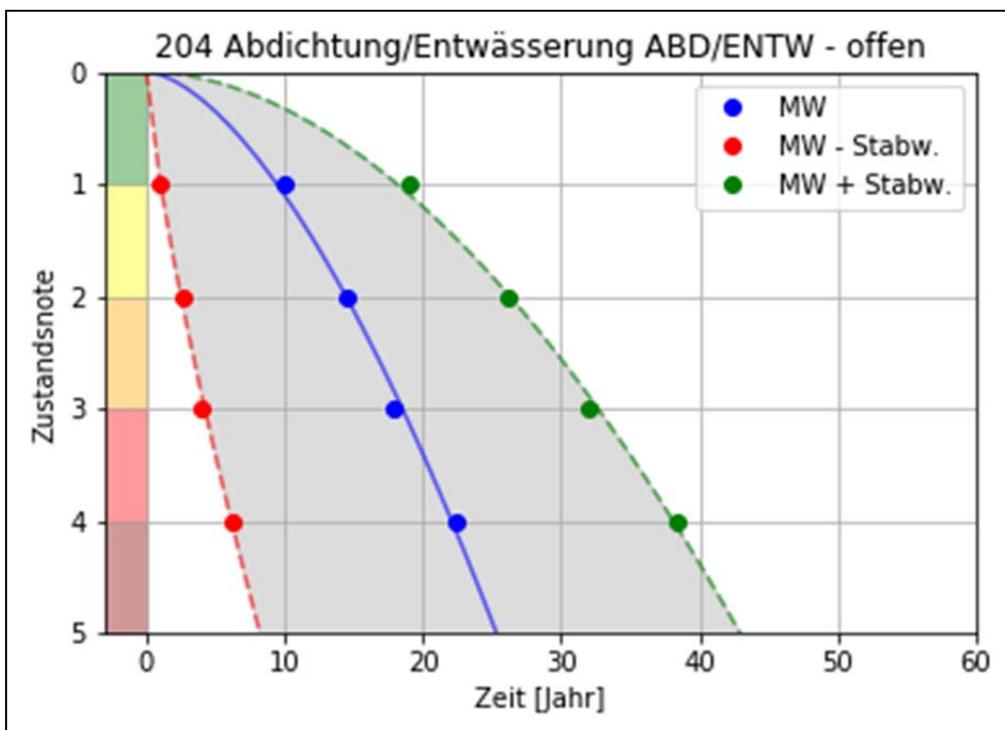


Abbildung 24: Degradationskurve nach CWA 16663 für Abdichtung/Entwässerung in offener Bauweise

BT5: Portal/Gesims

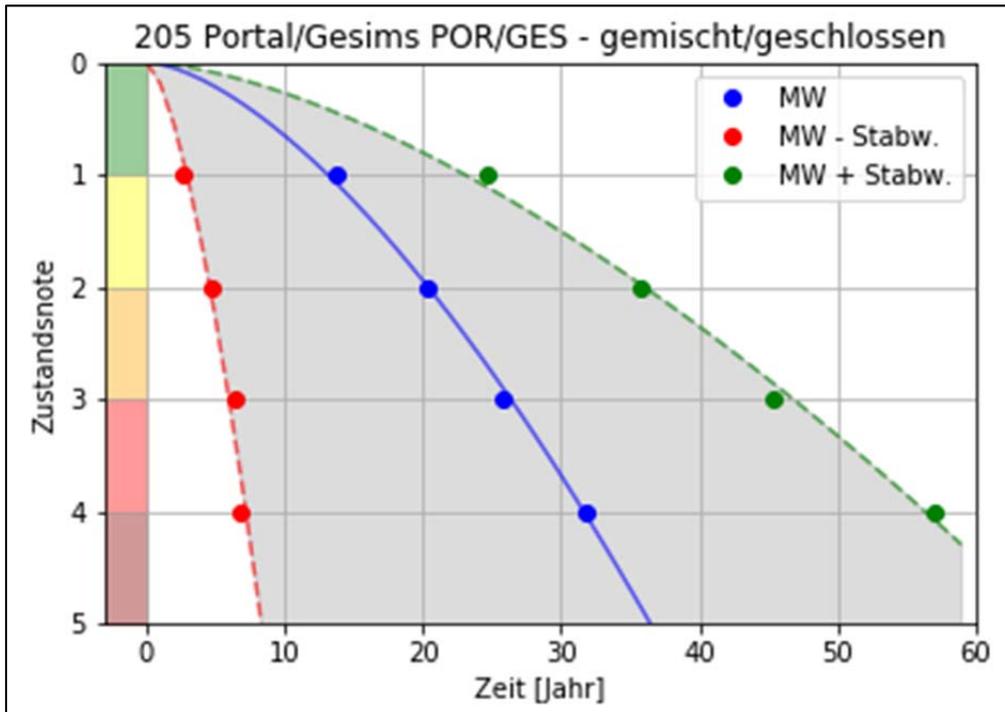


Abbildung 25: Degradationskurve nach CWA 16663 für Portal/Gesims in gemischter/geschlossenen Bauweise

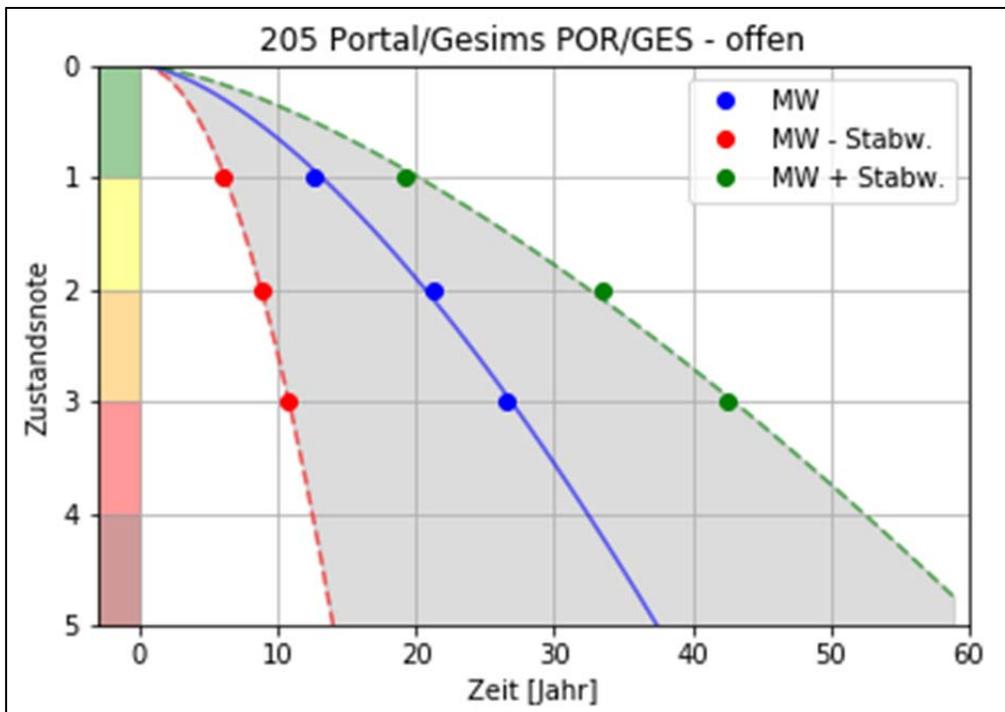


Abbildung 26: Degradationskurve nach CWA 16663 für Portal/Gesims in offener Bauweise

BT6: Zwischendecke/Trennwand

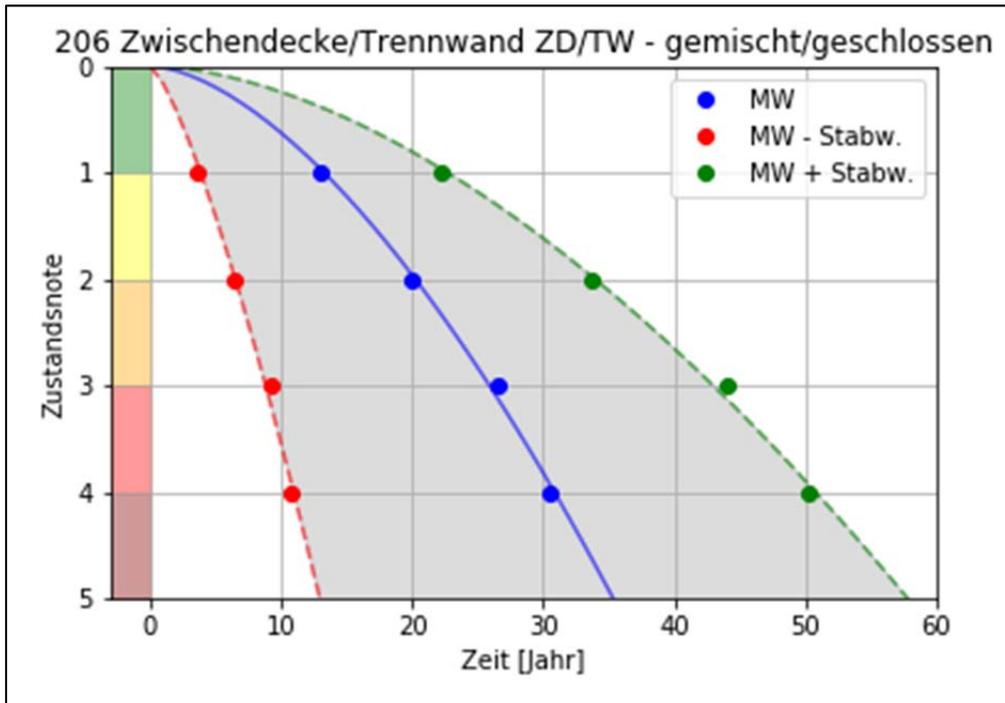


Abbildung 27: Degradationskurve nach CWA 16663 für Zwischendecke/Trennwand in gemischter/geschlossenen Bauweise

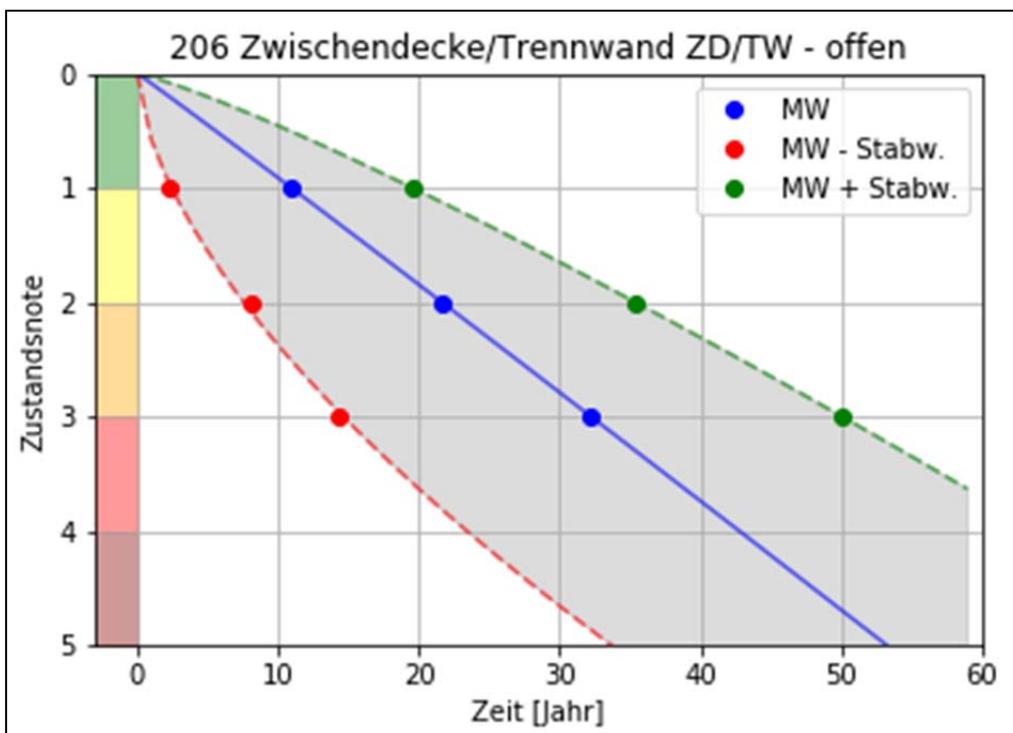


Abbildung 28: Degradationskurve nach CWA 16663 für Zwischendecke/Trennwand in offener Bauweise

BT7: Betriebsräume/Nischen

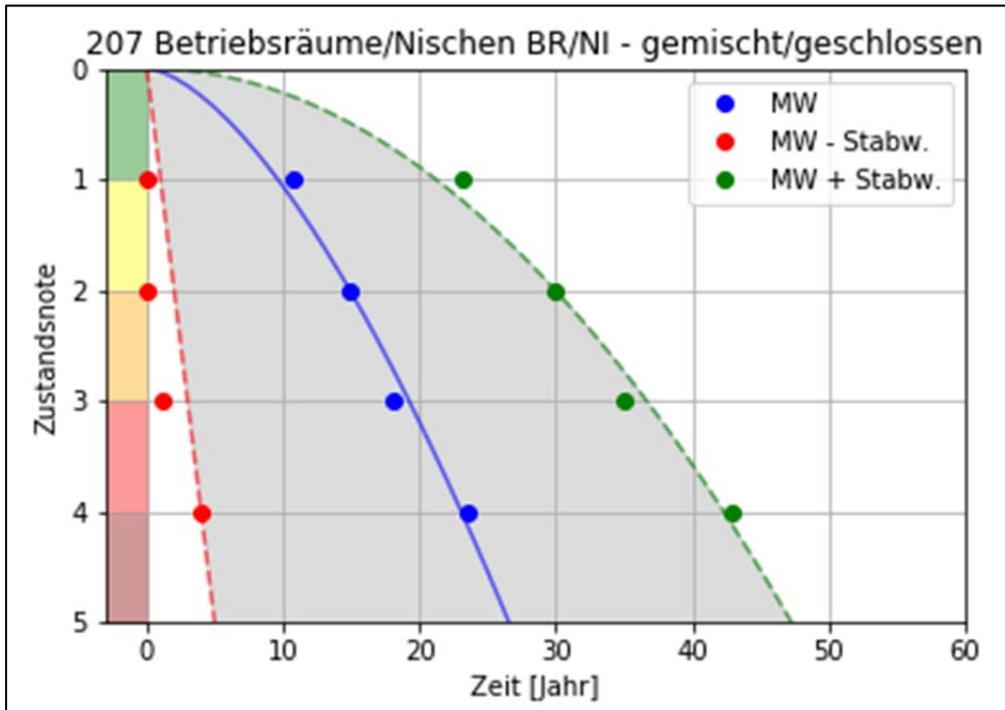


Abbildung 29: Degradationskurve nach CWA 16663 für Betriebsräume/Nischen in gemischter/geschlossenen Bauweise

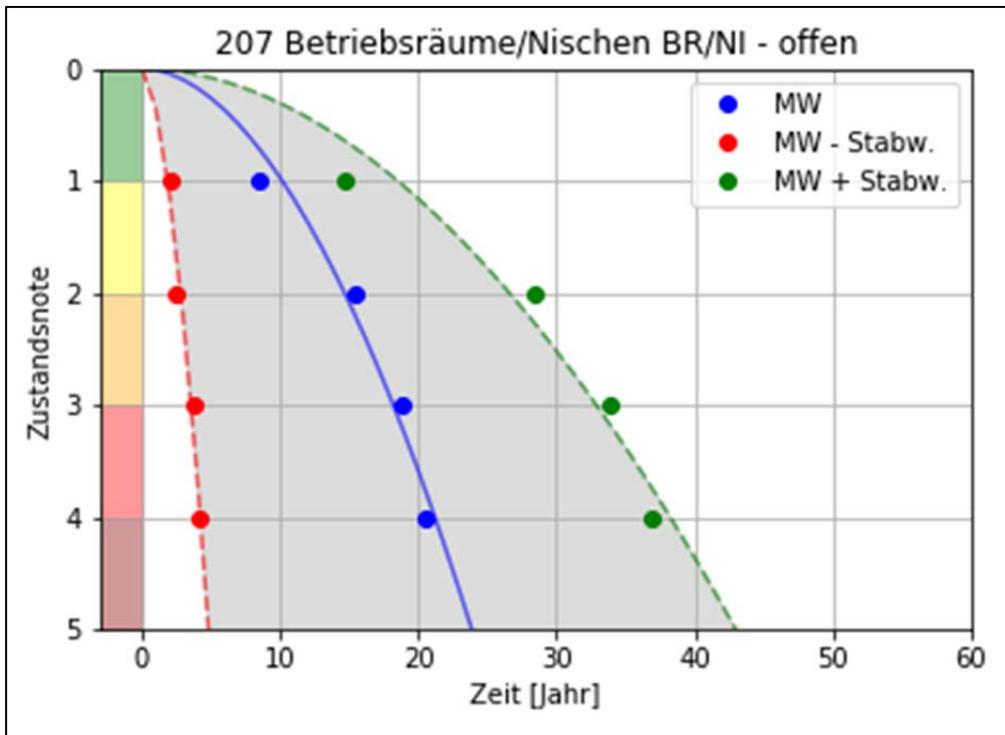


Abbildung 30: Degradationskurve nach CWA 16663 für Betriebsräume/Nischen in offener Bauweise

BT8: Bauliche Ausrüstung

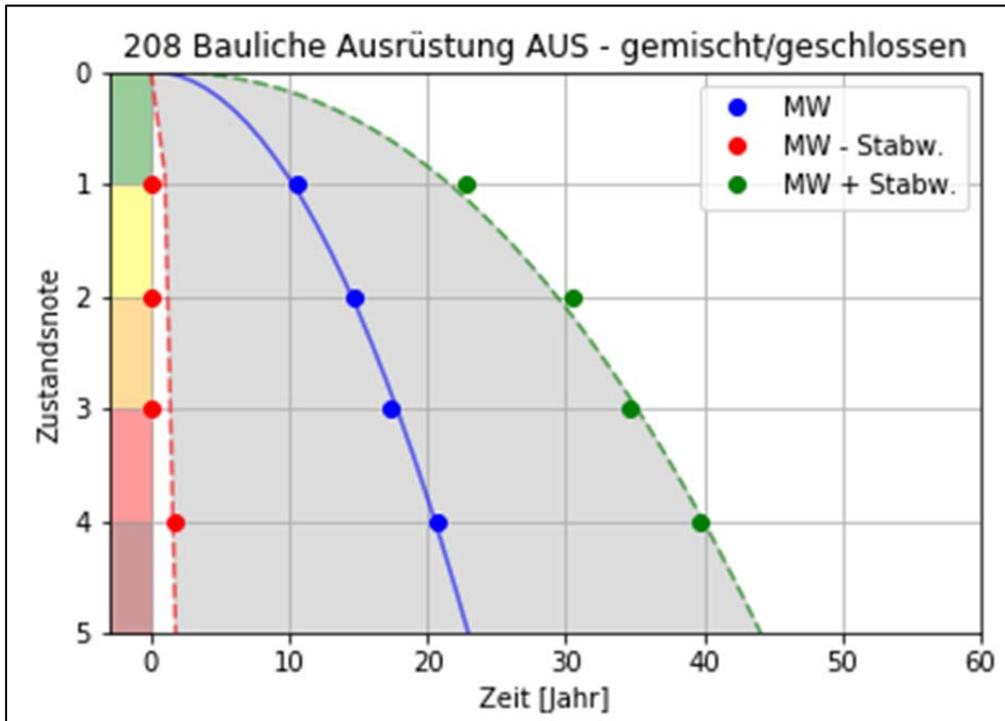


Abbildung 31: Degradationskurve nach CWA 16663 für bauliche Ausrüstung in gemischter/ geschlossenen Bauweise

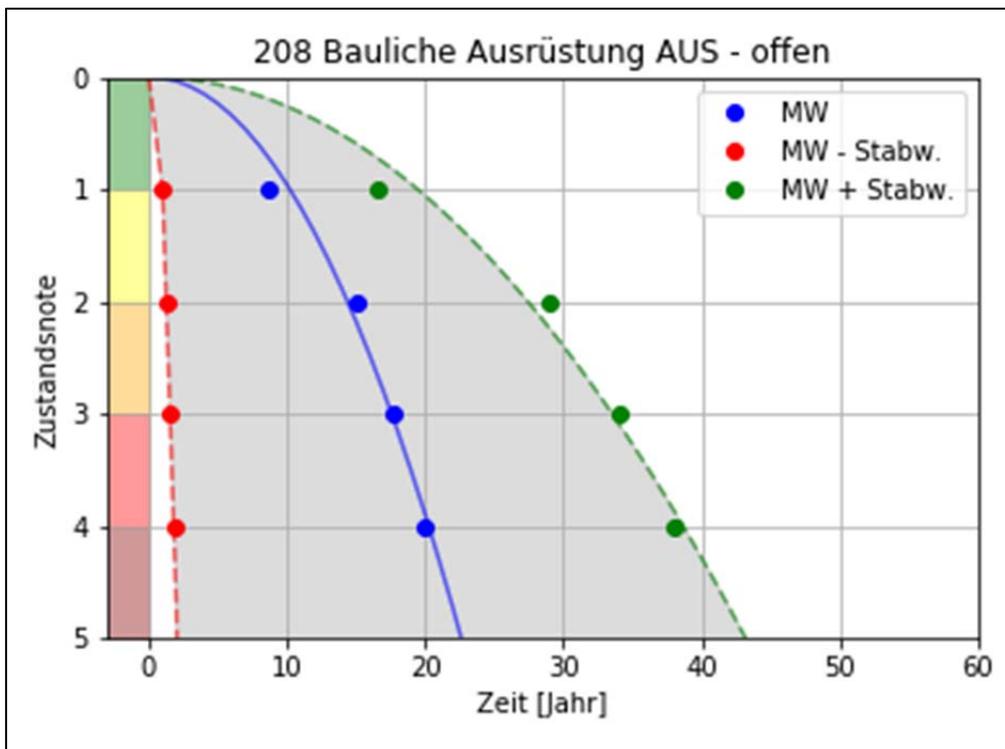


Abbildung 32: Degradationskurve nach CWA 16663 für bauliche Ausrüstung in offener Bauweise

1.4 Datenaufbereitung und Ableitung von Degradationskurven für das Schienennetz der ÖBB

1.4.1 Ermittlung der durchschnittlichen Verweildauer pro Zustandsnote

Die Bandbreiten der Verweildauern in den jeweiligen Zustandsnoten als Ergebnis des mehrstufigen Delphi-Prozesses (vgl. Kap. 1.2) sind für die relevanten Kombinationen aus Ausbautypen und Einflussgrößen in nachstehender Tabelle 8 zusammengefasst:

Tabelle 8: Begriffsbestimmungen & Definitionen

Ausbautyp	Einflussgrößen	Verweildauer in n bis Übergang n+1		
		2-3	3-4	4-5
Unaus- gekleidet	trocken, konstante Temp.	[a]	[a]	[a]
	nass+Frost	20 – 22,5 10 – 15	11,5 – 14 4 – 8	3 – 7 2 – 3,5
Mauerwerk	Naturstein trocken, konst. Temp.	22,5 – 25	16 – 20	2,5 – 5
	Nass+Frost	17,5 – 22,5	12,5 – 16	1,5 – 3,5
	Aggressives Wasser	11,5 – 15	10 – 12,5	1,5 – 2,5
Stampfbeton	trocken, konst. Temp.	17,5 – 25	15 – 18,5	3 – 7
	nass + Frost	17,5 – 20	10 – 12,5	2,5 – 3,5
	nass + Frost + „schlechter“ Zuschlag	11 – 12,5	8 – 11,5	1,5 – 3
Spritzbeton	/SpC verankert, trocken, konst. Temp.	17,5 – 19	10 – 12,5	2,5 – 4,5
	/SpC verankert, nass + Frost	11 – 12,5	6,5 – 9	1,5 – 2,5
	/Dichtspritzbeton, gering bewehrt, nass	9 – 11 10 – 12	6,5 – 8 6,5 – 9	1,5 – 2,5 1,5 – 2
	/Dichtputz, gering bewehrt, nass	8 – 10	5 – 8	2 – 5
	/Dichtspritzbeton oder -putz, aggressives Wasser, wechselnd feucht			

Die von den Experten angegebenen und hier konsolidierten Verweildauern sind jene Zeitspannen, innerhalb welcher bei Ausbleiben von Erhaltungsmaßnahmen eine Zustandsänderung in die nächst schlechtere Zustandsklasse erwartet wird („Do-nothing“) und repräsentieren somit die unbeeinflusste Alterung unter Betriebsbedingungen.

Die von den Experten gefundene Kategorisierung (vgl. Kap. 1.2) lässt ebenfalls bereits Schlüsse auf die von den Experten beurteilten wesentlichen an der Alterung beteiligten Einflussgrößen zu. Vor allem Frost in Kombination mit Feuchtigkeit wird als ein Haupttreiber der Alterung identifiziert.

Die Kategorisierung der Experten deutet auch darauf hin, dass vor allem ältere Anlagen mit deren typischen Bauweisen (z.B. ohne Auskleidung, Mauerwerkgewölbe, Stampfbetongewölbe) im Fokus der Anlageverantwortlichen liegen, da neuere Bauweisen (z.B. Ortbetoninnenschale) einerseits zum heutigen Zeitpunkt noch vergleichsweise unterrepräsentiert sind und andererseits für diese erst kürzlich in Betrieb gegangenen Jahren Anlagen erst ÖBB-spezifische Erfahrungswerte gesammelt werden müssen. Aufgrund des Fokus auf die älteren Bauweisen, wurden auch nur Gewölbe mit den dort begegneten und im Sinne des RW 06.01.02 [4] relevanten Alterungsphänomenen adressiert, während das Entwässerungssystem – im Vergleich zu neuen Bauweisen – hier aktuell eine nachrangige Rolle in Wartung und Betrieb spielt.

1.4.2 Ableitung von Degradationskurven

Die sich daraus ableitenden Degradationskurven (siehe [Abbildung 33](#) - [Abbildung 45](#)) sind auf den nachstehenden Abbildungen dargestellt. Da im bestehenden Tunnelkollektiv der ÖBB so gut wie keine Langzeiterfahrungen mit neuen Tunnelbauwerken besteht, wurde im Rahmen der Experteninterviews auch keine Experteneinschätzungen für die Verweildauer in Zustandsnote 1 abgefragt.

Für alle Kombinationen wurde daher zunächst eine Verweildauer von 20a in der Zustandsnote 1 angesetzt.

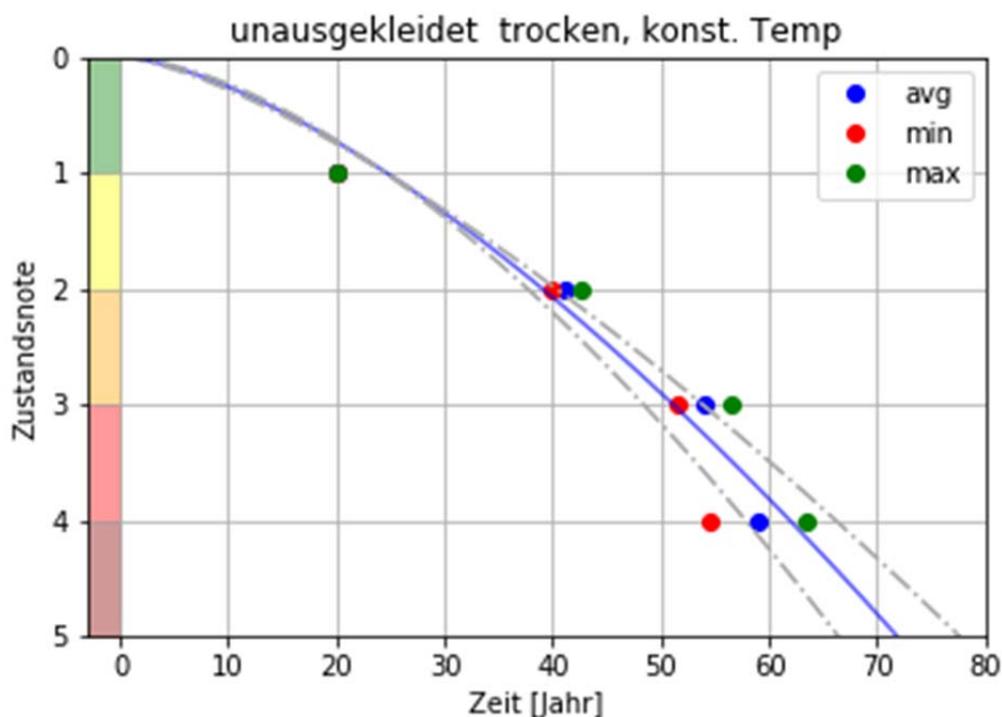


Abbildung 33: Degradationskurve für unausgekleidete Bahntunnel (trocken, konstante Temperatur)

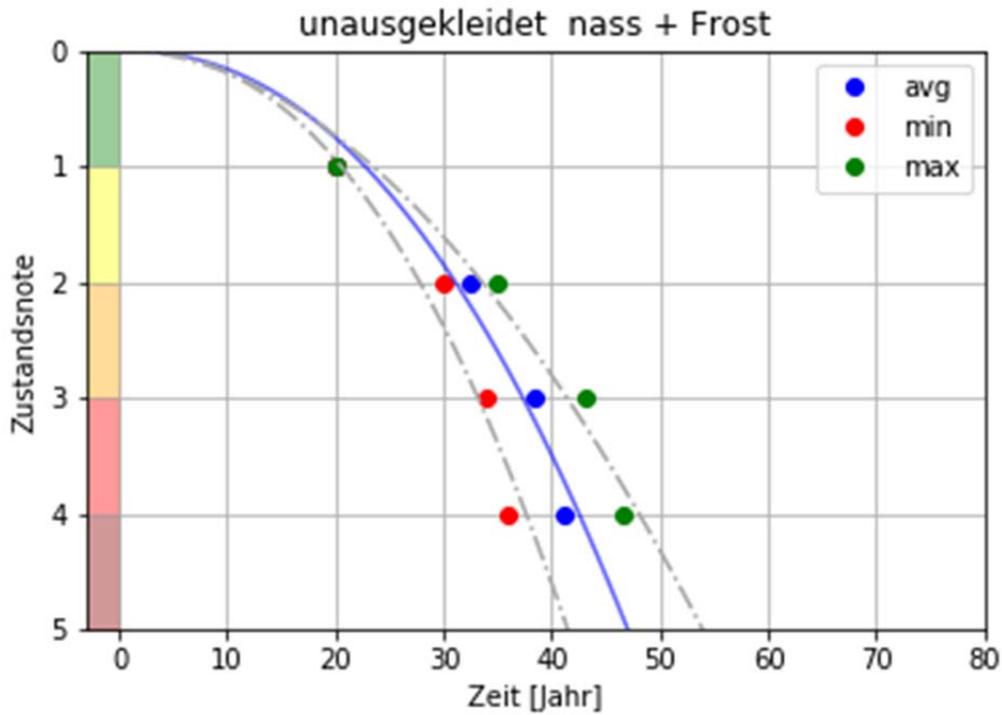


Abbildung 34: Degradationskurve für unausgekleidete Bahntunnel (nass, Frosteinwirkung)

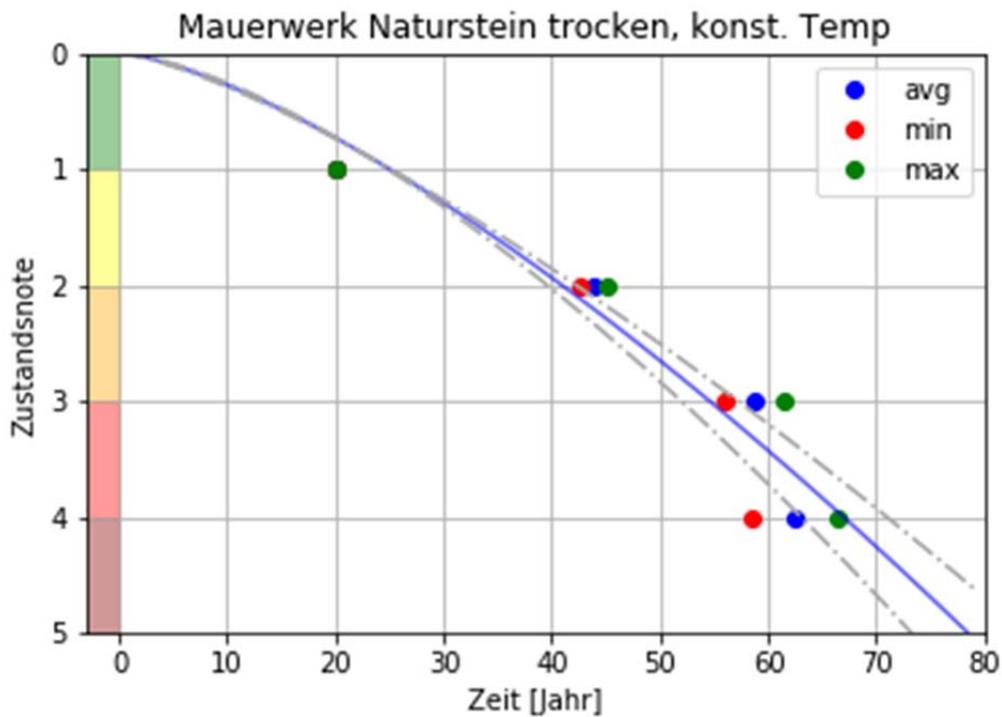


Abbildung 35: Degradationskurve für Bahntunnel mit Natursteinmauerwerk (trocken, konstante Temperatur)

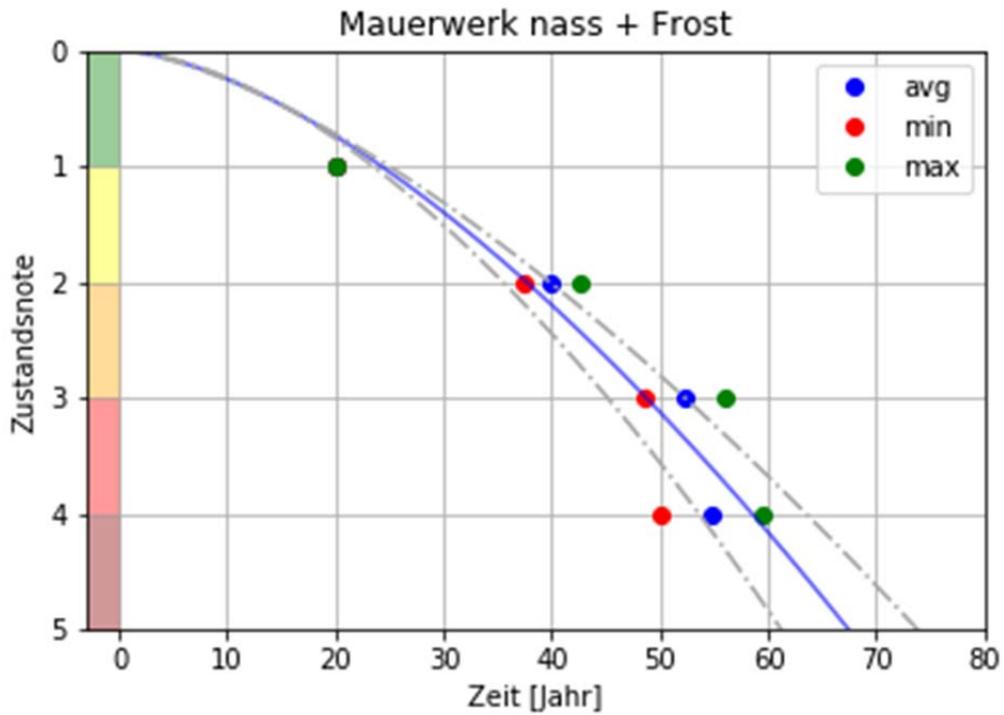


Abbildung 36: Degradationskurve für Bahntunnel aus Natursteinmauerwerk (nass, Frosteinwirkung)

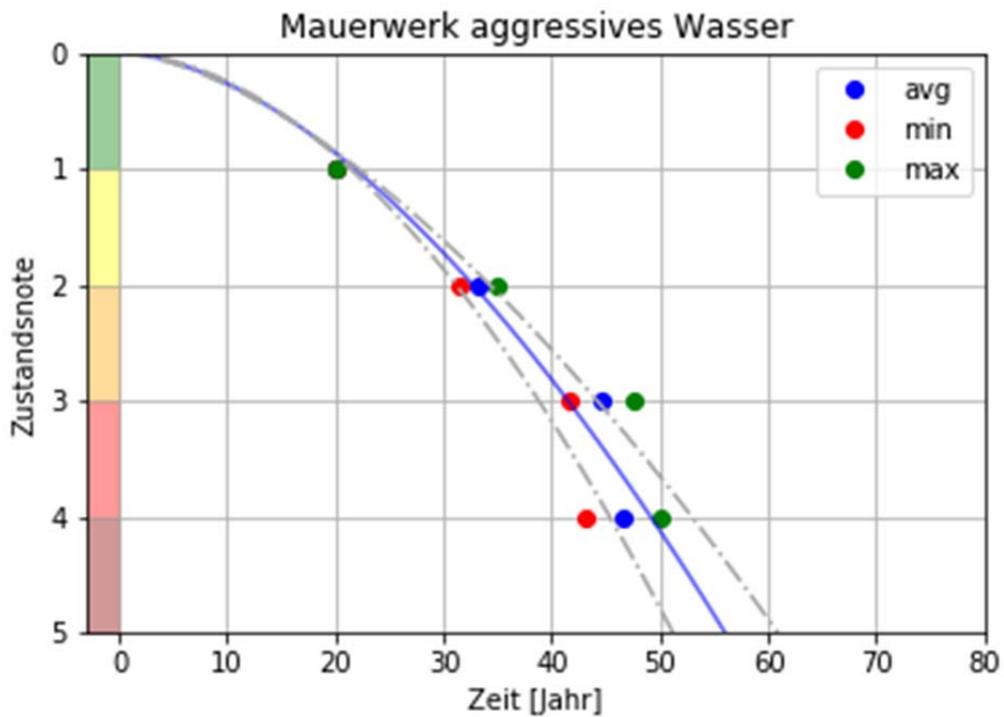


Abbildung 37: Degradationskurve für Bahntunnel aus Natursteinmauerwerk (aggressives Wasser)

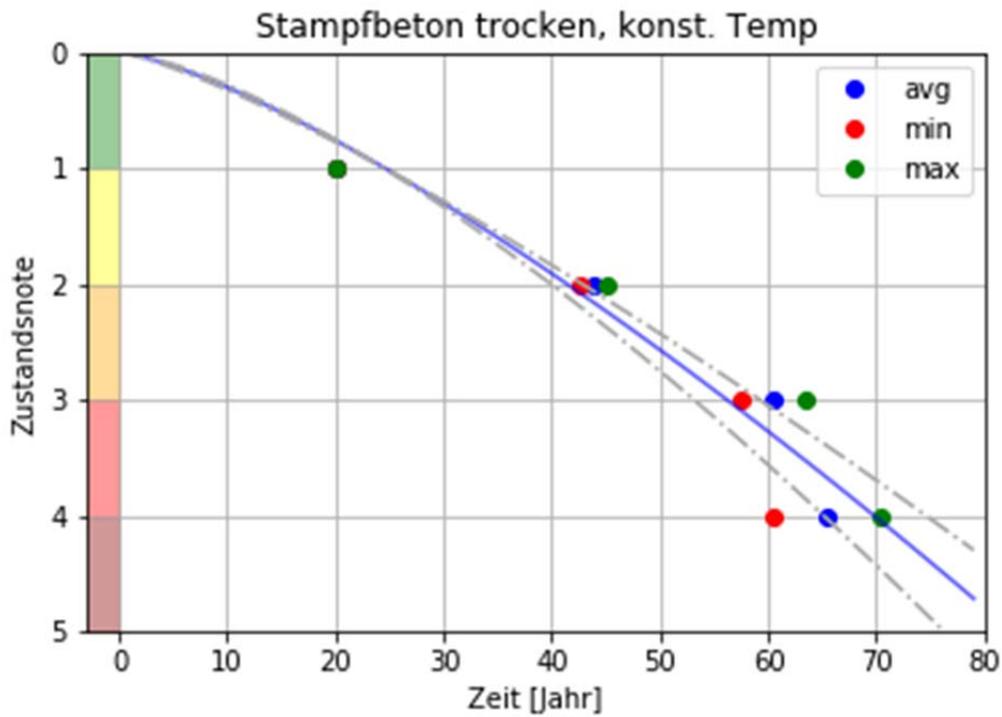


Abbildung 38 Degradationskurve für Bahntunnel mit Gewölbe aus Stampfbeton (trocken, konstante Temperatur)

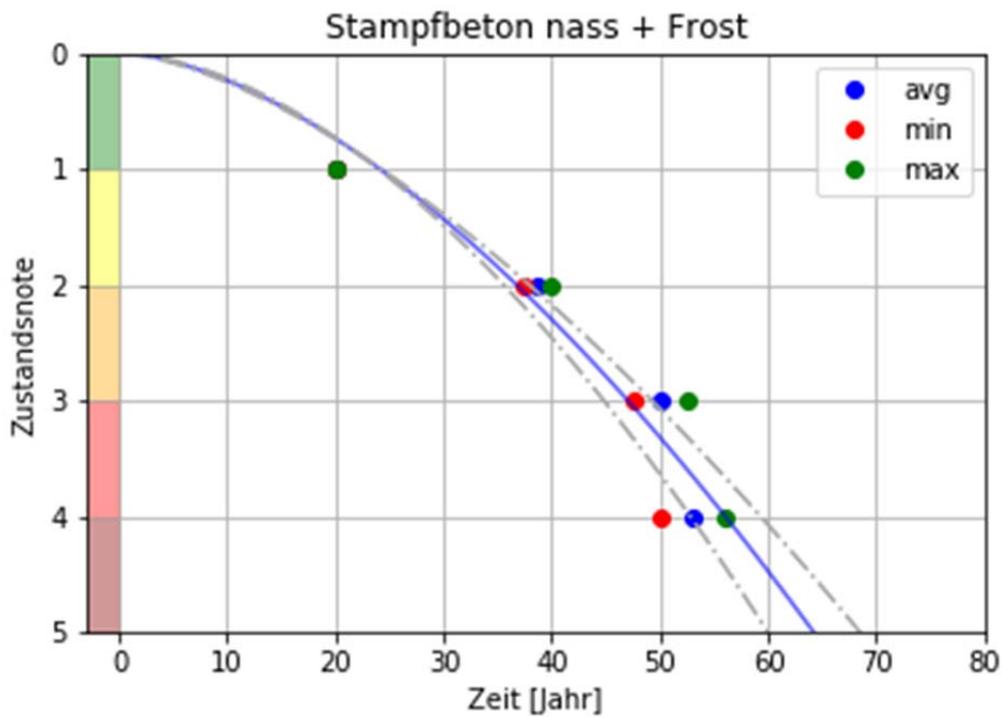


Abbildung 39: Degradationskurve für Bahntunnel mit Gewölbe aus Stampfbeton (nass, Frost- einwirkung)

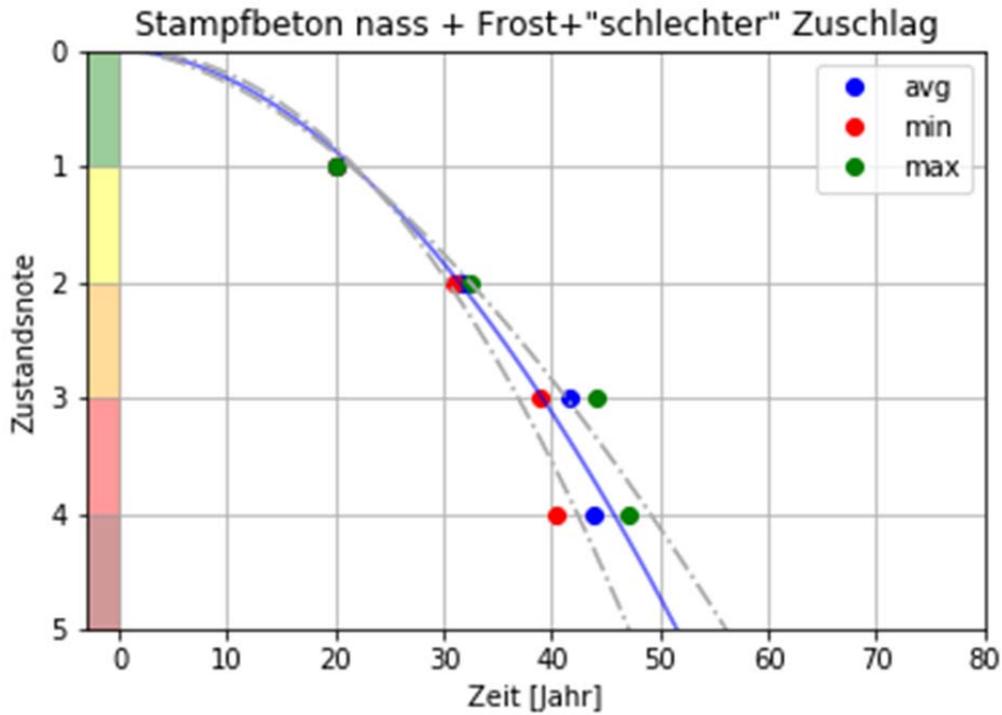


Abbildung 40: Degradationskurve für Bahntunnel mit Gewölbe aus Stampfbeton (nass, Frosteinwirkung, schlechter Zustand)

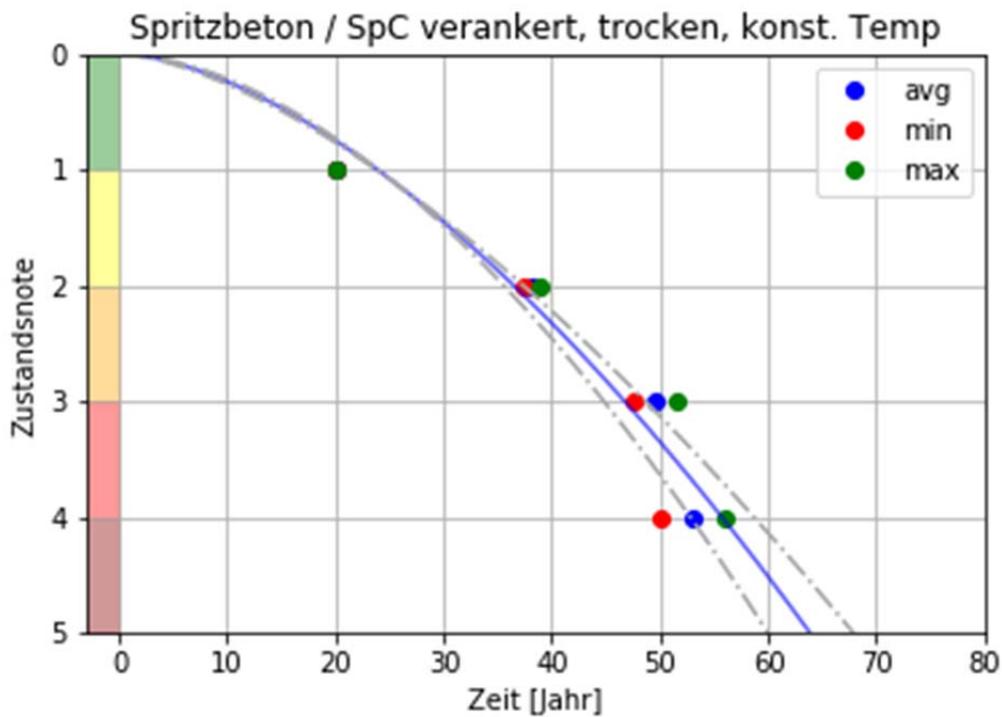


Abbildung 41: Degradationskurve für Bahntunnel mit Spritzbetonausbau (trocken, konstante Temperatur)

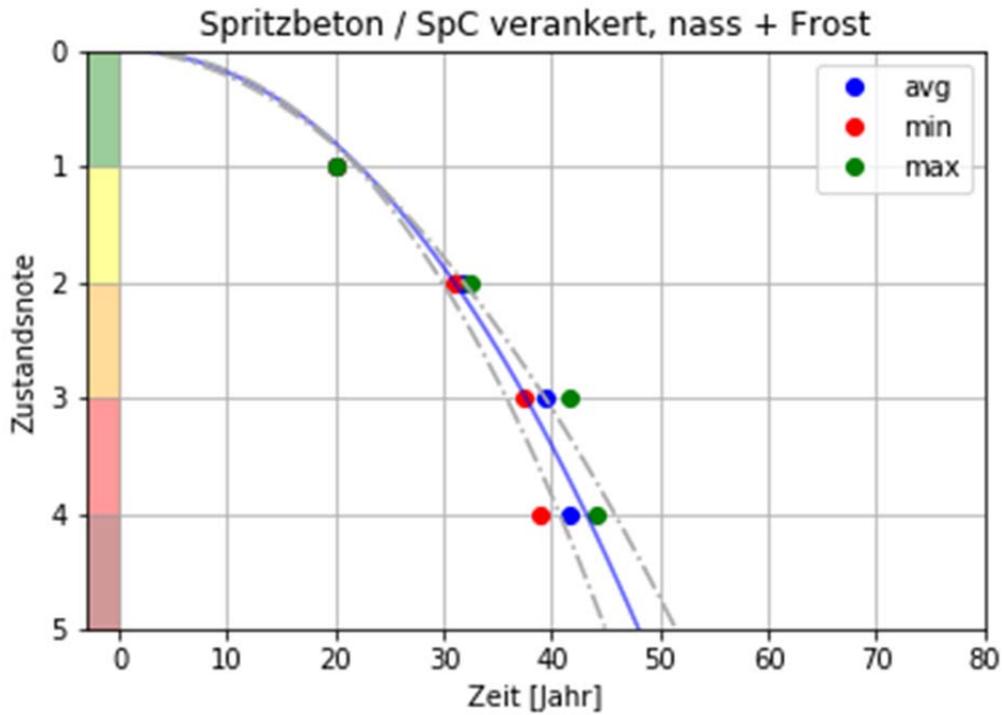


Abbildung 42: Degradationskurve für Bahntunnel mit Spritzbetonausbau (nass, Frosteinwirkung)

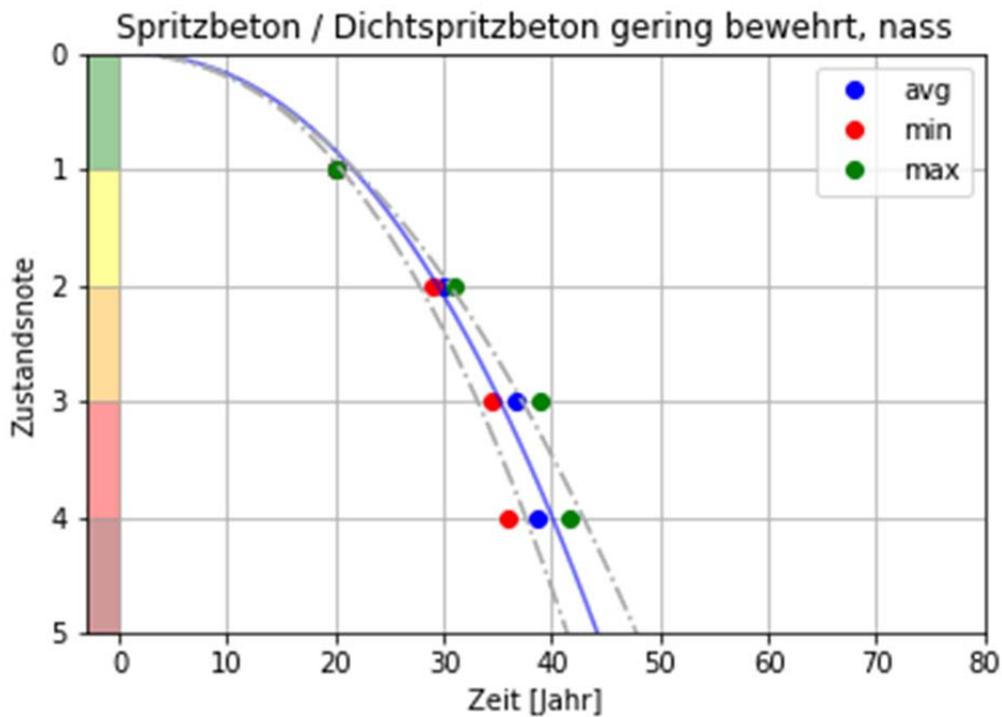


Abbildung 43: Degradationskurve für Bahntunnel mit Spritzbeton/Dichtspritzbeton-Ausbau (nass, geringe Bewehrung)

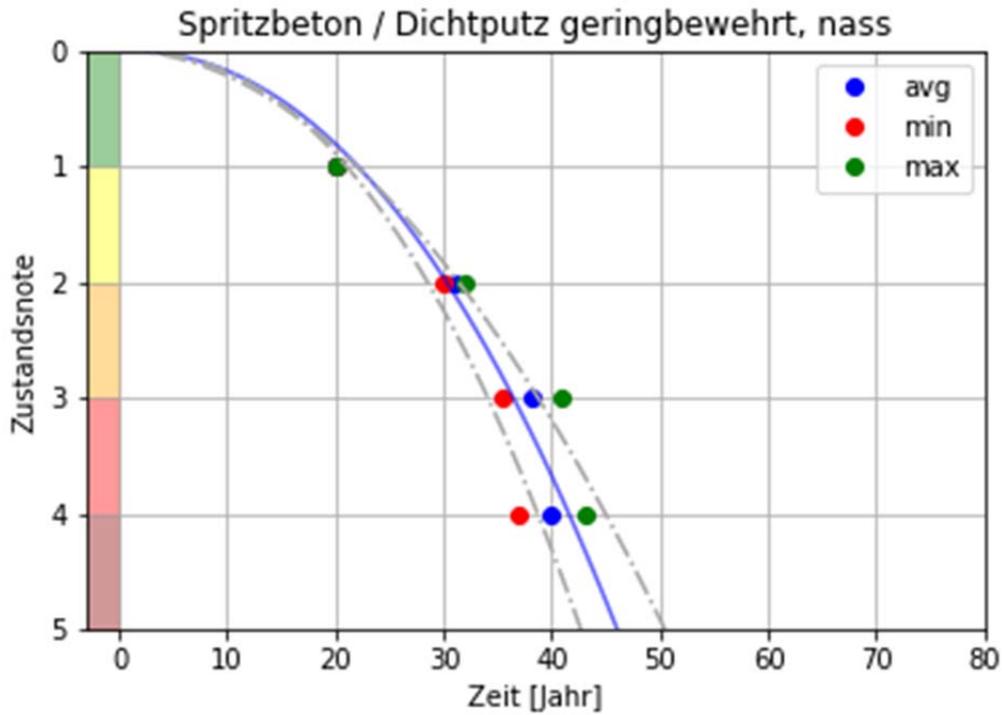


Abbildung 44: Degradationskurve für Bahntunnel mit Spritzbeton/Dichtputz-Ausbau (nass, geringe Bewehrung)

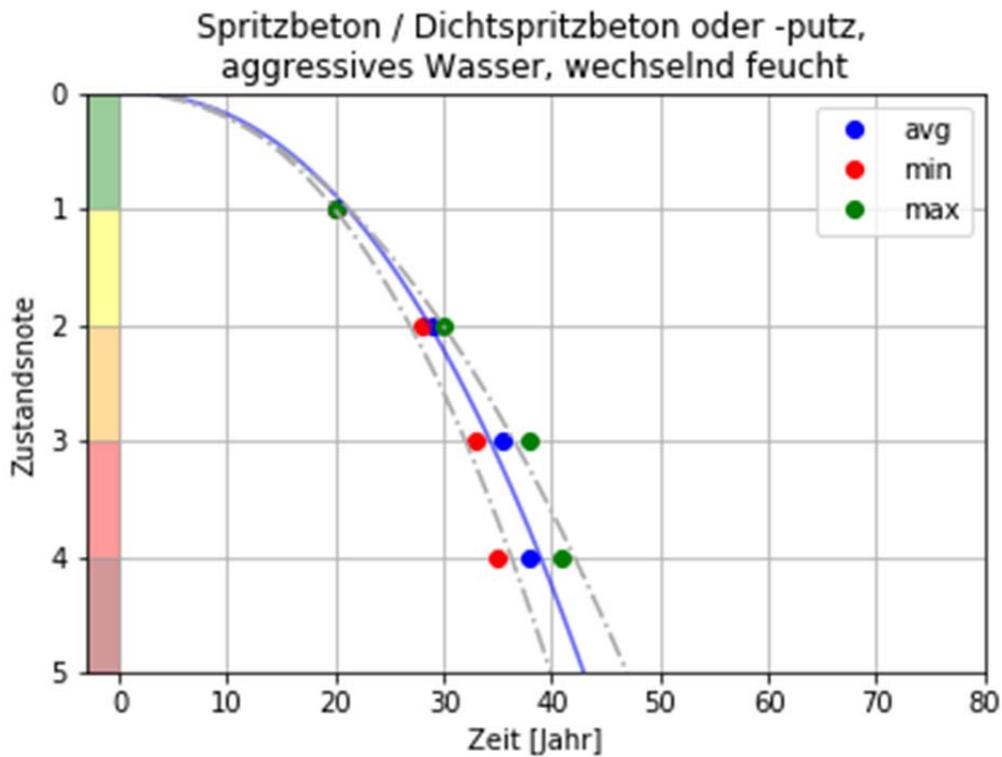


Abbildung 45: Degradationskurve für Bahntunnel mit Ausbau aus Spritzbeton/Dichtspritzbeton oder -putz (aggressives Wasser, wechselnd feucht)

1.5 Zusammenfassung der Degradationskurven

Die verschiedenen Alterungskurven weisen durchschnittliche Nutzungsdauern (Übergang Note 4→5, ohne Berücksichtigung von Instandhaltungsmaßnahmen) von 30 Jahre für das ASFiNAG-Netz und 40-60 Jahre bei der ÖBB auf. Diese sind aus folgenden Gründen nur bedingt vergleichbar:

- Die Altersverteilung der Straßentunnel eine andere als bei Bahntunnel ist, welche schon länger in Betrieb stehen. Die Erfahrungen der Experten beziehen sich auf die vergangenen 20-30 Jahre. Nutzungsdauerverlängernde Maßnahmen vor dieser Zeit schlagen sich in den Einschätzungen ggf. nur eingeschränkt nieder.
- Bei der Kalibrierung der Degradationskurven wurden sowohl bei der Schiene als auch der Straße Annahmen hinsichtlich der Initialdegradationsrate, sprich zwischen Inbetriebnahme und erster Zustandsnotenänderung oder Zustandsnotenvergabe getroffen. Diese verfälschen möglicherweise das Ergebnis über die Gesamtlebensdauer. Von größerem Interesse sind aber aufgrund des bestehenden Anlagenkollektivs ohnehin die Degradationsraten für Zustandsnoten >2. Hier zeigt sich im Vergleich zwischen Schiene und Straße eine markant raschere Alterung der Bahntunnel gegenüber den Straßentunneln.

Das unterschiedliche Alterungsverhalten ist auch geprägt durch die zwischen Straße und Schiene sehr divergierenden Alterungskollektive und Bauweisen. Hinsichtlich der Exposition gegenüber alterungsrelevanten Umwelteinflüssen (vgl. weiter unten auch Kap. 2 und 3) erscheint bei neueren Bauweisen (Ortbetonausbau) zunächst nur die Chlorideindringung als augenscheinlichstes Unterscheidungskriterium, deren Relevanz bei unbewehrten Innenschalen jedoch in den Hintergrund rückt. Ob deshalb aber die Degradation unbewehrter Innenschalen von Straßentunnel auf (derzeit erst in geringem Umfang vorhandene) unbewehrte Innenschalen von Bahntunneln übertragbar sind, lässt sich erst durch zukünftig längere Datenreihen verifizieren.

- Die aus den BAUT-Daten abgeleiteten Degradationskurven der Straßentunnel unterliegen einer sehr breiten Streuung. Auffällig ist dabei, dass durchwegs bei allen Bauteilen bzw. auch beim Gesamtbauwerk die abgeleitete mittlere Lebensdauer im Bereich von 30 Jahren liegt (im Do-Nothing-Szenario ohne Instandhaltungsmaßnahmen).

- Die Streuung der aus dem Delphi-Prozess hervorgegangenen Degradationskurven der Bahntunnel erscheint zunächst geringer als die Bandbreite bei den Straßentunneln. Dies liegt u.a. daran, dass es sich bei den Kurven der Bahntunnel nicht um stochastische Streuung handelt, sondern um geschätzte Bandbreiten einzelner vorausgewählter Kategorien. Es ist auch ein typischer Effekt des mehrstufigen Delphi-Prozesses, dass die Angaben der Experten und somit die Gesamtergebnisse konvergieren und sich die Bandbreiten tendenziell einengen. Weiters sind die Kurven für Bahntunnel bereits für verschiedene Ausbautypen und Expositionen kategorisiert, während hingegen bei den aus der BAUT abgeleiteten Degradationskurven keine solche Kategorisierung erfolgte und somit die tatsächliche Bandbreite an Expositionen und Bausubstanz repräsentieren.

Die Bandbreiten der Degradationskurven aus BAUT und ÖBB-Expertenbefragung sind somit insgesamt nicht im Sinne statistischer Verteilungen vergleichbar.

Die hier entwickelten und dargestellten Kurven dienen der Identifikation grundsätzlicher Alterungsprozesse, derer qualitativen Verläufe und wesentlichen Einflussgrößen (vgl. Kap. 3). Sie sind im Bewertungssystem der RVS 13.03.31 [1] und dem RW 06.01.02 [4] zu lesen. Ohne die erst im AMBITION Arbeitspaket AP4 behandelte Formulierung der Zustandsgrößen fehlt ihnen die notwendige quantitative Aussagekraft im Rahmen einer allfällig weiterentwickelten Zustandsbewertungssystematik. Die im Rahmen des Asset Managements zukünftig tatsächlich heranzuziehenden bauteil- und bauwerksspezifischen Alterungsmodelle sind erst auf Basis der zukünftigen Formulierung der Zustandsgrößen zu formulieren und - ggf. ausgehend von den gegenständlich präsentierten Ergebnissen - zu kalibrieren und fortzuschreiben.

2 GENERISCHE ALTERUNGSMODELLE

2.1 Allgemeines

Schädigungsprozesse lassen sich auch auf Baustoffebene beschreiben. Gerade bei Beton und Stahlbeton existiert bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle zur Beschreibung dieser Schädigungsprozesse. Die werkstoffliche Degradation führt dabei entsprechend zu einer Degradation des betroffenen Bauteils und letztendlich auch des Bauwerks. Im Folgenden werden die vorhandenen Schadensprozesse für Stahlbeton zusammengefasst und hinsichtlich der beim Tunnel eingrenzbaaren Rahmenbedingungen ausgewertet.

2.2 Bestehende Alterungsmodelle und Verteilungsannahmen auf Werkstoff-, Bauteil- und Bauwerksebene

2.2.1 Schadensprozesse

Schädigungsmodelle beziehen sich stets auf den betrachteten Werkstoff. Durch Einbeziehung der spezifischen Einwirkung können jedoch Rückschlüsse auf die Schädigungsentwicklung eines definierten Abschnittes bzw. Bauteils gezogen werden. Diese wiederum sind für den Zustand des Gesamtbauwerks verantwortlich.

Im Rahmen des AP2 wurde eine umfassende Literaturrecherche bez. generischer Alterungsmodelle durchgeführt. Im Rahmen des „Scoping“ (siehe Deliverable D1, Kapitel 2.1) wurde gemeinsam mit dem Auftraggeber festgelegt, dass AMBITION auf Tunnelschalen in Ortbeton und auf Mauerwerke fokussiert, wobei aus prozessökonomischen Gründen erstere anhand von Straßentunnel und letztere anhand von Eisenbahntunnel erörtert werden.

In der Literatur findet sich bislang kein Modell, welches Schäden von Mauerwerksbauten als Funktion der Zeit abbildet.

Hingegen werden in Bezug auf die Dauerhaftigkeit von Beton und Stahlbeton im FIB Model Code 2010 (MC10) [5] sowie im FIB Model Code for Service Life Design (MCSLD) [6] nachfolgende Alterungsmodelle vorgeschlagen:

- Karbonatisierungsfortschritt
- Eindringen von Chloriden
- Betondegradation durch Frost-Tau Wechsel
- Säureangriff
- Auswaschung des Betons

Im Rahmen des gegenständlichen Projekts wurden nur die ersten beiden Modelle für eine allgemeingültige Analyse der Schädigungsentwicklung im Detail untersucht. Die Degradation aufgrund von Frost-Tau Wechsel wurde hingegen nicht weiter berücksichtigt, da:

- 1.) diese Schadensart in Tunnel selten auftritt: In großen Höhenlagen gelangen im Portalbereich üblicherweise angepasste Betone mit Luftporenbildnern zum Einsatz, welche in genormten Tests (ÖNORM B3306 [7], CIF-Test [8] bzw. CDF-Test [9]) auf Frost-Tau- bzw. Frost-Tausalzbeständigkeit geprüft sind.
- 2.) die derzeit verfügbaren Modelle von FAGERLUND sowie gemäß [10] [11] [12] nur sehr vage Abschätzungen bez. Frost-Tauwechsel erwarten lassen. Dies liegt vor allem daran, dass keines der Modelle die Intensität und Dauer eines Frost-Tauwechsels berücksichtigt. Teilweise ist auch die Definition weiterer Eingangsparameter schwierig, da diese nur sehr allgemein formuliert wurden.

Das Einwirken von Säure auf die Stahloberfläche löst in Stahlbeton eine sofortige Korrosion aus. Daher ist die Eindringtiefe von Säure von besonderer Bedeutung. Im FIB Model Code 2010 [5] wird folgende Formel zur Berechnung der Korrosionstiefe d von Stahl in Beton unter der Betonoberfläche als Funktion der Zeit t vorgeschlagen

$$d = k_c \cdot \sqrt{c \cdot t}$$

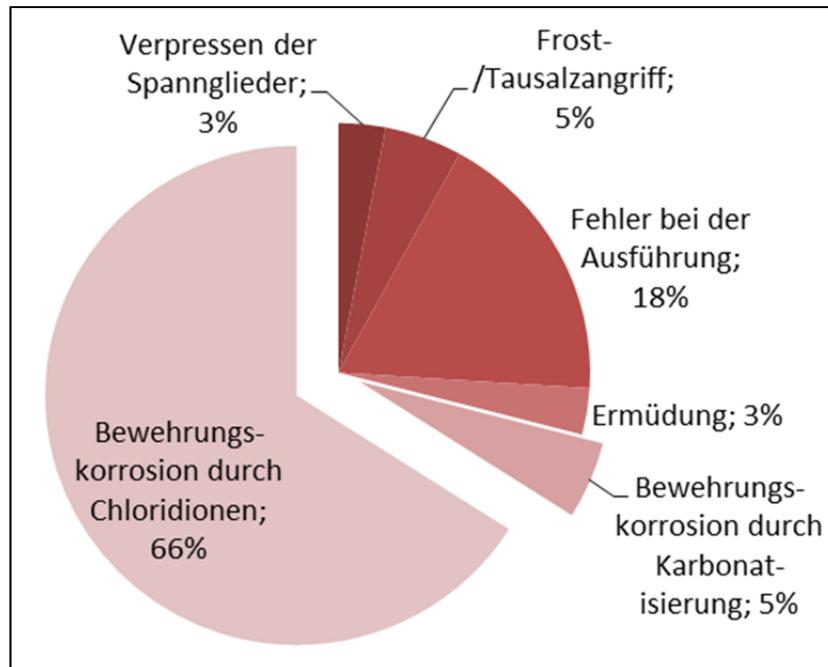
Wobei c die Konzentration der Säure und k_c eine für jeden Beton individuell zu bestimmende Konstante ist. Dieser Ansatz ist allerdings nur anwendbar, wenn der betonspezifische Wert k_c in einem Laborversuch bestimmt wurde, da keine allgemeingültige Formel zur Abschätzung zur Verfügung steht.

Die Berechnung der Korrosion durch Säureeinwirkung wurde aus mehreren Gründen nicht weiter verfolgt. Zum einen sind Säureeinwirkungen im Tunnel sehr selten. Andererseits muss die Säurekonzentration wie auch k_c für jeden Fall ermittelt werden, Berechnungen sind daher nicht in verallgemeinerter Form durchführbar.

Der vorgeschlagene Ansatz zur Berechnung der Auswaschung des Betons ist für das gegenständliche Projekt nicht von Relevanz, da er sich auf die Menge der für die Umwelt belastenden Moleküle bzw. Atome, welche bei Wassereinwirkung auf aus dem Beton ausgewaschen werden, bezieht.

Somit verbleiben die Korrosion von Bewehrungsstahl durch Karbonatisierung bzw. Chlorideintrag als einzige relevante und abschätzbare Schädigungsmechanismen. Diese Schädigungsmechanismen werden im weiteren Verlauf des Projekts genauer betrachtet.

digungsarten treten auch am Häufigsten an Betonbauwerken im Zuge von Verkehrswegen auf (siehe [Abbildung 46](#)).



[Abbildung 46](#): Schadensursachen und Häufigkeiten an Betonbrücken in Deutschland [13]

Allgemein wird die Korrosion von Bewehrungsstahl in Beton in zwei Stufen unterteilt:

Stufe 1:

Die erste Stufe, Initialphase genannt, zeichnet sich durch den Verlust der Passivschicht des Stahls aus (siehe [Abbildung 47](#)). Diese Schicht bildet sich aufgrund der hohen Alkalität von Beton und schützt den Stahl vor Korrosion. Bei einem pH-Wert < 10 ist dieser Schutz, die sogenannte Passivierung, nicht mehr ausreichend sichergestellt und der Stahl beginnt zu korrodieren. Bei der Karbonatisierung von Beton (Reaktion des im Beton enthaltenen alkalischen Kalkhydrats mit Luft-Kohlendioxid zu Kalkstein ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$)) sinkt der pH-Wert unter dieses Niveau. Ähnliches gilt für die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion, hier sinkt der pH-Wert durch Chloridionen im Betongefüge. Ab einer gewissen Konzentration, dem sogenannten kritischen Chloridgehalt, spricht man von Depassivierung, d.h. der Bewehrungsstahl beginnt zu oxidieren.

Die Dauer der Initialphase ist von einer Reihe von Faktoren abhängig. Die wichtigsten im Falle von Karbonatisierung sind die Feuchtigkeit, der w/z-Wert, die Porosität und das Alter. Im Falle von chloridinduzierter Korrosion wird unterschieden nach:

- **Faktoren** welche den **Chloriddiffusionskoeffizienten** beeinflussen (w/z-Wert, Zementzusammensetzung, Aggregate und Zuschlagstoffe als Faktoren der Betonmischung und Nachbearbeitung als Faktor der Ausführung),

- **Umweltfaktoren** (Temperatur, Feuchtigkeit, nass-trocken Zyklen, Chlorid Einwirkung)
- **Ausführungsfaktoren** (Unreinheiten, tatsächliche Betondeckung).

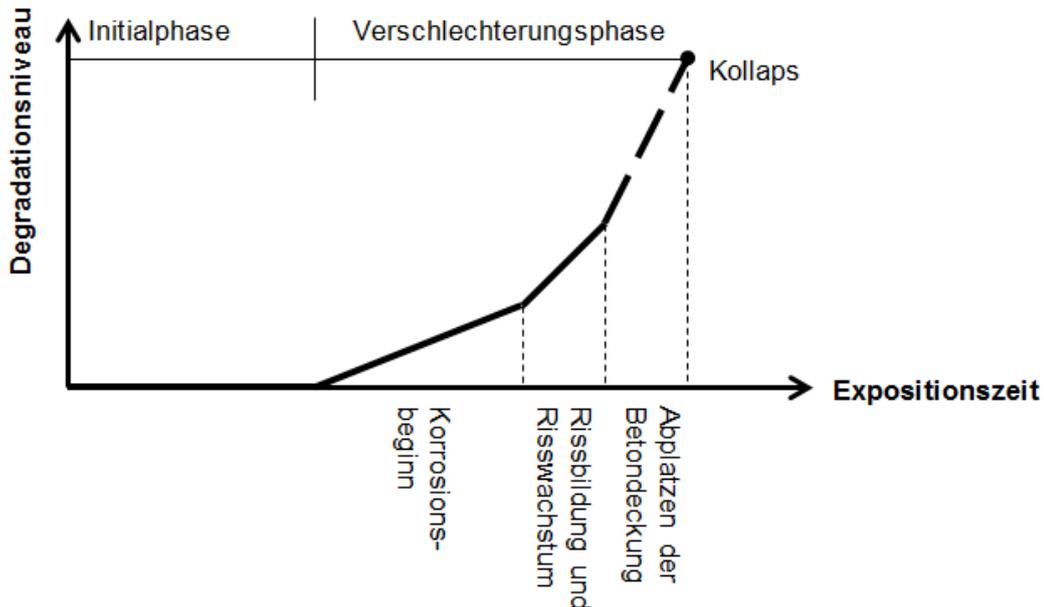


Abbildung 47: Phasen der Degradation von Stahlbeton durch Bewehrungskorrosion

Stufe 2:

Sobald der Bewehrungsstahl depassiviert ist, beginnt er zu korrodieren. Da das Korrosionsprodukt von Stahl, der Rost, ein wesentlich höheres spezifisches Volumen als Stahl hat, steigt der Druck auf den umgebenden Beton mit zunehmender Korrosion weiter an. Dieser Druck wiederum verursacht Zugspannungen in der Betondeckung, welche bei auseichendem hohem Druck zur Rissbildung führt.

Weiteres Rosten führt zu einer Vergrößerung der Rissweiten bis hin zum Abplatzen der Betondeckung. Die Querschnittsverminderung des Stahls wie auch des Betons und der damit einhergehende Verlust des Verbunds zwischen Stahl und Beton bedeuten natürlich eine Schwächung der bestehenden Struktur und können daher auch zum Versagen führen. Es sein noch erwähnt, dass das Auftreten von Rissen zu einer erhöhten Verfügbarkeit von Chloriden, Wasser wie auch Sauerstoff auf der Bewehrungsoberfläche führen und dadurch die Korrosionsgeschwindigkeit erhöhen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden verschiedene Modelle für die einzelnen Prozesse der Degradation von Stahlbeton vorgestellt. Gezeigt werden allerdings nur jene Modelle, welche für die gegenständliche Aufgabenstellung als relevant empfunden wurden und auch geeignet sind, Verwendung in der Berechnung von Inspektionszyklen zu finden.

2.2.2 Modelle für Korrosionsbeginn (Initialphase)

Zur Berechnung des Karbonatisierungsfortschritts wurde das Modell aus dem Projekt DARTS [14] verwendet, welches auch im MC 10 [5] vorgeschlagen wird. Die Karbonatisierungstiefe x_c berechnet sich hier aus:

$$x_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_s \cdot \sqrt{t} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}}}$$

Wobei R_{ACC}^{-1} der inverse effektive Karbonatisierungswiderstand von trockenem Beton zum Zeitpunkt t_0 ist. k_e , k_c und k_t sind Konstante zur Berücksichtigung der Umwelt, der Nachbehandlung und der Testmethode. ε_t ist der Fehlerterm zur Berücksichtigung von Ungenauigkeiten der ACC (beschleunigten) Karbonatisierungstestmethode. p_{SR} ist die Wahrscheinlichkeit für Schlagregen, ToW ist die Befeuchtungsdauer und b_w ist der Regressionsexponent der sogenannten „Wetterfunktion“.

Die Faktoren k_e , k_c und ToW errechnen sich aus:

$$k_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100}\right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100}\right)^{f_e}} \right)^{g_e}$$

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7}\right)^{b_c}$$

$$ToW = \frac{R_d}{365}$$

Wobei RH_{real} und RH_{ref} die reale und die Referenz-Luftfeuchtigkeit sind. f_e , g_e und b_c sind konstante Exponenten, t_c ist die Nachbearbeitungszeit und R_d sind die Regentage $\geq 2,5$ mm pro Jahr.

Zur Berechnung des Chloridgehaltes auf Bewehrungsniveau $C_{x,t}$ wurde die Formel aus dem MC10 [5] verwendet, welche eine leichte Adaptierung des Vorschlages des Projekts DuraCrete [15] darstellt.

$$C_{x,t} = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \sqrt{D_{app,C} \cdot t}} \right]$$

$$D_{app,C}(t) = k_e \cdot k_t \cdot D_{RCM,0} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^a$$

C_0 ist der initiale Chloridgehalt des Betons, $C_{S,\Delta x}$ ist der Oberflächenchloridgehalt in der Konvektionstiefe Δx , x ist die Dicke der Betondeckung, k_e und k_t sind konstanten zur Berücksichtigung der Umwelt und der Testmethode, $D_{RCM,0}$ ist der Diffusionskoeffizient zur Zeit t_0 , $D_{app,C}(t)$ ist der tatsächliche zu einem bestimmten Zeitpunkt auftretende Chlorid Diffusionskoeffizient, t ist die Einwirkungsdauer und a ist der Alterungsfaktor.

Die Initialzeit bei Chlorideinwirkung endet beim Erreichen des kritischen Chloridgehaltes ($C_{x,t} = C_{cr}$). Zur Definition dieses Schwellenwerts finden sich in der Literatur verschiedene Werte, Mittelwerte reichen hier von $0,2 Ma\% Cl^-$ des Binders in [16] für vorgespannten Beton bis $0,6 Ma\% Cl^-$ des Binders im MC10 [5].

2.2.3 Modelle Korrosionsgeschwindigkeit

Zur Berechnung der Korrosionsgeschwindigkeit (bzw. des Korrosionsstroms i_{corr}) wurde das Modell von Liu und Weyers (1998) [17] herangezogen. Dieses empirische Modell basiert auf einer umfassenden Regressionsanalyse. Diese Publikation beinhaltet auch eine empirische Formel zur Abschätzung des ohmschen Widerstands R_C des Betons.

$$\ln(1.08 i_{corr}) = 7.89 + 0.7771 \ln(1.69 C_x) - \frac{3006}{T} - 0.000116 R_C + 2.24 t^{-.215}$$

$$\ln(R_C) = 8.03 - 0.549 \ln(1 + 1.69 C_x)$$

$i_{corr} [\mu A/cm^2]$ ist der Korrosionsstrom, $C_x [kg/m^3]$ ist die Chloridkonzentration am Bewehrungsstab, $T [K]$ ist die Temperatur, $R_C [\Omega]$ ist der ohm'sche Widerstand des Betons und $t [yr]$ ist die Zeit seit Erreichen des kritischen Chloridgehaltes.

2.2.4 Modelle Rissbildung und Entwicklung

Wie bereits Eingangs beschrieben, verursacht das höhere spezifische Volumen von Rost einen Druck um den korrodierenden Bewehrungsstab. Übersteigt dieser Druck P_{corr} ein kritisches Niveau P_{cr} entstehen Risse entlang des Bewehrungsstabes.

$$P_{corr} \geq P_{cr}$$

Der kritische Druck bei dem die Zugspannung f_{ct} des Betons überschritten wird, errechnet sich aus:

$$P_{cr} = \frac{2 x_{cov} f_{ct}}{d_0}$$

Wobei x_{cov} die Dicke der Betondeckung und d_0 der Durchmesser des unbeschädigten Stabes ist.

Zur Berechnung des Druckes durch die Korrosionsprodukte wird die Masse des korrodierten Stahls mit dem Modell von Maaddawy and Soudki (2007) [18], welches auf dem Faraday'schen Gesetz beruht, berechnet. Die Masse des Stahlverlusts $\Delta M_{loss}[g/m]$ in einem Zeitschritt $\Delta t[yr]$ errechnet sich mit:

$$\Delta M_{loss}(t) = 2.315 \cdot 10^{-4} \cdot \pi \cdot d(t) \cdot i_{corr} \cdot \Delta t$$

Wobei $i_{corr}[A/m^2]$ ist der Korrosionsstrom und $d(t)[m]$ ist der verbleibende Bewehrungsdurchmesser. Der prozentuelle Masseverlust m_l resultiert nun aus:

$$m_l = \frac{100 \cdot \sum_{i=1}^n \Delta M_{loss}(t)}{M_{St}}$$

Wobei M_{St} die Ausgangsmasse des unbeschädigten Stabes ist. Schließlich errechnet sich der Korrosionsdruck P_{corr} aus:

$$P_{corr} = \frac{m_l \cdot E_{ef} \cdot d_0 \cdot (\gamma_{vol} - 1)}{200 \cdot (1 + \psi + \nu) \cdot (d_0 + 2\delta_0)} - \frac{2 \cdot \delta_0 \cdot E_{ef}}{(1 + \psi + \nu) \cdot (d_0 + 2\delta_0)}$$

E_{ef} ist der effektive Elastizitätsmodul des Betons, d_0 ist der Durchmesser des unversehrten Bewehrungsstabes, ψ ist eine geometrieabhängige Konstante, ν ist die Poisson-Zahl und δ_0 die Dicke der porösen Zone welche den Bewehrungsstab umgibt.

Der aktuelle verbleibende Durchmesser $d(t)$ wird bestimmt mit:

$$d(t) = \sqrt{d(t-1)^2 - 4 \frac{\Delta M_{loss}(t)}{\rho_s \cdot \pi}}$$

Wobei ρ_s die Dichte von Stahl ist.

Risse wirken sich umgekehrt natürlich auch auf den Chloridgehalt im Beton und damit auf die Korrosionsgeschwindigkeit aus. $D_{app,c}(t)$ ist, wie eingangs bereits erwähnt, stark von Rissen abhängig. Um Rissen die durch die Korrosion entstehen Rechnung zu tragen, wird $D_{app,c}(t)$ nun mit einem von der Rissweite $w [mm]$ abhängigen Faktor $f(w)$ multipliziert.

Der folgende Ansatz basiert auf einer Regressionsanalyse von Kwon et al. (2009) [19].

$$D(w) = f(w) \cdot D_{app,c}(t)$$

$$f(w) = 31,61 \cdot w^2 + 4,73 \cdot w + 1$$

Die Rissweite wurde mit einem Modellansatz gemäß [20] berechnet. Allgemein ist die Rissweite in diesem empirischen Ansatz nur abhängig vom stahlquerschnitt zum Beginn

der Rissbildung ΔA_{s0} und vom verbleibenden Stahlquerschnitt zu Betrachtungszeit ΔA_{s0} . Dieses Modell wurde in einer sogenannten GLIM Analyse entwickelt. Wobei hier von einer Gammaverteilung mit dem Formparameter k und der Skalierparameter θ ausgegangen wird, die sich folgendermaßen errechnen.

$$\theta = \frac{E[w]}{k}$$

$$E[w] = K(\Delta A_s - \Delta A_{s0})$$

$$k = \frac{1}{\exp(\gamma_1 + \gamma_2(\Delta A_s - \Delta A_{s0}))}$$

Die Konstanten haben die Werte $K = 0.1007$, $\gamma_1 = -0.4388$ und $\gamma_2 = -0.0399$.

2.3 Bewertung der Modelle in Hinblick auf Tunnel Asset Management

2.3.1 Allgemeines

Wie bereits im Kapitel 2.2 angeführt, werden für die bestehenden Modelle eine große Zahl an Eingangsparametern benötigt. Allgemein ist festzustellen, dass einige der Eingangsparameter streuen, anderen wiederum ein deterministischer Wert zugewiesen werden kann. Um Werte aus der Literatur beziehen zu können, muss in einem ersten Schritt festgelegt werden, von welchen Betonsorten, Umwelteinwirkungen und Ausführungen man ausgeht.

Mit diesen definierten Eingangsgrößen kann abgeschätzt werden, wie schnell die Schädigung des Stahlbetons durch Bewehrungskorrosion fortschreitet. In der Bewertung wird Bezug auf die Schadensniveaus der RVS 13.03.[1] genommen.

Somit lässt sich die Verschlechterung des Zustandes bzw. der Zustandsnote eines Bauteils leicht verständlich darstellen. Monetäre Auswirkungen eines Schadens werden nicht, (wie im Asset Management sonst üblich) betrachtet, jedoch können Verschlechterungszeiträume bestimmt und daraus folgernd Inspektionsintervalle vorgeschlagen werden.

2.3.2 Vergabe der Zustandsnote

Wie bereits erwähnt, wird die Bewertung des Schädigungszustands mit Hilfe von Zustandsnoten vorgenommen. Diese entsprechen allerdings nicht exakt den Noten der RVS 13.03.31 [1], da im Regelwerk die Note 2 keine Verschlechterung im Sinne von Degradation bedeutet, sondern sich auf leichte Schäden und Baumängel bezieht. Der Zusammenhang zwischen dem Ergebnis der Berechnung und der Zustandsnote wurde mit Hilfe des Textes zur Bauteilbewertung in der RVS abgeschätzt und ist Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Zustandsnotenvergabe auf Basis des Ergebnisses der Korrosionsberechnung

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

Bei den hier vorgenommenen Berechnungen handelt es sich um probabilistische Verfahren, d.h. die Streuung der Eingangsparameter wird bei der Ermittlung berücksichtigt. Zu diesem Zweck werden zuerst für jede Eingangsvariable Samples erzeugt welche der definierten Verteilung folgen. Im gegenständlichen Fall wurde die sogenannten Latin Hypercube Technik verwendet. Im nächsten Schritt wird Schädigungsentwicklung mit zufällig ausgewählten Realisierungen berechnet. Dieser Schritt wird so oft wiederholt, bis jeder erzeugte Samplewert einmal verwendet wurde.

Folglich weist auch das Ergebnis eine Streuung auf, dessen Verteilung aber nicht definiert ist. Es könnte zwar versucht werden eine entsprechende Verteilung anzupassen. Davon wurde im Zuge dieser Studie jedoch Abstand genommen, da sich diese je nach Eingangswerten und -verteilungen ändert. Vielmehr wurde untersucht, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Zustand eintritt. Zu diesem Zweck wird der Zeitpunkt des Eintretens eines bestimmten Schädigungszustands an sogenannten p-Quantilen betrachtet (siehe [Abbildung 48](#)). Da die Schädigungsberechnung auf Materialebene erfolgt, wird, bezogen auf das Bauteil, immer nur ein Punkt bzw. ein sehr begrenzter Raum betrachtet. Weiters setzt sich ein Schaden gemäß RVS 13.03.31 [1] immer aus Intensität und Ausmaß zusammen. Würde man also ein sehr kleines Quantil ansehen, beispielsweise 1 %, dann ist die Wahrscheinlichkeit einer sehr kleinen Räumlichen Ausdehnung sehr groß. Den Mittelwert zu betrachten könnte allerdings andererseits dazu führen den Schaden zu unterschätzen da die Wahrscheinlichkeit, dass große Abschnitte das beschriebene Schädigungsausmaß erreicht habe bereits sehr groß ist, vor allem wenn man in Betracht zieht, dass ein Bauwerk systematisch in geringer Qualität ausgeführt worden sein kann. Diese Überlegungen haben dazu geführt, dass in weiterer Folge immer das 0,05 und das 0,10 Quantil betrachtet wird, sprich der Schädigungszustand an 5 % bzw. 10 % der Stichpro-

ben überschritten wurde, allerdings bei 95 % bzw. 90 % das Schädigungsniveau nicht erreicht wurde.

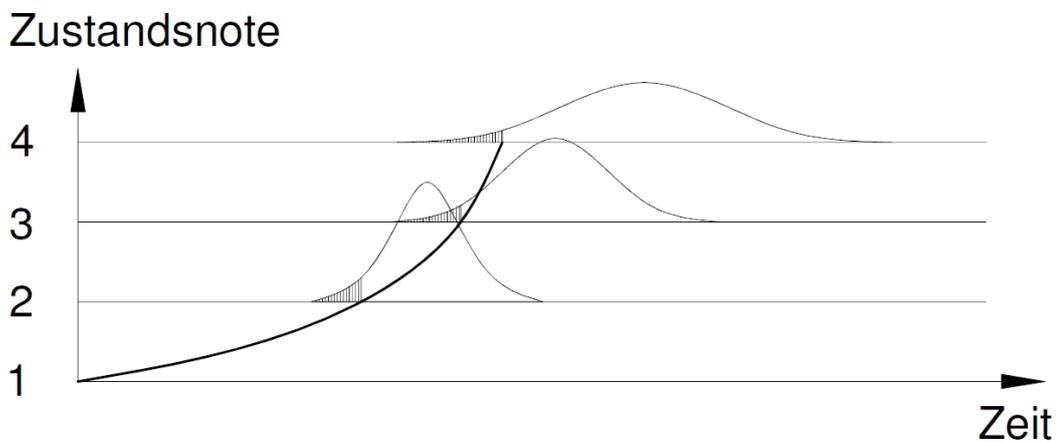


Abbildung 48: Schematische Darstellung der Verwendung von Quantilwerten für die Zuweisung von Schadenszuständen zu Zustandsnoten.

Für die Beschreibung der Zustandsverschlechterung wurden die Zeitpunkte der Zustandsnotenveränderung mit einer Exponentialfunktion gefittet. Diese Kurven können, wenn die Kosten verschiedener Instandhaltungsmaßnahmen wie auch Initialkosten etc. bekannt sind, zur Berechnung einer optimierten Instandhaltungsstrategie verwendet werden. Die Funktion wie auch in [25] verwendet lautet:

$$\text{Zustandsnote} = a + b \cdot t^c$$

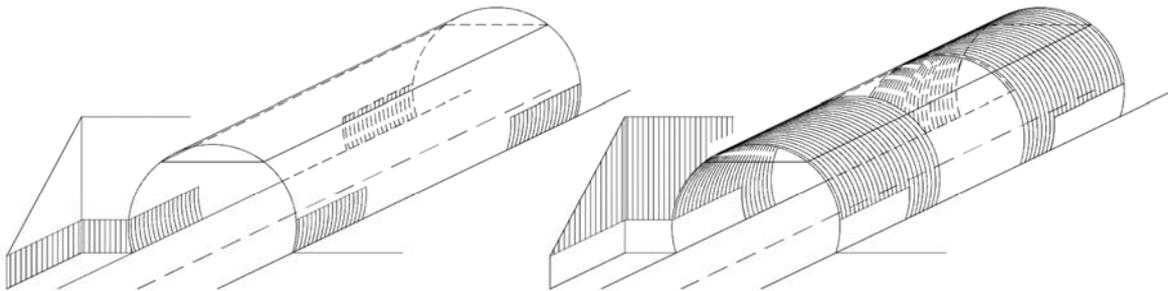
Wobei davon ausgegangen wird, dass die Zustandsnote zu Beginn der Berechnung 1 ist, daher ist immer $a = 1$. b und c werden für jede Eingangparameterzusammenstellung gefittet und t ist die Zeit in Jahren.

2.3.3 Festlegung der Eingangparameter unter Chloridbeanspruchung

Fragestellungen der Betonsorte wurden mithilfe der Tabelle 3.3 der Richtlinie Innenschalenbeton des ÖBV [21] definiert. Allgemein kann noch gesagt werden, dass der Diffusionskoeffizient, zumindest in der Initialphase, der wichtigste Eingangparameter ist. Da dieser stark vom w/z-Wert abhängt, wird die Auswahl der Werte beider Variablen nachfolgend detailliert dargestellt.

Bezüglich der Exposition wurde davon ausgegangen, dass es folgende drei Expositionsbereiche gibt (siehe Abbildung 49):

- **Spritzwasserbereich:** Bereich nahe der Fahrbahnoberfläche in denen (im Winter chloridhaltiges) Wasser direkt auf die Betonoberfläche einwirkt.
- **Sprühnebelbereich:** Bereich in dem aufgewirbelte (im Winter chloridhaltige) kleinste Wassertöpfchen die Betonoberfläche benetzen.
- **Trockener Bereich** im inneren des Tunnels.



Zone 1: Spritzwasserbereich

Zone 2: Sprühnebelbereich

Abbildung 49: Einwirkungsbereiche im Spritzwasserbereich und Sprühnebelbereich.

Da es im Tunnelinneren de facto keine Einwirkung gibt wird davon ausgegangen, dass kein chloridinduziertes Abrosten des Bewehrungsstabs auftritt. Zur Abschätzung der Einwirkung und Exposition wurden der Eurocode 2 [22] bzw. das FIB Bulletin 76 [23] herangezogen. Der Spritzwasserbereich wird demnach als XD3 definiert (Wechselnd nass-trocken mit Chlorideinfluss ausgenommen Meerwasser). Hier empfiehlt das FIB Bulletin eine Oberflächenchloridkonzentration von $C_s = 3,0 \text{ Ma\% Cl}^-$ mit einem $CoV = 0,75$. Für den Sprühnebelbereich wurde die Expositionsklasse XD1 gewählt (mäßige feuchte mit Chlorideinfluss ohne Meerwasser). Dies entspricht weiters einem von $C_s = 1,0 \text{ Ma\% Cl}^-$. Der Variationskoeffizient der Lognormalverteilung wird auch hier mit $CoV = 0,75$ angegeben.

Als Beton im Spritzwasserbeeinflussten Innen- wie auch Portalbereich wurden Betone der Kategorie IT (Frostmittelangriff mit Taumittel, ohne Tunnelanstrich) gewählt. Die Richtlinie Innenschalenbeton empfiehlt hier WT-38. Dies entspricht CEMII/A-M(S-L)42.5 N WT38. Die Innenschalenrichtlinie erlaubt w/z-Werte $w/z \leq 0,5$, der Eurocode 2 [22] lässt für die Exposition XD3 allerdings nur einen maximalen w/z Wert von $w/z = 0,45$ zu.

Als Gewölbebeton der Innenschale kann auch der Beton IG zur Anwendung gelangen. Die Richtlinie Innenschalenbeton empfiehlt in diesem Fall ebenfalls WT-38 bzw. auch WT-

42. Hier ist allgemein ein höherer w/z -Wert erlaubt, allerdings darf aufgrund des Eurocodes der w/z -Wert im Spritzwasserbereich (XD3) $w/z = 0,45$ und im Sprühnebelbereich (XD1) $w/z = 0,55$ nicht überschreiten.

Da für diese Betone bzw. Bindersorten keine Werte für den Referenzdiffusionskoeffizienten zur Verfügung stehen wurden diese mit der empirischen Formel nach Bamforth und Price (1998) [28] berechnet.

$$\ln(D_{Cl,ref}) = -10,6 + 1,9 \cdot \ln(w/c)$$

Demnach ergibt sich ein $D_{Cl,ref} = 5,45e^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ bzw. $D_{Cl,ref} = 8,00e^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ für $w/z = 0,45$ bzw. $w/z = 0,55$. Der Diffusionskoeffizient wurde nach FIB Bulletin 76 [23] Normalverteilt mit einem Variationskoeffizienten von $CoV = 0,2$ angenommen.

Bezüglich der Ausführung von bewehrten Innenschalen wurde für ältere Tunnels von einer Betondeckung von $x_c = 35 \text{ mm}$ und für neuere Tunnels von $x_c = 45 \text{ mm}$ ausgegangen. Nach FIB Bulletin 76 [23] wurde die Betondeckung Normalverteilt angenommen. Der Variationskoeffizient wurde ebenfalls dem FIB Bulletin 76 folgend auf $CoV = 0,15$ geschätzt.

Als Stahldurchmesser wurde $d = 12 \text{ mm}$ angenommen, da dieser häufig in bewehrten Schalen Verwendung findet und einen Vergleichsweise konservativen Ansatz darstellt. Größere, ebenfalls übliche, Durchmesser von $d = 16 \text{ mm}$ bzw. $d = 20 \text{ mm}$ würden zu einem verzögerten Erreichen der Zustandsnote 4 führen, da der abzurostende Durchmesser hier größer wäre.

Für die jährliche Durchschnittstemperatur wurden gleichverteilte Werte zwischen 5°C und $11,5^\circ\text{C}$ angenommen. Dies entspricht in Österreich der jährlichen Durchschnittstemperatur in Höhenlagen von ca. 1100 müA bis ca. 200 müA. Die Würfeldruckfestigkeit von Beton wurde mit $f_c = 34 \text{ MPa}$ angenommen. Mit den in [24] vorgeschlagenen Formeln wurde die Zugfestigkeit $f_{ct} = 0,6227 \cdot \sqrt{f_c}$ und der E-Modul $E_c = 4733 \cdot \sqrt{f_c}$ bestimmt.

Tabelle 10: Nicht-variable Eingangsparameter zur Berechnung des Schädigungsfortschritts unter Chloridbeanspruchung

Variable und Quelle		Verteilung	Mittelwert	SD	Unteres Limit	Oberes Limit	Einheit
Stahldurchmesser	d	Det.	0.12	-	-	-	m
Stahldichte	ρ	Det.	7.85E+06	-	-	-	g/m^3
Kriechkoeffizient	φ_{cr}	Det.	2	-	-	-	—
Poissonzahl	ν	Det.	0.2	-	-	-	—
Bindemittelgehalt [21]		Det.	290	-	-	-	kg/m^3
Jahres-durchschnitts-temperatur	T_{real}	Rechteck	-	-	278.15	284.65	K
Referenzzeit [2]	t_0	Det.	0.0767	-	-	-	yr
Alterungsexponent [23]	α	Beta	0.35	0.16	0	1	—
Referenz-temperatur [2]	T_{ref}	Det.	293	-	-	-	K
Kritischer Chlorid-gehalt [23]	C_{crit}	Beta	0.6	0.15	0.2	2	$Ma\%$ Cl^-
Zugfestigkeit Beton	f_{ct}	Normal	3.63	0.73	-	-	MPa
E-Modul Beton	E_c	Normal	27597.90	3311.75	-	-	MPa
Dicke der Porösen Zone [20]	δ_0	Rechteck	-	-	5.0E-06	1.2E-04	m
Relativvolumen Rost/Stahl [20]	γ_{vol}	Beta	3.01	0.81	1.695	6.3	—

2.3.4 Ergebnisse der Beurteilung unter Chloridbeanspruchung (Straßentunnel)

Für die nachfolgenden Auswertungen wurden 4.000 Berechnungsdurchläufe auf Basis von Latin Hypercube Samples zur Erstellung der Degradationskurven durchgeführt. Alle Auswertungen wurden sowohl für das 0,05-Quantil wie auch das 0,10-Quantil ausgeführt. Da die Betondeckung ein essentieller Parameter ist, werden alle Ergebnisse für eine Betondeckung von $x_c=35mm$ und $x_c=45mm$ gezeigt.

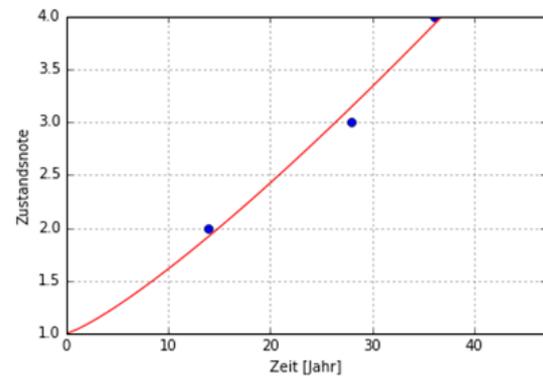
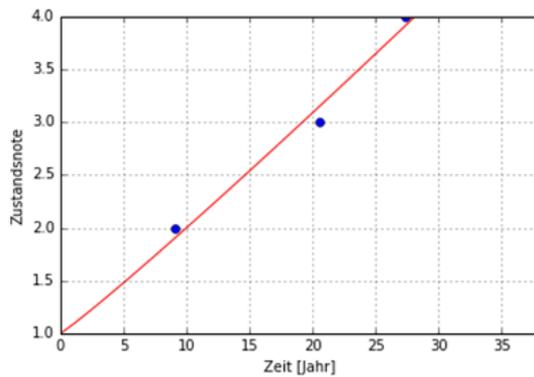


Abbildung 50: Zustandsentwicklung im Spritzwasserbereich bei Betrachtung des 5% Quantil (links: $x_c=35\text{mm}$, rechts: $x_c=45\text{mm}$).

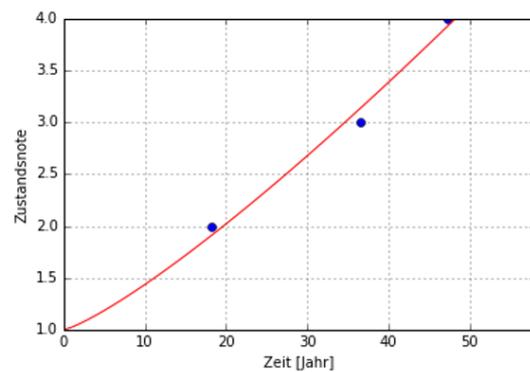
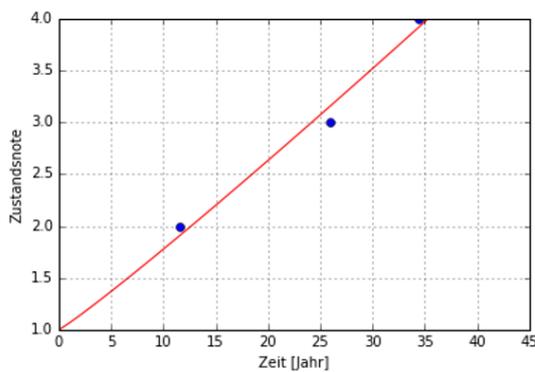


Abbildung 51: Zustandsentwicklung im Spritzwasserbereich bei Betrachtung des 10% Quantil (links: $x_c=35\text{mm}$, rechts: $x_c=45\text{mm}$).

Bei Betrachtung der Resultate des Schädigungsfortschritts im chloridbeeinflussten Spritzwasserbereich (Abbildung 50 und Abbildung 51) fällt auf, dass die Verschlechterung für beide Betondeckungen wie auch der Quantile fast linear verläuft. Weiters ist zu sehen, dass die Anpassung der Kurve auch aufgrund der Ausgangssituation (Zustandsnote 1) relativ schlecht funktioniert. Wie aus Tabelle 11 ersichtlich, beträgt die Mindestdauer der Verschlechterung um eine Zustandsnote 6 Jahre ($x_c=35\text{ mm}$, $3 \rightarrow 4$). Durchschnittlich kommt es alle 12 Jahre zur Abnahme um eine Note. Die Parameter der Exponentialfunktion sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 11: Jahr der Zustandsnotenänderung für den Spritzwasserbereich

Zustandsnote	5%		10%	
	$x_c = 35\text{ mm}$	$x_c = 45\text{ mm}$	$x_c = 35\text{ mm}$	$x_c = 45\text{ mm}$
2	9	14	12	18
3	21	28	26	37
4	27	36	34	47

Tabelle 12: Parameter Exponentialfunktion Spritzwasserbereich

Quantil	Betondeckung [mm]	a	b	c
5	35	1,00	0.08691	1.061
5	45	1,00	0.03695	1.219
10	35	1,00	0.06637	1.068
10	45	1,00	0.02620	1.222

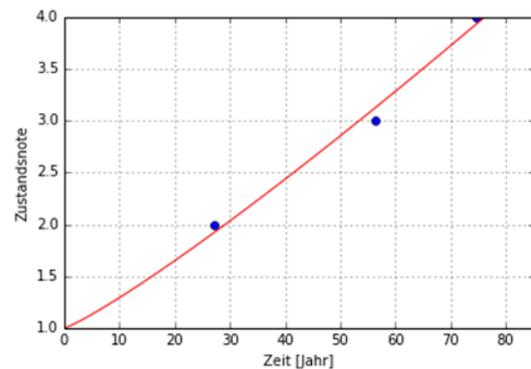
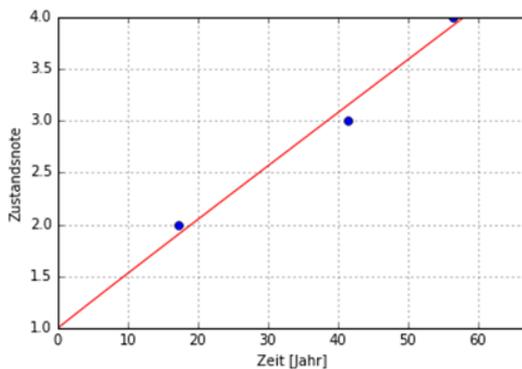


Abbildung 52: Zustandsentwicklung Sprühnebelbereich bei Betrachtung der 5% Quartil (links: $x_c=35\text{mm}$, rechts: $x_c=45\text{mm}$)

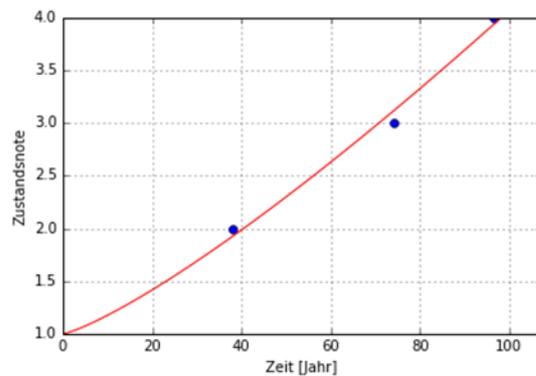
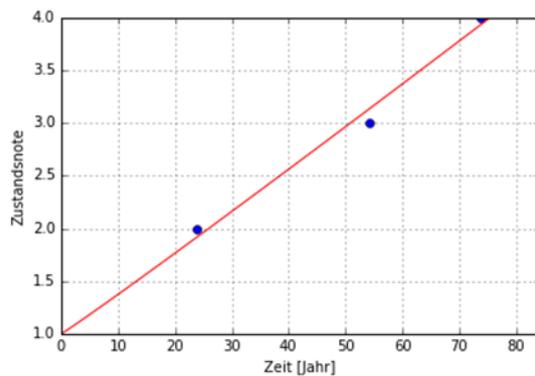


Abbildung 53: Zustandsentwicklung Sprühnebelbereich bei Betrachtung der 10% Quartil (links: $x_c=35\text{mm}$, rechts: $x_c=45\text{mm}$)

Im chloridbeeinflussten Sprühnebelbereich ([Abbildung 52](#) und [Abbildung 53](#)) kann davon ausgegangen werden, dass die Degradationsrate ca. halb so groß wie im Spritzwasserbereich ist. Obwohl der Diffusionskoeffizient höher ist, ist der Schädigungsprozess durch die wesentlich niedrigere Oberflächenkonzentration stark verlangsamt. Die Berechnung ergab eine Mindestdauer für eine Verschlechterung um eine Zustandsnote von 16 Jahren ($x_c=35\text{mm}$, $3 \rightarrow 4$, siehe [Tabelle 13](#)). Durchschnittlich beträgt die Verschlechterungsdauer um eine Note 22 Jahre (siehe [Tabelle 14](#)).

Tabelle 13: Jahr der Zustandsnotenänderung Sprühnebelbereich

Zustandsnote	5%		10%	
	$x_c = 35 \text{ mm}$	$x_c = 45 \text{ mm}$	$x_c = 35 \text{ mm}$	$x_c = 45 \text{ mm}$
2	17	26	17	27
3	42	55	42	58
4	58	73	58	76

Tabelle 14: Parameter Exponentialfunktion Sprühnebelbereich

Quantil	Betondeckung [mm]	a	b	c
5	35	1,00	0.0588	0.9605
5	45	1,00	0.0213	1.1487
10	35	1,00	0.0599	0.9593
10	45	1,00	0.0211	1.1375

2.3.5 Festlegung der Eingangsparameter unter Karbonatisierung (Bahntunnel)

Da für den inversen Karbonatisierungswiderstand, als wichtigster Eingangsparameter der Karbonatisierungsgeschwindigkeit, für in Tunneln übliche Betonmischungen keine Daten vorliegen, musste auf Werte mehr oder weniger ähnlicher Betonmischungen (Tabelle 15) zurückgegriffen werden. Da die Karbonatisierungsgeschwindigkeit, wie in den Ergebnissen ersichtlich, sehr gering ist, hat diese ohnehin nur eine untergeordnete Rolle in der Bestimmung von Inspektionsintervallen. Die Berechnungen wurden sowohl für sehr große wie auch sehr kleine Werte des inversen Karbonatisierungswiderstandes durchgeführt, um die Bandbreite der Initialzeit darstellen zu können.

Tabelle 15: Inverser Karbonatisierungswiderstand der verwendeten Zementmischungen

Zementart	w/z	$R_{ACC}^{-1} \left[\frac{\text{m}^2/\text{s}}{\text{kg}/\text{m}^3} \right]$
CEM I 42,5 R + FA (k=0,5)	0,45	1,9E-11
CEM I 42,5 R + SF (k=2.0)	0,55	16,5E-11

Da die Berechnung zeigte, dass die Initialzeit für Zementmischungen CEM I 42,5 R + FA (k=0,5) nach 400 Jahren noch nicht erreicht wird, werden in weiterer Folge nur Ergebnisse für CEM I 42,5 R + SF (k=2.0) gezeigt. Weiters sei erwähnt, dass der direkte Einfluss von Regen in diesem Modell zu einer Verlangsamung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit führt, da es in Tunneln viele Flächen gibt die nicht direkt von Wasser beeinflusst wer-

den wurde für alle Flächen der konservative Ansatz keiner direkten Regenexposition angenommen.

Tabelle 16: Eingangsparameter zur Berechnung d. Schädigungsfortschritts unter Karbonatisierung

Variable		Verteilung	Mittelwert	SD	Unteres Limit	Oberes Limit	Einheit
Stahldurchmesser	d	Det.	0.12	-	-	-	m
Stahldichte	ρ	Det.	7.85E+06	-	-	-	g/m^3
Kriechkoeffizient	φ_{cr}	Det.	2	-	-	-	—
Poissonzahl	ν	Det.	0.2	-	-	-	—
Relative Luftfeuchtigkeit	RH_{real}	Beta	80	10	40	100	%
Relative Referenz Luftfeuchtigkeit	RH_{ref}	Det.	65	0	0	0	%
Konstanter Parameter (Umweltterm)	f_e	Det.	5	0	0	0	—
Konstanter Parameter (Umweltterm)	g_e	Det.	2.5	0	0	0	—
Regressionsexponent (Nachbearbeitungsterm)	b_c	Normal	-0.567	0.024	0	0	—
Nachbearbeitungszeit	t_c	Det.	12	0	0	0	d
Regressionsparameter (Test)	k_t	Normal	1.25E+00	0.35	0	0	—
Fehlerterm (Karbonatisierungswiderstand)	ε_t	Normal	1.00E-11	1.52E-12	0	0	$\frac{m^2/s}{kg/m^3}$
Karbonatisierungswiderstand	R_{ACC}^{-1}	Normal	1.65E-10	6.14E-11	0	0	$\frac{m^2/s}{kg/m^3}$
CO2-Konzentration	C_s	Normal	0.00082	0.0001	0	0	kg/m^3
Regentage	R_d		0	0	0	0	d
Regressionsexponent (Wetterterm)	b_w	Normal	0.446	0.163	0	0	—
Referenzzeit	t_0	Det.	0.0767	0	0	0	yr
Schlagregenwahrscheinlichkeit	p_{SR}		0	0	0	0	—
Ohm'scher Widerstand Beton	ρ	Weibull Min	scale=680	c=1	0	0	$Ohm \cdot m$
Zugfestigkeit Beton	f_{ct}	Normal	3.63	0.73	0	0	MPa
E-Modul Beton	E_c	Normal	27597.9	3311.7	0	0	MPa
Dicke der porösen Zone	δ_0	Rechteck	0	0	5.00E-06	1.20E-04	m
Relativvolumen Rost/Stahl	γ_{vol}	Beta	3.010	0.809	1.695	6.3	—

2.3.6 Ergebnisse der Beurteilung unter Karbonatisierung (Bahntunnel)

Es wurden in Summe 4.000 Berechnungsdurchläufe auf Basis von Latin Hypercube Samples zwecks Erstellung der Degradationskurven durchgeführt. Die Ermittlung der Quantile und Betondeckungen erfolgt ident der Berechnung unter Chloridioneneinfluss.

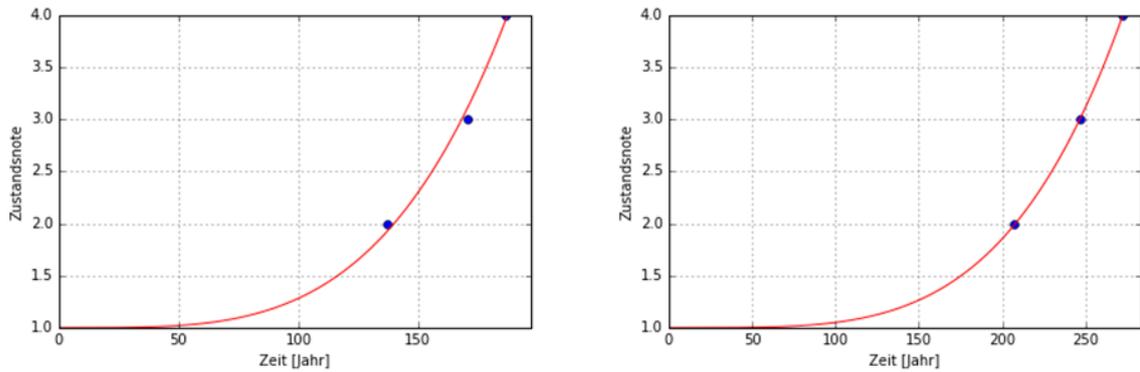


Abbildung 54: Zustandsentwicklung Karbonatisierung bei Betrachtung des 5% Quantil (links: $x_c = 35\text{mm}$, rechts: $x_c = 45\text{mm}$)

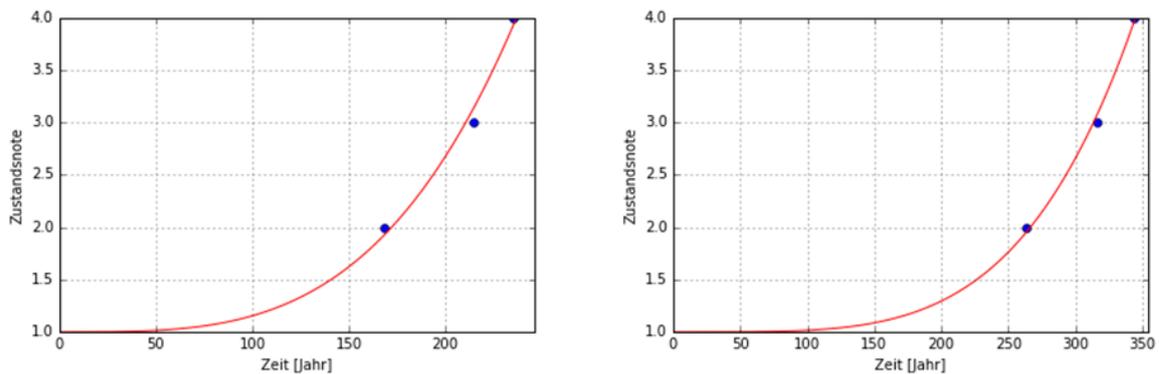


Abbildung 55: Zustandsentwicklung Karbonatisierung bei Betrachtung des 10% Quantil (links: $x_c = 35\text{mm}$, rechts: $x_c = 45\text{mm}$)

Tabelle 17: Jahr der Zustandsnotenänderung bei Karbonatisierung

Zustandsnote	5%		10%	
	$x_c = 35\text{ mm}$	$x_c = 45\text{ mm}$	$x_c = 35\text{ mm}$	$x_c = 45\text{ mm}$
2	168	263	137	208
3	214	316	171	247
4	235	344	187	272

Beim Betrachten der [Abbildung 54](#) und [Abbildung 55](#) fällt zunächst die lange Initialzeit von weit über 100 Jahren auf. Das Modell zur Berechnung der Karbonatisierungstiefe stammt aus dem MC10 [5] und ist in der Praxis etabliert, trotzdem erscheinen diese Zeiträume als zu lange. Die Schädigungsberechnung umfasst ebenfalls die Korrosionsgeschwindigkeit,

den Querschnittsverlust des Stahls sowie die Rissbildung, welche in weiterer Folge für die Zuweisung der Zustandsnoten herangezogen werden. Jener Teil der Korrosionsberechnung, welcher mit Erreichen der Bewehrung durch die Karbonatisierungsfront startet, läuft völlig unabhängig von der Berechnung der Karbonatisierungstiefe.

Lässt man diese Initialzeit daher außer Acht, ergibt sich eine durchschnittliche Zustandsnotenverschlechterung um ein Grad alle 32 Jahre, wobei der Mindestzeitabstand 16 Jahre beträgt.

Tabelle 18: Parameter der Exponentialfunktion Karbonatisierung

Quantil	Betondeckung [mm]	a	b	c
5	35	1,00	8.37E-09	3.76
5	45	1,00	3.71E-10	4.06
10	35	1,00	2.01E-08	3.44
10	45	1,00	4.62E-11	4.26

2.3.7 Exkurs Inspektionsintervalle

Da die Zustandsnoten 3 und 4 bereits eine starke Schädigung des Bauteils berücksichtigen, wird als Inspektionsintervall für Stahlbetonbauteile die Mindestdauer der Verschlechterung um eine Zustandsnote empfohlen (siehe Tabelle 19). Dieses Intervall sollten bei Chloridbeanspruchung ab Beginn der Nutzung keinesfalls überschritten werden. Im Falle von Karbonatisierung ist eine derartige restriktive Vorgehensweise nicht notwendig, es sollten die Inspektionsintervalle jedoch zumindest ab Bekanntwerden erster Schäden eingehalten werden. Da im Falle von Stahlkorrosion die Zustandsverschlechterung infolge Karbonatisierung sehr langsam abläuft, ist davon auszugehen, dass aufgrund anderer Bauteile ohnehin kürzere Intervallen anzusetzen sind.

Tabelle 19: Übersicht über vorgeschlagene Inspektionsintervalle

Exposition	Intervall
Chlorid Spritzwasserbereich	6
Chlorid Sprühnebelbereich	12
Karbonatisierung	16

3 AUSWAHL GEEIGNETER UMFELDKRITERIEN

3.1 Identifikation zustandsrelevanter Parameter

Alterung im Sinne einer Verschlechterung des Zustandes eines Werkstoffs, Bauteils oder Bauwerks ist ein Prozess, der einer Vielzahl an Einflussgrößen unterliegt. Unter Alterung beschränken wir uns hier auf materielle Alterung, welche von chemisch-physikalischen Prozessen getrieben wird. Immaterielle, sprich funktionelle oder technologische, Alterung oder Obsoleszenz wird im Rahmen von AMBITION nicht näher betrachtet.

Alterungsprozesse geschehen meist auf Werkstoffebene (z.B. Korrosion) und wirken sich früher oder später auf ganze Bauteile oder Bauwerke aus. Es gibt jedoch auch zustandsrelevante Prozesse, welche sich unmittelbar auf Bauteil- oder Bauwerksebene beziehen (z.B. geomechanische Prozesse).

Die wesentlichsten Alterungsprozesse, deren Folge sowie die beteiligten Einflussgrößen werden in den nachstehenden Kapiteln zusammengefasst. Der Fokus liegt dabei auf dem Tunnelausbau als Hauptelement eines Tunnelbauwerks.

3.1.1 Betonkorrosion

Unter Betonkorrosion wird die Schädigung des Werkstoffes Betons unter chemischen und physikalischen Beanspruchungen verstanden. Die wesentlichsten Prozesse sowie beteiligten Einflussgrößen sind nachstehend zusammengefasst (siehe [Tabelle 20](#)). Eine detaillierte Erläuterung der Schädigungsprozesse und daraus abgeleiteter Modelle enthält das Kapitel 2.2.

Die Prozesse sind größtenteils jene, die auch von anderen Ingenieurbauwerken bekannt sind. Als tunnelspezifischer Schädigungsprozess kann die Thaumazitbildung bezeichnet werden, da diese u.a. klimatische Rahmenbedingungen benötigt, welche in der Regel nur bei untertägigen Bauwerken auftreten.

Auf die Aufnahme der Alkali-Kieselsäure-Reaktion wird hier verzichtet, da davon ausgegangen wird, dass dieser Prozess bereits in jungen Jahren eines Bauwerks auftritt und saniert wird und im kollektiven Tunnelbestand im Österreichischen Kontext kaum Relevanz hat.

Tabelle 20: Prozesse und Folgen in Zusammenhang mit Betonkorrosion

Prozessgruppe	Prozess	Folge	relevanter Baustoff / Bauwerkeigenschaft	beteiligte Einflussgrößen
Chemisch	Treibender Angriff	<ul style="list-style-type: none"> • Verlust Festigkeit und Tragfähigkeit • Abplatzungen • Undichtigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Beständigkeit XAT • Oberflächenschutz 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfatgehalt Bergwasser/Baugrund • Emissionen Verkehr (aktuell oder historisch) • Wasser/Feuchtigkeit
	Lösender Angriff			Bergwasser: CO ₂ , NH ₄ ⁺ , Mg ²⁺ , °dH, pH
	Thaumasit-schädigung		<ul style="list-style-type: none"> • Wassereindringwiderstand 	<ul style="list-style-type: none"> • Gipshaltiges Gebirge • Sulfatgehalt im Bergwasser • Karbonatischer Zuschlag • Ablüftung feuchter Oberflächen • Temperatur 0-15°C
Physikalisch	Frost-Tau-Wechsel	<ul style="list-style-type: none"> • Abplatzungen • Risse • Undichtigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Beständigkeit XAT • Oberflächenschutz 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturwechsel • Frosteinwirkung • Geograph. Lage/ Portalnähe • Wasser
	Verschleiß (Abnutzung)	Verlust Griffigkeit (Fahrbahn)		Mechanische Einwirkung (Fahrbahn)
	Brand	<ul style="list-style-type: none"> • Abplatzungen • Verlust Festigkeit und Tragfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Brandeinwirkung • Betonfeuchte 	<ul style="list-style-type: none"> • Brandeinwirkung • Betonfeuchte

3.1.2 Mauerwerk

Mauerwerk ist in der Regel eine Verbundbauweise bestehend aus Steinen und Fugenmörtel. Beide sind an der Erfüllung der gestellten Anforderungen und Eigenschaften eines Gewölbes beteiligt. Somit sind Schädigungsprozesse sowohl am Fugenmörtel als auch an den Steinen relevant (siehe Tabelle 21). Bei beiden handelt es sich um mineralische Baustoffe, sodass Ähnlichkeiten mit Schädigungsprozessen der Betonkorrosion bestehen.

Tabelle 21: Prozesse und Folgen in Zusammenhang mit Mauerwerken

Prozessgruppe	Prozess	Folge	relevanter Baustoff / Bauwerkeigenschaft	beteiligte Einflussgrößen
Chemisch	Treibender Angriff	<ul style="list-style-type: none"> • Verlust Festigkeit und Tragfähigkeit • Abplatzungen • Undichtigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Beständigkeit gegen Sulfatreiben (Mörtel und Steine) • Natursteine: Steine karbonatisch/silikatisch • Ziegelsteine: Qualität, gebrannt, Klinker 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfatgehalt Bergwasser/Baugrund • Emissionen Verkehr (aktuell oder historisch) • Wasser/Feuchtigkeit
	Lösender Angriff		Beständigkeit gegen lösenden Angriff (Mörtel und Steine)	Bergwasser: CO ₂ , NH ₄ ⁺ , Mg ²⁺ , °dH, pH
Physikalisch	Frost-Tau-Wechsel	<ul style="list-style-type: none"> • Abplatzungen • Risse 	<ul style="list-style-type: none"> • Steinqualität/ Mörtelqualität • Wassereindringwiderstand • Porosität • Ausführungsqualität 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturwechsel • Frosteinwirkung • Geograph. Lage/ Portalnähe • Wasser
	Verschleiß (Abnutzung)	Verlust Griffigkeit (Fahrbahn)		Mechanische Einwirkung (Fahrbahn)
	Salzkristallisation	<ul style="list-style-type: none"> • Ablösungen • Verlust Festigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosität • Wasserdurchlässigkeit • Bergwasserabdichtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Bergwasser (Menge, Salinität) • Verdunstung/ Ablüftung
	Brand	<ul style="list-style-type: none"> • Abplatzungen • Verlust Festigkeit und Tragfähigkeit 	Brandbeständigkeit BBG	<ul style="list-style-type: none"> • Brandeinwirkung • Betonfeuchte

3.1.3 Stahl

Hier wird auf den Einsatz von Stahl als Bewehrung bei Innenschalen in Stahlbetonbauweise oder als Anker fokussiert. Hinsichtlich einer detaillierten Beschreibung der Schädigungsprozesse und -modelle der Bewehrungskorrosion wird wiederum auf Kapitel 2.2 verwiesen.

Tabelle 22: Prozesse und Folgen in Zusammenhang mit Stahl (Bewehrung Stahlbeton)

Prozessgruppe	Prozess	Folge	relevanter Baustoff / Bauwerkeigenschaft	beteiligte Einflussgrößen
(Elektro-) Chemisch	Karbonatisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Flächige Zerstörung • Passivschicht und flächige Korrosion • Abplatzung der Betondeckung • Verlust der Tragfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Beständigkeit Beton XC • Oberflächenschutz 	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ der Atmosphäre • Wasser: wechselnd trocken/nass
	Chlorid-induzierte Korrosion	<ul style="list-style-type: none"> • Zerstörung Passivschicht • Lokaler Lochfraß • Verlust der Tragfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Beständigkeit Beton XD • Oberflächenschutz • Verunreinigte Betonausgangsstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> • Freie Chloridionen aus Tausalz oder Brand mit PVC • Wasser/Feuchtigkeit • Sauerstoff der Atmosphäre
	Streustromkorrosion	Verlust der Tragfähigkeit	Potentialtrennung	Gleichstrombahnen
	Kontaktkorrosion		Kontakt von Metallen mit verschiedenem Lösungspotential/ Korrosionsbeständigkeit	Wasser/Elektrolyt
Physikalisch	Ermüdung	Verlust der Festigkeit und Tragfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Ermüdungsfestigkeit der Bewehrung • Bewehrungsgehalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Äußere Lasten und deren Lastwechsel (Verkehr, Aerodynamik)
	Brand	Verlust/Verminderung der Festigkeit	Brandbeständigkeit des Betons	<ul style="list-style-type: none"> • Brand • Betonfeuchtigkeit

3.1.4 Geomechanik

Geomechanische Prozesse müssen nicht mit Fertigstellung des Tunnelbauwerks abgeschlossen sein. Nachstehende Prozesse können während der Nutzungsdauer des Bauwerks anhalten (siehe Tabelle 23). Die Boden-Bauwerks-Interaktion ist somit nicht statisch und kann zu einer Schädigung bzw. Alterung des Bauwerks führen.

Tabelle 23: Prozesse und Folgen in Zusammenhang mit Geomechanik

Prozess	Folge	relevanter Baustoff / Bauwerkeigenschaft	beteiligte Einflussgrößen
Rock Squeeze (Druckhaftigkeit)	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitverzögerter, anhaltend zunehmender Gebirgsdruck auf Aufbau und/oder Konvergenzen • Verlust der Gebrauchstauglichkeit (Lichttraum, Fahrweg)/Tragfähigkeit 	Ausbau-dimensionierung	<ul style="list-style-type: none"> • Gebirgsfestigkeit • Überlagerung
Vernässung und Auslaugung	<ul style="list-style-type: none"> • Verminderung der Gebirgsfestigkeit • Erhöhung des Ausbaudrucks • Verlust der Gebrauchstauglichkeit (Fahrweg) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sohlausbildung • Funktionstüchtigkeit des Entwässerungssystem 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasser • Wasserempfindlichkeit des Gebirges
Quellen/Schwellen	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau von Quelldrücken auf Ausbau/Sohle und/oder Konvergenzen/Sohlhebungen • Verlust der Gebrauchstauglichkeit (Fahrweg) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbaudimensionierung • Sohlausbildung • Funktionstüchtigkeit des Entwässerungssystem 	<ul style="list-style-type: none"> • Quell-/Schwell-potential des Gebirges • Wasser
Hangtektonik	<ul style="list-style-type: none"> • Verformungen • Risse • Verlust der Tragfähigkeit 	Ausbau-dimensionierung	Geotechnisch-bodenmechanische Strukturen

3.2 Parametrisierung auf Basis der BAUT-Datenanalyse

Es wurde im Folgenden versucht, aus den vorhandenen BAUT-Daten (vgl. Kap. 0) relevante Einflussgrößen auf das Alterungsverhalten zu identifizieren. Der Datenbestand lässt jedoch nur grobe Analysen auf Basis einer Clusterung zu. Folgende Kategorien wurden dabei gebildet:

- Tunnellänge:
 - Tunnellänge $\leq 750\text{m}$
 - Tunnellänge $>750\text{m}$
- Verkehrsstärke:
 - JDTV ≤ 20.000 Kfz/24h

- JDTV >20.000 Kfz/24h

Für die einzelnen Cluster wurden allfällige Korrelationen zwischen den Clustergrößen und dem Alterungsverhalten des Gesamtobjekts einerseits sowie den Bauteilen „Tunnelröhre/Gewölbe“, „Abdichtung/Entwässerung“ und „Zwischendecke“ untersucht. Das Bauteil „Zwischendecke“ wird für Tunnellänge ≤ 750 m nicht weiter betrachtet, da kurze Tunnel nur in Ausnahmefällen Zwischendecken aufweisen und daher auch keine ausreichend solide Stichprobengröße für eine Auswertung vorhanden war. Die Auswertung der Degradationskurven erfolgte analog zum Kapitel 0 auf Basis einer Umrechnung gemäß CWA 16663 [27]. Die Ergebnisse der Anpassung sind in der nachfolgenden Tabelle 24 zusammengefasst und in der Abbildung 56–Abbildung 63 dargestellt.

Tabelle 24: Berechnete Parameter für alle betrachteten Bauteile

Name	C_I	a_n (MW)	c (MW)	a_n (+stabw)	c (+stabw)	a_n (-stabw)	c (-stabw)
Gesamt, JDTV \leq 20000 Kfz/24h, L \leq 750 m	0	0,02441	1,5645	0,550953	0,873733	0,00483	1,791136
Gesamt, JDTV \leq 20000 Kfz/24h, L > 750 m	0	0,048091	1,305792	0,465219	0,840139	0,013793	1,478796
Gesamt, JDTV > 20000 Kfz/24h, L \leq 750 m	0	0,022515	1,50742	0,032219	1,940972	0,015092	1,425195
Gesamt, JDTV > 20000 Kfz/24h, L > 750 m	0	0,013427	1,659087	0,022446	2,159047	0,009643	1,530855
Tunnelröhre, JDTV \leq 20000 Kfz/24h, L \leq 750 m	0	0,024328	1,518997	0,641751	0,781814	0,004279	1,773007
Tunnelröhre, JDTV \leq 20000 Kfz/24h, L > 750 m	0	0,035397	1,451975	0,741083	0,895861	0,010869	1,547986
Tunnelröhre, JDTV > 20000 Kfz/24h, L \leq 750 m	0	0,023035	1,550718	0,117667	1,536195	0,010571	1,55296
Tunnelröhre, JDTV > 20000 Kfz/24h, L > 750 m	0	0,023727	1,550871	0,05722	1,89839	0,015859	1,448513
Abdichtung/Entwässerung, JDTV \leq 20000 Kfz/24h, L \leq 750 m	0	0,010795	1,858085	0,303149	1,503481	0,0031	1,907495
Abdichtung/Entwässerung, JDTV \leq 20000 Kfz/24h, L > 750 m	0	0,049052	1,361042	1	0,785614	0,01737	1,425942
Abdichtung/Entwässerung, JDTV > 20000 Kfz/24h, L \leq 750 m	0	0,03404	1,468788	0,683974	0,822146	0,007605	1,667629
Abdichtung/Entwässerung, JDTV > 20000 Kfz/24h, L > 750 m	0	0,002388	2,168108	0,005283	2,648588	0,001289	2,063873
Zwischendecke/Trennwand, JDTV \leq 20000 Kfz/24h, L > 750 m	0	0,013697	1,624354	0,127264	1,291648	0,004548	1,719148
Zwischendecke/Trennwand, JDTV > 20000 Kfz/24h, L > 750 m	0	0,020517	1,542772	0,093893	1,383734	0,008789	1,598965

Gesamtbauwerk

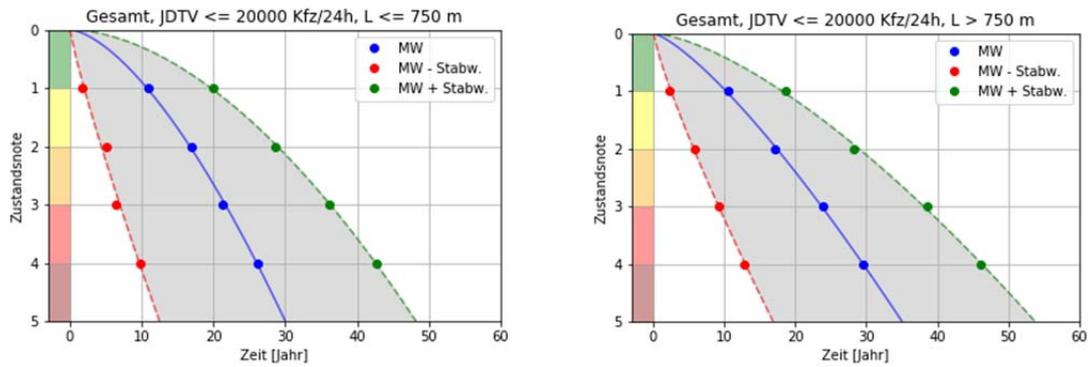


Abbildung 56: Degradationskurve Bauwerk für $JDTV \leq 20.000$ Kfz/24h für lange und kurze Tunnel

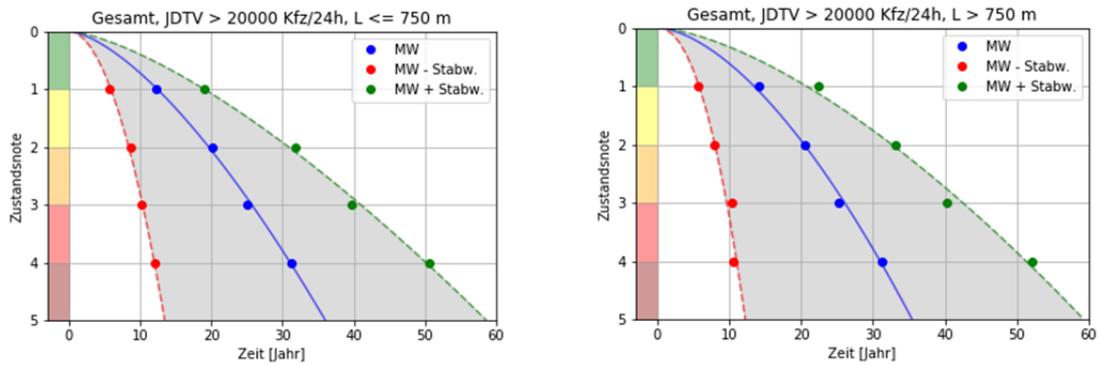


Abbildung 57: Degradationskurve Bauwerk für $JDTV > 20.000$ Kfz/24h für lange und kurze Tunnel

Tunnelröhre / Innenschale

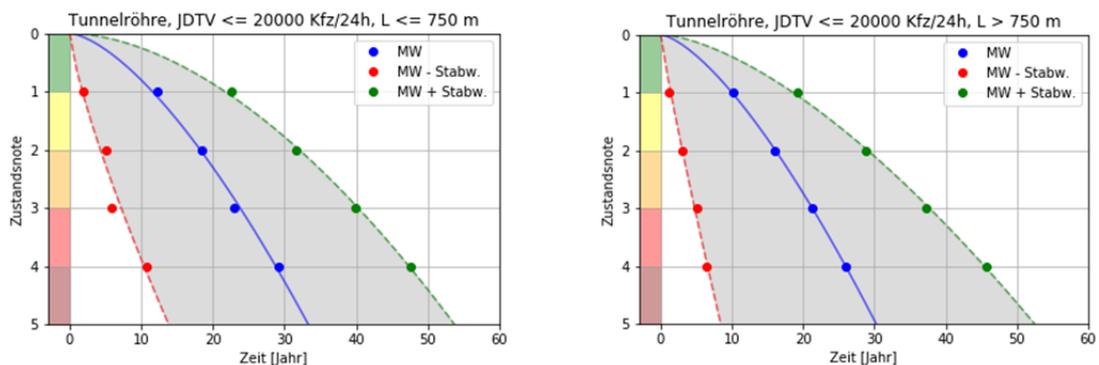


Abbildung 58: Degradationskurve Tunnelröhre für $JDTV \leq 20.000$ Kfz/24h für lange und kurze Tunnel

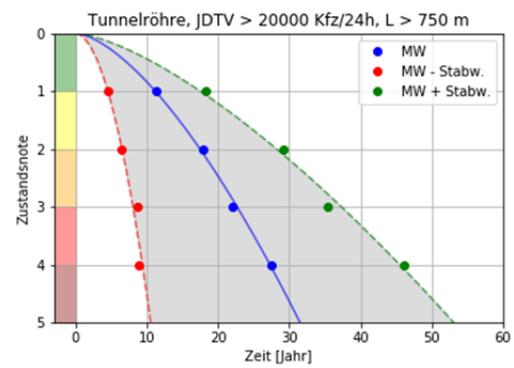
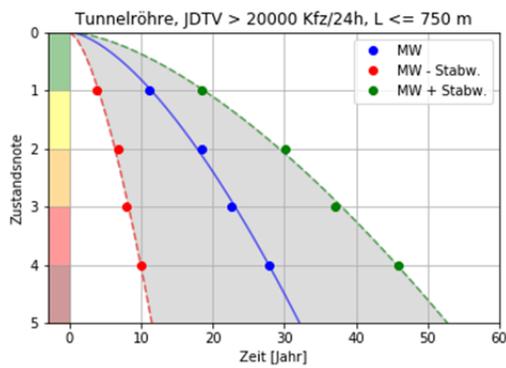


Abbildung 59: Degradationskurve Tunnelröhre für JDTV > 20.000 Kfz/24h für lange und kurze Tunnel

Abdichtung/Entwässerung

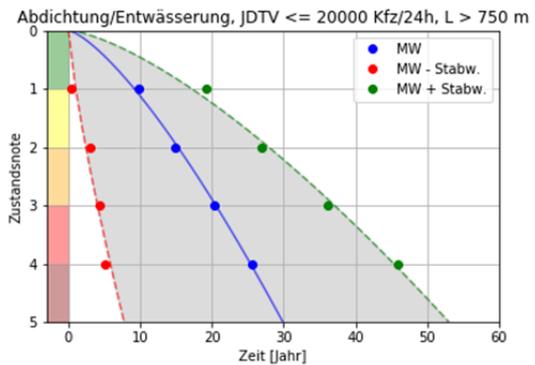
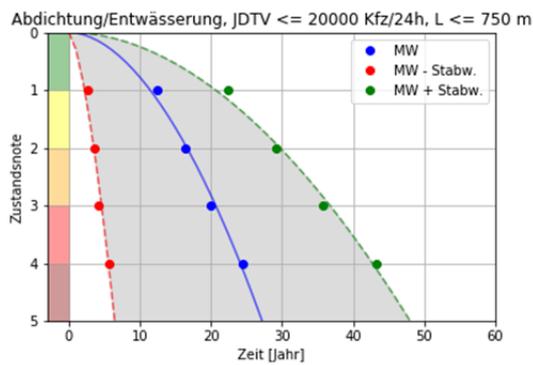


Abbildung 60: Degradationskurve Abdichtung/Entwässerung für JDTV ≤ 20.000 Kfz/24h für lange und kurze Tunnel

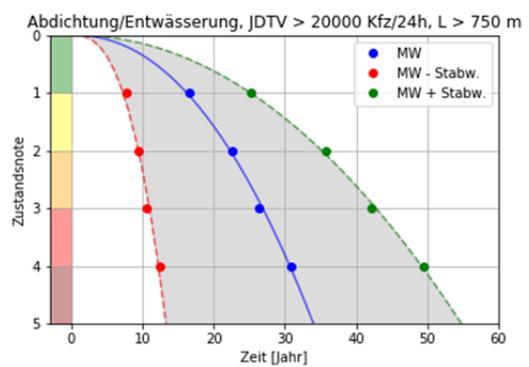
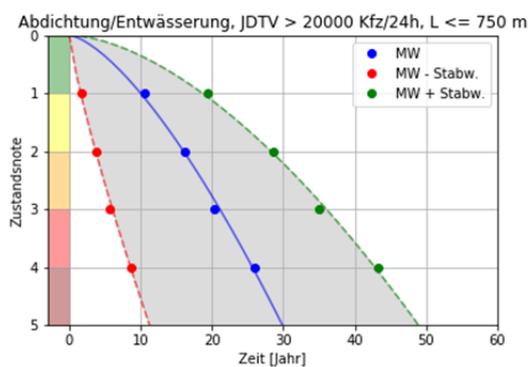


Abbildung 61: Degradationskurve Abdichtung/Entwässerung für JDTV > 20.000 Kfz/24h für lange und kurze Tunnel

Zwischendecke/Trennwand

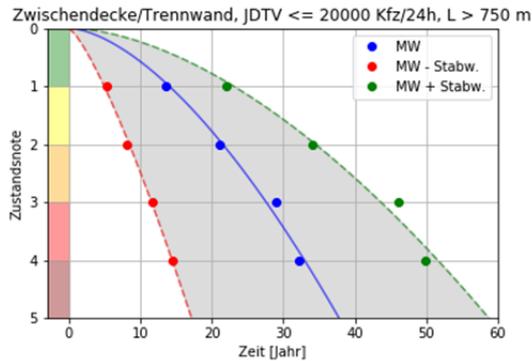


Abbildung 62: Degradationskurve Zwischendecke Trennwand für $JDTV \leq 20.000$ Kfz/24h für lange Tunnel

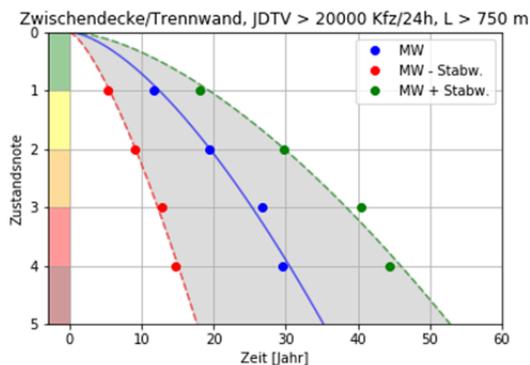


Abbildung 63: Degradationskurve Zwischendecke Trennwand für $JDTV > 20.000$ Kfz/24h für lange Tunnel

Die dargestellten Degradationskurven der jeweiligen Clusterkombinationen zeigen, dass die BAUT-Daten keinen nennenswerten Zusammenhang zwischen Degradation und Tunnellänge bzw. Verkehrsstärke aufweisen.

Das Kriterium der Tunnellänge kann als Indikator für Frost-Tau-Wechsel erachtet werden, das Kriterium der Verkehrsstärke als Indikator für den Schadstoffeintrag bzw. im Falle der Zwischendecke für das ermüdungsrelevante Lastkollektiv. Es sind jedoch eingehendere Detailuntersuchungen erforderlich, um die Ursache für die Indifferenz des Alterungsverhaltens der BAUT-Daten gegenüber diesen Umfeldkriterien zu ergründen. Eine mögliche Ursache liegt aber darin, dass die Zustandsnoten gem. RVS 13.03.31 [1] sich stets auf die gesamte Tunnelröhre bezieht. Auch längere Tunnel weisen einen Frosteinwirkungsbereich in Portalnähe auf. Die anzunehmende geringere Alterung in portalfurtheren Tunnelabschnitten schlägt sich jedoch nicht in der Zustandsnote nieder, da stets die „schlechtes-

ten“ Blöcke für die Gesamtnote maßgebend sind, auch wenn es sich hier nur um wenige portalnahe Blöcke handelt.

Die Verkehrsstärke scheint in den beiden gewählten Abstufungen (JDTV größer bzw. kleiner 20.000 Kfz/24h) keinen entscheidenden Einfluss auf die dokumentierte Alterung zu haben. Die geringfügig schnellere Alterung der Zwischendecke erscheint bei höheren Verkehrsstärken zunächst plausibel, da die Zwischendecke neben der Fahrbahn jenes Bauteil ist, welches den Lastwechseln aus Verkehr am meisten unterworfen ist. Die Schwankungsbreite der vorhandenen Daten erscheint aber generell zu hoch, um hier eindeutige Korrelationen zwischen Verkehrsstärke und Alterung auszumachen.

Zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass sich die fehlende Korrelation zwischen Verkehrsstärke/Tunnellänge einerseits und Alterungsverhalten andererseits lediglich auf den von der ASFiNAG zur Verfügung gestellten BAUT-Datenbestand bezieht, welcher auf der Systematik der RVS 13.03.31 basiert. Wie am Beispiel Tunnellänge erläutert wurde, wäre eine differenziertere Betrachtung der Bauteilzustände für jeden Einzelblock unabdingbar, um einen (allfälligen) Einfluss des Umfeldkriteriums der Portalnähe zu quantifizieren. Der indirekte Einfluss der Portalnähe (Frostexposition) wurde u.a. im Kapitel 1.4.1 eindeutig festgestellt.

3.3 Auswahl geeigneter Parameter und Umfeldkriterien

In Kapitel 1 und 2 wurden Alterungsprozesse aus verschiedenen Perspektiven untersucht:

- Datenbasiert (aus BAUT-Daten, vgl. Kap. 1.1)
- Erfahrungsbasiert aus der Synthese subjektiver Expertenmeinungen (Delphi-Prozess, vgl. Kapitel 1.2)
- Deterministisch anhand generischer Alterungsmodelle (Schadensprozesse auf Baustoffebene, vgl. Kapitel 2.2)

Aufgrund all dieser Untersuchungen erscheinen nachstehende Parameter und Umfeldkriterien von besonders hoher Relevanz für das Alterungsverhalten von Tunnel und Tunnelbauteilen zu sein. Zur Zustandsprognose und Kalibrierung von Alterungsmodellen erscheint es zielführend, diese entweder einmalig oder wiederholt routinemäßig im Zuge der Bauwerksüberwachung zu erheben:

- Grundlegende Bauwerksdaten: Bauweise, Materialien bzw. Baustoffe und deren nähere Spezifizierung (z.B. Expositionsklassen Beton), Dimensionen, Art Entwäs-

serungssystem/Abdichtungssystem, abschnittsweise Daten zu Geologie und Hydrogeologie, Anfangsschäden, Ausführungsqualität

- Schadigungsursachen: Exposition gegenüber externen Schädigungsgrößen wie z.B. Spritzwasserbereich, Sprühnebelbereich, Temperatur. Hierfür bietet sich u.a. eine GIS-unterstützte Auswertung an, da sich diese Größen aus den üblichen im GIS-enthaltenen Daten zumindest ableiten lassen.
- Schadigungsauswirkungen: Phänomene der Schädigungen wie z.B. Verformungen, Risse, Abplatzungen, Chlorideindringung und Karbonatisierung, Wasserzutritte.

Streng genommen können lediglich Phänomene der Schädigung erfasst werden, da die eigentlichen Auswirkungen, wie beispielsweise die Verminderung der Tragfähigkeit nicht unmittelbar messbar, sondern lediglich aus den Phänomenen indirekt interpretierbar sind. Die Schäden bzw. deren kondensierte Formulierung über Bewertungssysteme für Bauteile oder Bauwerke stellen selbst wieder Initialbedingungen für die zukünftige Alterung dar.

Die oben angeführten Parameter und Daten sind lediglich dann von relevanter Aussagekraft, wenn sie in entsprechender örtlicher Granularität erfasst werden. Die genannten Parameter und somit das Alterungsverhalten sind streng genommen an keiner Stelle des Tunnels gleich und daher örtlich zu differenzieren. Damit geht zwangsläufig auch eine Erfassung und Bewertung im Rahmen eines sinnvollen Bezugssystems einher. Als solches hat sich bisher der Einzelblock bzw. der Einzelring etabliert.

Damit die genannten Parameter verarbeitbar, auf Netzebene vergleichbar und für die Kalibrierung von Alterungsmodellen anwendbar werden, sind jedoch objektivierte Bezugsgrößen oder Klassifikationssysteme erforderlich.

Ungeachtet dessen wird ein Bewertungssystem auf der Ebene des Gesamtbauwerks wie bisher im Sinne einer Prioritätenkennzeichnung oder zur Darstellung der Anlagenzuverlässigkeit zweckmäßig sein.

4 KRITERIENKATALOG FÜR DIE ERSTELLUNG BAUWERKSSPEZIFISCHER ALTERUNGSMODELLE

Im Rahmen von AMBITION werden keine Instandhaltungsstrategien entwickelt. Aus diesem Grund wird im gegenständlichen Deliverable D2 auch nicht definiert, welche Steuerungsfunktionen für Tunnelbauwerke künftig verwendet werden (sollen) bzw. wie diese zu formulieren sind. Die Formulierung des „Zustands“, welcher als Ergebnis der Zustandsbewertung ausgegeben wird und in einer entsprechenden Alterungsfunktion abzubilden ist, sollte daher dem nachstehenden Kriterienkatalog entsprechen.

Nachfolgende Kriterien wurden in den gemeinsam mit ASFINAG und ÖBB abgehaltenen Workshop erarbeitet:

- Die Zustandsgröße soll die Zustandsverteilung der Anlagengattung Tunnel auf Netzebene kompakt darstellen.
- Zustandsgröße und Alterungsmodell sind Eingangsgrößen für Erhaltungsstrategien auf Netzebene. Sie sind (im Umkehrschluss) kein Werkzeug zur objektsbezogenen Analyse und Bewertung.
- Evidenzbasiert und Kalibrierbar: Zustand und Alterungsverhalten soll sich - nicht zuletzt aufgrund der Anforderungen der ISO 55001 [26] – auf Realdaten stützen. Es wird angestrebt, das Alterungsverhalten anhand der zunehmenden Datendichte zu kalibrieren.
- Parametrisierung: Ausgangspunkt ist ein Grund-/Basismodell, welches nach verschiedenen Einflussräumen (Kombination verschiedener Variablen) parametrisiert werden kann, um verfallsfördernde oder -bremsende Einflüsse einfach abzubilden
- Die Zustandsgröße solle sowohl den terminlichen Handlungsbedarf als auch den Abnutzungsvorrat widerspiegeln. Die Zustandsgröße bietet somit Orientierung über absehbare Prioritäten als auch den Substanzwert der Anlagen.
 - Prioritätenreihung: Wann ist eine Intervention erforderlich, um die Funktionalität/Sicherheit/... aufrecht zu erhalten?
 - Substanzorientierung: Wie aufwändig ist die Verbesserung/Bewahrung des aktuellen Zustandes?

Durch die Prioritätenreihung ist ein Konnex zur Anlagen- bzw. Streckenverfügbarkeit gegeben, während die Substanzorientierung für die mittel- bis langfristigen Mittelabflüsse benötigt wird.

- Verständlichkeit: Die Ermittlung der Zustandsgrößen soll einfach und nachvollziehbar gestaltet sein. Aufgrund der vorangegangenen Kriterien erfolgt an dieser Stelle keine Einschränkung, ob die Zustandsgröße alphanumerisch oder numerisch, als Skalar oder Vektor bzw. als ganze Zahl oder Dezimalzahl ausgedrückt wird

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Tunnelbau, Arbeitsausschuss Leistungsbild Bestandsprüfung von Tunnel: „Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS) 13.03.31, Straßentunnel – baulich konstruktive Teile“, Wien, 2013.
- [2] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Straßenoberbau, Arbeitsausschuss Strategische Erhaltungsplanung: „Richtlinien und Vorschriften (RVS) 13.01.16, Bewertung von Oberflächenschäden und Rissen auf Asphalt- und Betondecken, Wien, 2013
- [3] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Brückenbau, Arbeitsausschuss Brückenprüfung, Brückenerhaltung und Brückendatenbank: „Richtlinien und Vorschriften (RVS) 13.04.22, Bauwerksdatenbank – Straßentunnel in geschlossener Bauweise, Wien, 2009.
- [4] ÖBB-Infrastruktur AG Regelwerk (2012): 06.01.02 Konstruktiver Ingenieurbau: Instandhaltung – Instandhaltungsplan. Stand 21.12.2012.
- [5] FIF FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON (2013): „fib Model Code for Concrete Structures 2010“, Ernst & Son, ISBN: 978-3-433-03061-5.
- [6] FIB FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON (2006): „Bulletin 34: Model Code for Service Life Design, 2006 — ISBN 978-2-88394-074-1.
- [7] ÖNORM B 3306: 2016 04 15: Prüfung von vorgefertigten Betonerzeugnissen - Frost- und Frost-Taumittel-Beständigkeit (Teil 1 und 2).
- [8] SETZER, M. J. (1996): „Prüfvorschrift CIF-Test - Testmethode zur Bestimmung des Frostwiderstandes von Beton (Capillary Suction, Internal damage and Freeze thaw Test: Materials and Structures).
- [9] SETZER, M. J.; FAGERLUND, G.; JANSSEN, D. J. (1996): “CDF test - Test method for the freeze-thaw resistance of concrete-tests with sodium chloride solution (CDF). In: Materials and Structures Bd. 29, Nr. 9, S. 523–528.
- [10] PENTTALA, V. (2006): “Surface and internal deterioration of concrete due to saline and non-saline freeze–thaw loads”. In: Cement and Concrete Research Bd. 36, Nr. 5, S. 921–928.

- [11] DUAN, A.; TIAN, Y.; DAI, J.-G.; JIN, W.-L. (2014): “A stochastic damage model for evaluating the internal deterioration of concrete due to freeze–thaw action”. In: *Materials and Structures* Bd. 47, Nr. 6, S. 1025–1039.
- [12] DUAN, A.; JIN, W.; QIAN, J. (2011): “Effect of freeze–thaw cycles on the stress–strain curves of unconfined and confined concrete”. In: *Materials and Structures* Bd. 44, Nr. 7, S. 1309–1324.
- [13] SCHNEIDER, R.; FISCHER, J.; STRAUB, D.; THÖNS, S.; BÜGLER, M.; BORRMANN, A. (2015): „Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells“, Download unter: http://orbit.dtu.dk/files/119501524/BASSt_B_117_barrierefreies_ELBA_PDF_1.pdf, Abfragedatum: 11.10.2017
- [14] EUROPEAN COMMISSION (2004): “DARTS - Durable and Reliable Tunnel Structure - Deterioration Modelling, DARTS R2.1.
- [15] DuraCrete - Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions, The European Union - Brite EuRam III, 2000.
- [16] ACI-AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2000): “ACI 201.2R-01 Guide to Durable Concrete “.
- [17] LIU, T.; WEYERS, R. W. (1998): “Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures”. In: *Cement and Concrete Research*, Bd. 28, Nr. 3, S. 365–379.
- [18] EI MAADDAWY, T.; SOUDKI, K. (2007): “A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking”. In: *Cement and Concrete Composites* Bd. 29, Nr. 3, S. 168–175.
- [19] KWON, S. J.; NA, U.; PARK, S. S.; JUNG, S. (2009): “Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion. In: *Structural Safety* Bd. 31, Nr. 1, S. 75–83.
- [20] PAPAKONSTANTINOOU, K. G.; SHINOZUKA, M. (2013): “Probabilistic model for steel corrosion in reinforced concrete structures of large dimensions considering crack effects”. In: *Engineering Structures* Bd. 57, S. 306–326.
- [21] ÖBV - Österreichische Bautechnik Vereinigung: Richtlinie: Innenschalenbeton, 2012.

- [22] CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (2004): “ÖNORM EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.” Brussels.
- [23] FIB FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON (2015): “Bulletin 76: Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides, ISBN 978-2-88394-116-8.
- [24] ACI-AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2005): “ACI 318-05 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
- [25] BINDER, F.; GRUNICKE, U.H. (2016): „Lebenszykluskostenanalyse von Instandsetzungsmaßnahmen an Brückenbauteilen“.
- [26] ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2014): “ISO 55001:2014 – Asset Management – management Systems – Requirements”.
- [27] CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (2013): „CEN Workshop Agreement CWA 16633: Ageing Behaviour of Structural Components with regard to Integrated Lifetime Assessment and subsequent Asset Management of Constructed Facilities”. Brussels.
- [28] BAMFORTH, P. B.; PRICE, W. F.; EMERSON, M.: *An International Review of Chloride Ingress Into Structural Concrete*: Thomas Telford, 1997. — ISBN 978-0-7277-2928-6
- [29] ÖVBB Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Richtlinie: Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen, 2009.

AMBITION

Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und Bewertung
von Eisenbahn- und Straßentunnel

Evaluierung bestehender Methoden der Zustandsbewertung und deren Weiterent- wicklung und Validierung

Deliverable D3/D4

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2015

Version 0.5

Versionshistorie

Version	Änderung	Bearbeiter
0.1	Berichtsvorlage, Formatvorlagen, Gliederung	GRUNICKE
0.2	Input AIT	STEFAN
0.3	Input Dibat	METT, KONTRUS
0.4	Review AIT	STEFAN
0.5	AG-Feedback eingearbeitet	GRUNICKE, METT, STEFAN

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	5
2	Zweck und Zielsetzung der Zustandsbewertung.....	6
2.1	Begriffe.....	6
2.2	Zweck der Zustandsbewertung gem. RVS und ÖBB-Regelwerk.....	6
2.3	Zweck der Zustandsbewertung im Rahmen der Instandhaltung.....	7
2.4	Zweck der Zustandsbewertung für Reporting.....	7
3	Zukünftige Anforderungen an Zustandserfassung und Zustandsbewertung.....	8
3.1	Zustandsrelevante Parameter und Umfeldkriterien.....	8
3.2	Kriterienkatalog für die Zustandsbewertung.....	9
4	Evaluierung der Current Practice der Zustandsbewertung.....	11
4.1	Zustandserfassung.....	11
4.1.1	Objektivierbarkeit / Reproduzierbarkeit.....	12
4.1.2	Erfassung nach Schadenskatalogen.....	13
4.1.3	Wechselwirkung Prüfung und Betrieb.....	14
4.1.4	Aufnahme vollumfänglich.....	15
4.1.5	Dokumentation vollumfänglich.....	15
4.1.6	Erfassung Schadensveränderung.....	15
4.1.7	Vorhaltung relevanter Bauwerksdaten.....	16
4.1.8	Zielerfüllung Zustandserfassung.....	16
4.2	Zustandsbewertung.....	17
4.2.1	Nachvollziehbarkeit / Reproduzierbarkeit.....	18
4.2.2	Datenbasiert.....	19
4.2.3	Verarbeitbarkeit.....	19
4.2.4	Örtliche Differenzierung.....	19
4.2.5	Differenzierung Prioritätswert / Substanzwert.....	20
4.2.6	Differenzierung Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit.....	20
4.2.7	Zielerfüllung.....	20

4.3	Entwicklungspotential und Handlungsfelder im Status Quo.....	21
4.3.1	Zustandserfassung.....	22
4.3.2	Zustandsbewertung.....	23
5	Weiterentwicklung der Zustandsbewertung.....	24
5.1	Zustandserfassung.....	24
5.2	Katalog der zu erfassenden Schäden	25
5.3	Technik der Zustandserfassung	27
5.3.1	Tunnelscanning.....	27
5.3.2	Sensorik	28
5.3.3	Methodik.....	29
5.3.4	Genauigkeiten bei Tunnelscans.....	32
5.3.5	Auflösungen bei Tunnelscans	34
5.3.6	Ergebnisse von Tunnelscans	35
5.3.7	Stand der Technik beim Tunnelscan.....	36
5.3.8	Erwartungen bzw. Anforderungen an zukünftige Tunnelscanner Systeme .45	
5.4	Zustandsbewertung.....	53
5.4.1	Zustandsnoten	53
5.4.2	Zuordnung Zustandsnoten	56
5.5	Ausschöpfung des Entwicklungspotentiales	63
6	Validierung der erweiterten Zustandsbewertung.....	65
6.1	Allgemeines.....	65
6.2	Zustandserfassung.....	66
6.2.1	Tunnelscan.....	66
6.2.2	Erstellung des 3D-Modells	66
6.2.3	Rissanalyse des 3D-Modells – die „virtuelle Tunnelbegehung“	66
6.2.4	Anwendung der weiterentwickelten Zustandserfassung	67
6.2.5	Vergleich der klassischen (händischen) Tunnelinspektion mit einer virtuellen Tunnelinspektion	69

6.3 Zustandsbewertung.....	70
Literaturverzeichnis.....	76

1 EINLEITUNG

Ziel des VIF-Projekts AMBITION ist es, die Current Practice der Zustandserfassung und Zustandsbewertung von Straßen- und Eisenbahntunnel in Österreich zu evaluieren und Weiterentwicklungspotenziale aufzuzeigen.

Im Arbeitspaket AP2 des Projekts AMBITION wurde zunächst der internationale Stand der Technik im Sinne eines Benchmarkings erhoben.

Das Arbeitspaket AP3 beschäftigte sich mit den Alterungsprozessen von Tunnelbauwerken in den jeweiligen Netzen von ASFiNAG und ÖBB. Das Alterungsverhalten der Tunnelanlagen wurde in der Formulierung der bisherigen Zustandsbewertungssystematik daten- bzw. wissensbasiert abgeleitet und hinsichtlich der zustands- und alterungsrelevanten Parameter und Umfeldkriterien analysiert.

Das AP3 mündete in einem Kriterienkatalog für die Erstellung bauwerksspezifischer Alterungsmodelle, welche essentiell für die Entwicklung vorausschauender Instandhaltungsstrategien sind. Die Fokussierung auf Alterungsmodelle war insofern erforderlich, da eine Weiterentwicklung der allgemeinen Zustandsbewertung kompatibel mit der Formulierung von Alterungsmodellen sein muss und dadurch eine laufende Kalibrierung und Verfeinerung der Alterungsmodelle ermöglicht.

Die im gegenständlichen Deliverable D3 zusammengefassten Arbeitspakete AP4 und AP5 gliedern sich in folgende vier Teile:

- Bewertung des Current Practice anhand eines „Lastenheftes“ für die Zustandserfassung und Zustandsbewertung
- Weiterentwicklung der Methoden der Datenakquisition, -verarbeitung und -vorhaltung
- Weiterentwicklung der bestehenden Zustandsbewertung
- Validierung der erweiterten Zustandsbewertung

2 ZWECK UND ZIELSETZUNG DER ZUSTANDBEWERTUNG

2.1 Begriffe

Der Vergleich der bestehenden (internationalen) Methoden der Zustandsbewertung mit dem Stand der Technik hat gezeigt, dass nicht immer einheitliche Begrifflichkeiten verwendet werden. Daher werden eingangs nochmals die Definitionen des Deliverable D.1 wiederholt:

- **Zustand:** Summe aller für die Nutzung des Bauwerkes relevanten baulich-konstruktiven Merkmale zu einem bestimmten Zeitpunkt.
- **Zustandserfassung:** Erhebung der objektiv feststellbaren baulich-konstruktiv relevanten Merkmale eines Bauteils.
- **Zustandsbeurteilung:** Baulich-konstruktive Charakterisierung des Bauteil- oder Bauwerkzustandes auf Grundlage der Zustandserfassung und sonstiger relevanter Informationen durch den sachkundigen Ingenieur.
- **Zustandsbewertung:** Zusammenfassende quantitative und/oder qualitative Beschreibung des Zustandes auf Grundlage der Zustandserfassung und Zustandsbeurteilung.
- **Zustandsnote:** Angabe eines Werts bezüglich des funktionalen Zustands eines Bauteils/Bauwerks.

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Die Zustandsnote ist eine kompakte Darstellung der Zustandsbewertung. Wesentliche Voraussetzung hierfür ist die Zustandserfassung.

Alterungsmodelle werden in der Regel in Form einer Zustandsgrößenfunktion über die Zeit ausgedrückt. Sie sind ein wesentliches Planungsinstrument im Rahmen von Entscheidungssystemen oder zur Entwicklung von Instandhaltungsstrategien. Je nach spezifischer Zielsetzung und Fragestellung müssen die obigen Definitionen also entsprechend konkretisiert werden.

2.2 Zweck der Zustandsbewertung gem. RVS und ÖBB-Regelwerk

Im Rahmen der RVS 13.03.31 [1] erfolgt die Erhebung des Erhaltungszustandes, „um Mängel und etwaige aufgetretene Schäden rechtzeitig zu erkennen und den Erhaltungsverpflichteten dadurch in die Lage zu versetzen, diese Mängel und Schäden zu beheben, bevor größerer wirtschaftlicher Schaden eintritt oder die Verkehrssicherheit beeinträchtigt wird.“

Analog dazu dient die Inspektion gem. ÖBB-RL 06.01.02 [4] dem Zweck, die Verkehrs- und Standsicherheit während der geplanten Nutzungsdauer zu dokumentieren und bildet somit die Grundlagen für Wartungs- Instandsetzungs- und Erneuerungsprogramme.

Sowohl bei ASFiNAG als auch bei der ÖBB enthält die Zustandsbewertung eine Bewertung des Ist-Zustandes als auch eine vorausschauende Prognose. Vor allem letztere ist im Rahmen der aktuellen Bewertungssystematik der Zustandsnoten bereits implizit enthalten, indem die Notendefinition eine „längerfristige“, „mittelfristige“ oder „kurzfristige“ Einschränkung der Tragfähigkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit berücksichtigt (vgl. Pkt. 9.3 der RVS 13.03.31 [1] sowie Pkt. 3.5.1 des ÖBB-RW 06.01.02 [4]).

2.3 Zweck der Zustandsbewertung im Rahmen der Instandhaltung

Inspektion ist ein wesentlicher Teilprozess im Rahmen der Instandhaltung. Das gem. RVS 13.03.31 [1] und ÖBB-RL 06.01.02 [4] geforderte Instrumentarium der Zustandsprognose ist für die Entwicklung von Instandhaltungsstrategien und Instandhaltungspläne unverzichtbar und bedingt eine einheitliche bzw. normierte Definition der Zustandsgrößen der Anlage bzw. derer Komponenten.

2.4 Zweck der Zustandsbewertung für Reporting

Zustandsbewertung oder -noten stellen Performance Indikatoren im Rahmen des Performance Managements und des dazugehörigen internen und externen Reportings an die Eigentümer (z.B. Netzzustandsbericht), Regulatoren oder Stakeholder dar.

Daraus leitet sich das Erfordernis einer kompakten und verständlichen Darstellung in Form einer einheitlichen (Zustands-)Note oder eines Index ab.

3 ZUKÜNFTIGE ANFORDERUNGEN AN ZUSTANDSERFASSUNG UND ZUSTANDSBEWERTUNG

Im AP3 (vgl. Deliverable D.2) wurden (Mindest-)Kriterien der Datenerfassung im Rahmen der Zustandserfassung/-bewertung identifiziert. Diese sind als allgemeines „Lastenheft“ für eine einheitliche Systematik der Zustandserfassung und Zustandsbewertung anzusehen.

3.1 Zustandsrelevante Parameter und Umfeldkriterien

Als Ergebnis des AP3 sowie in Abstimmung mit ASFiNAG und ÖBB wurden im Deliverable D.2 jene Umfeldkriterien und Parameter definiert, welche für die Alterung von hoher Relevanz sind und daher für eine Zustandsbewertung zu erheben und vorzuhalten sind.

Hierzu zählen u.a.:

- Grundlegende Bauwerksdaten: Anlagenkonfiguration (ein-/zweigleisig, Richtungsverkehr/Gegenverkehr) Bauweise, Materialien bzw. Baustoffe und deren nähere Spezifizierung (z.B. Expositionsclassen Beton), Dimensionen, Art des Entwässerungssystems/Abdichtungssystems, abschnittsweise Daten zu Geologie und Hydrogeologie, Anfangsschäden, ergänzende Informationen zu Planungs- und Ausführungsqualität.
- Schädigungsursachen: Exposition gegenüber externen Schädigungsgrößen wie z.B. Spritzwasserbereich, Sprühnebelbereich, Temperatur. Hierfür bietet sich u.a. eine GIS-unterstützte Auswertung an, da sich diese Größen aus den üblichen im GIS-enhaltenen Daten zumeist überlagern bzw. ableiten lassen.
- Schädigungsauswirkungen: Phänomene der Schädigungen wie z.B. Verformungen, Risse, Abplatzungen, Chlorideindringung und Karbonatisierung, Wasserzutritte.

Streng genommen können lediglich Phänomene der Schädigung erfasst werden, da die eigentlichen Auswirkungen wie beispielsweise die Verminderung der Tragsicherheit nicht unmittelbar messbar, sondern lediglich aus den Phänomenen indirekt interpretierbar ist. Die Schäden bzw. deren kondensierte Formulierung über Bewertungssysteme für Bauteile oder Bauwerke stellen selbst wiederum Initialbedingungen für die zukünftige Alterung dar.

Die oben angeführten Parameter und Daten sind dann von relevanter Aussagekraft, wenn sie in entsprechender örtlicher Granularität erfasst werden. Die genannten Parameter und somit das Alterungsverhalten an sich sind an keiner Stelle des Tunnels gleich und daher örtlich zu differenzieren. Damit geht zwangsläufig auch eine Erfassung und Bewertung im

Rahmen eines sinnvollen Bezugssystems einher. Als solches hat sich bisher der Einzelblock bzw. der Einzelring etabliert.

Damit die genannten Parameter verarbeitbar, auf Netzebene vergleichbar und für die Kalibrierung von Alterungsmodellen anwendbar werden, sind dafür jedoch objektivierte Bezugsgrößen oder Klassifikationssysteme erforderlich. Hinsichtlich der Exposition kann es z.B. für das Umfeldkriterium „Frost-Tausalz-Einwirkung“ erforderlich sein, vorab zu definieren, was unter „Spritzwasserbereich“ oder „Frosteinwirkungsbereich“ zu verstehen ist. In Hinblick auf die Geologie kann wiederum eine Kategorisierung („Lockergestein“, „kein Gebirgsdruck“, „Gebirgsdruck/Langzeitumlagerungen“) zweckmäßig sein.

3.2 Kriterienkatalog für die Zustandsbewertung

Analog zur Datenerhebung (vgl. Kapitel 3.1) wurde in Abstimmung mit ASFiNAG und ÖBB ein Kriterienkatalog für die Formulierung des Zustands erstellt (vgl. Deliverable D2). Diese dient der Standardisierung der Ergebnisse der Zustandsbewertung und bildet die Eingangsgröße in entsprechende Alterungsfunktionen.

Folgende Bedingungen an die Zustandsbewertung sind dabei maßgebend:

- Die Zustandsgröße soll die Zustandsverteilung der Anlagengattung Tunnel auf Netzebene kompakt darstellen.
- Zustandsgröße und Alterungsmodell (=Zustandsgröße als Funktion der Zeit) sind Eingangsgrößen für Erhaltungsstrategien auf Netzebene. Sie sind (im Umkehrschluss) kein Werkzeug zur objektsbezogenen Analyse und Bewertung.
- Evidenzbasiert und kalibrierbar: Zustand und Prognose des Alterungsverhalten anhand von Realdaten.
- Parametrisierung und Kalibrierung der Alterungsmodelle: Dies bedingt, dass der Zustand (alpha-)numerisch in Form von Skalaren oder Vektoren bewertet bzw. benotet wird, welcher mathematisch oder algorithmisch verarbeitet werden kann.
- Die Zustandsgröße soll sowohl den terminlichen Handlungsbedarf als auch den Abnutzungsvorrat widerspiegeln. Die Zustandsgröße bietet somit eine Orientierung über absehbare Prioritäten als auch den Substanzwert der Anlagen:
 - Prioritätenreihung: Wann ist eine Intervention erforderlich, um die Funktionalität/Sicherheit/... aufrecht zu erhalten?

- Substanorientierung: Wie aufwändig ist die Verbesserung/Bewahrung des aktuellen Zustandes?

Durch die Prioritätenreihung ist ein Konnex zur Anlagen- bzw. Streckenverfügbarkeit gegeben, während die Substanorientierung für die mittel- bis langfristigen Mittelabflüsse benötigt wird.

- Verständlichkeit: Die Ermittlung der Zustandsgrößen soll einfach und nachvollziehbar gestaltet sein. Aufgrund der vorangegangenen Kriterien erfolgt an dieser Stelle jedoch keine Einschränkung, ob die Zustandsgröße alphanumerisch oder numerisch, als Skalar oder Vektor bzw. als ganze Zahl oder Dezimalzahl ausgedrückt wird.

4 EVALUIERUNG DER CURRENT PRACTICE DER ZUSTANDBEWERTUNG

Im gegenständlichen Kapitel wird der Erfüllungsgrad der in Kap. 3 erläuterten Zustandskriterien in Bezug auf den Status Quo/Current Practice bei ASFINAG und ÖBB evaluiert. Die Current Practice der Zustandserfassung/-bewertung wurde bereits in Deliverable D.1 zusammengefasst. Von einer detaillierten Wiederholung wird an dieser Stelle daher abgesehen.

Die Kriterien für Zustandserfassung und Zustandsbewertung werden in jeweils eigenen Kapitel analysiert und in weiterer Folge die Current Practice von ASFINAG und ÖBB anhand dieser Kriterien separat beurteilt.

4.1 Zustandserfassung

Bei Zustandserfassungen im Rahmen von routinemäßigen Bauwerksprüfungen werden in der Regel die Phänomene der Schädigungen und Alterungsprozesse erfasst, nicht jedoch zwangsläufig der eigentliche Schädigungsprozess selbst. Es gilt nun, diese Phänomene in jenem Umfang und in jener Qualität zu erfassen, die eine Beurteilung des Schädigungsgrades und somit des Zustandes erfordern.

Für eine zielgerichtete und effiziente Zustandserfassung sind somit zusätzlich zu den Kriterien aus Kapitel 3.1 folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Daten sind zur Erfassung des Zustandes am Bauwerk zu erheben?
- Werden diese Daten derzeit bereits erfasst?
- Werden sie derzeit adäquat / reproduzierbar erfasst?
- Werden Daten erfasst, die eigentlich nicht notwendig sind?

Dies wird anhand folgender Kategorien beurteilt:

- a) Objektivierbarkeit / Reproduzierbarkeit der Zustandserfassung
- b) Geringe Wechselwirkung Prüfung und Betrieb
- c) Vollumfänglichkeit der Zustandserfassung
- d) Vollumfänglichkeit der Dokumentation
- e) Erfassung nach Schadenskatalogen (ggf. vereinigen mit a) Objektivität)
- f) Erfassung der Schadensveränderung
- g) Vorhaltung relevanter Bauwerksdaten

Es ist festzuhalten, dass die o.a. Kriterien teilweise entgegenlaufen und ein hundertprozentiger Zielerfüllungsgrad aller Teilkriterien nicht möglich ist. Die Systematik der Zustandsbewertung ist somit stets eine Optimierungsaufgabe im Spannungsfeld aller dieser Kriterien.

4.1.1 Objektivierbarkeit / Reproduzierbarkeit

Die Zustandsbeurteilung sollte stets mit fachkundigem Sachverstand auf Basis der im Rahmen der Zustandserfassung erhobenen Daten erfolgen. Die im Rahmen der Zustandserfassung erhobenen Daten werden somit ingenieurmäßig vom jeweiligen Sachverständigen interpretiert. Aus dem Anspruch, dass Interpretationen und Entscheidungen stets evidenzbasiert erfolgen sollten, resultiert der Anspruch bestmöglicher Objektivität und Reproduzierbarkeit der erhobenen Daten und Messungen.

Die Datenakquisition erfolgt im Status quo im Wesentlichen durch Menschen (Sachverständige, Ziviltechniker, anlagenverantwortliches Betriebspersonal etc.). Ob ein Schaden dokumentiert und welche ergänzende handnahe Aufnahme am jeweiligen Schadensphänomen (z.B. Rissbreitenmessung) vorgenommen wird, hängt - neben der Aufmerksamkeit und Wahrnehmung des Prüfpersonals - auch von dessen fachkundiger, aber dennoch subjektiven Vorbeurteilung der Relevanz der wahrgenommenen Phänomene ab. Ob ein Schaden aus der Perspektive des Prüfenden wahrgenommen wird, hängt auch wesentlich von den Arbeitsbedingungen ab, u.a. von den Sicht- und Lichtverhältnissen auf einer Hebebühne bzw. im Tunnelinspektionsfahrzeug oder von der subjektiven Aufmerksamkeitsspanne während der Nachtstunden.

Auch die Dokumentation erfolgt in der Regel durch meist nicht maßstäbliche Aufnahmeblätter und Skizzen, ergänzt durch ausgewählte (und selbst angefertigte) Fotografien.

Als objektivitätssteigerndes Hilfsmittel kommen bei den ÖBB standardmäßig und bei der ASFİNAG zuletzt vermehrt Laserscans zum Einsatz, wobei die in den Aufnahmen ggf. halbautomatisiert identifizierten Schadstellen wiederum von Menschen hinsichtlich ihrer Relevanz vorbeurteilt und zur weiteren Aufnahme bestätigt oder anpasst werden müssen.

Ob ein Schaden somit erfasst wird und zur eigentlichen Zustandsbeurteilung herangezogen wird, hängt zu einem Gutteil von der spezifischen Erstbeurteilung des Prüfpersonals ab. Die Trennung zwischen objektiver Datenerfassung und einer darauf aufbauenden Interpretation ist in der gegenwärtigen Form somit nicht umgesetzt. Die Vorfilterung bei der Erfassung und Dokumentation der Daten kann zu Informationsverlust führen. Eine weitgehende Trennung von Erfassung und Interpretation erscheint daher zweckmäßig, da eine getrennte

Datenerfassung in einem vorab definiertem Detaillierungsgrad eine vom jeweiligen Prüfer unbeeinflusste und objektive Grundlage für spätere Bewertung schafft.

4.1.2 Erfassung nach Schadenskatalogen

Ein (zukünftiger) Schadenskatalog ist in diesem Zusammenhang als Maßstab zu verstehen, welche Schäden in welchem Ausmaß zu erfassen sind, damit diese in weiterer Folge in die anschließende Zustandsbewertung einfließen (Befundaufnahme).

Derartige Schadenskataloge kommen u.a. in der Schweiz, in Deutschland und auch bei Kanalinspektionen zur Anwendung (vgl. Deliverable D.1).

In den Prüfvorschriften der RVS 13.03.31 [1] und der ÖBB-RL 06.01.02 [4] finden sich nur sehr allgemeine Aussagen zu relevante Schäden, ohne jedoch spezifisch darauf einzugehen. Vereinzelt Hinweise, welche Schäden zu dokumentieren sind, finden sich in der RVS 06.02.31 [3] mit Schwellwerten von Rissbreiten bzw. in der RVS 13.03.31[1] in Form von allgemeinen exemplarischen Schadenstypen, die der jeweiligen Bauteilbewertung zugeordnet sind. Das ÖBV-Merkblatt „Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen“ [11] hingegen ist für die Mängelbehebung im Zuge der Neuerrichtung gedacht und für Bestandsbauwerke im gegenständlichen Zusammenhang nur bedingt geeignet.

Im konzerneigenen Berichtstandard der ASFINAG bez. Tunnelprüfungen finden sich ebenfalls allgemeine Beschreibungen möglicher Schadstellen, wobei auch hier - abgesehen von Rissbreiten – nur allgemeine Angaben hinsichtlich der dokumentierten Schäden getroffen werden, jedoch keine Schwellwerte zu deren Erfassung. Es existieren zwar interne (informelle) Schadenskataloge, diese stellen jedoch bislang keinen etablierten Standard für die üblicherweise externen Bauwerksprüfer dar und fokussieren v.a. auf Brückenbauten als auf Tunnelbauwerken.

Das ÖBB-RW 06.01.02 [4] erwähnt als weiterführende Literatur das UIC-Merkblatt 779-10 [5] sowie den dazugehörigen Schadenskatalog [6], welche eine wertvolle Arbeitshilfe zur Erkundung und Beurteilung von Schäden darstellt, jedoch ebenfalls keine Empfehlung zu Umfang und Detailtiefe der objektiv zu erfassenden Schäden enthält.

Ob ein Schaden erfasst wird und zur eigentlichen Zustandsbeurteilung herangezogen wird, hängt somit zu einem Gutteil von der spezifischen Erstbeurteilung des Prüfpersonals ab (vgl. Kapitel 4.1.1). Die Trennung zwischen einer objektiven Datenerfassung und einer darauf aufbauenden Interpretation durch den Menschen ist in der gegenwärtigen Form nicht durchgängig gegeben.

Schadenskataloge zu erfassender Schadensbilder sind ferner auch für eine automationsgestützte bzw. -unterstützte Datenerfassung erforderlich.

Ein Schadenskatalog mit bauarttypischer Empfehlung zu den zu erfassenden Schadensbildern und deren Erfassungsschärfen stellt auch eine Bezugsbasis für die Beobachtung von Veränderungen her, zumal die zeitliche Entwicklung oftmals von größerem Interesse ist als die Schadenscharakteristik zu einem einzelnen Zeitpunkt.

4.1.3 Wechselwirkung Prüfung und Betrieb

Es ist erstrebenswert, dass die Zustandserfassung einerseits möglichst wenig bis keine Störung des Betriebes verursacht und umgekehrt die Qualität der Zustandserfassung möglichst nicht durch den laufenden Betrieb beeinträchtigt wird.

Die klassisch konventionelle Prüfung erfordert in der Regel eine Sperre von zumindest einer Fahrspur oder eines Gleises. Die Prüfdurchführung muss gerade bei Bahntunnel bei herannahenden Zügen immer wieder unterbrochen werden (Rückzug in den sicheren Bereich des Fahrzeugs). Bei Eisenbahntunneln kommt erschwerend hinzu, dass der eingeschaltete Fahrdraht die Zugänglichkeit zur Firste erschwert und für handnahe Inspektionen abgeschaltet und geerdet werden muss.

Dies führt dazu, dass Prüfungen meist zu betriebsschwachen Zeiten (in der Regel in den Nachtstunden) durchgeführt werden, um den Betrieb möglichst wenig zu beeinträchtigen.

Durch eine vorlaufende Tunnelscan-Aufnahme lässt sich der Prüfprozess optimieren, indem in einer „virtuellen“ Begehung des Tunnels am Bildschirm bei der eigentlichen Prüfung Verdachtsstellen identifiziert werden und die eigentliche Prüfdurchführung nur mehr auf diese Bereiche fokussiert.

Während bei den ÖBB die Durchführung eines Tunnelscans vor der eigentlichen Prüfung fester Bestandteil der routinemäßigen Bauwerksüberwachung ist, steht dieses Prozedere bei der ASFiNAG erst vor der Einführung. Ungeachtet dessen ist die vollumfängliche Prüfung am Bauwerk durch den Ingenieur ist sowohl in der RVS [1] als auch im ÖBB-Regelwerk [4] mit den bisherigen Prüfintervallen unverändert festgeschrieben.

Zu beachten ist, dass auch die Durchführung eines Tunnelscans Störungen im Betrieb verursachen, welche jedoch durch die Effizienzsteigerungen (v.a. Geschwindigkeit) zunehmend geringer ausfallen.

4.1.4 Aufnahme vollumfänglich

Bahn: Die Zustandserfassung erfolgt in der Regel über das gesamte Bauwerk. Alle einsehbaren Flächen werden dabei inspiziert. Somit werden die Anlagen bei den ÖBB heute vollumfänglich aufgenommen.

Straße: Auch erfolgt in der Regel die Zustandserfassung über alle einsehbaren Oberflächen des Bauwerks. Ausnahmen bilden Bereiche welche z.B. mit Lärmschutzkassetten oder Brandschutzplatten verkleidet sind. Letztere wurden zunehmend in den letzten Jahren bei einigen Straßentunnel aufgrund neuerer Bestimmungen zum baulichen Brandschutz verbaut. Strategien für eine effiziente Bauwerksüberwachung zur Kompensation der erschwerten Zugänglichkeit müssen erst entwickelt werden (z.B. Monitoringsysteme hinter den Platten, Sichtschlitze u.dgl.). Abgesehen von derartigen lokalen Einzelfällen werden die Tunnelanlagen der ASFiNAG ebenfalls vollumfänglich aufgenommen.

4.1.5 Dokumentation vollumfänglich

In der Regel besteht sowohl bei ASFiNAG als auch bei ÖBB der Anspruch und die Praxis, die gesamten Flächen zu dokumentieren. Angesichts der Ausführungen in Pkt. 4.1.1 und 4.1.2. ist jedoch zu bedenken, dass letztlich nur jene Schäden erhoben werden, welche durch den Prüfer unter den gegebenen Prüfbedingungen wahrgenommen werden. Von diesen wird wiederum nur jener Teil dokumentiert, der aufgrund einer individuellen Ersteinschätzung als relevant erachtet wird.

4.1.6 Erfassung Schadensveränderung

Ergänzend zur „bloßen“ Charakteristik aktueller Schäden ist auch deren Veränderung für eine weitere Zustandsbewertung und -prognose von großem Interesse.

Aus diesem Grund ist es bereits heute Standard, die allfällige Veränderung einmal erfasster Schäden zu dokumentieren. Bei ASFiNAG erfolgt dies im Rahmen der CAD-mäßigen Schadensdokumentation durch die Ablage der Schadensinformation früherer Prüfungen auf eigenen Layer mit eigener Farbe. Die Entwicklung der Schäden kann somit – im Rahmen der Genauigkeit der jeweiligen Erfassung – nachvollzogen werden.

Bei den ÖBB erfolgt die Dokumentation der Schäden verschiedener Tunnelscanbefahrungen ebenfalls auf eigenen Layer, teils mit halbautomatischer Voridentifikation und anschließender (farblicher) Markierung der Änderungen.

4.1.7 Vorhaltung relevanter Bauwerksdaten

Bauwerksdaten sind ebenso Datengrundlage zur Zustandsbeurteilung wie die erhobenen Schäden. Schäden sind stets im Zusammenhang mit der jeweiligen spezifischen Bauweise, Anlagenkonfiguration und den Randbedingungen (z.B. Geologie) zu sehen. Sie werden daher in diesem Abschnitt zur Zustandserfassung mitbehandelt.

Generell hat sich sowohl bei ASFiNAG als auch ÖBB ein konsequentes Bestandsdatenmanagement etabliert. Während der Anspruch besteht, dass die grundlegenden Bauwerksdaten in den jeweiligen Datenbanken (BAUT/IMT und KISTE) vorgehalten werden, führt u.a. die breite Altersstruktur/Altersverteilung der Tunnelanlagen dazu, dass eine Reihe von Datengrundlagen nur analog und an verschiedenen Stellen abgelegt sind. Langfristig sind BIM-Systeme geeignete Plattformen zur Vorhaltung der erforderlichen Daten an einem Single-Point-of-Truth. Diese befinden sich jedoch erst im Aufbau und es ist derzeit noch ungewiss, ob alle für eine Zustandsbeurteilung und weitere Instandhaltungsplanung erforderlichen Daten georeferenziert (d.h. auf Bauteilebene und Block/Ring-Ebene) eingepflegt werden.

Bestandsdaten werden derzeit im Rahmen von Tunnelprüfung nur in sehr grober Granularität herangezogen, zumeist vor allem zur Feststellung der Bauweise und als Mittel zur Verortung. Eine spezifische Kombination von Bestandsdaten und Zustandsdaten (z.B. Gegenüberstellung Rissbild zum lokal anstehenden Gebirge) erfolgt in der Regel nur bei Sonderprüfungen oder bei objektspezifischen Schadensanalysen im Anlassfall.

4.1.8 Zielerfüllung Zustandserfassung

Die Zielerfüllungsgrade der obigen Kriterien für die Verkehrsträger Schiene (ÖBB) und Straße (ASFiNAG) sind in einem Spinnendiagramm (siehe [Abbildung 1](#)) illustriert. Die darin ausgewiesenen Achsenteilungen sind nicht als Ergebnis eines Algorithmus zu verstehen, sondern nur als Hilfsgröße zur Darstellung einer qualitativen Experteneinschätzung der Autoren und aus Gesprächen mit weiteren Fachleuten (Ingenieurbüro Laabmayr ZT GmbH, IGT Geotechnik und Tunnelbau ZT GmbH, Skava ZT GmbH, Dr. Erich Saurer ZT): Die Teilungsskala steht somit in Abhängigkeit von zunehmendem Abstand vom Zentrum für folgende Einschätzung:

Abstand vom Mittelpunkt ↓

„Das Kriterium findet sich im Status Quo kaum bis gar nicht wieder.“
 „Das Kriterium findet sich im Status Quo ansatzweise wieder.“
 „Das Kriterium findet sich im Status Quo teilweise wieder.“
 „Das Kriterium ist im Status quo zu wesentlichen Teilen erfüllt.“
 „Das Kriterium ist im Status quo weitgehend oder vollständig erfüllt.“

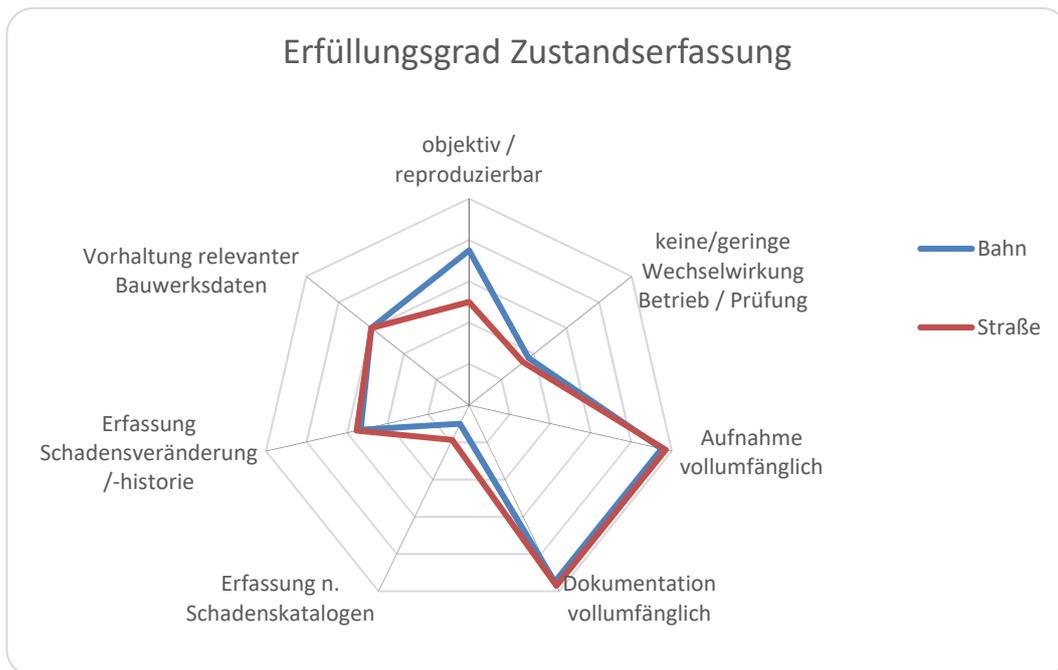


Abbildung 1: Erfüllungsgrad der Kriterien der Zustandserfassung

Es ist an dieser Stelle nochmals zu betonen, dass eine vollständige Zielerfüllung aller Kriterien nicht möglich ist, da die Erfüllung eines Kriteriums unter Umständen auf Kosten des anderen gehen kann. Die jeweils gewählte Systematik der Zustandserfassung ist somit stets als eine Optimierungsaufgabe im Spannungsfeld aller dieser Kriterien sowie in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit und Verhältnismäßigkeit zu sehen.

4.2 Zustandsbewertung

Für eine nachvollziehbare, objektivierbare, evidenzbasierte und prozesskonforme/verarbeitbare Zustandsbewertung sind ausgehend von den Kriterien aus Kap. 3.2 folgende Fragen zu beantworten:

- Wird der Zustand in kompakter und einfach verständlicher Form dargestellt?

- Eignet sich die derzeitige Zustandsbewertungssystematik für kalibrierbare und parametrisierbare Alterungsmodelle?
- Erfolgt die Bewertung nachvollziehbar und evidenzbasiert?
- Wird entlang der Längserstreckung örtliche differenziert (Ebene Block/Ring)?
- Wird nach prioritätenorientierter und substanzorientierter Bewertung unterschieden?

Diese Fragestellungen werden in weiterer Folge anhand folgender Kategorien beurteilt:

- a) Nachvollziehbarkeit / Reproduzierbarkeit der Zustandsbewertung
- b) Datenbasiert
- c) Verarbeitbarkeit
- d) Nachvollziehbarer Algorithmus zur Ableitung von Bewertungszahlen
- e) Örtliche Differenzierung
- f) Differenzierung Prioritätswert (Verfügbarkeit) / Substanzwert (Abnutzungsvorrat)
- g) Differenzierung hinsichtlich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

4.2.1 Nachvollziehbarkeit / Reproduzierbarkeit

Das Ergebnis der Zustandsbewertung in Form einer Zustandsnote bzw. eines Zustandsindex sollte nicht von der beurteilenden Person abhängen, da ansonsten die Vergleichbarkeit innerhalb der Anlagengattung und auf Netzebene nicht gegeben ist. Im Status Quo wird hier allein auf die Fachkunde des Prüfers gesetzt. Zwar ist hierdurch eine sachkundige Zustandsbeurteilung sichergestellt, diese ist jedoch aufgrund der subjektiven – wenn auch fachkundigen – Beurteilung seitens des Prüfers mit einem Bias versehen und kann sich (unter ansonsten gleichen Rahmenbedingungen) stark vom Urteil anderer Prüfer unterscheiden.

Wie derzeit eine spezifische Beurteilung des geprüften Bauwerks in eine allgemeingültige Zustandsnote zu erfolgen hat, wird sehr allgemein in der RVS 13.03.31 [1], Pkt. 9.3, sowie im ÖBB-RW 06.01.02 [4], Pkt. 3.5.1., beschrieben. Wie der Prüfer letztlich zu dieser Zuordnung kommt, ist derzeit nur bedingt nachvollziehbar.

Anders als im konstruktiven Ingenieurbau, wo aufgrund definierter statischer Systeme die statische Leistungsfähigkeit und die Einhaltung klarer Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitskriterien verhältnismäßig klar überprüfbar sind, ist der Tunnelbau geprägt durch ein hohes Maß an Unschärfe der Randbedingungen und Streuung der Einflussfaktoren, welche

ein Bauwerk nicht nur während Planung und Errichtung, sondern auch über seinen gesamten Lebenszyklus begleiten. Bei Planung und Bau wurde diesem Umstand in der Vergangenheit mit Empirie und Erfahrungswerten begegnet. Mit der Einführung der ÖGG-Richtlinie für die Geotechnische Planung von Untertagebauwerken [8] wurde man dem Anspruch auf Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen bei Planung und Errichtung im Sinne eines zeitgemäßen Risikomanagements gerecht, zumal die Auslegung von Untertagebauwerken durch die Eurocodes 1, 2, 6 und 7 nicht spezifisch geregelt sind. Der Prozess der ÖGG-Richtlinie [8] hat sich in Österreich als allgemein anerkannter Standard etabliert. Im restlichen Lebenszyklus nach Inbetriebnahme wäre ein ähnlicher Prozess für die Zustandsbeurteilung und -bewertung wünschenswert.

4.2.2 Datenbasiert

Die Zustandsbeurteilung erfolgt im Status quo auf Grundlage der Zustandserfassung und den ausgehobenen Bauwerksdaten und Randbedingungen und somit datenbasiert. Die Qualität der Daten spielt dabei entsprechend eine große Rolle, ist aber bereits mit dem Anspruch objektiver Datenerhebung im Rahmen der Zustandserfassung (vgl. [Kapitel 4.1.1](#)) abgedeckt.

4.2.3 Verarbeitbarkeit

Das Ergebnis der Zustandsbewertung entspricht im Status Quo einer Zustandsnote. Der Datenbestand der Zustandsnoten wurde im Deliverable D.2 aufbereitet und hinsichtlich der Ableitung von Alterungsmodellen prozessiert. Es zeigt sich, dass die Zustandsnotensystematik derzeit durchaus mathematisch bzw. statistisch verarbeitbar ist, wenn auch die Aussagekraft der derzeitigen Zustandsnotensystematik gem. RVS und ÖBB-RL ihre Grenzen hat (vgl. dazu nachstehende [Kapitel 4.2.4](#), [4.2.5](#) und [4.2.6](#)).

4.2.4 Örtliche Differenzierung

Formal sieht die geltende RVS 13.03.31 [1] eine Differenzierung in Bauteilnoten vor. Bei Tunnelbauwerken handelt es sich darüber hinaus in der Regel um Linienbauwerke mit größerer Längserstreckung. Wiewohl die Zustandserfassung örtlich vollständig erfolgt (vgl. [Kapitel 4.1.4](#) und [4.1.5](#)), sehen RVS [1] und ÖBB-RW [4] derzeit keine Differenzierung in Längsrichtung vor.

In der Praxis wird jedoch bei den ÖBB teilweise jeder Block/Ring mit einer Zustandsnote A bis E bewertet, welche in etwa den Noten 1 bis 5 des ÖBB-RW [4] entsprechen.

4.2.5 Differenzierung Prioritätswert / Substanzwert

Die heutige Zustandsnotensystematik stellt den Zustand der Gesamtanlage dar. Beim wesentlichen Bauteil „Innenschale“ bestimmt der „schlechteste“ Block/Ring die Gesamtnote des Bauwerks. Wie sich der Zustand über den Tunnel verteilt, lässt sich aus der heutigen Bewertungssystematik jedoch nicht ablesen. Dieses Vorgehen reflektiert die Verfügbarkeit bzw. umgekehrt die Ausfallswahrscheinlichkeit der Gesamtanlage, nicht jedoch ihren Abnutzungsvorrat oder Substanzwert.

Wenn von 200 Blöcken lediglich 4 Blöcke einen kritischen Zustand aufweisen, führt das im derzeitigen (Bewertungs-)System zur gleichen Gesamtnote als wenn 50 Blöcke einen kritischen Zustand aufweisen. Für die Erfassung des Substanzwertes oder Abnutzungsvorrates der Gesamtanlage und in weiterer Folge für die Entwicklung von mittel- oder langfristigen Instandhaltungsplänen ist diese Information zwingend notwendig, aber aus der Bauwerksnote derzeit nicht ableitbar.

Beispielsweise wird für Fahrbahnen im Rahmen des Pavement Managements im Rahmen der RVS 13.01.16 [3] eine vergleichbare Differenzierung in Teilindikatoren bereits getroffen.

4.2.6 Differenzierung Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit

Die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sind Indikatoren für die Verfügbarkeit und Verkehrssicherheit im aktuellen Zustand, während die Dauerhaftigkeit die noch bevorstehende zukünftige Zustandsentwicklung adressiert. Je nach Fragestellung ist daher ggf. eine getrennte Zuordnung zweckmäßig.

Die Beurteilung der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit (entspricht u.a. der Verkehrssicherheit) sowie der Dauerhaftigkeit ist in der heutigen Systematik mehr oder weniger explizit (RVS) oder implizit (ÖBB-RW) enthalten. Die heutige Zustandsnotensystematik alleine erlaubt im Status quo jedoch keine klare Differenzierung.

4.2.7 Zielerfüllung

Die Zielerfüllungsgrade der obigen Kriterien sind in einem weiteren Spinnendiagramm (siehe [Abbildung 2](#)) abgebildet. Die darin ausgewiesenen Prozentzahlen sind nicht als Ergebnis eines Algorithmus zu verstehen, sondern nur als Hilfsgröße zur Illustration einer qualitativen Experteneinschätzung der Autoren und aus Gesprächen mit weiteren Fachleuten (Ingenieurbüro Laabmayr ZT GmbH, IGT Geotechnik und Tunnelbau ZT GmbH, Skava ZT GmbH, Dr. Erich Saurer ZT, UHG Consult ZT):

- Abstand vom Mittelpunkt ↓
- „Das Kriterium findet sich im Status Quo kaum bis gar nicht wieder.“
 - „Das Kriterium findet sich im Status Quo ansatzweise wieder.“
 - „Das Kriterium findet sich im Status Quo teilweise wieder.“
 - „Das Kriterium ist im Status quo zu wesentlichen Teilen erfüllt.“
 - „Das Kriterium ist im Status quo weitgehend oder vollständig erfüllt.“

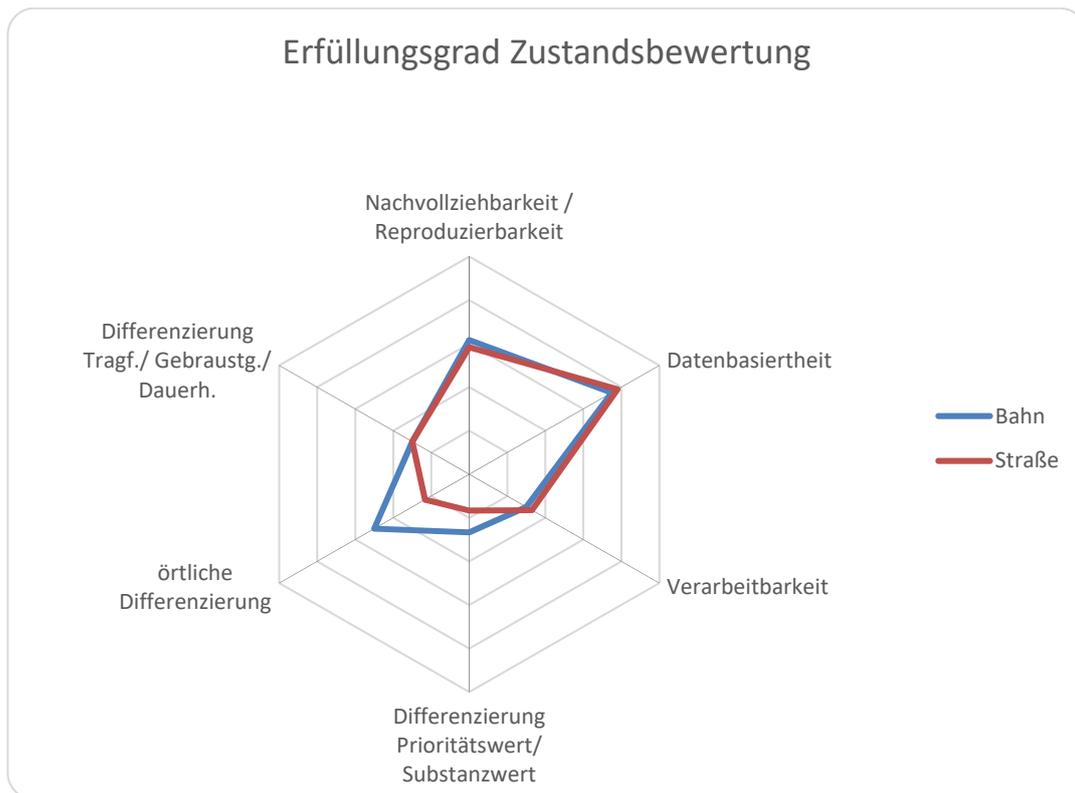


Abbildung 2: Erfüllungsgrad der Kriterien für die Zustandsbewertung

Es ist an dieser Stelle nochmals zu betonen, dass eine vollständige Zielerfüllung in allen gewählten Kriterien nicht möglich ist, da die Erfüllung eines Kriteriums z.T. auf Kosten eines anderen geht. Die jeweils gewählte Systematik der Zustandsbewertung ist somit stets eine Optimierungsaufgabe im Spannungsfeld aller dieser Kriterien.

4.3 Entwicklungspotential und Handlungsfelder im Status Quo

Aus den in [Abbildung 1](#) und [Abbildung 2](#) visualisierten Zielerfüllungsgraden zeigen die größten Entwicklungspotentiale in folgenden Bereichen:

4.3.1 Zustandserfassung

- Wechselwirkung Betrieb/Prüfung

Im Status quo ist eine hohe gegenseitige Beeinträchtigung zu beobachten. Inspektionen sind in der Regel nur unter (erheblicher) Störung des Betriebes möglich bzw. wird die Qualität der Zustandserfassung derzeit signifikant durch die jeweiligen Betriebsbedingungen beeinflusst.

- Systematisierte Aufnahme nach Schadenskatalogen

In der Praxis existieren keine klare Definition in Form eines Katalogs, welcher bauarttypisch empfiehlt, welche Schäden in welcher Schärfe überhaupt zu erfassen sind. Die Datenerfassung und -katalogisierung erfolgt derzeit ohne systematische und allgemein für Tunnelbauwerke gültige Kataloge.

- Objektivität/Reproduzierbarkeit der Zustandserfassung

Die beiden oben genannten Handlungsfelder beeinträchtigen unmittelbar die Objektivität der Zustandserfassung. Der Prüfende muss heute – teils unter sehr herausfordernden Prüfbedingungen – bereits im Zuge der Erfassung eine Vorbeurteilung und Interpretation vorwegnehmen, welche Schäden relevant und daher zu dokumentieren sind und welche nicht.

- Erfassung der Schadensveränderung bzw. -historie

Veränderungen der Schadensbilder werden derzeit in der Regel im Abstand der Hauptprüfungen (gem. [1] bei Straße: alle 6 bis 12 Jahre) bzw. der Untersuchungen (gem. [4] bei Bahn: alle 4-6 Jahre) abgebildet. Gerade im Zusammenhang mit allfälligen Instandhaltungsmaßnahmen ergeben sich somit letztlich eine entsprechend begrenzte Anzahl an Zustandszeitpunkte, die einander gegenübergestellt werden können.

4.3.2 Zustandsbewertung

- **Nachvollziehbarkeit der Zustandsbewertung**
Es bestehen heute kaum verpflichtend anzusetzenden Maßstäbe, welche die Nachvollziehbarkeit der Interpretationen und Überlegungen bei Zustandsbewertung sicherstellen. Vielmehr erfolgt die Zustandsbewertung allein auf einer fachkundigen, jedoch subjektiven Einschätzung des Prüfenden.
- **Differenzierung Tragfähigkeit/Gebrauchstauglichkeit/Dauerhaftigkeit**
Die Aspekte der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit gehen heute in die Zustandsbewertung ein. Es ist jedoch anhand der Zustandsnoten nicht ableitbar, zu welchen Anteilen diese Aspekte die Note beeinflussen.
- **Differenzierung Prioritätswert und Substanzwert**
Die heutige Zustandsbewertung adressiert heute in der Regel ein gesamtes Objekt (z.B. eine Röhre von Portal bis Portal). Ein Substanzwert der Anlage im Sinne des Kap. 4.2.5 ist durch die heutige Zustandsnote nicht repräsentiert.

5 WEITERENTWICKLUNG DER ZUSTANDBEWERTUNG

Abbildung 1 und Abbildung 2 bzw. Kapitel 4 illustrieren diejenigen Aspekte der Zustandserfassung und Zustandsbewertung, in welchen Potentiale für eine Weiterentwicklung identifiziert wurden. Im gegenständlichen Kapitel werden Vorschläge unterbreitet, wie dieses Weiterentwicklungspotential bei Zustandserfassung und Zustandsbewertung ausgeschöpft werden könnte.

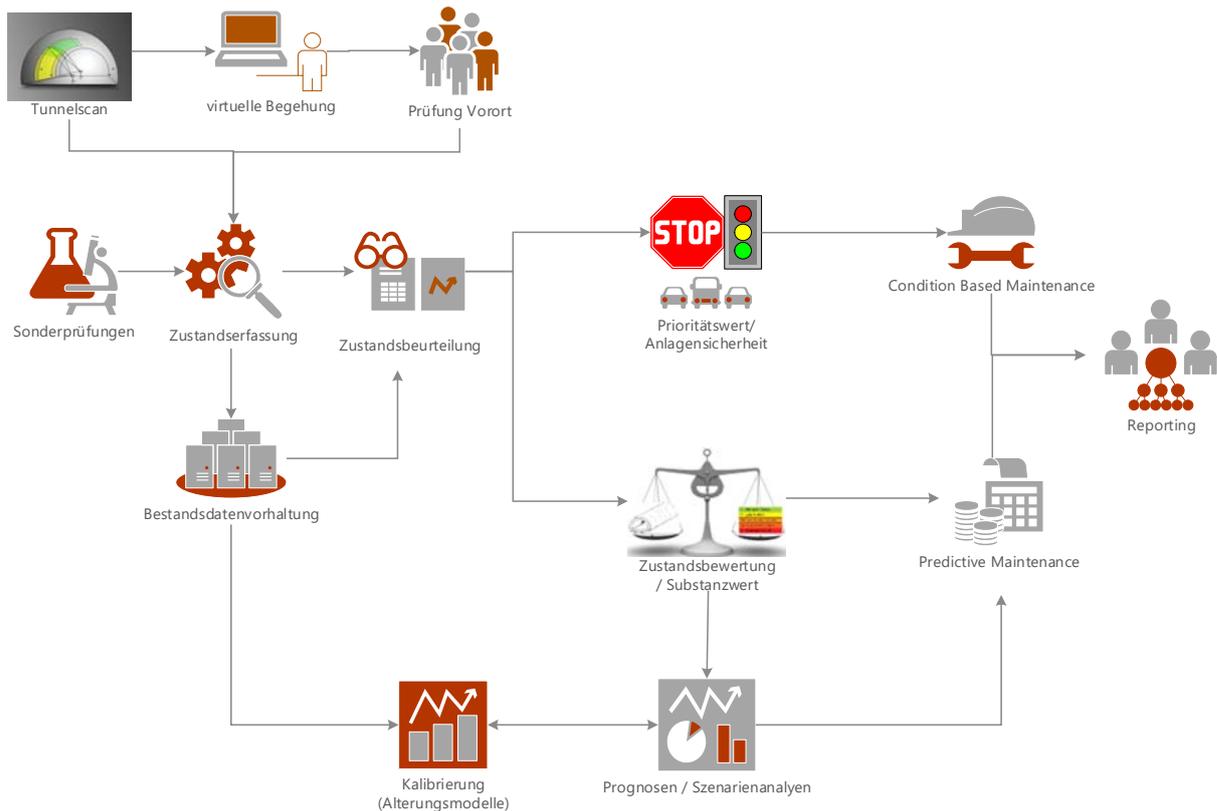


Abbildung 3: Framework Zustandsbewertung

5.1 Zustandserfassung

In Kapitel 4.1 wurde festgestellt, dass derzeit keine Trennung zwischen objektiver Datenerhebung und anschließender Zustandsbewertung besteht. Als Hauptgrund hierfür kann der Umstand genannt werden, dass im derzeitigen Inspektionsregime vieles der fachmännischen – wenn auch subjektiven – Einschätzung des Prüfenden bereits in die Auswahl der zu erfassenden oder zu berücksichtigenden Phänomene und Daten eingeht. Diese Einschätzung ist auch unter den fordernden Randbedingungen der Prüfdurchführung zu sehen. Wird der Prüfer von diesen engen Randbedingungen der reinen Datenakquisition entlastet, indem diese nach Möglichkeit automatisiert erfolgen, kann der Fokus des Prüfers auf die wesentliche sachkundige Interpretation der objektiv erhobenen Daten gelegt werden.

Durch den Einsatz von Tunnelscans bei den ÖBB wurde dabei ein wesentlicher Schritt zu einer objektiven visuellen Aufnahme als Grundlage für die weitere Schadensdokumentation gesetzt. Zunehmende Qualität der Aufnahme der Tunnellaubung und leistungsfähiger Visualisierung (3D-Mapping auf tatsächliche Tunnelgeometrie) ermöglichen es dem Prüfer nunmehr, das Bauwerk abseits von betrieblichen Randbedingungen und ggf. eingeschränkten Lichtbedingungen „virtuell“ zu inspizieren. Der potentiell vorhandene Einfluss einer allfällig eingeschränkten Wahrnehmung oder Aufmerksamkeit auf Umfang und Qualität der Zustandserfassung wird dadurch deutlich reduziert.

Durch die Weiterentwicklung der Aufnahmequalität des Tunnelscans werden somit die Zielkriterien Objektivierbarkeit, Wechselwirkung Betrieb/Prüfung, Erfassung nach Schadenskatalogen, Erfassung Schadensveränderung potentiell besser erfüllt.

Es ist an dieser Stelle jedoch zu betonen, dass die Weiterentwicklung der automatisierten Datenakquisition keinesfalls die Inspektion und Beurteilung durch einen Fachmann ersetzen kann und daher Inspektionen Vorort – wenn auch in Art und Umfang optimiert und in Kombination mit einer (semi-) automatischen Datenakquisition – als Basis für die eigentliche sachkundige Zustandsbewertung unverzichtbar sind.

5.2 Katalog der zu erfassenden Schäden

Entgegen des bereits erwähnten Anspruchs der methodischen Trennung zwischen Zustandserfassung und Zustandsbewertung besteht ein systemimmanenter Filter seitens des Prüfenden, welche Schäden überhaupt relevant und daher zu kennzeichnen bzw. zu erfassen sind. Hier erscheint es zweckmäßig, im Sinne der späteren Nachvollziehbarkeit, bauartspezifische Empfehlungen in Form der in [Kapitel 4.1.2](#) diskutierten Schadenskataloge zu definieren. Diese sind spätestens dann erforderlich, wenn der Einsatz bildverarbeitender Hard- und Software zur automatisierten Schadenserkenkung und -erfassung angestrebt wird.

Der nachstehende Katalog relevanter Zustandsphänomene (siehe [Tabelle 1](#)) ist Ergebnis von Arbeitsgesprächen zwischen dem AMBITION-Projektteam und weiteren externen Fachleuten (u.a. Skava Ziviltechniker GmbH, Dr. Erich Saurer, Sachverständiger für Tunnel und Stollenbau) unter Berücksichtigung der Schadenskataloge des UIC-Schadenskatalogs [6] und des STUVA-Sachstandsbericht 2017 [7]. Er enthält Schäden bzw. Schädigungsphänomene, welche jeder für sich oder in Kombination mit weiteren Indikatoren die potentielle Veränderung der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit wiedergeben.

Die Phänomene dieses Kataloges werden möglicherweise nicht immer erkannt, weil entweder keine entsprechende Messung erfolgt (z.B. Potentialfeld, Chloridgehalt) oder weil es die Prüfdurchführung (noch) nicht im entsprechenden Ausmaß erlaubt. Die Objektivierung im Sinne der Trennung zwischen Zustandserfassung und Zustandsbewertung wäre jedoch bereits erreicht, wenn die Phänomene dokumentiert werden, sobald sie erkannt oder gemessen werden.

Es steht dem Prüfer im Zuge einer auf objektiven Daten basierten sachkundigen Zustandsbewertung natürlich frei, die derart erfassten Schäden je nach spezifischer Bauwerkssituation mehr oder weniger Bedeutung zuzumessen.

Tabelle 1: Katalog potentiell relevanter Zustandsphänomene

Unbewehrter Ortbeton- oder Spritzbetonausbau	Bewehrter Ortbeton- oder Spritzbetonausbau	Mauerwerks-gewölbe
<ul style="list-style-type: none"> • Längsrisse, Querrisse und Schrägrisse *) • Versetzte oder ausbrechende Rissufer • Feuchte oder zeitweise wasserführende Risse • Risse, welche geschlossene Flächen umschreiben, ggf. in Kombination mit Blockfuge • Sichelförmige Risse an Blockfugen • Oberflächen-Netzrisse (Krakeele o.ä.) • Blockfugenabplatzungen • Profil-/Blockfugenversätze >1cm • Arbeitsfugen mit (zeitweiser) Wasserführung oder Sinterspuren • Abschaltungen, Abplatzungen oder Hohlstellen in der Laibung • Absandende Betonoberfläche • Feuchtstelle • Sinterspuren • Salzbildung 	<ul style="list-style-type: none"> • Längsrisse, Querrisse und Schrägrisse *) • Versetzte oder ausbrechende Rissufer • Feuchte oder zeitweise wasserführende Risse • Risse mit Rostspuren • Risse, welche geschlossene Flächen umschreiben, ggf. in Kombination mit Blockfuge • Sichelförmige Risse an Blockfugen • Oberflächen-Netzrisse (Krakeele o.ä.) • Blockfugenabplatzungen • Profil-/Blockfugenversätze >1cm • Arbeitsfugen mit (zeitweiser) Wasserführung oder Sinterspuren • Abschaltungen, Abplatzungen oder Hohlstellen in der Laibung • Abplatzung der Betondeckung • Freiliegende Bewehrung 	<ul style="list-style-type: none"> • Längsrisse, Querrisse und Schrägrisse*) • Versetzte oder ausbrechende Rissufer • Feuchte oder zeitweise wasserführende Risse • Risse, welche geschlossene Flächen umschreiben, ggf. in Kombination mit Blockfuge • Blockfugenabplatzungen • Profil-/Blockfugenversätze >1cm • Verdrückungen/Ausbauungen/Verformungen des Gewölbes • Abplatzungen und Hohlstellen in den Mauersteinen • Absandende Mauersteine • Lose oder fehlende Mauersteine • Loser oder fehlender Fugenmörtel • Feuchtstelle • Sinterspuren • Ausblühung

<ul style="list-style-type: none"> • Eisbildung • Nest und poröser Beton • zeitliche Veränderung der o.a. Phänomene • sonstige unspezifische oder nicht näher zuordenbare allgemeine Veränderung der Oberfläche (außer Verschmutzung) • Thermische Unstetigkeiten/ Anomalien • Betondruckfestigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Betonverfärbung aus Korrosion • abzeichnende Bewehrung • Absandende Betonoberfläche • Feuchtstelle • Sinterspuren • Salzbildung • Eisbildung • Nest und poröser Beton • zeitliche Veränderung der o.a. Phänomene • sonstige unspezifische oder nicht näher zuordenbare allgemeine Veränderung der Oberfläche (außer Verschmutzung) • Thermische Unstetigkeiten/ Anomalien • Potentialfeldmessung • Betondruckfestigkeit • Chlorid-Gehalt • Karbonatisierungstiefe 	<ul style="list-style-type: none"> • Eisbildung • zeitliche Veränderung der o.a. Phänomene • sonstige unspezifische oder nicht näher zuordenbare allgemeine Veränderung der Oberfläche (außer Verschmutzung) • Thermische Unstetigkeiten/ Anomalien
---	---	---

*) Die erfasste bzw. erkannte Mindestrissbreite ist in der Regel objektspezifisch und bauarttypisch zu betrachten bzw. zu definieren. Bei bewehrten Stahlbetoninnenschalen ist sie üblicherweise geringer als bei unbewehrten Innenschalen oder bei Mauerwerksgewölben.

5.3 Technik der Zustandserfassung

5.3.1 Tunnelscanning

Die Hauptaufgabe von Tunnelscanner Systemen ist die vollflächige Aufnahme von Tunneloberflächen und die anschließende 3D-Rekonstruktion der Tunnelbauwerke. Zusätzlich liefern moderne Scansysteme auch Informationen zur Oberfläche in Form einer Fototextur. Die 3D-Daten bzw. texturierten 3D-Daten können für eine Vielzahl von Dokumentations-, Inspektions- und Prüfungsaspekten verwendet werden, die im vorliegenden Deliverable D3/D4 beleuchtet werden.

Im Wesentlichen werden beim modernen Tunnelscanning im Zusammenhang mit der Zustandserfassung folgende drei Ansätze verfolgt:

- Laserscanning: Geometriedaten von Laserscannern; Intensitätsbilder (Grauwerte 0-255)
- Photogrammetrische Systeme: Geometrie und hochauflösende Fototextur ausschließlich von Digitalkamera(s)
- Hybridsysteme: Geometriedaten von Laserscanner und Fototextur von Digitalkamera(s)

5.3.2 Sensorik

Im Folgenden werden die Aufnahmesysteme gegliedert nach ihrer Sensorik dargestellt. Da bei allen Messsystemen die erreichbare Genauigkeit (absolute, relative, laterale) und die Auflösung (Sensor, Oberfläche, radiometrisch) von zentraler Bedeutung sind, werden diese gesondert in den nachfolgenden Kapiteln definiert und gegenübergestellt.

5.3.2.1 Lasersysteme

Lasermessungen basieren auf Impuls- bzw. Phasenverschiebungsverfahren. Mit deren Hilfe werden Distanz- und Winkelmessungen vorgenommen und die reflektierten Laserchos in Form eines Intensitätsbildes registriert. Mit aktuellen Laserscannern kann die Geometrie von Tunnelbauwerken mit einer geometrischen Genauigkeit von etwa 5 mm in alle Raumrichtungen vermessen werden. Laserscanner besitzen den Vorteil eines relativ weiten Aufnahmebereichs und die Fähigkeit, tageslichtunabhängig aufnehmen zu können. Dadurch ist es auch möglich, einspringende Formen, wie z.B. Nischen oder Einbindungen in Seitentunnel, zu erfassen.

Ein wesentliches Merkmal von Laserscannern liegt darin, dass sie die Tunneloberfläche nicht farbecht mit RGB-Werten erfasst wird.

Die Laserdaten liegen als Intensitätsbilder in Graustufen vor. Eine Erkennung von Rissbildern mit relevanten Rissbreiten (0,3-1,0 mm) ist daher nur aufgrund von Intensitäts- und folglichem Kontrastunterschieden möglich. Tunneldeformationen können jedoch durch den Vergleich von zwei Messungen unterschiedlicher Zeitpunkte bestimmt werden.

Ein gleisgebundenes System (z.B. zur Messung von Lichtraumprofilen) liefert Amberg Technologies AG (Regensdorf, Schweiz) mit dem Messwagen GPR IMS 5000, welcher eine geometrische Genauigkeit von bis zu 5 mm erzielt. Leica erreicht mit dem SiTrack One die gleiche geometrische Genauigkeit **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

5.3.2.2 Photogrammetrische Systeme

Bei photogrammetrischen Systemen werden sowohl 3D-Geometrie als auch die farbechte Fototextur ausschließlich aus den aufgenommenen Fotos berechnet. Die Aufnahme erfolgt mittels Flächen- oder Zeilenkameras; die 3D-Berechnungen beruhen auf der Methode der Stereorekonstruktion.

Photogrammetrische Systeme sind variabel einsetzbar und können auch mit hohen Geschwindigkeiten betrieben werden (vgl. Kapitel 5.3.8.1). Sie benötigen dafür jedoch helle Ausleuchtung und eine zu taktende Blitztechnik. Eine Marktanalyse ergab, dass rein photogrammetrische Systeme für die Tunnelvermessung im Zuge von Tunnelprüfungen derzeit aufgrund dieser Anforderung noch nicht etabliert sind.

Es gibt hingegen etablierte photogrammetrische Systeme in der Sparte Tunnelneubau, die stationär, d.h. ohne Bewegung betrieben werden (3GSM Shapematrix mit handelsüblichen Kameras; Dibit Handheld 3D-Komplettsystem) sowie wissenschaftliche Untersuchungen zum prinzipiellen Einsatz der Photogrammetrie in Tunneln [13] [14] [16].

5.3.2.3 Hybride Systeme

Im Rahmen von Tunnel-scans haben sich „hybride Systeme“ etabliert. Sie nehmen die Geometrie mittels Laserscan auf und verwenden eine oder mehrere Digitalkameras, um die Tunneloberfläche abzufotografieren. Die mittels Laserscan erfasste Geometrie wird in weiterer Folge mit einer Fototextur überlagert. Derart texturierte 3D-Modelle ermöglichen eine visuelle Verortung von Oberflächendetails (z.B. Risse) und deren hochgenaue Vermessung (siehe Abbildung 9).

5.3.3 Methodik

Mit Bezug auf die Aufnahmemethode können folgende zwei Verfahren unterschieden werden:

- Stop & Go Verfahren: Derartige Systeme messen stationär Segmente im Tunnel. Die Einzelaufnahmen werden in einer nachfolgenden Prozessierung aneinandergereiht.
- Kinematische Systeme: Aufnahme des Tunnels in einer kontinuierlichen (Vorwärts-) Bewegung.

5.3.3.1 Stop & Go

Beim „Stop & Go“-Verfahren wird das Aufnahmegerät an einer Messposition positioniert, von der aus die Tunneloberfläche mit einer hohen geometrischen Auflösung mittels Laser erfasst wird. Die Aufnahmeposition wird durch eine externe Einmessung (z.B. automatisierte Totalstation) oder Passpunkte an der Oberfläche ermittelt, wodurch die einzelnen Scans hochgenau georeferenziert werden können. Beispielhaft sind Anwendungen der Dibit Messtechnik GmbH zu nennen, deren Scangeschwindigkeit bei einem hybriden Stop & Go System auf etwa 250 m pro Stunde begrenzt ist.

Diese Scanmethode kann auch unter Verkehr durchgeführt werden. Hierzu muss der Tunnel jedoch teilgesperrt werden. Falls Scans durch Autos beeinträchtigt werden, müssen diese zudem wiederholt werden.

5.3.3.2 Kinematische Systeme

„Kinematische Systeme“ zur Tunnelinspektion ermöglichen nach derzeitigem Stand der Technik kontinuierliche Scans mit einer Messgeschwindigkeit zwischen 1-4 km/h. Die Systeme sind auf fahrbaren Trägerplattformen verbaut und variabel für den Straßen- und Schieneneinsatz einzusetzen. Bei den Systemen nehmen Laser und/oder Kameras die Tunneloberfläche kontinuierlich auf. Die Fotos werden in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit nach (vorab) definierten Abständen ausgelöst. Bezugspunkt für die Messungen sind Achsen bzw. Trajektorien im Tunnel. Die Referenzierung der Aufnahme erfolgt über die Achse bzw. über externe Passpunkte. Zusätzlich fließen zur Positionsbestimmung Strecken- und Neigungsmessungen durch Hodometer und IMU (Inertial Measurement Unit) - Sensoren ein.

Die Durchführung kinematischer Messungen erfordert eine Vollsperrung der Tunnel bzw. kann auch in Betriebspausen durchgeführt werden.

Als Anwender kinematischer Systeme speziell für Tunnelanwendungen seien hier unter anderem die Firmen SPACETEC Datengewinnung GmbH (Freiburg, Deutschland), terra vermessungen ag (Zürich, Schweiz) und Dibit Messtechnik GmbH (Innsbruck, Österreich) genannt, deren Scansysteme in Eigenregie entwickelt wurden.

In geringem Umfang werden von verschiedenen Messsystemherstellern auch Komplettsysteme angeboten. Diese bestehen aus mehreren Laserscannern und Digitalkameras und werden auf Autodächern bzw. Schienenfahrzeugen befestigt. Messplattformen wie „Leica Pegasus: Two Mobile Sensor Platform“ und „RIEGL VMX-2HA“ sind bereits zum Scannen von Straßen- und Bahninfrastrukturen im Einsatz (z.B. Topcon Deutschland Positioning

GmbH, Hamburg, Deutschland; Getmapping, Hampshire, UK, etc.). Sie erreichen geometrische Genauigkeiten bis zu 5x5 mm und Fotoauflösungen von ca. 3x3 mm. Die verwendeten Weitwinkelkameras sind aufgrund ihrer Lichtstärke und optischen Parametern jedoch nicht für den Betrieb in dunklen Tunnelbauwerken konzipiert, wo eine externe Leuchtquelle unerlässlich ist.

Im Folgenden werden unterschiedliche kinematische Aufnahmesystem vorgestellt:

Das SPACETEC TS2 wird überwiegend manuell geschoben. Es ist für den Schieneneinsatz optimiert und kann auf Wunsch auch mit einem elektrischen Motorantrieb versehen werden (siehe Abbildung 4 links). Das Dibit LSC 4100-SRMF2 ist für den Einsatz auf Straße und Gleis konfigurierbar (siehe Abbildung 4 rechts) und wird ebenfalls geschoben. Es erreicht eine geometrische Genauigkeit von 10 x 10 mm und Fotoauflösungen von bis zu 1x1 mm. Beide Systeme erreichen Schrittgeschwindigkeiten bis zu 4 km/h.



Abbildung 4: Links: Das hybride, kinematische System SPACETEC TS2 während eines Tunnelscans. Das Messsystem mit zwei Aufnahmekanälen scannt simultan Geometrie- und Foto-daten. Quelle: www.spacotec.de

Rechts: Das hybride, kinematische Messsystem Dibit LSC 4100-SRMF2 im Einsatz. Vorne befindet sich die Lasereinheit, welche kontinuierlich die Geometrie des Tunnels misst. Dahinter sind die Kameras, die wegbezogene Aufnahmen der Tunneloberfläche nehmen. Quelle: www.dibit.at

Der motorisierte, fahrzeuggebundene Tunnelscan wird ebenfalls in einem Geschwindigkeitsbereich von rd. 4 km/h durchgeführt. In diesem Bereich werden bei der Rotationsgeschwindigkeit der aktuellen Laserscanner (z.B. Riegl VUX-Serie mit 200-250 Linien pro Sekunde) annehmbare Punktabstände im unteren mm-Bereich erreicht, mit denen eine Fototexturierung des 3D-Modells gute Ergebnisse liefert. Das System SPACETEC TS3 liefert bei einer Geschwindigkeit von 4 km/h gleichzeitig geometrische, fototechnische und ther-

mografische Informationen der Tunnelaibung. Zweiwegefahrzeuge als Trägerplattform ermöglichen die 3D-Messungen sowohl auf der Straße als auch auf Eisenbahngleisen (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Links: Das SPACETEC TS3 auf einem Zweiwegefahrzeug montiert.

Quelle: www.spacetec.de

Rechts: Die Messplattform „Leica Pegasus:Two“ installiert auf einem Auto.

Quelle: <https://leica-geosystems.com>

Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt die Punktdichte der Lasermessungen an der Oberfläche jedoch stark ab. Daher weisen Komplettsysteme wie das oben beschriebenen „RIEGL VMX-2HA“ zwei VUX Laserscanner und 500 Linien pro Sekunde auf [17]. Die beiden Scanner sind in einem leichten Winkel verkippt gegeneinander angeordnet, damit auch einspringende Formen wie Buchten vermessen werden können (siehe Abbildung 5). Die Messplattformen „Leica Pegasus: Two“ erreicht 1 Mio. Datenpunkte pro Sekunde. Die Fahrgeschwindigkeit wird mit 40 km/h beziffert. Die Messplattformen „Leica Pegasus: Two-Ultimate“ erreicht auf eine Entfernung von 10m Fotoauflösungen bis ca. 3 mm [18]. Beide Systeme sind jedoch nicht für den Einsatz im Tunnel zu nutzen, da die integrierten Kameras aufgrund einer fehlenden Beleuchtung verschwommene bzw. dunkle Fotos liefern.

5.3.4 Genauigkeiten bei Tunnelscans

Der Begriff „Genauigkeit“ beschreibt die geometrische Genauigkeit des Tunnelscans. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen:

Absolute Genauigkeit

Die absolute Genauigkeit beschreibt die 3D-Genauigkeit eines Messpunktes, d.h. die Punktlagegenauigkeit betreffend xyz-Koordinaten in einem übergeordneten Koordinaten- bzw. Projektkoordinatensystem (siehe Abbildung 6). Der angegebene Wert ist ein Vektor im xyz-Bezugssystem. Die absolute Genauigkeit wird in mm angegeben.

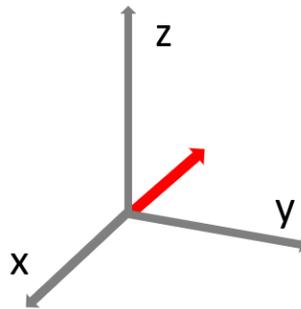


Abbildung 6: Schematische Darstellung der absoluten Genauigkeit im xyz-Koordinatensystem.

Relative Genauigkeit

Die relative Genauigkeit beschreibt die 2D-Genauigkeit und wird auch als „Profilgenauigkeit“ bezeichnet. Die Profilgenauigkeit („Ovalität“) ist ein Maß für die Abweichung der Geometrie zwischen zwei oder mehreren Messungen, die einen Profilschnitt im Tunnel erheben (siehe Abbildung 7). Als Bezugskordinaten dienen sbr-Werte (Station, Bogenlänge, Radius). Die relative Genauigkeit wird in mm angegeben.

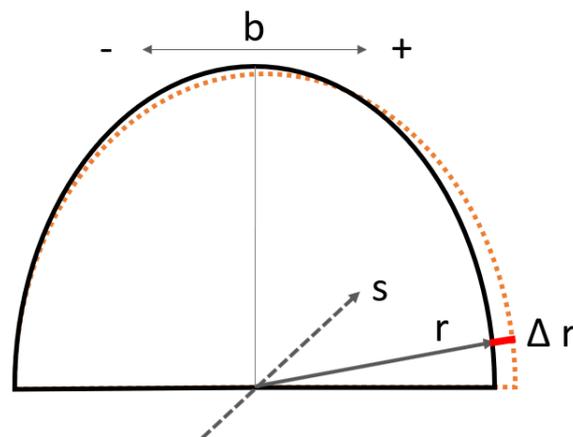


Abbildung 7: Schematische Darstellung der relativen Genauigkeit (delta r) in einem Tunnelprofilschnitt.

Laterale Genauigkeit

Die laterale Genauigkeit beschreibt die Abweichung der Pixellage von Fototexturen unterschiedlicher Aufnahmen nachdem diese übereinandergelegt (gematched) wurden (siehe Abbildung 8). Die Pixelgenauigkeit entspricht einem sb-Oberflächenpunkt (Station, Bogenlänge). Die laterale Genauigkeit wird in „Pixel“ angegeben und ändert sich entsprechend der vorliegenden Pixelgröße.

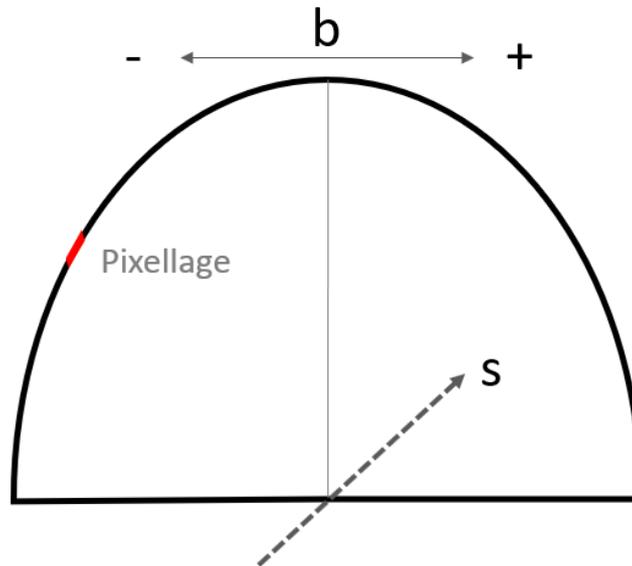


Abbildung 8: Schematische Darstellung der lateralen Genauigkeit (Pixellage) in einem Tunnelprofilschnitt.

5.3.5 Auflösungen bei Tunnelscans

Bei dem Tunnelscan sind folgende Auflösungen maßgeblich:

Sensorauflösung

Lasersysteme: Die Sensorauflösung beschreibt das Winkelinkrement und somit die Anzahl der Messpunkte pro Umlauf. Die Angabe erfolgt in Bildpunkte pro Zeile bzw. Fächer.

Fotosysteme: Die Sensorauflösung beschreibt die Anzahl der Bildpunkte auf dem Sensor. Die Angabe erfolgt in „Mega Pixel“.

Auflösung an der Tunneloberfläche

Die Auflösung an der Tunneloberfläche beschreibt die Größe des Punktrasters an der Tunneloberfläche. Die Angabe erfolgt in Millimeter.

Radiometrische Auflösung

Die radiometrische Auflösung ist ein Maß für die vom Bildsensor erfassbaren Helligkeitsverhältnisse des aufgenommenen Objekts. Sie wird in Form einer Ratio vom geringsten zum höchsten Wert angegeben (z.B. 1:1000). Dies bedeutet, dass der hellste Wert 1000-mal heller ist als der dunkelste.

5.3.6 Ergebnisse von Tunnelscans

Moderne Tunnelscanner Systeme liefern folgende Ergebnisse:

3D-Modell

Photogrammetrische und hybride Systeme erzeugen farbechte, texturierte 3D-Modelle. Bei Laserscannern liegen die 3D-Daten in Grauwerten vor (Intensitätsbilder).

Tunnel-Datenbank/Tunnelinformationssystem

In Tunnel-Datenbanken werden strukturiert 3D-Modelle und Tunnelanalysen abgelegt und verwaltet (siehe [Abbildung 9](#)). Schadstellen (Risse, Abplatzungen, Wasserzutritte etc.) und Erhebungen zum Tunnelbestand (Einbauten, Licht, Kabel, Blockfugen etc.) werden kategorisiert und nach Wunsch quantifiziert (z.B. Risslängen, Flächen von Versinterungen, Anzahl an Bauteilen).

Plots/Dokumente

Aus der Datenbank kann eine Vielzahl von Dokumenten und Informationen ausgelesen werden: Orthobilder, Profilschnitte, Lichtraumkontrollen, Bestandspläne, Zustandspläne, Schadensberichte u.v.m.

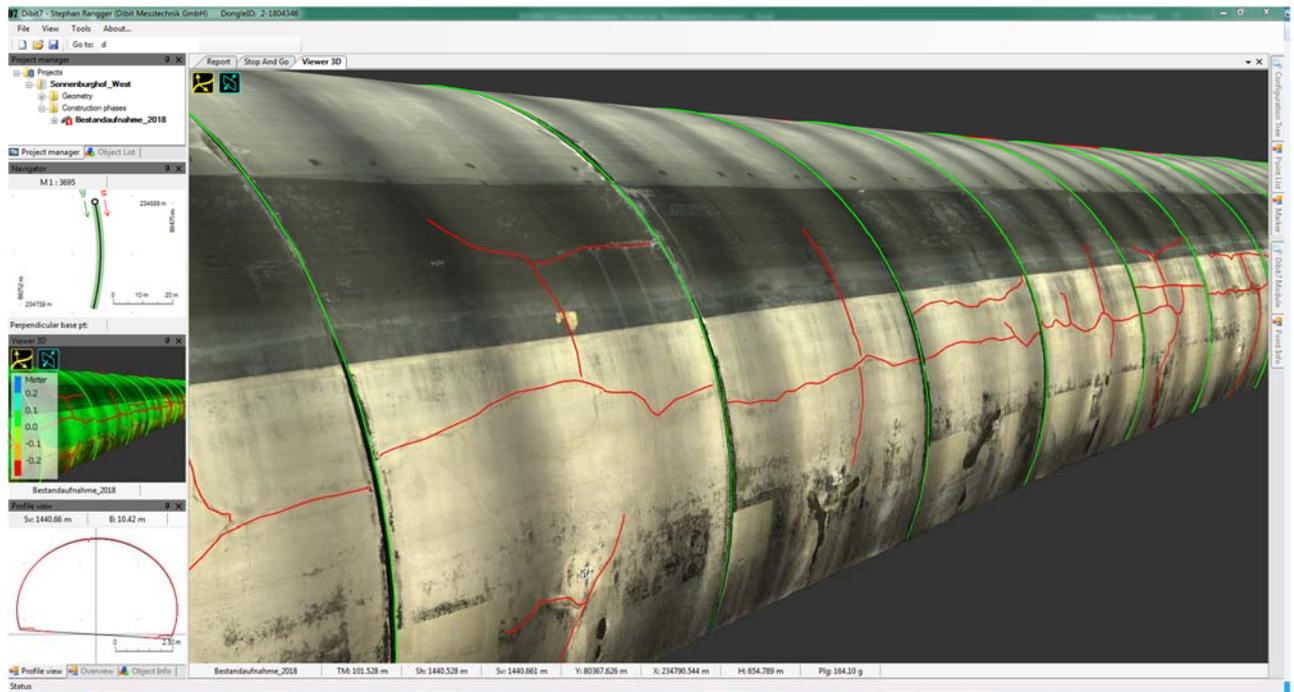


Abbildung 9: Auswertung von Rissbildern im Tunnelinformationssystem der Dibat Messtechnik GmbH. Die Aufnahme zeigten Rissbildungen über 0,3 mm Weite verlässlich an. Auf der linken Seite wird in Falschfarben die Differenz der Tunnelgeometrie zwischen der aktuellen Messung und einer vorherigen Messung, bzw. Soll-Geometrie angezeigt. Darunter werden Informationen zum Profilschnitt des Tunnels visualisiert.

5.3.7 Stand der Technik beim Tunnelscan

Das vorliegende Kapitel beschreibt, welche Genauigkeiten, Auflösungen und Geschwindigkeiten derzeit beim Tunnelscanning erzielt werden können und wie der prinzipielle Ablauf eines Tunnelscans aussieht.

Erreichbare Genauigkeiten

Folgende Genauigkeiten werden derzeit erzielt (vgl. [Kapitel 5.3.4](#)):

Tabelle 2: Erreichbare Genauigkeiten beim Tunnelscan

Kategorie	Laser	Foto	Hybrid
absolut	5 mm	5 mm	5 mm
relativ	3 mm	5 mm	3 mm
lateral	5 mm	1 mm	1 mm

Erreichbare Auflösungen

Folgende Auflösungen werden derzeit erzielt (vgl. [Kapitel 5.3.5](#)):

Tabelle 3: Erreichbare Auflösungen beim Tunnelscan

Kategorie	Laser	Foto	Hybrid
Sensor	10.000 (Pixel pro Zeile)	10-40 MP	10-40 MP
Oberfläche	3 mm	1 mm	1 mm
radiometrisch	1:256 (in Grauwerten)	1:1000 (je Farbkanal)	1:1000 (je Farbkanal)

Erreichbare Geschwindigkeiten

Folgende Geschwindigkeiten können derzeit erzielt werden (vgl. [Kapitel 5.3.3](#)):

Tabelle 4: Erreichbare Geschwindigkeiten beim Tunnelscan

Kategorie	Laser	Foto	Hybrid
Stop & Go	0,2 km/h	0,1 km/h	0,1 km/h
kinematisch	3–4 km/h	5 km/h	5 km/h

5.3.7.1 Befragungen der Tunnelbetreiber bez. dem Stand der Technik

Experteninterviews und Literaturrecherchen haben den aktuellen Stand der Tunnelvermessung bei ÖBB und ASFiNAG aufgezeigt. Aus den Ergebnissen wurden die Anforderung an die Daten und Aufnahmemethoden der Zukunft abgeleitet.

Tabelle 5 basiert auf einem Experteninterview mit den ÖBB. Der Hauptauftragnehmer der ÖBB, dessen Systeme als Referenz herangezogen wurden, ist SPACETEC Datengewinnung GmbH aus Freiburg, Deutschland.

Tabelle 5: Gegenüberstellung vom aktuellen Stand der Technik und den gewünschten, zukünftigen Anforderungen an die Tunnelscans bei der ÖBB.

Aktueller Stand der Technik bei der ÖBB	Zukünftige Anforderungen
Bilder werden in Grauwerten dargestellt	Darstellung der Ergebnisdaten in Echtfarben
Automatische Markierung von Oberflächenänderungen (Kasten)	Vollautomatische Erkennung, Auswahl und Klassifikation von Rissen; Einbindung von Ansätzen aus Artificial Intelligence, machine learning und neuronalen Netzwerken
Vermerkung von Rissen	Messung der Rissbreiten
Risse > 0,3 mm bei Betoninnenschalen werden halbautomatisch erkannt und manuell eingezeichnet	Risse < 0,3 mm bei Betoninnenschalen werden automatisch erkannt und eingetragen
Scangeschwindigkeit etwa 0,25 - 4 km/h	Scangeschwindigkeit >> 20 - 80 km/h
Verwendung eines örtlichen Referenzsystems	Verwendung eines globalen Referenzsystems
Datenformat der Firma Spacetec: Software „Tunnelinspector“	Modulare Systemstruktur mit eindeutigen/offenen Schnittstellen.
Es gibt einen Austausch von Informationen von/zu BIM (derzeit jedoch international noch kein einheitlicher Standard vorhanden)	Verwendung von BIM in Tunnelbauwerken (Entwicklung eines einheitlichen, internationalen BIM Standards für Tunnelbauwerke)
Thermografie wird teilweise angewendet	<ul style="list-style-type: none"> • Einbindung zusätzlicher Raum- und geophysikalischen Daten: Georadar, Drainagebefahrungen, Thermografie, Multispektraldaten • Verknüpfung mit weiteren Daten wie z.B. Protokollen, Detailfotos etc.
Lichtraumanalyse wird durchgeführt, das Lichtraumprofil kann beliebig definiert werden	
Gleisbezogen Aufnahme	

Tabelle 6 basiert auf den Erfahrungen des Hauptauftragnehmers der ASFINAG, der Dibit Messtechnik GmbH, Innsbruck, Österreich.

Tabelle 6: Gegenüberstellung vom aktuellen Stand der Technik und den gewünschten, zukünftigen Anforderungen an die Tunnelscans bei der ASFINAG

Aktueller Stand der Technik bei der ASFINAG	Zukünftige Anforderungen
Darstellung der Ergebnisdaten in Echtfarben	
Halbautomatische Markierung von Oberflächenänderungen	Automatische Erkennung, Auswahl und Klassifikation von Rissen
Messung der Rissbreiten	
Risse $\geq 0,3$ mm bei Betoninnenschalen werden halbautomatisch erkannt und manuell eingezeichnet	Risse $< 0,3$ mm bei Betoninnenschalen werden automatisch erkannt und eingetragen
Scangeschwindigkeit etwa 0,25 - 4 km/h	Scangeschwindigkeit $\gg 20 - 80$ km/h
Verwendung eines globalen Referenzsystems	
Datenformat der Firma Dibit	Offene Datenformate
Verwendung der strukturierten Datenbank „Dibit TIS“ (Tunnel Information System)	
<ul style="list-style-type: none"> • Einbindung von zusätzlichen Raum- und geophysikalischen Daten: Georadar, Drainagebefahrungen, Thermografie, Multispektraldaten ist möglich • Verknüpfung mit weiteren Daten, wie Protokollen, Detailfotos, etc. ist möglich 	

5.3.7.2 Zusammenfassung zu den Expertenbefragungen

Die Erhebungen haben gezeigt, dass seitens der Auftraggeber der Wunsch nach einem möglichst realitätsnahen Aufnahme- und Analyseumfeld, bei dem Eigenschaften der Tunneloberfläche visuell erkannt werden können, besteht. Dies setzt hohe Anforderungen bezüglich der Qualität der farbechten Fototextur voraus, da bei Betoninnenschalen auch feinste Rissbildungen unter 0,3 mm Breite erkannt werden sollen.

Auch wurde das Bestreben nach einer (semi-)automatischen Vorerkennung von Oberflächenveränderungen zwischen verschiedenen Messepochen hervorgehoben. Sonderlösungen der Firmen SPACETEC, Terra und Dibit zur (semi-)automatischen Risserkennung können Abbildung 12 entnommen werden. Derartige Ansätze erleichtern maßgeblich die Erkennung, Klassifizierung und spätere Analyse von Schadstellen.

In diesem Kontext sei angemerkt, dass Rissbildungen nicht nur in ihrer Längserstreckung vermessen werden, sondern in zukünftigen Anwendungen auch Messungen der Rissbreiten und deren statistische Auswertung möglich sein sollen. Bevorzugt sind hier selbstlernende Algorithmen und Methoden der AI (Artificial Intelligence) genannt, die pixelbasierte Änderungen zwischen Aufnahmen von unterschiedlichen Zeitpunkten detektieren. In einem ersten Ansatz werden veränderte Bereiche der Tunneloberfläche für eine weitergehende manuelle Analyse markiert (z.B. mittels Falschfarbendarstellungen). In einem zweiten Entwicklungsschritt sollen maßgebliche Schädigungen wie Risse, Abplatzungen etc. automatisch erkannt, kategorisiert, vermessen und strukturiert abgelegt werden. Dafür müssen in die Software selbstlernende Algorithmen implementiert werden, die mit steigender Anzahl an Trainingsdaten immer genauere und besser nachvollziehbare Analyseergebnisse liefern. Hier sind auch statistische Darstellungsmethoden wie Potentialfeldanalysen, Scatterdiagramme etc. angedacht, die über das räumlich-zeitliche Auftreten von Schädigungen Aufschluss geben.

Eine wichtige Forderung an Tunnelscanning ist eine höhere Aufnahmegeschwindigkeit, um Tunnelsperrzeiten zu minimieren und den Scan effizienter zu gestalten. Hierfür befinden sich photogrammetrische 3D-Systeme in Entwicklung, die bei Geschwindigkeiten bis zu 100 km/h betrieben werden können und somit auch Messungen in praktisch nicht schließbaren Tunnelsystemen wie z.B. U-Bahnen ermöglichen.

Die Datenfusion von geometrischen, optischen, spektralen und weiteren Daten wird als ein wichtiger Faktor bei der Tunnelüberwachung erachtet. Hierzu zählen u. a. Georadarmessungen und thermografische Aufnahmen, die Aufschlüsse zu Materialschädigungen geben können (z.B. wasserführende Risse; siehe [Abbildung 10](#)) oder multispektrale Aufnahmen, die Veränderungen bei Materialeigenschaften verdeutlichen können (z.B. Kalkausblühungen an Rissen). Auch eine geometrische Verknüpfung zu händischen Kontrollaufzeichnungen und Dokumentationsmaterialien ist wünschenswert.

Dies leitet weiter zur Implementierung eines BIM (Building Information Modelling) für Tunnelbauwerke. Hierfür gibt es noch keinen einheitlichen internationalen Standard. Es ist jedoch davon auszugehen, dass BIM-Systeme mittelfristig auch im Tunnelbau etabliert werden. Hierzu sind jedoch noch grundsätzliche Standards zu definieren und ein rechtliches Rahmenwerk zu etablieren. BIM ermöglicht ein synchrones, effizientes und transparentes Bearbeiten von Projekten seitens aller beteiligten Akteure über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks.

Grundvoraussetzung für die Nutzung eines BIM bei Tunnelbauwerken ist jedoch die Erstellung eines geeigneten Workflows sowie der Definition entsprechender Softwarestandards und Datenformate.

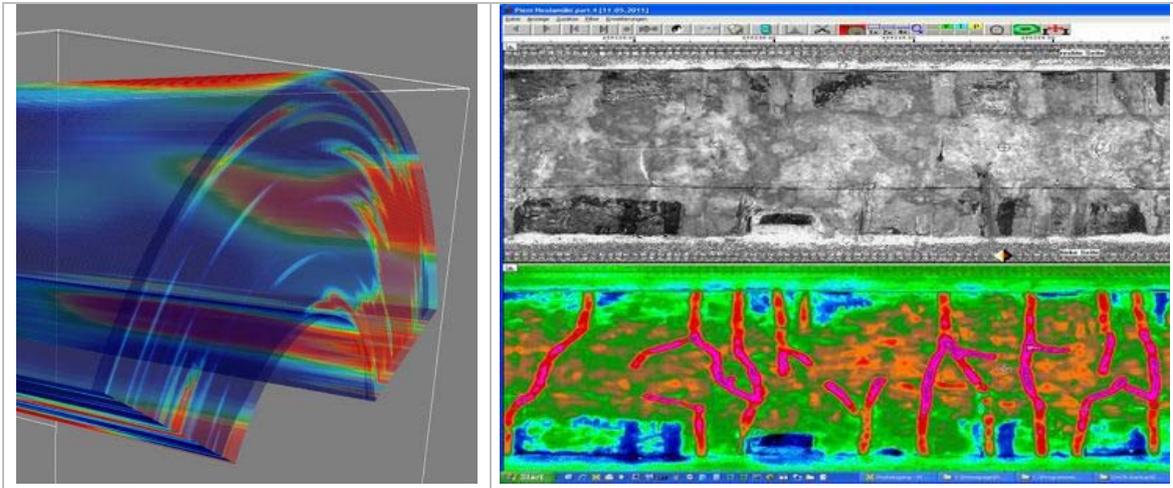


Abbildung 10: Links: Georadarmessungen von Betoninnenschalen am Beispiel einer Tunnelfirste (Quelle: www.3dgeoimaging.com). [19] Rechts: Vergleich von Geometriedaten (oben) und Thermografiedaten (unten) im Tunnel-Inspector der Firma SPACETEC (Quelle: www.spacetec.de/tunnel-inspector).

Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf ergibt sich bei nachfolgenden Themen:

- Automatische Detektion und Vermessung von Oberflächencharakteristiken
- Hochgeschwindigkeits-3D-Vermessung
- BIM, Data Warehousing, Datenformate

5.3.7.3 Derzeitiger Ablauf eines Tunnelscans

Ein Tunnelscan besteht aus folgenden Schritten (siehe Tabelle 7):

Tabelle 7: Prozessschritte zur Durchführung eines Tunnelscans.

Hauptschritte	Einzelsschritte (zusätzliche Aspekte)
Datenaufnahme	<ul style="list-style-type: none"> • Tunnelsperrungen (Organisation, Beeinträchtigungen) • Georeferenzierung (Passpunkte, Aufnahmetrajektorien) • Tunnelscanning (Aufnahmeprinzip, Geschwindigkeit)
Datenrohverarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • Geometrieerstellung (Laserscan, Fotogrammetrie) • Fototextur (aus Fotogrammetrie, hybride Systeme)
Datenanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Risserkennung (Messung in der „virtuellen Umgebung“) • Deformationsanalyse (Geologie, Bauwerksalterung, Schäden) • Volumenberechnung (Betonschichten, Über- / Unterprofile) • Querschnittskontrolle (Lichtraumprofil, Profilschnitte) • u.v.m.
Datenverwaltung	Strukturierte Ablage (zentrale Datenquelle, BIM, Datenstandard)

Je nach Aufgabenstellung werden Tunnelneubauten in mehreren Bauphasen aufgenommen (Rohausbruch, Spritzbeton, Abdichtungsuntergrund, Innenschale) bzw. Bestandsaufnahmen von (bestehenden) Tunnel in mehreren Epochen durchgeführt (Mängelerkennung, Monitoring, Sanierung). Alle Tunneldaten sind georeferenziert und lassen sich räumlich und zeitlich vergleichen.

Datenaufnahme: Im Vorfeld einer Tunnelprüfung sind Planungen bez. Tunnelschließung und Umleitung des Verkehrs durchzuführen. Aufgrund des Anspruchs einer hohen Streckenverfügbarkeit ist darauf zu achten, die für die Durchführung des Tunnelscans benötigte Zeit so kurz wie möglich zu halten. Bei Straßentunneln werden die Tunnel aufgrund des geringeren Verkehrsaufkommens zumeist in der Nacht bzw. teilweise gesperrt (nur ein Fahrstreifen oder eine Tunnelröhre). Bei Eisenbahntunnel sind Sperren üblicherweise lang im Voraus zu planen, sofern der jeweilige Fahrplan keine ausreichenden Zeitfenster ermöglicht. Mitunter werden Tunnelsperren auch für andere Erhaltungsarbeiten genutzt (z.B. Kleinsanierungen, Tunnelwäschen). Die engen Zeitfenster für die Messungen sind daher mit den Tunnelbetreibern oder weiteren Zwischenfirmen zu koordinieren.

Georeferenzierung: Für die Georeferenzierung der Messdaten wird entweder ein bestehendes Netz von Festpunkten vom Betreiber zur Verfügung gestellt oder eigene Festpunkte vermessen, deren bekannte Lage es ermöglicht, die späteren Messungen lokal oder in einem übergeordneten Koordinatensystem zu verorten (Geo-Referenzierung).

Von den eingemessenen Punkten werden Polygonzüge durch den Tunnel konstruiert, die die späteren Messpositionen der 3D-Aufnahmen definieren. Für kinematische Systeme wird der Anfangs- und Endpunkt der Wegtrajektorie bestimmt. Die Lagebestimmung auf dieser Achse geschieht weggesteuert mit Hilfe von Hodometern, Kompassen und Beschleunigungsmessern (IMU-Einheiten).

Ziel der Positionsbestimmungen ist es, die segmentweise aufgenommenen 3D-Messungen (Laser) bzw. Fotoinformationen möglichst fehlerfrei miteinander abzustimmen (matching).

Für ausschließlich photogrammetrische Berechnungen werden entweder Festpunkte an der Tunnellaibung benötigt, mit denen das 3D-Modell in ein übergeordnetes Koordinatensystem referenziert werden kann oder das 3D-Modell wird auf eine vorherige Messung desselben Tunnels gematcht.

Tunnelscanning: „Stop & Go“-Systeme werden etwa alle 5 m (abhängig vom Tunneldurchmesser) entlang der Tunnelachse für einen Scan platziert. Die Einheiten besitzen Panoramascanner, die die Tunnelinnenseite in einer Rotationsbewegung vermessen. Bei hybriden Systemen werden gleichzeitig an definierten Positionen Fotos (mit Blitzunterstützung) aufgenommen, mit deren Hilfe das 3D-Modell später vollflächig texturiert wird. Der Messvorgang dauert mit Bestimmung der Messposition durch die Totalstation in etwa 2 Minuten. Es werden hierfür zwei Personen benötigt. Eine schiebt die Messeinheit, die andere betreut die Totalstation(en) für die Positionsbestimmung und kümmert sich um sicherheitsrelevante Aspekte.

„Kinematische Systeme“ werden in Schrittgeschwindigkeit kontinuierlich entlang der Tunnelachse geschoben. Der Zeilenlaser misst zeilenförmig die 3D-Geometrie. Bei hybriden Systemen werden zusätzlich Kameras weggesteuert ausgelöst und nehmen die gesamte Tunnellaibung und Teile der Fahrbahn bzw. des Gleisbetts auf.

Hybride „kinematische Systeme“ sind mit einem oder mehreren Lasern und zumeist mehreren Digitalkameras ausgerüstet. Der Laserscan erfolgt kontinuierlich wohingegen die Fotoauslösung nach definierten Wegstrecken, abhängig von der Geschwindigkeit, erfolgt. Auf freien Straßen und Gleisstrecken erfolgt die Positionsbestimmung zur Georeferenzierung mittels GPS-Sensoren. Bei Tunnelmessungen müssen die 3D-Messungen mit bestehenden Passpunkten in Kombination mit einer eigenen Wegmessung per Hodometer und/oder IMU-Einheit georeferenziert werden.

Die beschriebenen Systeme sind sowohl für Straßen- als auch für Bahntunnel einsetzbar. In Bahntunneln werden sie auf entsprechenden Schienenfahrzeugen befestigt (siehe Abbildung 11). Durch die gleisgebundene Spurführung ist die Messposition der Scanner genauer als bei Straßentunnel. Somit ist auch der Aufwand für die Prozessierung der Daten und deren Georeferenzierung geringer. Derzeit sind Messgeschwindigkeiten von etwa 1-4 km/h Stand der Technik für die Tunnelinspektion. Bei höheren Geschwindigkeiten nehmen bei laserbasierten Messsystemen die Punktdichte und Oberflächenauflösung ab, was geometrische Messungen erschwert. Zukünftige photogrammetrische Hochgeschwindigkeits-systemen ermöglichen wesentlich höhere Geschwindigkeiten (siehe Kapitel 5.3.8.1). Trotz der hohen Geschwindigkeit werden geometrische Genauigkeiten von 5 mm erzielt sowie eine Fotoauflösung an der Tunneloberfläche unter 1 mm, wodurch Risse von 0,3 mm erkannt werden können. Dies erfüllt somit die Anforderungen, die aktuell an eine Zustandserfassung gestellt werden.

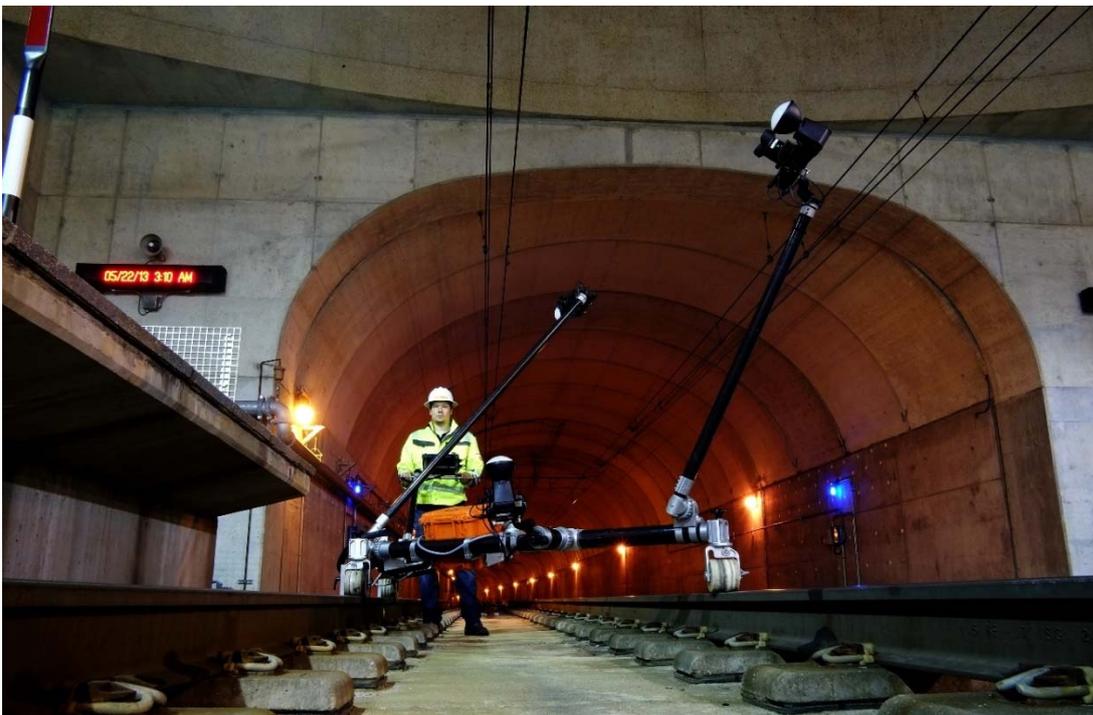


Abbildung 11: Gleisgebundenes 3D-Messsystem der Dibat Messtechnik GmbH. Einsatz in der U-Bahn in St. Louis, USA.

Datenrohverarbeitung: Die Messfotos werden entweder zur Texturierung bekannter Tunnelgeometrien verwendet oder zur Berechnung von 3D-Modellen. Bei den derzeitigen Verfahren „Stop & Go“ und den „hybriden kinematischen Systemen“ werden die Oberflächengeometrie mit Hilfe eines 3D-Lasers gemessen. Die Digitalfotos werden in einer Vermessungssoftware auf die 3D-Geometrie projiziert. Die texturierten Daten können im Folgenden

als Tunnelabwicklung in der 2D-Projektion betrachtet und als Grundlage für Messungen verwendet sowie in einem speziellen 3D-Viewer visualisiert werden.

Die Daten des photogrammetrischen „Hochgeschwindigkeits-Messsystems“ dienen entweder der fotogrammetrischen 3D-Rekonstruktion des Tunnels oder der Texturierung eines 3D-Modells.

Datenanalyse: Die 3D-Daten dienen als Grundlage zur Vermessung der Tunnelbauten sowie dem Vergleich mehrerer Bauepochen. Auf der texturierten Fotooberfläche lassen sich Strukturmerkmale (z.B. Risse) lokalisieren und vermerken. Terra Vermessung, SPACETEC und Dibit Messtechnik GmbH besitzen hierfür Software Tools, die Risse (semi-)automatisch verfolgen. Dies geschieht entweder auf Basis einer Bestimmung von Start- und Endpunkt eines Risses oder durch pixelbasierte Änderungen auf der Fototextur der 3D-Modelle. Mit diesen lassen sich Risse in Bahn- und Straßentunneln vermessen (siehe Abbildung 12). Im wissenschaftlichen Fokus stehen auch Ansätze der „Artificial Intelligence“ und „neuronalen Netzwerke“, mit deren Hilfe sich Algorithmen entwickeln lassen, die selbstlernend Strukturen erkennen und klassifizieren können (siehe Kapitel 5.3.8.2).

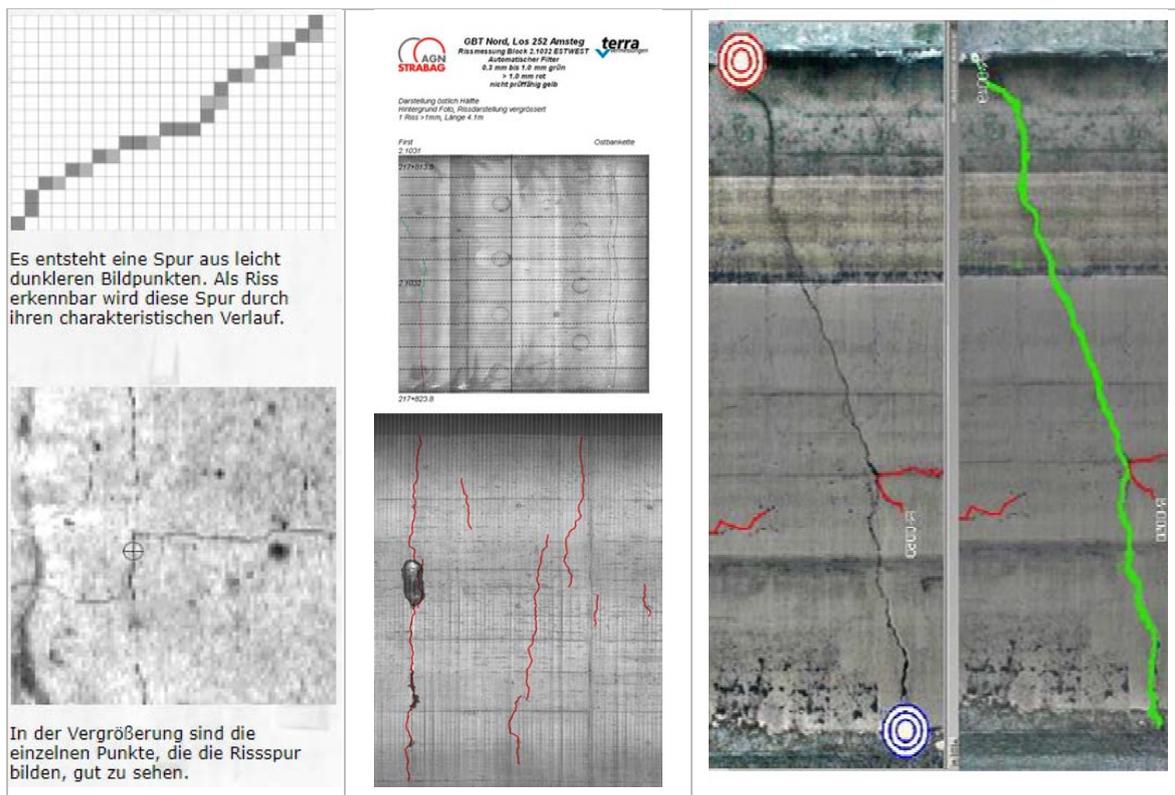


Abbildung 12: Software Tools zur (semi-)automatischen Vermessung von Rissen in Betonstrukturen. Links: pixelbasierter Ansatz von SPACETEC (Quelle: www.spacetec.de/risserkennung). Mitte: Risserhebung von Terra mittels „tCrack“ (Quelle: <http://www.terra.ch/en/crack-detection>). Rechts: (Semi-)automatische Risserkennung von Dibit (Quelle: Dibit Messtechnik GmbH).

Generell lassen sich Strukturen auch manuell vermessen, indem Polylinien auf der Foto-textur nachgezeichnet werden. Rissstrukturen werden als offene Polylinien definiert, wohingegen Flächen (z.B. Sinterbildungen, feuchte Bereiche) als geschlossene Polylinien gespeichert werden. Weiterhin können punktuell Strukturen markiert werden und mit externen Daten verknüpft werden (z.B. PDF-Messberichte, Zeichnungen u.v.m.).

Durch den Vergleich von Daten aus verschiedenen Zeitpunkten (Epochen) lässt sich die zeitliche- und räumliche Entwicklung von Schadstellen als Basis für die Zustandsbewertung oder Planung von Instandsetzungen analysieren. Dazu muss eine laterale Genauigkeit auf der Fotooberfläche im Pixelbereich gegeben sein.

Datenverwaltung: Die vermessenen Strukturen werden mit ihrer Position und einer Vielzahl wählbarer Parameter in einer zentralen Datenbank gespeichert. Diese ermöglicht es, Geometriedaten und thematisch assoziierte Dateien anderer Sensoren (Thermalbilder, Prüfberichte, Fotos etc.) räumlich zu verknüpfen und Strukturen auszumessen. Die vermessenen Strukturdaten können in gängige CAD- und GIS-Dateien exportiert werden und somit zur Basis für Dokumentationen und Planungen von Tunnelbaumaßnahmen fungieren.

Die Vermessungsdaten sind umfangreich, da sie hochauflösende Informationen zur Geometrie und Fotooberfläche der Tunnel aufweisen sowie ggf. weitere klassifizierte Objekte und verknüpfte Datenformate beinhalten. Mit steigender Tunnellänge wachsen die Datenmengen stark an, womit sich für durchschnittliche Projekte je nach Scanauflösung Datenvolumina von wenigen GB bis zu mehreren hundert GB ergeben können. Als groben Richtwert kann man etwa 30 MB für einen Tunnelmeter ansetzen. Je nach Umfang von vermessenen Strukturdaten und zusätzlichen Datenquellen kann dieser Wert jedoch auch stark ansteigen.

Trotz ihrer Komplexität sind die Daten von Anwendern (z.B. Netzbetreibern) generell gut handhabbar. Gängige Softwarelösungen ermöglichen es, selbst lange Tunnelsysteme (>> 10 km) schnell und effizient virtuell zu begutachten.

5.3.8 Erwartungen bzw. Anforderungen an zukünftige Tunnelscanner Systeme

Die Zukunft der Tunnelscans geht in Richtung Hochgeschwindigkeits-Messsystem in Kombination mit einer effizienten, automatisierten Kette zur 3D-Modell-Erstellung und Datenanalyse. Weiters werden neue Sensoren implementiert, die zusätzlich zu den 3D- und Fotodaten Informationen über Temperaturverläufe und Materialausprägungen an der Tunnelwand erheben. Auch werden die Softwarelösungen zunehmend den Charakter von BIM-Anwendungen (Building Information Modelling) bekommen, um ein effizientes Bearbeiten

von Tunnelprojekten und einen leichten Datenaustausch per allgemeiner Datenformate zu ermöglichen. Tabelle 8 zeigt die derzeitigen Hauptanforderungen an den zukünftigen Tunnelscan.

Tabelle 8: Hauptanforderungen an den zukünftigen Tunnelscan.

Thematik	Anforderung
Auflösung	Submillimeter auf der Oberfläche (mittels Photogrammetrie)
Geschwindigkeit	Bis zu 100 km/h (mittels Photogrammetrie)
Erweiterte Sensorik	Multispektraldaten: <ul style="list-style-type: none"> • Materialerkennung • Thermographie Time of Flight Sensoren
Software	Allgemeines Datenaustauschformat (ASCII, LAS, OBJ, etc.) Offenes Tunnelinformationssystem Automatisches Erkennen von Schädigungen Statistische Auswertungen der Tunnelattribute Schnittstellen zu BIM Serverlösungen / Hosting

5.3.8.1 Hardware

Hardwareseitig sollen zukünftige Tunnelmesssysteme so modifiziert werden, dass im Rahmen von Tunnelinspektionen höhere Geschwindigkeiten als die derzeitigen 1-4 km/h und eine bessere Oberflächenauflösung als die derzeitigen 1 mm erzielt werden kann, um auch Risse kleiner als 0,3 mm zu identifizieren.

Der Einsatz multispektraler Sensoren soll Aussagen über Thermal- und Materialeigenschaften der Tunneloberfläche ermöglichen. Thermalanalysen geben Aufschlüsse über Temperaturverteilungen an der Tunneloberfläche und damit einhergehende Bauwerkseigenschaften (z.B. Risse) aufgrund von Temperatur- und Wasserwegigkeiten. Scananbieter wie SPACETEC bieten bereits Thermalanalysen an. Zukünftige Systeme müssen jedoch Thermalgradienten im Sub-Grad-Bereich aufzulösen, um Aussagen über feinste Oberflächenschädigungen zu erhalten.

Multispektralkameras können auf Basis spektraler Reflektivitäten Aussagen über Materialeigenschaften geben. So sind z.B. Sinterablagerungen zu detektieren, die auf Risse bzw. Materialschädigungen des verwendeten Betons zurückzuführen sind.

Hardwareseitig bieten „Time of Flight (TOF)“ Sensoren eine interessante Alternative zwecks schneller Messung von 3D-Tunnelgeometrien. TOF-Kameras sind aktive Messsysteme, die mit Hilfe des Laufzeitverfahrens Distanzen messen. Sie emittieren Licht und empfangen die von einem Objekt reflektierten Impulse. Der Hauptvorteil dieser Systeme liegt in einer hohen Bildwiederholrate, womit auch hohe Messgeschwindigkeiten erzielbar sind. Der Nachteil zum jetzigen Stand der Technik sind geringe Punktauflösungen einer einzelnen Kamera von etwa 200 x 200 Pixeln.

Das photogrammetrische Hochgeschwindigkeitssystem

Dibit Messtechnik beschäftigt sich intensiv mit einem photogrammetrischen Hochgeschwindigkeitsmesssystem, dessen Prototyp bereits sehr gute Ergebnisse bei einer Aufnahmege-
schwindigkeit von 80 km/h erzielt. Im Kern besteht die Einheit aus mehreren Hochleistungs-
Industriekameras, die den gesamten Tunnelquerschnitt simultan aufnehmen. Das System
ist für Inspektionen bei einer Geschwindigkeit von bis zu 100 km/h konzipiert. Eine eigens
entwickelte Blitztechnik ermöglicht geringe Verschlusszeiten der Kameras, um Bewegungs-
unschärfen bei hohen Geschwindigkeiten zu vermeiden (siehe [Abbildung 13](#)). Die Aufnah-
meeinheit ist auf einer mobilen Trägervorrichtung installiert, die auf die Verwendung in Stra-
ßen- und Eisenbahntunneln adaptiert werden kann.

Mit Hilfe eines Tragarms wird die Aufnahmeeinheit im Mittelpunkt des Tunnelquerschnitts
positioniert. Die Auslösung der Hochgeschwindigkeitskameras erfolgt entweder wegge-
steuert oder zeitgesteuert. Die Georeferenzierung wird mit Hilfe von Festpunkten bewerk-
stelligt.

Mit den aufgenommenen Fotos des Hochgeschwindigkeitssystems werden unterschiedli-
che Ansätze verfolgt:

1. Aus den sich in Fahrtrichtung überlappenden Fotos wird mit Hilfe photogrammetrischer
Methoden die 3D-Gestalt des Tunnels rekonstruiert. Die Fotos dienen weiterhin der
naturgetreuen Fototexturierung der 3D-Modelle.
2. Die aufgenommenen Fotos werden ausschließlich für die Fototexturierung eines 3D-
Modells verwendet. Hierfür wird die 3D-Tunnelgeometrie einer unabhängigen Mes-
sung (z.B. Lasermessung) oder eine modellierte Tunnelgeometrie benötigt, auf die die
Fotos des Hochgeschwindigkeitssystems prozessiert werden können.

Die Aufnahmen des Prototyps erreichen bereits sehr gute Ergebnisse im Hinblick auf die
geometrische Genauigkeit der 3D-Messungen und die Qualität der Fototextur. So werden

z.B. Risse bis zu Öffnungsweiten von 0,3 mm erkannt. Die 3D-Modelle und Analyseergebnisse von Tunnelstrukturen (z.B. Risse, Abplatzungen, Wassereintritte etc.) können im vollen Umfang in 3D-Auswertesoftwaren verwaltet und visualisiert werden.



Abbildung 13: Dibat Hochgeschwindigkeits-Messsystem bei einer Testfahrt mit rd. 80 km/h im Tunnel, aufgenommen mit einer Langzeitbelichtung. Eine eigens konzipierte Blitztechnik beleuchtet gleichmäßig die Tunnellaibung. Die Aufnahme mit dem „endlosen“ Blitzband soll die Zukunftsvision einer schnellen, hochqualitativen Tunnelinspektion verdeutlichen.

Auswirkungen des Hochgeschwindigkeitssystems auf den Tunnelscan

Durch hohe Messgeschwindigkeiten sollen geringe Scanzeiten im Tunnel verwirklicht werden. Dadurch können die Sperrzeiten der Tunnel deutlich reduziert werden, der organisatorische Aufwand für die Tunnelcans verringert sich und die Akzeptanz der Tunnelnutzer steigt an. Durch einen effizienteren Arbeitsablauf sind Tunnelvermessungen in geringeren Zeitintervallen realisierbar.

Derartige neue Messsysteme ermöglichen auch ein „Mitschwimmen im Verkehr“. So ist es z.B. denkbar, dass das System fix an einem Wagonendabteil angebracht ist und den Tunnel im normalen Fahrbetrieb erhebt. Bei Autotunneln ist dies aufgrund der starken Lichtemission (Blitze), die die Verkehrssicherheit der anderen Autos einschränken könnten, mit grö-

ßeren Vorkehrungen verbunden. Hier sollte eine Kolonnenfahrt bei wenig Verkehrsaufkommen durchgeführt werden, wobei die aufzunehmende Tunnelstrecke von Sicherheitswagen nach vorne und hinten abgesichert wird.

5.3.8.2 Software

Generelle Anforderungen an Analysesoftware

Die Erhebungen im Rahmen von AMBITION haben gezeigt, dass zukünftige Tunnelinspektionen und Tunnelprüfungen durch den Einsatz spezialisierter Analysesoftware maßgeblich unterstützt werden können. Hier sind insbesondere noch Standards zur Verwendung allgemeiner Datenaustauschformate für Punktwolken und texturierte 3D-Modelle zu erarbeiten und Aspekte zur Nutzung von BIM-Systemen im Tunnelbau, wie auch zur (semi-)automatischen Erkennung und Klassifizierung von Schädigungen.

Die Analyse der Tunnelattribute sollte zukünftig in einer virtuellen Umgebung, vom eigentlichen Tunnelscan sowohl örtlich als auch zeitlich entkoppelt, geschehen. Hierzu ist jedoch zu beachten, dass die virtuellen Daten

1. so realistisch wie möglich (Fototextur, maßstabsgetreu, georeferenziert) und
2. durch manuelle Kontrollen im Tunnel verifiziert und nachvollziehbar sind.

Die Prozessierungskette von den Rohdaten bis zu den klassifizierten Vermessungsergebnissen sollte zudem möglichst automatisch erfolgen und von selbstlernenden, (semi-)automatischen Analysetools unterstützt werden.

Objekterkennung und Change Detection

Zur Erkennung und Vermessung von Schadstellen in einer virtuellen Umgebung existieren bestehende Software-Lösungen. Mit ihnen können beliebig wählbare Attribute (z.B. Risse, Schadstellen, Blockfugen, Einbauten etc.) im Kontext des gesamten Bauwerks betrachtet, eingezeichnet, vermessen und kategorisiert werden.

3D-Messungen unterschiedlicher Zeitpunkte können zudem überlagert werden, um den Alterungsprozess des Tunnels zu visualisieren bzw. die zeitliche Entwicklung etwaiger Schadstellen und die Wirkung von Sanierungsarbeiten zu dokumentieren.

Die automatische Erkennung von Strukturelementen aus Fotos und 3D-Modellen steht im Fokus von Weiterentwicklungen. Die Erkennung wiederkehrender Muster (z.B. Risse) aus 2D-Fotos beruht auf Methoden der „Artificial Intelligence“ (AI), wie z.B. neuronalen Netzwerken. Diese bestehen im Kern aus intelligente, selbstlernende Auswertungsalgorithmen,

die mit Musterdatensätzen trainiert werden können, um gewisse Strukturelemente auf Basis von Pixeleigenschaften zu erkennen und zu klassifizieren (siehe [Abbildung 12](#)).

Bei 3D-Daten beruht die Erkennung von Strukturelementen auf Änderungen von 3D-Netzelementen. Sogenannte „Bruchkanten“ geben Hinweise auf lineare Strukturelemente, die mit der Wahl geeigneter Parameter (z.B. Steilheit der Netzelemente) gefiltert und klassifiziert werden können.

Ansätze wie „Object-Based Image Analysis (OBIA)“, die vorwiegend bei Geoinformationssystemen und der Fernerkundung angewandt werden, verwenden eine Kombination aus 2D- und 3D-Informationen. Methoden der „Change Detection“ untersuchen die zuvor klassifizierten Muster im Laufe ihres zeitlichen Auftretens (siehe [Abbildung 14](#)).

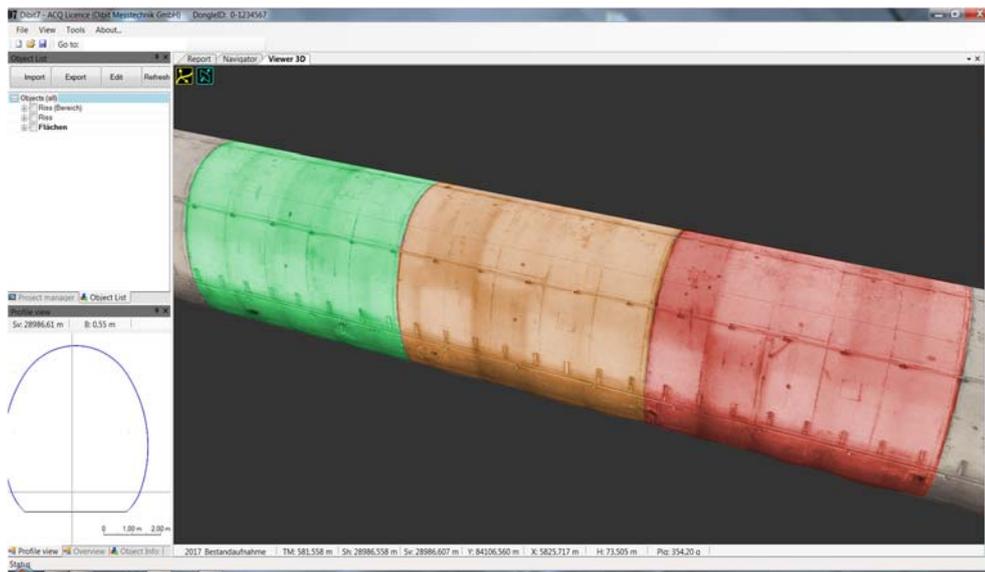


Abbildung 14: Beispiel zur automatischen Klassifizierung von Tunnelblöcken basierend auf der Methode der Change Detection. Blöcke mit starken Veränderungen der Rissbilder werden rot markiert, während Blöcke mit keinen oder geringen Veränderungen in grün dargestellt werden.

Die wissenschaftliche Forschung geht dahin, Veränderungen der Tunneloberfläche automatisch zu bestimmen und zu quantifizieren. Die statistische Analyse der Daten ermöglicht es, das räumliche und zeitliche Auftreten von Schadstellen zu beurteilen und deren Gefährdungspotentiale abzuschätzen. Isolinien-Darstellungen sind in dem Zusammenhang besonders geeignet, den Prüfer bei seiner virtuellen Vorabbeurteilung des Tunnels zu unterstützen (siehe [Abbildung 15](#)) und dessen Aufmerksamkeit gezielt auf derartige Veränderungsherde zu lenken.

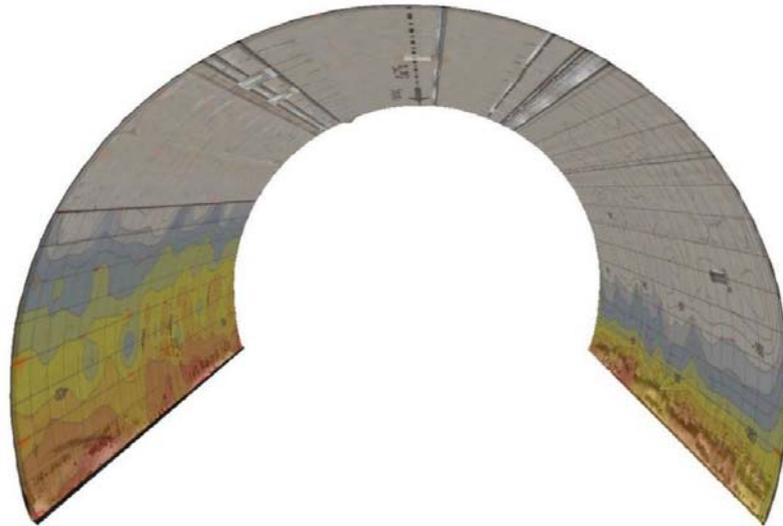


Abbildung 15: Visualisierung von Ergebnissen einer Potentialfeldanalyse kombiniert mit einem 3D-Modell (Quelle: Dibit Forschung).

BIM-Anwendungen

Generell ist es erstrebenswert, ein BIM („Building Information Model“) für Tunnelbauwerke zu etablieren, um diese über den gesamten Lebenszyklus bewirtschaften und überwachen zu können. Bei Bestandstunneln ist die BIM-Datenbank entsprechend vom Zeitpunkt des ersten 3D-Scans an zu führen. „Analoge“ Annotierungen von früheren Zeitpunkten, wie z.B. Bauberichte, Inventarisierungen, Sanierungsprotokolle etc. können mit den 3D-Geometrien räumlich verknüpft werden. Sie können später Hinweise zu geologisch- oder bauwerksbedingten Schädigungen und Alterungsprozessen geben.

Grundsätzlich sind für BIM-Entwicklungen Softwareansätze ein geeigneter Ausgangspunkt, die die Fähigkeit zur räumlich-, zeitlich strukturierten Ablage und Analyse von Daten beinhalten. Etablierte Tunnelvermesser wie SPACETEC, Dibit, Terra u.a. haben hier bereits erfolgversprechende Softwaresysteme auf dem Markt.

Allgemeine Datenstandards

Für das Datenhandling ist es erforderlich, einen offenen Datenstandard für Tunnelscans und Analysedaten zu schaffen, der von allen involvierten Parteien verwendet wird. Der maßgebliche Faktor ist dabei die Analysesoftware, die bei den Auftraggebern bzw. Tunnelbetreibern und tunnelprüfenden Ingenieuren verwendet wird. Ein Dienstleister eines Tunnelscans muss unabhängig von den verwendeten Systemen (Laser-, Photogrammetrie-, Hybridsystem) Daten in jenem Format liefern, die von der Analysesoftware importiert und anschließend dargestellt werden können. Unter diesem Gesichtspunkt scheinen u.a. folgende Datenformate besonders aussichtsreich:

- **3D-Modelle:** Wavefront OBJ, Stanford PLY, Autodesk DXF, U3D
- **3D-Punktwolken:** ASPRS LAS, ASCII XYZ, Stanford PLY

Zukünftig sollte eine Analysesoftware auch als cloud- oder serverbasierter Dienst zur Verfügung stehen. Es würde dadurch keine Hochleistungsrechner sowie aufwändige Softwareinstallationen bei den Anwendern mehr benötigt. In Punkto Datensicherheit müssen entsprechende Vorkehrungen in Absprache mit den involvierten Firmen getroffen werden. Tests zur Praktikabilität von Serverdiensten laufen derzeit bei der Dibit Messtechnik GmbH in Kooperation mit der ASFINAG.

5.3.8.3 Nutzen und neuer Workflow der Tunnelprüfung

Zusammenfassend ergeben sich durch die Verwendung von Tunnelscanner Systemen folgende Nutzen und Aspekte für zukünftige Tunnelprüfungen (siehe Tabelle 9):

Tabelle 9: Allgemeine Aspekte einer zukünftigen Tunnelinspektion, basierend auf den Experteninterviews und wissenschaftlichen Erhebungen.

Hauptaspekt	Unterschiede (Vorteile) gegenüber jetzigen Tunnelmessungen
Konzept	<ul style="list-style-type: none"> • Teilweise Verlagerung der Inspektionen und Bearbeitung vom Tunnel in eine virtuelle Umgebung des Begutachters
Hauptvorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Ökonomischer, schneller, objektiver, weniger Beeinträchtigungen des Betriebs während der Tunnelaufnahmen
Prüfzyklen	<ul style="list-style-type: none"> • Durch den geringeren Aufwand wird die Prüfhäufigkeit erhöht • Hauptprüfungen durch den Menschen werden reduziert • Ein häufigeres Monitoring ist möglich (z.B. jedes Jahr im Ggs. zu den 5-jährigen Zyklen der aktuellen Tunnelprüfung)
Sperrungen	<ul style="list-style-type: none"> • Sperrzeiten nur mehr wenige Stunden anstatt mehrerer Tage • Ggf. können die Messsysteme im Verkehr „mitschwimmen“
Scanzeit	<ul style="list-style-type: none"> • Die reine Messfahrt beträgt Minuten anstatt mehrerer Stunden oder Tage (bis zu 100 km/h, anstatt 2-4 km/h (kinematisches System) oder 200 – 500 m/h (Stop & Go System))
Personalkosten	<ul style="list-style-type: none"> • Bedeutend geringerer Zeitbedarf (schwer zu quantifizieren; etwa 1/5 des vorherigen bezogen auf die Tunnelmessung) • Reduktion um 1/2, bezogen auf die Computerauswertung und Berichterstattung
Analyseort	<ul style="list-style-type: none"> • Überwiegend auf dem Computer des Begutachters • Verifizierung durch Vorbegehungsdaten aus Tunnel
Risserkennung	<ul style="list-style-type: none"> • Risse bis < 0,3 mm (anstatt > 0,3 mm) werden erkannt

Rissanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • (semi-) automatische Vorerkennung von Bereichen mit Schädigungen; selbstlernende Softwarealgorithmen • (semi-) automatische Schadenskategorisierung • (semi-) automatische Verformungsüberwachung (Ovalisierung) • Visualisierung der Schadensänderung mit Falschfarben • Statistiken zu Schaddichte und deren zeitlich-räumliche Veränderung • Leichte graphische Visualisierung des Schadmaßes durch Veränderungsindikatoren • Vollautomatische Risserkennung wird anvisiert
Datenverwaltung	<ul style="list-style-type: none"> • BIM (Building Information Model) ist anvisiert • Einheitliche Datenstandards werden eingeführt • Server- und cloudbasierte Softwareanwendungen

5.4 Zustandsbewertung

In diesem Kapitel wird ein Vorschlag zur Weiterentwicklung der heutigen Zustandsbewertungssystematik gem. RVS [1] bzw. ÖBB-RW [4] für das Gewölbe (Innenschale bzw. Tunnelleibung) präsentiert, welcher die Zielerfüllung der Kriterien „Nachvollziehbarkeit“, „Differenzierung Prioritätswert/Substanzwert“, „Differenzierung Tragfähigkeit/ Gebrauchstauglichkeit/ Dauerhaftigkeit“, „örtliche Differenzierung“ und „Verarbeitbarkeit“ berücksichtigt.

5.4.1 Zustandsnoten

Am Ende der Bewertung steht die Zusammenfassung in Form von Zustandsnoten. Um die Verständlichkeit und Komptabilität zu den Zustandsbewertungssystemen anderer Gewerke (v.a. im Rahmen der RVS [1]) möglichst zu erhalten, baut die Definition der Zustandsnoten auf dem bisherigen Ansatz der RVS [1] und ÖBB-RW [4] auf, verknüpft diese mit Prognosen bez. der weiteren Entwicklung („kurzfristig“, „mittelfristig“, „langfristig“) und vergibt letztendlich eine (Zustands-)Note in der Abstufung 1-5 gemäß der bestehenden RVS-Systematik.

Der vorgestellte Ansatz differenziert jedoch in Teilnoten für Tragsicherheit (U1 bis U5, siehe Tabelle 10), Gebrauchstauglichkeit (S1 bis S5, siehe Tabelle 11) und Dauerhaftigkeit (D1 bis D5, siehe Tabelle 12). Die Kürzel wurden entsprechend der üblichen Begrifflichkeit des Eurocodes angepasst (U für „Ultimate Limit State“, S für „Serviceability“ und D für „Durability“)

Tabelle 10: Zustandsnoten U für die Tragsicherheit

Tragsicherheit (ultimate limit state)	
U1	Das Tragwerk weist die planmäßigen Eigenschaften hinsichtlich Geometrie, Festigkeit, Steifigkeit, Lagerung/Bettung u.dgl. auf.
U2	Es sind Hinweise auf geänderte Eigenschaften des Tragwerks vorhanden, die derzeit zwar einen beginnenden und unwesentlichen Einfluss, langfristig jedoch einen wesentlichen ungünstigen Einfluss auf das Tragverhalten gegenüber dem planmäßigen Zustand haben.
U3	Die Veränderungen am Tragwerk haben einen Einfluss auf das Tragverhalten und die Tragreserven. Die Tragsicherheit und Zuverlässigkeit wird noch mittelfristig als gegeben beurteilt.
U4	Veränderungen am Tragwerk haben einen nennenswerten Einfluss auf das Tragverhalten und die Tragreserven. Die Tragsicherheit ist derzeit noch gegeben, wird bei Fehlen kurzfristiger Maßnahmen jedoch nur noch eingeschränkt und unterhalb des zulässigen Zuverlässigkeitsniveaus vorhanden sein.
U5	Die Tragsicherheit ist wesentlich eingeschränkt bzw. nicht mehr gegeben. Das vorhandene Zuverlässigkeitsniveau wird für einen sicheren Gebrauch als zu gering beurteilt.

Tabelle 11: Zustandsnoten S für die Gebrauchstauglichkeit

Gebrauchstauglichkeit (serviceability)	
S1	Es liegen keine Beeinträchtigungen der Gebrauchstauglichkeit vor.
S2	Es sind Hinweise auf geänderte Eigenschaften des Bauteils vorhanden, die derzeit zwar einen beginnenden und unwesentlichen Einfluss, langfristig jedoch einen wesentlichen ungünstigen Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit gegenüber dem planmäßigen Zustand haben.
S3	Die Veränderungen am Bauteil haben einen Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit. Die Gebrauchstauglichkeit wird noch mittelfristig als gegeben beurteilt.
S4	Veränderungen am Bauteil haben einen nennenswerten Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit. Für den sicheren Gebrauch ist kurzfristig die Notwendigkeit von Hilfs- oder Kompensationsmaßnahmen absehbar.
S5	Die Gebrauchstauglichkeit ist nicht mehr gegeben. Die Nutzung ist im vorgesehenen Umfang nicht mehr möglich.

Tabelle 12: Zustandsnoten D für die Dauerhaftigkeit

Dauerhaftigkeit (durability)	
D1	Es liegen keine Beeinträchtigungen der Dauerhaftigkeit vor.
D2	Es sind Hinweise auf geänderte Eigenschaften des Bauteils vorhanden, die derzeit zwar erst beginnenden und vernachlässigbaren Einfluss auf die Dauerhaftigkeit gegenüber dem ursprünglichen Ausgangszustand haben.
D3	Die Veränderungen am Bauteil haben einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit. Die fortschreitende Schädigung führt langfristig zu einer Einschränkung der Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit.
D4	Die Dauerhaftigkeit am Bauteil ist eingeschränkt. Es ist eine beschleunigende Schädigung des Bauteils zu erwarten, welche mittelfristig zu einer Einschränkung der Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit führen wird.
D5	Die Dauerhaftigkeit des Bauteils ist nicht mehr gegeben. Es ist beschleunigte Schädigung des Bauteils zu erwarten, welche kurzfristig zu einer Einschränkung der Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit führt.

Die Zustandsnoten U, S, D werden zunächst für jeden einzelnen Ring/Block vergeben, wodurch das Kriterium der örtlichen Differenzierung und eine weitere Auswertung hinsichtlich Substanzwert und Prioritätswert möglich wird.

Die Zustandsnote U drückt den Abnutzungsvorrat bis zum Erreichen des zulässigen Zuverlässigkeitsniveaus am Ende der Lebensdauer aus. Ein Tragwerk wird – der Herangehensweise des Eurocodes folgend – für ein derart hohes Zuverlässigkeitsniveau zu Beginn der Nutzungsdauer ausgelegt, sodass das voraussichtliche Zuverlässigkeitsniveau bis zum Ende der vorgesehenen Nutzungsdauer dem minimal erforderlichen im Sinne des Eurocodes 0 entspricht (z.B. ausgedrückt in Form der Versagenswahrscheinlichkeit p_f oder in Form eines auf den Bezugszeitraum der Restnutzungsdauer bezogenen Zuverlässigkeitsindex β gem. EN 1990-1.)

Das vorhandene Zuverlässigkeitsniveau ließe sich anhand einer Stufe-3-Nachrechnung des Tragwerks gem. ONR 24008 [9] quantifizieren, was im Rahmen einer herkömmlichen Zustandsbewertung (zumindest für Zustandsnoten von 1-3) in der Regel nicht erforderlich ist. Der Bezug zum Zuverlässigkeitsniveau dient hier lediglich zur Definition des Übergangs des Zustandes U4 in den (gerade noch zuverlässigen) Grenzzustand U5.

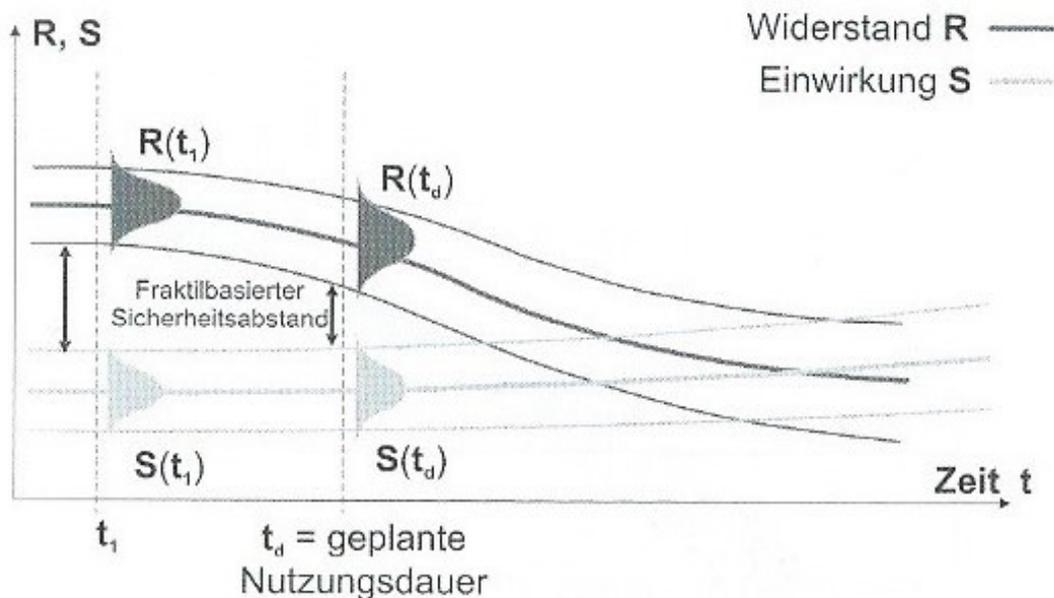


Abbildung 16: Ausschöpfung des Abnutzungsvorrates bis zum minimalen Zuverlässigkeitsniveau gemäß [10]

Die Zustandsnote S drückt analog den Abnutzungsvorrat bis zum Erreichen des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit aus, wobei hier nicht nur jene Aspekte eingehen, welche üblicherweise im Rahmen der Tragwerksplanung Berücksichtigung finden, sondern auch Phänomene wie Wasserzutritte, Eisbildung und Lichtraumfreihaltung.

Die Notenkategorie D schließlich stellt im engeren Sinne keinen Zustand dar, sondern den Widerstand gegenüber weiterer Degradation oder Alterung (U oder S) dar. Mathematisch betrachtet, könnte man D als erste Ableitung der Alterungskurve interpretieren, also die Gradienten der Alterungskurve bzw. die Alterungsrate. Wenn zwei Bauteile beispielsweise mit der Zustandsnote S3 bewertet werden, jedoch eine unterschiedliche Dauerhaftigkeit (z.B. D2 und D4) aufweisen, so ist davon auszugehen, dass bei der nächsten Prüfung der letztere Block schneller eine schlechtere S-Note erfährt als der erste, obwohl beide aktuelle dasselbe Zuverlässigkeitsniveau hinsichtlich Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit aufweisen. Der Nutzen der bewerteten Gebrauchstauglichkeit liegt also in der blockweisen differenzierten Prognose der Alterung beispielsweise im Rahmen einer „Predictive Maintenance Strategie“.

5.4.2 Zuordnung Zustandsnoten

Wie im Kapitel 4.2.1 bereits erläutert, kann die Einschätzung des Zustandes von Fachmann zu Fachmann streuen. Dies ist unter anderem eine Konsequenz der Gemengelage aus mitunter fehlenden Informationen zu Einflüssen, Schadensfortschritt und Umfeldkriterien, welche in ihrer Kombination den zu beurteilenden Zustand charakterisieren. Umso wesentlicher erscheint es – in Analogie zum strukturierten Vorgehen bei der Auslegung des Bauwerks in der Planungs- und Errichtungsphase nach [8], die Nachvollziehbarkeit der Beurteilung sicherzustellen, ohne die Freiheit des fachkundigen Urteils unnötig einzuschränken. Ein entsprechendes Vorgehen dient nicht zuletzt der semantischen Koordination, welche sicherstellt, dass die Vielzahl an externen und internen Beteiligten beispielsweise dieselben Begrifflichkeiten zum Maßstab nehmen.

Als Hilfsmittel wurde auf Basis des bereits am Katalog der Tabelle 1 beteiligten Expertenkreis ein exemplarischer Bewertungskatalog für das unbewehrte Ortbetongewölbe konzipiert, welcher als Hilfestellung für übliche bzw. häufige Randbedingungen (z.B. herkömmliche Querschnittsgeometrie und Querschnittsgröße, übliche Baustoffe und Bauweise nach Neuer Österreichischer Tunnelbauweise im Festgestein) dienen kann.

Zweck des Katalogs ist ein möglichst gleiches Verständnis der Notenskalen, sodass ein Prüfer bei einem Anwendungsfall bei gleichem Informations- und Kenntnisstand zu einer vergleichbaren Noteineinstufung kommt. Andernfalls sind die Benotungen verschiedener Prüfer als objektübergreifendes Bewertungsschema kaum vergleichbar.

Der Katalog weist diversen Einzelphänomenen und Kombinationen einen Vorschlag der Bandbreiten zur Bauteilbenotung U, S, D nach Kapitel 5.4.1 zu.

Tabelle 13: Zuordnung Schadensphänomene zu Zustandsnoten U, S, D

Innenschale	Schadensgruppe	Schaden	Eigenschaften	Tragfähigkeit	Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit	Anmerkung	
				U	S	D		
Beton unbewehrt	Risse >0,5mm	Längsrisse	Beschreibung					
			mehr als 2 Längsrisse >0,5mm in Kämpfer oder Ulme	U1-U3			Hinweis auf Spannungsumlagerung	
			mehr als 4 Längsrisse Kämpfer oder Ulme	U1-U3			Hinweis auf Spannungsumlagerung	
			Rissbreite >3mm	U2-U3	S2-S3	D2-D3	Ausnutzung der Rotationsfähigkeit des Betonquerschnitts	
			Rissufer versetzt	U2-U4	S2-S4	D3-D4	Hinweis auf Spannungsumlagerung und erhöhte Teilbeweglichkeit der Schale	
			Risse umschreiben geschlossene Flächen (mit anderen Rissen, ggf. auch mit Blockfugen)	U2-U3	S2-S4	D2-D3	Gefährdungsbild herausfallender Schalenteile	
			Risse feucht oder zeitweise wasserführend außerhalb Frosteinwirkungsbereich		S2-S3	D2-D3	beginnende potenzielle Beeinträchtigung der Fahrbahn/des Fahweges bzw. der Tunnelausrüstung	
			Risse feucht oder zeitweise wasserführend im Frosteinwirkungsbereich		S3-S4	D3-D4	Beeinträchtigung Verkehrssicherheit durch Eisbildung, Feuchtigkeit Feuchtigkeits mit Frost beschleunigt Degradation	
			Risse nass und meist wasserführend außerhalb Frosteinwirkungsbereich		S3-S4	D3-D4	Gefährdung Verkehrssicherheit durch Eisbildung, Feuchtigkeit mit Frost beschleunigt Degradation	
			Risse nass und meist wasserführend im Frosteinwirkungsbereich		S3-S4	D4	Bildung von Eiszapfen und Frostabsprengungen, Gefahr Vereisungen, beschleunigte Degradation zufolge Frost-Tauwechsel	
			>2 Risse >0,5mm je Ulme			D2-D3	in der Regel nur Folge früher und späteren Zwangs, statisch i.d.R. unbedenklich	
			Risse >0,5mm umlaufend über ganzen Querschnitt		U1-U3	S2-S3	D2-D3	beginnender Einfluss auf das Tragwerk (bzw. dessen Längstragwirkung) und somit das Tragverhalten
			Rissufer versetzt		U2-U4	S2-S4	D3-D4	Hinweis auf Spannungsumlagerung und erhöhte Teilbeweglichkeit der Schale
			Risse umschreiben geschlossene Flächen (mit anderen Rissen, ggf. auch mit Blockfugen)		U2-U3	S2-S4	D3-D4	Gefährdungsbild herausfallender Schalenteile
			Risse feucht oder zeitweise wasserführend außerhalb Frosteinwirkungsbereich			S2-S3	D2-D3	beginnende potenzielle Beeinträchtigung der Fahrbahn/des Fahweges bzw. der Tunnelausrüstung
Risse feucht oder zeitweise wasserführend im Frosteinwirkungsbereich			S3-S4	D3-D4	Beeinträchtigung Verkehrssicherheit, Feuchtigkeit mit Frost beschleunigt Degradation			
Risse nass und meist wasserführend außerhalb Frosteinwirkungsbereich			S3-S4	D3-D4	Gefährdung Verkehrssicherheit durch Eisbildung, Feuchtigkeit mit Frost beschleunigt Degradation			
Risse nass und meist wasserführend im Frosteinwirkungsbereich			S3-S4	D4	Bildung von Eiszapfen und Frostabsprengungen, Gefährdungsbild Vereisungen, beschleunigte Degradation zufolge Frost-Tauwechsel			

Innenschale	Schadensgruppe	Schaden	Eigenschaften	Tragfähigkeit	Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit	Anmerkung
				U	S	D	
Verformungen	Blockfugenversatz, Verdrückung	neuer Blockfugen Versatz (d.h. nicht schon aus Bauherstellung) drohende Einschränkung des Lichtraumes zufolge Querschnittsverformung	U2-U4	S2	D2-D4	Hinweis auf neue äußere Lasten oder Änderung der Bettung	
			U3-U4	S4	D3-D4	Hinweis auf neue äußere Lasten oder Änderung der Bettung	
	Blockfuge	Abplatzung	außerhalb Frosteinwirkungsbereich	U2-U3	S3-S4	D2-D4	quer und längs, auch zufolge thermischer Öffnung/Schließen der Blockfuge; Gefahr durch herausfallende Bruchstücke
					S2-S4	D2-D3	Einfluss des Fahweges/der Fahrbahn und Ausrüstung durch Wasserzutritte, Potenzial bei schleuniger Degradation
		Sinterspuren	Wasserzutritt		S2-S3	D2-D3	Einfluss des Fahweges/der Fahrbahn und Ausrüstung durch Wasserzutritte, Potenzial bei schleuniger Degradation
					S2-S4	D3-D4	Gefährdungsbild Vereisung und Eiszapfenbildung, beschleunigte Degradation zufolge Frost-Tau-Wechsel
	Ablösungen	Abplatzungen	Abplatzungen Blockfuge mit losen Teilen Abplatzungen Blockfuge saniert (ohne lose Teile) Abplatzungen in der Fläche <1m² Abplatzungen in der Fläche >1m²	U1-U4	S3-S4	D2-D3	Gefahr durch herausfallende Bruchstücke
				U1-U3	S2-S3	D2-D3	Gefährdungsbild herausfallender Bruchstücke
				U1-U4	S2-S4	D3-D4	Gefahr durch herausfallende Bruchstücke
				U2-U4	S3-S4	D3-D4	Gefahr durch herausfallende Bruchstücke, Beginnender Einfluss auf das Tragsystem
Oberflächenschäden	Hohlstelle	Hohlstelle <1m² Hohlstelle >1m²	U2-U3	S2-S4	D2-D4	Gefährdungsbild herausfallender Bruchstücke, Hinweis auf mögliche weitere Beeinträchtigung der Gewölbeintegrität	
			U2-U4	S3-S4	D3-D4	Gefahr durch herausfallende Bruchstücke, Einfluss auf das Tragsystem/Gewölbeintegrität aufgrund von Minderstärken	
	Feuchtesteile	>1m² außerhalb Frosteinwirkungsbereich >1m² innerhalb Frosteinwirkungsbereich	S2-S3	S2-S3	D2-D3	Einfluss des Fahweges/der Fahrbahn und Ausrüstung durch Wasserzutritte, Potenzial bei schleuniger Degradation	
			S2-S4	S2-S4	D3-D4	Gefährdungsbild Vereisung und Eiszapfenbildung, zunehmende Degradation zufolge Frost-Tau-Wechsel	
		Nest/poröser Beton	Fläche >2m² in Kombination mit Feuchtigkeit außerhalb Frosteinwirkungsbereich in Kombination mit Feuchtigkeit im Frosteinwirkungsbereich	S2-S3	S2-S3	D2-D3	Verminderte Qualität Betonoberfläche fördert potentiell die Degradation
				S2-S3	S2-S3	D2-D3	Einfluss des Fahweges/der Fahrbahn und Ausrüstung durch Wasserzutritte, Potenzial bei schleuniger Degradation
			U2-U3	S2-S4	D3-D4	Gefahr durch herausfallende Bruchstücke zufolge Frostabsprengung, Einfluss auf das Tragsystem/Gewölbeintegrität aufgrund von Minderstärken	

Innenschale	Schadensgruppe	Schaden	Eigenschaften	Tragfähigkeit	Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit	Anmerkung
	Veränderung gegenüber vorhergehender Prfng	Flächige Schäden (Nassstellen, Sinterstellen, Abplatzungen), Unabhängig von Art	+25% der Fläche	-> Veränderungsindikator "x" +1			Hinweis auf Veränderungen, möglicherweise Spannungsumlagerungen, Abnahme Betonqualität, Korrosion; Bewertung U/S/D erst nach spezifischer Beurteilung des Schadensmechanismus möglich.
		Linienförmige Schäden, unabhängig von Rissbreite u. dgl.	+25% der Länge	-> Indikator "y" +1			Hinweis auf Veränderungen, möglicherweise Spannungsumlagerungen, Abnahme Betonqualität, Korrosion; Bewertung U/S/D erst nach spezifischer Beurteilung des Schadensmechanismus möglich.

Die Zuordnungen gem. Tabelle 13 sind lediglich als Richtschnur gedacht. Die endgültige Bewertung der Schadensphänomene und die Benotung des einzelnen Blocks vor dem Hintergrund der jeweiligen spezifischen Umstände des zu prüfenden Bauteils und unter Berücksichtigung allfälliger weiterer, im obigen Katalog nicht enthaltenen Aspekte oder Phänomene liegt weiterhin in der Freiheit und Verantwortung des prüfenden Fachmanns. Diese Freiheit sollten die Prozesse der jeweiligen Organisation im Rahmen der Bauwerksüberwachung auch sicherstellen. In die endgültige, durch den Prüfer vorzunehmende Bewertung sind vor allem auch auf Kombinationen der o.a. Phänomene zu berücksichtigen. Derlei Kombinationen können Effekte von Mechanismen sein, welche in Tabelle 13 nicht angeführt sind. Auch Veränderungen von Phänomenen (unterste Zeilen der Tabelle 13) gegenüber der reinen Momentaufnahme (übrige Zeilen der Tabelle 13) sind als wesentliches Beurteilungskriterium zu berücksichtigen.

Umgekehrt sind die Bandbreiten auch auf die Art des Tunnelobjekts und seinen Anforderungen abzugleichen, da beispielsweise die Gebrauchstauglichkeit eines Bahntunnels einer Hochleistungsstrecke differenziert zu bewerten ist als die eines Autobahntunnels.

Ein wesentlicher Vorteil eines derartigen Katalogs ist, dass eine halbautomatisierte Vorauswertung erfolgt, die durch den Prüfer dann entsprechend ergänzt, abgewandelt oder bestätigt wird. Eine unmittelbare automatisierte Umsetzung ist mit heutigen Mitteln noch nicht realisierbar und auch nicht wünschenswert, da die Gefahr besteht, dass das System zu einer Black-Box ohne kritische fachmännische Hinterfragung fehlerhaft eingesetzt wird.

Ein wesentliches Hilfsmittel der laufenden Überwachung kann aber die letztgenannten Indikatoren zur flächigen oder linienhaften Veränderung von Oberflächenstrukturen sein, deren automatisierte Auswertung bereits heute umsetzbar wäre. Eine reine Oberflächenveränderung ist an sich noch kein unmittelbarer Beleg einer Zustandsverschlechterung, jedoch ein Indikator eines laufenden Veränderungsprozesses. Wird eine solche Veränderung identifiziert, wird die betreffende Stelle im System gekennzeichnet (vgl. Kapitel 5.3.8 und Abbildung 15) oder automatisiert gemeldet, sodass dem Anlagenverantwortlichen die Möglichkeit gegeben wird, den Bereich vor Ort oder anhand des Scans einem näheren Augenschein zu unterziehen. Setzt man die visuelle Aufnahme mit einer automatisierten Bildauswertung der Oberflächenveränderungen in engen Zeitintervallen ein, entspricht das einer Erhöhung der Überwachungsdichte im Sinne eines laufenden Bauwerksmonitorings. Sofern die visuellen Aufnahmen im laufenden Betrieb umgesetzt werden können, wird daraus ein hoher Mehrwert für die Bauwerksüberwachung generiert. In weiterer Folge ist eine Anpassung der Prüfintervalle der Hauptuntersuchungen/Hauptprüfungen denkbar.

5.5 Ausschöpfung des Entwicklungspotentiales

Im Folgenden wird exemplarisch erläutert, ob und wie die im Kapitel 4 identifizierten Handlungsfelder durch die in den Kapiteln 5.1 und 5.3 aufgezeigten Weiterentwicklungen optimiert werden können.

Tabelle 14: Synthese der ausgeschöpften Entwicklungspotentiale

Zustandserfassung	
Wechselwirkung Betrieb/Prüfung	<p>Durch die Weiterentwicklung der automatisierten Aufnahme (Tunnelscan) hinsichtlich Geschwindigkeit und Bildauflösung wird der tatsächliche Zeitbedarf der Prüfung vorort optimiert.</p> <p>Die Beeinträchtigung der Aufnahmequalität einer rein händischen Schadensdokumentation infolge widriger Prüfbedingungen (laufender Betrieb) wird bei Einsatz einer visuell objektiven Aufnahme der Tunnellaubung mittels Tunnelscan erheblich reduziert.</p>
Systematisierte Aufnahme nach Schadenskatalogen	<p>Durch die Definition eines Minimalkatalogs an Schadensbildern, die bei der Zustandserfassung (je nach Bauweise) zu erfassen sind, wird eine subjektive Vorauswahl/Filterung durch den Prüfenden minimiert.</p>
Objektivität / Reproduzierbarkeit der Zustandserfassung	<p>Durch den Einsatz moderner Technik bei der visuellen/bildgebenden Aufnahme sowie durch die Definition eines Minimalkatalogs der zu erfassenden Schadensbilder wird eine subjektive Vorauswahl/Filterung durch den Prüfenden minimiert.</p>
Erfassung Schadensveränderung bzw. -historie	<p>Der Einsatz einer automatisierten Bildauswertung auf linienhafte oder flächenhafte Veränderungen der Oberfläche liefert einen erheblichen Mehrwert im Sinne eines Frühwarnsystems.</p> <p>Ergänzt durch Monitoringmaßnahmen, können – bei gleichwertigem Zuverlässigkeitsniveau – die Prüfzyklen angepasst werden.</p> <p>Erfassung und Datenhaltung in einem objektiven und georeferenzierten Tunnelinformationssystem (BIM) erlaubt eine lagerichtige Gegenüberstellung der jeweils erfassten Zustände.</p>

Zustandsbewertung	
Nachvollziehbarkeit der Zustandsbewertung	<p>Durch die Entwicklung von Katalogen mit einer Vorbewertung für typische Verhältnisse und Bauweisen werden die Beurteilungsmaßstäbe der verschiedenen Prüfenden einander angeglichen.</p> <p>Da die Kataloge nur zur Orientierung und Hilfestellung dienen, schränken sie den Prüfenden in seiner Beurteilung jedoch nicht ein.</p>
Differenzierung Tragfähigkeit/ Gebrauchstauglichkeit/ Dauerhaftigkeit	<p>Durch die Ergänzung von Teilnoten U, S und D ist eine Differenzierung gewährleistet. Dadurch ist auch die Unterscheidung zwischen dem jeweiligen Zustand (U, S) und der erwarteten Verfallsrate (D) der weiteren Zustandsentwicklung sichergestellt.</p>
Differenzierung Prioritätswert und Substanzwert	<p>Durch die blockweise Beurteilung und Benotung ist eine Differenzierung gegeben, sodass auch das Ausmaß des Abnutzungsvorrates der Anlage darstellbar ist und auch quantitative Szenarioanalysen im Rahmen der Instandsetzungsplanung möglich werden.</p>

6 VALIDIERUNG DER ERWEITERTEN ZUSTANDBEWERTUNG

6.1 Allgemeines

Die im Kapitel 5 vorgestellte Weiterentwicklung der Zustandserfassung und Zustandsbewertung wird anhand eines Beispielobjekts eines realen Autobahntunnels im Netz der AS-FiNAG getestet und der bisherigen Systematik gegenübergestellt.

Die betreffende Röhre dieses Tunnels ist rund 1.010 m lang und wurde Ende der 1970er-Jahre bergmännisch in „Neuer Österreichischer Tunnelbauweise“ errichtet. Sie weist einen herkömmlichen zweistreifigen Straßentunnel-Regelquerschnitt auf. Der Ausbau besteht aus einer Außenschale, einer Regenschirmabdichtung mit seitlichen Ulmendrainagen und einer innbewehrten Innenschale. Der Tunnel wurde im Festgestein (Phyllite und Grünschiefer) in stark gebrächen bis druckhaften Gebirgsverhältnissen bei einer Überlagerung von bis zu 120 m vorgetrieben.

Im Jahr 2014 erfolgte die letzte Tunnelhauptprüfung nach RVS 13.03.31 [1], wobei damals bereits ein Tunnelscan durchgeführt wurde, in welchem die vor Ort handnah erfassten Schadstellen eingetragen sowie die in der vorhergehenden Prüfung dokumentierten Schäden nachgetragen wurden. Der Tunnel wurde mittlerweile generalsaniert und sicherheitstechnisch nachgerüstet.

Dies ermöglicht die gegenständliche Validierung auf Basis vorhandener Aufnahmen nach dem in Kapitel 5.3 beschriebenen Schemata.

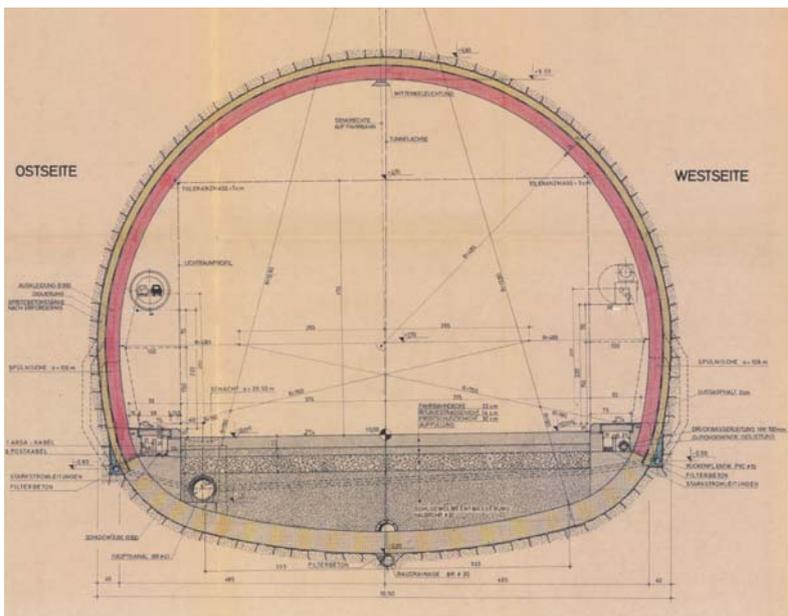


Abbildung 17: Regelquerschnitt Realtunnel

6.2 Zustandserfassung

6.2.1 Tunnelscan

2014 wurde ein Tunnelscan mit dem „Stop & Go System“ von Dibit durchgeführt (siehe [Kapitel 5.3.2.3](#)). Das „hybride Messsystem“ misst mit einem Laserscanner die 3D-Geometrie des Tunnels und nimmt gleichzeitig Digitalfotos von der Tunnelinnenseite auf.

Im Vorfeld der Messung musste die Röhre gesperrt und der Verkehr umgeleitet werden. Um den Verkehr so wenig wie möglich zu stören, wurden die Arbeiten in den Nachtstunden durchgeführt. Der Messpfad des Aufnahmesystems bzw. die Standpunkte der einzelnen Scans wurden mit Hilfe einer automatischen Totalstation erhoben. Zwecks deren Lokalisierung wurden Passmarken im Abstand von etwa 50 m entlang der Tunnelachse in den Tunnelwänden verbohrt und eingemessen.

Weiters wurden zwecks Ermittlung der „ground truth“ exemplarische Rissbildungen und maßgebliche Tunnelobjekte manuell begutachtet. Diese Erfahrungen unterstützen bei einer späteren „virtuellen Tunnelbegehung“ die Erkennung und Klassifikation von Oberflächenschädigungen.

Die eigentliche Messung (3D-Scan) dauerte ca. 5 Stunden für den rund 1 km langen Tunnel. Für die gesamten Vorbereitungen, d.h. Einrichten der Passmarken, deren Vermessung, manuelle Vorbegutachtung maßgeblicher Strukturen und die Durchführung der Sperre wurde insgesamt ein Tag benötigt.

6.2.2 Erstellung des 3D-Modells

Das texturierte 3D-Modell wurde auf Basis der 3D-Lasergeometrie und der Digitalfotos mit der Software „Dibit TIS“ erstellt. Die aufgenommenen Punktwolken wurden mit Hilfe der Positionsmessungen der Totalstation co-registriert und die Digitalfotos in einem rechnerintensiven Schritt auf die 3D-Geometrie „gematched“. Für die Berechnung des texturierten 3D-Modells wurde in etwa eine Woche benötigt.

6.2.3 Rissanalyse des 3D-Modells – die „virtuelle Tunnelbegehung“

Die Rissanalyse erfolgte auf Basis des digitalen 3D-Modells mit Unterstützung der vorher beschriebenen „ground truth“ Erfahrungen. Der Operator bewegte sich entlang der Tunnelachse durch das Bauwerk und begutachtete virtuell die Tunneloberfläche in Bezug auf Rissbildungen, Schadstellen etc.

Die Strukturen wurden manuell bzw. semi-automatisch nachgezeichnet, kategorisiert und mit einer fortlaufenden Nummer versehen (siehe [Abbildung 18](#)). Alle erfassten Objekte wurden mit Informationen bez. Raumlage, Länge und Fläche (bei geschlossenen Polylinien) im

Dibit TIS (Tunnel Information System) abgespeichert. Hierin können weitere, frei definierbare Attribute angegeben werden (z.B. „wasserführend“, versintert etc.). Sämtliche Objekte können aus dem TIS exportiert werden und in Kalkulationsprogrammen weiter ausgewertet werden.

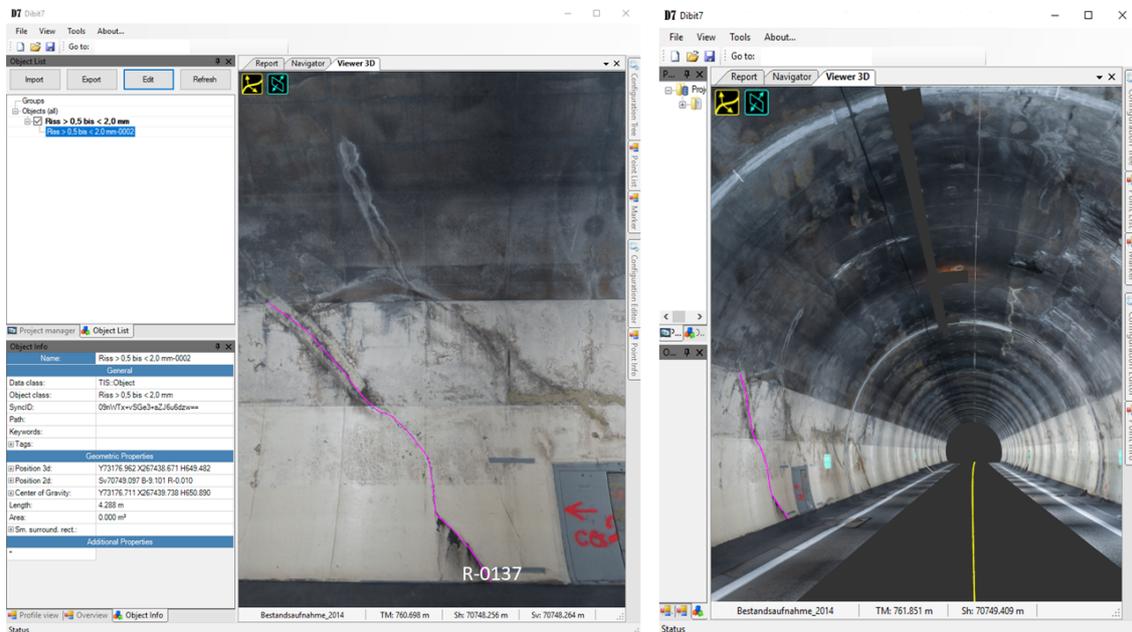


Abbildung 18: Exemplarische Rissbestimmung in der Software Dibit TIS. Links: Kategorisierter Riss mit Informationen zu dessen Position und Erstreckung. Rechts: die perspektivische Darstellung desselben.

6.2.4 Anwendung der weiterentwickelten Zustandserfassung

Der gesamte Tunnel wurde wie zuvor beschrieben hinsichtlich Schadbildungen untersucht. Vor allem die Messungen von Risserstreckungen, Rissmustern, Rissbreiten sowie weiterer Schadstellen wie Abplatzungen und Feuchtigkeitseinbrüchen bildeten die Basis für die Zustandsbenotung gemäß Kapitel 5.3.

In Abbildung 19 illustriert ein Beispiel einer solchen Messung. In der Tunnelabwicklung sind die Blöcke 66 und 67 mit den vermessenen und kategorisierten Schadstellen dargestellt. Die Notenvergabe der einzelnen Blöcke auf Basis des Katalogs gemäß Tabelle 13 ist in der nachfolgenden Tabelle 15 detailliert dargestellt.

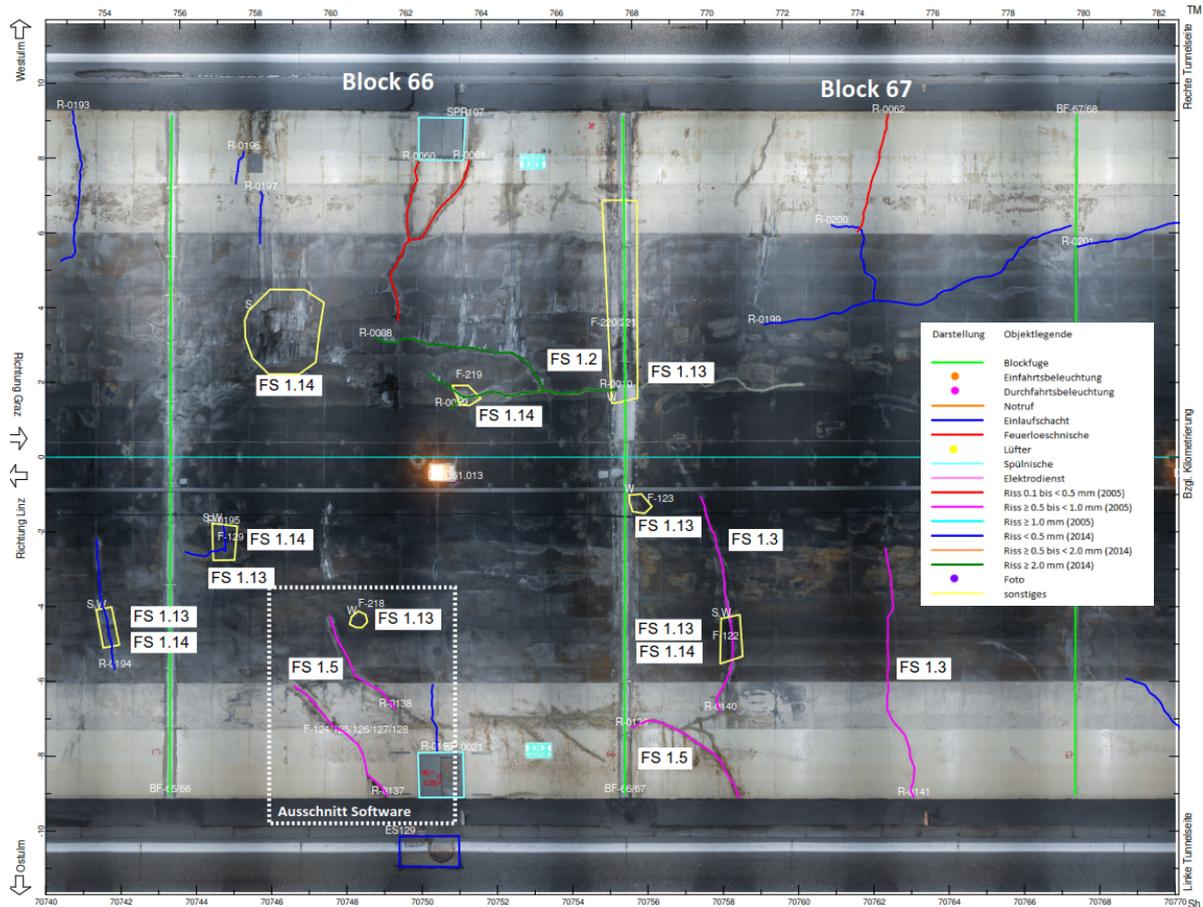


Abbildung 19: Tunnelabwicklung der Messungen von Block 66 und 67. An der Ober- und Unterseite sind Teile des Gehsteigs und der Fahrbahn zu erkennen, während die Längsachse des Fotos die Tunnelrinne darstellt. Der Riss aus Abbildung 18 ist extra (links unten) hervorgehoben.

Tabelle 15: Zustandsbenotungen der Blöcke 66 und 67 gemäß Katalog potentiell relevanter Schadens- und Zustandsphänomene (Tabelle 1 und Tabelle 13)

Block	Note	Begründung für die Zustandsbenotung
66	U 1	<p><i>Längsrisse:</i> Nicht mehr als 2 Stk. mit >0,5mm (FS 1.2), alle <3mm, ohne Versatz, umschreiben keine geschlossene Fläche → U1</p> <p><i>Querrisse:</i> alle <0,5mm → U1</p> <p><i>Schrägrisse:</i> nicht mehr als 2 Stk mit >0,5mm (FS 1.5), kein Versatz, umschreiben keine geschlossene Fläche → U1</p> <p>Keine Netzsrisse, keine Verformungen, keine Abplatzungen, keine Hohlstellen → U1</p>
	S 4	<p><i>Blockfuge</i> mit Wasserzutritt im Frosteinwirkungsbereich (FS1.13) → S4</p> <p><i>Längsrisse</i> >0,5mm feucht oder zeitweise wasserführend im Frosteinwirkungsbereich (FS 1.2, FS 1.14) → S3</p>
66	D 4	<p><i>Blockfuge</i> mit Wasserzutritt im Frosteinwirkungsbereich (FS1.13) → D4</p> <p><i>Längsrisse</i> >0,5mm feucht oder zeitweise wasserführend (Sinterspuren) im Frosteinwirkungsbereich (FS 1.2, F1.14) → D3</p>

67	U 1	<i>Längsrisse</i> : alle <0,5mm, kein Versatz, umschreiben keine geschlossene Fläche → U1 <i>Querrisse</i> : >0,5mm (FS 1.3) nicht mehr als 2 Stk je Ulme, kein Versatz. → U1 <i>Sichelförmiger Riss</i> >0,5 mm bei Blockfuge (FS 1.5) umschreibt geschlossene Fläche, kein Versatz → U1 Keine Netzsrisse, keine Verformungen, keine Abplatzungen, keine Hohlstellen → U1
	S 4	<i>Blockfuge</i> mit Wasserzutritt im Frosteinwirkungsbereich (FS1.13) → S4 <i>Längsrisse</i> >0,5mm feucht oder zeitweise wasserführend im Frosteinwirkungsbereich (FS 1.2, FS 1.14) → S3
	D 4	<i>Blockfuge</i> mit Wasserzutritt im Frosteinwirkungsbereich (FS1.13) → D4 <i>Längsrisse</i> >0,5mm feucht oder zeitweise wasserführend (Sinterspuren) im Frosteinwirkungsbereich (FS 1.2, F1.14) → D3

6.2.5 Vergleich der klassischen (händischen) Tunnelinspektion mit einer virtuellen Tunnelinspektion

Tabelle 16 vergleicht den (Zeit-)Aufwand einer herkömmliche (klassische) Tunnelinspektion mit jenem einer virtuellen Tunnelinspektion (basierend auf einem Tunnelscan, einer virtuellen Begehung und der abschließenden Inspektion der identifizierten Auffälligkeiten Vorort). Der Vergleich ist jedoch nur für den im gegenständlichen Kapitel beschriebenen Tunnel inklusive der speziellen Charakteristika (Autobahntunnel, ca. 2 km Länge, 2 Röhren, keine Zwischendecke) zulässig und inkludiert lediglich die Aufwendungen. Es soll dadurch ein quantitativer Eindruck über das Verlagerungspotential von der Verkehrsfläche hin zum Büroarbeitsplatz vermitteln werden und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 16: Gegenüberstellung einer konventionellen Tunnelprüfung vs. „virtuelle“ Tunnelprüfung inkl. Inspektion der identifizierten Auffälligkeiten am spezifischen Beispieltunnel eines Neubautunnels mit Betoninnenschale.

Aspekt	Klassische, manuelle Tunnelinspektion	Neue, „virtuelle Tunnelinspektion“
Tage mit Verkehrsbeeinträchtigung (z.B. halbseitige Spursperren)	3 Tage für Vorort-Inspektion	2 Tage (1 Tag für Tunnelscan + 1 Tag für gezielte Vorort-Inspektion)
Personal Prüfung	Bei halbseitiger Sperre: 3-4 Personen	<ul style="list-style-type: none"> • „Virtuelle“ Vorbegehung: 1 Person inkl. Schadensvorerfassung • Gezielte Vorort-Inspektion: 2 Personen

Geometrie-aufnahmen	<u>Hoher Aufwand:</u> In der Regel nicht erforderlich, bei Bedarf im Tunnel nur durch händisches Aufmaß oder gesonderte Vermessung möglich	<u>Geringer Aufwand:</u> Erfassung Geometrie in virtueller Umgebung ohne weitere Vorort-Aufnahmen
Schadensdokumentation im Nachgang	Konventionell: Übertragung der Aufnahmeblätter in CAD-System: <ul style="list-style-type: none"> • 1 CAD-Kraft: 5 Tage • 1 Ingenieur für ergänzende Fotodokumentation: 1 Tag • Prüfbericht mit zusammenfassender Zustandsbewertung: 1,5 Tage 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbereitung Tunnelscan: 1 Person (2 Tage) • Ergänzung Schadenserfassung in Software: 1 Person (3Tage) • 1 Ingenieur für ergänzende Fotodokumentation: 1 Tag • Prüfbericht: mit zusammenfassender Zustandsbewertung: 1,5 Tage
GESAMT	16-20 Personentage	13 Personentage

6.3 Zustandsbewertung

Die Innenschale und das Gesamtobjekt wurden im Zuge der Tunnelhauptprüfung 2014 mit der Note 4 gem. RVS 13.03.31 [1] („mangelhaft“) bewertet.

Die Weströhre (RFB Spielfeld) befindet sich in grundsätzlich in einem ausreichendem Zustand. Ausgenommen davon ist der südliche Abschnitt mit starker Rissbildung an Innenschale. Das Rissbild (Radialrisse) weist auf eine eingeschränkte Gebrauchstauglichkeit hin, während Hinweise auf eine eingeschränkte Tragsicherheit nicht vorliegen.

Wasserzutritte im südlichen Tunnelabschnitt, vor allem im Bereich von Block 66, weisen darauf hin, dass das primäre Entwässerungssystem der Ulmendrainagen vor allem im Winter bei Frost eingeschränkt gebrauchstauglich/funktionsfähig ist. Ulmendrainagen sind meist trocken, trotzdem gibt es zeitweise Wasserzutritte in den Fahrraum durch Risse im Gewölbe welche im Winter zu Eisbildung führen.

Der Gesamtzustand wird als mangelhaft bewertet.

Die Aufnahmeblätter (Tunnelscan mit ergänzter händisch eingetragener Schadenserfassung) sind im Anhang enthalten. Auf Basis der Schadensdokumentation erfolgte eine Bewertung aller Innenschalenblöcke (87 Stk.) nach dem Schema des Kapitels 5.4.2 (siehe Tabelle 13).

Das Gesamtobjekt lässt sich hinsichtlich der Maxima für U, S und D analysieren. Daraus ergeben sich U3, S4 und D4. Aufgrund des Gesamtmaximums der drei Kategorien U, S, D ergibt sich ebenfalls die Note „4“. Dies entspricht der gem. aktueller RVS vergebenen Bauwerksnote. Die beiden Auswerteverfahren bzw. Bewertungsschemata würden demnach bei

einer prioritätszentrierten Auswertung zur gleichen Gesamtbewertung kommen. Die Gesamteinschätzung des Bauwerks nach dem Schema des Kapitels 5.4.2 kommt somit inhaltlich zu einem qualitativ vergleichbaren Ergebnis.

Für eine substanzwertorientierte Auswertung ist eine Betrachtung der Streuung der Zustandsnoten über das Blockkollektiv erforderlich. Die Einfärbung entsprechend der Farbcodierung der Tabelle 10-Tabelle 12 verdeutlicht jedoch, dass ein Großteil der Blöcke in sehr gutem oder gutem Zustand (Note U1, S1, D1) sind, während sich die schlechteren Noten (S3, S4, D3, D4) auf eine geringe Anzahl der Blöcke beschränkt.

Das arithmetische Mittel der Teilnoten beträgt für die Tragfähigkeit $U=1,3$, die Gebrauchstauglichkeit $S=2,1$ und die Dauerhaftigkeit $S=2,0$. Diese Mittelwerte sind von geringer Aussagekraft über den tatsächlichen Abnutzungsvorrat und Substanzwert. Eine Darstellung in Form eines Histogramms (vgl. Abbildung 20) vermittelt hingegen eine kompakte Übersicht, wie sich der Zustand über die Tunnelröhre verteilt und welche Blöcke in absehbarer Zeit Interventionen der Instandhaltung erfordert.

Tabelle 17: blockweise Zustandsbenotung U, S, D

Block Nr.	U	S	D	Block Nr.	U	S	D
1	1	1	1	44	1	3	3
2	3	2	2	45	1	3	3
3	2	4	2	46	1	3	3
4	2	4	2	47	1	1	1
5	3	3	3	48	1	1	1
6	3	3	3	49	1	1	1
7	1	1	1	50	1	1	1
8	1	1	1	51	1	1	1
9	1	1	1	52	1	1	1
10	1	1	1	53	1	1	1
11	1	1	1	54	2	4	3
12	1	1	1	55	2	4	3
13	1	1	1	56	1	3	3
14	1	1	1	57	2	3	3
15	1	1	1	58	1	4	4
16	1	1	1	59	1	4	4
17	1	1	1	60	1	4	4
18	1	1	1	61	1	4	4
19	1	1	2	62	1	4	4
20	1	3	3	63	1	1	1
21	2	3	3	64	3	3	3
22	3	3	3	65	1	4	4
23	2	3	3	66	1	4	4
24	1	1	2	67	1	4	4
25	1	1	1	68	1	1	1
26	1	3	3	69	1	1	1
27	1	3	3	70	1	1	1
28	2	3	3	71	1	1	1
29	2	3	3	72	1	1	1
30	1	1	1	73	1	1	1
31	2	4	3	74	1	1	1
32	2	4	3	75	1	1	1
33	2	2	2	76	1	1	1
34	1	1	1	77	1	1	1
35	2	4	3	78	3	3	3
36	2	2	2	79	1	1	1
37	2	4	3	80	2	4	3
38	2	4	3	81	2	4	4
39	1	1	1	82	1	4	4
40	1	1	1	83	1	1	1
41	1	1	1	84	1	1	1
42	1	2	1	85	1	1	1
43	1	1	1	86	1	1	1
				87	1	1	1

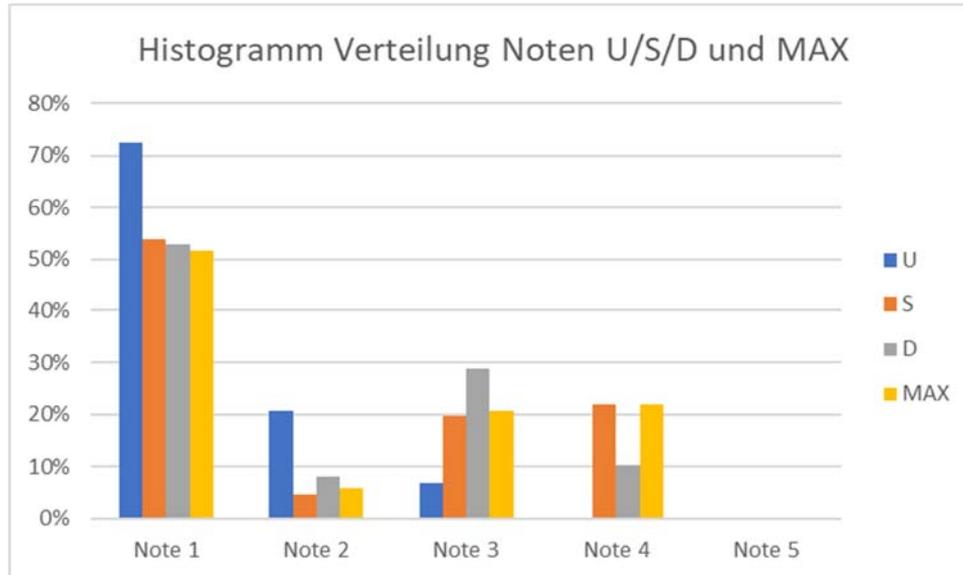


Abbildung 20: Histogramm Zustandsnotenverteilung U, S, D und „RVS“

Abbildung 20 liefert in übersichtlicher Form nachfolgende Informationen:

- Das Tragfähigkeitsniveau ist generell hoch: Über 90% der Blöcke weisen Note U1 oder U2 auf, weniger als 10% der Blöcke die Note U3, was jedoch weiterhin einem zulässigen Sicherheitsniveau entspricht.
- Die Gebrauchstauglichkeit ist ebenfalls im Großteil der Blöcke gegeben, wobei rd. 40% der Blöcke die Note S3 bzw. S4 aufweisen. Der Anteil der „schlechteren“ Blöcke ist hier größer als beim Tragsicherheitsniveau.
- Bei der Dauerhaftigkeit ist ersichtlich, dass ein relevanter Anteil, nämlich ebenfalls rd. 40% der Blöcke die Note D3 oder D4 aufweisen. Für diese Blöcke lässt sich erwarten, dass diese schnellere Zustandsübergänge in ihren U- und S-Noten haben werden, als die übrigen Blöcke. Die betroffenen Blöcke müssen aktuellen nicht zwangsläufig eine schlechte U- oder S-Bewertung haben.
- Ergänzend ist zu Vergleichszwecken die Kategorie „MAX“ dargestellt, welche das blockspezifische Maximum der drei Noten U, S, D (analog einer prioritätsorientierten Auswertung des Status Quo) repräsentiert.

Die blockweise Differenzierung ermöglicht also eine substanzwertorientierte Prognose der Zustandsentwicklung des Tragsicherheitsniveaus und der Gebrauchstauglichkeit, indem die hinterlegten Alterungskurven blockspezifisch über die Teilnote D parametrisiert werden. Die daraus ermittelte Prognose lässt sich wiederum analog der Abbildung 20 in einem Prognose-Histogramm darstellen.

Auf Basis diverser Auswertungen lassen sich Szenarien im Rahmen der Instandhaltungsplanung entwickeln: Das Histogramm in Abbildung 21 zeigt folgende Gruppierung von zusammengefassten Teilnoten:

- USD: blockspezifisches Maximum aus Teilnoten U, S, und D
- US: blockspezifisches Maximum aus Teilnoten U und S
- D: blockspezifische Teilnote D

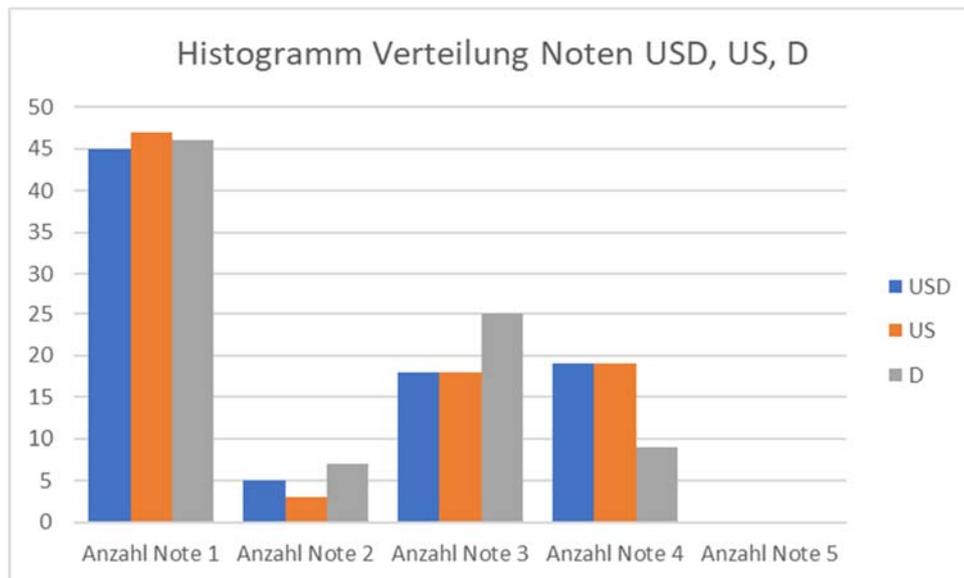


Abbildung 21: Histogramm Zustandsnotenverteilung U, S, D und „RVS“

Im Sinne einer vorausschauenden Instandhaltungsplanung können Auswertung für verschiedene Zielfunktionen gelöst werden, z.B. an welchen Blöcken liefern welche Maßnahmen bei begrenztem Zeit- und Mittelbudget den höchsten Gewinn an Substanzwerterhöhung oder -erhaltung und somit den

größten Zuverlässigkeitsgewinn der Anlage?

Naturgemäß sind jene Blöcke hierfür Kandidaten, welche bereits eine deutlichere Alterung in Kombination einer beeinträchtigten Dauerhaftigkeit erfahren haben.

Die Anzahl der Blöcke mit $US \geq 3$ und $D \geq 4$ beträgt 9. Die Anzahl der Blöcke mit $US \geq 3$ und $D \geq 3$ beträgt 34. Diese Menge repräsentiert diejenigen Blöcke, bei denen Maßnahmen zur Aufrechterhaltung eines sicheren Betriebes in abgestufter Fristigkeit erforderlich werden.

Eine gezielte Instandsetzungsplanung am Objekt nach Priorisierung der Schadstellen ist auch schon bisher schon möglich. Durch die hier vorgestellte blockspezifische Auswertung

wird es aber möglich, das Kollektiv im gesamten Netz bzw. entlang eines Korridors für verschiedene Szenarien einzugrenzen und einen langfristigen strecken- oder netzbezogenen Mittelabfluss abzuschätzen.

Auch wenn die tatsächlichen Maßnahmen inkl. Zeitbedarf und Kosten von weiteren Faktoren wie Streckensperrungen u.dgl. abhängen, bietet die obigen Methoden bei der Entwicklung der mittel- bis langfristigen Instandhaltungsstrategien mit höherer Aussagekraft als das Gesamtnotensystem der aktuellen Regelwerke [1] [4].

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Tunnelbau, Arbeitsausschuss Leistungsbild Bestandsprüfung von Tunnel: „Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS) 13.03.31, Straßentunnel – baulich konstruktive Teile“, Wien, 2013.
- [2] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Straßenoberbau, Arbeitsausschuss Strategische Erhaltungsplanung: „Richtlinien und Vorschriften (RVS) 13.01.16, Bewertung von Oberflächenschäden und Rissen auf Asphalt- und Betondecken, Wien, 2013
- [3] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Tunnelbau, Arbeitsausschuss Leistungsbild Bestandsprüfung Tunnel: „Richtlinien und Vorschriften (RVS) 06.02.31, Leistungsbilder Bestandsprüfung – Tunnel und artverwandte Kunstbauten, Wien, 2013.
- [4] ÖBB-Infrastruktur AG Regelwerk (2012): 06.01.02 Konstruktiver Ingenieurbau: Instandhaltung – Instandhaltungsplan. Stand 21.12.2012.
- [5] UIC Union Internationale des Chemins de Fer: UIC-Kodex 779-10: Grundsätze für die Verwaltung und Instandhaltung bestehender Eisenbahntunnel. 2. Ausgabe. Paris, September 2012
- [6] UIC Union Internationale des Chemins de Fer: Katalog von Schäden und ihren Ursachen in alten Tunnel. Working Group „Tunnel Maintenance“. 2003.
- [7] Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA - e.v.: Arbeitskreis Instandsetzung von Verkehrstunneln, Sachstandsbericht 2017: „Instandsetzungsstrategien- und -verfahren für Verkehrstunnel“. 2017
- [8] Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG): „Richtlinie für die Geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb“. 2. Auflage. Salzburg. 2007.
- [9] ON-Regel ONR 24008: „Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahn- und Straßenbrücken“. 2006.

- [10] WÖRNER J.-D., BERGMESTER K. (2013): „Sicherheit Risikoakzeptanz, Nutzungs-, Lebensdauer und das richtige Maß“; Betonkalender 2013. Ernst+Sohn. 2013.
- [11] ÖVBB Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Richtlinie: Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen, 2009.
- [12] Gerhard Paar, Maria d. P. Caballo-Perucha, Heiner Kontrus, Oliver Sidla, "Optical crack following on tunnel surfaces", Proc. SPIE 6382, Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology IV, 638207 (20 October 2006); doi: 10.1117/12.685987.
- [13] Charbonnier, Pierre & Chavant, P & Foucher, Philippe & Muzet, Valerie & Prybyla, D & Perrin, T & Grussenmeyer, Pierre & Guillemin, Samuel. (2013). Accuracy assessment of a canal-tunnel 3D model by comparing photogrammetry and laserscanning recording techniques. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XL-5/W2. 171-176. 10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-171-2013
- [14] Scaioni, M., Barazzetti, L., Giussani, A. et al. Earth Sci Inform (2014) 7: 83. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0152-8>
- [15] <https://ambergtechnologies.com/de/>
- [16] Bauer, Arnold & Gutjahr, Karlheinz & Paar, Gerhard & Kontrus, Heiner & Glatzl, Robert. (2015). Tunnel Surface 3D Reconstruction from Unoriented Image Sequences.
- [17] RIEGL-VMX-2HA: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VMX-2HA_Infosheet_2017-09-14_Preliminary.pdf
- [18] LEICA-PEGASUS TWO-ULTIMATE: https://leica-geosystems.com/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus_two-ultimate
- [19] GPR Messungen: <http://www.3dgeoimaging.com/gpr-slice/>

AMBITION

Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und
Bewertung von Eisenbahn- und Straßentunnel

Messmethoden zur Detektion von Innenschalenstärken & Hohlräumen sowie deren Integration in Bauwerks- informationssysteme – Current Practice & State-of-the-Art

Deliverable D5

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2015

Version 0.8

Versionshistorie

Version	Änderung	Bearbeiter
0.1	Berichtsvorlage, Formatvorlagen, Gliederung	STEFAN, GRUNICKE
0.2	Kapitel 3	METT, KONTRUS
0.3	Einleitung, Kapitel 1, Kapitel 2, Kapitel 4	JUNG
0.4	Review AIT	JUNG
0.5	Review UHG	GRUNICKE
0.7	Review DIBIT	METT, KONTRUS
0.8	Final Review	STEFAN

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	3
1 Anwendbarkeit bestehender Messtechniken im Tunnel Asset Management	4
2 Testung und Evaluierung neuer Messmethoden	9
2.1 Einsatz von Bodenradar zur Detektion von Hohlräumen und Schalenstärken	9
2.2 GPR-Versuchsaufbau im Selzthaltunnel	12
2.3 Interpretation der Messergebnisse	14
2.4 Empfehlungen für zukünftige Versuchsanordnungen von Bodenradar in Tunnel	15
3 Integration der GPR-Messergebnisse in ein Bauwerksinformationssystem	19
3.1 Einführung in Bauwerksinformationssysteme	19
3.2 Möglichkeiten der Datenanalyse in einem Bauwerksinformationssystem	20
3.2.1 Visuelle Analysen:	22
3.2.2 Statistische Analysen:	23
3.2.3 Auswirkungen der Ergebnisse von AMBITION auf zukünftige Bauwerksinformationssysteme	23
3.3 Einbindung von geophysikalischen Daten in ein Bauwerksinformati- onsystem	25
3.4 Adaptierung eines Tunnelinformationssystemes für Building Information Modelling (BIM-Anwendungen)	27
4 Schlussfolgerungen	30
5 Anhang	32
Literaturverzeichnis	42

Einleitung

Zu den Aufgaben von Ingenieuren zählt u.a. die Inspektion, Bewertung und Instandhaltung der bestehenden zivilen (Verkehrs-)Infrastruktur. Hierzu zählen Bauwerke und Sonderkonstruktionen wie z.B. Tunnel, Brücken, Straßen und Rohrleitungen.

In den vergangenen Jahr(zehnt)en wurde aufgrund mehrerer Brandkatastrophen in Tunnel (1999: Mont-Blanc-Tunnel und Tauerntunnel, 2001: Gotthard-Tunnel) sowie des zügigen Ausbaus der bestehenden Straßen- und Schieneninfrastruktur (u.a. Semmering, Koralpe, Brenner) massiv in den Tunnel(neu)bau investiert, sodass deren Anzahl und Gesamtlänge stetig ansteigen. Ferner befindet sich ein Großteil der Tunnel, die im Laufe der letzten 150 Jahren errichtet wurden, nach wie vor in Betrieb.

Der Einsatz verschiedener (geo)physikalischen Messmethoden zur Untersuchung der Tunnelschale wird seit über 20 Jahren intensiv erforscht [1]. Vor allem im asiatischen Raum gelangen zusehends neue Verfahren wie Microtremor, Boden-/Georadar (GPR, Ground Penetrating Radar), Ultraschall-Tomographie und verschiedene seismische Verfahren zur Anwendung [2] [3] [4].

Zur Detektion von Hohlräumen und dem generellen Schichtaufbau wird seit einigen Jahren verstärkt Boden-/Georadar eingesetzt, welches mittlerweile auch Eingang in verschiedene Richtlinien und Normen (z.B. DB RIL 853 [5]) gefunden hat. Die Erkundung des Tunnelzustandes mittels GPR dient insbesondere als Basis für Ansatzpunkte von Kernbohrungen. Neben der Dicke der Innenschale liefert die Messung auch Hinweise auf etwaige Hohlräume hinter der Tunnelauskleidung sowie den Schichtenaufbau hinter der Schale. In der DB RIL 853 [5] fehlen jedoch generelle Empfehlungen für den Einsatz von Georadar, die Auswahl eines geeigneten Antennentyps (boden-gekoppelt vs. luft-gekoppelt), zu verwendende Frequenzen sowie Hinweise auf potentielle Einflussgrößen, Einsatzbereiche und Limitierungen.

Im gegenständlichen Arbeitspaket 6 wurde Boden-/Georadar auf seine generelle Eignung zur Detektion von Hohlräumen in bzw. hinter der Tunnelauskleidung getestet. In einem Pilotversuch im Selzthaltunnel wurde eine 200/600 MHz GPR-Kombination entlang der Tunnelaibung geführt und die Messergebnisse im Anschluss mittels unterschiedlicher Processing-Anwendungen ausgewertet. Der gegenständliche Deliverable D5 beschreibt das Testdesign, die durchgeführten Analysen und Interpretation der Ergebnisse sowie Empfehlungen für den Einsatz in Bestands- und Neubautunnel. Ferner erfolgte eine Integration der Messergebnisse in eine marktübliche Analysesoftware und die anschließende Visualisierung der Informationen in Verbindung mit einem digitalen Tunnelmodell.

1 ANWENDBARKEIT BESTEHENDER MESSTECHNIKEN IM TUNNEL ASSET MANAGEMENT

Der Zweck einer Inspektion besteht in erster Linie darin, zu prüfen, ob eine bestehende Infrastruktur, die seit Jahren funktionsfähig ist, weiterhin sicher verwendet werden kann, d.h. den gültigen Sicherheitsanforderungen entspricht. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wird angestrebt, Inspektionen weitgehend ohne negative Auswirkungen auf das Bauwerk oder den Bauteil durchzuführen, weshalb Methoden der zerstörungsfreien Prüfung häufiger zum Einsatz gelangen als destruktive Methoden [6]. Zerstörende Mess-/Prüfmethoden (z.B. Bohrkernentnahmen) können zerstörungsfreie (non-destructive) Verfahren durch Validierung bzw. Kalibrierung der Ergebnisse jedoch unterstützen.

Wie man Deliverable 1 entnehmen kann, hat es sich in der Praxis bewährt, verschiedene Messmethoden miteinander zu kombinieren. Die gängigsten (geo)physikalischen Mess- und Prüfmethoden sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Methoden, die tiefenrelevante Informationen und eindeutige Hinweise zur Hohlraumdetektion beisteuern sind grün hinterlegt, während in hellblauer Farbe jene Methoden ausgewiesen werden, die lediglich Indizien bez. tiefenrelevante Informationen/Hohlräumen liefern.

Tabelle 1: Messmethoden im Tunnelbau zur Schadensdetektion

	Bohrkern	Impuls-Echo	Impact-Echo	Luft-GPR	Boden-GPR	Impulse Response	3D-Laser	Elektro-Statistisch	Elektro-Magnetisch
zerstörungsfrei	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
berührungslos	NEIN	NEIN	NEIN	JA	NEIN	JA	JA	NEIN	NEIN
Oberfläche	JA	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA	JA	JA	JA
geringe (wenige cm) Eindringtiefe	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Tiefe	JA	JA ¹	JA ¹	JA	JA	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
Risse	JA	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA	JA	JA	JA
Abplatzung	JA	JA	JA	NEIN	NEIN	JA	JA	NEIN	NEIN
Hohlraum	JA	JA ¹	JA ¹	JA	JA	JA ¹	NEIN	NEIN	JA ¹
Oberflächenänderung	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA	JA	NEIN	NEIN
Nassstellen	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA	NEIN

¹bei bekannten Bauteilparametern

Neben den Impuls- bzw. Impact-Echo-Verfahren eignen sich insbesondere luft- und boden-gekoppelte Georadarverfahren zur Ermittlung des Schichtaufbaus hinter der Tunnelschale. Für sämtliche Echoverfahren gilt, dass Kenntnisse der Bauteilparameter in Hinblick auf Interpretation der Messergebnisse von großem Vorteil sind. In Bezug auf die Detektion von Hohlräumen sind zusätzlich zu den genannten Verfahren noch Impulse-Response (IR) und elektromagnetische Verfahren zu erwähnen. Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, weisen die beide Bodenradarmethoden Vorteile hinsichtlich der Bedienbarkeit und dem Messaufwand auf bez. ermöglichen eine tiefenorientierte Erfassung der Schichten und Hohlräumen.

Auf Grund der einfacheren Montage auf ein (Mess-)Fahrzeug sowie des uneingeschränkten Einsatzes der Messantenne (keine Beeinflussung durch Oberflächenrauigkeiten und Hindernissen) wird derzeit dem luft-gekoppeltem Bodenradar der Vorzug gegenüber dem boden-gekoppelten (auch: bauteil-gekoppelten) Bodenradar¹ gegeben [7]. Dem steht jedoch der Nachteil gegenüber, dass oftmals keine Aufzeichnungen über den Abstand der Antenne zur Messoberfläche vorliegen bzw. ein konstanter Abstand zwischen Messgerät und Tunnelröhre schwer einzuhalten ist. Dies ist bei der Auswertung der Rohdaten unbedingt zu berücksichtigen und kann zu Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Tiefenlage führen.

Auf Grund der hohen Messgeschwindigkeiten eignet sich das Bodenradar generell für eine rasche und zerstörungsfreie Erfassung der Hohlräume im Tunnel. Mit diesem Verfahren können bei einer periodischen Messung auch Veränderungen im Schichtaufbau bzw. Hinterbau des Tunnels detektiert und verfolgt werden. Voraussetzung für den Einsatz im Tunnel-Monitoring sind jedoch vergleichbare Messbedingungen (Jahreszeit, Temperatur, Feuchtigkeit etc.). Auf Grund der zumeist gleichartigen Bedingungen in Tunnel lassen sich viele Prozessschritte relativ leicht automatisieren. Neben einer höheren Aufnahmege-
schwindigkeit ermöglicht dies zeitnahe Bewertungsgrundlagen für den Bauwerksprüfer bzw. Anlagenverantwortlichen. Zeitnah bedeutet in diesem Zusammenhang, dass bereits während der Messung auf Auffälligkeiten geachtet wird und nicht erst die Auswertung im Zuge des Data Processing abgewartet werden muss.

Ultraschall-Verfahren, Impact-Echo-Verfahren oder „Portable seismic property analyzer“ (PSPA) werden derzeit hauptsächlich im Forschungsbereich eingesetzt und weisen gegenüber den GPR-Methoden v.a. im Zeit- und Personalaufwand große Nachteile auf. Gemäß [8] eignen sie sich nur bedingt für die Hohlraumdetektion und werden daher zumeist als Zusatzüberprüfung lokaler Verdachtsstellen eingesetzt. Eine deutliche Verbesserung der

¹Im gegenständlichen Bericht wird die Bezeichnung „boden-gekoppeltes Bodenradar“ verwendet und bezeichnet eine Messung mit unmittelbarem Kontakt zur Tunnelschalenoberfläche.

Scanauflösung sowie eine Reduktion des Zeit- und Personalaufwandes bedarf weiterführender Forschungen auf dem Gebiet der Hohlraumdetektion mittels GPR.

Eine entsprechende Parallelisierung und Automation des Aufnahmeverfahrens vorausgesetzt, eignet sich das boden/bauteil-gekoppelte Bodenradar derzeit am besten für Bauwerkserkundungen in Bezug auf Hohlräume und Schichtaufbau ohne auf den Abstand zwischen Antenne und Bauteil Rücksicht nehmen zu müssen (wie es bei luft-gestützten Georadar der Fall ist). Der häufigere Einsatz des luft-gekoppelten Bodenradars hängt v.a. mit der Historie im Bereich Straßenbelagsuntersuchungen zusammen, wo traditionell nur (luft-gekoppelte) Hornantennen zum Einsatz gelangen.

Die wichtigsten in Tabelle 1 dargestellten Methoden werden im Folgenden bezüglich ihrer spezifischen Vor- und Nachteile sowie der generellen Eignung im Sinne einer Schicht- bzw. Hohlraumerkennung kurz erörtert:

Impuls-Echo-Verfahren:

- Methode: Beim Impuls-Echo-Verfahren wird ein definierter Sendeimpuls über einen Leistungsverstärker auf einen Ultraschall-Prüfkopf gesendet, welcher das elektrische Signal in eine mechanische Welle transformiert und in das Bauwerk einbringt.
- Einsatzbereich: Feststellung von Ablösungen und Hohlräumen im Beton.
- Vorteile: Die Methode weist eine hohe Durchdringungskraft bei hoher Empfindlichkeit auf und kann stark automatisiert werden.
- Nachteile: Die Bedienung erfordert erfahrene Techniker und ist nicht in der Lage, Anomalie-Tiefen im Spritzbeton zu erfassen. Hoher Zeit- und Personalaufwand.

Impact-Echo-Verfahren:

- Methode: Ähnlich dem Impuls-Echo -Verfahren wird beim Impact-Echo Verfahren die „Antwort“ des Bauwerks mittels Körperschall-Sensoren aufgenommen. Die Anregung der Bauteile erfolgt durch einen mechanischen Stoß, der eine transiente Druckwelle im Bauwerk erzeugt (zumeist mittels eines kleinen Hammers o. Ä.).
- Einsatzbereich: Diese Methode wird v.a. zur Abschätzung der Dicke von Betonplatten oder Betonwände eingesetzt.
- Vorteile: Die Methode weist eine hohe Durchdringungskraft bei hoher Empfindlichkeit auf und kann stark automatisiert werden.
- Nachteile: Die Bedienung erfordert erfahrene Techniker bzw. generell hohen Zeit- und Personalaufwand. Es werden je nach angewandter Methode

Koppler/Kopplungsmittel (Ausnahme: elektromagnetischen Schallwandler) benötigt, um eine effektive Übertragung der Ultraschallwellenenergie zwischen den Wandlern und den zu inspizierenden Teilen zu gewährleisten.

Bodenradar:

- Methode: Beim Radar-Verfahren wird, ähnlich wie beim Ultraschall-Verfahren, zumindest ein Sender und ein oder mehrere Empfänger benötigt. Die Prüfung erfolgt mittels elektro-magnetischen Wellen im Frequenzbereich von 20–2500 MHz, wovon Eindringtiefe und erreichbare Auflösung abhängen.
- Einsatzbereich:
 - *Luftgestütztes Bodenradar:* Zeigt Bereiche mit hoher Feuchtigkeit oder geringer Dichte (hohe Luftporen) an. Solche Bereiche können Problemzonen innerhalb oder hinter der Tunnelauskleidung darstellen.
 - *Bodengestütztes Bodenradar:* Das Gerät kann Anomalien in jeder Tiefe innerhalb oder unmittelbar hinter Tunnelauskleidungen in Abhängigkeit der Frequenz erkennen.
- Vorteile:
 - *Luftgestütztes Bodenradar:* Hohe Fahrgeschwindigkeiten (bis zu 30 km/h) durch Montage an einem Fahrzeug möglich.
 - *Bodengestütztes Bodenradar:* Direkte Ankopplung an das zu untersuchende Objekt → gute tiefenmäßige Zuordnung von Schichten und Anomalien. Hohe Messgeschwindigkeiten bei entsprechender Automatisierung möglich.
- Nachteile:
 - *Luftgestütztes Bodenradar:* Eine Detektion von Schichten bzw. Hohlräumen ist schwierig. Derzeit keine vollständige Automatisierung möglich sowie parallel angeordneten Sender/Antenne(n)-Einheiten standardmäßig nicht verfügbar (nur Pilotkonstruktionen). Detailauswertung derzeit nicht in Echtzeit möglich.
 - *Bodengestütztes Bodenradar:* Derzeit keine vollständige Automatisierung vorhanden sowie keine parallel angeordneten Sender/Antenne(n)-Einheiten standardmäßig verfügbar (nur Pilotkonstruktionen). Detailauswertung nicht in Echtzeit möglich.

Impulse-Response-Verfahren:

- Methode: Über einen sogenannten Impaktor werden Spannungswellen durch das getestete Element gesendet. Die Reaktion auf die Eingangsbelastung wird normalerweise mit einem Geophon gemessen.
- Einsatzbereich: Die Erkennung von Hohlräumen oder schlecht verdichteten Bereichen unterhalb oder hinter plattenartigen Strukturen ist eine der Hauptanwendungen des Impulse-Response-Verfahrens.
- Vorteile: Punktgenaue Detektion von Unstetigkeiten.
- Nachteile: Derzeit keine vollständige Automatisierung (Messung, Auswertung) möglich bzw. benötigt das Verfahren erfahrene Techniker. Es sind nur punktuelle Informationen – 1 Messung = 1 Punkt – möglich; flächenhafte Aussagen nur mittels unverhältnismäßig großem zeitlichen und personellen Aufwand möglich.

Elektro-magnetische Verfahren:

- Methode: Die Verteilung des magnetischen Flusses wird durch die Anwesenheit von (magnetischem) Stahl verzerrt, was relativ einfach messbar ist. Durch dieses magnetische Streuflussverfahren ist jedoch keine direkte Aussage über eventuelle Tunnelschäden möglich.
- Einsatzbereich: Positionskontrolle von Stahlbewehrungen.
- Vorteile: Keine im Rahmen der Schicht- oder Hohlraumdetektion.
- Nachteile: Eine Detektion von Schichten bzw. Hohlräumen ist nicht möglich. Hoher Zeit- und Personalaufwand.

2 TESTUNG UND EVALUIERUNG NEUER MESSMETHODEN

2.1 Einsatz von Bodenradar zur Detektion von Hohlräumen und Schalenstärken

Sowohl luft- als auch boden-gekoppeltes Bodenradar basiert auf dem Prinzip der Messung der durch Refraktion oder Reflexion zurückgeworfener Radarwellen (elektromagnetischer Strahlung) im Mikrowellenbereich.

Geo-/Bodenradar verwendet hochfrequente (polarisierte) Wellen, zumeist zwischen 10 MHz – 2,6 GHz. Ein Sender sendet Radarwellen in den Boden, welche auf unterirdische Objekte oder Grenzschichten mit unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit (σ) und Dielektrizitätskonstante treffen. Die reflektierten, gebrochenen oder an die Oberfläche gestreuten Wellen werden wiederum von einer Empfängerantenne aufgezeichnet. Neben der elektrischen Leitfähigkeit σ bestimmt auch der Dielektrizitätskonstante ϵ_r die Qualität der Ergebnisse.

Der effektive Tiefenbereich einer GPR-Messung wird durch die Eigenschaften des Untergrundes (Leitfähigkeit, Dielektrizitätskonstante des Mediums), die übertragene Mittenfrequenz² sowie die Strahlungsleistung begrenzt. Höhere elektrische Leitfähigkeiten dämpfen die eingebrachten elektromagnetischen Wellen und reduzieren deren Eindringtiefe. Aufgrund frequenzabhängiger Dämpfungsmechanismen im Boden dringen höhere Frequenzen nicht so tief in den Untergrund ein wie tiefe Frequenzen. Höhere Frequenzen ermöglichen jedoch eine bessere Auflösung. Somit ist die Betriebsfrequenz immer ein Kompromiss zwischen Auflösung und Durchdringungstiefe.

Trockene sandige Böden (ohne Wasser und im Wasser gelöste Stoffe) sowie massive trockene Materialien wie Granit, Kalkstein und Beton weisen eine geringe Leitfähigkeit auf, wodurch die Eindringtiefe von GPR-Wellen bis zu 15 Meter beträgt. Im Gegensatz dazu kann die Eindringtiefe bei feuchten oder ton- bzw. schluffhaltigen Böden und Materialien mit hoher elektrischer Leitfähigkeit nur wenige Zentimeter betragen. Ein hoher Wassergehalt im Boden/Material oder ein vorhandener Wasserspiegel bzw. eine lokale Vernässung erlauben Messungen nur bis zu dieser Schicht und verhindern somit Aussagen über darunter- bzw. dahinterliegende Schichten oder Materialien. Auch künstliche Einbauten wie

²geometrische Mittel der unteren und oberen Grenzfrequenz (Übergangsfrequenz) eines Frequenzbands mit einer bestimmten Filterbandbreite.

Rohrleitungen oder dergleichen können zu Abschattungseffekten führen und verhindern genaue Aussagen über darunterliegende Schichten

Stahlbetonbewehrungen können in Abhängigkeit ihrer Geometrie bzw. Rasterverteilung sowie aufgrund des Durchmessers der Bewehrungsstäbe einen Einfluss auf das Ergebnis aufweisen; auch hier ist eine Abhängigkeit von der gewählten Frequenz gegeben. Das bedeutet jedoch, dass bei niedrigeren Frequenzen die Bewehrung im Radargramm nicht mehr sichtbar sind. Bewehrungen im oberflächennahen Bereich (wenige cm) der Tunnelwand sind mit Frequenzen >1 GHz sicherlich zu erfassen, darunterliegende Strukturen oder Anomalien werden jedoch durch die geringe Eindringtiefe nicht mehr abgebildet.

Stahlfaserbewehrte Innenschalen können theoretisch eine Störung der Messung oder eine Verfälschung der Messergebnisse hervorrufen; die Auswirkungen solcher Innenschalen auf die Messungen lassen sich nur durch Testmessungen an Stellen mit exakter Kenntnis des Aufbaues oder bei Kenntnis aller messungsrelevanter Parameter der verschiedenen Bauteile über Berechnungen abschätzen und durch eine Auswahl geeigneter Frequenzen bzw. Frequenzbereiche abmildern.

Weitere Störfaktoren, die eine Georadarmessung beeinträchtigen, verfälschen oder sogar verunmöglichen können sind:

- Stromdurchflossene Oberleitungen
- Kabelrinnen – einerseits als Aussparung in der Tunneloberfläche und durch stromdurchflossene Kabel bzw. Kabelstränge
- Stromdurchflossene Energiekabel für Beleuchtungen, Funkkabel und dgl.
- Abdichtungsfolien³

Der Unterschied zwischen boden-/bauteilgestützten Bodenradar und luftgestützten GPR liegt u.a. in der Geometrie der verwendeten Antennen und (wie der Namen hinweist), ob eine Kopplung mit dem Untergrund stattfindet (boden-/bauteilgestütztes GPR) oder nicht (luftgestütztes GPR). Wie eingangs bereits erwähnt, ist bei luftgestütztem GPR das Messergebnis um den Luftanteil zu korrigieren.

³Auf Grund der geringen Stärke der Abdichtungsfolien (2–3 mm) ist im Allgemeinen eher mit einer (leichten) Dämpfung des Signals als mit einem Ausfall der Messung hinter der Folie zu rechnen. Dies ist in Abhängigkeit zur Einbautiefe und dem eingesetzten Frequenzbereich zu betrachten. Ein sich bildender Wasserfilm entlang der Folie kann aber die Messung an dieser Fläche tatsächlich begrenzen.

Zwecks Kalibrierung der ermittelten Radargramme sollten zusätzliche Messungen (z.B. mittels Kernbohrungen) entlang der Profillinien bzw. in definierter geometrischer Auswertekonfiguration durchgeführt werden. Anderenfalls müssten gesicherte Ausbaupläne zur Kalibrierung und Interpretation der Ergebnisse herangezogen werden.

Die größte Einschränkung hinsichtlich der Verwendung von Bodenradar besteht bei Materialien mit hoher Leitfähigkeit wie z.B. tonigen, salzbelasteten oder wassergesättigte Böden oder bei Vorhandensein flächig ausgebildeten Berg- oder Grundwasserspiegeln. Diese stellen eine Grenzschicht dar, die auch mit Erhöhung der Inputenergie vom Radarsignal nicht durchdrungen werden kann. Die Abstrahlungsleistung kann auch durch Signalstreuung unter heterogenen Bedingungen (u.a. bei steinigen Böden oder Bewehrungen im Betonkörper) begrenzt werden.

Weitere Einschränkungen derzeit verfügbarer GPR-Systeme sind:

- Die Interpretation von Radargrammen bedarf der Erfahrung auf Seiten des Bearbeiters und ist in der Regel nicht intuitiv.
- Um GPR-Messprogramme effektiv konzipieren, durchführen und interpretieren zu können, ist eine Abschätzung der vorherrschenden Bedingungen erforderlich, um die am besten geeignete Messkombination, Messfrequenzen sowie die geeignetsten Filtermethoden im Rahmen der Prozessierung auszuwählen.

Unter Berücksichtigung der besonderen Eigenheiten der jeweiligen Bodenradarmethode und der dargestellten Einschränkungen kann das Bodenradar gute Hinweise zum Schichtaufbau der Tunnelröhre sowie zum Vorhandensein von Hohlräumen innerhalb der Mess-tiefe bei entsprechender Profildicht flächenhaft liefern. Das Georadar kann also ergänzende, flächenhafte Informationen zwischen Aufschlüssen (Bohrungen) liefern; die Aussagekraft einer bauteilgestützten Georadarmessung ist ohne Kalibrierungspunkte oder ohne genaue Kenntnis des Aufbaues eingeschränkt.

2.2 GPR-Versuchsaufbau im Selzthaltunnel

Für eine boden-/bauteilgekoppelte Georadarmessung im Selzthaltunnel waren Adaptionen am Messequipment des AIT notwendig. Da die Messungen entlang der Tunnellaubung (entsprechend früherer Messungen der TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH) durchgeführt wurden, musste die Antennenkombination 200/600 MHz umgebaut werden, um sie manuell entlang der Wandung in verschiedenen Höhen führen zu können. Das adaptierte Messinstrumentarium ist in Abbildung 1 für Messungen in geringer Höhe (links) bzw. für Messungen in 4m Höhe (rechts) dargestellt.



Abbildung 1: Umgebaute 200/600 MHz-Antennenkombination für geringe Messhöhen (links) sowie für Messhöhen bis 4m (rechts).

Die Messungen im Selzthaltunnel fanden am 5.12.2016 in ausgewählten Bereichen des Tunnels während laufenden Generalerneuerung der Tunnelanlage statt. Der Fahrbahnbelag entlang der Versuchsstrecke war im Vorfeld der Messung entfernt worden, wodurch der Untergrund sehr unruhig und in den Randbereichen von Schutt und Leitungen bedeckt war. Die Versuchsanordnung und die Referenzierung auf eine Bezugsgeometrie war dadurch erschwert.

Insgesamt wurden 11 Linien (siehe Abbildung 2 bzw. im Anhang Abbildung 14 - Abbildung 23, Tabelle 2) gemessen, die eine Entsprechung in den „Georadaruntersuchungen Selzthaltunnel“ des TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH haben.

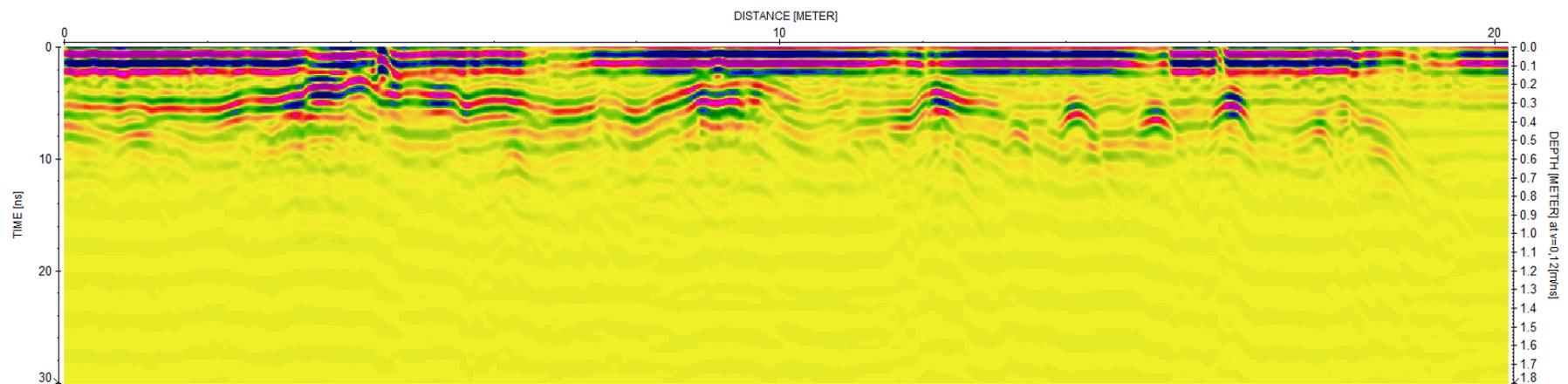
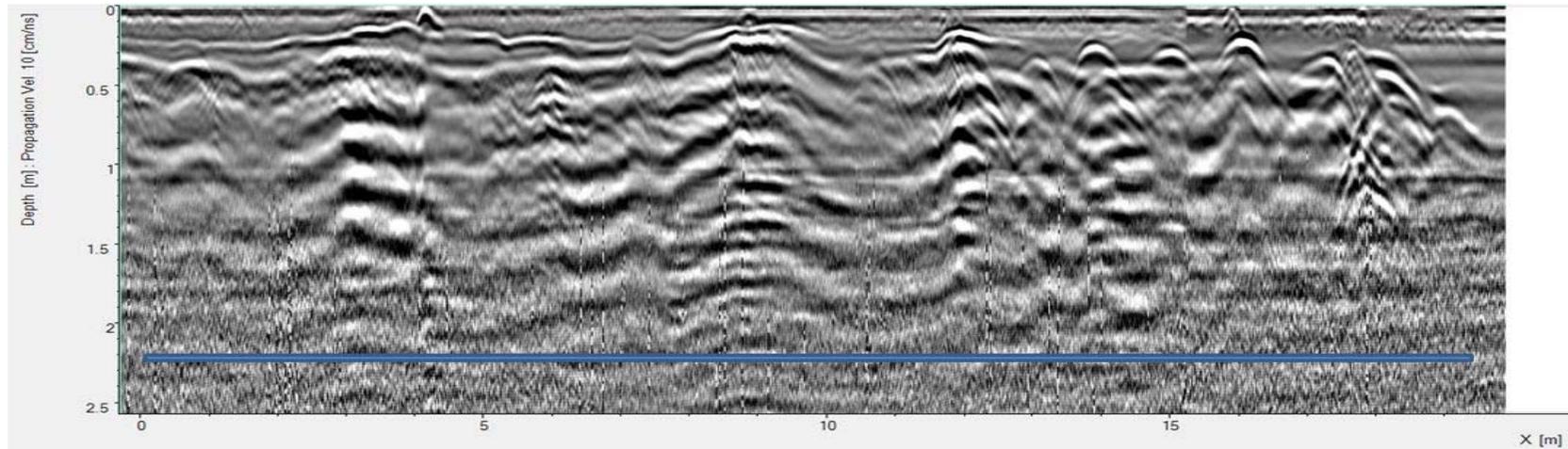


Abbildung 2: Gemessene Linie 4 im Selzthaltunnel (Messrichtung gegen Fahrtrichtung Graz; Linke Fahrbahn (140-160 m); Höhe 2,9 m). Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz. (oben: GRED-Auswertung [blau: Anomalien aus dem TÜV-Bericht]; unten: REFLEX-Auswertung).

Tabelle 2: Gemessene Georadarprofile im Selzthaltunnel. Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz.

Fahrtrichtung	Fahrbahn	Linie	Höhe
Gegen Fahrtrichtung Graz	Linke Fahrbahn (140-160 m)	2	3,7 m
Gegen Fahrtrichtung Graz	Linke Fahrbahn (140-160 m)	3	3,4 m
Gegen Fahrtrichtung Graz	Linke Fahrbahn (140-160 m)	4	2,9 m
Gegen Fahrtrichtung Graz	Linke Fahrbahn (140-160 m)	5	2,6 m
Fahrtrichtung Graz	Rechte Fahrbahn (140-180 m)	6	3,7 m
Gegen Fahrtrichtung Graz	Linke Fahrbahn (70-120 m)	8	1,6 m
Gegen Fahrtrichtung Graz	Linke Fahrbahn (70-120 m)	9	0,9 m
Fahrtrichtung Graz	Rechte Fahrbahn (140-180 m)	10	4,0 m
Fahrtrichtung Graz	Rechte Fahrbahn (140-180 m)	11	4,6 m
Fahrtrichtung Graz	Rechte Fahrbahn (190-350 m)	12	1,0 m
Gegen Fahrtrichtung Graz	Linke Fahrbahn (260-290 m)	13	2,6 m
Gegen Fahrtrichtung Graz	Linke Fahrbahn (70-200 m)	14	2,3 m

2.3 Interpretation der Messergebnisse

Der Selzthaltunnel weist laut Bauleitung folgenden, für Tunnelbauten gleicher Bauart typischen Aufbau auf:

- Außenschale aus Spritzbeton: 10–30 cm (je nach Ausbruch durch Sprengarbeiten, meist bewehrt)
- Innenschale aus Ortbeton: 20–35 cm stark, in der Regel unbewehrt

Die kombinierte Betonstärke der Außen- und Innenschale beträgt somit zwischen 30–50 cm, kann jedoch auf Grund von Überprofilen im Zuge des Vortriebs mitunter höher sein.

In allen durchgeführten Messungen zeigt sich eine Reflexion der Radarwellen über nahezu die gesamten Profillängen, die als Übergang von Beton zu (anstehenden) Gestein interpretiert werden kann. Die Gesamtbetonstärken entlang der Ulmen beträgt zwischen 25–90 cm und maximal 120 cm (vgl. Linie 9; [Abbildung 19](#)). Bereiche mit Schlitzten in der Innenschale wie in [Abbildung 19](#) bei 8–9 m, 17–19 m und bei 29 m verhindern den Einblick in die

Betonschale durch den Luftpolster zwischen Antennen und Beton. Kleine Furchen und Fräsungen beeinträchtigen ferner die Ankopplung an den Untergrund und somit die Erkundung. Eine Untergliederung des Betonaufbaus in Innen- und Außenschale ist mit dem gewählten Antennensystem und der doch sehr ähnlichen Eigenschaften der Betonteile (Vgl. Leitfähigkeit, Dielektrizitätskonstante) nicht möglich, sollte aber bei Kenntnis der Maschenweite der verwendeten Bewehrungsgitter und Auswahl der Frequenzen möglich sein.

Die den Abbildungen hinzugefügten blauen Balken kennzeichnen die Lage von Anomalien (Hohlräume, auffällige Strukturen, Unstetigkeiten etc.), welche im TÜV Bericht beschrieben wurden. Diese Interpretation ist durch die Wiederholungsmessung nicht nachvollziehbar dokumentiert. In den Messungen des AIT vom 5.12.2016 ergeben sich im Gegensatz zu den TÜV-Messungen deutliche Unterschiede in der (Beton)schalenstärke, die im Bereich der Ulmen eine Schwankungsbreite von 104–116 cm beim TÜV und in den AIT-Messungen von 25–120 cm aufweisen. Auch konnten in den AIT-Messungen keine klaren Hinweise auf Hohlräume⁴ gefunden werden, wie sie in einem früheren Messbericht [9] angedeutet wurden bzw. eingezeichnet wurden. Sowohl die gewählten Frequenzbereiche als auch die Größe und Geometrie von etwaigen Hohlräumen sollten bei zukünftigen Messungen dabei berücksichtigt werden. Da die Tiefenlage der Hohlräume aus einem früheren Messbericht [9] nur durch Ellipsen gekennzeichnet wurde, erscheint die Eindringtiefe der bei einer früheren Messung verwendeten 1.000 MHz bzw. 2.000 MHz und die Tiefenlage der detektierten Hohlräume unseres Erachtens nicht konsistent und ist mangels entsprechender Erläuterungen/Dokumentation nicht verifizierbar. Die festgestellten Hohlräume sind – vor allem über mehrere Laufmeter – nur unter hohem Aufwand durch andere Methoden (Kernbohrung) zu verifizieren.

2.4 Empfehlungen für zukünftige Versuchsanordnungen von Bodenradar in Tunnel

Zukünftige Hohlraum- und Schichtaufbaumessungen sollten sich der Vorteile und Nachteile der verschiedenen Antennentypen bzw. -konfigurationen bewusst sein. Boden- bzw. bauteilgekoppelte GPR, wie seitens des AIT verwendet, schließen den sogenannten Luftpolstereffekt, der bei Verwendung von Hornantennen entsteht, aus. Der Einsatz von parallel angeordneten Antennenkonfigurationen (mindestens drei parallele Messsysteme) ist anzustreben, da sich größere Flächen zeitnah bearbeiten lassen und die Messzeiten

⁴Um einen Hohlraum detektieren zu können, müsste dieser bei der verwendeten Antennenkonfiguration mindestens einen Durchmesser von 8 cm aufweisen.

entsprechend kurzhalten werden. Bei boden-gekoppeltem Georadar ist auf eine Kollisionsdetektion und ein damit verbundenes automatisiertes Anheben der Antenne zu berücksichtigen. Solche Systeme sind derzeit nicht im Einsatz und müssten noch entwickelt werden. Die Montage von boden- als auch luft-gekoppeltem Bodenradar lässt sich sowohl auf Kraftfahr- als auch Schienenfahrzeugen bewerkstelligen, wobei die entsprechenden Auslegerarme, an denen die Sensoren befestigt sind, längenmäßig zu berücksichtigen sind. Befahrungsgeschwindigkeiten von mehreren Kilometern pro Stunde (10-30 km/h) pro (parallelen) Messprofil(en) sind dadurch erzielbar. Unabhängig davon ist auf eine geeignete Bezugsfläche (Schiene oder Fahrbahn) zu achten. Ein in Sanierung befindlicher Tunnel (wie bei der Versuchsmessung im Selzthaltunnel) führt zu einer deutlich geringeren Fahrgeschwindigkeit, da bei einer automatisierten Messung die GPR-Antennen auf gleicher Höhe (Spurree) zu halten sind, um aussagekräftige Messungen zu ermöglichen.

In Abhängigkeit der zu erreichenden Auflösung bzw. Eindringtiefe empfiehlt sich der Einsatz von Antennen mit 200–1.600 (2.000) MHz. Hierbei kann eine Auflösung für Hohlräume im Idealfall von 25 cm bis 2,5 cm erzielt werden bzw. maximale Eindringtiefen von 50–700 cm.

Bei der Auswahl der verwendeten Frequenzen bzw. Antennen sind ferner folgenden Überlegungen zu berücksichtigen:

- Ziel der Untersuchung (Hohlraumdetektion, Schichtaufbau)
- Beeinflussende Parameter wie Tunnelaufbau, Bewehrung, etc.
- Hintergrundgeologie, Betonaufbau, Bewehrung, Einbauten, etc.
- Störungen durch elektrische Einbauten, Geräte, etc.

In Abbildung 3 ist der Zusammenhang von Eindringtiefe und vertikaler Auflösung bei verschiedenen Frequenzen dargestellt. Hierbei sind die Einschränkungen bei hoher Eindringtiefe geringe Auflösung und umgekehrt deutlich sichtbar.

An Beispiel der im Selzthaltunnel angewandten Messkombinationen 200 MHz/600 MHz würde dies folgendes bedeuten: bei 200 MHz ist eine theoretische Eindringtiefe von etwa 1,1 m und eine Auflösung von 25 cm zu erzielen. Die zweite genutzte Frequenz von 600 MHz weist eine theoretische Eindringtiefe von 0,5 m und eine Auflösung von maximal 8 cm auf. Dies würde für einen unbewehrten Ortsbetonausbau von 25–40 cm bedeuten, dass ein Frequenzbereich oder Frequenzkombination von etwa 600-1.300 MHz gewählt werden könnte abhängig von der gewünschten Fragestellung.

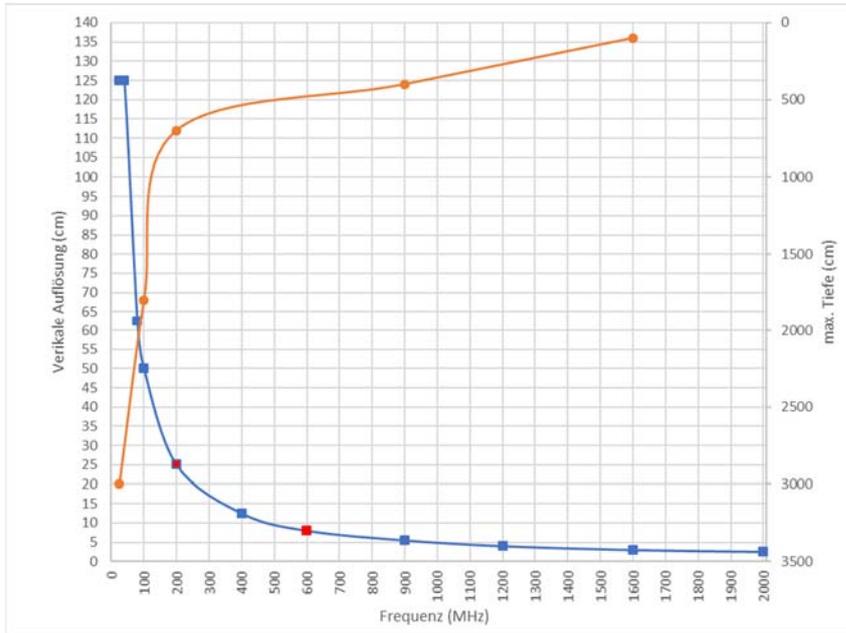


Abbildung 3: Verschieden Georadar-Frequenzen und deren maximale Eindringtiefen (orange) bzw. vertikale Auflösung (blau). Rot gekennzeichnet sind die von AIT eingesetzten Frequenzen von 200 MHz und 600 MHz.

Wenn man die Innenschalenstärke eines unbewehrten Ortbetonausbaus erkunden will, welche planmäßig zwischen 25–40 cm beträgt, dann ist eine Frequenz zwischen 1 GHz und 2 GHz oder größer (maximal 4 GHz) anzustreben. Dies basiert auf der empirischen Formel für die maximale Eindringtiefe von kleiner 20-mal der Wellenlänge, die sich wie folgt berechnet:

$$\text{Wellenlänge} = \frac{(\text{Ausbreitungs})\text{Geschwindigkeit im Medium (in } \frac{m}{ns})}{\text{Frequenz (in GHz)}}$$

1 GHz: Wellenlänge = 0,10 m → theoretische maximale Eindringtiefe: 2,0 m

2 GHz: Wellenlänge = 0,05 m → theoretische maximale Eindringtiefe: 1,0 m

Daraus ergibt sich eine maximale Eindringtiefe von 1,3 m (2 GHz) bis 2,6 m (1 GHz), die normalerweise auf Grund von Dämpfungserscheinungen und anderen Beeinträchtigung (z.B. Feuchte) nicht erreicht werden. Durch die Wahl dieses Frequenzbereiches bleibt eine genügende Sicherheit, um die angestrebte Detektionstiefe zu erreichen. Bewehrte Ausbauten sind auf Grund der eingebauten Metalle extra zu betrachten und bedürfen einer genauen Festlegung des Detektionszieles (z.B. Bewehrung oder Betonstärke) und der Kenntnis der Baugeometrie (Betonstärke, Einbautiefe der Bewehrung, Maschenweite, etc.). Die Geschwindigkeit wird normalerweise mit 0,1-0,13 m/ns für trockenen Beton angegeben (wie hier angegeben und kann sich bei zunehmender Durchfeuchtung auf 0,09 m/ns verringern).

Will man gezielt (luftgefüllte) Hohlräume hinter einem Mauerwerksgewölbe mit einer Stärke zwischen 50 cm und 200 cm detektieren, dann sind dieselben Randbedingungen wie im oberen Beispiel und zusätzlich die Zielauflösung zu beachten. Die Zielauflösung lässt sich ebenfalls empirisch mit etwa 10 % der Wellenlänge angeben. Somit sind hier also Eindringtiefen zwischen mindestens 1 m und 3 m anzustreben; damit sind Frequenzen zwischen 1 GHz und 400 MHz zu wählen, die theoretische Eindringtiefen von 2 m bis 5 m und theoretische Objektauflösungen von 1 cm bis 2,5 cm aufweisen können. Aufgrund der Eigenschaften der Luft in den Hohlräumen können darunter/dahinter liegende Strukturen nicht erfasst werden und es kommt zu so genannten „ringing“ Effekten im Radargramm (siehe [Abbildung 4](#)).

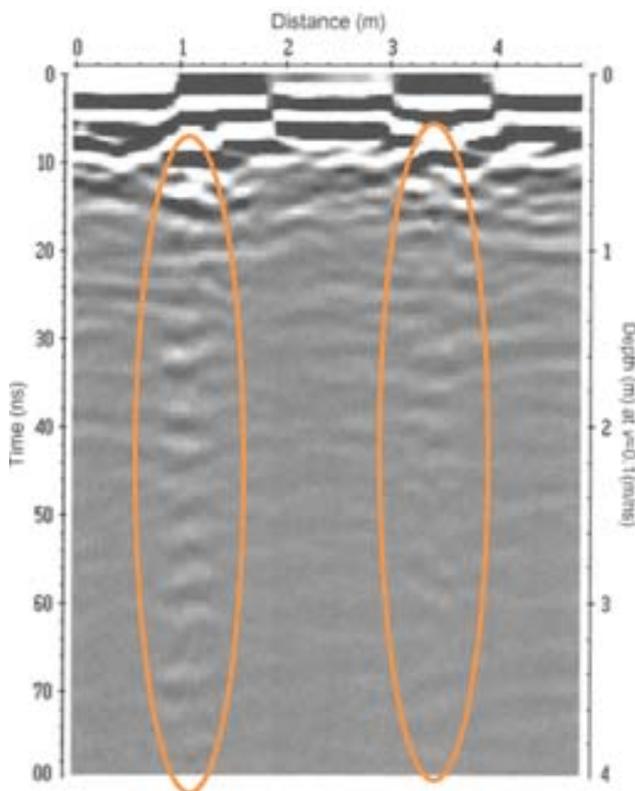


Abbildung 4: Beispiel des „ringing“ Effektes aufgrund zweier „Luftlücken“. Die Dopplungserscheinungen lassen sich über die ganze Tiefe des Radargramms verfolgen (Abb. 4.2, [10])

Das Bodenradar liefert im Zuge der Inspektion eines Tunnels zusätzliche Informationen zur Schalenstärke und -integrität über die Tiefe. Im optimalen Fall werden unterschiedliche Messfrequenzen miteinander kombiniert, um zu unterschiedliche Eindringtiefen und Auflösungen zu gelangen.

3 INTEGRATION DER GPR-MESSERGESBISSE IN EIN BAUWERKSINFORMATIONSSYSTEM

3.1 Einführung in Bauwerksinformationssysteme

Ein Bauwerksinformationssystem (BIS) ermöglicht die strukturierte, zeitliche, räumliche und thematische Bearbeitung und Visualisierung von Informationen komplexer Tunnelbauwerke. Die vorhandenen Informationen werden verschiedenen Objektklassen (Assets) bzw. Schichten (Layer) zugeordnet und ermöglichen spezifische Tunnelanalysen sowie den Export der Ergebnisse in Form automatisierter Berichte und Plandarstellungen.

Dadurch wird z.B. die Erfassung und Kartierung von Bauteilen (Blöcke, Nischen etc.), Einbauten (Lampen, Verkehrsleittechnik etc.) sowie von Schadstellen (z.B. Risse, Abplatzung) ermöglicht. Diese werden entweder direkt auf den 2D-Abwicklungen des Tunnels eingezeichnet oder den fototexturierten, hochauflösenden 3D-Tunneldaten hinzugefügt.

Durch die Überlagerung fotorealistischer Tunnelaufnahmen unterschiedlicher Epochen (Aufnahmezeitpunkte) können Änderungen an der Tunneloberfläche sichtbar gemacht werden und ermöglichen eine Quantifizierung der räumlichen und zeitlichen Veränderungen (4D change detection). Derartige Informationen bilden eine wichtige Grundlage für nachfolgende Inspektions- und Sanierungstätigkeiten.

Die Objekte werden entweder manuell oder semi-automatisch in ihrer räumlichen Gestalt erfasst und in einer Datenbank gespeichert. Sie können in Form offener oder geschlossener Polylinien aufgenommen werden. Die Markierung von Objekten als Flächen, Kreise und Punkte ist ebenso möglich. Die Positionen, Längen und Flächen der einzelnen Objekte sowie diverse weitere Parameter können tabellarisch exportiert und statistisch ausgewertet werden (siehe [Abbildung 5](#)). Weiters können die Objekte mit frei wählbaren, beschreibenden Attributen wie z.B. Informationen zur Wasserführung, Sinterbildungen, Rissbreiten und vieles mehr versehen werden. Dies ermöglicht eine thematische Filterung und Auswertung einzelner Aspekte. Im Rahmen von AMBITION sind insbesondere folgende Informationen von hoher Relevanz:

- Raumlage der Strukturen (Polylinien, Polygone)
- Länge und Fläche von Strukturen
- Häufigkeit und Dichte des Auftretens
- Anmerkungen: Wasserführung, Rissbreiten u.v.m.
- Korrelation mit zusätzlichen, (geo)-physikalischen Informationen (z.B. GPR)

- Zeitlich-räumliche Entwicklung von Schadensformen (4D change detection)

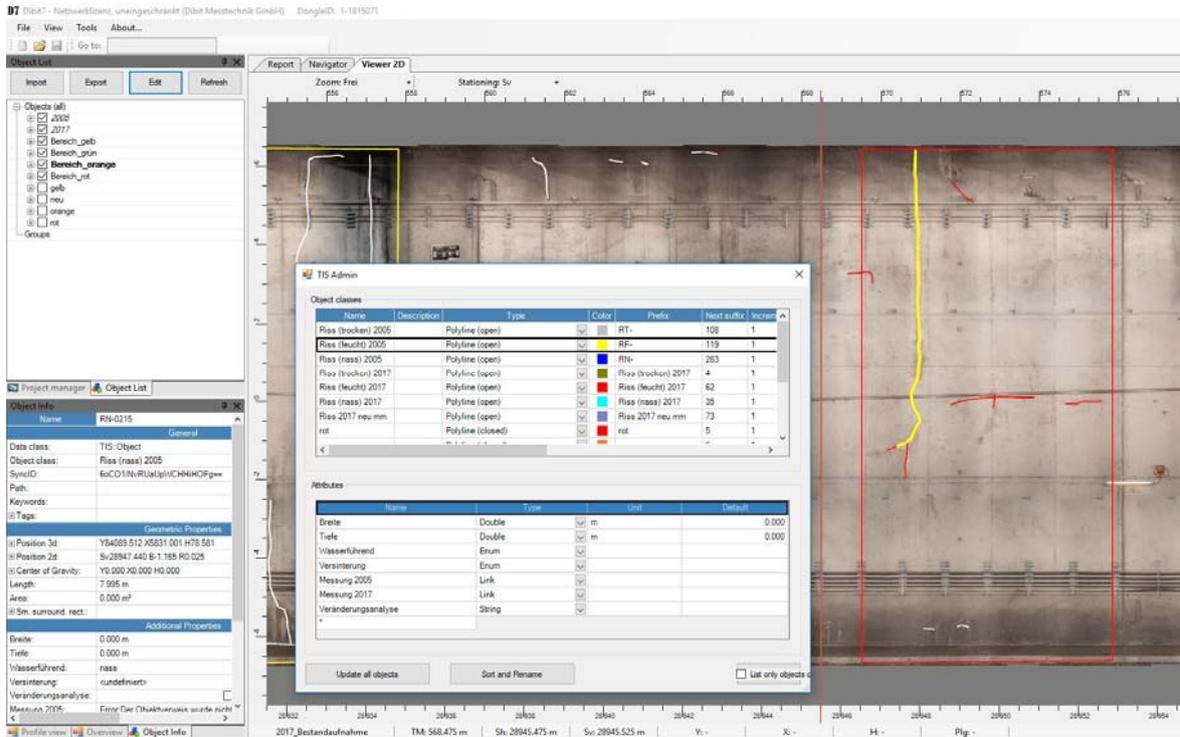


Abbildung 5: Beispiel eines Bauwerksinformationssystems. Im Viewer sind Risse in Form offener Polylinien eingezeichnet. Die Informationen zum gelb vermerkten Riss werden in einem eigenen Viewer angeführt. Sämtliche Objektinformationen und geometrischen Messungen können in gängige Tabellenkalkulationsprogramme exportiert werden.

3.2 Möglichkeiten der Datenanalyse in einem Bauwerksinformationssystem

Um einen besseren Eindruck über den Funktionsumfang eines Bauwerksinformationssystems zu bekommen, sei folgendes Beispiel einer zeitlich strukturierten Überlagerung und Auswertung unterschiedlicher Geomessungen angeführt (siehe [Abbildung 6](#)). Die einzelnen Aufnahmen und Analysemethoden sind im Nachfolgenden beispielhaft beschrieben:

Tunnel Neubau / Rohausbruch (1):

- Abweichungen zum Soll-Profil werden in Form von Unter- und Überprofilen dargestellt.

Spritzbeton / Abdichtungsuntergrund (2):

- Anhand der Differenz zu (1) können eingebrachten Schichtdicken und Kubaturen berechnet werden.

Innenschale zum Zeitpunkt A – fertige/in Benutzung befindliche Tunnel (3):

- Die Aufnahmen ermöglichen im Vergleich zu (1) und (2) weitere Berechnungen von Schalendicken, wie z.B. der Innenschale oder weiterer Einbauten.
- Die Qualität der Tunneloberfläche (Risse, Schadflächen) und deren Einbauten wird ermittelt.
- Etwaige Schädigungen der Innenschale können mit Daten des Tunnel-Neubaus (1) korreliert werden, um Aussagen über tektonische Aktivitäten des Gebirges zu erhalten.

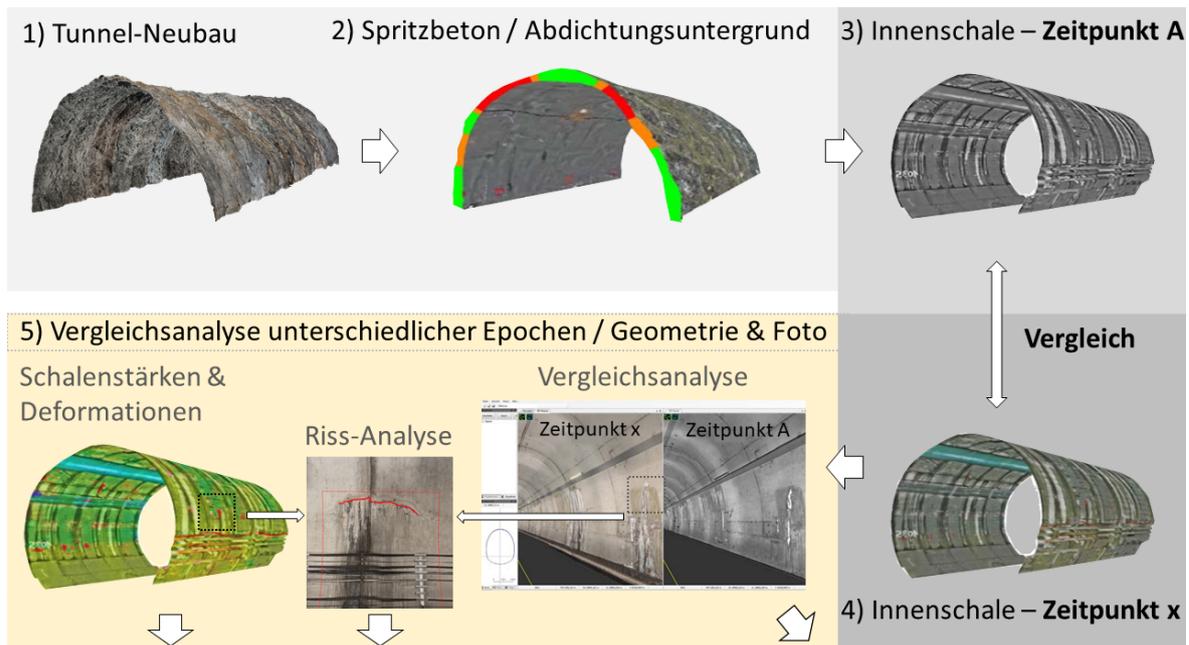


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Einbindung unterschiedlicher Daten in ein Bauwerksinformationssystem

Innenschale zum Zeitpunkt X (4) und Vergleich zu weiteren Aufnahmeepochen (5):

Die Innenschale des Tunnels wird zu einem zweiten/alle n Zeitpunkte neuerlich aufgenommen. Die Vergleichsanalyse zeigt:

- In Bezug auf (1), (2), (3) weitere Veränderungen der Schalendicken (z.B. Spritzbeton, Spezialanstriche nach Sanierungstätigkeiten).
- Deformationen des Tunnelbauwerks zu unterschiedlichen Zeitpunkten.
- Entwicklungen von Schadstellen (Risse, Abplatzungen, Wassereintritte etc.).

Integration weiterer Datenquellen (5):

Referenzierte Datenquellen (im lokalen Tunnelsystem oder im globalen Koordinatensystem; siehe Kapitel 3.2) können den 3D-Tunnelmessungen überlagert werden und ermöglichen zusätzliche Informationen neben den geometrischen und fototexturierten Daten:

- Informationen zu nicht-sichtbaren Details (z.B. im Nachhinein rekonstruierte Schalendicken aufgrund von Georadarmessungen, Materialeigenschaften (multispektrale Messsysteme) und Thermaldaten).
- Einbeziehung alter, manuell erhobener Messungen: Risskartierung, Bestandsaufnahmen etc.

3.2.1 Visuelle Analysen:

Da die erhobenen Daten thematisch in Layer angeordnet sind, können sie überlagert abgebildet werden und verdeutlichen u.a. die zeitliche und räumliche Entwicklung von Schadstrukturen. Diese Art der Visualisierung ermöglicht eine effiziente Analyse der Rissbildänderungen (siehe [Abbildung 7](#)).

Ferner ist es auch möglich, die Abweichung einer 3D-Tunnelmessung von einer vorgegebenen 3D-Geometrie, wie z.B. dem Regelprofil oder einer Bestandsmessung, zu erkennen. Die Abweichungen, d.h. die flächig erfassten Abstände, sind beispielsweise in Falschfarben oder in Profilschnitten darstellbar, die der visuell sichtbaren Oberflächentextur überlagert werden (siehe [Abbildung 8](#)). Die Profile, Abwicklungen und Plots sollten in alle gängigen Auswertesoftware, wie z.B. CAD- oder GIS-Programme, in definierten offenen Datenformaten exportiert werden können.

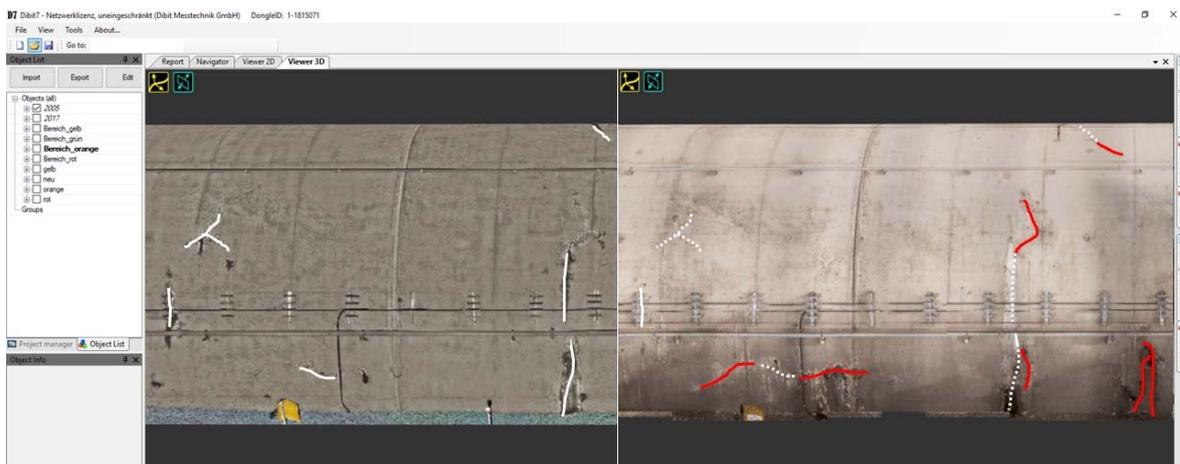


Abbildung 7: Darstellung des gleichen Ausschnitts eines Beispieltunnels zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Links: Risse Zeitpunkt A (weiß), Rechts: Neue Rissentwicklung zum Zeitpunkt B (rot). Die älteren Risse sind weiß strichliert dargestellt.

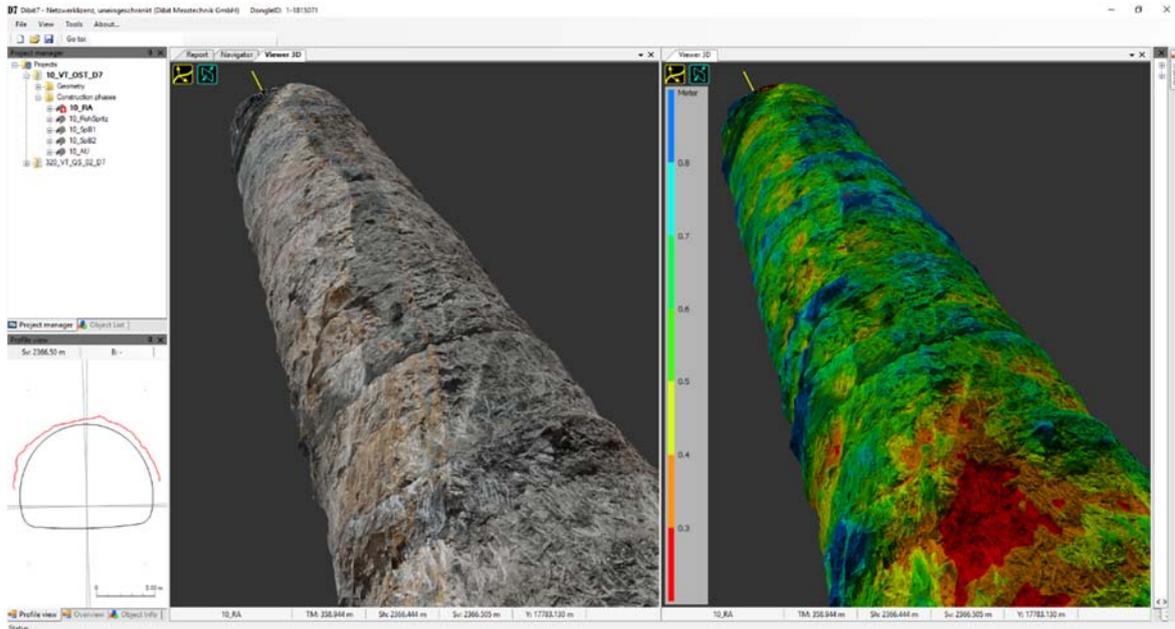


Abbildung 8: Multiviewer Darstellung eines Tunnel-Rohausbruchs. Links sind in der Aufsicht unterschiedliche Lithologien zu erkennen. Rechts wird in Falschfarben die Abweichung der Ausbruchsgometrie mit dem Regelprofil angezeigt. Diese ist für einen Profilschnitt auch links unten angegeben (Rohausbruch = rot)

3.2.2 Statistische Analysen:

Die erhobenen Daten können aus der Datenbank exportiert und mittels statistischer Programme (z.B. R Software) ausgewertet werden. So ist es z.B. möglich, das Auftreten von Objekten tunnelmeterbezogen zu untersuchen, bzw. die Raumdichte von Schädigungen zu erfassen. Die Schadensdichte kann wiederum mit geologischen 3D-Aufnahmen und bauwerksspezifischen Parametern, wie z.B. der Innenschalendicke, korreliert werden, um Aussagen über mögliche Schadmechanismen zu treffen (z.B. deformationsbedingte Rissbildungen oder mangelhafte Ausführungsqualität).

3.2.3 Auswirkungen der Ergebnisse von AMBITION auf zukünftige Bauwerksinformationssysteme

Basierend auf den Erfahrungen von AMBITION wurden insbesondere folgende Aspekte hinsichtlich der Nutzung zukünftiger Bauwerksinformationssysteme zur Messung und Bewertung von Tunnel als wichtig erachtet:

Überlagerung unterschiedlicher Daten- und Informationsquellen:

Ein Hauptvorteil von Bauwerksinforationssystemen ist die Fähigkeit, geometrische mit thematischen Informationen zu überlagern und diese gemeinsam auszuwerten. Der einfachste und am meisten angewandte Fall ist die Texturierung von 3D-Geometrien mittels Fotos. Auch ist es anzustreben, weitere georeferenzierte geophysikalische Messungen mit diesen

vergleichen zu können. In Kapitel 3.2 wird z.B. erläutert, wie Erkundungsdaten aus Georadarmmessungen georeferenziert dargestellt und mit anderen Informationen überlagert werden können. Weiterhin können thermografische Daten Hinweise über hydrogeologisch- oder bauwerksbedingte Temperaturverteilungen am Tunnelbauwerk wiedergeben.

Auch klassische Bauwerksinformationen wie Bauwerkspläne, manuelle Schadensberichte und weitere Dokumente aus Bau und Instandhaltung können mit den texturierten 3D-Tunnelaufnahmen mit orts- und zeitbezogen verknüpft werden.

Virtuelle Tunnelbegehungen:

Die georeferenzierten 3D-Daten von Tunnelbauwerken erlauben eine orts- und zeitunabhängige, virtuelle Begutachtung der Bauwerke. Auf die Vorteile dieses Ansatzes, wie Reduktion von Verkehrsbeeinträchtigungen, Personalaufwand und Gefährdungspotential, aber auch auf die Notwendigkeit einer „realen“ Begehung und Begutachtung von Tunnelbauwerken durch qualifizierte Bauingenieure wurde eingehend in Deliverable D3/D4 eingegangen.

Implementierung neuer Methoden und Modelle:

In Bauwerksinformationssystemen sollte die Möglichkeit gegeben sein, Informationen zur Zustandsentwicklung blockweise nachzuverfolgen. Im Zusammenhang mit den oben angesprochenen sonstigen Umfeldkriterien lassen sich Alterungsmodelle mit jeder neuen Prüfepoche entsprechend kalibrieren.

Mit Hilfe geometrischer, bildlicher und externer Informationen können die Modelle auf ausgewählte Tunnelbereiche prognostisch angewendet werden. Als Bezugsraum bieten sich hier Tunnelblöcke an, die als einheitliche, statische Elemente angesehen werden können. Die Attribuierung (z.B. Zustandsnoten U für Tragsicherheit) erfolgt direkt im 3D-Modell (Abb. 5). Filterfunktionen ermöglichen die Suche nach Tunnelcharakteristiken (z.B. Tragsicherheit Note U3) und das gezielte Exportieren/Plotten gewünschter Tunnelabschnitte.

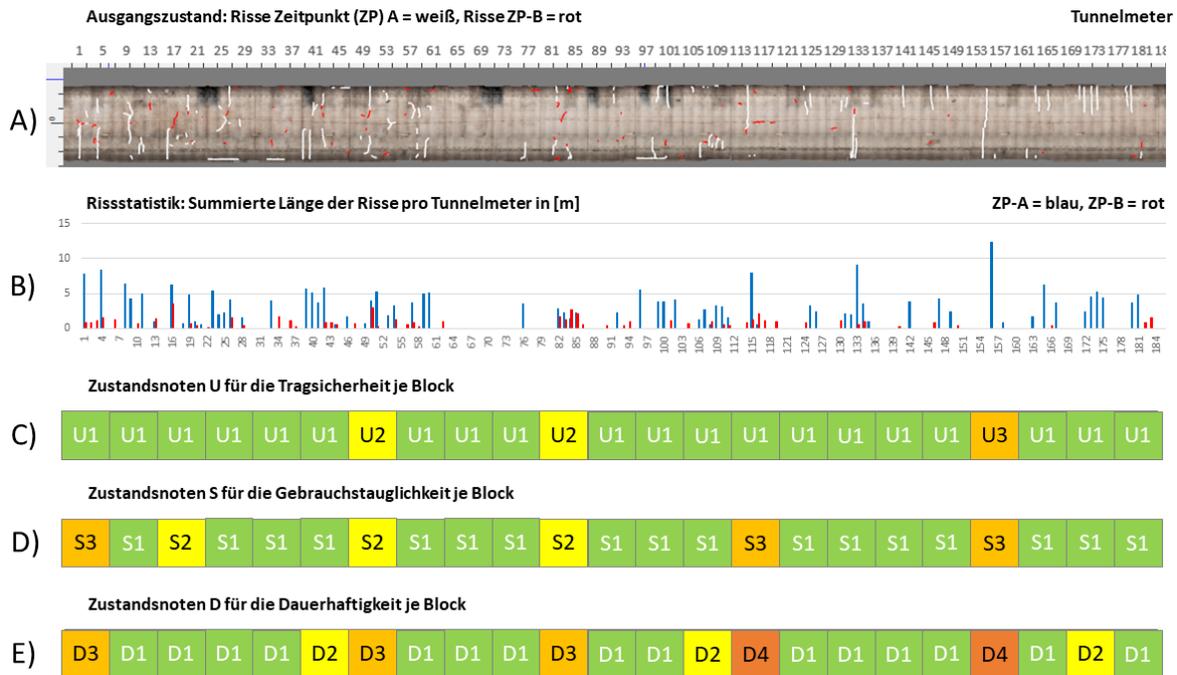


Abbildung 9: Exemplarische Darstellung von Auswertungen im Rahmen eines Bauwerksinformationssystems: A) Darstellung von Rissen zu zwei Beobachtungszeiten (Risse zu Zeitpunkt A = weiß; neue Rissentwicklungen zum späteren Zeitpunkt B = rot). B) Aufsummierung der Risslängen je Tunnelmeter. Zustandsnoten für Tunnelblöcke auf Basis der entwickelten Modelle (vgl. D3/D4, Kapitel 5.4): C) Tragsicherheit, D) Gebrauchstauglichkeit und E) Dauerhaftigkeit.

3.3 Einbindung von geophysikalischen Daten in ein Bauwerksinformationssystem

Zur Visualisierung von Daten in Verbindung mit einem Tunnelbauwerk müssen diese in ein geeignetes Datenformat überführt werden. Bauwerksinformationssysteme ermöglichen den Import einer Vielzahl unterschiedlicher Raster und Punktdaten zur raumbezogenen Analyse bzw. Visualisierung (in 2D = Abwicklung/Plot; 3D = 3D Viewer; 4D = zeitlich-räumliche Entwicklung). Die Daten werden hierfür intern mit einem Koordinaten-Transformations-Tool umgewandelt. Im Rahmen von AMBITION wurden GPR-Daten (Ground Penetrating Radar = Bodenradar) vom Selzthaltunnel verwendet, um exemplarisch die Verschneidung von geophysikalischen mit 3D-Geometriedaten zu veranschaulichen.

Der Import und die Visualisierung der GPR- Daten vom Austrian Institute of Technology und dem TÜV-Rheinland werden im Folgenden vorgestellt.

Die GPR Daten vom AIT (Austrian Institute of Technology) bestehen aus zwei Messreihen, die parallel zueinander mit einem Abstand von 1,3 m aufgenommen wurden. Die einzelnen Messpunkte in Richtung der Tunnelachse weisen Abstände zwischen etwa 0,3 und 1,3 m auf. Zwischen den Datenpunkten wurden die Werte linear interpoliert. Die geringe

Datendichte ermöglichte in diesem Fall eine eher bedingt aussagekräftige Rekonstruktion der Felsoberfläche unter der Betoninnenschale (siehe [Abbildung 10](#)).

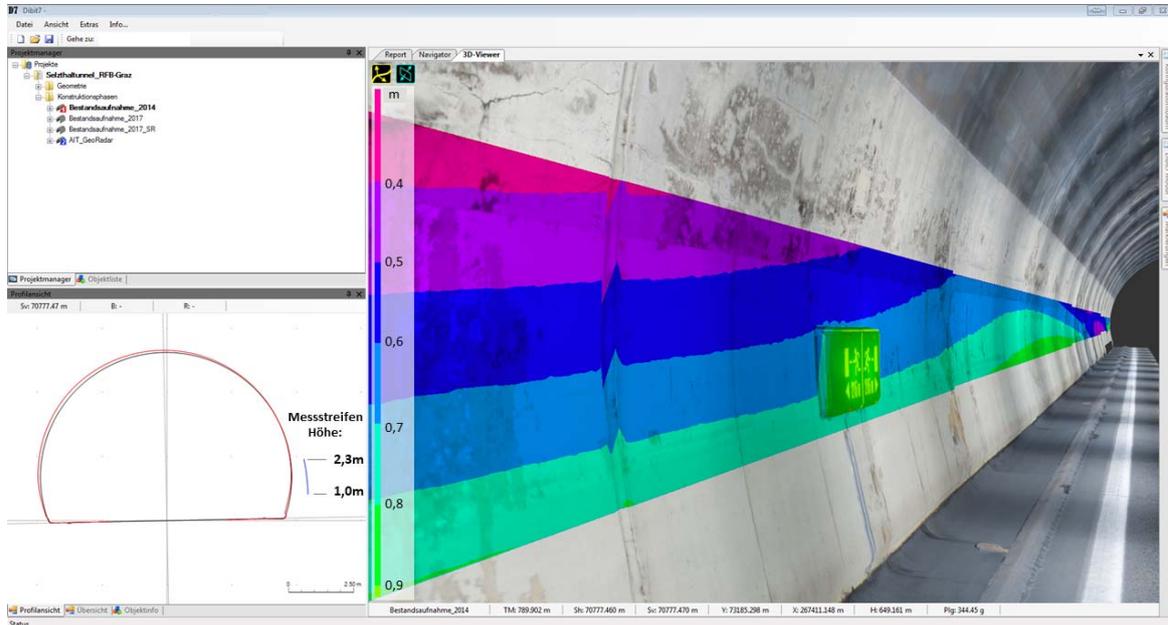


Abbildung 10: Visualisierung der Georadarmessungen des AIT in Form von Isolinien. Die Daten liegen in Form von zwei Messreihen vor, die in der Höhe über der Fahrbahn von 2,3 und 1,0 m angefertigt wurden. Zwischen den Datenpunkten wurde linear interpoliert. Die Daten zeigen das Ersttreffen der Felsoberkante unter der Betoninnenschale an.

Die Georadardaten des TÜVs Rheinland bestehen aus 32 Messreihen, die den gesamten Tunnelquerschnitt mit einem Abstand von etwa 0,4m zwischen einander abdecken. In Richtung der Tunnelachse liegen die Messpunkte jeweils einen Meter auseinander. Sie zeigen: 1) die Dicke der Betoninnenschale und 2) die Dicke der darauffolgenden Spritzbetonschicht. Der Reflektionshorizont von 2) ist der anstehende Fels (siehe [Abbildung 11](#)).

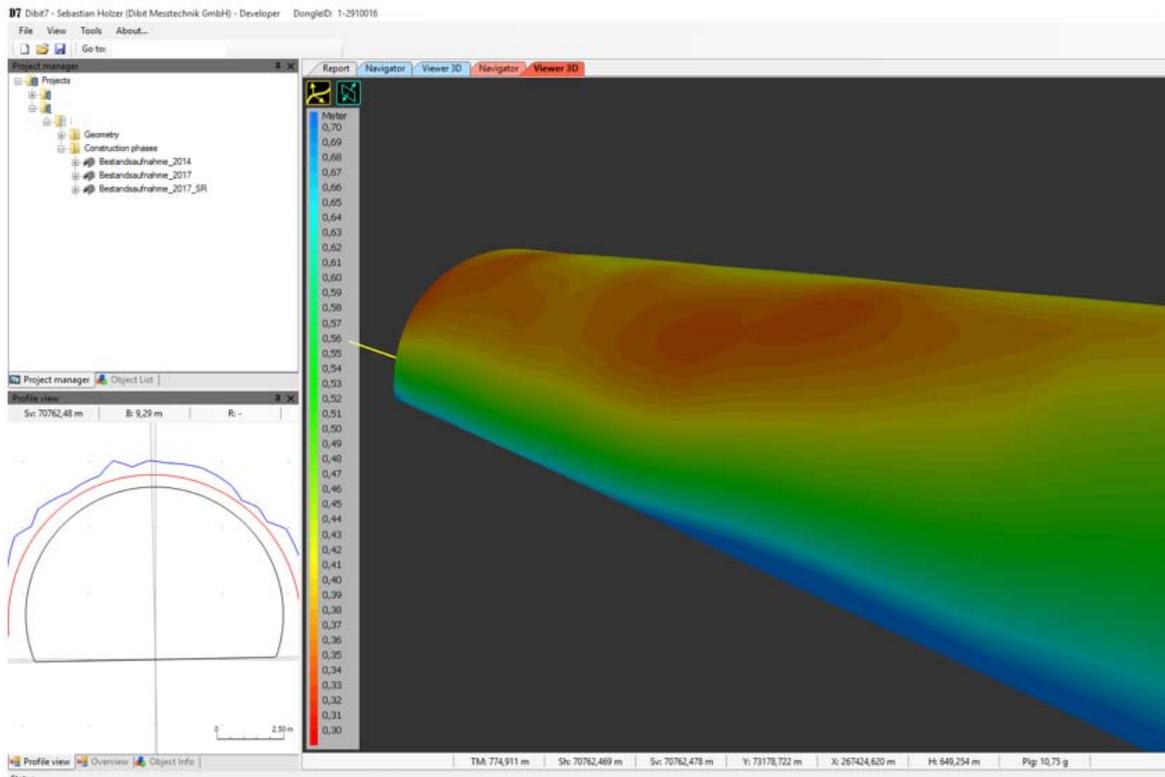


Abbildung 11: Visualisierung der Georadardaten des TÜVs Rheinland. In Falschfarbendarstellung wird der Abstand der detektierten Felsoberfläche (blaue Linie links unten im Profil) und der Außenkante der Betoninnenschale (rote Linie) angezeigt.

Die vorhandenen GPR-Daten können in ein Bauwerksinformationssystem problemlos eingelesen und dort visualisiert werden. Sie ermöglichen eine raumschlüssige Analyse für den gesamten Tunnelquerschnitt. Aufgrund der relativ geringen Datendichte von einem Messpunkt pro Tunnelmeter sind die vorliegenden Daten jedoch nur von eingeschränkter Aussagekraft. Die Messdaten wurden zwischen einander linear interpoliert. Bei der Verwendung von enger maschigen GPR-Messungen, z.B. in einem Raster von wenigen Dezimetern oder Zentimetern, sind die Strukturen der Felsoberfläche hinter der Betoninnenschale weitaus detaillierter aufzulösen.

3.4 Adaptierung eines Tunnelinformationssystems für Building Information Modelling (BIM-Anwendungen)

Bauwerksinformationssysteme bzw. Tunnelinformationssysteme sind leistungsfähige Werkzeuge um unterschiedliche tunnelbezogene Daten zu analysieren und zu visualisieren. Diese reichen von 3D-Geometrien aus Aufnahmesystemen wie dem „Handheld“, „stop & go“ und dem „kinematischen“ System (vgl. Deliverable 3/4) bis hin zu unterschiedlichsten Laserscannern und virtuellen 3D-Formaten (siehe [Abbildung 12](#)).

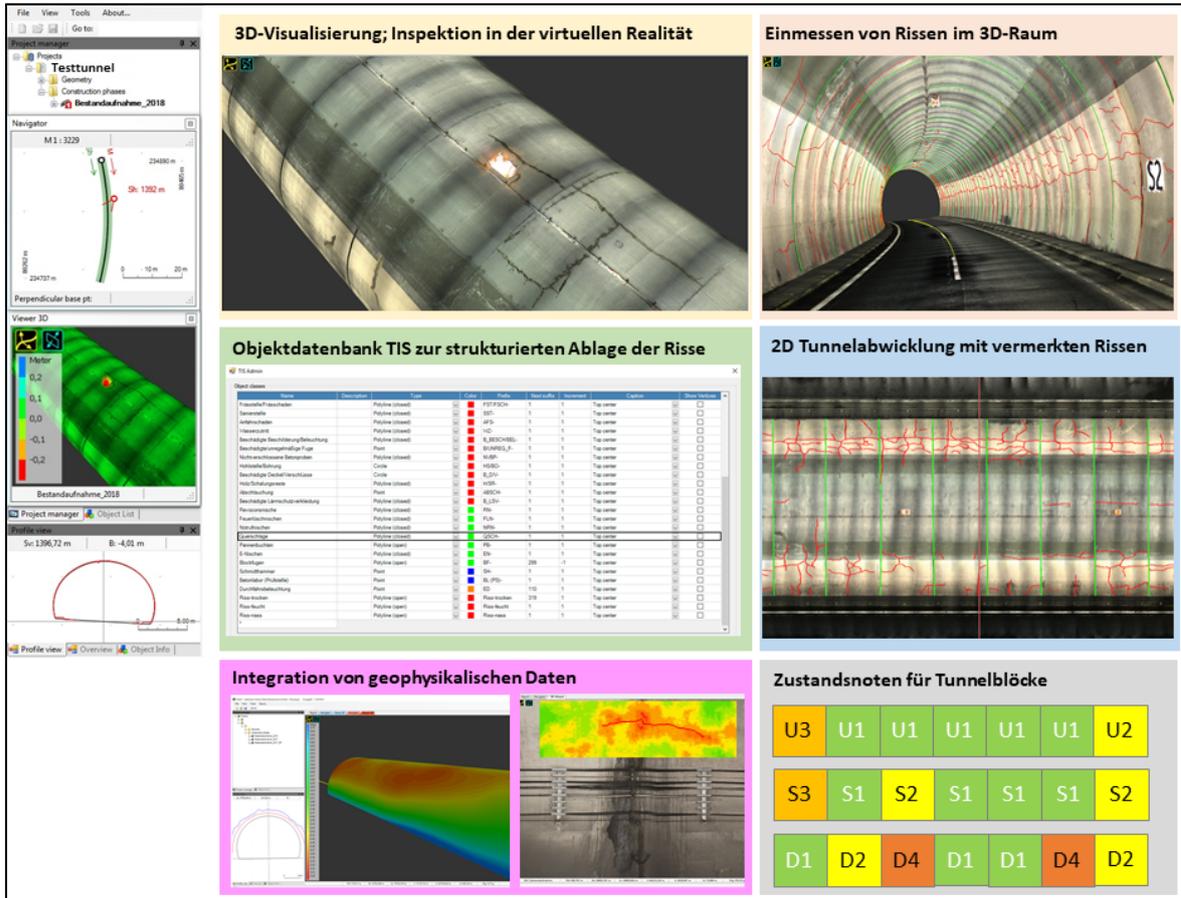


Abbildung 12: Schematische Darstellung möglicher Funktionalitäten eines BIM

Zukünftige Bestrebungen sollten die Bandbreite verwendbarer Messsysteme und Daten noch weiter öffnen und gezielt Schnittstellen zu Softwares schaffen, die die Daten weiterverarbeiten können.

In diesem Zusammenhang ist insbesondere das Konzept des „BIM“ zu erwähnen. Das „Building Information Modeling“ kann als das Digitalmodell der Zukunft angesehen werden. In diesem laufen zentral, von den Beteiligten einsehbar und modifizierbar, bauwerksrelevante Informationen zusammen. Im Mittelpunkt steht eine synchronisierte Datenbank, die im Laufe der Planungen und der Lebenszeit des Bauwerks alle relevanten Bauwerksinformationen enthält und mit der Zeit weiterwächst. BIM-Systeme können hier vom Rohausbruch über verschiedene Bauphasen bis hin zu Inspektions- und Instandhaltungsmaßnahmen Daten zum Tunnelbauwerk bereitstellen.

Begleitende, (geo)-physikalische Messungen wie Bodenradar, Thermografie, spektrale Messmethoden und manuelle Tunnelerhebungen liefern einen Mehrwert zum Verständnis der zeitlichen Tunnelentwicklung. In diesem Zusammenhang stellen gerade die im Rahmen

von AMBITION entwickelten Alterungsmodelle einen wertvollen Beitrag zur effizienten Bewirtschaftung der Tunnelbauwerke über lange Zeiträume dar.

Eine Bestrebung für die nahe Zukunft sollte sein, die bestehenden BIS-Systeme so zu adaptieren, dass sie standardisierte Daten exportieren können, die von BIM-Systemen einlesbar und weiter zu verarbeiten sind. Weiterhin sollten die BIS-Systeme, als wichtige Datenlieferanten für BIM-Anwendungen, bereits geeignete, räumlich-statistische Auswertemethoden implementiert haben. Die neuen, korrelierten und gefilterten Daten sollten unter Berücksichtigung statistisch relevanter Filtermethoden erhoben werden und darstellbar sein. Als Visualisierungsergebnisse werden Isolinien-Darstellungen, Scattergramme und Intensitätskarten erwartet, die auf die Scandaten des Tunnels überblendet werden können.

Simulationsmethoden für zeitlich-räumliche Schadensänderungen (4D) sollten ebenfalls als zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten angedacht werden. Die Ansätze zum Verständnis der zeitlichen Tunnelentwicklung, die im Rahmen von AMBITION entwickelt wurden, sollten ein wichtiger Bestandteil möglicher Prognose-Ansätze sein.

Weiterhin sind Verlinkungen mit Mess- oder Inspektionsbildern und Begehungs- oder Sanierungsprotokollen (z.B. Injektionsprotokolle von Riss-Sanierungen) möglich.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

In Kapitel 2 wurde erläutert, dass boden-/bauteilgestütztes Georadar (GPR) eine geeignete Technologie darstellt, um Gesamtschalenstärken und Hohlräume bei Tunnelschalen mit relativ homogenem Aufbau (z.B. Spritzbetonaußenschale sowie unbewehrte Ortbetoninnenschale) zu detektieren. Ein erfolgreicher Einsatz bedingt jedoch eine fachkundige Abstimmung der Frequenzen auf die Zusammensetzung des gemessenen Ausbaus und das Erkundungsziel im Spannungsfeld zwischen gewünschter Tiefenauflösung und Eindringtiefe. Örtlich begrenzte Einschränkungen sind v.a. im Bereich von Einbauten wie Kabeltassen und stromführende Oberbauten gegeben, welche die Führung der Antennen entlang der Bauteiloberfläche behindern und die Messung potentiell stören.

Das Haupteinsatzgebiet von GPR im Zusammenhang mit der Bauwerksprüfung sind Sonderprüfungen zur Abdeckung eines anlassbezogenen Erkundungsbedarfs. Derartige Anlässe können z.B. sein:

- Abnahme nach Neubau/Instandsetzung im Rahmen der Inbetriebnahme
- Verdacht auf Ablösungen und Hohlstellen, z.B. auf Grund von Hinweisen im Zuge der routinemäßigen Bauwerksinspektionen
- Schaffung von Planungsgrundlagen für vorgesehene Arbeiten an der Innenschale

Für routinemäßige Inspektion von Tunnelschalen ist bodengestütztes Georadar (derzeit) nur eingeschränkt geeignet, da es in der gegenwärtigen Konfiguration allzu zeitbestimmend für die Prüfdurchführung ist. Dies liegt u.a. in der fehlenden verfahrenstechnischen Umsetzung geeigneter Messapparaturen, um die ansonsten ausgereifte GPR-Technologie hinreichend effektiv unter den Randbedingungen von Verkehrstunnelbauwerken anzuwenden. Eine verhältnismäßig einfache Umsetzung ist jedoch bei jüngeren Tunnelbauwerken mit relativ konstanter Querschnittsgeometrie und ebenen Oberflächen zu erwarten. Ältere Bauwerke (z.B. Eisenbahntunnel mit „rauem“ Mauerwerksausbau, Spritzbetonausbau oder gänzlich ohne Ausbau) stellen aufgrund der zumeist geometrischen Ungleichmäßigkeiten der Tunnellaibung sowie der hohen Heterogenität der verwendeten Baustoffe große Herausforderungen an die verfahrenstechnische Umsetzung der Antennenführung dar.

Bei geeigneter Umsetzung sind bei neuen Tunnelbauwerken Messgeschwindigkeiten bis zu 30km/h denkbar, wobei zu beachten ist, dass jeweils nur eine begrenzte Anzahl an Spuren abgefahren werden kann. Für eine Aufnahme des Ausbaus über den gesamten Umfang ist daher eine entsprechende Spurendichte erforderlich.

In Kapitel 3 wurde demonstriert, dass Bauwerks-Informationssysteme (BIS) unterschiedliche Geodatenformate (z.B. GPR-Messungen) einlesen und verarbeiten können. Die Daten können für eine Vielzahl weiterführender Visualisierungen und Analysen, wie z.B. zur Bestimmung von Schichtdicken, verwendet werden.

Um in einem zukünftigen BIS für Tunnelbauwerke ein zentrales Einlesen und Weiterverarbeiten der Daten durch Ingenieure zu gewährleisten, sind einheitliche Standards betreffend zu verwendenden Datenformate zu definieren. In diesen sind vom jeweiligen Scan-Dienstleistern die Ergebnisse – aufgenommen mittels unterschiedlicher Sensoren – zu liefern (siehe Abbildung 13: Schematische Darstellung für den standardisierten Datenaustausch.). Die Verfügbarkeit und überlagerte Darstellung diverser Daten (Bestandsdaten, Messdaten etc.) mit der gleichen Georeferenzierung eliminiert Aufwand und Fehleranfälligkeit der Informationszusammenstellung aus verschiedensten Quellen mit oft divergierenden Ortsbezügen. Ein Bauwerks-Informationssystem liefert somit einen markanten Mehrwert zur Beurteilung des Bauwerks und allfälligen weiteren Planung der Instandhaltung, indem Daten adäquat bevorratet und deren Nutzen voll ausgeschöpft werden kann.

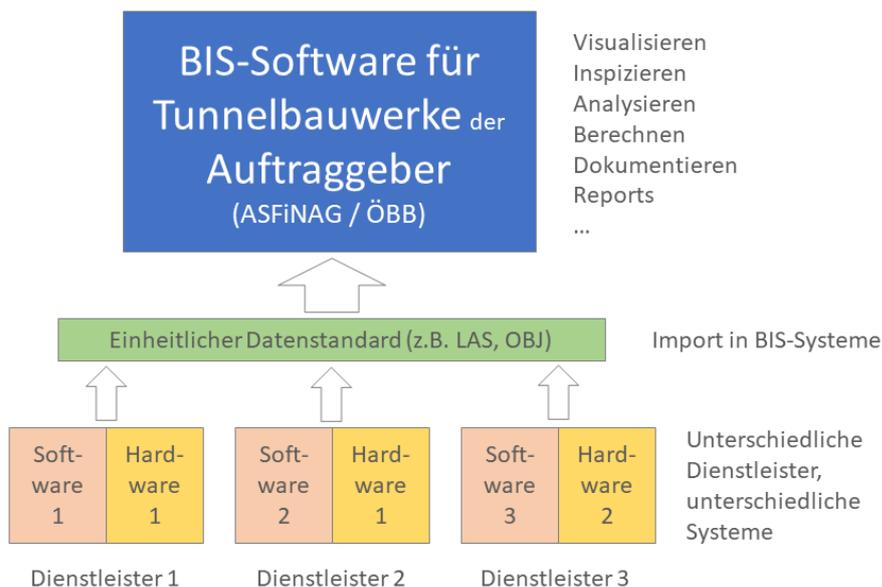


Abbildung 13: Schematische Darstellung für den standardisierten Datenaustausch.

Im gegenständlichen Deliverable D5 wurde ferner gezeigt, dass Daten aus BIS auch in BIM-Systeme exportiert werden können. Datenformate und thematische Verknüpfungen sind hierfür geeignet. Um eine vollständige Funktionalität der Daten in BIM-Anwendungen zu gewährleisten, müssen jedoch von den BIM-Entwicklern entsprechende implementierbare Standards (z.B. IFC5) definiert werden, wie dies z.B. im Rahmen der Forschungsinitiative IFC Infra angestrebt wird [11].

5 ANHANG

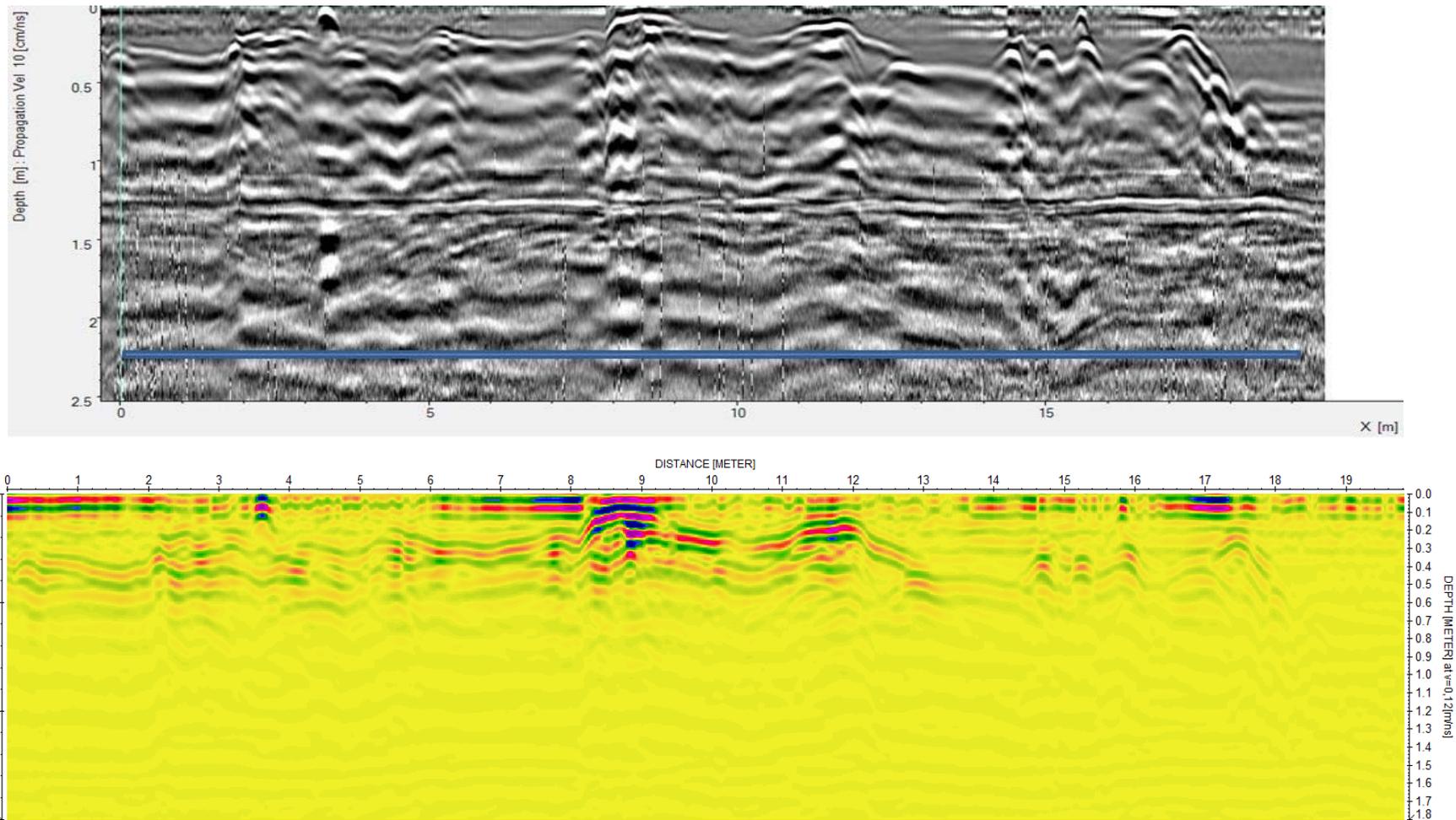


Abbildung 14: Gemessene Linie 2 im Selzthaltunnel (Messrichtung gegen Fahrtrichtung Graz; Linke Fahrbahn (140-160 m); Höhe 3,7 m). Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz. (oben: GRED-Auswertung [blau: Anomalien aus dem TÜV-Bericht]; unten: REFLEX-Auswertung).

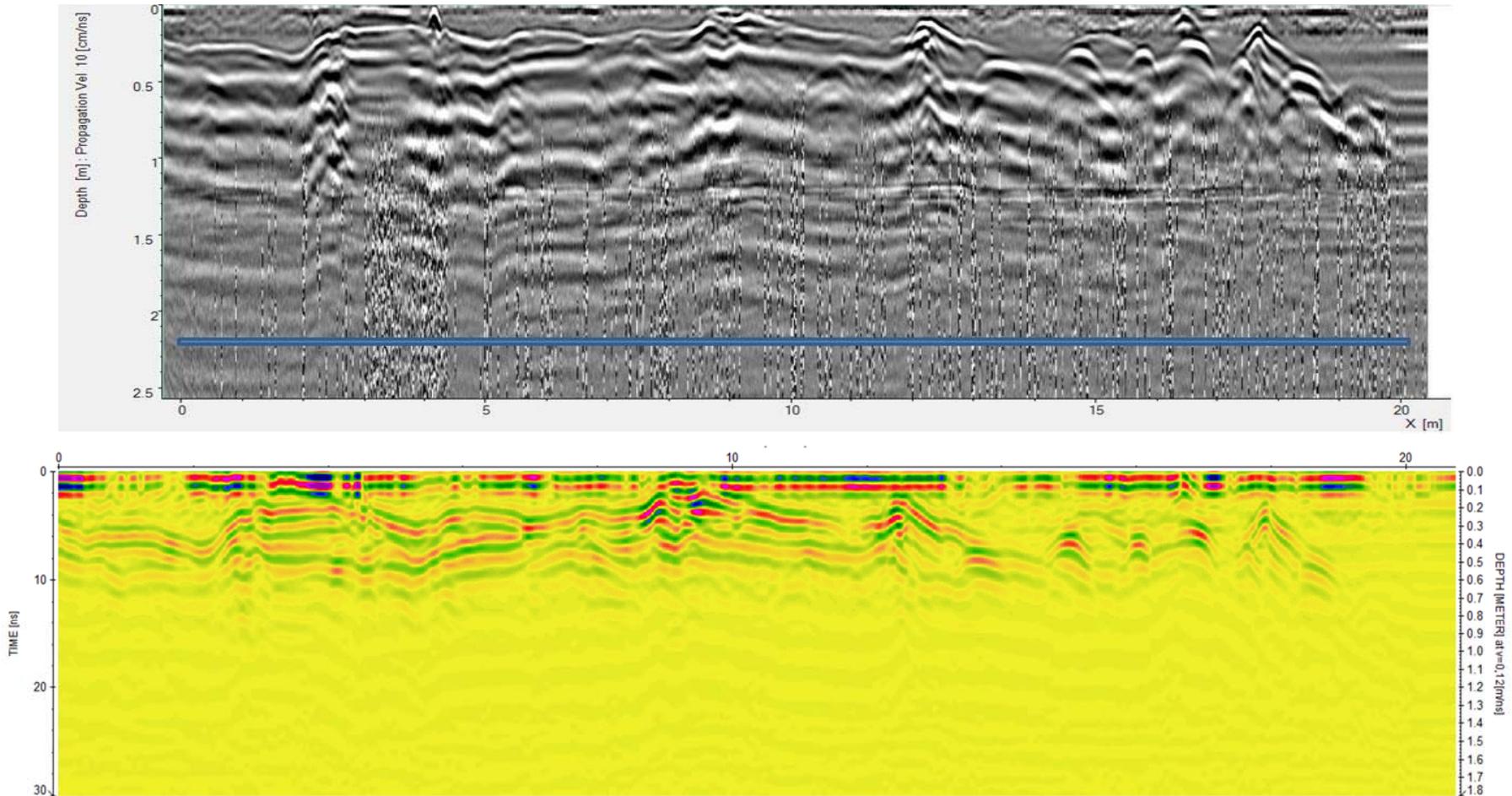


Abbildung 15: Gemessene Linie 3 im Selzthaltunnel (Messrichtung gegen Fahrtrichtung Graz; Linke Fahrbahn (140-160 m); Höhe 3,4 m). Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz. (oben: GRED-Auswertung [blau: Anomalien aus dem TÜV-Bericht]; unten: REFLEX-Auswertung).

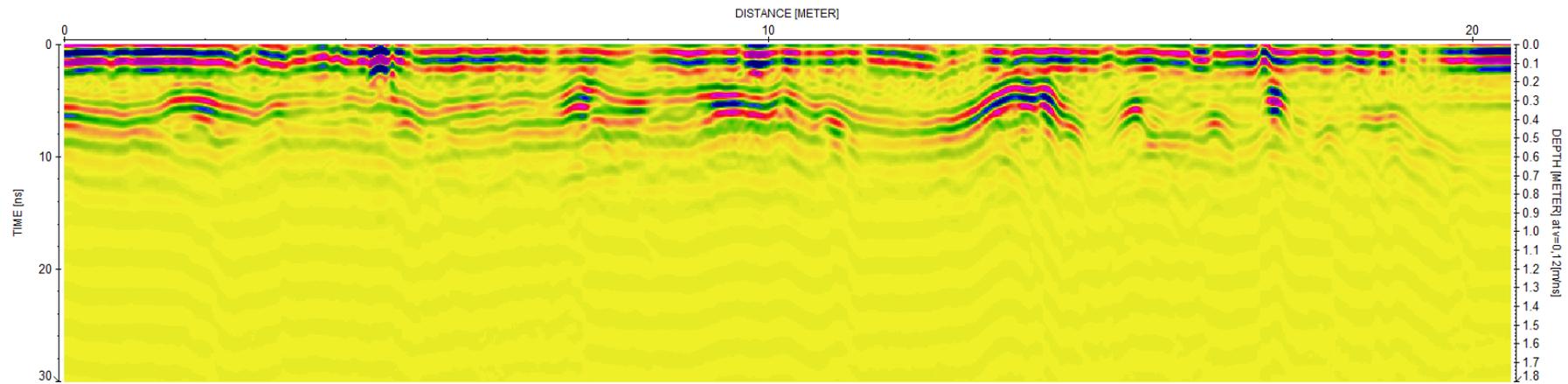
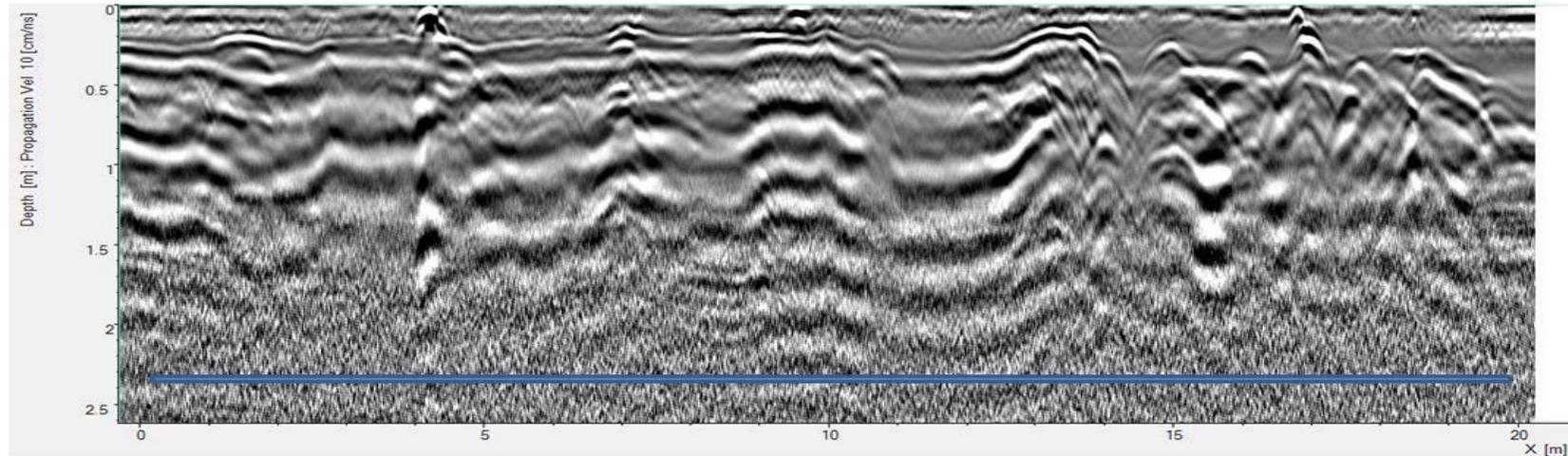


Abbildung 16: Gemessene Linie 5 im Selzthaltunnel (Messrichtung gegen Fahrtrichtung Graz; Linke Fahrbahn (140-160 m); Höhe 2,6 m). Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz. (oben: GRED-Auswertung [blau: Anomalien aus dem TÜV-Bericht]; unten: REFLEX-Auswertung).

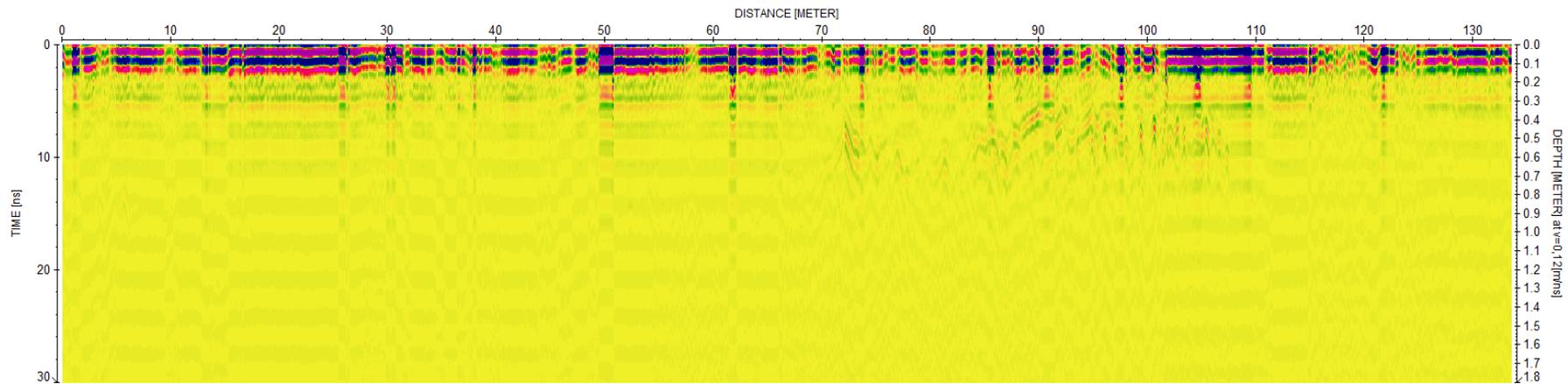
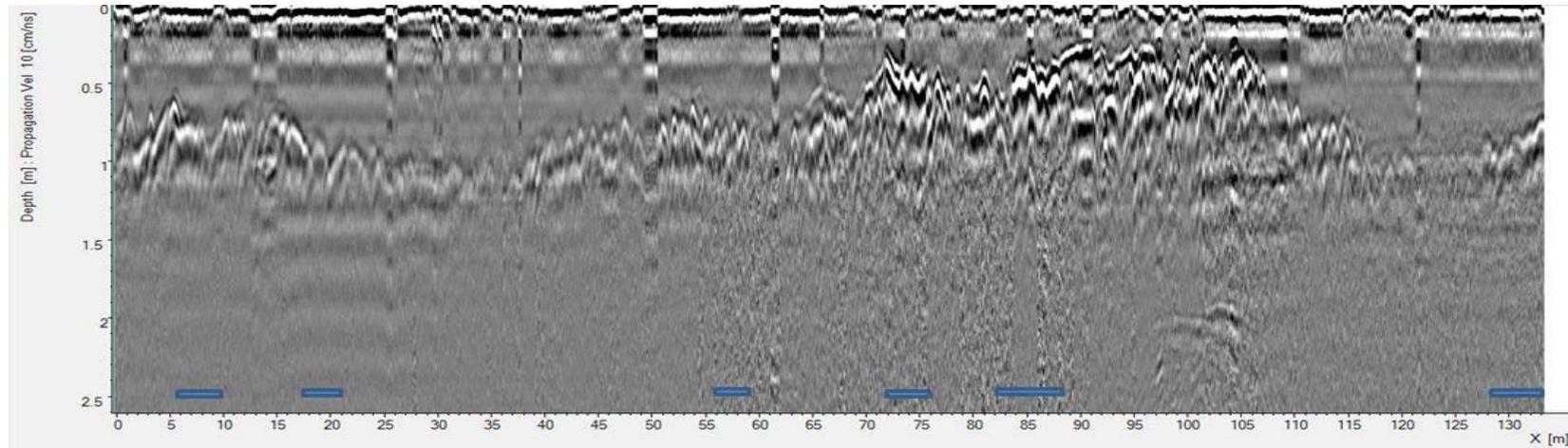


Abbildung 17: Gemessene Linie 6 im Selzthaltunnel (Messrichtung Fahrtrichtung Graz; Linke Fahrbahn (140-180 m); Höhe 3,7 m). Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz. (oben: GRED-Auswertung [blau: Anomalien aus dem TÜV-Bericht]; unten: REFLEX-Auswertung).

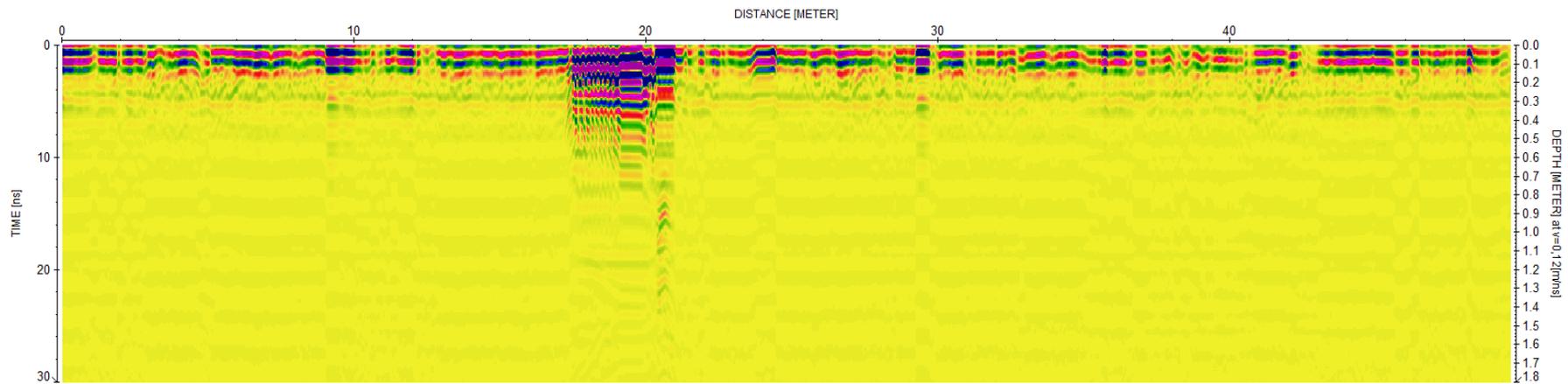
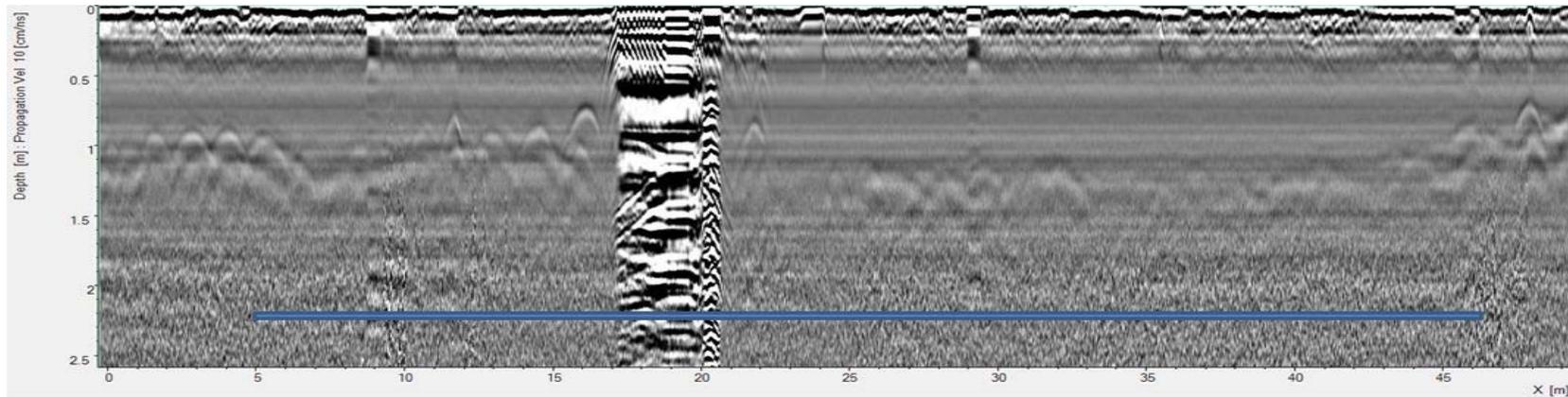


Abbildung 18: Gemessene Linie 8 im Selzthaltunnel (Messrichtung gegen Fahrtrichtung Graz; Linke Fahrbahn (70-120 m); Höhe 1,6 m). Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz. (oben: GRED-Auswertung [blau: Anomalien aus dem TÜV-Bericht]; unten: REFLEX-Auswertung).

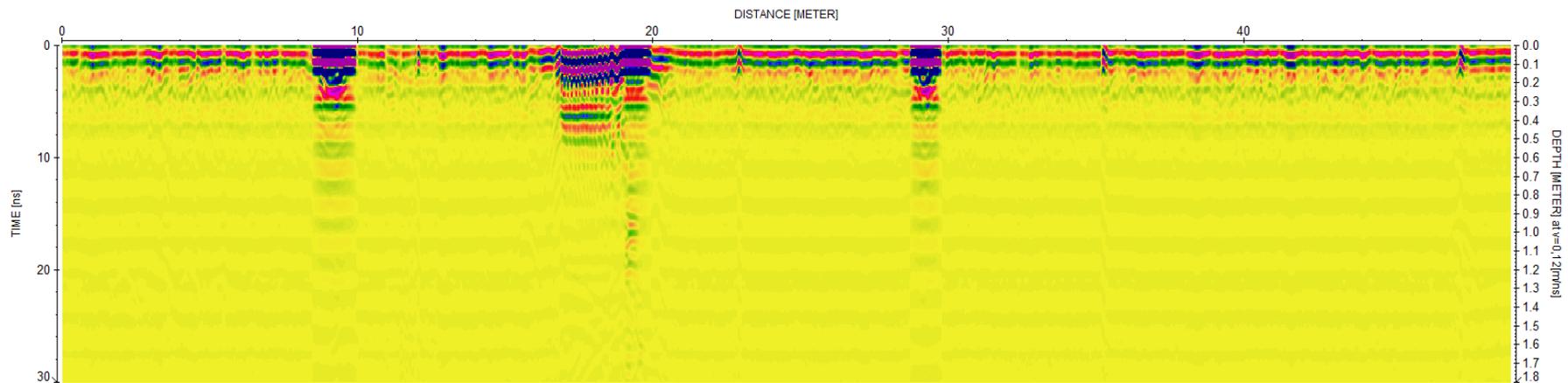
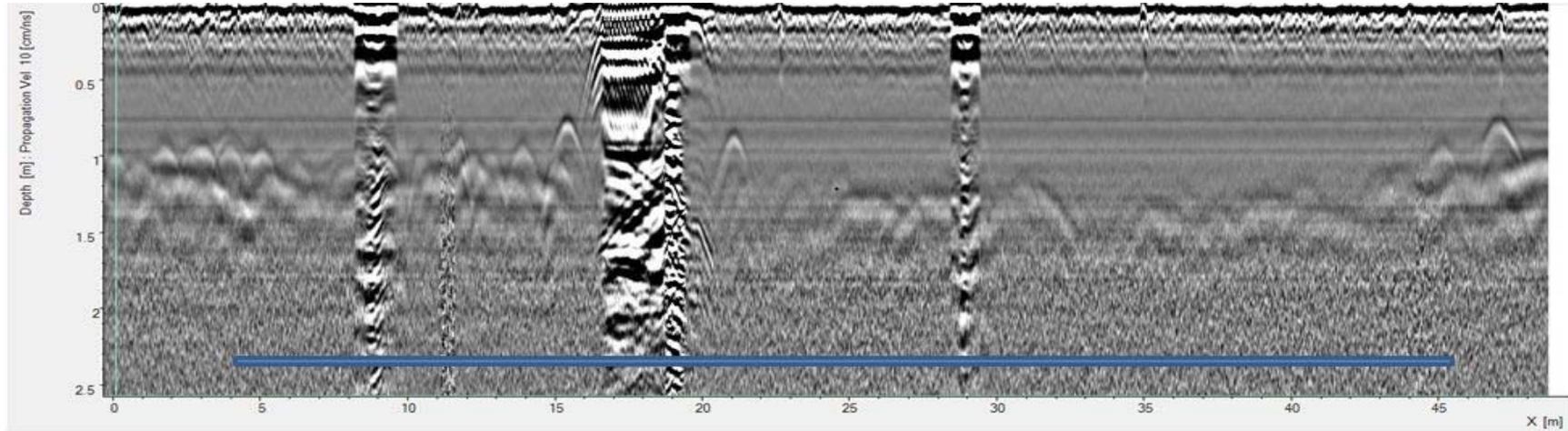


Abbildung 19: Gemessene Linie 9 im Selzthaltunnel (Messrichtung gegen Fahrtrichtung Graz; Linke Fahrbahn (70-120 m); Höhe 0,9 m). Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz. (oben: GRED-Auswertung [blau: Anomalien aus dem TÜV-Bericht]; unten: REFLEX-Auswertung).

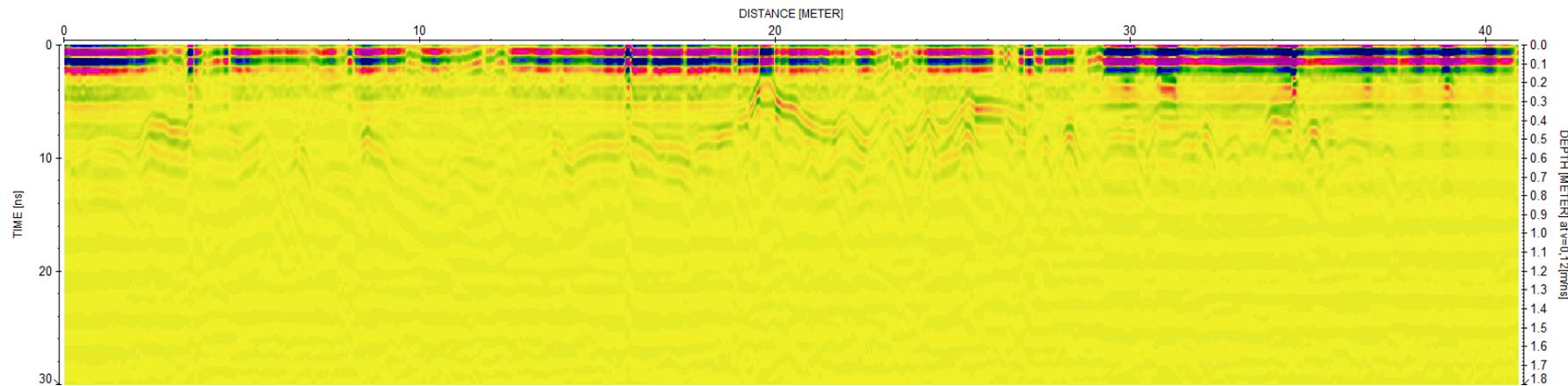
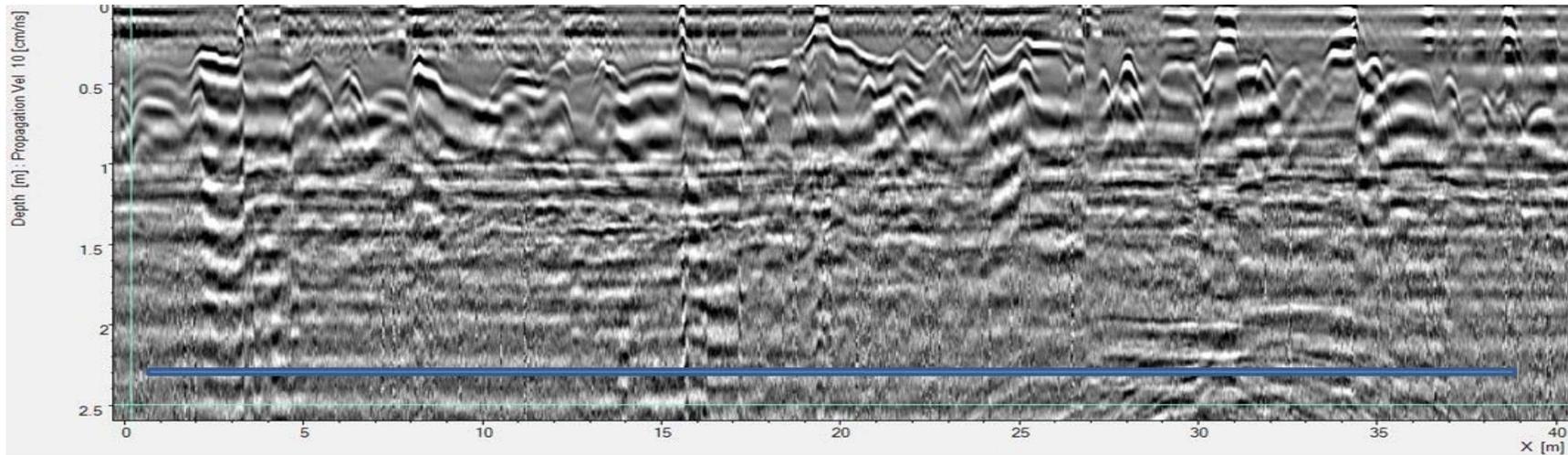


Abbildung 20: Gemessene Linie 10 im Selzthaltunnel (Messrichtung gegen Fahrtrichtung Graz; Linke Fahrbahn (140-180 m); Höhe 4,0 m). Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz. (oben: GRED-Auswertung [blau: Anomalien aus dem TÜV-Bericht]; unten: REFLEX-Auswertung).

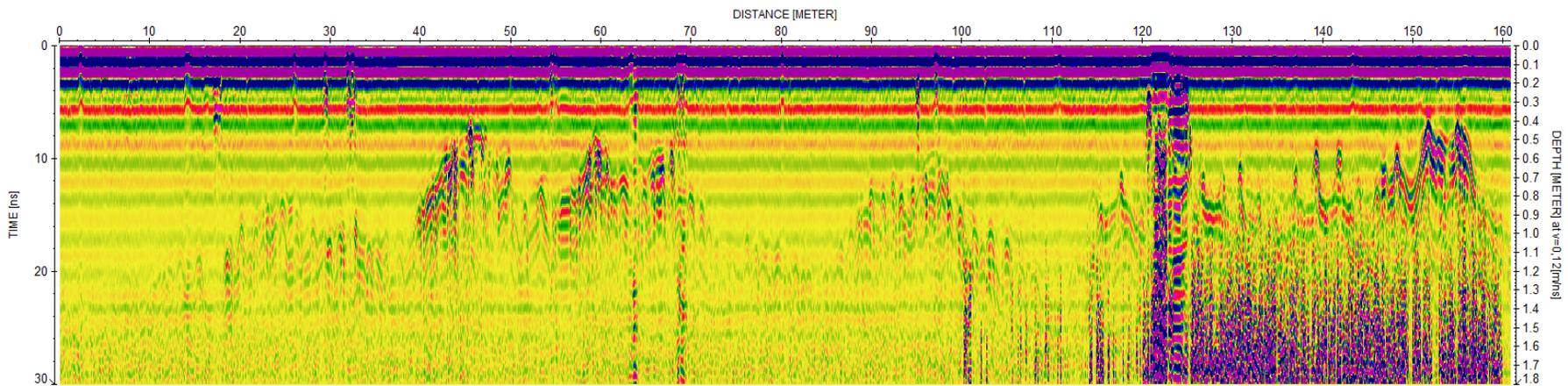
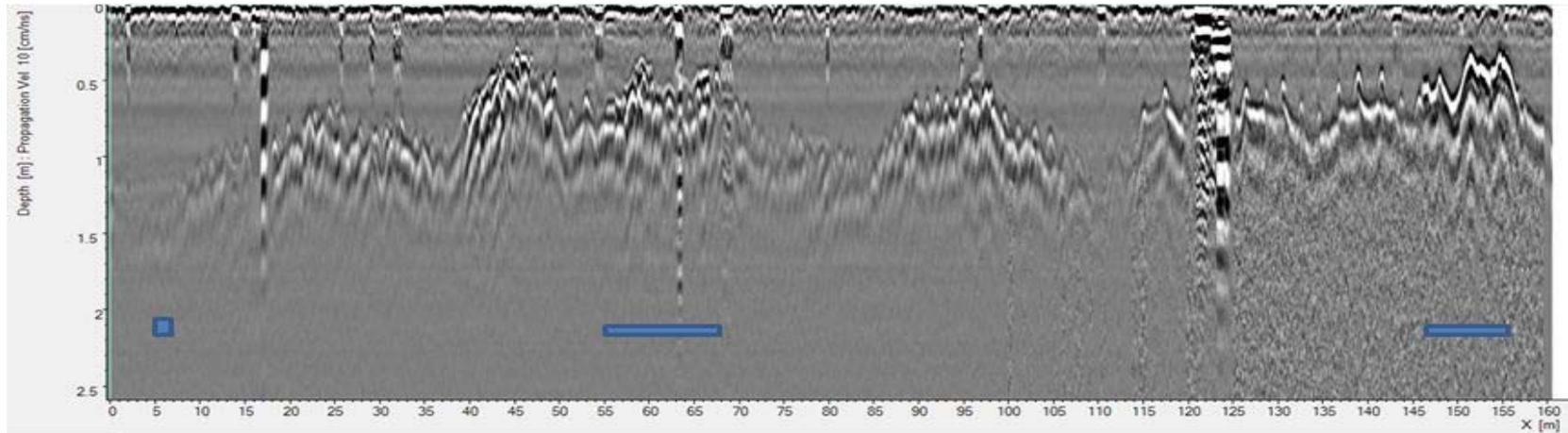


Abbildung 21: Gemessene Linie 12 im Selzthaltunnel (Messrichtung Fahrtrichtung Graz; Linke Fahrbahn (190-350 m); Höhe 1,0 m). Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz. (oben: GRED-Auswertung [blau: Anomalien aus dem TÜV-Bericht]; unten: REFLEX-Auswertung).

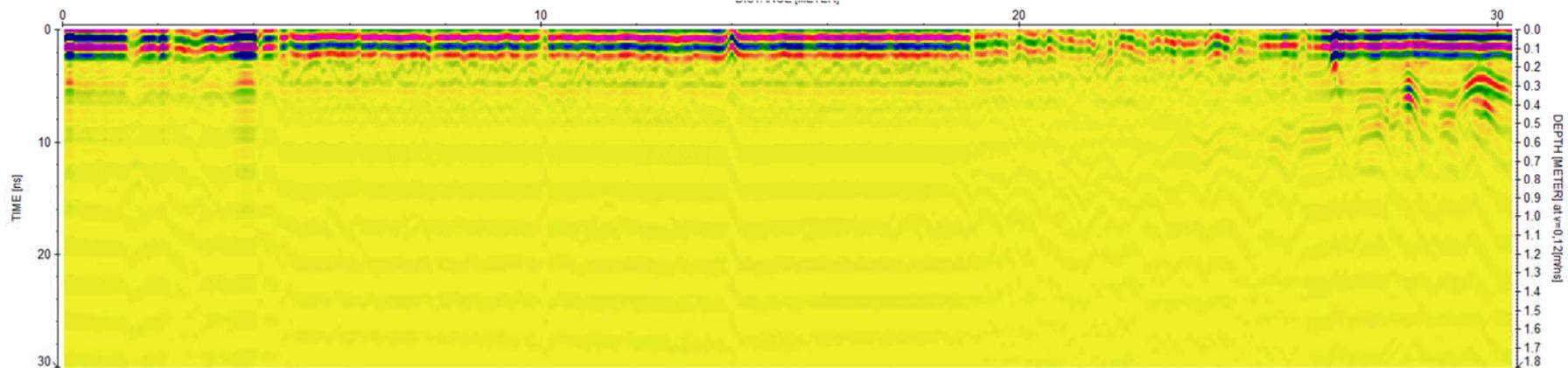
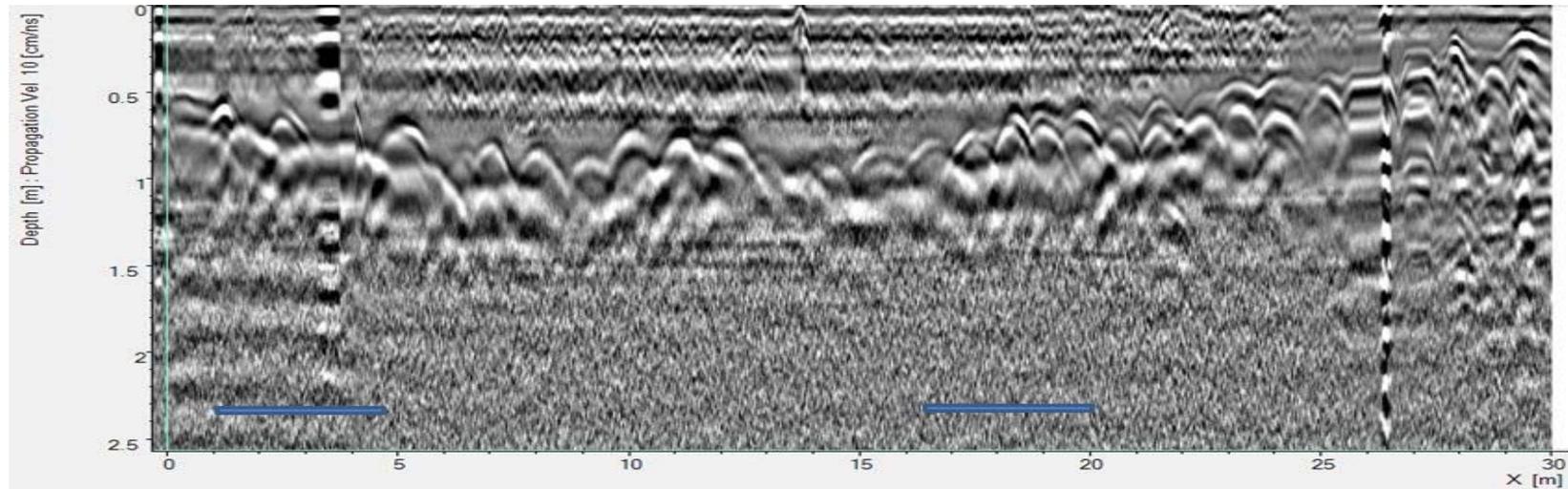


Abbildung 22: Gemessene Linie 13 im Selzthaltunnel (Messrichtung gegen Fahrtrichtung Graz; Linke Fahrbahn (260-290 m); Höhe 2,6 m). Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz. (oben: GRED-Auswertung [blau: Anomalien aus dem TÜV-Bericht]; unten: REFLEX-Auswertung).

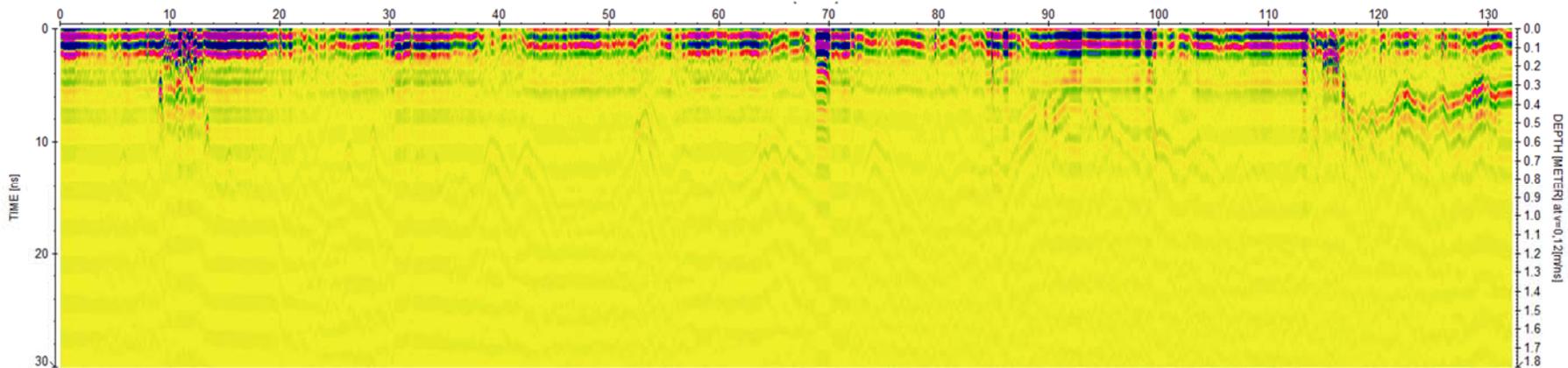
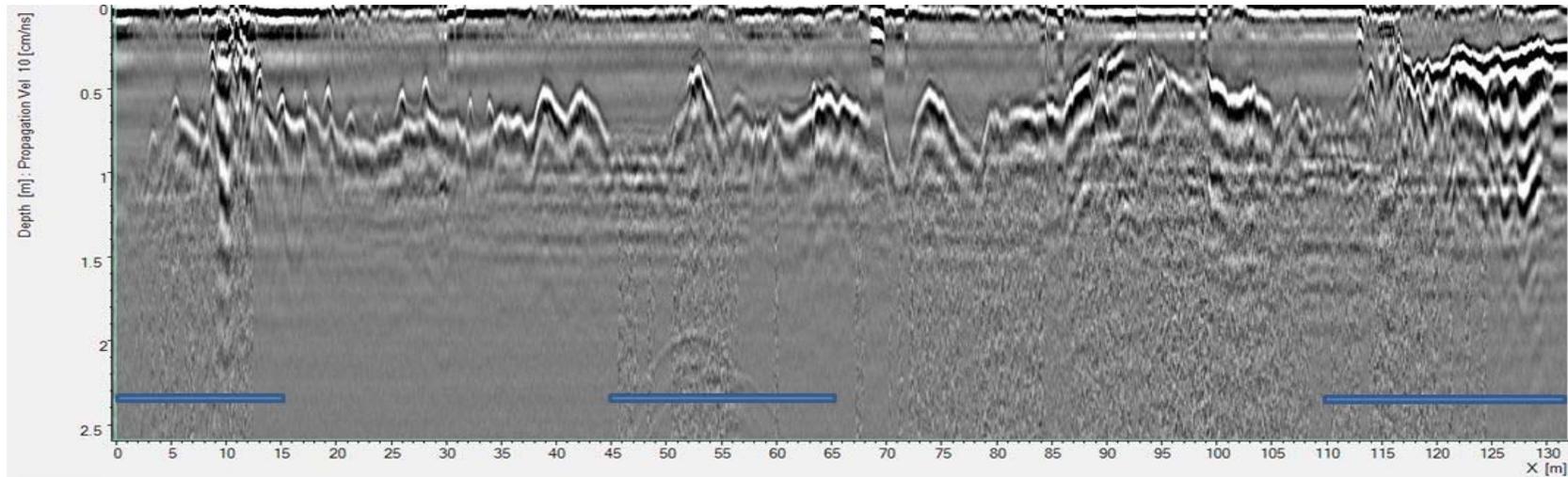


Abbildung 23: Gemessene Linie 14 im Selzthaltunnel (Messrichtung gegen Fahrtrichtung Graz; Linke Fahrbahn (70-200 m); Höhe 2,3 m). Alle Längenangaben beziehen sich auf die Position der Fuge 44/45 in Fahrtrichtung Graz. (oben: GRED-Auswertung [blau: Anomalien aus dem TÜV-Bericht]; unten: REFLEX-Auswertung).

Literaturverzeichnis

- [1] HAACK, A.; SCHREYER, J.; JACKEL, G. (1995): "State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining", In: Tunneling and Underground Space Technology, 10/4, 413–431.
- [2] ZHANG, F.; HUANG, H. (2010): „Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction - Tunneling and Underground Space Technology, 25, page 99–107.
- [3] WHITE, J.; HURLEBAUS, S.; SHOKOUHI, P.; WIMSATT, A. (2015): „Nondestructive Testing Methods for Underwater Tunnel Linings: Practical Application at Chesapeake Channel Tunnel”, In: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) September 15 - 17, 2015, Berlin, Germany, 4p.
- [4] ZAN, Y.; LI, Z.; SU, G.; ZHANG, X. (2016): „An innovative vehicle-mounted GPR technique for fast and efficient monitoring of tunnel lining structural conditions - Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation,
Download: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csndt.2016.10.001>
- [5] DEUTSCHE BAHN (2014): "DB RIL 853 – Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten", Neuausgabe, gültig ab 01.06.2002.
- [6] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (2010): „Tunnel Operations, Maintenance, Inspection and Evaluation (TOMIE) Manual”, In: Montero, R. et al. (2015): "Past, present and future of robotic tunnel inspection - Automation in Construction", 59, 99-112
- [7] WHITE, J.; HURLEBAUS, S.; SHOKOUHI, P.; WIMSATT, A. (2015): "Nondestructive Testing Methods for Underwater Tunnel Linings" International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE),4p.
- [8] WIMSATT, A.; WHITE, J.; LEUNG, C.; SCULLION, T.; HURLEBAUS, S.; ZOLLINGER, D.; GRASLEY, Z.; NAZARIAN, S.; AZATRI, H.; YUAN, D.; SHOKUHI, P.; SAARENKETO, T.; TONON, F. (2012): „Mapping Voids, Debonding, Delamination, Moisture, and Other Defects Behind or Within Tunnel Linings”, SHRP2, Project No. R06, 555p.
- [9] TÜV RHEINLAND (2015): „Georadaruntersuchung Selzthaltunnel”, Messbericht Nr. BBMTR15003 (nicht veröffentlicht).
- [10] UTSI, E.C. (2017): „Ground Penetrating Radar – Theory and Practice”, Butterworth-Heinemann, 205p.
- [11] IFC Infra (2018): "IFC Infra(structure)", <http://ifcinfra.com/> (13.11.2018).

AMBITION

Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und
Bewertung von Eisenbahn- und Straßentunnel

Abstimmung mit dem strategischen Asset Management

Deliverable D6

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2015

Version 0.3

Versionshistorie

Version	Änderung	Bearbeiter
0.1	Berichtsvorlage, Formatvorlagen, Gliederung	STEFAN
0.2	Input AIT	STEFAN
0.3	Input ILF	GRUNICKE

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung.....	3
1 Kontext zu Asset Management Systemen.....	4
1.1 Konsistenz mit anderen Asset Klassen	4
1.2 Weiterentwicklung der traditionellen Zustandsbewertung zum Integrierten Risikomanagement	4
1.2.1 Traditionelles Erhaltungsmanagement.....	4
1.2.2 Risikobewertung im Tunnel Asset Management.....	5
1.3 Konnex zur ISO 55000	7
2 Datenmanagement.....	9
2.1 Allgemeines.....	9
2.2 Mehrwert durch Digitalisierung.....	9
2.3 Empfehlung zur Datenvorhaltung.....	10
3 Empfehlungen zur Implementierung.....	13
Literaturverzeichnis.....	14

Einleitung

Tunnelbauwerke stellen zumeist Schlüsselbauwerke in den Verkehrsnetzen dar und gelten daher oftmals als kritische Infrastruktur. Sie weisen in ihrer Topologie im Vergleich zu anderen Asset-Klassen einige Besonderheiten auf. Es handelt sich in der Regel um linienförmige Bauwerke mit z.T. großer Längserstreckung und/oder wechselnden Zusammensetzung (z.B. geologisch/geotechnische Verhältnisse, Außenschale, Expositionsverhältnisse) entlang ihrer Achse. Diese Eigenschaften sind für die Zustandsbewertung sowie zahlreiche Aspekte der Instandhaltung von großer Bedeutung. In den Deliverables D1-D5 des Projekts AMBITION wurden bislang Lösungsansätze präsentiert, welche in erster Linie technische und technologische Aspekte der Zustandserfassung und der Zustandsbewertung von Straßen- und Eisenbahntunnel betreffen. Allen Bauwerken ist jedoch gemein, dass im Rahmen des Asset Managements nicht nur der Objektsicht, sondern auch der Netzsicht eine maßgebliche Rolle zukommt. Der organisatorische und strategische Kontext ist daher von einer Weiterentwicklung der Zustandsbewertung ebenso betroffen. Im vorliegenden Deliverable D6 werden diese Gesichtspunkte näher erörtert.

1 KONTEXT ZU ASSET MANAGEMENT SYSTEMEN

1.1 Konsistenz mit anderen Asset Klassen

Objektive und effiziente Möglichkeiten der Zustandserfassung unterstützen den Anlagenverantwortlichen dabei, den Blick auf das Wesentliche zu richten. Auf Netzebene wird dies durch das in D3/D4 [2] und D5 [3] vorgestellte Konzept der Zustandsbewertung ermöglicht. Hierbei handelt es sich um eine evidenzbasierte Vorausschau auf die Zustandsentwicklung in Form des Substanzwertes und den mittel- bis langfristigen Investitionsbedarf, der durch die baulich-konstruktiven Komponenten ausgelöst wird.

Durch Kombination mit Zustandsmodellen anderer Gewerke (E&M) entsteht ein integriertes Lifecycle-Management für die Asset-Klasse Tunnel, wie es auch bereits bei anderen Assets (z.B. Brücken, Pavement) gelebt wird. Der Reifegrad des Managements der Asset-Klasse Tunnel wird somit auf jenen anderer Infrastrukturen angehoben.

1.2 Weiterentwicklung der traditionellen Zustandsbewertung zum integrierten Risikomanagement

1.2.1 Traditionelles Erhaltungsmanagement

Die Auswahl von Erhaltungsmaßnahmen und deren Durchführungszeitpunkte erfolgte in der Vergangenheit oftmals auf Grundlage von „Worst-First“-Reihungen und nur in einzelnen Teilbereichen auf Basis von Lebenszyklusmodellen. Anfang des 20. Jahrhunderts gelangten zusehends heuristische Optimierungsverfahren zum Einsatz, welche eine näherungsweise Lösung komplexer Entscheidungs- und Optimierungsprobleme ermöglichten und einen ersten Schritt in Richtung integriertes Tunnel Asset Management darstellten.

Die Abschätzung des optimalen Instandsetzungszeitpunktes einzelner Anlagen bzw. Bauwerke beruht heutzutage in erster Linie auf der Entwicklung realitätsnaher, zustandsbasierter Alterungs- bzw. Zustandsprognosemodelle. Im AMBITION Deliverable D2 (Kriterienkatalog für die Erstellung von bauwerksspezifischen Alterungsmodellen) wurde auf Basis der zur Verfügung gestellter BAUT-Daten ein erster Versuch unternommen, Degradationskurven für das Autobahn- und Schnellstraßennetz abzuleiten. Deren Basis sind gemessene Zustandsdaten bzw. auf (ingenieurmäßigen) Einschätzungen beruhende Zustandsbeurteilungen. Unter Heranziehung von Alterungs- und Zustandsprognosemodelle sowie des aktuellen Zustands kann für jede bauliche Anlage eine Prognose für den weiteren Zustands-

verlauf erstellt und daraus potenziell erforderliche Erhaltungsmaßnahmen beim Erreichen eines bestimmten Zustandes abgeleitet werden.

Diese Vorgehensweise entspricht der „klassischen“ Lebenszyklusanalyse auf technischer Ebene, die maßgebend durch die Einhaltung bestimmter technischer Grenzwerte (Warnwerte, Schwellenwerte etc.) definiert ist. Der optimale Instandsetzungszeitpunkt ist jener, der aus rein technischer Überlegung hergeleitet wurde und der bei einer Betrachtung der Erhaltungsnotwendigkeiten auf Netzebene (z.B. Einschränkung durch budgetäre Vorgaben) oftmals nicht eingehalten werden kann. Eine Betrachtung auf Netzebene ist bei größeren Infrastrukturanlage eine strategische Notwendigkeit, da auch strategische Überlegungen wie z.B. Erhaltungsbudget, Netzverfügbarkeit, Verkehrssicherheit einen maßgeblichen Einfluss auf den optimalen Instandsetzungszeitpunkt haben. Die Erhaltungsnotwendigkeiten einzelner Objekte oder Anlagen stehen somit in Konkurrenz zueinander, sodass weitere Entscheidungsmodelle in den Prozess integriert werden müssen.

1.2.2 Risikobewertung im Tunnel Asset Management

Im Erhaltungsmanagement werden in jüngster Zeit verstärkt Risikomodelle herangezogen, um die Auswirkungen unterschiedlicher Erhaltungsstrategien und Maßnahmenabfolgen berechnen und die betriebs- und volkswirtschaftlich vorteilhafteste Variante ermitteln zu können. Unter Risiko versteht man die Kombination aus der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ereignis auftritt, und dem Ausmaß des damit verbundenen Schadens (Ausmaß der Konsequenz). Die Eintrittswahrscheinlichkeit (Schadenswahrscheinlichkeit, Versagenswahrscheinlichkeit) bezeichnet den statistischen Erwartungswert für das Eintreten eines bestimmten Ereignisses in einem bestimmten Zeitraum.

Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit x Konsequenz des Versagens

Im klassischen Bau- und Erhaltungsmanagement wird üblicherweise der Begriff „Versagenswahrscheinlichkeit“ (engl. Probability of Failure, PoF) verwendet, da die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauwerk/Tragwerk den vorherrschenden Beanspruchungen, denen es unter normalen Bedingungen ausgesetzt ist, Stand hält, im Mittelpunkt der Betrachtung steht. Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit ist somit von zentraler Bedeutung für Erhaltungs- und Sicherheitsanalysen auf zuverlässigkeitstheoretischer Basis. In den vergangenen Jahrzehnten wurden weltweit unterschiedlichste Ansätze und Methoden zur Risikobewertung entwickelt (z.B. Functional Hazard Analysis, Engineering Safety Management, Fehlerbaumanalyse). Seit langem werden in den unterschiedlichen Bereichen der

Risikoforschung u.a. Risikomatrizen (siehe Abbildung 1) verwendet, um technische Systeme und deren Risiken untersuchen und bewerten zu können.

Risikomatrizen können daher zur Beurteilung aller im Rahmen einer Risikoanalyse auftretenden Risiken verwendet werden, d.h. zur Feststellung, ob das vorliegende Restrisiko unter Berücksichtigung aller vorhandenen Gegenmaßnahmen tolerierbar ist, oder ob zusätzliche Maßnahmen zur Risikoreduktion erforderlich sind.

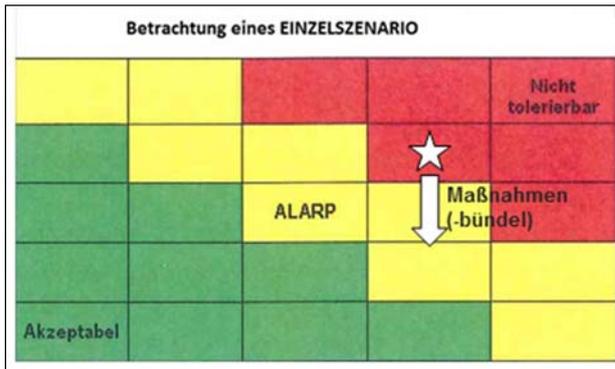


Abbildung 1: Beispiel einer Risikomatrix mit/ohne Maßnahmen

Ein holistischer Risikoansatz (siehe Abbildung 2) verknüpft die verschiedenen Ebenen (Objekt-/Anlagenebene und Netzebene) und ermöglicht eine gesamthafte Betrachtung des Anlagenvermögens aus Sicht des strategischen Asset Managements.

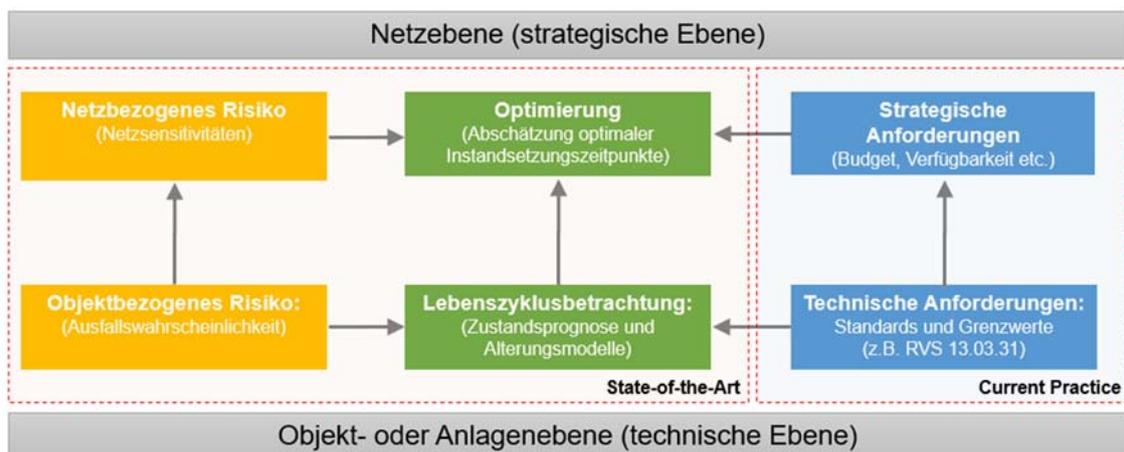


Abbildung 2: Integraler Ansatz für ein Tunnel Asset Management System

Auf Objekt- oder Anlagenebene wird es dadurch möglich, das Risiko eines Ausfalls anhand einer technischen Beurteilung abzuschätzen. So lassen sich aus Alter und Zustand mögliche Wahrscheinlichkeiten für ein Versagen ableiten, welche (wenn ein bestimmter Zustand erreicht wird) zu einem nicht mehr akzeptablen Risiko führen, sodass Erhaltungsmaßnahmen zur Reduktion des Risikos unerlässlich sind.

Die Risikobetrachtung auf Netzebene ist jedoch nicht nur eine Zusammenführung des Risikos (aus der risikobasierten Lebenszyklusanalyse) einzelner Objekte und deren Vergleich bzw. Gegenüberstellung. Das Risiko auf Netzebene ist eine wesentliche komplexere Angelegenheit, da auch die Wirkungen im Netz selbst berücksichtigt werden müssen. So ist z.B. die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Streckenabschnitts, wo keine Ausweichmöglichkeiten bestehen, mit einem höheren Risiko zu bewerten, als ein Streckenabschnitt, der eine deutlich geringere Versagenssensitivität aufweist. Dies bedeutet, dass letztendlich der optimale Instandsetzungszeitpunkt in beiden Fällen unterschiedlich sein wird. Im ersten Fall ist eine vorausschauende Erhaltungsstrategie (Durchführung der Maßnahme zu einem sehr frühen Zeitpunkt) besser zu bewerten als ein Zuwarten bis zum technisch optimalen, aber möglicherweise deutlich späteren Zeitpunkt.

1.3 Konnex zur ISO 55000

Die Normenserie ISO 5500x [4] stellt den zukünftigen Industriestandard im Bereich Infrastructure Asset Management dar. Das im Rahmen von AMBITION vorgestellte Konzept ist ein Baustein im Rahmen eines integrierten Asset Managements, welches sich an diesem Standard orientiert. Die ISO zeigt die wesentlichen Grundpfeiler des Asset Managements und eines Asset Management Systems auf (vgl. Pkt. 2.4.2 der ISO 55000 [4]). Sie werden im Rahmen von AMBITION wie folgt adressiert:

Nutzen (Value): Wert, den es bei Assets zu sichern und aus diesen zu generieren gilt: Die vorgestellte substanzwertorientierte Zustandsbewertung repräsentiert das tatsächliche Anlagevermögen einzelner Assets und der jeweiligen Asset-Klasse umfassender als die bislang verwendete prioritätsorientierte Bewertungssystematik.

Abgleich (Alignment): Umsetzung der Unternehmensziele in Form risikobasierter, evidenzbasierter (informationsgetriebener) Planungs- und Entscheidungsfindungsprozesse sowie Aktivitäten: Die Evidenzbasis wird durch die Entwicklung von Degradationsmodellen hergestellt, welche als Zustandsprognosemodelle unmittelbar die Planung und Entscheidungsfindung unterstützen. In AMBITION wurden derartige Modelle auf Basis vorhandener Daten (ASFiNAG: BAUT-Analyse, ÖBB: Erfahrungswerte aus Delphi-Prozess) entwickelt. Diese stellen jedoch lediglich Prototypen dar, welche auf der bisherigen Bewertungssystematik basieren (Bauwerksnote = Note des schlechtesten Blocks). Es gilt nun, die entwickelten Modelle im Rahmen der zukünftigen Bewertungssystematik zu kalibrieren und fortzuschreiben, um die Prognosequalität hinsichtlich Substanzwert zu verbessern. Nicht zuletzt gewährleistet der Einsatz objektiver Methoden der Zustandserhebung eine entsprechende

Rohdatenqualität. Zustandsprognosemodelle erlauben die Darstellung von Ausfallswahrscheinlichkeiten und sind Bestandteil eines adäquaten Risikomanagements (Kap. 1.2.2).

Leadership/ Kontext der Organisation: Das Thema „Nachvollziehbarkeit der Zustandsnotenbewertung“ stellt das Rollenverständnis aller Prozessbeteiligten in den Mittelpunkt der Betrachtung. Die Zustandsbewertung befindet sich hierbei in einem Spannungsfeld zwischen dem Anspruch auf Nachvollziehbarkeit (z.B. mittels Schadenskataloge und einer festen Verknüpfung mit Zustandsnoten) und der unabhängigen und unbeeinflussten fachlichen Einschätzung des Prüfenden auf Basis der jeweiligen Objektkenntnis.

Für ein integriertes Asset Management ist es unerlässlich, dass die Prozesse auf allen Ebenen vom selben Rollenverständnis, einer gemeinsamen Verantwortung sämtlicher Prozessbeteiligten und deren Beitrag zur einer hierarchie-übergreifenden (integrierten) Bewirtschaftung der überantworteten Infrastruktur getragen sein müssen. Wenn ein derartiges Verständnis nicht sichergestellt ist, besteht die Gefahr ggf. verzerrter Entscheidungsgrundlagen im Asset Management. Die Thematik der Zustandsbewertung von Tunnelbauwerken ist somit nicht isoliert auf den Bereich der technischen Instandhaltung zu betrachten, sondern berührt eine Vielzahl an Ebenen innerhalb der Organisation (vgl. Abbildung 3).

Sicherstellung (Assurance): Das vorgeschlagene Konzept der Zustandsbewertung im Rahmen der Bauwerksüberwachung ist einer von vielen Monitoring- und Überwachungsprozessen, welche sicherstellen, dass Tunnel den geforderten Zweck erfüllen.



Abbildung 3: Begriffsmodell des Asset Managements (Quelle: IAM [5])

2 DATENMANAGEMENT

2.1 Allgemeines

Gerade in den bundesweit agierenden Infrastrukturnetzen von ASFINAG und ÖBB ist es essentiell, eine Datenstrukturlandschaft zu entwickeln und zu pflegen, welche fundierte Aussagen und Prognosen für das Asset-Portfolio ermöglicht. Nur mit einer adäquaten, standardisierten und objektiven Datenstrukturlandschaft ist es möglich, innerhalb gleicher Asset-Klassen, wie z.B. bergmännische Tunnelanlagen, ein konsistentes Asset Health Management (AHM) zu erstellen, welches sich den Datenbestand zunutze macht.

Durch den Einsatz aktueller Technik in der Datenakquise und Zustandserfassung und in der Datenhaltung (von Bauwerksinformationssystem bis BIM) wird sichergestellt, dass der Fokus des Anlagenverantwortlichen oder Prüfsingenieurs auf die wesentlichen Problemstellen gelegt werden kann. Digitalisierung ist hier eine Chance, den Prozess der Datenakquise und -verwertung zu vereinfachen und dadurch einen Mehrwert für die Zustandsbewertung und Instandhaltungsplanung zu generieren. Dieser Mehrwert sollte jedoch nicht von einem unverhältnismäßig hohen Aufwand der Beteiligten für die Datenerfassung und für die Datenpflege aufgezehrt werden. Die vorgehaltenen Daten sollten daher auf den bereits in D2 [1] [Kap. 3.3](#) (Katalog relevanter Bestandsdaten und Umfeldkriterien) und D3 [2] [Kap. 5.2](#) (Katalog zu erfassender Schadensphänomene) erörterten Bedarf und in Pkt. 2.3 empfohlenen Umfang fokussieren.

2.2 Mehrwert durch Digitalisierung

Vergleichende Differentialanalysen mehrerer Inspektionsepochen und die georeferenzierte Überlagerung von Daten aus anderen Quellen (z.B. Georadar, geologische Dokumentation des Vortriebs, punktuelle und flächige Sonderprüfungen) sind wertvolle Werkzeuge für die Instandhaltung. Anhand der georeferenzierten Datenvorhaltung und Auswertung auf der Ebene „Tunnelblock“ ist der Substanzwert verhältnismäßig einfach und ohne besonderen Mehraufwand abbildbar. Ein Bauwerksinformationssystem ist mehr als ein reiner Viewer für Tunnelscanaufnahmen und sollte als unabhängige integrierte Datenplattform auf Objektebene gesehen werden. Auch bedarf es der Definition entsprechender Schnittstellen und offener Datenaustauschformate, um die Durchgängigkeit mit anderen Systemen auf Objektebene (z.B. BIM) oder Netzebene (Datenbanken, GIS u.dgl.) sicherzustellen (siehe dazu Empfehlungen in [Kap. 3](#)).

2.3 Empfehlung zur Datenvorhaltung

Durch die georeferenzierte Datenvorhaltung in einem Bauwerksinformationssystem (vgl. D5 [3], Kap. 3) ist die für den Substanzwert der Anlage wesentliche Auswertung auf der Ebene „Tunnelblock“ verhältnismäßig einfach und ohne besonderen Mehraufwand realisierbar.

Für die zukünftige Kalibrierung und Fortschreibung von Zustandsprognosemodellen wird der Datenumfang der Tabelle 1 und Tabelle 2 empfohlen. Eine netz- und bauartspezifische Konkretisierung (ÖBB/ASFINAG) ist dabei noch erforderlich.

Tabelle 1: Vorschlag vorzuhaltende zustandsrelevante Bestandsdaten und Umfeldkriterien

Zustandsrelevante Bestandsdaten und Umfeldkriterien	
grundlegende Bauwerksdaten (blockweise)	Schädigungsursachen (blockweise)
<ul style="list-style-type: none"> • Anlagenkonfiguration (ein-/zweigleisig, Richtungsverkehr/ Gegenverkehr) • Bauweise • Materialien bzw. Baustoffe und deren nähere Spezifizierung (z.B. Expositionsclassen Beton), • Dimensionen / Querschnittsgeometrie • Art des Entwässerungssystems/ Abdichtungssystems • abschnittsweise Daten zu Geologie und Hydrogeologie • Initialschäden • ergänzende Informationen zu Planungs- und Ausführungsqualität. 	<p>Exposition gegenüber externen Schädigungsgrößen wie z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spritzwasserbereich, • Sprühnebelbereich, • Temperatur • Verkehrsart und -stärke • Geotechnische Beanspruchung (Hangschub, Druckhaftigkeit, Quell/Schwelldruck u.dgl.) <p>Für die genannten Parameter sind einfache Kategorien zweckmäßig, welche sich netzspezifisch zwischen Bahn und Straße unterscheiden, wie z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • „kein Gebirgsdruck“ / „Gebirgsdruck und Langzeitumlagerungen“ • JDTV $>/< x$ KFZ/d • Schwerverkehrsanteil $>/< y\%$ • Einfahrtbereich bis z m ab Portal / Innenstrecke <p>Diese Kategorien sind aus vorhandenen GIS-Daten bzw. aufgrund der Georeferenzierung nach Bedarf dynamisch anpassbar.</p>

Tabelle 2: Vorschlag Katalog potentiell relevanter Zustandsphänomene

Unbewehrter Ortbeton- oder Spritzbetonausbau	Bewehrter Ortbeton- oder Spritzbetonausbau	Mauerwerks- gewölbe
<ul style="list-style-type: none"> • allgemeine flächige und linienförmige Oberflächenveränderung (nicht-qualifizierend und ohne nähere Differenzierung) • Längsrisse, Querrisse und Schrägrisse*) • Versetzte oder ausbrechende Rissufer • Feuchte oder zeitweise wasserführende Risse • Risse, welche geschlossene Flächen umschreiben, ggf. in Kombination mit Blockfuge • Sichelförmige Risse an Blockfugen • Oberflächen-Netzrisse (Krakeele o.ä.) • Blockfugenabplatzungen • Profil-/Blockfugenversätze >1cm • Arbeitsfugen mit (zeitweiser) Wasserführung oder Sinterspuren • Abschalungen, Abplatzungen oder Hohlstellen in der Laibung • Absandende Betonoberfläche • Feuchtstelle • Sinterspuren • Salzbildung • Eisbildung • Nest und poröser Beton • zeitliche Veränderung der o.a. Phänomene 	<ul style="list-style-type: none"> • allgemeine flächige und linienförmige Oberflächenveränderung (nicht-qualifizierend und ohne nähere Differenzierung) • Längsrisse, Querrisse und Schrägrisse*) • Versetzte oder ausbrechende Rissufer • Feuchte oder zeitweise wasserführende Risse • Risse mit Rostspuren • Risse, welche geschlossene Flächen umschreiben, ggf. in Kombination mit Blockfuge • Sichelförmige Risse an Blockfugen • Oberflächen-Netzrisse (Krakeele o.ä.) • Blockfugenabplatzungen • Profil-/Blockfugenversätze >1cm • Arbeitsfugen mit (zeitweiser) Wasserführung oder Sinterspuren • Abschalungen, Abplatzungen oder Hohlstellen in der Laibung • Abplatzung der Betondeckung • Freiliegende Bewehrung • Betonverfärbung aus Korrosion • abzeichnende Bewehrung 	<ul style="list-style-type: none"> • allgemeine flächige und linienförmige Oberflächenveränderung (nicht-qualifizierend und ohne nähere Differenzierung) • Längsrisse, Querrisse und Schrägrisse*) • Versetzte oder ausbrechende Rissufer • Feuchte oder zeitweise wasserführende Risse • Risse, welche geschlossene Flächen umschreiben, ggf. in Kombination mit Blockfuge • Blockfugenabplatzungen • Profil-/Blockfugenversätze >1cm • Verdrückungen/Ausbauungen/Verformungen des Gewölbes • Abplatzungen und Hohlstellen in den Mauersteinen • Absandende Mauersteine • Lose oder fehlende Mauersteine • Loser oder fehlender Fugenmörtel • Feuchtstelle • Sinterspuren • Ausblühung • Eisbildung • zeitliche Veränderung der o.a. Phänomene • sonstige unspezifische oder nicht näher zuordenbare

<ul style="list-style-type: none"> • sonstige unspezifische oder nicht näher zuordenbare allgemeine Veränderung der Oberfläche (außer Verschmutzung) • Thermische Unstetigkeiten/ Anomalien • Betondruckfestigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Absandende Betonoberfläche • Feuchtstelle • Sinterspuren • Salzbildung • Eisbildung • Nest und poröser Beton • zeitliche Veränderung der o.a. Phänomene • sonstige unspezifische oder nicht näher zuordenbare allgemeine Veränderung der Oberfläche (außer Verschmutzung) • Thermische Unstetigkeiten/ Anomalien • Potentialfeldmessung • Betondruckfestigkeit • Chlorid-Gehalt • Karbonatisierungstiefe 	<p>allgemeine Veränderung der Oberfläche (außer Verschmutzung)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thermische Unstetigkeiten/ Anomalien
---	--	---

*) Die erfasste bzw. erkannte Mindestrissbreite ist in der Regel objektspezifisch und bauarttypisch zu betrachten bzw. zu definieren. Bei bewehrten Stahlbetoninnenschalen ist sie üblicherweise geringer als bei unbewehrten Innenschalen oder bei Mauerwerksgewölben.

3 EMPFEHLUNGEN ZUR IMPLEMENTIERUNG

Die Implementierung des in D3/D4 [2] und D5 [3] vorgeschlagenen Konzepts ist ein gradueller Vorgang, im Zuge dessen die Systematik und Methoden der Zustandserfassung und -bewertung und die betreffenden Prozesse entsprechend den jeweiligen Randbedingungen der Organisation anzupassen sind. Eine operative Ausrollung wird aus einer Reihe von Maßnahmen bestehen. Nachstehend sind exemplarisch Aktivitäten angeführt, deren Umsetzung in einem ersten Schritt zweckmäßig erscheinen:

Tabelle 3: Maßnahmenliste zwecks Implementierung des AMBITION-Konzepts

Massnahme	Ziel
Pilot-Anwendung Bewertungsschema/ Benotungsschema für eine Auswahl von Tunnelobjekten im Rahmen der kommenden Prüfung parallel zum bisherigen Schema	Evaluierung der Praktikabilität der blockweisen Bewertung und Differenzierung zwischen Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit
Benchmarking Skalenverständnis: Bewertung eines oder mehrerer Objekte durch verschiedene interne und externe Fachleute	Bewertung eines durchgängigen Skalenverständnisses
Erstellung von bauarttypischen Schadenskatalogen (z.B. Konkretisierung des UIC-Katalogs) auf typische nationale Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherstellung eines durchgängigen Skalenverständnisses • Erhöhung der Nachvollziehbarkeit der Benotung; • Grundlage für automatisierte (nicht qualifizierte) Bildauswertung zur Change Detektion/Differentialanalyse
Lastenhefte Tunnelscan (hinsichtlich Datenaustauschformat, Auflösung und Genauigkeit, Geschwindigkeit etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Trennung Datenaufnahme/Datenlieferant von Datenauswertung/Datenverarbeiter • Sicherstellung Datenaustausch mit Bauwerksinformationssystem und dessen Analysetools
Lastenheft Bauwerksinformationssystem (Anforderungen Datenformate, Schnittstellen, Analysemöglichkeiten, Datenstruktur)	
Ergänzung / Anpassung der vorgehaltenen Bestands- und Zustandsdatenstruktur (Tabelle 1 und Tabelle 2) und deren blockweise Erfassung	Datengrundlage für die Kalibrierung und Fortschreibung der Degradationsmodelle für Prognosen in der Instandhaltung
Entwicklung von LCM-Prognosemodellen, welche alle wesentlichen Gewerke (z.B. elektro-maschinelle Ausrüstung) umfasst.	Bewertung der Signifikanz der Alterung baulich-konstruktiver Anlagenkomponenten im Gesamtanlagenkontext; ggf. Anpassung der Anforderung an Detaillierung bzw. Komplexitätsgrad der Degradationsmodelle baulicher Komponenten

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AMBITION Deliverable D.2
- [2] AMBITION Deliverable D.3/D.4
- [3] AMBITION Deliverable D.5
- [4] ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2014): “ISO 55000:2014 – Asset Management – management Systems – Overview, Principles and terminology”.
- [5] The Institute of Asset Management (2014): „Asset Management – an anatomy“ (Issue 2, July 2014)