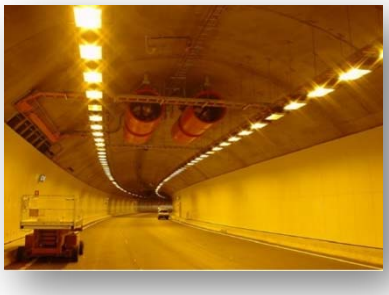
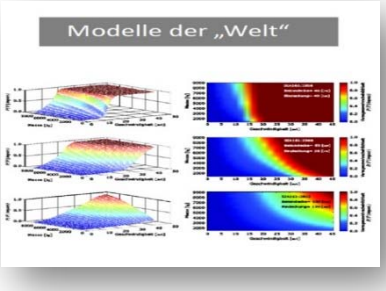
Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA

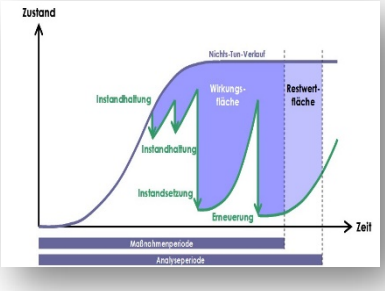
OPtimAL

Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung 2017 (**VIF 2017**)

September 2020







Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität
Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
1010 Wien

Für den Inhalt verantwortlich:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Amstein + Walthert Progress AG
UHG Consult ZT
PMS-Consult GmbH

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien

Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA

OPtimAL

Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung (**VIF2017**)

AutorInnen:

DI Christian STEFAN

DI Urs H. GRUNICKE

DI Veronika Prändl-Zika

Dr. Alfred Weninger-Vycudil

Dr. Andreas HULA

Dr. Andreas VAN LINN

Dr. Barbara BROZEK

Dr. Dominik PRAMMER

MSc Lars Derek MELLERT

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

- AIT Austrian Institute of Technology GmbH
- Amstein + Walthert Progress AG
- DI Urs Heinrich Grunicke, UHG Consult ZT
- PMS-Consult GmbH (seit 2019 Deighton GmbH)

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung 8
1.1 Ziel 8
1.2 Vorgehen 9
1.2.1 Innovationsgehalt des Vorhabens 9
1.2.2 Methode und wissenschaftlicher Lösungsansatz 9
1.3 Begriffsdefinitionen 11
2 Stand der Forschung 16
2.1 Lebenszyklusaspekte der elektromaschinellen Ausrüstung von Strassentunneln 16
2.2 Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten 17
2.3 Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken – Modulares Prozessmodell zur ökonomischen Optimierung von Straßentunneln 18
2.4 Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel 19
2.5 Integrativer Ansatz zur Messung und Bewertung von Eisenbahn- und Straßentunnel 22
2.6 Bewertung der elektromaschinellen Ausrüstung von Straßentunneln für das Land Tirol 25
2.7 RAMS und Lebenszyklusbewertung von Strassentunneln 38
2.8 Instandsetzungsstrategien und -verfahren für Verkehrstunnel 40
3 Systemarchitektur und Datengrundlagen – Deliverable 2.1 41
3.1 Systemabbildung 41
3.1.1 Abgrenzung 41
3.1.2 Strukturierung 43
3.2 Datengrundlagen für gewerksspezifische Lebenszyklen 52
3.2.1 Alterungscharakteristik und Nutzungsdauern Bau 53
3.2.2 Alterungscharakteristik und Nutzungsdauern E&M 55
3.2.3 Maßnahmenkataloge 61
3.2.4 Identifikation kritischer Komponenten 66
3.3 Wechselwirkungsmatrix 66
3.3.1 Grundsätze 66
3.3.2 Wechselwirkungen 68
3.3.3 Weitere bauzeitliche Aus- und Wechselwirkungen 71

4 Risikobasierte Entscheidungsmodelle – Deliverable 3.1 72
4.1 Risikobasierte Inspektionen im Rahmen der Instandsetzung 73
4.2 Datengrundlagen ASFINAG 75
4.2.1 Bauliche Anlagen 75
4.2.2 Elektromaschinelle Gewerke 76
4.2.3 Datenfusion 78
4.2.4 Tunneldatenbank zur Risikomodellierung 82
4.3 Degradationskurven für Tunnelbauwerke 87
4.3.1 Alterungsfunktionen für bauliche Anlagen 87
4.3.2 Alterungsfunktionen für elektromaschinelle Ausrüstung 101
4.4 Risikomatrix 104
4.4.1 Ableitung der Ausfallswahrscheinlichkeit 105
4.4.2 Identifikation und Quantifizierung der Konsequenzen 110
5 Zielsysteme für optimierte regelelebenszyklen – Deliverable 4.1 115
5.1 Regellebenszyklen 115
5.1.1 Definition Regellebenszyklus 115
5.1.2 Spannungsfeld Zustand, Verkehrsbeeinträchtigung und Erhaltungsrisiko 116
5.1.3 Eingangsgrößen für die Beschreibung der Regellebenszyklen 117
5.2 Definition von Zielsystemen für Regellebenszyklen 123
5.3 Ergebnisse der Analyse und optimales Erhaltungsintervall 126
5.3.1 Zielsetzung 126
5.3.2 Ergebnisse der Algorithmus- und Modellanwendungen auf das ASFINAG Tunnelportfolio 127
6 Übertragung auf Asfinag Gesamtportfolio – Deliverbale 5.1 134
6.1 Einleitung 134
6.2 Generelle Vorgehensweise 134
6.2.1 Erstellung der IMT-Systemkonfiguration „Tunnel: Bau- und E&M-Technik“ (Prototyp) 135
6.2.2 Praktische Anwendung Lebenszyklusalgorithmus mit den Daten der ASFINAG 135
6.3 Software dTIMS 136
6.4 Bausteine der Systemkonfiguration 136
7 Implementierungsleitfaden 141
7.1 Einleitung 141

7.2 Schritte der Implementierung 143
7.2.1 Ablaufschema der Implementierung 143
7.2.2 Anforderungen an Daten (Qualität und Quantität) 145
7.2.3 Anforderungen an Asset Management Systeme 145
7.2.4 Anforderungen an die Ergebnisse 146
7.3 Vorschläge für die strategische Planung sowie die Planung auf Objektebene im Rahmen eines Bauprogramms 147
7.4 Prozesse nach Implementierung 148
7.5 Risiko der Implementierung 148
8 Fazit und Empfehlungen 150
9 Literaturverzeichnis 155

1 EINLEITUNG

1.1 Ziel

Heutige Straßentunnel (insbesondere im höherrangigen Straßennetz) sind komplexe Systeme, welche erst in einer engen Abstimmung unterschiedlicher Anlagenkomponenten einen sicheren und verfügbaren Verkehrsweg gewährleisten. Die teils sehr heterogenen Anlagen unterliegen jedoch diversen Alterungsprozessen, die wiederkehrender Erhaltungsmaßnahmen bedürfen.

Gerade zwischen den beiden Gruppen der bautechnischen Anlagenteile (Tunnelröhre, Entwässerung, Fahrbahnbelag etc.) und den elektro-maschinellen Gewerken (Tunnellüftung, Beleuchtung, Energieversorgung usw.) wird besonders deutlich, wie sehr die einzelnen Erhaltungszyklen voneinander divergieren. Das Erhaltungsmanagement steht dabei vor der Herausforderung, Strategien zu entwickeln, die sowohl dem notwendigen Funktionserhalt der Einzelkomponenten über deren jeweiligen Lebenszyklus als auch dem Anspruch einer optimierten Bewirtschaftung des Gesamtsystems gerecht werden. Eine Synchronisierung von Maßnahmen erfolgt dabei im Spannungsfeld einander konkurrierender Zielsetzungen, wie maximierte Anlagenverfügbarkeit, minimaler Lebenszykluskosten oder bestmögliche Ausschöpfung von Abnutzungsvorräten.

Das durch Mittel der FFG geförderte Forschungsprojekt OPtimAL (Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA) verfolgt das Ziel, ein Decision Support Tool für das operative Asset Management von Straßentunnelanlagen mit einer möglichst hohen Praxisnähe zu entwickeln. Hierfür sind Realdaten erforderlich. Einen wesentlichen Teil der Arbeit nimmt dabei die Herleitung optimierter Regellebenszyklen für Bau- und E&M-Komponenten und deren Übertragung auf das Gesamtportfolio der ASFiNAG ein.

Neben der Aggregation der Ergebnisse für Einzelkomponenten auf die Gesamtbauwerksebene (Tunnelröhre) ist auch die Betrachtung der Wechselwirkungen der Einzelkomponenten im Gesamtsystem bei den Prozessen der Instandsetzung wesentlich, um risikobasierte Entscheidungsmodelle entwickeln zu können. Gewerkeübergreifende Maßnahmenvarianten können so risikobasiert bewertet werden und einer Optimierungsaufgabe unterworfen werden.

1.2 Vorgehen

1.2.1 Innovationsgehalt des Vorhabens

Mit diesem Forschungsprojekt werden fundierte Regellebenszyklen für Tunnelbauwerke erarbeitet und für eine Optimierung der Instandsetzungsplanung bereitgestellt. Erstmalig erfolgte eine Synthese der Lebenszyklusplanung der baulichen und elektromaschinellen Anlagenteile des Gesamtsystems „Straßentunnel“. Die Resultate fördern einen einheitlichen Umgang mit Lebenszyklusinformationen und stellen damit eine wichtige wissenschaftliche Grundlage für eine ganzheitliche Beurteilung auf Basis eines einheitlichen gewerkeübergreifenden Bezugssystems dar.

Die Anwendung der bereitgestellten Parameter von Regellebenszyklen der baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung in Straßentunneln wird in der Praxis zu einer Standardisierung führen, was wiederum mehr Transparenz in der Ressourcenallokation und eine größere Effektivität und Effizienz der Erhaltungsplanung zur Folge haben wird. Weil das Projekt zur Förderung einer wirtschaftlichen Kosten- und Erhaltungsplanung von Straßentunneln im Rahmen des Integrierten Asset Managements der ASFiNAG beiträgt, sind sowohl die wirtschaftliche als auch die technische Bedeutung gegeben. Aus wissenschaftlicher Sicht trägt das vorliegende Forschungsprojekt zur Verbreitung des Wissensstandes bei und kann aufgrund seines Initialprojekt-Charakters weitere, tiefergehende Forschungstätigkeiten auslösen.

Die Resultate dieses Forschungsprojektes betreffen die Themenbereiche "wirtschaftlicher Umgang mit öffentlichen Geldern" und "Tunnelsicherheit". Sie sind prinzipiell in der angewandten Wissenschaft mit einem starken Praxisbezug sowie aufgrund der Schlüsselfunktion von Tunnelbauwerken im höherrangigen Verkehrsnetz einer großen volkswirtschaftlichen aber auch gesellschaftlichen Relevanz anzusiedeln.

1.2.2 Methode und wissenschaftlicher Lösungsansatz

Prozessgesteuerte und -unterstützte Entscheidungshilfen sind eine wichtige Grundlage für eine objektive und nachvollziehbare Erhaltungsplanung von Anlagen der Verkehrsinfrastruktur. Diese Form der Entscheidungsfindung wird bei vielen Anlagen angewendet (Oberbau, Brücken etc.) und kann auch für die Tunnel inkl. E&M-Technik herangezogen werden. Voraussetzung hierfür sind objektiv anwendbare Untersuchungs- und Beurteilungsverfahren (einheitliche Bewertungsindikatoren, holistische Lebenszyklusbetrachtung, etc.), die in Österreich zur Verfügung stehen und in eine solche Entscheidungshilfe integriert werden können. Aufgrund der relativ komplexen Fragestellung ist es notwendig, den gesamten Prozess in entsprechende Teilaufgaben (vgl. Abbildung 1) zu gliedern, die eine kontinuierliche

Abarbeitung der Fragestellungen ermöglichen. Der technisch-wissenschaftliche Lösungsansatz basiert daher auf einem generellen Bearbeitungs- und Entwicklungsprozess, der in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist.

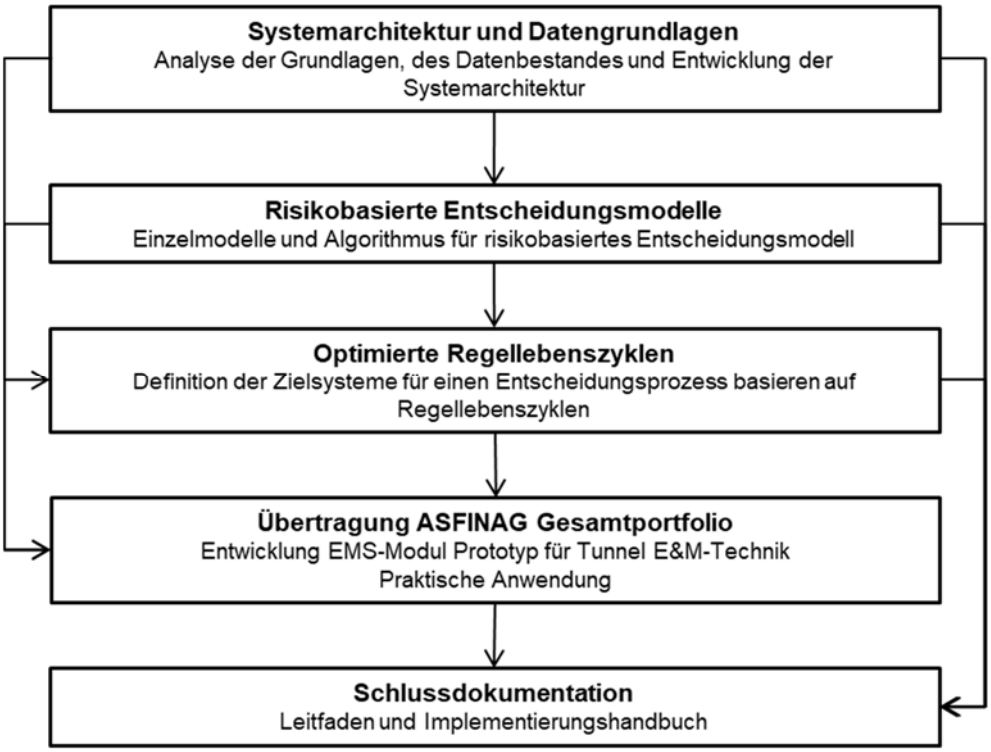


Abbildung 1: Bearbeitungs- und Entwicklungsprozesses

Der Schwerpunkt im Projekt wird definitionsgemäß auf die Lebenszykluselemente der Instandsetzung und Erneuerung gelegt.

Im Folgenden wir der Ablauf für die Entwicklung eines optimierten Regellebenszyklus für Tunnelbauwerke unter Berücksichtigung von Lebenszyklusdiskrepanzen detailliert beschrieben. Das Forschungsprojekt ist in sechs Arbeitspakete (AP) untergliedert, die in Abbildung 2 dargestellt sind.

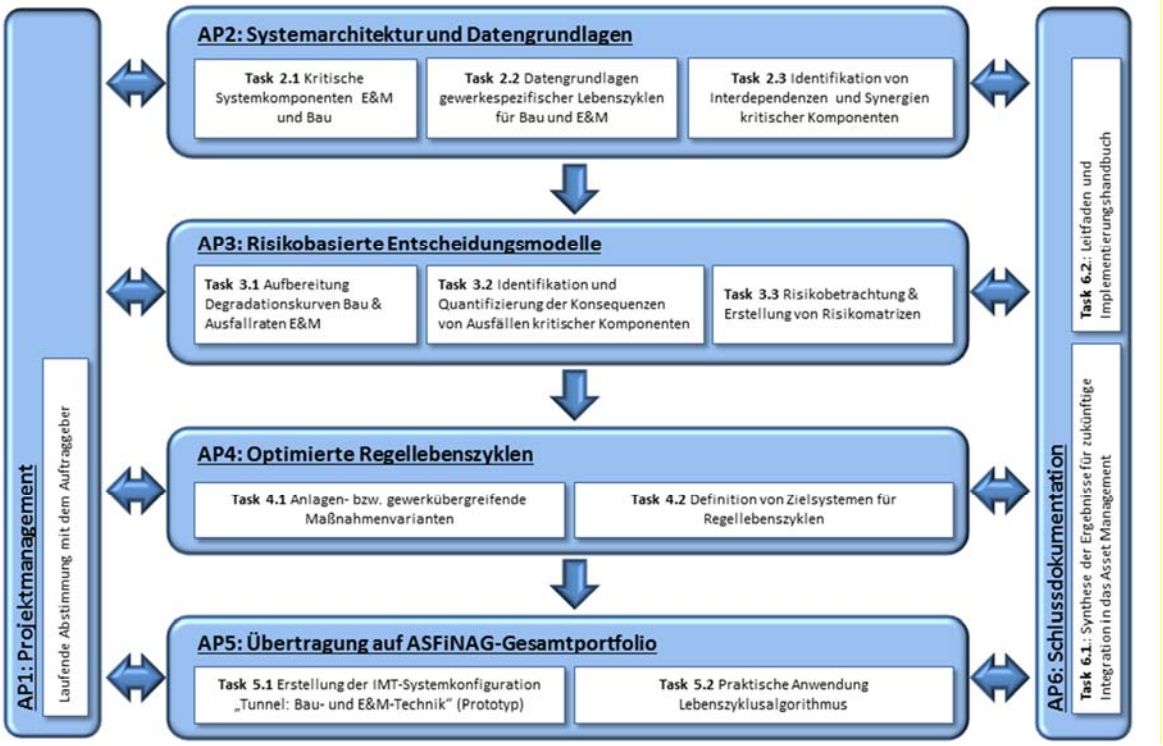


Abbildung 2: Darstellung der Arbeitspakete und Abhängigkeiten

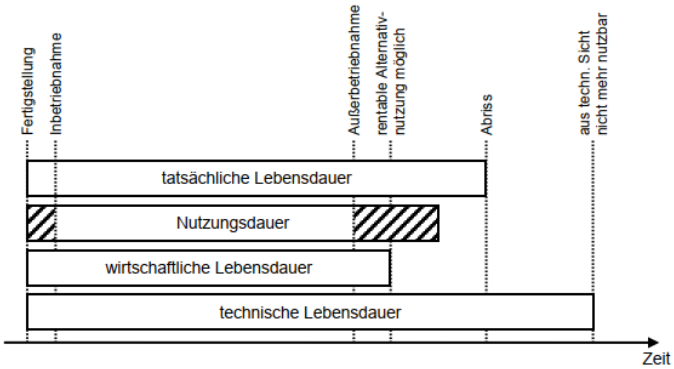
1.3 Begriffsdefinitionen

Um eine einheitliche Vorgehensweise im Rahmen des Projekts OPtimAL sicherzustellen, wird es als notwendig erachtet, die maßgebenden Begriffe vorab zu beschreiben bzw. für das gegenständliche Projekt neu zu definieren. Die nachfolgenden Definitionen (vgl. Tabelle 1) beziehen sich ausschließlich auf den Verkehrsträger „Straße".

Es wird ferner 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 und Definitionen

Begriff	Definition
ALARP	Risikoreduzierung „As Low As Reasonable Practicable". Setzen von Maßnahmen zur Reduktion eines Risikos, sodass das verbleibende Restrisiko nicht unzulässig hoch ist und der Aufwand zur Risikominimierung nicht unverhältnismäßig groß im Vergleich zum erzielten Nutzen ist

Begriff	Definition
	Maßnahmen werden gemäß dem ALARP-Prinzip dann implementiert, wenn sie finanziell und/oder technisch mit vertretbarem Aufwand realisierbar sind
Ausfallrate	Anzahl der Ausfälle einer Einheit während eines gegebenen Zeitinvervalls dividiert durch das betrachtete Zeitintervall.
Nutzungsdauer **Brauchbarkeitsdauer**	Zeitintervall, das zu einem gegebenen Zeitpunkt beginnt und endet, sobald die Ausfallrate unvertretbar hoch wird oder die Einheit als Folge eines Fehlers oder aus anderen sachlichen Umständen als nicht mehr reparierbar gesehen wird (ÖNORM EN 13306 [7]). Die Brauchbarkeitsdauer endet mit dem Zeitpunkt, an dem der Grenzzustand erreicht ist. Der Begriff der Brauchbarkeitsdauer wird oftmals mit den Begriffen Lebensdauer oder Nutzungsdauer gleichgesetzt. Gemäß [32] lassen sich die verschiedenen Begriffe jedoch über die Dauer des Bauwerkslebenszyklus miteinander verknüpfen (vgl. Abbildung 3).  Hinweis: Die schraffierten Flächen stehen für möglicherweise längere oder kürzere Nutzungsdauern, beispielsweise auch über den Horizont der Nutzungsdauer hinaus. **Abbildung 3: Lebens- und Nutzungsdauern im Bauwerkslebenszyklus [32]**
Eintrittswahrscheinlichkeit	Grad, in dem ein (Schadens-)Ereignis wahrscheinlich eintritt. Die Wahrscheinlichkeit eines Risikos kann sich auf eine Periode (z.B. Jahreswahrscheinlichkeit) oder auf eine Anzahl von Fällen (Fall-Wahrscheinlichkeit) beziehen. Oft wird an Stelle der Wahrscheinlichkeit eines Risikos die Häufigkeit verwendet (z.B. 1 x in 100 Jahren)
Ereignis	Abweichung vom normalen Zustand während eines Prozesses
Erneuerung	Austausch einer Betrachtungseinheit durch eine neue, gleichartige Einheit mit derselben Funktion.
Gefahr	Zustand oder Eigenschaft mit dem Potential, negative Auswirkungen auf Personen, Umwelt oder Gegenstände hervorzurufen ➔ übergeordneter, unspezifischer Begriff

Begriff	Definition
Gefährdung	Eine für eine konkrete Situation beschriebene Gefahr/potentielle Schadensquelle ➔ räumlich und zeitlich für alle beteiligten Personen/Gegenstände/vorhandene Umwelt definiert
Instandhaltung	Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann [7]. Die DIN 31051 [10] unterscheidet bei der Instandhaltung zwischen: • Wartung • Inspektion • Instandsetzung • Verbesserung
Instandsetzung	Maßnahmen zur Rückführung einer Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand (DIN 31051 [10]). Gemäß ÖNORM EN 13306 [7] umfasst die Instandsetzung sämtliche physische Maßnahmen, die ausgeführt werden, um die Funktion einer fehlerhaften Einheit wiederherzustellen. Sie beinhaltet somit Maßnahmen zur Behebung von Schäden und Funktionsmängeln der Anlagen.
Lebenszyklus	Zeitspanne, beginnend mit der Produktidee und endend mit der Entsorgung der Einheit (ÖNORM EN 13306 [7]). Der Lebenszyklus eines Tunnelbauwerks erstreckt sich gem. dieser generischen Definition von ersten Vorstudien zu einem zukünftigen Tunnelprojekt bis hin zum Rückbau der Anlage. Im Rahmen von OPtimAL erfolgt der Analysezeitraum bei neuen Tunnelanlagen ab Inbetriebnahme, bei bestehenden Anlagen ab dem aktuellen Betrachtungszeitpunkt. Rückbau, Entsorgung bzw. Nachnutzung von Bauwerken sind im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung, insbesondere hinsichtlich der Bewertung der Nachhaltigkeit von direkten/internen und indirekten/externen Faktoren grundsätzlich zu berücksichtigen. Das Projekt OPtimAL verfolgt hingegen das Ziel einer rein betriebswirtschaftlichen Vorausschau mit einem Zeithorizont von 30–60 Jahren. Der Lebenszyklus einer Tunnelanlage und die damit verbundenen Größen, wie zum Beispiel Lebenszykluskosten, beziehen sich somit auf diesen Zeitraum.

Begriff	Definition
Lebenszykluskosten (LCC)	Alle Kosten, die während des Lebenszyklus einer Einheit auftreten. Sie werden im Rahmen einer Lifecycle Cost Analysis (LCCA) ermittelt. Entsprechend der im Projekt OPtimAL getroffenen inhaltlichen Abgrenzung des Lebenszyklus, beinhalten Lebenszykluskosten jene Kostenteile, die ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme bis zum Ende der effektiven Nutzungsdauer (30–60 Jahre) entstehen. Lebenszykluskosten im Rahmen des gegenständlichen Projekts beinhalten somit keine Betriebskosten (Kosten für Energie, Betriebsstoffe, Personal, Steuern etc.), Lagerhaltungs-, Inspektions- oder Wartungskosten und auch keine indirekten/externen Kosten. Es werden lediglich die Kosten der physischen Instandsetzung inkl. der im Rahmen dieser beiden Tätigkeiten erforderlichen (Teil-)Erneuerungen und Rückbauten berücksichtigt.
Regellebenszyklus	Standardisierte Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen (bezogen auf Bauteile/Gewerke) unter der Verwendung von vorgegeben (standardisierten und technisch sinnvollen) Erhaltungsintervallen
Restrisiko	Risiko, das nach der Anwendung von Schutzmaßnahmen verbleibt
Risiko	Kombination der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens und dessen Schweregrad ➔ Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit x Schadensausmaß. Das Risiko wird für konkrete Situationen mit spezifischen Parametern (quantitativ/qualitativ) ermittelt
Risikoanalyse	Systematische Auswertung verfügbarer Informationen, um Gefährdungen zu identifizieren und Risiken einzuschätzen. In den meisten Fällen ist die Risikobewertung, d.h. die Beurteilung des Restrisikos inkludiert
Risikoanalyse, qualitativ	Beschreibung eines Risikos unter Verwendung qualitativer Kennwörter (z.B. selten-häufig, vernachlässigbar-katastrophal etc.)
Risikoanalyse, quantitativ	Analyse eines Risikos unter Zugrundelegung eindeutiger definierter Größen (z.B. Schadensausmaß in EUR bzw. Anzahl von betroffenen Personen, Eintrittswahrscheinlichkeiten [Anzahl/Zeiteinheit])
Risikoeigner	Person mit Entscheidungskompetenz und Verantwortung, hinsichtlich eines Risikos zu handeln. Der Risikoeigner kann das Risiko verändern
Risikomanagement	Prozesse und Verhaltensweisen, die darauf ausgerichtet sind, eine Organisation bezüglich Risiken zu steuern
Schadensausmaß	Umfang des durch ein Ereignis ausgelösten Schadens

Begriff	Definition
Schadensbegrenzung	Vorkehrung bzw. Tätigkeit zur Verringerung des Schadensausmaßes eines ungeplanten Ereignisses
Schutzmaßnahme	Vorkehrung bzw. Tätigkeit zur Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines ungeplanten Ereignisses
Straßentunnel	Alle baulichen Konstruktionselemente und elektromechanischen Ausrüstungsteile einer Straßenführung in unterirdischen Abschnitten, inklusive der für den Betrieb erforderlichen funktionell zugehörigen obertägigen Elemente. Der Begriff „Straßentunnel“ bezieht sich im gegenständlichen Projekt auf Tunnelanlagen für das hochrangige Straßennetz (Autobahnen und Schnellstraßen) jeglicher Bauweise. Dies schließt nicht aus, dass die angestellten Überlegungen und Annahmen zu einem gewissen Grad auch auf sonstige Straßentunnel übertragbar sind, insbesondere wenn diese gem. der RVS projektiert, errichtet und betrieben wurden.
Szenario	Ein Ereignis oder die Kombination von Ereignissen, welche zu einem unerwünschten Risiko führen (können)
Vertretbares (akzeptables) Risiko	Risiko, das in einem bestimmten Zusammenhang nach den gültigen Wertvorstellungen der Gesellschaft akzeptiert wird
Wartung	Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats (DIN 31051 [10]. Im Kontext der ASFiNAG fällt die Wartung unter den Gegenstand der „Betrieblichen Erhaltung“ und umfasst im Sinne der RVS 13.03.41 [19] bei Straßentunnel u.a. die Reinigung und Pflege, den Austausch von Verschleißteilen (z.B. Leuchtmittel) und gewerkespezifische Maßnahmen entsprechend den Vorgaben der Anlagenerrichter und Hersteller.
Zuverlässigkeit	Fähigkeit einer Einheit, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall zu erfüllen (ÖNORM EN 13306 [7]).

2 STAND DER FORSCHUNG

2.1 Lebenszyklusaspekte der elektromaschinellen Ausrüstung von Strassentunneln

Der vom Weltstraßenverband PIARC herausgegebene Bericht 2012R14 [35] untersucht LCCA-Aspekte der elektromaschinellen Ausrüstung von Straßentunnels. Die Motivation war die Einschätzung der Autoren, dass die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus heute meist nur ungenügend berücksichtigt würde. Der hohe Anteil an Ausrüstungskosten an der Gesamtanlage gebietet daher eine verbesserte Kosteneffizienz durch die Betrachtung des Lebenszyklus.

Neben der Zusammenfassung der relevanten Normen ISO 50126 und ISO15686 sowie einem Abriss über die wesentlichsten Einflussgrößen (mechanischer Stress, Galvanische Korrosion, Betriebstemperatur) auf die Alterung der Tunnelausrüstung enthält der PIARC-Bericht weiters ein separates Kapitel bez. des Einflusses der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit auf die Erhaltungsstrategie (Wartung).

Das Ergebnis einer internationalen Umfrage in 10 Ländern hinsichtlich der Nutzungsdauern verschiedener elektromaschineller Komponenten (vgl. Abbildung 4) wird ebenso vorgestellt wie existierende Datengrundlagen zu unterschiedlichen Gewerksgruppen. Abschließend werden die Konsequenzen der zwischen den einzelnen Gewerksgruppen streuenden Nutzungsdauern anhand unterschiedlicher Instandsetzungsstrategien (Kombination von Erneuerungszyklen) illustriert und unter den Aspekten der Kosten, der Verkehrsbeeinträchtigung und Zuverlässigkeit diskutiert.

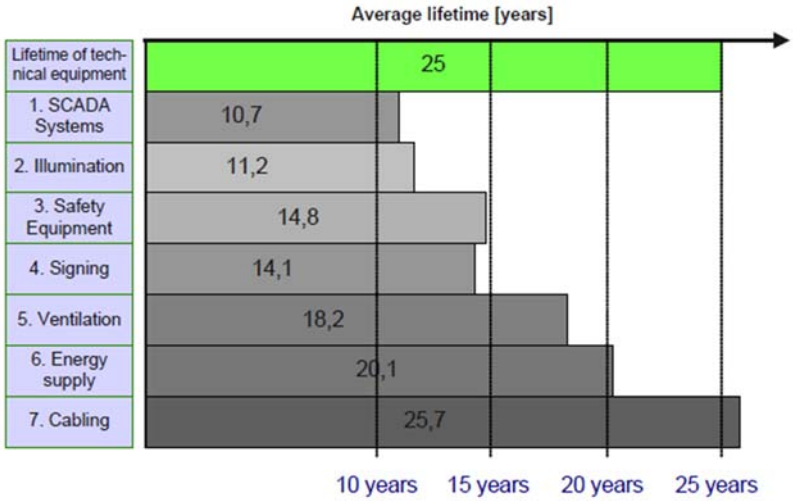


Abbildung 4: Durchschnittliche Nutzungsdauer verschiedener E&M-Gewerke [35]

Die Nutzungsdauern der Gewerke fanden – nach Anpassung auf den österreichischen Kontext - auch Eingang in die österreichische RVS 13.03.41 [19].

2.2 Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten

Die Arbeit von VOGT [32] gibt zunächst einen Überblick über den Stand der Technik bei Lebenszyklusbetrachtungen (LCC) in der Bauwirtschaft. In der Dissertation werden u.a. die wesentlichen theoretischen Grundlagen hinsichtlich des Abnutzungsverhaltens und der Nutzungsdauern von baulichen und ausrüstungstechnischen Anlagekomponenten beschrieben. Die Kriterien einer LCC Analyse bei Straßentunnel werden aufgestellt. Die typischen Nutzungsdauern der im Straßentunnel üblicherweise verbauten Gewerke sind aus verschiedenen Quellen zusammengefasst. Die Arbeit behandelt weiters den Zusammenhang Initialkosten–Folgekosten (Betrieb und Unterhalt), deren Unschärfen und Unsicherheiten über den Lebenszyklus sowie mögliche Lösungsstrategien.

Es wird ein Modell einer LCC-Analyse von Straßentunnels vorgestellt, welches auf Basis der Barwertmethode für vordefinierte Modulkombinationen (Gewerkekollektive) die Gesamtlebenszykluskosten über einen definierten Betrachtungszeitraum abbildet (vgl. Abbildung 5). Das Modell bildet auch mögliche Unschärfen zukünftiger Preisentwicklungen, Zinssätze und Unsicherheiten bei Ausfallswahrscheinlichkeiten der einzelnen Komponenten ab. Die betrachteten Modulkombinationen samt den angenommenen Erneuerungszyklen sind dabei vorab zu definieren und gehen von einer wechselseitigen Unabhängigkeit der untersuchten Gewerke aus.

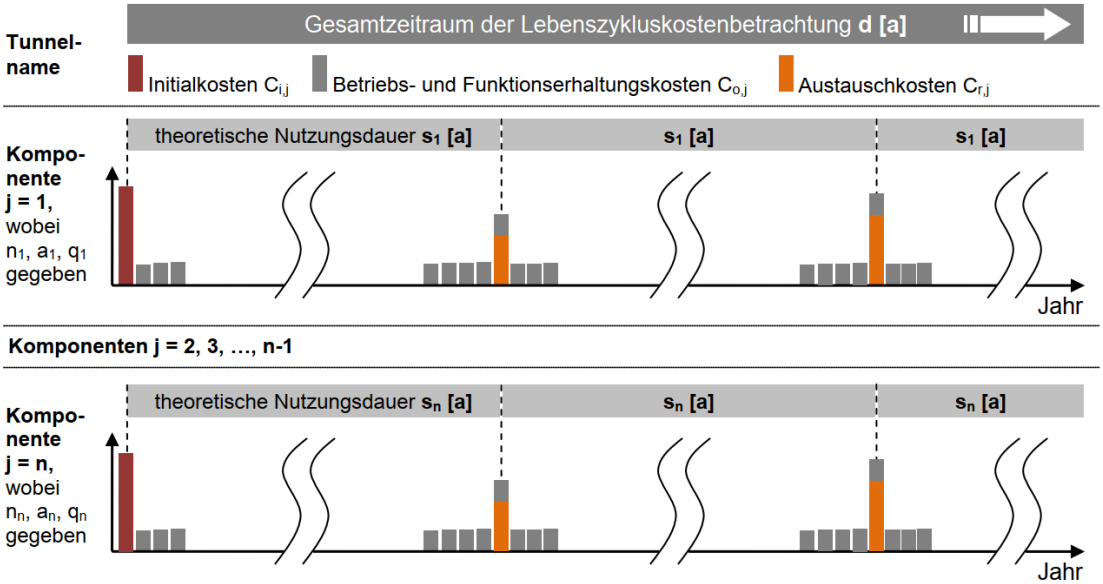


Abbildung 5: LCCA für Komponentenkollektiv [32]

Die Arbeit von VOGT [32] bildet gemeinsam mit jener von ENGELHARDT [11] eine wesentliche Grundlage für die später darauf aufbauende „Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel“ des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB [9]).

2.3 Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken – Modulares Prozessmodell zur ökonomischen Optimierung von Straßentunneln

ENGELHARDT [11] hat in seiner Dissertation ein Lebenszykluskostenmodell entwickelt, welches als Basis für eine ausgewogene Berücksichtigung der Erst- und Folgekosten eines Straßentunnels dient. Unter der Prämisse der Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit über die gesamte Nutzungsdauer werden sowohl die Investitions- als auch die Folgekosten berücksichtigt. Die wesentlichen baulichen und elektromechanischen Anlagen und ihre Wechselwirkungen fließen unter Berücksichtigung ihrer gegenseitigen Schnittstellenbeziehungen in die Lebenszykluskostenanalysen ein.

Zur Umsetzung einer strukturierten und nachvollziehbaren Vorgehensweise bei der Bestimmung der Lebenszykluskosten wird ebenfalls eine hierarchische und modulare Strukturierung des Tunnelbauwerkes vorgenommen, die eine flexible Ausgangslage zur Optimierung der Lebenszykluskosten eines Straßentunnels schafft. Die Module bilden weitestgehend unabhängige Einheiten, für die ein allgemeingültiger Aufbau in Form von Attributen beschrieben wird.

Mittels eines modularen Prozessmodells können Lebenszykluskosten berechnet und verschiedene Optimierungsansätze generiert werden. Unsicherheiten aus der Kostenprognose fließen dabei mittels Monte-Carlo-Simulationen in die Analyse ein. Das modulare Prozessmodell beschränkt sich nicht nur auf eine bestimmte Lebensphase, sondern kann als Ausgangsbasis für eine fortlaufende Erfassung und Überprüfung über alle Lebensphasen eines Straßentunnels hinweg angewendet und überdies für den Vergleich mit ähnlichen Bauwerken und zur Entwicklung kontinuierlicher Verbesserungsansätze und der Umsetzung von Optimierungen hinzugezogen werden.

Die exemplarische Anwendung des Modells verdeutlicht die Stärke des modularen Aufbaus des Modells, weil dadurch interne und externe Schnittstellen und Abhängigkeiten zwischen den Anlagen kenntlich gemacht werden können. Ökonomische Schwachstellen können dadurch sichtbar gemacht werden. Das modulare Prozessmodell wurde auch in den DAUB-Empfehlungen (vgl. Kapitel 2.4 und [9]) übernommen.

Abschließend wird jedoch betont, dass bislang noch keine allgemeingültige und validierte Zusammenstellung der verwendeten Elemente für reale Tunnelbauwerke besteht („Modul-Katalog“) und es sich bei der Arbeit um die Erarbeitung einer grundlegenden Struktur und Methodik handelt. Diese kann nicht ohne projektspezifische Anpassungen auf aktuelle Problemstellungen angewandt werden und bedarf in jedem Falle einer bauwerksspezifischen Erweiterung mit zuverlässigen Lebenszyklusdaten. Für die Erstellung eines solchen Modulkatalogs ist eine Datenkompilation realer Bauwerke notwendig, für die jedoch zurzeit kaum brauchbare und in der Regel nur wenig zuverlässige Datensätze vorhanden sind. Erst wenn aussagekräftige Kennzahlen vorliegen, können fundierte und verlässliche Kostenplanungen und Strategieentscheidungen getroffen werden, welche die Lebenszyklusdiskrepanzen berücksichtigen.

Hinsichtlich einer fortlaufenden Verbesserung des Erhaltungsprozesses bei Tunnelbauwerken ist zudem eine Erweiterung des Benchmarkings vorzusehen. Insbesondere die Berücksichtigung von nichtmonetären Kriterien wie Angaben zur Verfügbarkeit oder Dauerhaftigkeit einzelner Anlagen erscheint für eine ganzheitliche Betrachtung der Lebenszyklen als vielversprechend.

Die Arbeit von ENGELHARDT [11] bildet gemeinsam mit jener von VOGT [32] eine wesentliche Grundlage für die später darauf aufbauende „Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel“ des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB [9]).

2.4 Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel

Die Empfehlung des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB) [9] beschreibt ein Verfahren, mit dessen Hilfe die Wirtschaftlichkeit von Investitionen bei Tunnelbauprojekten über den gesamten Lebenszyklus evaluiert werden kann. Sie baut auf den Arbeiten von VOGT [32] und ENGELHARDT [11] auf. Hierfür werden nicht nur die Herstellungskosten des Bauwerks und der gesamten Ausstattung, sondern auch die Folgekosten für Betrieb, Instandhaltung und Instandsetzung berücksichtigt. Ein wesentlicher Parameter der Folgekostenermittlung stellt die Nutzungsdauer (jeder Komponente) dar.

Für das eigentliche Tunnelbauwerk wird in der Regel eine Nutzungsdauer von 100 Jahren oder mehr angestrebt. Bei der Ausrüstung sind die Nutzungszeiten jedoch wesentlich kürzer und erfordern somit einen (mehrfachen) Austausch während der Lebensdauer des Ge-

samtbauwerks. Alle erwähnten Kostenarten werden in einem Gesamtmodell zur Berechnung der Lebenszykluskosten zusammengefasst. Somit kann die vorteilhafteste Lösung für das jeweilige Tunnelbauwerk ermittelt werden. Variantenuntersuchungen ermöglichen ferner die Bewertung und den Vergleich einzelner Bauteile untereinander.

Die Bestimmung der Lebenszykluskosten gesamter Bauwerke erfolgt mittels eines systematischen Verfahrens, in dessen Kern das Bauwerk sowie die technische Ausstattung hierarchisch strukturiert und die Lebenszyklen anhand der anfallenden Prozesse gegliedert werden. Mit Blick auf das vorliegende Forschungsprojekt scheinen insbesondere die Strukturierung des Bauwerks (siehe Abbildung 6) sowie das Verfahren zur Kostenermittlung interessant.

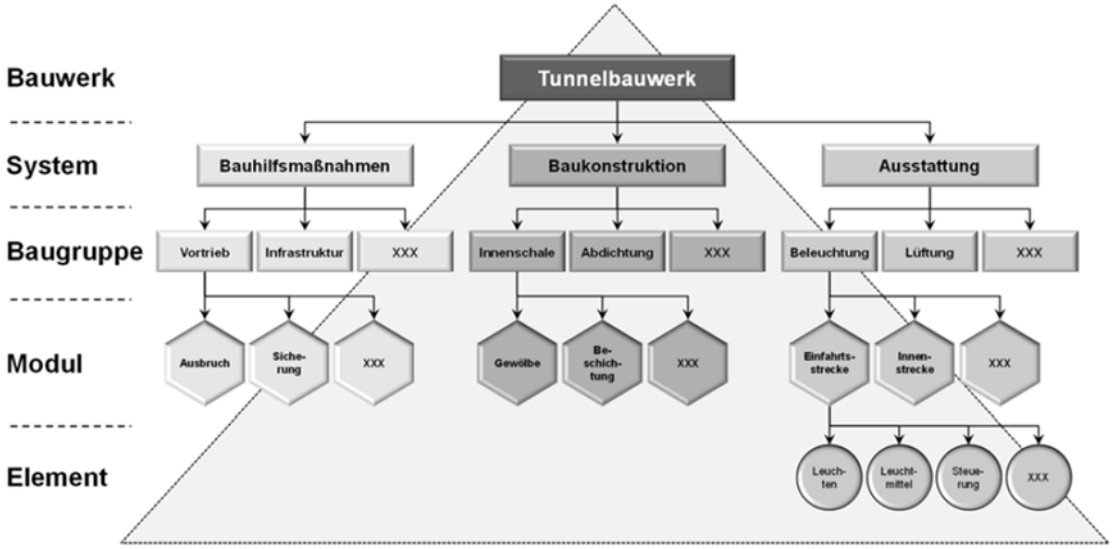


Abbildung 6: Hierarchisch-modulare Strukturierung von Tunnelbauwerken [9]

Mittels der beschriebenen Struktur werden Tunnelbauwerke in verschiedene Teilsysteme unterteilt, die zueinander weitestgehend unabhängig sind und die unter Berücksichtigung vorhandener Beziehungen losgelöst betrachtet werden können. Im Grundsatz werden dabei Baugruppen, Module und Elemente unterschieden, die ungefähr den Funktionsgruppen, Gewerken bzw. Komponenten von Tunnelanlagen in Österreich entsprechen (vgl. Kapitel 3.1.2.2). Durch die klare Trennung der baulichen Infrastruktur und der technischen Ausstattung mit ihren diversifizierten Lebenszyklen, kann der unterschiedlichen Ausprägung der Lebensdauern aber auch der Investitions- und der späteren Erhaltungskosten Rechnung getragen werden.

Die Empfehlung der DAUB erwähnt weiters verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung der Kosten einzelner Module, die von auf erfahrungsbasierten Kostenschätzungen über Initialkosten-orientierte Verfahren bis hin zu detaillierten Kalkulationsverfahren reichen. Die

Verfahrenswahl erfolgt dabei unter Einbeziehung des Kenntnisstandes über das Bauwerk: je nach Lebenszyklusphase eines Bauwerks (Bsp. Planungs- vs. Betriebsphase) und mit steigendem Wissensstand sollte auf detaillierte Methoden zurückgegriffen werden. Es wird jedoch betont, dass in der Praxis selten eine validierte und lückenlose Datenbasis vorliegt und alle erforderlichen Einflussgrößen verfügbar sind und sich dadurch oftmals eine Mischung der verschiedenen Kostenermittlungsverfahren anbietet.

Zusätzlich ermöglicht die gewählte Strukturierung neben einer Aggregation der Kosten für das Gesamtbauwerk auch eine system-, baugruppen- und modulweise Auswertung (vgl. Abbildung 7). Hierdurch wird beispielsweise eine Bewertung der Initial- und Folgekosten ausgehend vom gesamten Untersuchungsrahmen bis hin zum einzelnen Modul ermöglicht.

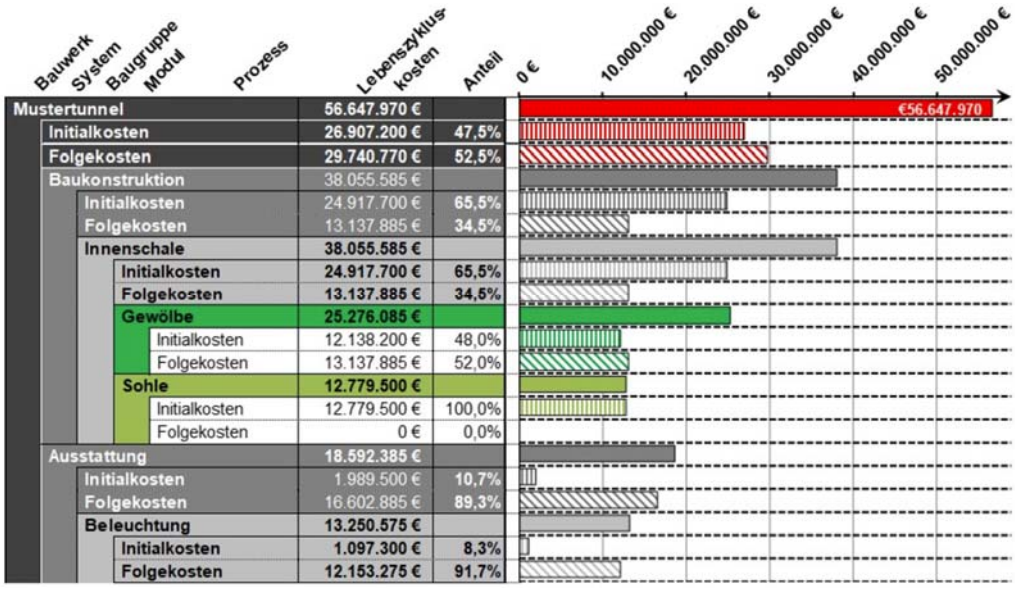


Abbildung 7: Bewertung der Initial- und Folgekosten [9]

Die DAUB-Empfehlung stellt Werkzeuge, Daten und Quellen zur Verfügung, mit denen die Berechnung der Lebenszykluskosten für Tunnelbauwerke zum allgemeinen Stand der Technik werden kann. Im Sinne einer Handlungsempfehlung wird abschließend hervorgehoben, dass die zukünftige Datenerfassung vermehrt auf das Konzept der Lebenszyklusbetrachtungen ausgerichtet und gezielt Datensammlungen mit Kosten und Nutzungsdauern der verschiedenen Gewerke von Straßentunneln angelegt werden sollten.

2.5 Integrativer Ansatz zur Messung und Bewertung von Eisenbahn- und Straßentunnel

Ziel des FFG-Forschungsprojekts AMBITION [14] war es, neuartige Technologien und Messverfahren im Tunnel Asset Management zu evaluieren, um eine objektspezifische Beurteilung von Tunnelbauwerken nach objektiven und standardisierten Bewertungskriterien zu ermöglichen. Es wurden in weiterer Folge zustandsrelevante Parameter und Umfeldkriterien identifiziert sowie ein Anforderungskatalog für die Erstellung von Alterungsmodellen auf Bauwerksebene entwickelt.

Zu diesem Zweck wurden historische Zustandsdaten verschiedener Bauteile von Straßentunnel (Tunnelröhre, Zwischendecke etc.) analysiert und auf Basis dessen standardisierte Alterungskurven abgeleitet. Ausgangsbasis hierfür war das CEN-Workshop Agreement CWA 16663 „Ageing behaviour of Structural Components with regard to Integrated Lifetime Assessment and subsequent Asset Management of Constructed Facilities“ [8], welches verschiedene Vorschläge für die Formulierung von generischen Alterungskurven enthält (vgl. Abbildung 8). Vorteil der dargestellten Kurven ist die grundsätzliche Kompatibilität mit anderen Anlagengattungen wie z.B. Brücken und Stützbauwerken.

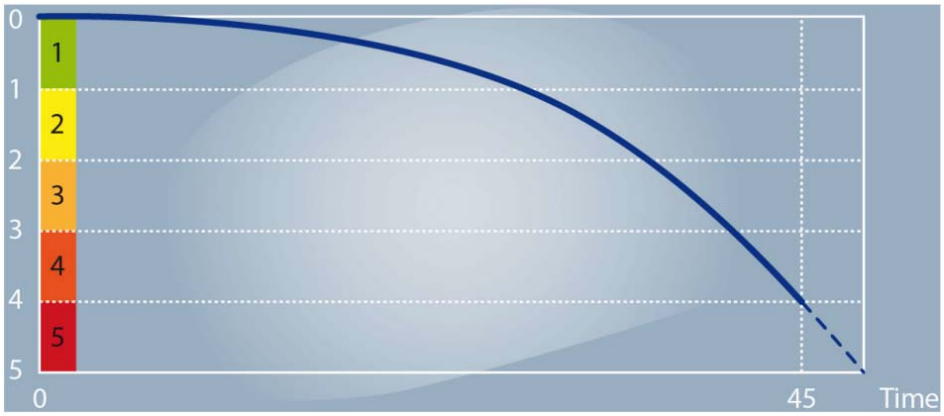


Abbildung 8: Beispiel einer Alterungskurve nach [8]

Um Degradationskurven gemäß CWA 16663 zu ermitteln, wurden die mittlere Verweildauer der Zustandsnoten und deren Standardabweichung aufsummiert. Diese wurde sowohl dem Mittelwert hinzugerechnet als auch von diesem abgezogen (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Verweildauer in Zustandsnoten am Beispiel „Gesamtnote – gemischte/geschlossene Bauweise“

Zustands-note	Summe Mittelwert	Summe Standard-abweichung	Mittelwert – Standard-abweichung	Mittelwert + Standard-abweichung
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 Verweildauern vorgenommen. Die Ergebnisse der Degradationskurven nach der CWA-Anpassung sind in Tabelle 3 zusammengefasst und in der Abbildung 9 für das Bauteil 201 (Tunnelröhre) dargestellt.

Tabelle 3: 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

Name	C_I	a_n(MW)	c(MW)	a_n (+stabw)	c (+stabw)	a_n (-stabw)	c (-stabw)
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

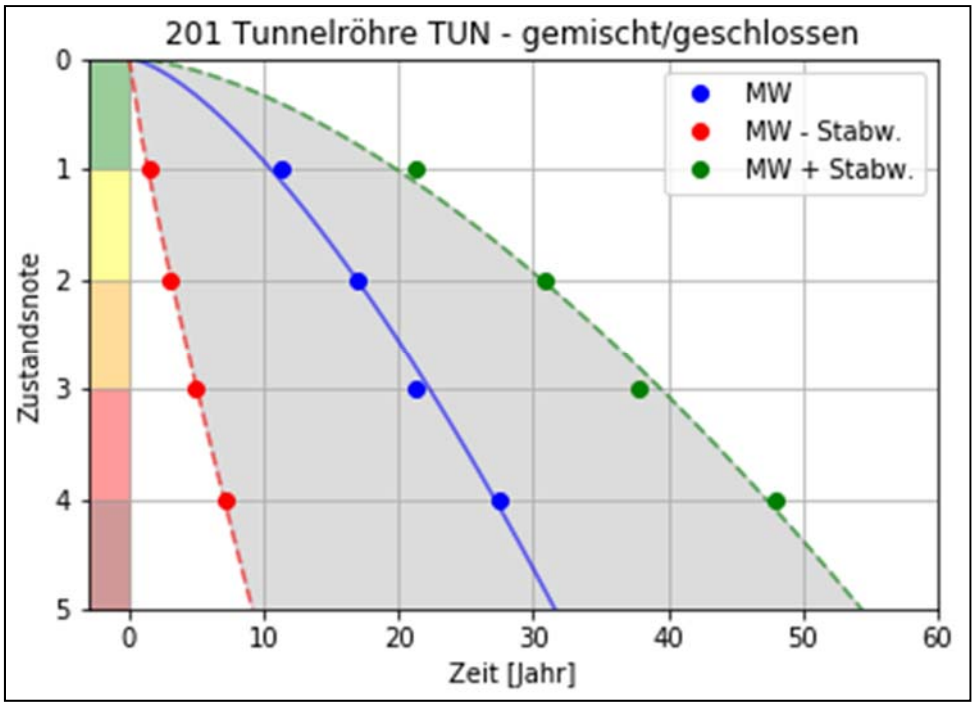


Abbildung 9: Degradationskurve nach CWA 16663 [8] für Straßentunnel in gemischter/ geschlossener Bauweise

Für Eisenbahntunnel dienten Expertenbefragungen dazu, Degradationskurven für unterschiedliche Gewölbeauskleidungen (z.B. Natursteinmauerwerk) abzuleiten. Die ermittelten Alterungskurven berücksichtigen jedoch keine Instandsetzungsmaßnahmen und stellen daher immer nur eine Alterung auf Basis einer "Do-Nothing" Strategie dar.

2.6 Bewertung der elektromaschinellen Ausrüstung von Straßentunneln für das Land Tirol

Aufgabenstellung

Eine wesentliche Voraussetzung für eine effiziente Erhaltungsplanung im Land Tirol liegt in einer objektiven Darstellung des Erhaltungsbedarfs und der Erhaltungsnotwendigkeit der unterschiedlichen Anlagen der Straßeninfrastruktur. Darunter fällt u.a. die E&M-Technik der Straßentunnel, die im Tiroler Landesstraßennetz eine sehr hohe Bedeutung haben.

Hauptziel des nachfolgend beschriebenen Pilotprojektes lag in der Ermittlung des Erhaltungsbedarfs auf Gewerkegenauigkeit über eine längere Zeitperiode, d.h. für jedes einzelne E&M-Technik-Gewerk war eine Aussage im Hinblick auf Erhaltungsmaßnahmen zu tätigen. Darauf aufbauend wurde der Erhaltungsbedarf für das gesamte Tunnelobjekt bzw. der Erhaltungsrückstand bei entsprechender Einschränkung der erforderlichen budgetären Mittel ermittelt. Um das Projektziel zu erreichen, wurden folgende Aufgaben definiert und umgesetzt:

- Datenübernahme und Zusammenführung der E&M-Daten der Tunnelobjekte
- Datenauswertung und Erstellung einer Grundlage für eine Prognose
- Erhaltungsbedarfsanalyse E&M-Ausrüstung

Die Ergebnisse des Pilotprojektes sind WENINGER-VYCUDIL [33] entnommen, ein Überblick der verwendeten Algorithmen kann den nachfolgenden Kapiteln entnommen werden.

Bewertung der Indikatoren

Die Bewertung der 42 Indikatoren der E&M-Ausrüstung der Straßentunnel in Tirol bildet die Ausgangslage für die Lebenszyklusanalysen. Jedes einzelne Gewerk wird individuell bewertet, wobei drei Indikatoren durch den Inspektor definiert werden:

- Technischer Anlagenzustand (TAZ)
- Ersatzteilverfügbarkeit (EV)
- Alter (ALT)

Sämtliche Indikatoren werden in Form einer Notenskala (1 = sehr gut, 5 = sehr schlecht) ermittelt. Die Notenverteilung hängt dabei von den jeweiligen Eigenschaften ab und ist wie folgt festgelegt:

- **Technischer Anlagenzustand**: 1 = neuwertig; 2 = vereinzelte leichte Mängel; 3 = mittelschwere Mängel; 4 = schwere Mängel; 5 = massive Funktionseinschränkung.

- **Ersatzteilverfügbarkeit**: 1 = Ersatzteile beim Hersteller verfügbar; 3 = nur mehr Restposten von Ersatzteilen verfügbar; 5 = keine Ersatzteile mehr verfügbar (auch nicht im eigenen Ersatzteillager).
- **Alter des Gewerks**: 1 = weniger als 25% Nutzungsdauer; 2 = 25%–50% Nutzungsdauer; 3 = 51%–75% Nutzungsdauer; 4 = 76%–100% Nutzungsdauer; 5 = mehr als die angegebene Nutzungsdauer.
  In jenen Fällen, in denen bereits Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt wurden, kann die Note für das Alter unabhängig vom tatsächlichen Alter des Gewerks durch den Inspektor festgelegt werden.

Aus den drei Einzelindikatoren wird ein Gesamtwert des jeweiligen Gewerkes nachfolgender Formel ermittelt:

$$GW_i = \frac{TAZ_i \cdot 3{,}0 + EV_i \cdot 2{,}0 + ALT_i \cdot 1{,}0}{6{,}0}$$

mit:

GW_i .....Gesamtwert des Gewerks i

TAZ_i .....Technischer Anlagenzustand des Gewerks i

EV_i .....Ersatzteilverfügbarkeit des Gewerks i

ALT_i.....Altersnote des Gewerks i

Die Funktion liefert einen Wert zwischen 1,0 und 5,0 (1 = sehr guter Gesamtzustand; 2 = guter Gesamtzustand; 3 = ausreichender Gesamtzustand; 4 = mangelhafter Gesamtzustand; 5 = schlechter Gesamtzustand). Aus der Gesamtbewertung der Einzelgewerke wird abschließend über sämtliche bewerteten Gewerke ein E&M-Technik Gesamtwert unter Heranziehung des statistischen Mittelwertes errechnet. Jene Gewerke, die bei einem Tunnelobjekt nicht vorhanden sind, werden nicht berücksichtigt.

Erstellung E&M-Technik Datenbank

Als Basis für die Lebenszyklusanalyse diente eine eigens für das Projekt erstellt E&M-Technik Datenbank unter Heranziehung der Asset Management Software dTIMS. Hierfür wurde eine eigene E&M-Tunnelapplikation in dTIMS erzeugt (dTIMS® E&M Tunnel), die aus folgenden Tabellen bestand:

- Basistabelle: Ablage der einzelnen Tunnelbauwerke inklusive Definitionen
- Zustandstabelle: Ablage der Inspektionsergebnisse und der Inventardaten.

Jeder gewerksbezogene Indikator sowie der Gesamtwert wurde als eigenständiges Attribut abgespeichert und bildete in weiterer Folge die Eingangsdaten für die Analyse.

Lebenszyklusanalyse E&M-Technik Tunnel

Die Lebenszyklusanalyse in dTIMS® E&M Tunnel basiert auf gewerkbezogenen Verhaltensfunktionen, d.h. in Abhängigkeit der zuletzt vorgenommenen Zustandsbewertung wird eine Prognose in Abhängigkeit der Faktoren „Ersatzteilverfügbarkeit“, „technischer Anlagenzustand“ und „Alter vs. Nutzungsdauer“ durchgeführt.

Diese wird für jedes Gewerk separat gerechnet und mittels unterschiedlicher Maßnahmengruppen (Zusammenführung verschiedener gewerksbezogener Erhaltungsmaßnahmen) systematisch und objektiv miteinander verglichen. Der Vergleich basiert entweder auf einer Kosten-Wirksamkeitsanalyse (Gegenüberstellung geschätzte Maßnahmenkosten und technische Wirkungen) oder einer Kostenminimierungsanalyse, bei der die objektbezogenen Erhaltungsmaßnahmenstrategien mit den geringsten Kosten unter Berücksichtigung von Randbedingungen des Zustandes und des Alters miteinander verglichen werden.

Das Ziel der LCCA besteht darin, jene Erhaltungsmaßnahmen auszuwählen, die unter verschiedenen Randbedingungen die optimale Lösung aufweisen. Bei den Randbedingungen der Kosten-Wirksamkeitsanalyse handelt es sich um budgetäre Restriktionen (vorgegebenes Erhaltungsbudget) und bei der Kostenminimierungsanalyse, um Grenzwerte des Zustandes, die den optimalen Lebenszyklus beschreiben.

Die Prognose des Zustandes kann über die im Kapitel 2.6 beschriebenen Indikatoren für jedes einzelne Gewerk zu jedem beliebigen Zeitpunkt während der Betrachtungsperiode vorgenommen werden. Die maßgebende Einflussgröße ist hierbei die jeweilige Nutzungsdauer (ND) eines Gewerks. In der nachfolgenden Tabelle 4 ist diese für die 42 Gewerke tabellarisch dargestellt.

Tabelle 4: Nutzungsdauern für verschiedene E&M-Gewerke

Gewerk Nr.	Bezeichnung	Nutzungs-dauer [a]
1	Mittelspannungsanlage	25
2	Niederspannungsanlage	25
3	SSV Anlage	15
4	Notstromaggregate	25
5	Blitzschutzanlagen	25
6	Erdung und Potentialausgleich	25
7	Mechanische Anlagenteile Axialventilatoren	30
8	Mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	20
9	Elektromechanische Anlagenteile Axialventilatoren	20
10	Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	20
11	Regelung, Steuerung	15
12	Gebäudelüftung, Klimaanlage	15
13	Einfahrtsbeleuchtung	20
14	Innenstreckenbeleuchtung	20
15	Beleuchtung Querschläge/Fluchtwege	20
16	Fluchtweghinweis/-orientierungsleuchte	10
17	Regelung, Messwerterfassung	15
18	CO-Messung	15
19	Trübungsmessung	15
20	Längsgeschwindigkeitsmessung	15
21	Straßenverkehrszeichen	10
22	Verkehrszählung	10
23	Videoanlagen	10
24	Verkehrslichtsignalanlagen	10
25	Höhenkontrolle	10
26	Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen	15
27	Notruf	15
28	Telefonanlage	20
29	Funkanlagen	15
30	Beschallungsanlage	20
31	Brandmeldeanlage Kabel	20
32	Brandmeldeanlage Steuerung	10
33	Löscheinrichtungen	20
34	Löschwasserversorgung	20
35	Lösch- und Bindemittelvorrat	20
36	Automatisierung	15
37	Prozessvisualisierung	10
38	Archivierung / Datenauswertung	10
39	Gewässerschutzanlagen	20
40	Schachtbefahrung	30
41	Türen, Tore, Verkleidungen	20
42	Krane und Hebezeuge	30

Die Prognose des technischen Anlagenzustandes (TAZ) erfolgt unter Heranziehung der Nutzungsdauern der einzelnen Gewerke, die in den Bewertungsformularen festgeschrieben sind. Der Entwicklung des TAZ wird ein lineares Modell zu Grunde gelegt, welches in Abhängigkeit der Nutzungsdauer einen Wert zwischen 1,0 und 5,0 aufweisen darf, wobei ein Wert von 5,0 dem faktischen Ende der Nutzungsdauer entspricht. Die Ausgangslage für die Prognose ist immer der aktuelle TAZ, der sich jedes Jahr um einen relativen Wert (Steigung in Abhängigkeit der Nutzungsdauer) verschlechtert. Daraus lässt sich folgende deterministische Funktion ableiten:

$$TAZ_{i,t+1} = TAZ_{i,t} + \frac{4{,}0}{ND_i} \; mit \; [1 \leq TAZ_{i,t+1} \leq 5]$$

mit:

$TAZ_{i,t}$ .....Technischer Anlagenzustand des Gewerks i zum Zeitpunkt t

$TAZ_{i,t+1}$ ...Technischer Anlagenzustand des Gewerks i zum Zeitpunkt t+1

ND_i .....Theoretische Nutzungsdauer des Gewerks i

Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt die Entwicklung des TAZ für 3 unterschiedliche Nutzungsdauern bei einem Ausgangszustand von 1,0 (neuwertig). Obwohl bei der Inspektion nur eine Zustandsklasse aufgenommen wird, ergeben sich durch die Prognosefunktion Zustandswerte zwischen 1,0 und 5,0, die ggf. wieder in eine Klasse (durch ganzzahlige Rundung) übergeführt werden können.

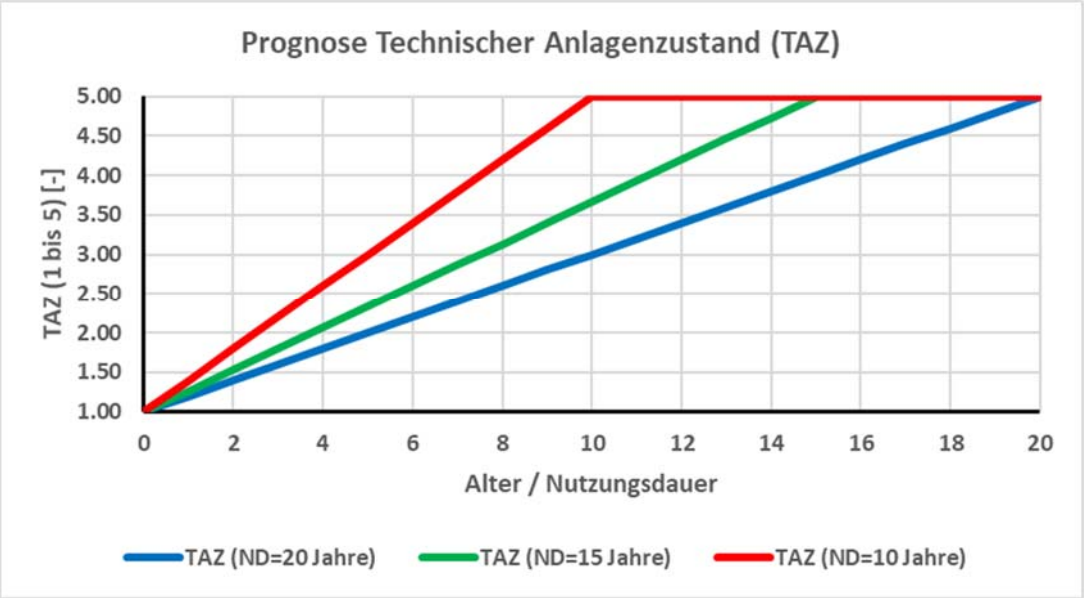


Abbildung 10: Beispiel Prognosemodell TAZ für unterschiedliche Nutzungsdauern

Die Prognose der Ersatzteilverfügbarkeit (EV) ist wesentlich komplexer als die des technischen Anlagenzustandes (TAZ), da eine Vielzahl von Einflussgrößen den Verlauf bestimmen können. Dazu gehört einerseits die Verfügbarkeit der Ersatzteile am Markt/im Lager bzw. in welchem Ausmaß die Ersatzteile zu einem bestimmten Zeitpunkt benötigt werden. Diese Informationen stehen für die einzelnen Gewerke bzw. für sämtliche Ersatzteile eines Gewerkes nur bedingt zur Verfügung, sodass auch hier ein genereller Ansatz, wiederum unter Heranziehung der theoretischen Nutzungsdauer, erfolgt.

Die Prognose der Ersatzteilverfügbarkeit kann wiederum individuell für jedes einzelne Gewerk vorgenommen werden, wobei insgesamt drei Kategorien in der ersten Anwendung zur Verfügung stehen:

- Normale Entwicklung (N)
- Rasche Abnahme der Ersatzteilverfügbarkeit in Relation zur Nutzungsdauer (R)
- Ersatzteile sind deutlich über die Länge der Nutzungsdauer verfügbar (L)

Im Vergleich zum TAZ ist mit hoher Wahrscheinlichkeit eine progressive Entwicklung zu erwarten, sodass folgendes deterministisches Modell zur Anwendung gelangte:

$$EV_{i,t+1} = EVi_{,t} \cdot \left(1{,}0 + \frac{1{,}0}{ND_i \cdot a}\right) \; mit \; \left[1 \leq EV_{i,t+1} \leq 5\right]$$

<u>mit</u>:

$EV_{i,t}$ .....Ersatzteilverfügbarkeit des Gewerks i zum Zeitpunkt t

$EV_{i,t+1}$ .....Ersatzteilverfügbarkeit des Gewerks i zum Zeitpunkt t+1

ND_i .....Theoretische Nutzungsdauer des Gewerks i

a.....Modellparameter a für Entwicklungskategorie (0,6 für N, 0,1 für R und 1,2 für L)

Die Ausgangslage für die Prognose ist auch bei der Ersatzteilverfügbarkeit immer die aktuelle EV-Note, die sich jedes Jahr um einen relativen Wert (Steigung in Abhängigkeit der Nutzungsdauer) verschlechtert.

Die nachfolgende <u>Tabelle 5</u> enthält Vorschläge für die Entwicklungskategorie für die 42 unterschiedlichen Gewerke. In <u>Abbildung 11</u> ist die Prognose der Ersatzteilverfügbarkeit beispielhaft für eine Nutzungsdauer von 10 Jahren für alle drei Entwicklungskategorien (Ausgangslage: EV=1,0 am Beginn des Betrachtungszeitraums) dargestellt.

Tabelle 5: Entwicklungskategorien für die Ersatzteilverfügbarkeit von E&M-Gewerken

Gewerk Nr.	Bezeichnung	Ent-wicklungs-kategorie
1	Mittelspannungsanlage	L
2	Niederspannungsanlage	L
3	SSV Anlage	N
4	Notstromaggregate	N
5	Blitzschutzanlagen	N
6	Erdung und Potentialausgleich	L
7	Mechanische Anlagenteile Axialventilatoren	N
8	Mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	N
9	Elektromechanische Anlagenteile Axialventilatoren	N
10	Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	N
11	Regelung, Steuerung	N
12	Gebäudelüftung, Klimaanlage	N
13	Einfahrtsbeleuchtung	N
14	Innenstreckenbeleuchtung	N
15	Beleuchtung Querschläge/Fluchtwege	N
16	Fluchtweghinweis/-orientierungsleuchte	N
17	Regelung, Messwerterfassung	N
18	CO-Messung	N
19	Trübungsmessung	N
20	Längsgeschwindigkeitsmessung	N
21	Straßenverkehrszeichen	N
22	Verkehrszählung	N
23	Videoanlagen	N
24	Verkehrslichtsignalanlagen	N
25	Höhenkontrolle	N
26	Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen	N
27	Notruf	N
28	Telefonanlage	N
29	Funkanlagen	N
30	Beschallungsanlage	N
31	Brandmeldeanlage Kabel	N
32	Brandmeldeanlage Steuerung	N
33	Löscheinrichtungen	N
34	Löschwasserversorgung	L
35	Lösch- und Bindemittelvorrat	L
36	Automatisierung	N
37	Prozessvisualisierung	N
38	Archivierung / Datenauswertung	N
39	Gewässerschutzanlagen	N
40	Schachtbefahrung	N
41	Türen, Tore, Verkleidungen	N
42	Krane und Hebezeuge	N

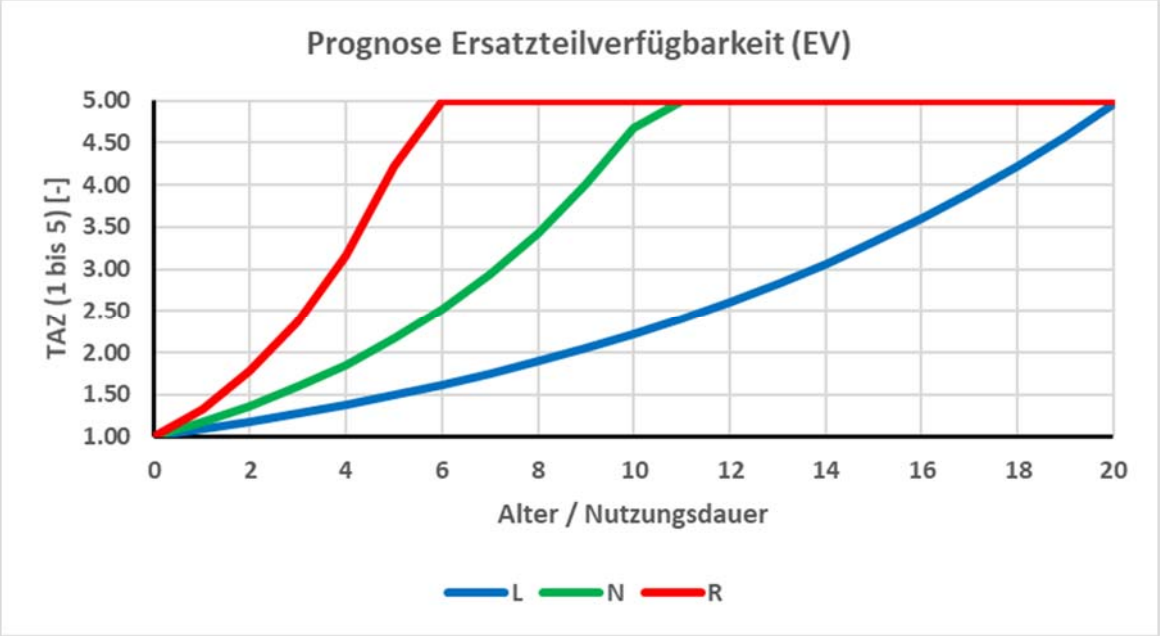


Abbildung 11: Prognosemodell für die Ersatzteilverfügbarkeit (EV) für unterschiedliche Entwicklungskategorien (ND=10 Jahre)

Die Prognose des Altersindikators erfolgt in gleicher Weise wie beim technischen Anlagenzustand, d.h. mittels eins relativen Modells wird die jährliche Änderung des Indikators in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer ermittelt. Das deterministische Modell lässt sich wie folgt definieren:

$$ALT_{i,t+1} = ALT_{i,t} + \frac{4{,}0}{ND_i} \; mit \; [1 \leq ALT_{i,t+1} \leq 5]$$

mit:

$ALT_{i,t}$ .....Altersindikator des Gewerks i zum Zeitpunkt t

$ALT_{i,t+1}$....Altersindikator des Gewerks i zum Zeitpunkt t+1

ND_i .....Theoretische Nutzungsdauer des Gewerks i

Maßnahmenkatalog

Im Vergleich zu Bauteilen von Straßen und Brücken ist die Zuordnung und Kostenschätzung für Erhaltungsmaßnahmen an Gewerken deutlich komplexer, da nicht immer gleich das gesamte Gewerk ausgetauscht werden muss. Oftmals können durch Ersatz oder Reparatur einzelner Komponenten eines Gewerks die Mängel rasch und nachhaltig behoben werden. Es erscheint daher sinnvoll und zweckmäßig, in Abhängigkeit der drei Bewertungsindikatoren auch den Umfang einer Erhaltungsmaßnahme abzuschätzen. Hierfür wurde ein Verfahren entwickelt, dass jedem Gewerk eine sogenannte Ersatzzahl (EZ) zuordnet, die darüber Auskunft gibt, in welchem Umfang das Gewerk auszutauschen ist. Die EZ liegt in

einem Wertebereich zwischen 0 und 1 (bzw. 0% und 100%), wobei die Grenzwerte folgende Aussage ermöglichen:

- EZ=0,0: Kein Ersatz am Gewerk notwendig
- EZ=1,0: Vollständiger Ersatz des Gewerks zu vollen Kosten

Um die Ersatzzahl berechnen zu können, wird in einem ersten Schritt eine Grundersatzzahl (EZ_0) als Funktion der Altersnote (ALT) und des technischen Anlagezustandes (TAZ) ermittelt. Dabei ist von folgenden Randbedingungen auszugehen, welche in Abbildung 12 graphisch dargestellt werden:

- TAZ = 5,0 und ALT = 5,0 ➔ EZ_0 = 1,0 (vollständiger Ersatz)
- TAZ = 1,0 und ALT = 1,0 ➔ EZ_0 = 0,0 (kein Ersatz)
- TAZ = 1,0 und ALT = 5,0 ➔ EZ_0 = 0,0 (kein Ersatz)
- TAZ = 5,0 und ALT = 1,0 bis 4,0 ➔ $EZ_0 \geq 0{,}5$ (teilweiser Ersatz, linearer Anstieg)

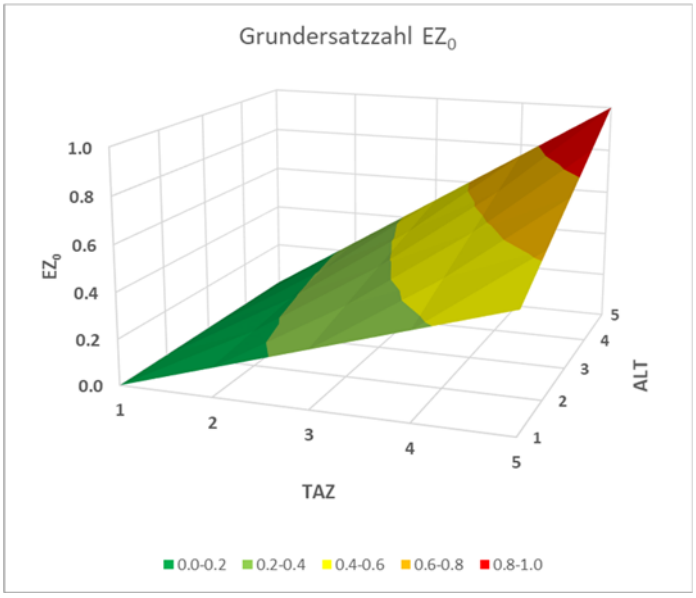


Abbildung 12: Grundersatzzahl in Abhängigkeit von TAZ und ALT

Unter Verwendung eines linearen Zusammenhangs und der oben aufgelisteten Randbedingungen ergibt sich folgende Funktion für die Grundersatzzahl EZ_0:

$$EZ_{0,i} = \frac{(ALT_i - 1) \cdot \frac{0{,}5}{4{,}0} + 0{,}5}{4} \cdot TAZ_i - \frac{(ALT_i - 1) \cdot \frac{0{,}5}{4{,}0} + 0{,}5}{4} \; mit \; [0 \leq EZ_{0,i} \leq 1]$$

mit:

$EZ_{0,i}$.....Grundersatzzahl des Gewerks i

ALT_i.....Altersindikator des Gewerks i

TAZ_i .....Technischer Anlagenzustand des Gewerks i

Nicht berücksichtigt ist in diesem Zusammenhang der Einfluss der Ersatzteilverfügbarkeit (EV). Dies erfolgt mittels eines additiven Terms, der in Abhängigkeit der Ersatzteilverfügbarkeit die Grundersatzzahl erhöht und letztendlich zur Ersatzzahl (EZ) führt. Auch hier wird über einen linearen Zusammenhang der Einfluss bestimmt, wobei die additive Größe den Wert 0 hat, wenn EV einen Wert von 1,0 aufweist und bei keiner Ersatzteilverfügbarkeit mit den vollen Kosten gerechnet werden muss.

Daraus ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang:

$$EZ_i = EZ_{0,i} + (EV_i - 1) \cdot \frac{(1 - EZ_{0,i})}{4} \; mit \; [0 \leq EZ_i \leq 1]$$

mit:

EZ_i.....Ersatzzahl des Gewerks i

$EZ_{0,i}$.....Grundersatzzahl des Gewerks i

EV_i .....Ersatzteilverfügbarkeit des Gewerks i

Liegt für jedes einzelne zu berücksichtigende Gewerk eine Ersatzzahl vor, können die Kosten für unterschiedliche Maßnahmengruppen über die Länge des Tunnels abgeschätzt werden.

Der Maßnahmenkatalog bezieht sich auf Erhaltungsmaßnahmen für bestimmte Gruppen von Gewerken, da eine detaillierte Zuordnung der Kosten auf einzelne Gewerke aufgrund von fehlenden Kostenansätzen und -daten derzeit nicht möglich ist. Die Festlegung der Erhaltungsmaßnahmen erfolgt somit auf zwei Betrachtungsebenen:

- Erhaltungsmaßnahmen für unterschiedliche Gewerksgruppen in Anlehnung an die Bewertung (G-Maßnahmen)
- Zusammenfassung der Maßnahmengruppen in übergeordnete Erhaltungsmaßnahmen

Die Kosten der Maßnahmen ergeben sich je nach Anzahl der auf einzelne Gewerke bezogenen Aktivitäten (unter Berücksichtigung der jeweils aktuellen Ersatzzahl), der Maßnahmengruppen sowie der Kategorie des Tunnels, wobei in einem ersten Schritt die Zuordnung der 42 Gewerke zu den Gruppen notwendig ist. Diese kann der nachfolgenden Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 6: Zuordnung der Gewerke zu Gewerksgruppen

Gruppe Nr.	Bezeichnung	Gewerk Nr.	Bezeichnung
G1	Energie	1	Mittelspannungsanlage
		2	Niederspannungsanlage
		3	SSV Anlage
		4	Notstromaggregate
		5	Blitzschutzanlagen
		6	Erdung und Potentialausgleich
G2	Belüftung	7	Mechanische Anlagenteile Axialventilatoren
		8	Mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren
		9	Elektromechanische Anlagenteile Axialventilatoren
		10	Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilatoren
		11	Regelung, Steuerung
		12	Gebäudelüftung, Klimaanlage
G3	Beleuchtung	13	Einfahrtsbeleuchtung
		14	Innenstreckenbeleuchtung
		15	Beleuchtung Querschläge/Fluchtwege
		16	Fluchtweghinweis/-orientierungsleuchte
		17	Regelung, Messwerterfassung
G4	Messeinrichtung	18	CO-Messung
		19	Trübungsmessung
		20	Längsgeschwindigkeitsmessung
G5	Überwachung	21	Straßenverkehrszeichen
		22	Verkehrszählung
		23	Videoanlagen
		24	Verkehrslichtsignalanlagen
		25	Höhenkontrolle
		26	Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen
G6	Notruf	27	Notruf
G7	Telefon/ Funk/Schall	28	Telefonanlage
		29	Funkanlagen
		30	Beschallungsanlage
G8	AnlagenBrand	31	Brandmeldeanlage Kabel
		32	Brandmeldeanlage Steuerung
		33	Löscheinrichtungen
		34	Löschwasserversorgung
		35	Lösch- und Bindemittelvorrat
G9	Steuerung	36	Automatisierung
		37	Prozessvisualisierung
		38	Archivierung / Datenauswertung
G10	GewSchutz	39	Gewässerschutzanlagen
G11	Sonstiges	40	Schachtbefahrung
		41	Türen, Tore, Verkleidungen
		42	Krane und Hebezeuge

Die Berechnung der Kosten einer Gewerksgruppe richtet sich nach dem Umfang der Erhaltungsaktivität der zugeordneten Gewerke, wobei der Anzahl der Gewerke eines Tunnelobjektes eine wesentliche Rolle zukommt. Darüber hinaus stehen nur Einheitspreise für die übergeordneten Maßnahmen zur Verfügung, sodass diese auf die Ebene der Gewerksgruppen in Abhängigkeit vom Zustand und dem Vorhandensein der Anlage heruntergebro-

chen werden müssen. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der Ersatzzahl für jedes betroffene Gewerk. Die mathematische Funktion für die Berechnung der Kosten in Abhängigkeit von der Ersatzzahl ergibt sich wie folgt:

$$KST_{Gn,k} = KA_{Gn,k,Y} \cdot \frac{\sum_i EZ_{Gn,i} \cdot X_i}{AnzGew_{Gn,k}} \cdot L_k \cdot EP_Y$$

mit:

$KST_{Gn,k}$ ..... Kosten E&M-Maßnahme der Gruppe Gn des Tunnelobjekts k

$KA_{Gn,k,Y}$ ..... Kostenanteil Gruppe Gn des Tunnelobjekts k der Tunnelkategorie Y (siehe Tabelle 7)

$AnzGew_{Gn,k}$ ..... Anzahl der vorhandenen Gewerke der Gruppe Gn des Tunnelobjekts k

$EZ_{Gn,i}$ ..... Ersatzzahl des Gewerks i der Gruppe Gn des Tunnelobjekts k

$X_{i,k}$ ..... Faktor zur Anwendung einer Erhaltungsmaßnahme auf das Gewerk i der Gruppe Gn des Tunnelobjekts k (wenn Maßnahme dann $X_{i,k}$=1, sonst $X_{i,k}$=0)

L_k ..... Länge des Tunnelobjektes k in m

EP_Y ..... Einheitspreis der E&M-Maßnahme der Tunnelkategorie Y in €/m (siehe Tabelle 7)

Die aktuellen Einheitspreise für die Maßnahmen (Preisbasis 2017) in Abhängigkeit der Tunnelkategorie können der nachfolgenden Tabelle 7 entnommen werden.

Die in Tabelle 8 aufgelisteten Faktoren berücksichtigen bereits das Vorhandensein von bestimmten Gewerksgruppen in Abhängigkeit von der Tunnelkategorie (I bis IV) und sind das Ergebnis der Durchsicht der zur Verfügung gestellten Kosten von bereits durchgeführten E&M Sanierungen.

Die Anwendungsgrenzen und -bereiche der Erhaltungsmaßnahmen können dem Lebenszyklus entnommen werden. Dabei wird ab einem bestimmten Zustand eine Erhaltungsmaßnahme ausgelöst. Hierfür spielt der Gesamtwert eines Gewerks eine maßgebende Rolle. Generell gilt für die Anwendung einer Erhaltungsmaßnahme folgende Anwendungsgrenze:

$$GW_i \geq 3{,}0$$

mit:

GW_i ..... Gesamtwert Gewerk i

Um in der zusammengefassten Maßnahme TEM-Erneuerung (**T**unnel **E**lektro-**M**aschinell) möglichst viele Maßnahmen der Gewerksgruppen durchführen zu können, wurde eine zweite Gruppe von Anwendungsgrenzen implementiert, die der nachfolgenden Tabelle 9 entnommen werden können.

Tabelle 7: Einheitspreise Erhaltungsmaßnahmen Tunnel E&M-Technik, Preisbasis 2017

Tunnelkategorie[1)]	Einheitspreis in €/m
Kat. I	4.000
Kat. II	1.300
Kat. III	700
Kat. IV	400

[1)] Im Rahmen des Projektes wurde mit dem Begriff Tunnelkategorie gearbeitet. Dies entspricht der Gefährdungsklasse

Tabelle 8: Kostenanteile je Gewerksgruppe in Abhängigkeit von der Tunnelkategorie

Gruppe Nr.	Kat. I	Kat. II	Kat. III	Kat. IV
G1	0,14	0,15	0,16	0,23
G2	0,07	0,00	0,00	0,00
G3	0,14	0,15	0,16	0,22
G4	0,03	0,04	0,04	0,06
G5	0,11	0,12	0,13	0,19
G6	0,05	0,05	0,06	0,00
G7	0,07	0,07	0,00	0,00
G8	0,20	0,21	0,23	0,00
G9	0,1	0,10	0,11	0,16
G10	0,01	0,01	0,01	0,00
G11	0,08	0,10	0,10	0,15

Tabelle 9: Anwendungsgrenzen Maßnahmengruppen

Maßnahmengruppe	Anwendungsgrenze
G1 – Energie	$Max(GW_{G1})>=2,5$
G2 – Belüftung	$Max(GW_{G2})>=2,5$
G3 – Beleuchtung	$Max(GW_{G3})>=2,5$
G4 – Messeinrichtung	$Max(GW_{G4})>=2,5$
G5 – Überwachung	$Max(GW_{G5})>=2,5$
G6 – Notruf	$Max(GW_{G6})>=2,5$
G7 – TelefonFunkSchall	$Max(GW_{G7})>=2,5$
G8 – AnlagenBrand	$Max(GW_{G8})>=2,5$
G9 – Steuerung	$Max(GW_{G9})>=2,5$
G10 – GewSchutz	$Max(GW_{G10})>=2,5$
G11 – Sonstiges	$Max(GW_{G11})>=2,5$

Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Maßnahmengruppen wird eine maßnahmenfreie Periode von mindestens sechs Jahren angesetzt. Dies verhindert, dass innerhalb kürzester Zeit Maßnahmen durchgeführt werden und die Anwendung von übergeordneten Maßnahmen mit einer möglichst großen Anzahl von Maßnahmengruppen bevorzugt ausgewählt werden soll.

Die Auswirkungen der Erhaltungsmaßnahmen werden über sogenannte Rücksetzwerte beschrieben, die den technischen Anlagenzustand (TAZ) der Gewerke auf eine bessere Note zurücksetzen. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei Anwendung einer Maßnahme auf ein bestimmtes Gewerk ein TAZ = 1,0 erreicht werden kann. Darüber hinaus werden die Indikatoren Ersatzteilverfügbarkeit (EV) und Alter (ALT) ebenfalls auf eine Note von 1,0 zurückgesetzt. Eine teilweise Instandsetzung wurde aus Gründen der Vereinfachung und der fehlenden Zusammenhänge zwischen Wirkung bzw. Zustand nach der teilweisen Instandsetzung im Rahmen des Projektes in Tirol ausgeschlossen.

2.7 RAMS und Lebenszyklusbewertung von Strassentunneln

Ziel der Arbeit von HAUGEN [15] ist die Entwicklung eines Frameworks für eine kombinierte LCC/RAMS-Betrachtung von Tunnelanlagen (vgl. Abbildung 13). RAMS steht für die Abkürzung „Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit“ (Engl.: Reliability, Availability, Maintainability, Safety). Die Definition entstammt der CENELEC-Norm EN 50126 und umfasst die qualitative und quantitative Angabe des Grades, bis zu welchem man sich darauf verlassen kann, dass ein System/Subsystem oder eine Komponente, aus denen ein System besteht, spezifikationsgemäß funktionieren und ebenso verfügbar und sicher sind [10].
Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde u.a. eine Kostenstruktur für Lebenszyklusanalysen für Tunnel entwickelt, welche aus nachfolgenden Elementen besteht:

- Investitions- und Kapitalausgaben (**CAPEX**)
- Betriebsaufwand (**OPEX)**
- Aufwendungen zur Durchführung der RAMS (**RAMEX)**
- Ausgaben für Risikoanalyse und -mitigation (**RISKEX**)
- Aufwendungen zur Ermittlung der Umweltauswirkungen/Umweltkosten (**ENVEX**)

Das vorgeschlagene LCC/RAMS-Framework ist dabei in fünf Projektphasen untergliedert:

1. **Durchführbarkeit** (Feasibility): bestehend aus den Aktivitäten „Ersteinschätzung“ (Pre-Assessment) und „Gefahrenanalyse“ (Preliminary Hazard Analysis, PHA). Im Fokus stehen Fragestellungen wie z.B.:
   - ➔ Was unterscheidet das gegenständliche Projekt von einem „Standard-tunnel“?
   - ➔ Welche potentiellen Um- und Ableitungsmöglichkeiten bestehen bei einer Tunnelsperre und was sind die damit verbundene Konsequenzen?
   - ➔ Definition eines geeigneten Risikoakzeptanzkriteriums?
2. **Vorentwurf** (Preliminary design): bestehend aus CAPEX, RISKEX und einer detaillierten Risikoanalyse. Die Ergebnisse des Pre-Assessment und der PHA bilden hierfür die Grundlagen.
3. **Detailanalyse** (Detailed design): bestehend aus einer RAM-Analyse, Instandhaltungsplanung sowie diverser LCC-Berechnungen. Die RAM dient der Erfüllung der festgelegten Risikoakzeptanzkriterien und bildet die Basis für eine (Grob-)Planung potentiell erforderlicher Instandhaltungsarbeiten. Im Zuge der Detailplanung erfolgt auch ein Update von CAPEX und RISKEX aus Schritt 2.
4. **Bau** (Building phase): Die Bauphase umfasst die Aktivitäten „Sicherheitsmanagement“ (Safety Management), „Qualitätssicherung“ (Quality assurance) und „LCC-Aktualisierung“.
5. **Betrieb** (Operational phase): längste Phase im LCC/RAMS-Framework und umfasst die Aktivitäten „Datenerhebung“ (Data collection) und „LCC-Updating“ in den Bereichen RISMEX, OPEX und RAMEX.

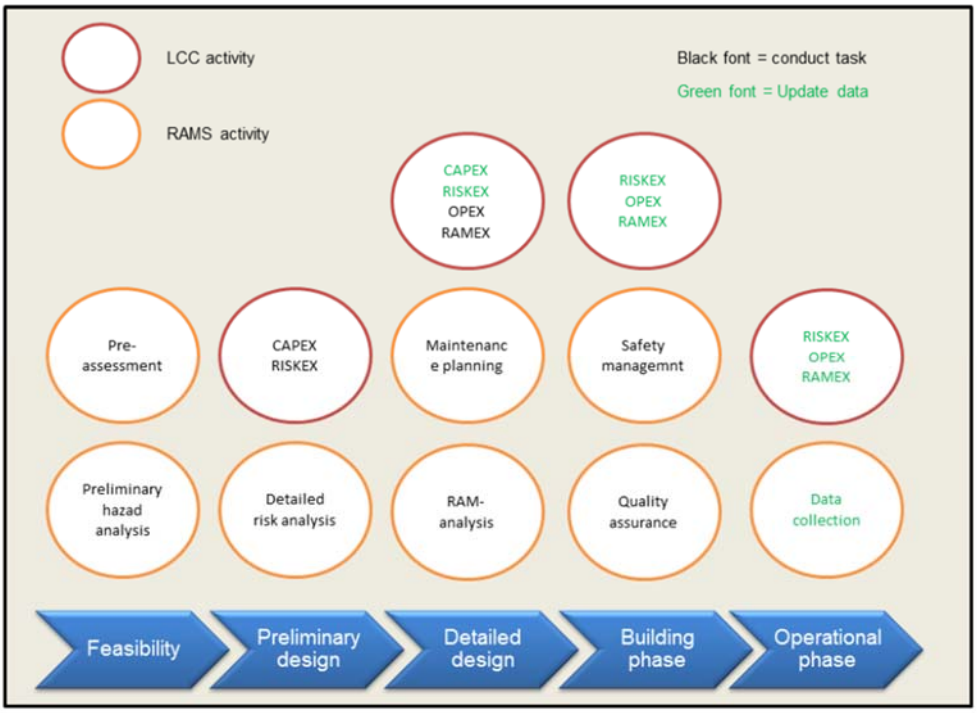


Abbildung 13: LCC/RAMS-Framework für Tunnelanlagen [10]

2.8 Instandsetzungsstrategien und -verfahren für Verkehrstunnel

Der Sachstandsbericht des Arbeitskreises „Instandsetzung von Verkehrstunneln“ der Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e.V. [30] gibt eine Übersicht über die Altersstruktur der Tunnelbauwerke im deutschen Bundesfernstraßennetz, der Deutschen Bahn und der Tunnel im hochrangigen österreichischen Straßennetz.

Die jeweils geltenden Regeln der Bauwerksüberwachung und die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Instandsetzung der Verkehrstunnel in beiden Ländern werden näher erläutert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den baulichen Anlagenteilen.

Häufige Schäden werden in einem eigenen Schadenskatalog zusammengefasst. Neben einer allgemeinen Erläuterung der Möglichkeiten präventiver und reaktiver/hinhaltender Instandhaltungsstrategien werden technische Instandsetzungskonzepte für bauliche Komponenten beschrieben sowie technische Methoden und betriebliche Randbedingungen der Umsetzung erläutert. Ein eigenes Kapitel widmet sich ferner innovativen Lösungsansätzen in Maschinentechnik und Bauverfahrenstechnik.
Der Bericht enthält eine Reihe realisierter Projektbeispiele bautechnischer Tunnelinstandsetzungen und schließt mit einer Aufstellung der absehbaren zukünftigen Instandsetzungsprojekte bei Tunnelanlagen im Netz der Deutschen Bahn, der deutschen Bundesfernstraßen und der hochrangigen Straßen in Österreich.

3 SYSTEMARCHITEKTUR UND DATENGRUNDLAGEN – DELIVERABLE 2.1

In diesem Kapitel werden die wesentlichsten Ergebnisinhalte des Arbeitspakets AP2 zusammengefasst. Am Beginn steht dabei die Erfassung und Strukturierung des Systems „Straßentunnel“ mit sämtlichen relevanten Systemkomponenten der baulichen und elektromaschinellen Anlage n. Die Komponenten werden im Sinne eines System Mappings zusammengefasst, um für die folgenden Arbeitspakete einen einheitlich definierten Untersuchungsrahmen (Systemabgrenzung) zu schaffen. Weiters wurden im Zuge des AP2 die lebenszyklusrelevanten Datengrundlagen erhoben und die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten bei Instandsetzung und Erneuerung in geeigneter Art und Weise dargestellt.

Die relevanten Komponenten der elektromaschinellen Ausrüstung und baulichen Anlagenteile werden auf Basis der heutigen und einer ggf. absehbaren zukünftigen Standardausstattung identifiziert und zusammengestellt. Hierfür wurden die Systemkomponenten in den allgemein üblichen Strukturen hierarchisch strukturiert und bis auf die Bauteilebene bzw. Ebene der Anlagenteile der jeweiligen Gewerke heruntergebrochen.

Die Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen und deren Kosten sind in einem eigenen Katalog zusammengefasst.

3.1 Systemabbildung

3.1.1 Abgrenzung

3.1.1.1 Funktionale und räumliche Systemabgrenzung

Der Untersuchungsrahmen des Projektes OPtimAL umfasst die Tunnelanlage gem. der in Kap. 1.3 getroffenen Begriffsdefinition „Straßentunnel“, d.h. die Tunnelanlage mit allen baulichen Konstruktions- und allen elektromechanischen Ausrüstungselementen entlang der Tunnelröhre zwischen den Portalen sowie der für den Betrieb erforderlichen funktionell zugehörigen obertägigen Elemente wie Betriebsgebäude, Löschwasserbecken, Gewässerschutzanlage, Lüftergebäude u.dgl.

Hinsichtlich der Tunnelsteuerung erfolgt die Betrachtung bis zum Tunnelkopf, d.h. die übergeordnete Leitebene liegt außerhalb des Betrachtungsrahmens.

3.1.1.2 Zeitliche Systemabgrenzung

Der zeitliche Untersuchungsrahmen des Projektes OPtimAL umfasst den Lebenszyklus gem. der in Kap. 1.3 getroffenen Begriffsdefinition „Lebenszyklus“ und beginnt bei bestehenden Anlagen zu einem gegebenen Zeitpunkt und bei neuen Anlagen mit der Verkehrsfreigabe nach Inbetriebnahme der Gesamtanlage. Der Betrachtungshorizont endet theoretisch mit der Außerbetriebsetzung der Anlage. Für die Beurteilung generisch wiederkehrender Muster in den gewerkeübergreifenden Maßnahmenzyklen werden zwar zunächst sehr lange Zeiträume (80 Jahre) betrachtet. Aufgrund des technologischen und regulatorischen Wandels, sind jedoch in der praktischen Anwendung langfristige Prognosen mit zunehmender Unsicherheit und abnehmender Aussagekraft behaftet.

3.1.1.3 Wirtschaftliche Systemabgrenzung

Das Projekt OPtimAL hat sich zum Ziel gesetzt, Optimierungspotenziale der Lebenszykluskosten durch Synchronisierung der für die verschiedenen Anlagengruppen streuenden Instandsetzungs- bzw. Erneuerungszyklen zu identifizieren.

Es wird dabei vorausgesetzt, dass die technische Systemkonfiguration in den verschiedenen Szenarien unverändert bleibt, d.h. es werden nicht im Sinne von ENGELHARDT [11] Initialkosten durch Folgekosten oder umgekehrt substituiert, indem die Anlagenkonfiguration geändert wird. Dieses Potenzial/Notwendigkeit wird in OPtimAL zu einem späteren Zeitpunkt als Ergebnis der Optimierung der Zyklen adressiert, wenn z.B. als Ergebnis einer Optimierungsaufgabe die Zuverlässigkeit bis an eine akzeptierte Grenze ausgeschöpft wird und ein Anpassungsbedarf der technischen Konfiguration besteht. Der wirtschaftliche Untersuchungsrahmen umfasst die Lebenszykluskosten gem. der in der in Kap. 1.3 getroffenen Begriffsdefinition „Lebenszykluskosten“.

Da OPtimAL auf die Optimierung der Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen fokussiert, beschränkt sich der Untersuchungsrahmen somit auf Investitionskosten für Instandsetzung und Erneuerung ohne nähere Betrachtung der Kosten des laufenden Betriebes (z.B. Wartung, Energie, Betriebsstoffe, Persona, Steuern), der indirekten Kosten (z.B. Mautentgang zufolge eingeschränkter Verfügbarkeit) oder sonstigen externen Kosten (z.B. Nutzer, Gesellschaft, Umwelt).

3.1.2 Strukturierung

3.1.2.1 Allgemeines

Abgesehen von der globalen Unterscheidung zwischen bautechnischen Elementen und ausrüstungstechnischen Elementen, gibt es mehrere Möglichkeiten, das System „Tunnelanlage“ strukturiert abzubilden. Je nach Zielsetzung und vorhandener Datenlage kann die Strukturierung der Elemente hinsichtlich der:

- Funktionalität
- Vergabe/Abrechnung
- Bedeutung für Sicherheit und Betrieb
- Wechselwirkung mit anderen Komponenten

erfolgen.

Die Einteilung der Komponenten in Gewerke und funktionelle Gewerksgruppen wird beispielsweise in der RVS 13.03.41 [19] für Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen vorgenommen. Eine im weiteren Sinn funktionale Gruppierung bautechnischer Bauteilgruppen und Bauteile findet sich auch in der RVS 13.03.31 [21]. Die beiden RVS ähneln großteils der Gewerke- bzw. Bauteilgruppierung der RVS 13.04.22 [22] bzw. 13.04.23 [23], welche die Datenbankstruktur der bisherigen Bauwerksdatenbank BAUT und deren Nachfolgerin IMT definieren.

Bei der Betriebstechnik und Steuerung kann zudem in verschiedene Ebenen unterschieden werden. Unterhalb der übergeordneten Leitebene (z.B. regionale Verkehrsmanagementzentrale/Überwachungszentrale) folgt die Anlagenleitebene (Tunnelkopf), darunter die Automatisierungsebene (SPS) und schließlich die Feldebene mit den jeweiligen Systembauteilen. Bei der Steuerung wird ferner deutlich, wie die verschiedenen Hierarchieebenen aber auch Systembauteile auf Feldebene funktionell miteinander verknüpft sind.

Eine abweichende Einteilung in Gewerke- bzw. Leistungsgruppen für die Beschaffung und Abrechnung wird in den Standardleistungsbüchern LB-TI [4] und LB-VI [25] getroffen und dient in erster Linie einer für den Bieter kalkulierbaren Beschreibung der Beschaffungsleistung, einer detaillierten Kostenermittlung auf Positionsebene, der Vergleichbarkeit der Angebote und der Abrechnung.

Im Sinne der Kostenermittlung eignet sich eine derartige funktionelle Strukturierung allenfalls für eine kennzahlenorientierte Kostenschätzung (Elementmethode), was aber in der Regel für eine allgemeine Portfolioanalyse ausreichend erscheint.

Eine Strukturierung der ausrüstungs- und bautechnischen Komponenten hinsichtlich ihrer Kritikalität für Sicherheit und Betrieb wird im Arbeitspapier Nr. 32 zu RVS 09.04.11 [24] vorgenommen. Darin werden sogenannte „minimale Betriebsbedingungen“ definiert und die Störungsbehebung im laufenden Betrieb nach betroffener Komponente und deren Kritikalität priorisiert.

Eine Strukturierung hinsichtlich der potentiellen Wechselwirkungen wird implizit auch durch ENGELHARDT [11] und VOGT [32] vorgenommen, indem verschiedene (Tunnel-)Komponenten in Module zusammengefasst werden, welche keine oder möglichst geringe funktionelle Überschneidungen mit anderen Modulen und voneinander unabhängige Einheiten aufweisen.

Wechselwirkungen werden von ENGELHARD [11] und VOGT [32] zwecks Identifikation von Substitutionspotenzialen im (laufenden) Betrieb vorgenommen, wodurch es zu einer Verschiebung von Initialkosten in Folgekosten und umgekehrt durch alternative technische Anlagenkonfigurationen kommt.

Die Wechselwirkungen im Betrieb weisen eine andere Ausprägung auf als jene im Falle der Instandsetzung oder der Erneuerung. Da OPtimAL auf diese beiden Tätigkeiten fokussiert, werden diese Interdependenzen detailliert in Kap. 3.3 untersucht. Wie dort näher erläutert, dominieren Wechselwirkungen v.a. zwischen bautechnischen Komponenten und ausrüstungstechnische Komponenten sowie zwischen ausrüstungstechnischen Komponenten und der Steuerung bzw. Leittechnik.

3.1.2.2 Analysestruktur

Aus der im Projektantrag formulierten Fragestellung resultieren folgende Anforderungen an die strukturierte Abbildung des Systems Straßentunnel:

- Möglichkeit der Darstellung von Wechselwirkungen zwischen den Elementen (vgl. Kap. 3.3)
- Hinterlegung von Alterungsdaten (vgl. Kap. 3.2)
- Hinterlegung von Kostendaten (vgl. Kap. 3.2)

Es wird in weiterer Folge daher eine funktionale Strukturierung gewählt, welche sich vornehmlich an jener der RVS 13.03.31 [21] und 13.03.41 [19] orientiert, da die Bestands- und Zustandsdaten, welche für die weitere Analyse des Alterungsverhaltens benötigt werden, in dieser Struktur vorliegen.

Die Analysestruktur erfolgt dabei einem hierarchischen Prinzip gemäß:

- Funktionsgruppe

- Gewerk
- Komponente

und macht dadurch sowohl unmittelbar örtliche Wechselwirkungen zwischen einzelnen Komponenten („Feldebene“) als auch hierarchieübergreifende Wechselwirkungen (z.B. die Steuerung- und Leittechnik) erkennbar. Für die späteren weiterfolgenden Untersuchungen kann bzw. muss ggf. eine höhere Granularität gewählt werden, z.B. mangels Grundlagendaten in der jeweiligen Detailtiefe.

Gleichzeitig können mittels einer funktionalen Strukturierung die Komponenten im Sinne des Arbeitspapiers Nr. 32 zu RVS 09.04.11 [24] in die Kategorien „sicherheitskritisch“ und „betriebskritisch“ unterschieden werden.

Eine Kostenschätzung für die Komponenten auf Elementebene z.B. anhand von Kennzahlen ist für die Aufgabenstellung im Rahmen von OPtimAL ausreichend. Von einer Strukturierung nach LB-TI oder LB-VI wird daher abgesehen.
Die für die Untersuchung der Wechselwirkungen (vgl. 3.2.4) gewählte Strukturierung in Funktionsgruppe, Gewerk und Komponente ist in der nachfolgenden Tabelle 10 dargestellt. Die darauf in weiterer Folge aufbauenden Lebenszyklus-Analysen erfolgen auf der aggregierten Gewerksebene.

Tabelle 10: Strukturierung Tunnelanlage: Markierung: rot: potenziell sicherheitskritisch, gelb: potenziell betriebskritisch (vgl. Kap. 3.2.4)

Funktionsgruppe	Gewerk	Komponente
Energieversorgung		
	Mittelspannungsanlage	
		Schaltzellen
		Schutzeinrichtungen
		Transformatoren
	Niederspannungsanlage	
		Niederspannungsverteilungen in Betriebsgebäuden
		Niederspannungsverteilungen in Elektronischen
	SSV Anlage	
		Wechsel-/Gleichrichter
		Akkumulatoren
	Notstromaggregate	
		Aggregat (Motor/Generatoreinheit)
		Treibstofftank
		Starterbatterie
	Blitzschutzanlagen	

Funktionsgruppe	Gewerk	Komponente
		Blitzschutzanlage (Leitungsinstallation) in Betriebsgebäuden und im Vorportal-bereich
		Schutzgeräte in Betriebsgebäuden (Überspannungsableiter, Sicherungen der versch. Schutzniveaus)
		Schutzgeräte im Vorportalbereich (Über-spannungsableiter, Sicherungen der versch. Schutzniveaus)
		Schutzgeräte in Elektronischen (Über-spannungsableiter, Sicherungen der versch. Schutzniveaus)
	Erdung und Potentialausgleich	
		Leitungsinstallation in Betriebsgebäuden
		Leitungsinstallation im Tunnel
		Leitungsinstallation in Elektronischen
Belüftungsanlagen		
	Mechanische Anlagenteile – Axialventilatoren	
		Ventilator Motor Einheit
		Absperrklappen
		Leitbleche
		Rauchabzugsklappen in Zwischendecke
		Schalldämpfer
	Mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	
		Strahlventilatoren
		Leitbleche
		Schalldämpfer Strahlventilatoren
	Elektromechanische Anlagenteile Axialventilatoren	
		Elektromotor Axialventilator
		Laufschaufelverstellung von Axial-ventilatoren einschließlich Hydraulik
		Fremdbelüftung von Axialventilatoren
		Antriebe von Rauchabzugsklappen in Zwischendecke
		Antriebe von beweglichen Jalousien oder Leitblechen
	Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	
		Elektromotor Strahlventilator (Fahrraum und Querschläge)
	Regelung, Steuerung	
		Frequenzumrichter
		Stufenschalter
		Schutz- und Auswertegeräte
	Gebäudelüftung, Klimaanlage	

Funktionsgruppe	Gewerk	Komponente
		Raum-Lüftungsanlage Betriebsgebäude
		Klimageräte Betriebsgebäude
		Raum-Lüftungsanlage Elektronische
		Klimageräte Elektronische
Beleuchtung		
	Einfahrtsbeleuchtung	
		Leuchten
		Verkabelung
		Unterkonstruktion/Aufhängung
		Steuerungskomponenten
	Innenstreckenbeleuchtung	
		Leuchten
		Verkabelung
		Unterkonstruktion/Aufhängung
		Steuerungskomponenten
	Beleuchtung Querschläge/ Fluchtwege	
		Leuchten
		Verkabelung
		Unterkonstruktion/Aufhängung
		Steuerungskomponenten
	Fluchtweghinweis-/ Orientierungsleuchten	
		Mechanik (Gehäuse, Aufhängung)
		Elektrik (Beleuchtung, Verkabelung)
	Regelung, Messwerterfassung	
		Lichtaufnehmer (Leuchtdichtekamera) Vorportalbereich
		Lichtaufnehmer (Leuchtdichtekamera) Tunnelinnenbereich
Messeinrichtungen		
	CO-Messung	
	Trübungsmessung	
	Längsgeschwindigkeitsmessung	
Überwachung / Verkehrslenkung		
	Straßenverkehrszeichen	
		Wechselverkehrszeichen (Gehäuse, Aufhängung, Elektrik)
		Hinweiszeichen (Gehäuse, Aufhängung, Elektrik)
	Verkehrszählung	
		Zählschleifen einschließlich Verkabelung
		Auswertegeräte
	Videoanlagen und akustisches Tunnelmonitoring	

Funktionsgruppe	Gewerk	Komponente
		Fixkameras im Tunnelfahrraum (Kamera, Schutzgehäuse, Konsole, Verkabelung, Anschlusskasten)
		Schwenk-/Neige-/Zoomkameras im Tunnelfahrraum (Kamera, Schutzgehäuse, Konsole, Verkabelung, Antrieb, Anschlusskasten) sowie Domkameras
		Fix- und Schwenk-/neige/zoomkameras im Vorportalbereich (Kamera, Schutzgehäuse, Konsole, Verkabelung, Antrieb, Anschlusskasten)
		Zentrale Komponenten (Videospeichersystem, Kreuzschienen, Videodetektion, div. Steuerungsrechner)
		Akustisches Tunnelmonitoring (AKUT)
	Verkehrslichtsignalanlagen	
		VLSA im Vorportalbereich und am Tunnelportal (Aufhängung, Gehäuse, Steuerungsmodule)
		VLSA im Tunnelfahrraum (Aufhängung, Gehäuse, Steuerungsmodule)
	Höhenkontrolle	
		Sensorik (mechanisch, elektrisch) einschließlich Meldung
	Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen	
		Informationstafeln in Pannenbuchten (Gehäuse, Aufhängung, Netzteile, Steuerungen)
		Informationstafeln im Vorportalbereich (Gehäuse, Aufhängung, Netzteile, Steuerungen)
		Prismenwender im Tunnelfahrraum (Gehäuse, Aufhängung, Antriebe, Steuerungen)
		Prismenwender im Vorportalbereich (Gehäuse, Aufhängung, Antriebe, Steuerungen)
		Leiteinrichtungen selbstleuchtend
		Fahrstreifensignalisierung (Aufhängung, Steuerungen)
Notruf		
	Notruf	
		Sprechstelle in Notrufnische (NRN)
		Sprechstelle Fahrraum (NRSt)
		Sprechstelle in Querschlägen, Fluchtwegen
		Sprechstelle im Vorportalbereich (NRK)
		Elektrotechnische Komponenten und Elektroinstallation Notrufnischen
Telefon		
	Telefonanlage (Festnetz)	

Funktionsgruppe	Gewerk	Komponente
		Telefonapparate in Betriebsgebäuden
		Telefonapparate in E-Nischen
		Telefonzentrale
		Telefonapparate, welche von Einsatz-organisationen genützt werden
Funk		
	Funkanlage	
		Strahlerkabel im Fahrraum
		Zentrale Komponenten in E-Nischen
		Zentrale Komponenten in den Betriebsstation oder -zentrale
Beschallung		
	Beschallungsanlage	
		Lautsprecher samt Verstärkereinheit Vorportalbereich
		Lautsprecher samt Verstärkereinheit Tunnelinnenbereich
		NF-Komponenten in den Betriebs-gebäuden
Systeme zur Branderken-nung und -bekämpfung		
	Brandmeldeanlage Kabel, Sensoren, Schalter	
		Linienbrandmeldekabel Fahrraum (Kabel, Befestigung)
		Handgefahrenmelder
		Punktbrandmelder Betriebsgebäude, E-Nischen, Kavernen
	Brandmeldeanlage Steuerung	
		Branderkennungszentrale für Tunnelfahrraum
		Branderkennungszentrale für Punktbrandmelder
	Löscheinrichtungen	
		Tragbare Feuerlöscher
		Wandhydranten
		Löschzubehör in Feuerlöschnischen
		Elektrotechnische Ausrüstung der Feuerlöschnischen
	Löschwasserversorgung	
		Löschwasserbehälter inkl. Pumpen-stuben
		Drucksteigerungsanlagen (elektromech. Anlagenteile)
		Löschwasserleitung einschließlich Sektionsabsperrungen und Ventile im Leitungsnetz, Frostlauf, Druckprobe

Funktionsgruppe	Gewerk	Komponente
		Wasserentnahmestellen, Absperrschieber
	Lösch- und Bindemittelvorrat	
Tunnelsteuerung		
	Automatisierung	
	Prozessvisualisierung	
	Archivierung / Datenauswertung	
Gewässerschutzanlagen		
	Gewässerschutzanlagen	
		Elektromechanische Anlagenteile (Schieber, Füllstandmessgeräte, Messeinrichtungen, Pumpen usw.)
		bauliche Anlagenteile (Becken, Schächte)
Schachtbefahrung		
	Schachtbefahrung	
		Mechanische Anlagenteile (Seil, Fahr-korb, Seilrolle einschließlich Lagerung)
		Elektrische Anlagenteile (Antriebsmotor, Kabineninstallation, Elektroinstallation Windenhaus, Bedienelemente)
Türen, Tore, Verkleidungen		
	Türen, Tore, Verkleidungen	
		Türen Betriebsgebäude außen (Türblatt, Öffen-/Schließmechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)
		Türen Betriebsgebäude innen (Türblatt, Öffen-/Schließmechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)
		Türen Notrufnischen (Türblatt, Öffen-/Schließmechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)
		Türen Feuerlöschnischen (Türblatt, Öffen-/Schließmechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)
		Querschlagstüren/-tore EQ (Torblatt, Öffen-/Schließmechanismus einschließ-lich Antrieb, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte
		Querschlagstüren/-tore GQ, EQ, GA und EA (Torblatt, Öffen-/Schließ-mechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte
		Türen Elektronischen (Türblatt, Öffen-/Schließmechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)
Kräne, Hebezeuge		
	Krane und Hebezeuge	

Funktionsgruppe	Gewerk	Komponente
		Mechanische Anlagenteile (Seil, Träger, Seilrolle einschließlich Lagerung)
		Elektrische Anlagenteile (Antriebsmotor, Elektroinstallation, Bedienelemente)
Tunnelröhre		
	Gewölbe bewehrte Blöcke	
	Gewölbe unbewehrte Blöcke	
	Sohlgewölbe/Sohlplatte	
	Abdichtung	
Tunnelleibung		
	Beschichtung bzw. Anstrich	
	Blocknummerierungen	
	Brandschutzverkleidungen (Platten oder Mörtel)	
	Lärmschutzverkleidungen	
Fahrbahn und Seitenstreifen		
	Fahrbahn	
	erhöhte Seitenstreifen	
	Kabelkanäle	
	Bordsteine	
	Bodenmarkierung	
Entwässerung		
	Ulmendrainagen	
	Frostkofferentwässerung	
	Einlaufschächte	
	Schlitzrinnen	
	Schachtabdeckungen, Sammelleitungen	
Fluchtwege		
	Abschlusswände/Verschlusswände	
	Flucht-, Rettungswege und Zugänge	
	Querschläge	
Nischen		
	Nischenkörper	
	Nischenabdeckungen	
Bauliche Lüftungsanlagen		
	Lüftungsschächte	
	Lüftungstürme	
	Zwischendecke inkl. Auflager	
	Trennwand	
	Hängestangen	
Bauliche Anlagen		
	Betriebsgebäude	
	Betriebsstationen	

Funktionsgruppe	Gewerk	Komponente
	Geländer und Absturzsicherungen	
	Kabelkollektoren	
Portale		
	Portalbauwerk, Portalkranz	
	Portalwände und Flügelwände	
	Steinschlagnetze	
Gelände über Tunnel		
	Böschungen	
	Pflasterungen	
	Steinschlichtungen	

3.2 Datengrundlagen für gewerksspezifische Lebenszyklen

Bei der Begrifflichkeit der Nutzungsdauer ist zu unterscheiden nach der Nutzungsdauer des Bauwerks und jener der Bauteile/Einzelkomponenten. Während die Bauwerksnutzungsdauer bei Tunnelanlagen bauweisenspezifisch mit bis zu 100 Jahre angesetzt wird, wird diese nur durch wiederholte Instandsetzung und/oder Erneuerung von Einzelkomponenten (Bauteilen) erreicht. Die Nutzungsdauern der Einzelkomponenten sind somit entsprechend geringer als jene des Gesamtbauwerks (vgl. Abbildung 14).

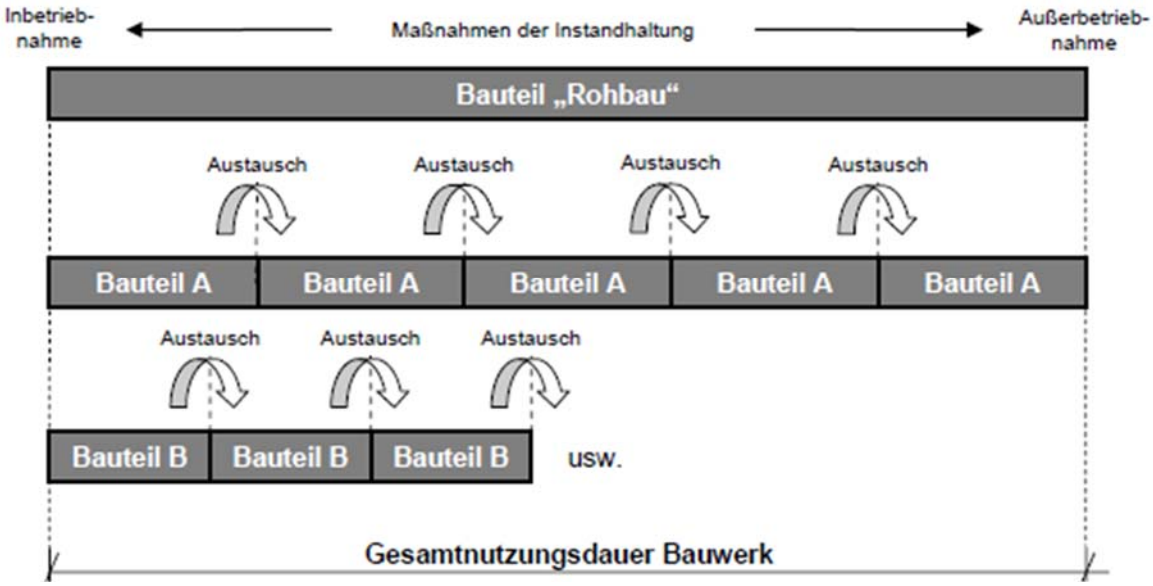


Abbildung 14: Unterscheidung Bauwerksnutzungs- vs. Bauteilnutzungsdauer [32]

Aufgrund der hohen Diversität der in einer Tunnelanlage verbauten Komponenten, divergieren die Nutzungsdauern und somit auch die Erneuerungszyklen und Instandsetzungszyklen untereinander sehr stark.

3.2.1 Alterungscharakteristik und Nutzungsdauern Bau

Die Alterung der bautechnischen Komponenten wurden im Rahmen des VIF-Projektes AMBITION [14] untersucht, indem die Daten der Bauwerksdatenbank BAUT (Stand 2017) ausgewertet und Alterungskurven im Format der CWA 16633 [13] angepasst wurden.

Der verwendete Datensatz umfasste 248 Bauwerke in offener, geschlossener und gemischter Bauweise. Eine konsequente Erfassung der Zustandsnoten war allerdings nicht über den gesamten Betrachtungszeitraum gegeben, da vor dem Jahr 1991 keine Zustandsnoten in die Datenbank eingetragen wurden. 90% der aufgezeichneten Daten fielen in den Zeitraum 2014-2017. Des Weiteren sind in der BAUT keine Instandhaltungsmaßnahmen verzeichnet – diese können insofern nur angenommen werden, wenn eine Verbesserung der Zustandsnote eintritt. Die Ableitung von Degradationskurven, welche eine „Do-Nothing-Strategie“ darstellen, kann durch das Fehlen von Angaben zu Instandhaltungen mit Problemen behaftet sein. Es besteht die Möglichkeit, dass Instandhaltungsmaßnahmen, welche die Note nicht verbessern, die Degradation jedoch verlangsamten, stattfanden.

Aus dem Datensatz wurden nun für alle Bauteile (Gewölbe, Zwischendecke, Entwässerung, Seitenstreifen etc.) Übergangswahrscheinlichkeiten (Mittelwert und Standardabweichung) für eine Zustandsverschlechterung um einen Notengrad errechnet, wobei Verbesserungen als Folge von Maßnahmen im Rahmen der Instandhaltungen betrachtet und in der Auswertung daher nicht berücksichtigt wurden. Diese Ergebnisse wurden aufsummiert und Alterungskurven im Format der CWA 16633 [13] gefittet.

Die ermittelten Alterungskurven zeigten, bis auf wenige Ausnahmen, ein Erreichen der Zustandsnote 5 nach etwa 30 Jahren, wobei die Standardabweichung ±15 Jahren beträgt. Eine signifikant höhere Lebensdauer von im Mittel 53 Jahren konnte nur für Zwischendecken und Trennwände in offener Bauweise festgestellt werden.

In weiterer Folge wurde untersucht, ob die Verkehrsstärke (größer/kleiner 20.000 Kfz pro Tag) und die Tunnellänge (größer/kleiner 750 m) einen Einfluss auf die Degradationskurven haben. Die Cluster-Auswertung ergab (u.a. aufgrund der Datenqualität und dem Systemverständnis der Zustandsnote) keine eindeutige Differenzierung des Alterungsverhaltens hinsichtlich Verkehrsstärken oder Tunnellängen. In technischer Sicht ist der Einfluss von Umweltfaktoren, Betrieb und der verbauten Materialien auf das Alterungsverhalten jedoch unbestritten und spiegelt sich im Substanzwert, also dem verbleibenden quantitativen Abnutzungsvorrat des Tunnels, wider [29], [30].

Um eine geringere Streuung der Degradationskurven und damit eine eindeutigere Aussage bezüglich der mittleren Verweildauer in einer Zustandsnote zu erhalten, wird im gegenständlichen Projekt vor der Ermittlung der Übergangswahrscheinlichkeiten eine Analyse der wesentlichen Eingangsparameter mittels Random Forest durchgeführt. Aus der BAUT werden hierfür die Parameter Länge, Material, Bauweise und Baujahr berücksichtigt. Zusätzlich werden auch noch der Einfluss des Frostindex, der Gefahrenklasse, des Schwerverkehrs und des JDTV ermittelt. Sofern signifikante Alterungsunterschiede erkannt werden, wird der Datensatz danach geclustert und mittels Markov-Ketten Verschlechterungskurven erstellt.

Für den Substanzwert gibt es in der heutigen Zustandsbewertungssystematik keine Erfassungsgröße. Im Gegensatz zur heute üblichen RVS-Benotung, welche als qualitatives Maß der Dringlichkeit von Instandsetzungsmaßnahmen verstanden werden kann, spiegelt der Substanzwert - vereinfacht ausgedrückt - den quantitativen Instandsetzungsbedarf an einem Objekt wider. Dieser streut entsprechend den objektspezifischen Randbedingungen aus Umwelt, Betrieb und Baustoffen.

Die im Netz der ASFiNAG verwendeten Baustoffe und Materialien sind weitestgehend standardisiert durch ÖNORMen, RVSen, ÖBV-Richtlinien und ASFiNAG Planungshandbücher. Eine gewisse Streuung liegt jedoch allein schon aufgrund der Altersverteilung vor, da ältere Tunnelanlagen nach einem anderen Stand der Technik geplant und errichtet wurden als Anlagen jüngeren Datums. Einen massiven Qualitätssprung gab es beispielsweise beim technischen Standard bez. der Innenschale, der Tunnelabdichtung und der Tunnelentwässerung, was sich auch in der Alterungscharakteristik dieser Bauteile niederschlägt. So streut beispielsweise der Umfang des Neubaus einer Innenschale bei vergangenen Instandsetzungsprojekten beträchtlich. So wurden beispielsweise beim Ofenauer- und Hiefler-tunnel nach rd. 30 Jahren 100% des Innenausbaus (Abdichtung und neue Innenschale) erneuert, während beim Katschbergtunnel nach 30 Jahren an der Innenschale lediglich lokale Instandsetzungen am Gewölbebeton erfolgten.

Die Alterungskurven geben an sich noch keine direkte Auskunft über die Bauteilnutzungsdauern und Erneuerungsraten. Grobe Richtwerte zu den Nutzungsdauern (Erneuerungsraten) bautechnischer Komponenten in Straßentunnel werden z.B. in der SIA 197/2 [28] gegeben. Diese Werte sind jedoch im Schweizer Kontext zu verstehen und erscheinen vor den in den letzten Jahren im Netz der ASFiNAG vorgenommenen Tunnel-Generalerneuerungen, wo im Schnitt nach 30-40 Jahren wesentliche Teile des bautechnischen Innenausbau erneuert werden, optimistisch [29].

Für Instandsetzungsumfang und Erneuerungszyklen werden daher aufgrund der bisherigen Erfahrungen im ASFiNAG Netz Bandbreiten abgeschätzt, welche in den Maßnahmenkatalogen für Instandsetzung und Erneuerung aufgenommen wurden (vgl. Kap. 3.2.3.).

Eine für bautechnische Komponenten charakteristische Eigenschaft ist, dass die tatsächlich erzielte Nutzungsdauer durch hinhaltende Maßnahmen verhältnismäßig flexibel ausdehnbar ist, während bei ausrüstungstechnischen Komponenten vielfach nur ein Austausch einer gealterten Komponente in Frage kommt. Je nach verfolgter (Instandhaltungs-)Strategie und Anwendung hinhaltender Maßnahmen sind Angaben zu tatsächlichen und erwarteten Nutzungsdauern bautechnischer Komponenten nur bedingt vergleichbar.

3.2.2 Alterungscharakteristik und Nutzungsdauern E&M

3.2.2.1 Nutzungsdauern in Österreich

In Österreich regelt die RVS 13.03.41 [19] die Maßnahmen für die Instandhaltung, Kontrolle und Prüfung der elektrotechnischen und maschinellen Einrichtungen sowie sonstiger Sicherheitseinrichtungen zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit, Betriebsbereitschaft und Verkehrssicherheit.
Die RVS gibt Erfahrungswerte für typische Nutzungsdauern (vgl. Tabelle 11), welche im Wesentlichen auf jene der PIARC [35] basieren und entsprechend den österreichischen Erfahrungen und der in Österreich üblicherweise verbauten Technologie adaptiert wurden.

Tabelle 11: **Nutzungsdauern für E&M nach RVS 13.03.41 [19]**

Betriebs- und Sicherheitseinrichtung	Gewerk	Ø Lebensdauer* [Jahre]
Energieversorgung	Mittelspannungsanlage	25
	Niederspannungsanlage	25
	SSV Anlage	15
	Notstromaggregate	25
	Blitzschutzanlagen	25
	Erdung und Potentialausgleich	25
Belüftungsanlagen	Mechanische Anlagenteile Axialventilatoren	30
	Mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	20
	Elektromechanische Anlagenteile Axialventilatoren	20
	Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	20
	Regelung, Steuerung	15
	Gebäudelüftung, Klimaanlage	15
Beleuchtung	Einfahrtsbeleuchtung	20
	Innenstreckenbeleuchtung	20
	Beleuchtung Querschläge/Fluchtwege	20
	Fluchtweghinweis/-orientierungsleuchten	10
	Regelung, Messwerterfassung	15
Messeinrichtungen	CO-Messung	15
	Trübungsmessung	15
	Längsgeschwindigkeitsmessung	15
Überwachung/Lenkung Verkehr	Straßenverkehrszeichen	10
	Verkehrszählung	10
	Videoanlagen	10
	Verkehrslichtsignalanlagen	10
	Höhenkontrolle	10
	Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen	15
Notruf	Notruf	15
Telefonanlage (Festnetz)	Telefonanlage (Festnetz)	20
Funkanlage	Funkanlage	15
Beschallungsanlage	Beschallungsanlage	20
Brandmelde-/-bekämp-fungsanlagen	Brandmeldeanlage Kabel (Linienbrandmeldekabel Fahrraum)	20
	Brandmeldeanlage Steuerung	10
	Löscheinrichtungen	20
	Löschwasserversorgung	20
	Lösch- und Bindemittelvorrat	20
Tunnelsteuerung	Automatisierung	15
	Prozessvisualisierung	10
	Archivierung/Datenauswertung	10
Gewässerschutzanlagen	Gewässerschutzanlagen	20
Schachtbefahrung	Schachtbefahrung	30
Türen, Tore, Verkleidungen	Türen, Tore, Verkleidungen	20
Kräne und Hebezeuge	Krane und Hebezeuge	30

3.2.2.2 Nutzungsdauern International

Weil der technische Ausstattungsumfang in Straßentunneln über die Jahre umfassender aber auch komplexer geworden ist, führt die pauschale Annahme einer identischen Nutzungsdauer für alle betriebstechnischen Anlagen vermehrt zu verzerrten Kostenermittlungen. Pauschale Werte sind deshalb soweit wie möglich zu vermeiden. Der Weltstraßenverband PIARC hat unter anderem aus diesem Grund im Jahr 2016 einen Bericht veröffentlicht, der den aktuellen Stand und die geeignetsten methodischen Vorgehensweisen für Lebenszyklusbetrachtungen zur betriebstechnischen Ausstattung von Straßentunneln dokumentiert (vgl. [35])

In der Schweiz werden seit einiger Zeit bereits anlagenspezifische Nutzungsdauern für die E&M in Straßentunneln in den Normen vorgegeben (vgl. Tabelle 12). In Wirtschaftlichkeitsberechnungen oder in Betrachtungen für die Erhaltungsplanung werden diese Angaben dann als Basis genommen.

Tabelle 12: Nutzungsdauern für E&M in Schweizer Straßentunneln (Bsp. Energieversorgung) [28]

	Nutzungsdauer (Jahre)							
Anlagenteil	10	15	20	25	30	35	40	45
Energieversorgung								
Hoch- und Niederspannungsverteilungen				X	X			
Transformatoren					X	X	X	
Niederspannungsverteilungen				X	X			
USV-Anlage			X	X				
Batterien mit Säurefüllung		X						
Batterien mit Gelfüllung	X							

Auch im angelsächsischen Raum existieren Quellen, die zur Bestimmung von Nutzungsdauern und Restnutzungsdauern der unterschiedlichen E&M in Straßentunneln und Berechnung von Lebenszykluskosten herangezogen werden können (vgl. [1]). In den amerikanischen Vorgaben wird davon ausgegangen, dass die meisten technischen und mechanischen Ausstattungen in Straßentunnel eine durchschnittliche Nutzungsdauer zwischen 20 und 25 Jahren haben. In der Praxis wird diese pauschale Annahme aber aufgrund der geplanten Unterhaltstätigkeiten und Betriebsarten anlagenspezifisch weiter differenziert (vgl. Tabelle 13).

Der amerikanische Ingenieurverband für Heizung, Lüftung und Kühlung publiziert ebenfalls Schätzungen und Vergleiche von Nutzungsdauern von verschiedenen betriebstechnischen Anlagen (vgl. [5]). Für die E&M von Tunnelsystemen können aus dieser Datengrundlage Nutzungsdauern für Lüftungen, Pumpen, Motoren, Transformatoren sowie pneumatische, elektrische und elektronische Steuerungen adaptiert werden (vgl. Tabelle 14). Die Daten leiten sich einerseits aus Betriebserfahrung ab und stammen andererseits aus Wartungsprotokollen und Herstellerempfehlungen - die Nutzungsdauern variieren ebenfalls zwischen 15 – 30 Jahren.

Tabelle 13: Kenngrößen für Lebenszykluskosten für E&M in den USA [1]

Preservation Action	Tunnel #	Capital Cost ($)	Agency Oversight Cost ($)	Annual Energy Cost Savings ($)	Annual Change in Maintenance Cost ($)	Total Annual Change in Costs ($)	Service Life of the Asset After Improvement	PV of LCC ($)**
Ventilation upgrade to meet NFPA 502	1	5,700,000	570,000	–150,000	–2,500	–152,500	25	3,614,495
Install new LED lights	1	3,400,000	136,000	–66,000	–5,000	–71,000	20	2,479,699
CO system–repair to operating condition	2	32,000	3,200	0	0	0	20	35,200
Repair active leak in tunnel	4	10,000	1,000	0	0	0	20	11,000
Remove existing concrete tunnel ceiling	6	8,000,000	800,000	0	–20,000*	–20,000*	50	8,285,405
Install flood gates	6	8,000,000	320,000	0	0	0	100	8,320,000

Tabelle 14: Vergleich von Nutzungsdauern für betriebstechnische Anlagen in den USA [5]

Equipment Item	Median Service Life, Years: Abramson et al. (2005)	Median Service Life, Years: Akalin (1978)	Equipment Item	Median Service Life, Years: Abramson et al. (2005)	Median Service Life, Years: Akalin (1978)	Equipment Item	Median Service Life, Years: Abramson et al. (2005)	Median Service Life, Years: Akalin (1978)
Air Conditioners			**Air Terminals**			**Condensers**		
Window unit	N/A*	10	Diffusers, grilles, and registers	N/A*	27	Air-cooled	N/A	20
Residential single or split package	N/A*	15	Induction and fan-coil units	N/A*	20	Evaporative	N/A*	20
Commercial through-the-wall	N/A*	15	VAV and double-duct boxes	N/A*	20	**Insulation**		
Water-cooled package	>24	15	**Air washers**	N/A*	17	Molded	N/A*	20
Heat pumps			**Ductwork**	N/A*	30	Blanket	N/A*	24
Residential air-to-air	N/A*	15[b]	**Dampers**	N/A*	20	**Pumps**		
Commercial air-to-air	N/A*	15	**Fans**	N/A*		Base-mounted	N/A*	20
Commercial water-to-air	>24	19	Centrifugal	N/A*	25	Pipe-mounted	N/A*	10
Roof-top air conditioners			Axial	N/A*	20	Sump and well	N/A*	10
Single-zone	N/A*	15	Propeller	N/A*	15	Condensate	N/A*	15
Multizone	N/A*	15	Ventilating roof-mounted	N/A*	20	**Reciprocating engines**	N/A*	20
Boilers, Hot-Water (Steam)			**Coils**			**Steam turbines**	N/A*	30
Steel water-tube	>22	24 (30)	DX, water, or steam	N/A*	20	**Electric motors**	N/A*	18
Steel fire-tube		25 (25)	Electric	N/A*	15	**Motor starters**	N/A*	17
Cast iron	N/A*	35 (30)	**Heat Exchangers**			**Electric transformers**	N/A*	30
Electric	N/A*	15	Shell-and-tube	N/A*	24	**Controls**		
Burners	N/A*	21	**Reciprocating compressors**	N/A*	20	Pneumatic	N/A*	20
Furnaces			**Packaged Chillers**			Electric	N/A*	16
Gas- or oil-fired	N/A*	18	Reciprocating	N/A*	20	Electronic	N/A*	15
Unit heaters			Centrifugal	>25	23	**Valve actuators**		
Gas or electric	N/A*	13	Absorption	N/A*	23	Hydraulic	N/A*	15
Hot-water or steam	N/A*	20	**Cooling Towers**			Pneumatic	N/A*	20
Radiant heaters			Galvanized metal	>22	20	Self-contained		10
Electric	N/A*	10	Wood	N/A*	20			
Hot-water or steam	N/A*	25	Ceramic	N/A*	34			

*N/A: Not enough data yet in Abramson et al. (2005). Note that data from Akalin (1978) for these categories may be outdated and not statistically relevant. Use these data with caution until enough updated data are accumulated in Abramson et al.

In Norwegen stehen seit kurzem verschiedene Analyseinstrumente und Methoden für Lebenszyklusbetrachtungen zur Verfügung. Diese integrieren weitere Aspekte in die Lebenszyklusbetrachtungen von E&M in Straßentunneln, wie zum Beispiel Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (engl. reliability, availability, maintainability, safety, RAMS; vgl. [15]). Die Methoden wurden ausführlich in Bahnprojekten wie dem Neubau des Gotthard Basistunnels angewendet (vgl. [31]). Derzeit erfolgen Untersuchungen im Rahmen von Arbeitsgruppen des Weltstraßenverbandes (PIARC), um die Erkenntnisse auf Straßen bzw. Straßentunnel zu übertragen [26].

3.2.2.3 Alterungscharakteristik

Anlagen der E&M weisen sehr unterschiedliche Alterungscharakteristiken auf, die sich anhand der verschiedenen Degradationsverläufe und der damit verbundenen Auswirkungen typisieren lassen. Grundsätzlich lassen sich für die elektromechanischen Anlagen in einem Straßentunnel die folgenden Charakteristiken identifizieren (vgl. [6]):

- **Alterung mit Auswirkungen auf den Zustand**: Bestimmte Anlagen zeichnen sich durch eine lineare Degradation aus, die sich direkt auf den Zustand und damit auch

auf die Beeinträchtigung der vorgegebenen Anlagenfunktion auswirkt (Bsp. Verschmutzung der Beleuchtungsanlage). Der Zustand der Anlage verschlechtert sich solange kontinuierlich bis eine zustandsverbessernde Maßnahme umgesetzt wird.

- **Alterung mit Auswirkungen auf die Nutzungsdauer**: Insbesondere bei Anlagen mit einem hohen Anteil mechanischer Komponenten (Bsp. Strahlventilatoren) spielt der sogenannte „Abnutzungsvorrat“ eine zentrale Rolle in der Erhaltungsplanung. Dieser bezeichnet den verbleibenden Vorrat an möglichen Funktionserfüllungen unter vorgegebenen Bedingungen (vgl. [32], [6]). Ohne angemessene Erhaltungstätigkeiten ist eine Anlage so abgenützt, dass sie die ihr zugeschriebene Funktion nicht mehr länger erfüllen kann. Die Nutzungsdauer dieser Anlage hängt somit stark von den periodischen Wartungsmaßnahmen ab, wie zum Beispiel Reinigung oder Schmierung.
- **Alterung mit Auswirkungen auf Ausfallrate und Verfügbarkeit**: Funktionsausfälle und damit verbundene Unverfügbarkeit von Anlagen sind unvorhersehbare Ereignisse, die typischerweise eng mit der Alterung einhergehen und deren Häufigkeit über die Nutzungsdauer einer Anlage variieren (vgl. Badewannenkurv in Abbildung 15).

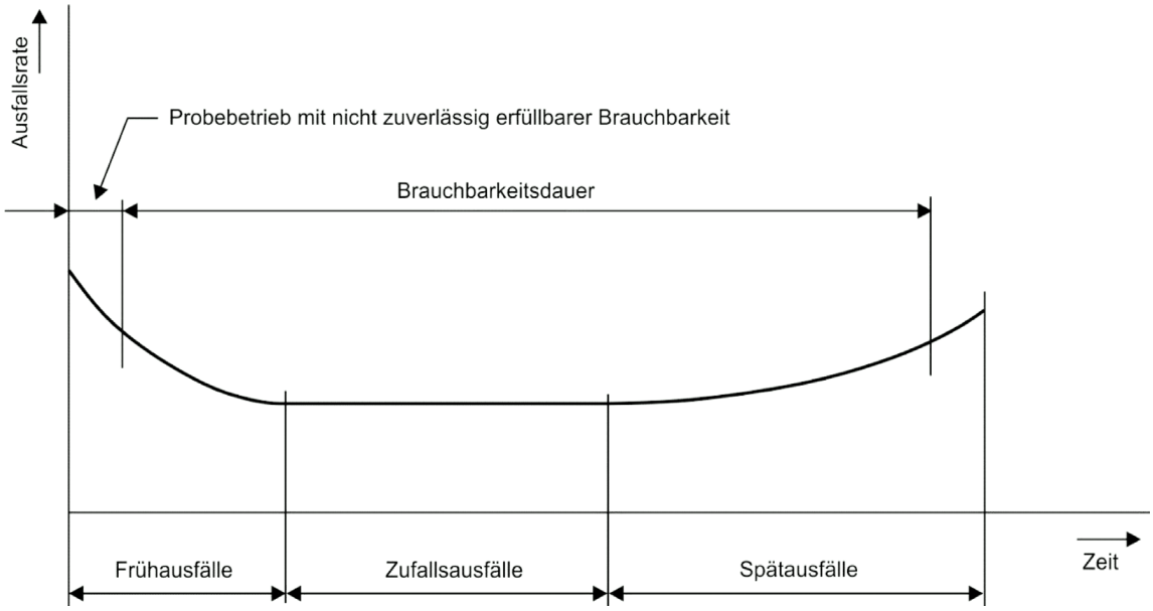


Abbildung 15: Ausfallrate während der Nutzungsdauer [19]

Die RVS 13.03.41 [19] beinhaltet ein Bewertungsverfahren für die Zustandsbewertung von elektrotechnischen und maschinellen Einrichtungen. Die Gesamtnote einer E&M-Anlage reicht von 1 (sehr guter Gesamtzustand) bis 5 (schlechter Gesamtzustand) und setzt sich aus den Teilaspekten „technischer Anlagenistzustand“, „Ersatzteilverfügbarkeit“ und „Alter“

zusammen. Die Gesamtnote wird dabei in einen direkten Zusammenhang mit der Maßnahme (Wartungszyklus, Revitalisierung, Sofortmaßnahme) gebracht. Des Weiteren werden für alle Gewerke typische Brauchbarkeitsdauern („Lebensdauern“) und Kontroll- und Prüfzyklen definiert.

3.2.3 Maßnahmenkataloge

3.2.3.1 Instandsetzung (Revision) Bau

Während die Erneuerung (eines Elements) den Ersatz des alten Elements durch ein funktional gleichwertiges neues Element bedeutet, handelt es sich bei der Instandsetzung um Maßnahmen, welche sich von Bauteil zu Bauteil wesentlich unterscheiden. Auch innerhalb gleicher Bauteile kann (insbesondere bei bautechnischen Elementen) eine Instandsetzungsmaßnahme in Abhängigkeit des Schadensbilds und dem Instandsetzungsziel (z.B. langfristige vs. hinhaltende Instandsetzung) unterschiedlich ausfallen.

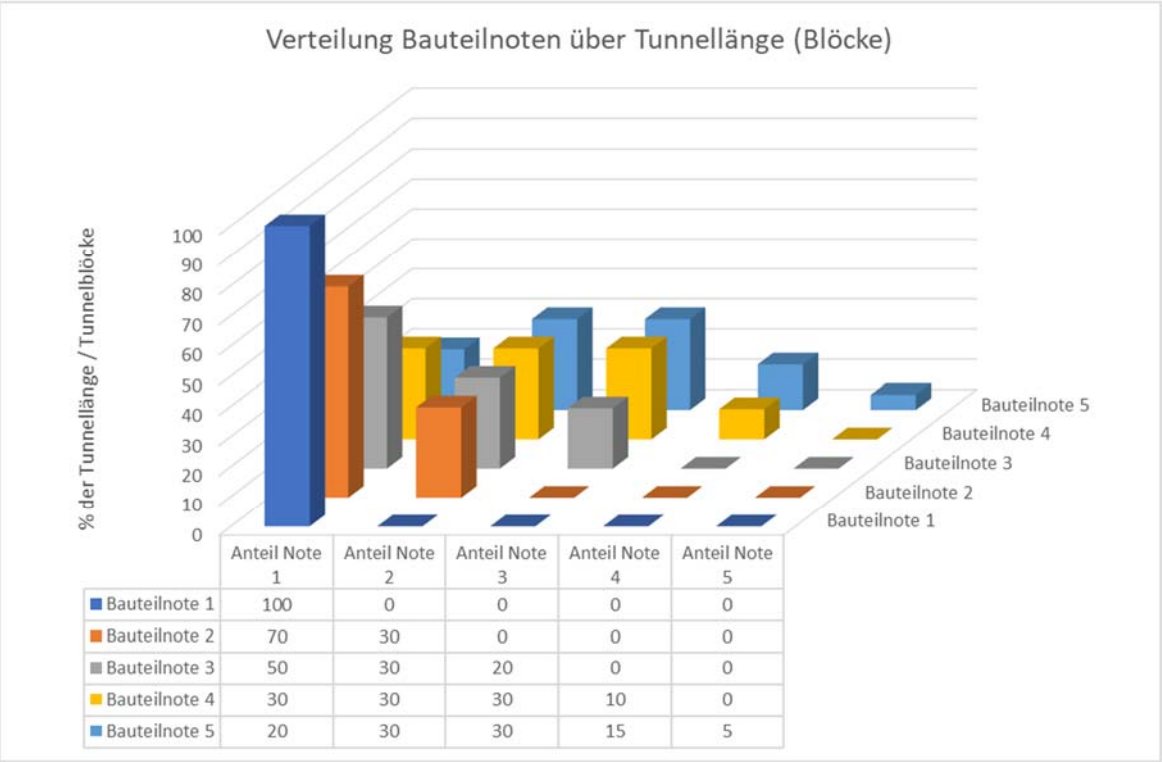
Oftmals umfassen Instandsetzungsmaßnahmen lokale Betoninstandsetzungen, örtliche Rohrsanierung, das Abdecken oder Abdichten undichter Fugen oder das Entfernen loser Teile. Ein planbarer Umfang der Maßnahmen einer bautechnischen Instandsetzung kann daher nicht allgemein gültig definiert werden. Generell gilt aber, dass Instandsetzungen als hinhaltende Maßnahmen verhältnismäßig flexibel eingesetzt werden können, um eine Erneuerung der betreffenden Elemente flexibel hinauszögern zu können.

Die bautechnischen Bauteile unterscheiden sich hinsichtlich Art und Umfang der gesetzten Maßnahmen wesentlich von den elektromaschinellen Gewerken. Bei Letzteren steht meist ein Austausch des gesamten Gewerks über eine gesamte Tunnelröhre im Vordergrund, während bei ersteren auch innerhalb eines Bauteils (z.B. Tunnelinnenschale) eine Vielzahl an Maßnahmen möglich sind, die sich in Art, Tiefe und räumlichem Eingriff stark unterscheiden. In der Regel divergieren diese auch je nach anlagenspezifischen Randbedingungen (Geologie, Verkehr, Hydrogeologie, Baustoffe, Bauqualität) und sind sehr ungleich über die Tunnellänge verteilt.

Das korrekte Ansetzen der bautechnischen Instandsetzungsmaßnahmen in Lebenszyklusbetrachtungen setzt somit die Kenntnis der Art und des Umfangs der Maßnahmen voraus. Da wäre erst ein objektspezifisches Instandsetzungsprojekt zu entwickeln, was zumindest für Portfoliobetrachtungen unpraktikabel ist. Somit sind zumindest plausible Ansätze anhand der vorhandenen Informationen des Anlagenzustandes zu treffen. Der vorhandene Anlagenzustand, der in Form einer Zustandsnote je Bauteil dokumentiert ist, lässt jedoch

in der derzeitigen Systematik der RVS 13.03.31 keinen Rückschluss auf das Schadensausmaß zu, da in der Regel der schlechteste Bereich einer Tunnelröhre in die Bauteilnote durchschlägt. Vorschläge einer weiterentwickelten Zustandsbewertung gibt es bereits [14], wurden jedoch bislang noch nicht implementiert. Im Rahmen des gegenständlichen Vorhabens wird daher ein Ansatz zur Verteilung des Zustandes über die Tunnelröhre gem. Abbildung 16 getroffen.

Für die bautechnischen Maßnahmen können dann generische bauteilspezifische Benchmarkkosten angenommen werden im Umfang jenes Tunnelanteils, der eine bestimmte Note überschreitet (z.B. anteilige Tunnellänge mit Bauteilnote 3 oder schlechter). Bei Verwendung dieser generischen baulichen Instandsetzungskosten je Bauteil muss man sich der Aussagekraft bzw. -genauigkeit entsprechend bewusst bleiben, wobei bei Portfoliobetrachtungen von zumindest einem teilweisen Ausmitteln von Unschärfen ausgegangen werden kann.



	Anteil Note 1	Anteil Note 2	Anteil Note 3	Anteil Note 4	Anteil Note 5
Bauteilnote 1	100	0	0	0	0
Bauteilnote 2	70	30	0	0	0
Bauteilnote 3	50	30	20	0	0
Bauteilnote 4	30	30	30	10	0
Bauteilnote 5	20	30	30	15	5

Abbildung 16: Ansatz für Zustandsverteilung Bauteilnoten über Tunnellänge

3.2.3.2 Instandhaltung E&M

Bei den meisten ausrüstungstechnischen Elementen ist eine Instandsetzung im Sinne einer Reparatur in der Regel nicht möglich. Instandsetzungen fallen am ehesten bei mechanischen Teilen an, z.B. die Revision von Axialventilatoren, das Gängigmachen und Schmieren beweglicher Teile, die Einstellungen von Klappen oder Türöffnungshilfen, das Erneuern

von Dichtungen. Diese eher als „Instandhaltung“ zu bezeichnenden Maßnahmen vermögen bei derartigen Elementen eine Erneuerung allenfalls hinauszuzögern.

Es gibt grundsätzlich viele Einflussgrößen, welche die Art und Intensität der Instandhaltungsmaßnahmen bei E&M beeinflussen. Für die E&M haben Anlageart und Ausfallrisiko, Restnutzungsdauer und Zustand, Umgebungsbedingungen und betriebliche Faktoren sowie tunnelspezifische Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die Maßnahmen. Im Folgenden werden diese Einflussgrößen im Hinblick auf ihre Relevanz für die Instandhaltungsmaßnahmen von E&M analysiert.

Anlagenart

Die sinnvoll anzuwendenden Instandhaltungstätigkeiten unterscheiden sich innerhalb der E&M stark. Für gewisse Komponenten gibt es kaum sinnvolle Instandhaltungstätigkeiten, für andere ist es erforderlich, diese anhand eines detaillierten Plans vorzugeben. Gewisse Komponenten müssen online überwacht werden, für andere ist dies nicht sinnvoll. Die Instandhaltungstätigkeiten müssen folglich aufgrund der Anlageart jeweils individuell gewählt werden. Dabei ist auch dem anlagenspezifischen Ausfallrisiko Rechnung zu tragen. Die Anlageart hat einen Einfluss auf die Instandhaltung und sollte zusammen mit dem Ausfallrisiko in der Instandhaltungsstrategie berücksichtigt werden.

Restnutzungsdauer und Zustand

Die Nutzungsdauern der E&M unterscheiden sich stark. Während gewisse Komponenten lediglich eine Nutzungsdauer von 5 Jahren aufweisen, beträgt diese für andere Komponenten über 30 Jahre. Für gewisse Komponenten gilt, dass durch Wartung die Nutzungsdauer verlängert und die Ausfallhäufigkeit reduziert werden kann. Dies gilt besonders für Aggregate mit einem hohen Mechanikanteil (z.B. Ventilatoren, Pumpen). Die Restnutzungsdauer bestimmt den Instandhaltungsaufwand solcher Anlagen maßgeblich. Anlagen, welche ihre Nutzungsdauer erreicht oder überschritten haben, produzieren häufiger Störungen und benötigen erhöhte Instandhaltungszyklen. Sowohl in der Instandhaltung wie auch in der Instandsetzung bedeutet dies für den Betreiber mehr Aufwand. Oft wird aber auch bei neuen Anlagen eine erhöhte Ausfall- oder Störungsrate beobachtet.

In der Theorie der Zuverlässigkeitsanalysen beschreibt die Ausfallrate vieler Komponenten die sogenannte Badewannenkurve (vgl. Abbildung 15), mit zunächst vielen Frühausfällen,

einer Phase mit konstanter und niedriger Ausfallrate, und einer Erhöhung der Ausfallrate gegen Ende der Nutzungsdauer:

Gegen Ende des Lebenszyklus einer Anlage wird ihre Ausfallrate irgendwann derart hoch, dass nur noch eine Erneuerung in Frage kommt. Die Restnutzungsdauer bzw. der Zustand haben folglich einen Einfluss auf die Instandhaltung. Anhand von Restnutzungsdauern oder Anlagenzustände lassen sich aber keine übergeordneten oder pauschalen Instandhaltungsstrategien ableiten: diese sind immer vom jeweiligen Betreiber im Rahmen einer objektspezifischen Instandhaltungsplanung zu definieren. Eine allgemeingültige Regel lässt sich aufgrund der Heterogenität der E&M nicht anwenden.

Umgebungsbedingungen und betriebliche Faktoren

Die Umgebungsbedingungen, welchen die E&M ausgesetzt sind, variieren ja nach Aufstellungsort. Komponenten, die sich in der Mitte eines langen Tunnels befinden, erfahren viel konstantere Umgebungsbedingungen als Komponenten in Portalnähe. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Spritzwasser, Staub, Salz und mechanische Belastungen (z.B. Druckstöße, Vibrationen) sind Faktoren, welche je nach Intensität die Nutzungsdauer von E&M stark beinträchtigen können. Betriebliche Faktoren beeinflussen die Nutzungsdauer von E&M ebenfalls. Beispielsweise führen viele Ein- und Ausschaltzyklen einer Komponente in der Regel zu einer Verminderung der Nutzungsdauer gegenüber einer identischen Komponente, welche weniger belastet wird. Für gewisse Komponenten ist jedoch gerade der Stillstand kritisch. So weisen Ventilatoren in vielen Tunneln weniger Betriebsstunden pro Jahr auf, als vom Hersteller als optimal angegeben. Die Umgebungsbedingungen und die betrieblichen Faktoren haben einen Einfluss auf die Instandhaltung, die Zusammenhänge sind jedoch komplex und es lässt sich daraus keine übergeordnete Strategie für alle E&M ableiten.

Tunnelspezifische Faktoren

Tunnel unterscheiden sich in ihrer Bedeutung für die Mobilität. Während gewisse Tunnel ohne viel Zeitaufwand und Zusatzrisiken umfahren werden können, ist dies für andere Tunnel nicht möglich. Die Auswirkung bzw. der volkswirtschaftliche Schaden durch eine Tunnelsperrung ist von Objekt zu Objekt sehr unterschiedlich. Tunnel differenzieren auch in Bezug auf ihr Personenrisiko, das typischerweise in «Tote pro Jahr» ausgedrückt wird. Grundsätzlich wäre es möglich, das Personenrisiko eines jeden Tunnels als Einflussgröße für die Instandhaltung zu verwenden.

Die Tabelle in Anhang A führt beispielhaft typische Instandsetzungsmaßnahmen auf, welche nach Bedarf im Rahmen von bautechnischen und ausrüstungstechnischen Instandsetzungen häufig gesetzt werden. Gerade bei bautechnischen Elementen ist Art und Umfang der Instandsetzungsmaßnahme jedoch stets spezifisch in Abhängigkeit von der Schadensart und vom Schadensumfang zu treffen.

3.2.3.3 Erneuerung

Bei der Erneuerung werden Elemente durch gleichartige Elemente mit derselben Funktion ersetzt. Technologiebedingt werden bei der elektromaschinellen Ausstattung Gewerke in der Regel vollständig über eine ganze Tunnelröhre ausgetauscht, da hier ein Mischen alter mit neuer Technik problematisch sein kann.

Auch bei den baulichen Komponenten ist bei einigen Bauteilen eine Erneuerung über die gesamte Tunnellänge sinnvoll, wie z.B. die Erneuerung der Fahrbahndecke. Bei anderen Bauteilen ist jedoch eine beschränkte Teilerneuerung zweckmäßig und möglich (z.B. bei der Innenschale, der Zwischendecke, der Abdichtung und Entwässerung). Der Zustand der Bauteile streut in der Regel signifikant über die Tunnellänge, sodass sich nur bereichsweise ein Handlungsbedarf ergibt und ein Komplettaustausch über die gesamte Tunnelröhre unwirtschaftlich und unverhältnismäßig wäre. Die Funktionalität dieser Bauteile ist auch kaum beeinträchtigt von der resultierenden Mischung alter Bauteilabschnitte mit neuen Bauteilabschnitten.

Den Umfang des Austauschs dieser Bauteile bestimmt der spezifische Zustand und dessen Verteilung entlang der Röhre. Die sehr inhomogene Verteilung sowohl innerhalb einer Tunnelröhre als auch über das Kollektiv vergleichbarer Tunnelanlagen macht die Definition allgemein gültiger Ersatzraten für die Entwicklung von Erneuerungsstrategien schwierig. So finden sich unter den in den vergangenen Jahren abgeschlossenen Generalerneuerungen von Tunnelanlagen im ASFiNAG-Netz Beispiele, wo die Innenschale überwiegend oder komplett erneuert wurde (z.B. Ofenauertunnel, Hieflertunnel, Wolfsbergtunnel, Massenbergtunnel) und solche, wo keine oder kaum Erneuerung an der Innenschale durchgeführt wurde (z.B. Tauerntunnel, Katschbergtunnel, Gleinalmtunnel).

Neben der Heterogenität des tatsächlichen Alterungsverhaltens ist dies auch den ebenfalls streuenden jeweiligen objektspezifischen Randbedingungen geschuldet (Strategie Instandsetzung vs. Erneuerung, Verkehrsführung, hydrogeologische und geomechanische Verhältnisse, Ausführungsqualität des Bestands u.dgl.). Die in Anhang A enthaltenen Werte für die Nutzungsdauern der baulichen Anlagekomponenten sind insofern nur als grobe/globale

Richtwerte zu verstehen – v.a. im Vergleich mit den Zahlen zu den elektromaschinellen Gewerken.

Für die in weiterer Folge zu entwickelnden Szenarien der optimierten Lebenszyklen wird diese Unsicherheit der Ersatzraten durch den technischen Handlungsspielraum entschärft, welcher bei baulichen Komponenten über längere Zeit hinhaltende Instandsetzungsmaßnahmen als bei elektromaschinellen Komponenten erlaubt (vgl. auch Kap. 3.2.3.1)

3.2.4 Identifikation kritischer Komponenten

Maßnahmen an Komponenten der Betriebs- und Sicherheitstechnischen Ausstattung beeinträchtigen die Anlagenverfügbarkeit in verschiedenem Maße, wodurch der Handlungsspielraum, Maßnahmen unter Verkehr zu treffen, stark eingegrenzt wird. Ein Eingriff in ein E&M-Element kann daher zu einem kurzfristigen oder längerfristigen Ausfall der Anlage oder einer Richtungsröhre führen, je nachdem wie sicherheitskritisch oder betriebskritisch die Komponente ist und wie aufwändig die jeweilige Inbetriebnahme nach der Maßnahme ist.

Das Arbeitspapier Nr. 32 zu RVS 09.04.11 [24] stellt in einer Matrix dar, welche Ausfallszenarien einzelner Komponenten als sicherheitskritisch, betriebskritisch oder betriebsrelevant zu qualifizieren sind und definiert die minimalen Betriebsbedingungen, um die Anlage weiter betreiben zu können. Die betreffenden Komponenten, deren Ausfall gem. [24] potenziell sicherheitskritisch einzustufen ist, sind in Tabelle 10 rot markiert, jene Komponenten, deren Ausfall als potenziell betriebskritisch einzustufen ist, sind gelb markiert.

Die Maßnahmen dieser Komponenten müssen nicht notwendigerweise in einer unmittelbaren physischen Wechselwirkung mit anderen Komponenten stehen. Da die Gesamtanlagenverfügbarkeit betroffen ist, betreffen sie jedoch sicherheitstechnisch auf Systemebene pauschal alle anderen Komponenten. Diese systemweite Wechselwirkung ist analog den direkten Wechselwirkungen zwischen Einzelkomponenten bei der späteren Maßnahmendefinition von Instandsetzungs- und Erneuerungsszenarien zu berücksichtigen.

3.3 Wechselwirkungsmatrix

3.3.1 Grundsätze

Bei der Erneuerung oder Instandsetzung einzelner Komponenten sind oft Manipulationen an anderen Komponenten erforderlich, obwohl an diesen betroffenen Teilen eigentlich keine Maßnahmen erforderlich wären. Zahlreiche Komponenten stehen also im Instandsetzungsfall in Wechselwirkung, da sie beispielsweise funktional miteinander verschränkt sind

oder weil der physische Zugang zu der zu erneuernden Komponente durch eine andere Komponente eingeschränkt ist.

Die paarweise Wechselwirkung zwischen zwei Komponenten kann anhand einer quadratischen Matrix sichtbar gemacht werden. In den Zeilen sind die Funktionsgruppen, Gewerke und Komponenten in der Strukturierung gem. Tabelle 10 in Kap. 3.1.2.2 als „auslösende" instandgesetzte oder erneuerte Komponenten aufgetragen. In den Spalten sind in derselben Strukturierung alle Funktionsgruppen, Gewerke und Komponenten als potenziell betroffene Elemente aufgetragen. Die Matrix wird dabei mit der Information der Auswirkung auf das betroffene Element befüllt.

In Anhang B ist eine Matrix für Fall der Instandsetzung von Komponenten und in Anhang C für den Fall der Erneuerung von Komponenten enthalten. Die im Instandsetzungs- bzw. Erneuerungsfall unterstellten Maßnahmen entsprechen jenen aus Kap. 3.2.3.

Die Wechselwirkung wird dabei mit folgenden Attributen qualifiziert:

- Schwere des Eingriffs in betroffene Komponente:
    - wesentlich: z.B. Austausch einer auslösenden Komponente bedingt den Austausch der betroffenen Komponente
    - gering: z.B. Austausch einer auslösenden Komponente bedingt die De- und Wiedermontage der betroffenen Komponente.
- Umfang des Eingriffs in betroffene Komponente:
    - longitudinal: z.B. Eingriff an betroffener Komponente ist über die gesamte entsprechende Tunnellänge wie beim Eingriff der auslösenden Komponente erforderlich
    - punktuell: z.B. Eingriff an betroffener Komponente ist nur punktuell erforderlich.
    - systemisch: z.B. Eingriff an auslösender Komponente bedingt einen systemweiten Eingriff in andere Komponente (z.B. Tunnelsteuerung)

Es ist festzuhalten, dass im Rahmen einer Gesamtmaßnahme sowohl Komponenten ausgetauscht als auch andere Komponenten instandgesetzt werden können. Eine Matrix stellt also kein Gesamtszenario dar, sondern lediglich die paarweise Auswirkung zwischen einzelnen Komponenten.

Die Arten der Wechselwirkung lassen sich an folgenden Beispielen illustrieren:

1. Die Erneuerung der Leuchtkörper Einfahrtsbeleuchtung bedingt in der Regel auch eine Erneuerung der Verkabelung über die entsprechende Länge, einen punktuellen Eingriff in die Niederspannungsverteilung und Steuerungskomponenten.
2. Eine Erneuerung der Strahlventilatoren bedingt auf Systemebene einen Eingriff auf die Steuerung, einen punktuellen Eingriff in die Regelung, Steuerung und LG-Messung, die Niederspannungsverteilung, bei Querschlagslüftern ggf. in die Schleusenwände.
3. Die Erneuerung der Löschwasserleitung bedingt eine Erneuerung des erhöhten Seitenstreifens, den selbstleuchtenden Leiteinrichtungen über die entsprechende Länge, einen geringeren Eingriff in den Kabelkanal, in die Hydranten der Feuerlöschnischen, die Absperrschieber, sowie einen punktuellen Eingriff in den Löschwasserbehälter und die Tunnelsteuerung.
4. Die Erneuerung der Fahrbahn bedingt eine Erneuerung der Bordsteine, der erhöhten Seitenstreifen, der Schlitzrinne oder Einlaufschächte und der Frostkofferentwässerung.

Für ein Szenario, welches die Erneuerung einer Komponente beinhaltet, sind somit entsprechende Aufwendungen an den betroffenen Komponenten mit zu berücksichtigen.

3.3.2 Wechselwirkungen

Die Wechselwirkungsmatrizen erlauben eine Auswertung hinsichtlich jener Komponenten, welche sehr häufige Wechselwirkung (als auslösendes oder betroffenes Element) aufweist. Aufgrund ihrer hohen Repräsentanz spielen diese Komponenten eine häufige, wiederkehrende und somit eine entsprechend zentrale Rolle bei der Auswahl von Maßnahmenkombinationen. Die Top 15 Elemente mit den meisten Wechselwirkungen sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

An erster Stelle steht hier erwartungsgemäß das Gewölbe, welches u.a. als Montageträger für die gesamte Ausrüstung entlang der Tunnelröhre dient, gefolgt von der Tunnelsteuerung. Es folgen danach sowohl ausrüstungstechnische als auch bautechnische Elemente.

Tabelle 15: Erneuerung – Zentralität Top 15

Gewerk / Komponente	Anzahl Wechselwirkungen
Gewölbe bewehrte Blöcke	76
Gewölbe unbewehrte Blöcke	76
Steuerung - Automatisierung	69
Abdichtung	68
Prozessvisualisierung	66
Sohlgewölbe/Sohlplatte	60
Betriebsgebäude	57
Betriebsstationen	57
Energie: NSP-Verteilungen in Elektronischen	49
Steuerung: Archivierung / Datenauswertung	49
Energie: NSP-Verteilungen in Betriebsgebäuden	48
Energie: Erdung, Potentialausgleich – Leitungsinstallationen im Tunnel	45
Brandschutzverkleidungen (Platten oder Mörtel)	45
Kabelkanäle	44
Nischenkörper	39

Ein anderes Bild zeigt die Tabelle 16 mit einer Auswertung nach den auslösenden Komponenten („Treiber"-Komponenten), deren Austausch/Erneuerung Auswirkungen auf andere Komponenten hat. Hier stehen an den ersten 13 Stellen ausschließlich bautechnische Elemente, während sich eine elektromaschinelle Komponente erst an 14. Stelle findet.

Umgekehrt finden sich bei der Auswertung nach den häufigsten betroffenen Komponenten („Opfer"-Komponenten) an den ersten Stellen ausschließlich elektromaschinelle Komponenten und erst an 9. Stelle die erste bautechnische Komponente (vgl. Tabelle 17). Eine Auswertung für die Wechselwirkung bei Instandsetzungsmaßnahmen statt Erneuerungsmaßnahmen zeigt ein ähnliches Bild.

Hinter den hier einfach aufsummierten Wechselwirkungsbeziehungen können recht unterschiedliche monetäre oder bauzeitliche Tragweiten stehen. Sie sind daher nur bedingt vergleichbar. Die Auswertungen in „Treiber"- und „Opfer"-Komponenten macht aber deutlich, dass Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen an elektromaschinellen Komponenten insgesamt weniger Einfluss auf bauliche Komponenten nehmen und umgekehrt bauliche Erneuerung große Auswirkungen auf elektromaschinelle Komponenten haben.

Tabelle 16: Erneuerung – Treiber-Komponenten Top 15

Gewerk / Komponente	Anzahl Wechsel-wirkungen
Abdichtung	62
Gewölbe bewehrte Blöcke	61
Gewölbe unbewehrte Blöcke	61
Sohlgewölbe/Sohlplatte	60
Betriebsgebäude	42
Betriebsstationen	42
Brandschutzverkleidungen (Platten oder Mörtel)	35
Kabelkanäle	29
Zwischendecke inkl. Auflager	29
Trennwand	29
Ulmendrainagen	26
Beschichtung bzw. Anstrich	25
Nischenkörper	24
Axialventilator - Elektromotor	20
Hängestangen	20

Tabelle 17: Erneuerung – Opfer-Komponenten Top 15

Gewerk / Komponente	Anzahl Wechsel-wirkungen
Automatisierung	66
Prozessvisualisierung	66
Archivierung / Datenauswertung	49
Energie: NSP-Verteilungen in Betriebskomponenten	41
Energie: NSP-Verteilungen in Elektronischen	41
Energie: Erdung, Potentialausgleich – Leitungsinstallationen im Tunnel	41
Energie Erdung, Potentialausgleich – Leitungsinstallationen in BG	22
Lüftung/Messeinrichtungen - LG-Messung	19
erhöhter Seitenstreifen	17
Beleuchtung - FOL	15
Gewölbe bewehrte Blöcke	15
Gewölbe unbewehrte Blöcke	15
Kabelkanäle	15
Nischenkörper	15
Nischenabdeckungen	15

Die Wechselwirkungsmatrizen erlauben es, für die Untersuchung von Lebenszyklusstrategien realistische Maßnahmenkombinationen zu wählen. Über die wechselseitige Verknüpfung der Gewerke kann vermieden werden, dass in den Strategieszenarien Maßnahmen an beeinflussten Gewerken übersehen oder unterschätzt werden.

Gemeinsam mit der Untersuchung möglicher Kombinationen und Szenarien kann in weiterer Folge auch versucht werden, jene Gewerke zu identifizieren, bei welchen eine Anpassung der Technologie hohe Wirksamkeit hätte, z.B. durch signifikante Verlängerung oder Verkürzung der bisher postulierten Lebensdauern oder durch zukünftige technische Entkoppelung von anderen Komponenten, mit denen sie heute noch in starker Wechselwirkung stehen.

3.3.3 Weitere bauzeitliche Aus- und Wechselwirkungen

Bei den Kosten und der erforderlichen Bauzeit der Maßnahmen der Erneuerung oder Instandsetzung ist das Umsetzungskonzept von wesentlicher Bedeutung. Kann die betreffende Tunnelröhre für die Zeit der Umsetzung außer Verkehr genommen werden (Gegenverkehr in der anderen Röhre oder Umleitungsstrecke verfügbar), dann stellt dies baubetrieblich gänzlich andere Voraussetzungen dar als in einem Fall, wo nur nächtliche Sperren möglich sind oder die betreffende Röhre überhaupt ständig unter Verkehr steht (z.B. ein Fahrstreifen).

Die Lebenszyklen und Nutzungsdauern der Gewerke sind davon unbeeinflusst, sehr wohl aber die Kosten und Dauer der Instandsetzung oder Erneuerung. Einerseits sinkt bei Bauen unter Verkehr die Produktivität und erhöhen sich die Lohnkosten bei Arbeiten in der Nacht, andererseits ist der sichere Betrieb durchgehend zu gewährleisten. Zur Aufrechterhaltung der minimalen Betriebsbedingungen für die jeweilige Verkehrsführung (vgl. Kap. 3.2.4) sind z.B. Parallelaufbauten neuer Komponenten während des Betriebes der alten erforderlich, was u.a. zusätzlichen Raumbedarf in E-Nischen und Betriebsgebäuden erfordert.

Bei der kostenmäßigen Betrachtung von Instandsetzungsszenarien ist dies in weiterer Folge z.B. durch Erhöhungsfaktoren der jeweiligen Gewerkekosten zu berücksichtigen.

4 RISIKOBASIERTE ENTSCHEIDUNGSMODELLE – DELIVERABLE 3.1

Im Erhaltungsmanagement werden in jüngster Zeit verstärkt Risikomodelle herangezogen, um die Auswirkungen unterschiedlicher Erhaltungsstrategien und Maßnahmenabfolgen berechnen und die betriebs-/volkswirtschaftlich vorteilhafteste Variante ermitteln zu können.
Unter Risiko versteht man die Kombination aus der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ereignis auftritt und dem Ausmaß der damit verbundenen (ungewollten) Konsequenz. Die Eintrittswahrscheinlichkeit bezeichnet dabei den statistischen Erwartungswert oder die geschätzte Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines bestimmten (ungeplanten) Ereignisses in einem bestimmten Zeitraum.

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. Im gegenständlichen Kontext wird unter „Probability of Failure“ bzw. „Versagenswahrscheinlichkeit“ die partielle Beeinträchtigung oder der vollständige Ausfall der vorgesehen Funktion einer Komponente, einer Anlage oder eines Systems verstanden.

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 auch sogenannte Risikomatrizen verwendet, um technische Systeme und deren Risiken untersuchen und bewerten zu können.
Risikomatrizen können 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.

Der Deliverable D3.1 (vgl. [36]) liefert die theoretischen Grundlagen für ein risikobasiertes Entscheidungsmodell für Tunnelbauwerke unter Berücksichtigung sowohl der baulichen Anlageteile als auch der elektromaschinellen Ausrüstung (E&M). Auf Basis von Degradationskurven und Ausfallskonsequenzen werden Risikomatrizen für die verschiedenen Tunnelkollektive (Galerien, offene, geschlossene Bauweisen) definiert, um festzustellen, welche Risiken im akzeptablen und welche im inakzeptablen Bereich liegen.

4.1 Risikobasierte Inspektionen im Rahmen der Instandsetzung

Mit Beginn der industriellen Revolution und der zunehmenden Mechanisierung der Wirtschaft Mitte des 18.Jahrhunderts entwickelten sich verschiedene Strategien der Instandsetzung. Anfänglich dominierte der Grundsatz des „Fail & Fix“, d.h. Instandsetzungsmaßnahmen wurden erst dann durchgeführt, wenn an der Maschine bereits eine Störung aufgetreten ist oder diese komplett versagte. Ein Ausfall der Anlage wird bei dieser Instandsetzungsstrategie somit bewusst in Kauf genommen – es finden keine vorbeugenden Instandsetzungsmaßnahmen statt, sondern der Fokus liegt primär auf der reaktiven Schadensbeseitigung. Diese Art der Instandsetzungsplanung wird auch als reaktive Instandhaltungsstrategie (*engl. breakdown maintenance*) bezeichnet.

Im Gegensatz dazu dient die vorbeugende Instandsetzungsstrategie (*engl. preventive maintenance*) der Vermeidung bzw. Minimierung von Ausfällen durch die Umsetzung von präventiven (in festgelegten Abständen oder nach vorgeschriebenen Kriterien) Instandsetzungsmaßnahmen. Nicht die reaktive Behebung von Störungen und Ausfällen, sondern deren Vorbeugung liegt im Zentrum des Asset Managements. Bei kalenderbasierten Routineinstandsetzungen (*engl. time-based maintenance*) werden Instandsetzungsmaßnahmen in periodischen Zeitabständen durchgeführt.

Bei der zustandsorientierten Instandsetzung (*engl. Risk Based Inspection, RBI*) wird in regelmäßigen Abständen (durch Inspektion) oder dauerhaft (Condition-Monitoring) der Zustand einer Anlage überprüft und Instandsetzungsmaßnahmen nur bei Bedarf durchgeführt. In den 1990er Jahren wurde die RBI als Methodik federführend von der US Ölindustrie entwickelt und hat sich seither in der Petrochemie weltweit durchgesetzt [27]. Derartige Anlagen werden aus ökonomischen Gesichtspunkten über Jahre hinweg ununterbrochen betrieben, haben aber im Falle eines Versagens zumeist ein großes Schadenspotential.

Übergeordnetes Ziel der Risk Based Inspection ist es, eine hohe Sicherheit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Anlage sicherzustellen. Gleichzeitig müssen jedoch auch gesetzliche Vorgaben berücksichtigt werden. Weiters sollen Instandsetzung und Inspektion nicht den Betrieb stören, geplante Stillstände möglichst kurzgehalten werden und die Kosten gering sein. Um all dies zu erfüllen, muss das Risiko durch Verlust der Integrität der Bauteile bewertet werden. Es wird vorab möglichst genau bestimmt, welche Schädigungs- und Fehlermechanismen wo und wie rasch wirken. Mit der Ermittlung der Konsequenzen eines Fehlers kann sodann das Risiko bestimmt und entsprechende Maßnahmen zum Risikomanagement gesetzt werden.

Die RBI ist ein wesentliches Instrument zur Bestimmung von Art und Umfang von Instandsetzungsmaßnahmen unter Berücksichtigung des Risikomanagements (vgl. Abbildung 17).

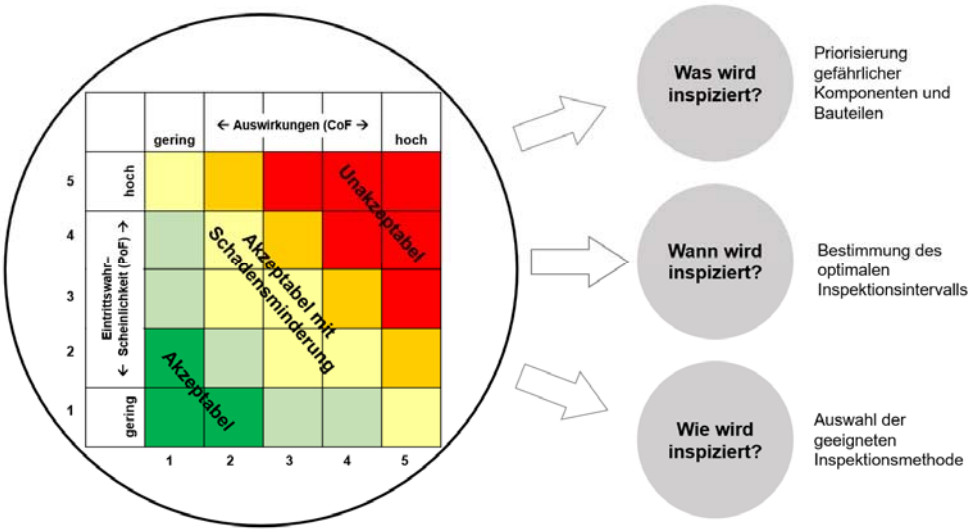


Abbildung 17: Einfluss der Risk-based Inspection (RBI) auf die Instandsetzungsplanung

RBI stellt die modernste Form der Instandsetzungs- und Inspektionsplanung dar. In der Petrochemie zielt die RBI vor allem auf einen möglichen „Loss of Containment“ ab, d.h. das Entstehen von Leckagen an statischem Equipment infolge von Schwächung des Werkstoffes durch Korrosion sowie anderer Mechanismen. Diese Risiken werden zumeist durch Inspektion und zerstörungsfreie Prüfungen (ZfP) kontrolliert.

Die Risk Based Inspection stellt eine ideale Basis zur Planung großer Anlagenstillstände (sog. Turnaround) dar. Damit kann der Umfang und die Kosten eines Stillstandes reduziert werden, indem manches Equipment ein ZfP-Ersatzprüfprogramm erhalten und/oder vor dem Stillstand untersucht werden. So verringern sich der Aufwand, die Komplexität und die Dauer des Turnarounds.

Die technischen Regelwerke API 580 „Risk-Based Inspection“ [2] und 581 „Risk-Based Inspection Methodology“ [3] beschreiben umfassend die Durchführung einer RBI, speziell für die Öl- und Gasindustrie, angepasst an amerikanische Normen. Die EN 16991 “Risk-Based Inspection Framework (RBIF)” [12] stellt hingegen die Planung und Durchführung einer RBI und die Verwendung der Ergebnisse zur Inspektions- und Instandsetzungsplanung dar. Diese Norm hat als Schwerpunkt die Qualitätssicherung eines RBI-Projektes und ist auf die ganze Prozessindustrie anwendbar (Energie, Stahl, Öl, Gas, Petrochemie, Prozessindustrie allgemein). Ausgenommen ist die Nuklearindustrie.

4.2 Datengrundlagen ASFINAG

Eine wesentliche Voraussetzung für eine systematische Erhaltungsplanung im Bereich der Tunnel ist die Verfügbarkeit von Daten und Informationen, die sowohl die baulichen Komponenten (Bauteile) eines Tunnels als auch die entsprechende E&M-Ausrüstung betreffen. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde eine systematische Sichtung der Daten der ASFINAG vorgenommen und vor dem Hintergrund der Modellentwicklung und dem Grundsatz einer möglichst praktischen Anwendung bewertet

4.2.1 Bauliche Anlagen

Auf Grundlage der RVS 13.04.22 [17] werden systematisch Daten der baulichen Anlagen von Tunnels erhoben und in der Bauwerksdatenbank (BAUT) der ASFINAG gespeichert. In der BAUT-Tunnel sind rd. 250 Tunnelbauwerke angeführt, welche sich im Autobahn- und Schnellstraßennetz (AS-Netz) befinden. Die Daten können wie folgt beschrieben werden:

- **Netzdaten**: Bauwerke in der BAUT-Datenbank sind lagemäßig über die Straßenachse sowie die Stationierung (Kilometrierung) definiert; es werden jedoch keine Angaben zur Richtungsfahrbahn oder hierarchische Ebene gemacht.
- **Inventardaten**: Nicht alle in der RVS 13.04.22 [17] angeführten Attribute sind auch befüllt. Üblicherweise liegen Angaben bez. Baujahr, Tunnellänge, Material und Bauweise vor.
- **Zustandsdaten**: Die Erfassung des Zustands erfolgt auf Basis der RVS 13.03.31 [21]. Falls Zustandsnoten in die BAUT eingetragen wurden, liegt zumindest die Gesamtnote vor. Meist stehen auch Bauteilnoten der Tunnelröhre, des Fahrbahnbelags, des erhöhten Seitenstreifens und der Abdichtung zur Verfügung. Die Bauteilnoten der übrigen Komponenten sind nur teilweise verfügbar. Aktuell liegen Zustandsnoten des Zeitraums 1991–2017 (26 Jahre) vor. 90 % der in der BAUT-DB dokumentierten Erhebungen fanden zwischen 2004–2017 (13 Jahre) statt.
- **Beanspruchungsdaten**:
    - <u>Verkehrsaufkommen</u>, verantwortlich für Spritzwasser/Sprühnebel, Vibrationen sowie dynamische Beanspruchungen aufgrund von Druckunterschieden, stehen in Form des JDTV (jährlich durchschnittliche Verkehrsstärke in KFZ/24h) und des JDTLV (jährliche durchschnittliche Lastverkehrsstärke für LKW>=3,5t HzG in LKW/24h) sowie einer jährlichen Zuwachsrate für beide

Richtungsfahrbahnen zur Verfügung. Grundlage hierfür sind die automatischen Verkehrszählstellen der ASFINAG.

- Klimadaten mit Temperatur (Minimal- und Maximaltemperatur in °C) und Frostindex (Grad Celsius Tage °Cd oder Kelvin-Stunden Kh) für Bauteile im Bereich der Portale auf der Grundlage von [34].

4.2.2 Elektromaschinelle Gewerke

Die Informationen der elektromaschinellen Anlagen werden seit mehreren Jahren in eigenen Excel-Listen abgelegt, wobei i.d.R. jede Tunnelröhre individuell verwaltet wird. Die maßgebende Richtlinie ist hierfür die RVS 13.04.23 Bauwerksdatenbank – Betriebs- und sicherheitstechnische Einrichtungen Tunnel aus dem Jahr 2014 [23]. Unter Bezugnahme auf die obige Kategorisierung stehen folgende Datengrundlagen zur Verfügung:

- **Netzdaten**: Neben den Detaildaten der einzelnen Gewerke ist in den Excel-Tabellen auch die Referenzierung zum Straßennetz sowie die Lage der Tunnel über die Betriebskilometrierung gegeben und unter dem Begriff „Stammdaten“ abgelegt. Eine Aktualisierung dieser Daten erfolgt nur rudimentär und unabhängig von der Netzverwaltung der GIS-Abteilung.
- **Inventardaten**: Die Inventardaten sind über die einzelnen Gewerke (insgesamt 42 Gewerke in 15 Gruppen) definiert (vgl. Tabelle 18).
- **Zustandsdaten**: Jedem einzelnen Gewerk werden unter Heranziehung der RVS 13.03.41 [19] die folgenden Informationen zugeordnet:
  - Technischer Anlagezustand
  - Altersindex
  - Ersatzteilverfügbarkeit
- **Beanspruchungsdaten**: Obwohl auch bei dieser Anlagengruppe die Beanspruchungsdaten in Form des Verkehrsaufkommens nicht direkt in den Excel-Tabellen gespeichert sind, liegen sie im PMS flächendeckend vor und können somit mit jedem anderen Objekt verknüpft werden. Darüber hinaus wurde jedem Tunnel eine Gefährdungsklasse zugeteilt, die u.a. Art und Umfang der Tunnelausrüstung bestimmt.

Tabelle 18: Liste der Gewerknummern

Gewerk Nr.	Bezeichnung
1	Mittelspannungsanlage
2	Niederspannungsanlage
3	SSV Anlage
4	Notstromaggregate
5	Blitzschutzanlagen
6	Erdung und Potentialausgleich
7	Mechanische Anlagenteile Axialventilatoren
8	Mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren
9	Elektromechanische Anlagenteile Axialventilatoren
10	Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilatoren
11	Regelung, Steuerung
12	Gebäudelüftung, Klimaanlage
13	Einfahrtsbeleuchtung
14	Innenstreckenbeleuchtung
15	Beleuchtung Querschläge/Fluchtwege
16	Fluchtweghinweis/-orientierungsleuchte
17	Regelung, Messwerterfassung
18	CO-Messung
19	Trübungsmessung
20	Längsgeschwindigkeitsmessung
21	Straßenverkehrszeichen
22	Verkehrszählung
23	Videoanlagen
24	Verkehrslichtsignalanlagen
25	Höhenkontrolle
26	Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen
27	Notruf
28	Telefonanlage
29	Funkanlagen
30	Beschallungsanlage
31	Brandmeldeanlage Kabel
32	Brandmeldeanlage Steuerung
33	Löscheinrichtungen
34	Löschwasserversorgung
35	Lösch- und Bindemittelvorrat
36	Automatisierung

Gewerk Nr.	Bezeichnung
37	Prozessvisualisierung
38	Archivierung / Datenauswertung
39	Gewässerschutzanlagen
40	Schachtbefahrung
41	Türen, Tore, Verkleidungen
42	Krane und Hebezeuge

4.2.3 Datenfusion

Ein wesentlicher Schritt in der Erstellung der notwendigen Datengrundlagen für ein risikobasiertes Entscheidungsmodell bestand in der Zusammenführung der unterschiedlichen ASFINAG-Datenquellen. Hierfür wurde eine SQL-Datenbank unter Verwendung der Software dTIMS konfiguriert und mit den zur Verfügung gestellten Daten befüllt. Die Verknüpfung der Daten erfolgte über das Tunnelobjekt, welches Basis für die Ablage der Daten darstellt. Ein Tunnelobjekt ist definiert als die Kombination der in den maßgebenden Grundlagen definierten Objekte (s. Kapitel 4.2.1 und Kapitel 4.2.2). Dadurch wird es möglich, die für eine Datenanalyse notwendigen Daten zu verschneiden (vgl. Abbildung 18 – Abbildung 20).

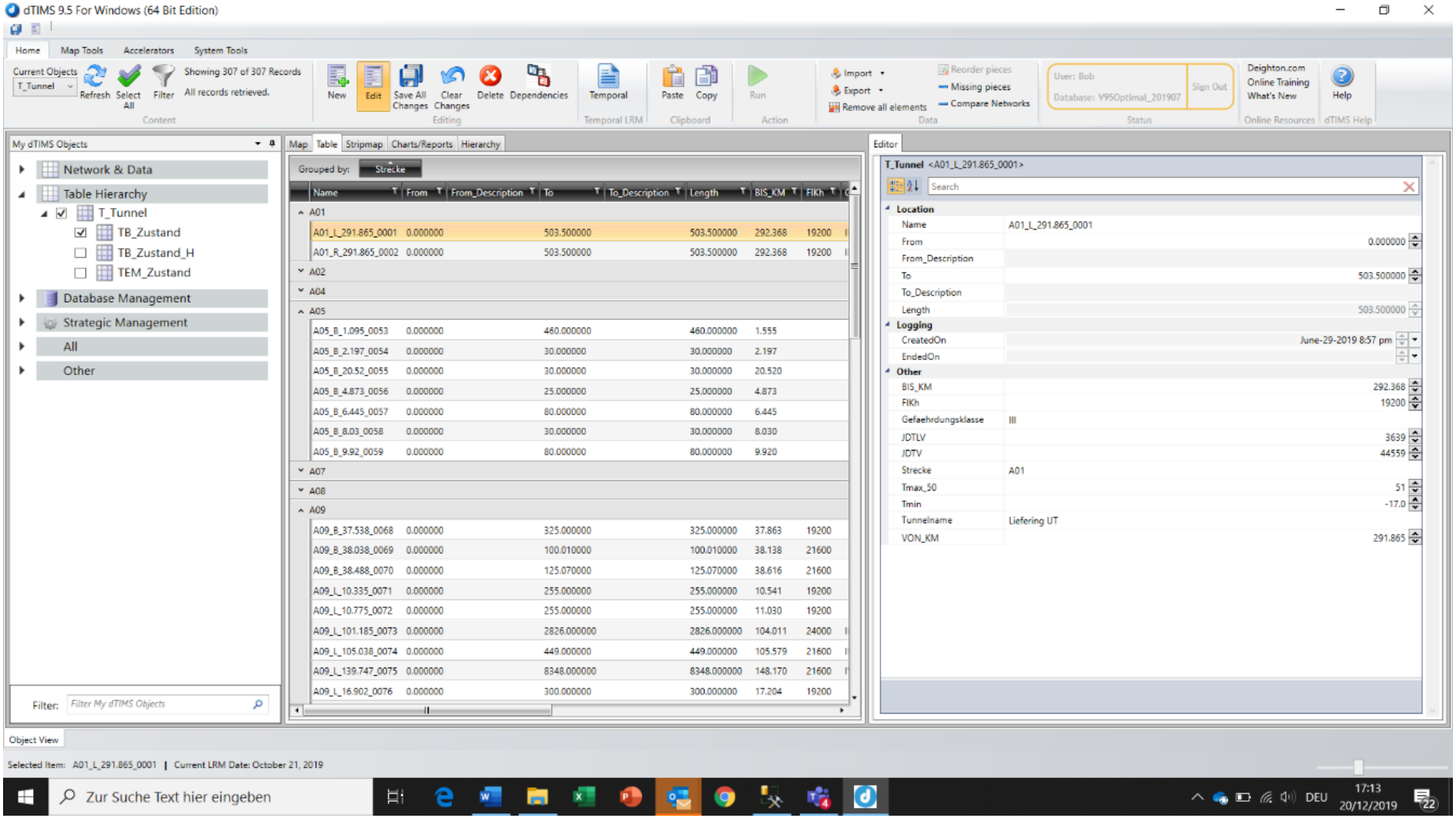


Abbildung 18: Basistabelle der OPtimAL-Tunneldatenbank

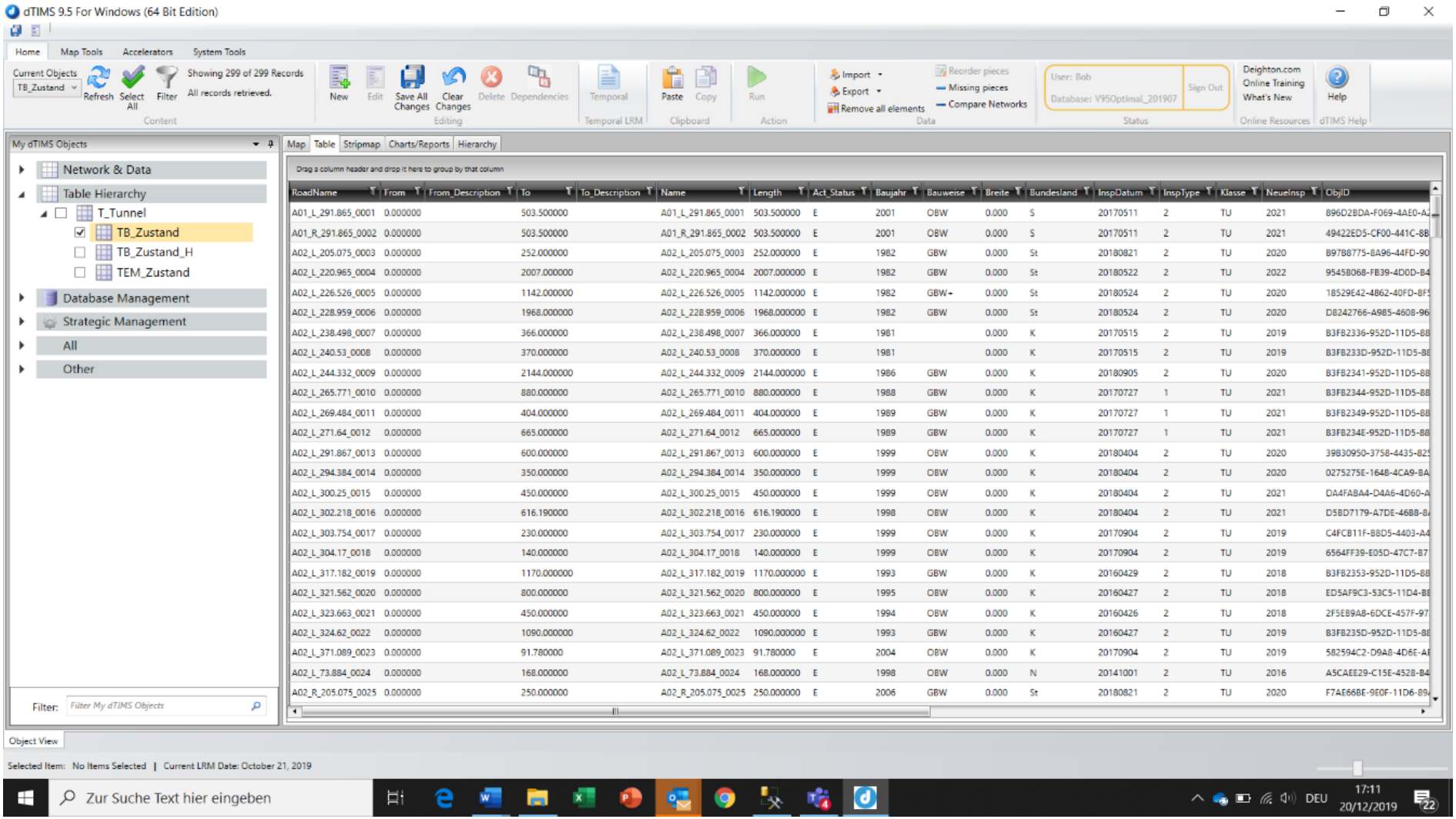


Abbildung 19: Tabelle bautechnische Tunneldaten (Übertragung aus BAUT)

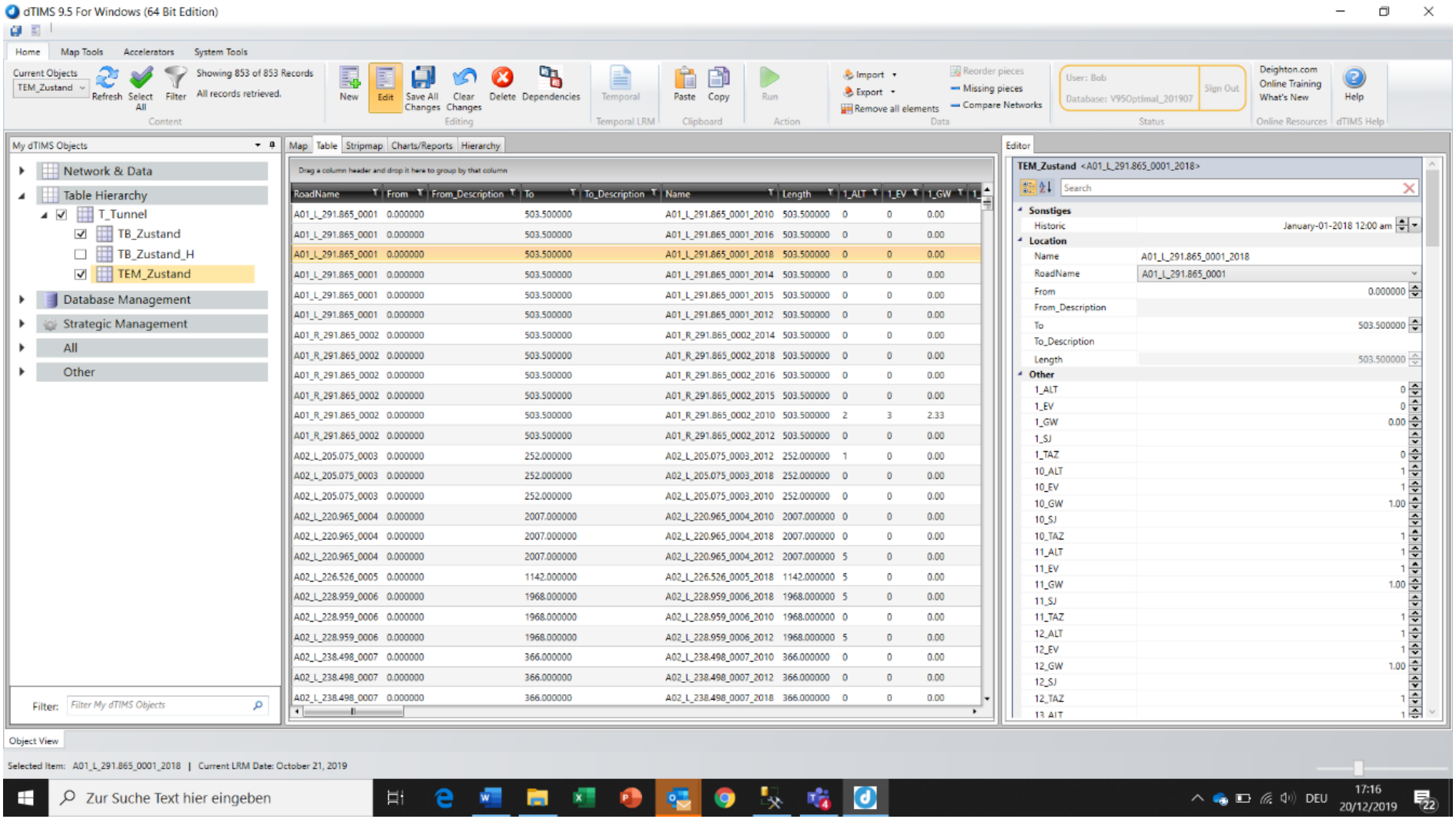


Abbildung 20: Tabelle E&M-Daten Tunnel (Übertragung aus Excel-Tabellen

4.2.4 Tunneldatenbank zur Risikomodellierung

Grundbaustein der Risikobewertung von Tunnelbauwerken sind Degradationskurven zur Abschätzung der künftigen (Substanz-)Abnutzung. Die Erstellung derartiger Kurven (für bauliche Anlagen und elektromaschinelle Gewerke) erfolgt i.d.R. anhand von materialbezogenen Verschlechterungsmodellen, erfahrungsbasierten Expertenabschätzungen oder historischen Zustandsdaten.

Der OPtimAL-Risikoansatz beruht auf der Auswertung gemessener/erhobener Zustandsdaten und Zustandsbeurteilungen im Zuge von Tunnelinspektionen. In Österreich werden Tunnelbauwerke und deren Anlagen in periodischen Abständen kontrolliert (s. RVS 13.03.31 [21] und RVS 13.03.41 [19]), um detaillierte Informationen über den Zustand eines Bauwerks (Substanzwert) zu erhalten.

Im Zuge des OPtimAL-Projekts wurden die verfügbaren BAUT-Datensätze in die Software dTIMS übertragen und um aktuelle Zustandsnoten ergänzt (s. Kapitel 4.2.3). Auch die Zustandsnoten der elektromaschinellen Gewerke gemäß RVS 13.03.41 [19] wurden von der ASFINAG in Form von Excel-Listen zur Verfügung gestellt und in dTIMS integriert.

Insgesamt standen für die Risikomodellierung 307 Objekte (Tunnelröhren) zur Verfügung, wobei nicht für sämtliche Bauwerke auch Zustandsdaten vorhanden waren. Im Folgenden werden, getrennt nach baulichen Anlagen und E&M-Gewerke, die Daten zusammengefasst, um zu generellen Aussagen über den Tunnelbestand zu gelangen.

4.2.4.1 Bestandsanalyse der baulichen Anlagen

Es standen für insgesamt 215 von 307 Tunnelröhren Zustandsdaten zur Verfügung. Diese Bauwerke wurden im Zeitraum 1965–2017 errichtet, Details zum Baujahr sind Abbildung 21 zu entnehmen. Die 215 Röhren in der OPtimAL-Tunneldatenbank weisen Längen zwischen 92–9.919m auf (vgl. Abbildung 22), wobei 90% der Bauwerke kürzer als 3.500m sind.

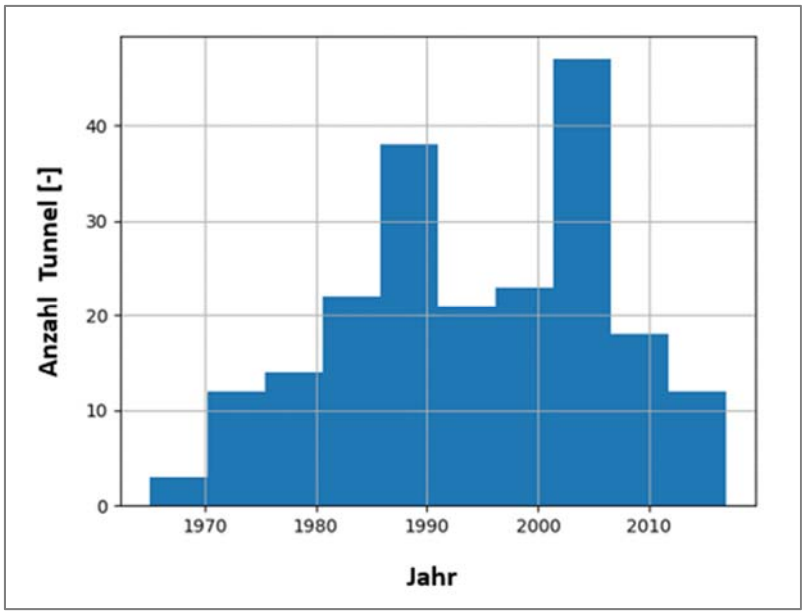


Abbildung 21: Verteilung des Baujahres der baulichen Anlagen in der OPtimAL-Tunneldatenbank

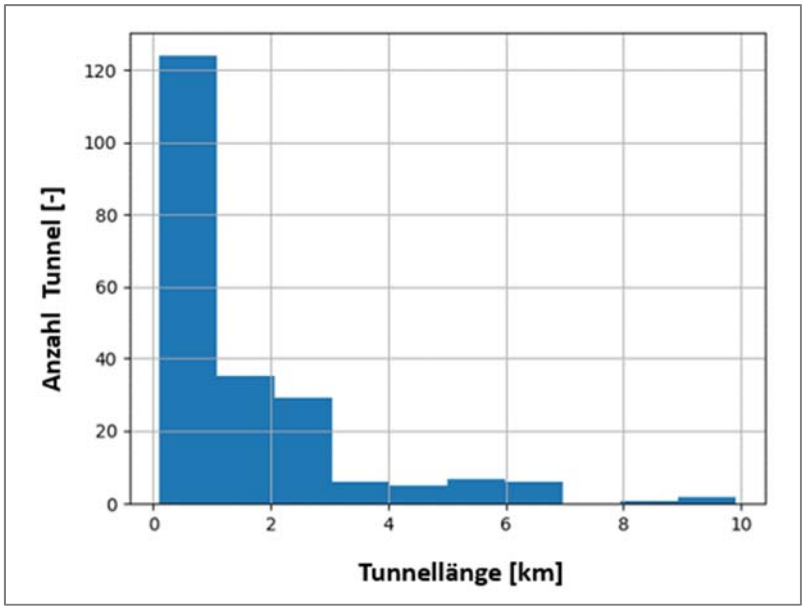


Abbildung 22: Verteilung der Tunnellängen der baulichen Anlagen in der OPtimAL-Tunneldatenbank

Von den im Ursprungsdatensatz enthaltenen Attributen (Bauweise, Baujahr, Verkehrsführung, Länge) war die Bauweise mit einem Befüllungsgrad von 93,5 % das am wenigsten befüllte. Bei den nachträglich mit dem BAUT-Datensatz verschnittenen Daten (FIKh, Tmax50, Tmin, Gefährdungsklasse, JDTV und JDTLV) war die Gefährdungsklasse mit nur 66,5 % Befüllung das am schlechtesten ausgefüllte Attribut. Bis auf die soeben genannten Eigenschaften, beträgt die Vollständigkeit des Datensatzes zumindest 95% (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Vollständigkeit der Datensätze in der OPtimAL-Tunneldatenbank (bauliche Anlagen)

	Anzahl Tunnelröhren	Befüllungs-grad [%]
Bauweise	201	93,5
Baujahr	210	97,7
Verkehrsführung	213	99,1
Klima (FIKh, Tmax50, Tmin)	207	96,3
Gefährdungsklasse	143	66,5
Verkehr (JDTV, JDTLV)	209	97,2
Länge	215	100,0

Bezüglich Tunnelbauweise scheint die geschlossene Bauweise mit 49,3% im Datensatz am häufigsten auf, gefolgt von der offenen Bauweise mit 35,3% (vgl. Tabelle 20). Vergleichsweise unterrepräsentiert sind Tunnelbauwerke in gemischter Bauweise (8,3%) und Galerien mit nur einem Bauwerk (0,5%). Bei fast allen Tunnelbauwerken existieren Blöcke in einer anderen als der Hauptbauweise (z.B. offene Bauweise im Portalbereich eines bergmännischen Tunnels). Aus diesem Grund wurden für die Auswertung der baulichen Anlagen zwei Sonderformen eingeführt, wenn pro Tunnelbauwerk mehr als zwei Blöcke in einer abweichenden Bauweise ausgeführt wurden:

- Geschlossene Bauweise mit relevanter abweichender Bauweise (GBW+)
- Offene Bauweise mit relevanter abweichender Bauweise (OBW+)

Tabelle 20: Verteilung der Bauweisen in der OPtimAL-Tunneldatenbank

	Anzahl Tunnelröhren	Anteil [%]
Offene Bauweise (OBW)	76	35,3
Geschlossene Bauweise (GBW)	106	49,3
Gemischte Bauweise (GBW+)	16	7,4
Galerien (GAL)	1	0,5
Gemischte Bauweise (OBW+)	2	0,9

Bei der Verteilung der Verkehrsführungsarten fällt auf, dass Tunnel im Richtungsverkehr mit einem Anteil von 81,4% die häufigste Art der Ausführung darstellen (vgl. Tabelle 21).

Tabelle 21: Verteilung der Verkehrsführungsarten in der OPtimAL-Tunneldatenbank

	Anzahl Tunnelröhren	Anteil [%]
Richtungsverkehr	175	81,4
Gegenverkehr	8	3,7
keine Angabe	11	5,1
kein öffentlicher Verkehr	21	9,8

Wie man Tabelle 22 entnehmen kann, ist der Befüllungsgrad der Zustandsnoten für die einzelnen baulichen Anlagen (leider) nicht konstant. Gegenwärtig sind keine Zustandsnoten für Kavernen und Fluchtwege verfügbar. Da Zwischendecken nur in relativ wenigen Tunnels verbaut sind, steht im Vergleich zu anderen Bauteilen auch nur eine sehr geringe Datenbasis zur Verfügung. Die Tunnelröhre als zentrales Bauteil eines jeglichen Tunnelbauwerks ist in knapp 95% der Fälle befüllt.

Tabelle 22: Befüllungsgrad der Bauteil- bzw. Gesamtnote im verwendeten Datensatz

	Anzahl Zustandsnoten	Befüllungsgrad [%]
Gesamtnote	963	100,0
Abdichtung und Entwässerung	856	88,9
Ausrüstung	594	61,7
Betriebsräume und Nischen	520	54,0
Erhöhter Seitenstreifen	684	71,0
Belag	836	86,8
Fluchtwege	0	0,0
Kaverne	0	0,0
Tunnelröhre	907	94,2
Zwischendecke	256	26,6

Die Zahl der Tunnelinspektionen ist über den Betrachtungszeitraum sehr ungleich verteilt und nimmt mit der Zeit rasant zu (vgl. Abbildung 23). Eingetragene Zustandsnoten existieren in der BAUT-Datenbank von 1991–2017. Jedoch entstammen nur 10 % der Einträge (Gesamtnote) aus den Jahren vor 2005. Informationen bez. der Tunnelröhre fallen zu 92% in die Jahre 2006–2017. Diesem Umstand ist geschuldet, dass für längere Zeitreihen nur eine sehr kleine Datenbasis zur Verfügung steht.

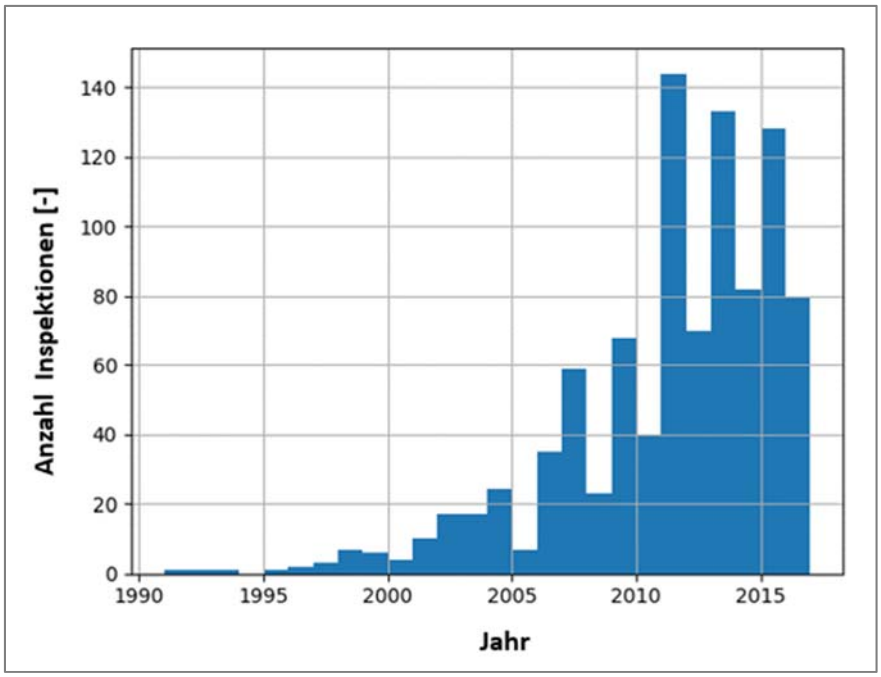


Abbildung 23: Zeitliche Verteilung aller Inspektionen, bei denen zumindest eine Gesamtnote von baulichen Anlagen zur Verfügung stand

4.2.4.2 Bestandsanalyse der elektromaschinellen Gewerke

Der OPtimAL-Datenbestand für elektromaschinellen Gewerke umfasst in Summe 239 Objekte. Bewertungen fanden zwischen 2010 und 2019 statt, wobei für die meisten der 42 Gewerke Zeitreihen von rd. 8 Jahren mit Messintervallen alle 2-4 Jahren zur Verfügung standen (vgl. Abbildung 24).

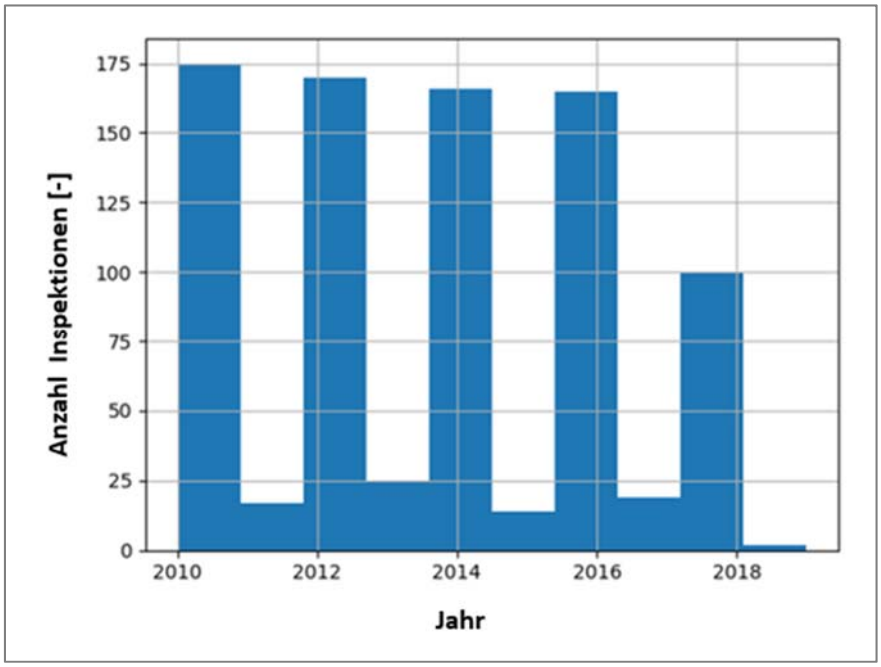


Abbildung 24: Verteilung des Inspektionsdatums von elektromaschinellen Gewerken

Die Anzahl der Bewertungen schwankt bei Betrachtung der Bewertungspunkte im Zeitbereich stark. So stehen beispielsweise für mechanische Teile von Axialventilatoren (9) nur 37 Datenpunkte zur Verfügung, während für Niederspannungsanlagen (2) insgesamt 794 Datensätze existieren. Die Anzahl der Einträge je Gewerk kann Tabelle 23 entnommen werden.

Tabelle 23: Anzahl der Zustandsnoten, die für die Gewerke zur Verfügung standen

Gewerk Nr.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Anzahl der Zustands-noten	382	794	681	70	623	706	43	345	37	335	366	573	737	748
Gewerk Nr.	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**
Anzahl der Zustands-noten	430	551	648	358	366	418	675	710	734	648	487	740	610	563
Gewerk Nr.	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**	**37**	**38**	**39**	**40**	**41**	**42**
Anzahl der Zustands-noten	569	564	525	650	639	550	270	682	682	682	376	163	697	42

4.3 Degradationskurven für Tunnelbauwerke

4.3.1 Alterungsfunktionen für bauliche Anlagen

Zur Ermittlung der technischen Degradation wurden Alterungskurven für unterschiedliche bauliche Ausführungen und Umwelteinflüsse berechnet. Für die Fahrbahn und den Fahrbahnbelag konnte auf fundiertes Vorwissen der Projektpartner aus Vorprojekten bzw. Fachliteratur zurückgegriffen werden. Für die baulichen Anlagen und elektromaschinellen Gewerke wurden Degradationskurven auf Basis historischer Zustandsnoten gefittet.

Im FFG-Projekt AMBITION (2016–2018) wurde versucht, Degradationskurven für unterschiedliche Verkehrsbelastungen, Längen und Bauweisen abzuleiten. Der Nachteil an der gewählten Analysemethode war, dass die Grenzen der Parametrisierung anhand von Ingenieurschätzungen vorgenommen wurden. Die resultierende Streuung der Degradationskurven bzw. der Prognosewerte waren dementsprechend relativ groß.

In gegenständlichen Projekt gelangen Methoden zum Einsatz, die die Streuung weitgehend reduzieren, um dadurch präzisere Prognosen zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Machine-Learning-Ansätze verwendet:

- **Random Forest**: Identifikation der wichtigsten Ausführungs- und Einwirkungsparameter und potentieller Grenzwerte

- **Markov-Kette**: Degradationsprognose für eine Bauwerksauswahl nach vordefinierten Grenzen. Es wurden verschiedene Arten von Markov-Ketten getestet, wobei zeitinhomogene Markov-Ketten die besten Resultate lieferten.

4.3.1.1 Klassifizierung mittels Random Forest

Wie bereits einleitend erwähnt (s. Kapitel 4.3.1), wurde zwecks Identifikation relevanter Parameter und Bestimmung von Grenzwerten mit anschließender Gruppenbildung der Machine-Learning-Ansatz „Random Forest“ gewählt. Der Ablauf der Clusterung kann zusammenfassend wie folgt beschrieben werden (s. Abbildung 25):

a) Identifikation potentiell wichtiger Daten und Einflussfaktoren (s. Kapitel 4.3.1.1.3)
b) Aufbereitung der Zielvariable und Bestimmung der Übergangsdauer um einen Notengrad (s. Kapitel 4.3.1.1.1)
c) Zusammenfassung aller Daten inkl. Übergangsdauer in einem neuen Datensatz für die Random-Forest-Analyse (RFA)
d) Durchführung der RFA mit Übergangsdauer als Zielvariable
e) Auswahl der geeignetsten Parameterkombination und des dazugehörigen Entscheidungsbaums (s. Kapitel 4.3.1.1.4)

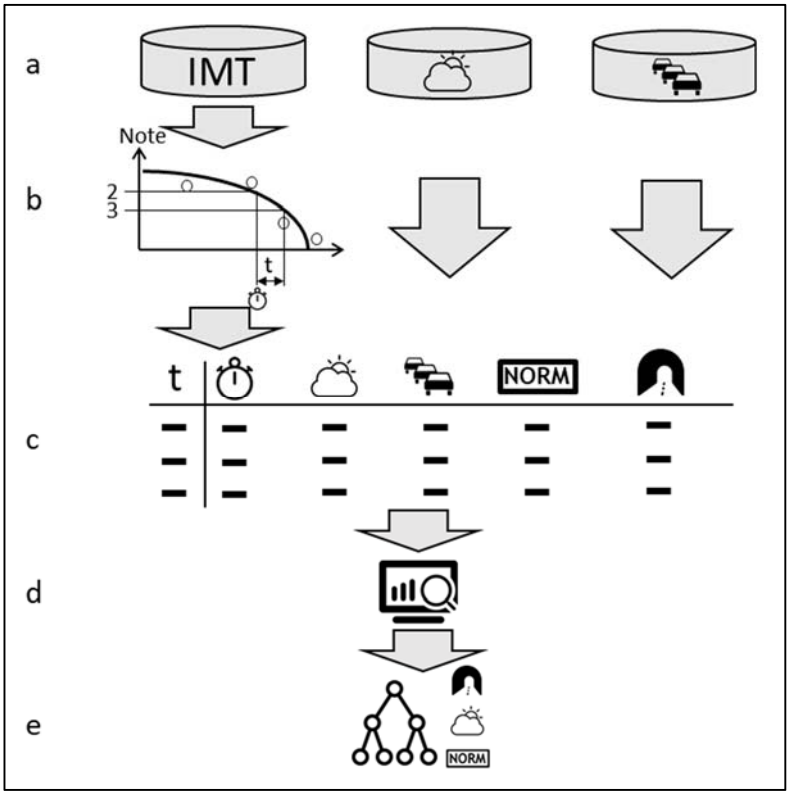


Abbildung 25: Ablauf der Random Forest Analyse zur Klassifizierung der Tunnelbauteile

4.3.1.1.1 Bestimmung der Zielvariable

Bevor eine Random-Forest-Analyse durchgeführt werden kann, muss die Zielvariable (*engl. Label*) vorab definiert werden. Auf Basis der Zustandsnoteneinteilung nach RVS 13.03.31 [21] wurde festgelegt, dass die Zielvariable die Dauer des Übergangs von einer Zustandsnote auf die nächsthöhere ist. Zur Bestimmung dieser Übergangsdauer wurden Kurvenfits nach CEN CWA 16633 [8] entlang der Datenpunkte von Einzelobjekten auf Bauteilebene erstellt, um in einem nächsten Schritt die Schnittpunkte der Kurve mit den Zustandsnoten zu ermitteln (vgl. Abbildung 26). Zusätzlich wurde das Alter des Bauwerks am Beginn des Übergangs berechnet. Der Ansatz nach CEN CWA 16633 [8] ist folgendermaßen definiert:

$$C(t) = C_I + b \cdot t^c$$

wobei:

C(t) Zustandsnote zum Zeitpunkt t

C_I Zustandsnote am Beginn der Betrachtung

b Parameter der Neigung der Verschlechterung

c Parameter der Beschleunigung (Exponent) der Verschlechterung

t Alter

Diese Herangehensweise wurde deswegen gewählt, da bei Bestimmung der Verweildauer pro Zustandsnote sehr viel weniger Übergänge zur Verfügung gestanden wären und die Datenmenge bei vielen Bauteilen ohnehin ein niedriges Niveau aufweist. Außerdem ist mit dieser Herangehensweise auch bei Sprüngen über mehrere Zustandsnoten (z.B. von 1 auf 3) durch die Interpolation mit der CEN CWA Kurve klar definiert wie lang die Übergangsdauer um jeden Notengrad ist.

Eine Analyse des Datensatzes ergab des Weiteren, dass Verbesserungen der Zustandsnote in den ersten 11 Jahren nach der Errichtung des Bauwerks nur in Ausnahmefällen vorkommen. Aus diesem Grund wird, sofern eine Zustandsnote vor diesem Zeitraum vorhanden ist (s. Kapitel 4.3.1.1.2), zum Baujahr extrapoliert (vgl. Abbildung 26, Beginn $t_{1\text{-}2}$).

Übergänge, für die keine Zustandsnoten vorliegen, werden für die Modellierung nicht verwendet (vgl. Abbildung 26, Übergang von 4→5). Findet eine Verbesserung statt, beginnt ein neuer (zweiter) Fit für die Degradation nach diesem Ereignis. Es kann daher vorkommen, dass ein Bauwerk zwei Übergangsdauern von 2→3 hat. In diesem Fall wäre allerdings das Startalter am Beginn des Übergangs und die Dauer des Übergangs unterschiedlich.

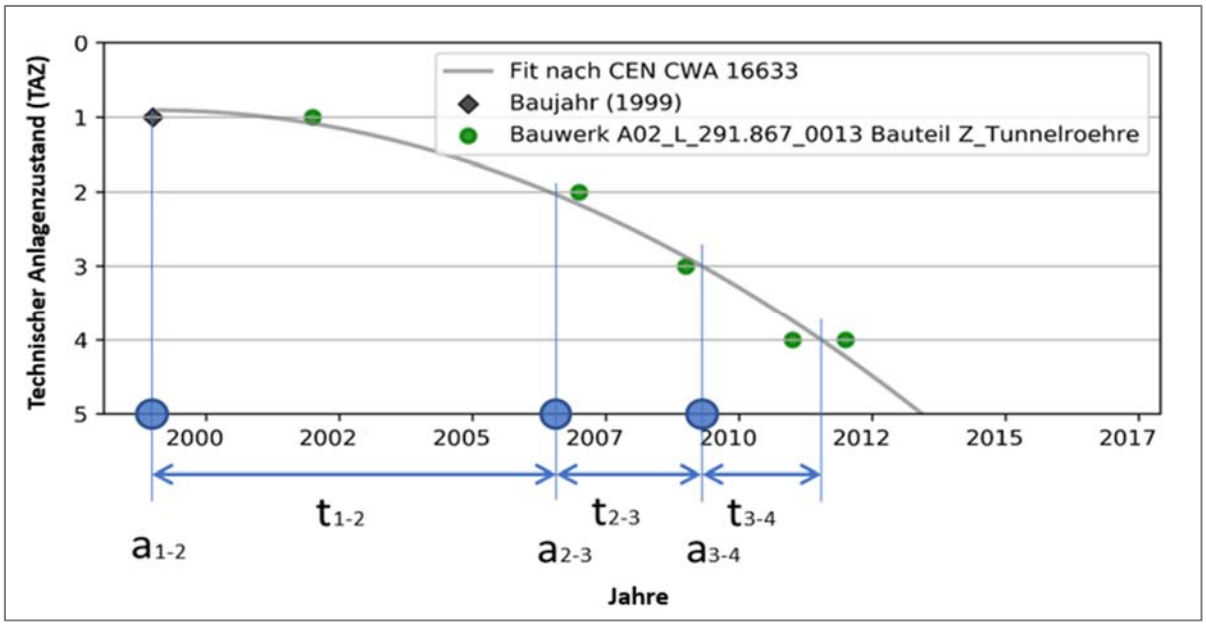


Abbildung 26: Beispiel einer CEN CWA 16633 Anpassung zur Bestimmung der Übergangsdauer (t) um einen Notengrad und des Alters am Beginn des Übergangs (a)

4.3.1.1.2 Zustandsnotenverbessernde Instandsetzungsmaßnahmen nach dem Bau

Da zwischen Baujahr und erster Benotung normalerweise mehrere Jahre vergehen, stellt sich die Frage inwiefern und mit welchem zeitlichen Abstand zur ersten Bewertung das Baujahr in der Auswertung miteinbezogen werden soll. Seitens des Auftraggebers wird davon ausgegangen, dass ein Tunnelbauwerk nach Fertigstellung jedenfalls die Zustandsnote 1 aufweist.

In Abbildung 27 sind zwei Beispiele einer Tunnelinnenschalen angeführt, bei denen kurz nach Inbetriebnahme, möglicherweise aufgrund von Kleinbaumaßnahmen (Wartung), eine Verbesserung der Zustandsnote eintrat. Betrachtet man zum Vergleich den Zeitpunkt der ersten Verbesserung im gesamten Datensatzes (vgl. Abbildung 28) ist jedoch offensichtlich, dass eine Verbesserung der Zustandsnote innerhalb der ersten Dekade sehr selten vorkommt. Das 5% Perzentil liegt bei 9 Jahren bzw. das 10% bei 11 Jahren. Häufig dürfte die Verbesserung der Zustandsnote entweder auf unterschiedliche Interpretation der RVS 13.03.31 [21] bei Kontrollen bzw. auf Kleinbaumaßnahmen zurückzuführen sein.

Es kann vielmehr davon ausgegangen werden, dass Instandsetzungsmaßnahmen nur in absoluten Ausnahmefällen vor dem 12.Jahr nach Inbetriebnahme des Tunnelbauwerks stattfinden. Aus diesem Grund wird in weiterer Folge angenommen, dass ein Bauwerk zumindest 11 Jahren vor der erstmaligen Inspektion die Zustandsnote 1 aufweist.

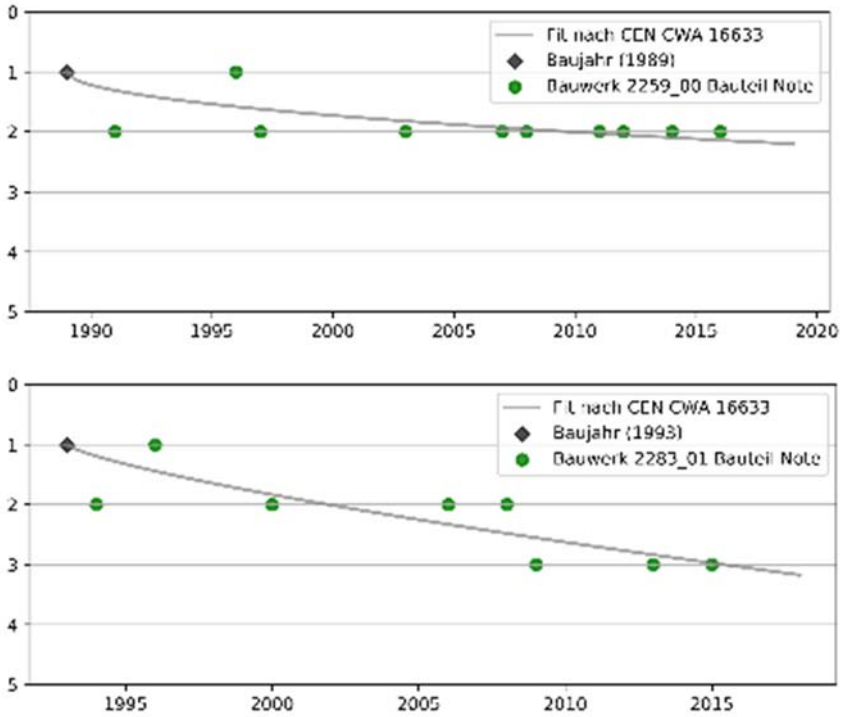


Abbildung 27: Beispiele einer frühzeitigen Zustandsnotenverbesserung der Tunnelinnenschale, möglicherwiese aufgrund von Kleinbaumaßnahmen nach Inbetriebnahme

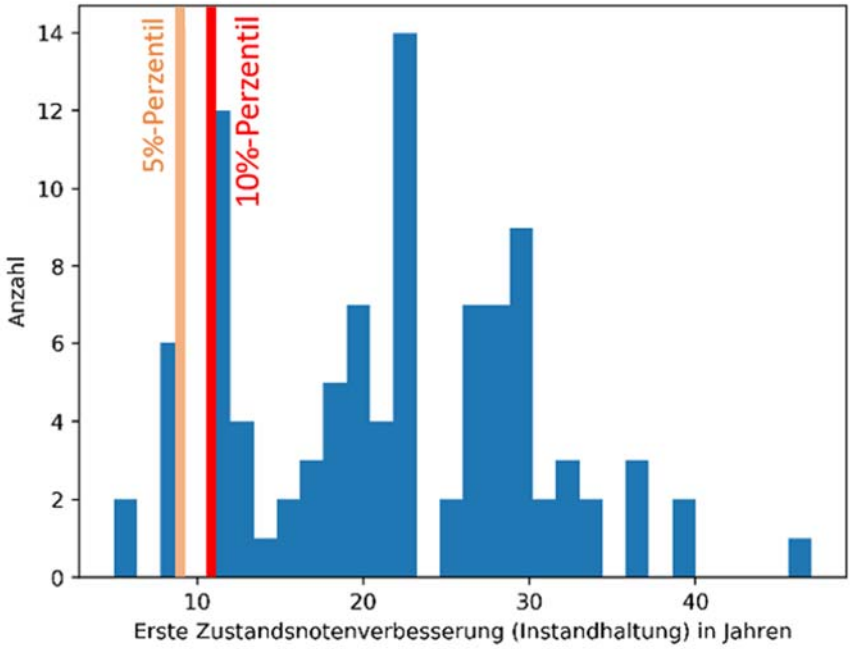


Abbildung 28: Verteilung der erstmaligen Zustandsverbesserung der Innenschale (BT1) sowie 5% und 10%-Perzentile

4.3.1.1.3 Potentiell wichtige Einflussfaktoren/Parameter

Die Einteilung der Gruppen wurde mit Hilfe einer Random-Forest-Analyse durchgeführt. Diese bildet mögliche Gruppierung (Grenzen der Blätter des Entscheidungsbaumes) und den Einfluss der einzelnen Parameter ab. Für eine RFA ist es dabei ausreichend, lediglich potentiell wichtige Parameter vorzubestimmen, da der tatsächliche Einfluss der einzelnen Parameter ohnehin im Zuge der Analyse ermittelt wird. In der nachfolgenden Auflistung sind die in Betracht kommenden Parameter und deren zugrundeliegenden Annahmen zusammengestellt:

- **Baujahr**: Synonym für die zum Zeitpunkt der Errichtung geltende Normen
- **Alter**
- **Länge**: Geringere Temperaturschwankungen sowie Sprühnebel- und Spritzwasserbelastungen in Abhängigkeit der Tunnellänge
- **Bauweise**: Im FFG-Projekt AMBITION wurden unterschiedliche Degradationsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Bauweise angenommen. Dies soll im gegenständlichen Projekt datenbasiert überprüft werden.
- **Frostindex**: Synonym für die Frost-Tau-Beanspruchung sowie die Chloridbeanspruchung (mehr Tausalze in größeren Höhenlagen).
- **Gefährdungsindex**: Errechneter Wert gem. RVS 09.03.11 [18] Der Gefährdungsindex steht nur für vergleichsweise wenige Streckenabschnitte (72 Röhren) zur Verfügung, dementsprechend gering ist dieses Attribut in der Datenbasis ausgefüllt (s. Kapitel 4.2.4.1).
- **Verkehrsaufkommen (JTDV, JDTLV)**: Synonym für die Beanspruchung verschiedener Bauteile durch Druckunterschiede, Vibration, Sprühnebel und Spritzwasser.
- **Temperatur (T_{min}, T_{max})**: Temperaturmaxima haben v.a. im Portal- und Eingangsbereich Einfluss auf die Beanspruchung

Als Vorbereitung für die RFA wurde für jeden Übergang eine Tabelle der jeweiligen Übergangsdauer und weiterer potentiell wichtiger Parametern zusammengestellt (vgl. Tabelle 24, Ausschnitt der Übergangstabelle 1→2).

Tabelle 24: Beispiel eines vollständigen Datensatzes für die Random-Forest-Analyse

Name	Bau-jahr	Länge	Bau-weise	FIKh	JDTLV	JDTV	T_{min}	T_{max_50}	1-2	1-2-start-age
A09_R_36,620	2003	0,264	OBW	19.200	1.810	9.784	-17	51	5,704	0
A09_R_42,800	1997	0,249	OBW	21.600	1.810	9.784	-19	51	6,198	0
A23_B_14,880	1990	0,465	OBW	19.200	3.160	49.042	-17	52	11,244	0
S16_B_6,005	1991	0,362	GAL	20.400	745	8.222	-17	52	4,206	15,273
A09_L_27,410	2003	0,533	GBW	19.200	1.641	10.722	-17	51	11,685	0
A02_L_304,100	1999	0,145	OBW	18.000	1.494	14.765	-17	53	10,518	0
A09_L_25,660	2003	1,462	GBW	19.200	1.641	10.722	-17	51	11,685	0
A02_R_73,880	1997	0,187	OBW	16.800	1.981	20.831	-16	51	14,635	0
A02_R_302,200	1998	0,302	OBW	18.000	1.521	14.613	-17	53	9,881	0
A09_R_27,410	2003	0,533	GBW	19.200	1.736	10.778	-17	51	11,685	0
A09_L_24,500	2004	0,195	OBW	19.200	1.641	10.722	-17	51	7,002	0
A09_L_42,800	1997	0,249	OBW	21.600	1.704	9.653	-19	51	9,687	0
A02_L_73,880	1998	0,187	OBW	16.800	1.980	20.169	-16	51	13,573	0

4.3.1.1.4 Ergebnisse der Random-Forest-Analyse

Mit dem vorliegenden aufbereiteten Datensatz wurde die RFA durchgeführt. Zur Anwendung gelangte das Software-Paket „RandomForestRegressor“ aus der Programmbibliothek „sklearn.ensemble“ (scikit-learn Version 0.21.2) in Python (Version 3.7.3.final.0).

Da nicht alle Parameter für alle Bauwerke zur Verfügung standen und Bauwerke mit fehlenden Parametern nicht in die Analyse miteinbezogen werden, wurde die RFA mit verschiedenen Parameterkombinationen durchgeführt. Aus statistischen Gründen wird eine möglichst kleine Zahl an Einflussparametern angestrebt (*parsimonious model fitting*). Aus diesem Grund wurde der Parameter mit dem geringsten Einfluss auf die Übergangsdauer im darauffolgenden Berechnungsdurchlauf weggelassen. Als Beispiel ist das Ergebnis einer solchen Analyse (Innenschale Übergang 1→2) in Tabelle 25 dargestellt. Für die RFA wurde die Parameterkombination der letzten Zeile (blau umrahmt) gewählt.

Tabelle 25: Statistische Relevanz verschiedener Einflussparameterkombinationen beim Übergang Note 1→2 von Tunnelröhren

Accuracy [%]	Baujahr	Laenge	Bauweise	FIKh	JDTLV	JDTV	Tmin	Tmax_50	1-2-start-age
64,55	15,22	29,42	17,36	2,45	20,01	10,45	0,18	4,91	0
64,54	15,24	29,42	17,36	2,44	20	10,45	0,18	4,91	
64,56	15,25	29,44	17,36	2,56	20,01	10,48		4,9	
64,68	15,54	30,58	17,54		20,45	10,71		5,18	
63,95	16,7	32,08	18,98		21,93	10,31			
63,17	17,9	36,29	21,4		24,41				
63,72		41,77	23,36		34,87				
68,24		48,77			51,23				

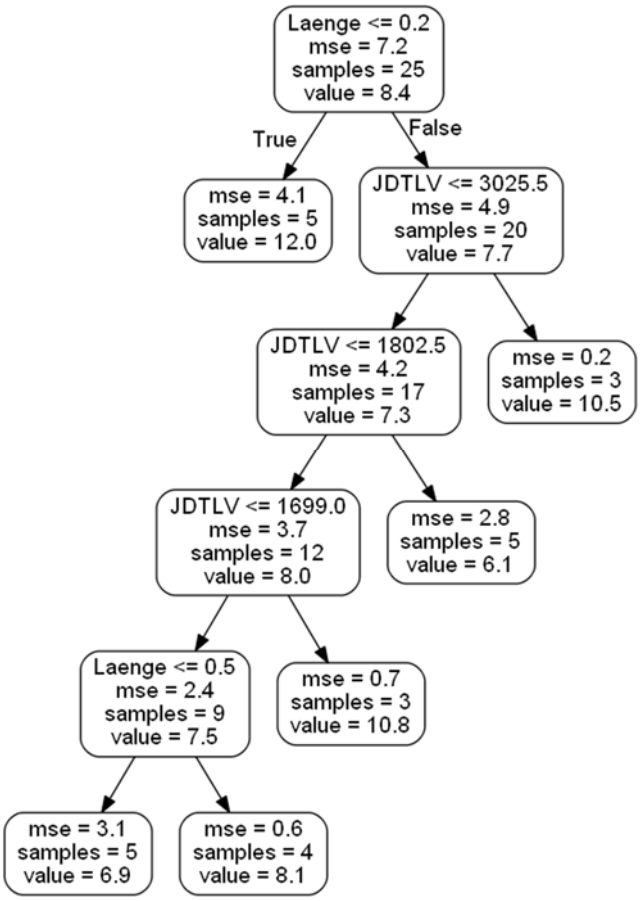


Abbildung 29: Random Forest für den Übergang Zustandsnote 1→2 für Tunnelröhren

In der Abbildung 29 sind exemplarisch die Ergebnisse der Random Forest Analyse (RFA) für den Übergang Zustandsnote 1→2 für die Innenschale dargestellt mit folgenden Ergebnissen:

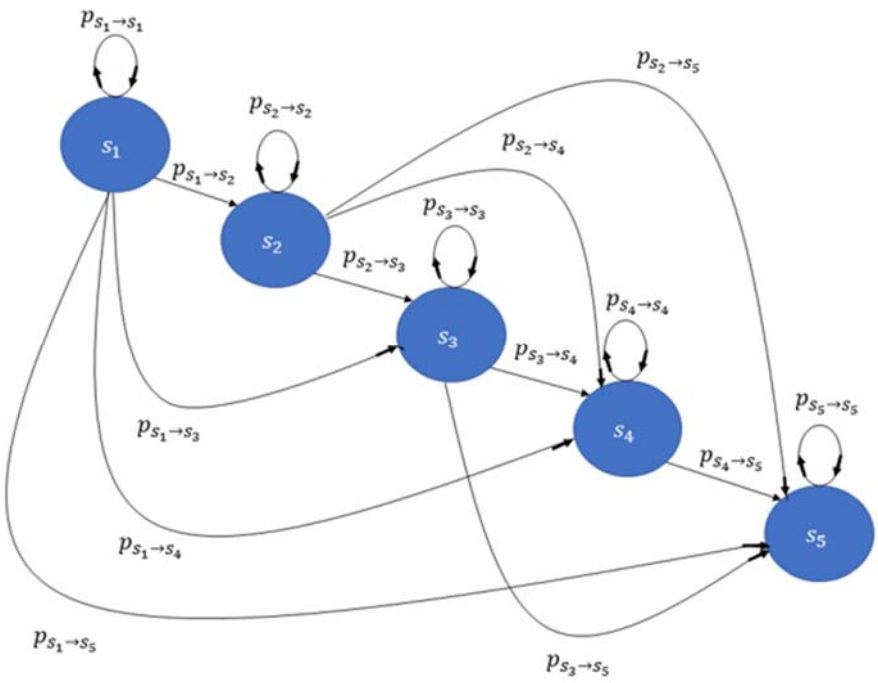
- Alle Tunnelröhren ≤ 0,2 km haben eine mittlere Übergansdauer von Zustandsnote (ZN) 1→2 von 12 Jahren, wobei die erwartete quadratische Abweichung (MSE) 4,1 Jahre beträgt

- Röhren mit einer Länge L>0,2 km und einem jahresdurchschnittlichen täglichen Lastverkehr (JDTLV) > 3.025 haben eine Verweildauer von ZN 1→2 von 10,5 Jahren (MSE=0,2)
- Röhren mit einer Länge L>0,2 km und einem JDTLV zwischen 1.802 und 3.025 haben eine Verweildauer ZN 1→2 von 6,1 Jahren (MSE=2,8)
- Röhren mit einer Länge L>0,2 km und einem JDTLV zwischen 1.699 und 1.802,5 haben eine Verweildauer ZN 1→2 von 10,8 Jahren (MSE=0,7)
- Röhren mit einer Länge L>0,5 km und einem JDTLV < 1.699 haben eine Verweildauer ZN 1→2 von 8,1 Jahren (MSE=0,6)
- Röhren mit einer Länge L>0,2 km und L<0,5 km und einem JDTLV ≤ 1.699 haben eine Verweildauer ZN 1→2 von 6,9 Jahren (MSE=3,1)

Die gewählte Vorgehensweise wurde für alle Bauteile und Übergänge (Verschlechterungen) um einen Notengrad durchgeführt, wobei auf Grund der Datenmenge (Anzahl der beobachteten Übergänge) eine Klassifizierung nur bei den Bauteilen Abdichtung/Entwässerung (1→2 und 2→3), erhöhter Seitenstreifen (1→2), Belag (1→2 und 2→3) und Tunnelröhre (1→2 und 2→3) möglich war. Im Anhang sind alle Ergebnisse (Grenzen der Clusterung) der RFA inklusive der jeweiligen statistischen Parameter und Momente ersichtlich. Aufgrund des geringen Daten- und Wertegerüsts für die Zustandsnoten 4 und 5, konnte der oben skizzierte Lösungsansatz für Übergänge der Zustände 3→4 und 4→5 nicht durchgeführt werden.

4.3.1.2 Zeitinhomogene Markov-Ketten

Markov-Ketten stellen einen stochastischen Prozess (wahrscheinlichkeitsbehaftete Änderung eines Zustands über die Zeit) dar, welcher in diskreten Zeitschritten (z.B. Jahre) abläuft. Die möglichen Zustände sind oftmals ebenfalls diskret bzw. endlich viele. Markov-Ketten stellen ein Modell von Zustandsänderungen da, welches sich schematisch wie in Abbildung 30 darstellen lässt. Gleichbleibende Zustände werden dabei als Ellipsen dargestellt. Die Wahrscheinlichkeiten für gegebene Übergänge werden mit p bezeichnet und enthalten als Sub-Index die Zustände zwischen denen der Übergang stattfindet (z.B. $p_{s1\rightarrow s2}$ bezeichnet die Wahrscheinlichkeit vom Zustand 1 in den Zustand 2 überzugehen.
Ausgehend von einem aktuellen Zustand s_i können Wahrscheinlichkeiten $p_{si\rightarrow sj}$ definiert werden, die den möglichen Nachfolgezustand s_j bestimmen. Schleifen in Abbildung 30 stellen die Wahrscheinlichkeit eines gleichbleibenden Zustands im nächsten Zeitschritt dar.



<u>Abbildung 30</u>: Markov-Kette mit fünf Zuständen und Zustandsübergänge

Sofern die Übergangswahrscheinlichkeiten aus einem gegebenen Zustand nicht von der Zeit abhängen bzw. sofern Zeit kein Faktor in der Definition der Zustände ist, kann von einer zeithomogenen Markov-Kette gesprochen werden.
Im vorliegenden Fall eines bauwerklichen Verfallsmodells ist es jedoch unwahrscheinlich, dass sich Notenübergangswahrscheinlichkeiten nicht mit der Zeit ändern. In diesem Fall macht es Sinn, die verstrichene Zeit in einem Zustand als Faktor in der Definition der Modellzustände zu übernehmen.

Dies impliziert, dass der Zustand zu jedem Zeitpunkt die in diesem Zustand (=Notengrad) verstrichene Zeit als Komponente enthalten muss. Wir bezeichnen die neuen Zustände mit m_k^t, wobei der Superscript-Index t den „Jahreszähler“ darstellt und der Subscript-Index k den „Notenindex“, der die Note im aktuellen Zustand beschreibt. Die Übergangswahrscheinlichkeiten lassen sich analog als $p_{si \to sj}$ bezeichnen.

Das sich ergebende komplexe Modell ist schematisch in <u>Abbildung 31</u> dargestellt (Pfeile stellen mögliche Übergänge dar, werden aber aus Platzgründen nicht mit Formelvariablen bezeichnet). Bei jedem Notenübergang wird der „Jahreszähler“ wieder auf das Jahr 1 gesetzt. Als Übergänge sind nur Verschlechterungen (Pfeile zu einem höheren bzw. schlechteren Notenindex im Jahr 1) oder gleichbleibende Noten (Pfeile zu dem gleichen Notenindex aber mit einem um 1 erhöhten Jahreszähler) zulässig. Notensprünge > 1 sind in dem Model integriert, tragen jedoch aufgrund ihrer Seltenheit wenig zum Erklärungsgehalt bei.

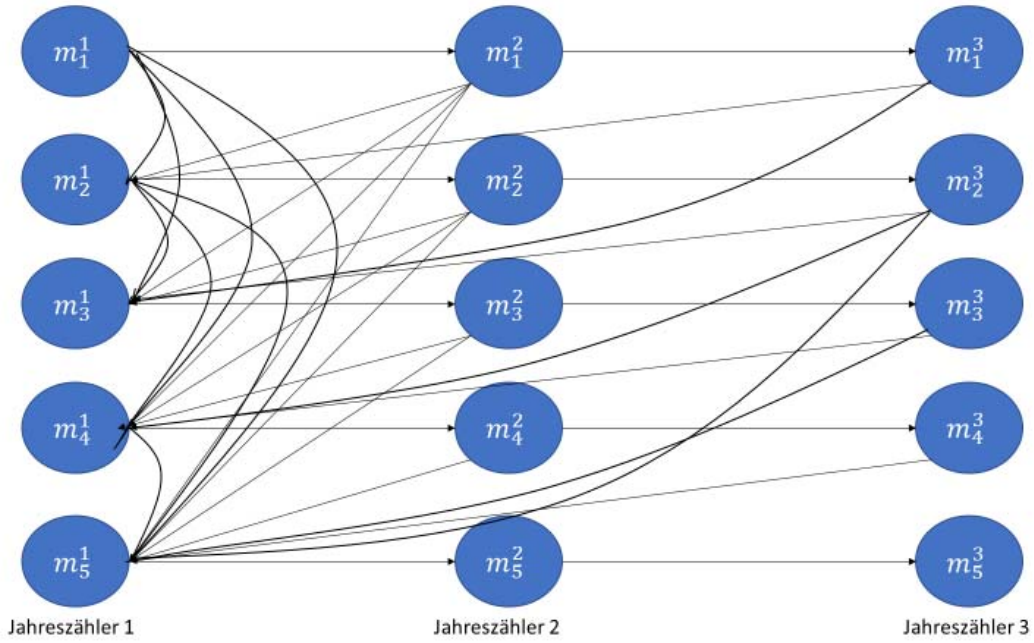


Abbildung 31: Mögliche Zustände einer Zeit-inhomogenen Markov-Kette

Die Zeit ist hierbei in den Zuständen abgebildet, auf welche sich die Übergangswahrscheinlichkeiten beziehen. Dies ist das Modell, auf dem alle folgenden Analysen basieren. Datenbasis des Modellfit sind die zeitlichen Verläufe der Noten. Im Gegensatz zu den Baumgruppierungen werden keine Übergänge interpoliert, sondern nur in den Daten vorhandene Übergänge genutzt.
Wir betrachten die Dauer des Verweilens auf einer gegebenen Note bis zum ersten dokumentierten Übergang auf eine schlechtere Note bzw. bis zum letzten vorhandenen Erfassungszeitpunkt. Notenverbesserungen werden nicht abgebildet, da sie als Folge etwaiger (uns nicht bekannter) Maßnahmen gesehen werden. Im Falle einer Verbesserung wird jedoch immer noch der Notenverlauf davor als „gleichbleibend“ angemerkt.

Zur Verfeinerung des Modells werden jene Gruppen verwendet, welche aus der RFA erhalten wurden. Da die RFA auch interpolierte Notenübergänge anwendet, kommt es in sehr seltenen Fällen dazu, dass Gruppen aus der RFA sich nicht in die Markovkettenmodellierung übertragen ließen. Die betroffenen Fälle sind bei der Darstellung der Ergebnisse unten angeführt und ihre Exklusion aus der Markovkettenmodellierung ist ebenda begründet.

4.3.1.2.1 Ermittlung der Sprungwahrscheinlichkeit

Die Sprungwahrscheinlichkeiten für jede Note in jedem gegebenen Jahr, werden nach einer einfachen Formel (relative empirische Häufigkeit von Sprüngen) für die 3 Parameter bisheriger Notenzustand, betrachtetes Jahr im bisherigen Zustand und zukünftiger Notenzustand am Ende des Jahres bestimmt. Für gleichbleibende Noten lautet die Wahrscheinlichkeit p:

$$p\left(m_k^t, m_k^{t-1}\right) = \frac{n_k^t}{n_k^{t-1}}.$$

<u>wobei:</u>

m_k^t .....Zustand Komponente hat t-Jahre auf Note k verbracht,

m_k^{t-1} ....Zustand Komponente hat t-1 Jahre auf Note k verbracht,

n_k^{t-1} .....Anzahl der Fälle im Datensatz „Komponente hat t-1 Jahre auf Note k verbracht“,

n_k^t.....Anzahl der Fälle im Datensatz „Komponente hat t Jahre auf Note k verbracht“

Für sich ändernde Noten lautet die Wahrscheinlichkeit p:

$$p\left(m_l^1, m_k^{t-1}\right) = \frac{n_{k,l}^t}{n_k^{t-1}}.$$

<u>wobei</u>:

m_k^{t-1} ....Zustand „Komponente hat t-1 Jahre auf Note k verbracht“,

m_l^1.....Zustand „Komponente ist nach t Jahren von Note k auf Note l gesprungen“,

n_k^{t-1} .....Anzahl der Fälle im Datensatz „Komponente hat t-1 Jahre auf Note k verbracht“,

$n_{k,l}^t$.....Anzahl der Fälle im Datensatz „Komponente ist im Jahr t von Note k auf Note l gesprungen“

Im Sinne der obigen Modellbeschreibung definieren die Parameter Alte Note und Jahr den Zustand und Neue Note (mit Jahr 1 falls neue Note ≠ alte Note und Jahr+1 falls Neue Note=Alte Note) den Nachfolgezustand.

Zusätzlich ging in das Modell die Annahme eines spätestens möglichen Zeitpunktes einer Verschlechterung ein: Spätestens im 12-ten Jahr einer gleichbleibenden Note kommt es zu einem Sprung auf den nächsthöheren Notengrad (frühere Sprünge sind, wie oben dargestellt, aber möglich, sofern es dafür Beispiele in den Daten gibt). Diese Annahme ergab sich ursprünglich aus der Beobachtung der Verweildauern auf der Note 4: Die längste dokumentierte Verweildauer auf der Note 4 waren 11 Jahre.

Für die Prognose des möglichen Bauwerkzustands zu einem gegebenen Zeitpunkt (Jahr) ergibt sich dabei eine Darstellung als Wahrscheinlichkeitsmatrix, deren Komponenten die

jeweiligen Wahrscheinlichkeiten der möglichen Zustände m_k^t (siehe oben) darstellen. Dies ist beispielshaft in Tabelle 26 dargestellt. Es ist erkennbar, dass nur noch eine geringe Wahrscheinlichkeit (0.05) zum Verbleib in Note 1 nach 7 Jahren gegeben ist, während der Großteil der Wahrscheinlichkeit sich in den Zuständen der Note 2 (mit verschiedenen Startzeitpunkten/Jahren) angesammelt hat.

Tabelle 26: Zustandswahrscheinlichkeiten mittels zeit-inhomogener Markov-Kette

Wahrscheinlichkeit	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5	Jahr 6	Jahr 7
Note 1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0500
Note 2	0,1100	0,1100	0,2300	0,1200	0,0300	0,0600	0,0000
Note 3	0,0760	0,0650	0,0400	0,0060	0,0359	0,0000	0,0000
Note 4	0,0400	0,0050	0,0200	0,0006	0,0015	0,0000	0,0000
Note 5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

In dieser Darstellung entsprechen Zeilen dem Notengrad und Spalten der Anzahl der Jahre seit dem ursprünglichen Notenübergang. Wir drücken die Annahme, dass ein Tunnel nach der ursprünglichen Fertigstellung klar die Note 1 hätte, aus, indem zum Startzeitpunkt t=1 die Wahrscheinlichkeit bei (1,0,0,0,0) angenommen wird. Mithilfe der Übergangswahrscheinlichkeiten der zeitinhomogenen Markov-Kette können daraus die Wahrscheinlichkeiten, andere Zustände anzunehmen, für jedes Folgejahr berechnet werden.

Aus Mangel an beobachteten Übergängen der Note 4 auf die Note 5, wurde die datenbasierte Modellierung auf die Noten 1 bis 4 beschränkt und der Übergang zur Note 5 nach 12 Jahren angenommen.

4.3.1.2.2 Transformation in CWA-Format

Mit der bisher vorgestellten Methode der zeitinhomogenen Markov-Ketten konnten zwar bis zur Zustandsnote 4 sehr schöne Ergebnisse mit kleiner Streuung erzeugt werden, für den weiteren Projektverlauf ergeben sich allerdings folgende zwei Probleme:

1. Extrapolation auf die Zustandsnote 5 erforderlich
2. Kalibrierungsfaktor für Wartungsarbeiten und Kleinbaumaßnahmen ab Note 3 notwendig

Aus diesem Grund sowie aufgrund einer besseren Vergleichbarkeit wurden die Ergebnisse der zeitinhomogenen Markov-Kette in das CEN CWA 16633 Format [8] (vgl. Kapitel

4.3.1.1.1) transformiert. Zu diesem Zweck wurden die Zeitpunkte der Schnittpunkte der gefitteten Kurven (Erwartungswert ± Standardabweichung) mit den Zustandsnoten 1-4 ermittelt. Die Schnittpunkte der Noten 2 bis 4 wurden nun als Datenpunkte für die Anpassung der Parameter der CEN CWA Funktion herangezogen. Ein typisches Ergebnis ist in Abbildung 32 dargestellt.

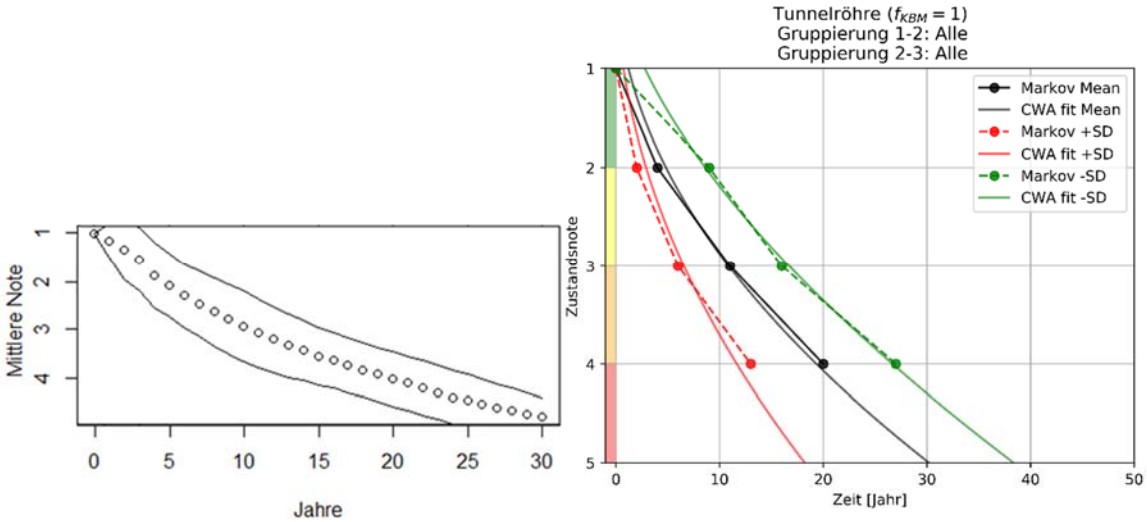


Abbildung 32: Modelrechnung für den Zustandsverlauf der Gesamtnote (links) und abgeleitete CWA-Kurve (rechts)

Alle Ergebnisse der Analyse der baulichen Anlagen sind im Anhang D dargestellt.

4.3.1.2.3 Berücksichtigung von Kleinbaumaßnahmen

Beim Betrachten der Ergebnisse wird deutlich, dass die Geschwindigkeit der Zustandsnotenverschlechterung meist abnimmt. Dies ist u.a. auf die erhöhte Wartungstätigkeit bei schlechteren Zustandsnoten zurückzuführen. Um eine verminderte Wartungstätigkeit berücksichtigen zu können wird ein Faktor zur Berücksichtigung von Kleinbaumaßnahmen (f_{KBM}) eingeführt. Da allerdings in der Auswertung angenommen wurde, dass eine Instandsetzung bei einer Verbesserung um mindestens einen Zustandsnotengrad erkennbar ist, fließen solche Ereignisse auch nicht in die Ergebnisse ein. In den Ergebnissen sind lediglich Instandhaltungen enthalten, die zu keiner Verbesserung der Zustandsnote geführt haben.

Diese Instandhaltungen sind per Definition Teil der Wartung und werden in diesem Projekt auch als „Do-Nothing“ interpretiert. Bei üblicher Wartungs- und Instandhaltungstätigkeit wird also ein f_{KBM} = 1,0 empfohlen. Bei verminderter Wartungs- und Instandhaltungstätigkeit gibt es nun aber die Möglichkeit den Faktor zu vermindern vgl. Abbildung 33). Empfehlungen dazu können allerdings aufgrund der fehlenden Datenbasis nicht gegeben werden.

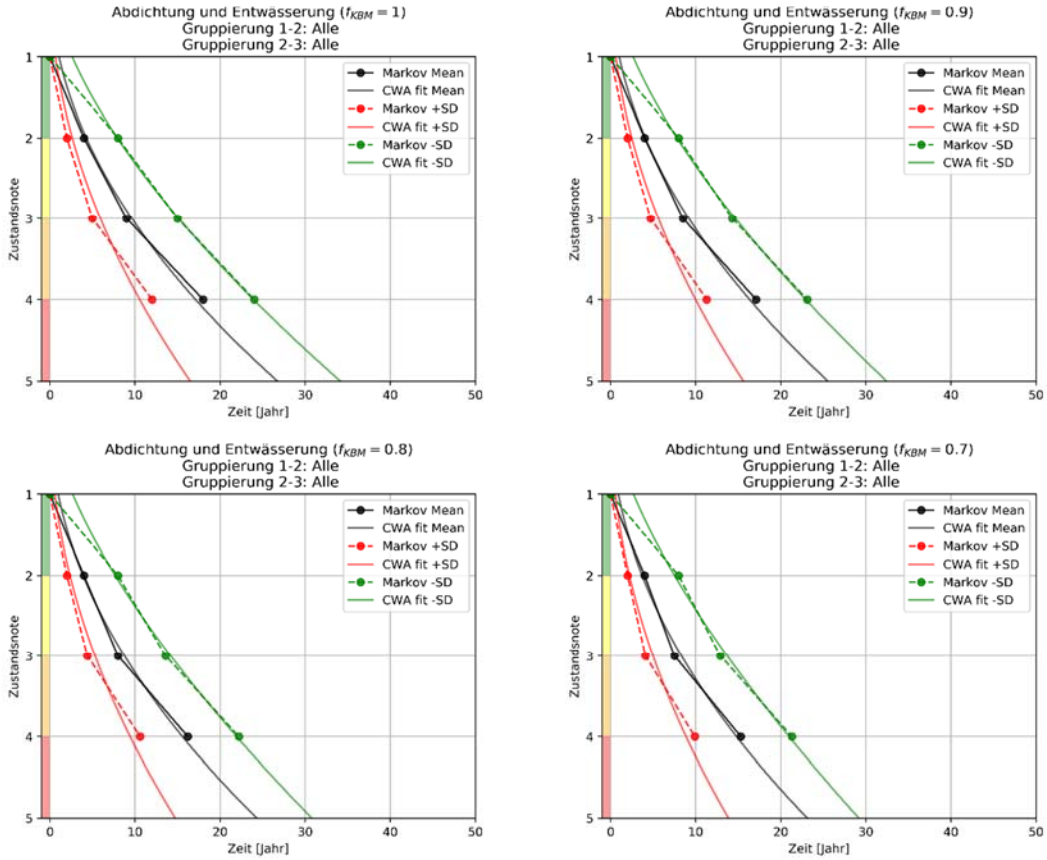


Abbildung 33: Beispiele der Anpassung einer Degradationskurve mit unterschiedlichen Faktoren für Kleinbaumaßnahmen (f_{KBM}): Bei f_{KBM} = 0,7 verkürzt sich die technische Lebensdauer um 3,5 Jahre im Verglich zu f_{KBM} = 1,0

4.3.2 Alterungsfunktionen für elektromaschinelle Ausrüstung

4.3.2.1 Voranalysen

Beim ersten näheren Betrachten der E&M-Daten war auffällig, dass sich der technische Anlagenzustand (TAZ) häufig erst bei einer Ersatzteilverfügbarkeit (EV) größer gleich 3 verschlechtert. In einer Auswertung diesbezüglich konnte ein solcher Zusammenhang auch klar gezeigt werden (vgl. Abbildung 34). Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde beschlossen, Analysen durchzuführen mit:

- gesamten Datenbasis des TAZ
- TAZ bei einer EV $\geq$ 3

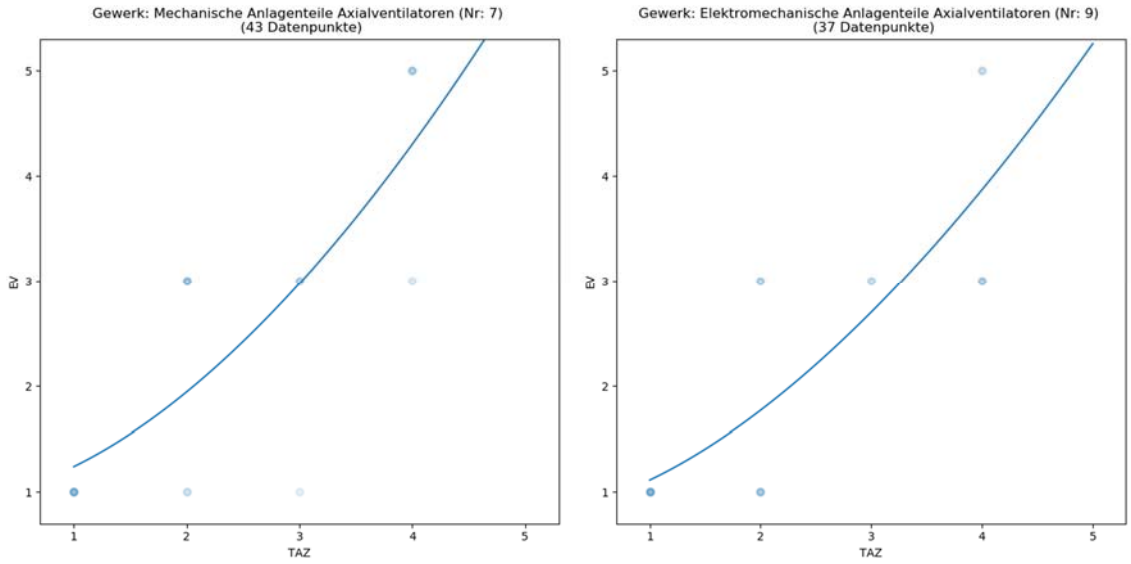


Abbildung 34: Beispiele für das Fehlen schlechter Noten des technischen Anlagenzustandes (TAZ) bei guter Ersatzteilverfügbarkeit (EV)

4.3.2.2 Vereinfachte zeithomogene Markov-Ketten

Im Folgenden wurde also auch eine Auswertung des TAZ bei EV größer gleich 3 durchgeführt. Die nun allerdings stark dezimierte verbleibende Datenbasis verunmöglicht allerdings eine Auswertung von zeitinhomogenen Markov-Ketten analog jener der baulichen Anlagen. Die Methode der Auswertung musste folglich angepasst werden. So wurde zum einen vom zeitinhomogenen Ansatz Abstand genommen und die Sprungwahrscheinlichkeiten als zeitunabhängig angenommen. Zum anderen gab es für viele Übergänge keine Daten mehr, daher wurde eine Sprungwahrscheinlichkeit unabhängig von der aktuellen Note ausgewertet. In diesem Ansatz wird also eine Degradationsgerade rein aus der Wahrscheinlichkeit einer Verschlechterung um einen Zustandsnotengrad gerechnet.

Ergebnis dieser Analysen sind nun lineare Degradationsgeraden (vgl. Abbildung 35). Ein großer Nachteil dieser Methode ist, neben der sehr kleinen Datenbasis, dass die Streuung rein eine Funktion der Sprungwahrscheinlichkeit ist. Sprich die Streuung von Gewerken langer Lebensdauer ist immer groß und umgekehrt.

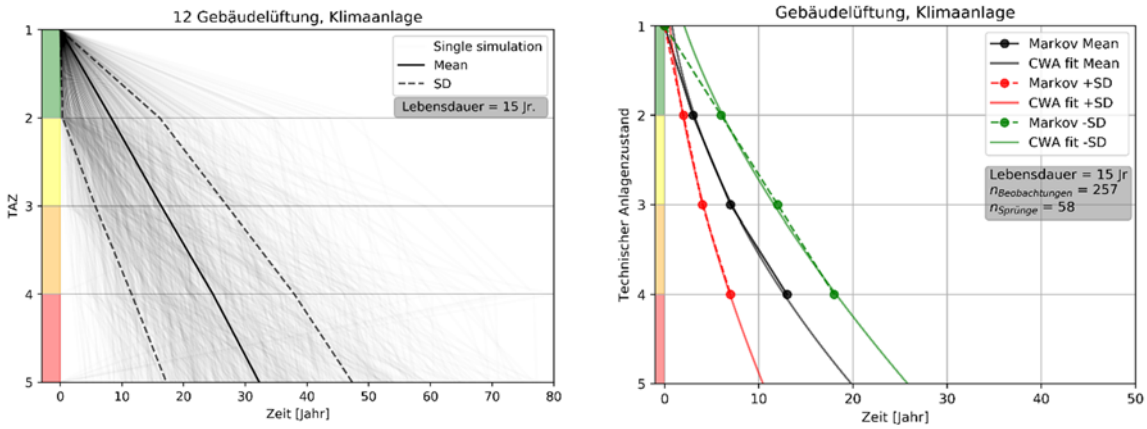


Abbildung 35: Beispiel einer Degradationskurve für E&M mit vereinfachter Methode (links) und mit zeitinhomogener Markov-Kette (rechts). Lebensdauer = technische Nutzungsdauer gem. [19],[35].

4.3.2.3 Zeitinhomogene Markov-Ketten

Die Degradation des TAZ wurde, wie bereits erwähnt, auch unabhängig von der EV durchgeführt. Diese Ausführungen wurden mit derselben Methodik wie die der baulichen Anlagen, mit Ausnahme der fixen Sprungzeit nach 12 Jahren, durchgeführt. Die fixe Sprungzeit ist für E&M Gewerke abhängig von deren angegebener Planlebensdauer folgendermaßen geregelt: Anstelle eines fixen Sprunges nach 12 Jahren findet ein fixer Notensprung nach der angegebenen Lebensdauer (plus 1 Jahr) statt.

Grundsätzlich funktioniert die Auswertung mit dieser Methode sehr gut, und wie bei den baulichen Anlagen ergeben sich sehr kleine Streuungen. Lediglich bei Gewerken mit sehr kleiner Datenbasis ergeben sich manchmal aufgrund der fehlenden Daten abschnittsweise relativ sprunghafte Verläufe (s. Verlauf von „Blitzschutzanlage“ im Anhang D).

Da diese Herangehensweise am Ende als repräsentativer eingestuft und daher gewählt wurde (s. folgendes Kapitel) sind alle Ergebnisse im Anhang D zu sehen. Für „Kräne und Hebezeuge“ wie auch für „Schachtbefahrung“ konnte aufgrund der fehlenden Daten keine Kurve ermittelt werden.

Beim Vergleich der Lebensdauer mit dem Resultat der Auswertung zeigt sich, dass der Zeitraum meist recht gut übereinstimmt. Es gibt allerdings auch Gewerke, bei denen beide Werte sehr weit auseinander liegen. In diesen Fällen scheint eine nähere Untersuchung der angegebenen Lebensdauer als sinnvoll.

4.3.2.4 Vergleich der Ergebnisse und Interpretation

Der resultierende Mittelwert führt über den Zustandsnotenbereich TAZ 1-4 bei beiden Herangehensweisen zu einer ähnlichen Lebensdauer. Allerdings ist die Streuung der Ergebnisse mit dem zeitinhomogenen Ansatz viel geringer. Des Weiteren ergaben Gespräche mit Experten, dass es sich bei der beobachteten Korrelation zwischen TAZ und EV in der Regel um eine Scheinkorrelation handelt. Da neue Bauteile mit sehr gutem TAZ und geringer Ausfallrate üblicherweise auch noch eine sehr gute EV haben, da diese ja aktuell am Markt verfügbar sind. Es ist also davon auszugehen, dass sich der TAZ und EV unabhängig von der Menge an ausgetauschten Ersatzteilen verschlechtern.

Folglich werden im weiteren Projektverlauf die Ergebnisse der zeitinhomogenen Markov-Ketten verwendet.

In Abbildung 35 ist abschließend ein Vergleich der beiden Methoden dargestellt. Auffällig ist hier die deutlich breitere Streuung des vereinfachten Ansatzes. Außerdem hat hier die Veränderung der Datenbasis zu einer deutlich längeren Lebensdauer von mehr als 10 Jahren geführt. Beim zeitinhomogenen Ansatz musste die Extrapolation wieder mit einem CEN CWA 16633 Fit [8] vorgenommen werden.

4.4 Risikomatrix

Ausgangspunkt für die Erstellung einer Risikomatrix waren Erfahrungen des Projektteams in ähnlich gelagerten Forschungsprojekten (z.B. Projekt EINSTEIN, VIF 2013) sowie die gelebte Praxis der Tunnelzustandserfassung (Bewertungsschema für Straßentunnel gem. RVS 13.03.31 [21]). Wie in Abbildung 36 schematisch dargestellt, kann über eine Risikomatrix mit den Eingangswerten PoF und CoF das entsprechende Risiko ermittelt werden.
Die senkrechte Achse gibt die Wahrscheinlichkeit eines Funktionsverlustes (PoF) wieder, wohingegen auf der waagrechten Achse die damit verbundenen Konsequenzen (CoF) für die einzelnen Szenarien aufgetragen sind. Mit PoF wird im Zusammenhang mit dem Instandsetzungsmanagement keineswegs (Total-)Versagen, sondern vielmehr eine Einschränkung der Funktionsfähigkeit in verschiedenen Abstufungen verbunden.
Die Eingangswerte PoF sind einer Klasse (1-5) zugeordnet, die Werte für die CoF zurVermeidung einer Verwechslung den Klassen A bis E. Der Ergebniswert entspricht einer entsprechenden Risikoklasse mit einer 5-teiligen Färbung von dunkelgrün, hellgrünn, gelb, orange bis rot. Zur mathematischen Modellierung in dTIMS wird den einzelnen Risikoklassen ein numerischer Wert zugeordnet, (1-25, aus 5x5-Matrix).

PoF \ CoF	A	B	C	D	E
5	5	10	15	20	25
4	4	8	12	16	20
3	3	6	9	12	15
2	2	4	6	8	10
1	1	2	3	4	5

Abbildung 36: OPtimAL-Risikomatrix (5x5 Matrix)

4.4.1 Ableitung der Ausfallswahrscheinlichkeit

Die Ausfallswahrscheinlichkeit, auch mit Probability of Failure (PoF) bezeichnet, bezieht sich im Erhaltungsmanagement auf die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer (ungeplanten) Störung oder einer Beeinträchtigung der Funktionalität, welche die Notwendigkeit einer Erhaltungsmaßnahme auslöst. Diese setzt sich zusammen aus der Grundausfallswahrscheinlichkeit PoF_0 und verschiedenen Konfidenzfaktoren (CF):

$$PoF=PoF_0*CF_M*CF_D$$

wobei:

PoF ….. Ausfallswahrscheinlichkeit [0-100]
PoF_0 ….. Grundausfallswahrscheinlichkeit
CF_M ….. Konfidenzfaktor - Monitoring (vgl. Kapitel 4.4.1.1)
CF_D ….. Konfidenzfaktor - Datenqualität (vgl. Kapitel 4.4.1.1)

Zwecks Verwendung der Ausfallswahrscheinlichkeit in einer Risikomatrix wird der ermittelte PoF-Wert in eine (diskrete) PoF-Kategorie transformiert (vgl. Tabelle 27).

Tabelle 27: Ausfallswahrscheinlichkeitskategorien für Tunnelbauwerke

PoF-Kategorie	Berechneter PoF-Wert
1	[0-20]
2	[20-40]
3	[40-60]
4	[60-90]
5	[90-100]

Die Grundausfallswahrscheinlichkeit (PoF_0) wird für bauliche Anlagenteile und E&M Gewerke jeweils getrennt ermittelt. In Abhängigkeit unterschiedlicher Modelltypen (vgl. Tabelle 28) kann je nach Gewerk/Bauteil die Wahrscheinlichkeit einer langsamen (konkave), gleichmäßigen (lineare) oder exponentiellen (konvexe) Zustandsänderung berechnet werden. Die unterschiedlichen Modelltypen werden dabei jedem konstruktiven Tunnelbauteil bzw. E&M-Gewerk individuell zugeordnet (vgl. Tabelle 29)

Die Basisform des konkaven bzw. linearen Modelltyps hat die Form:

$$PoF_0=a+b*EAZ^c$$

Komponenten mit einer hohen Sensitivität bez. ungeplanter Erhaltungsmaßnahmen (z.B. aufgrund eines hohen Anteils an elektronischer Anlagekomponenten) werden hingegen mittels konvexer Modelle abgebildet. Diese haben die Form:

$$PoF_0=a+b*(1-exp(c*EAZ))$$

Tabelle 28: Parameter unterschiedlicher Modelltypen

Modelltyp	a	b	c
Linear	-30,00	30,00	1,0
Konkav 1	-6,00	6,00	2,0
Konkav 2	-1,43	1,43	3,0
Konkav 3	-0,35	0,35	4,0
Konvex 1	-75,20	191,00	-0,5
Konvex 2	-162,77	257,50	-1,0

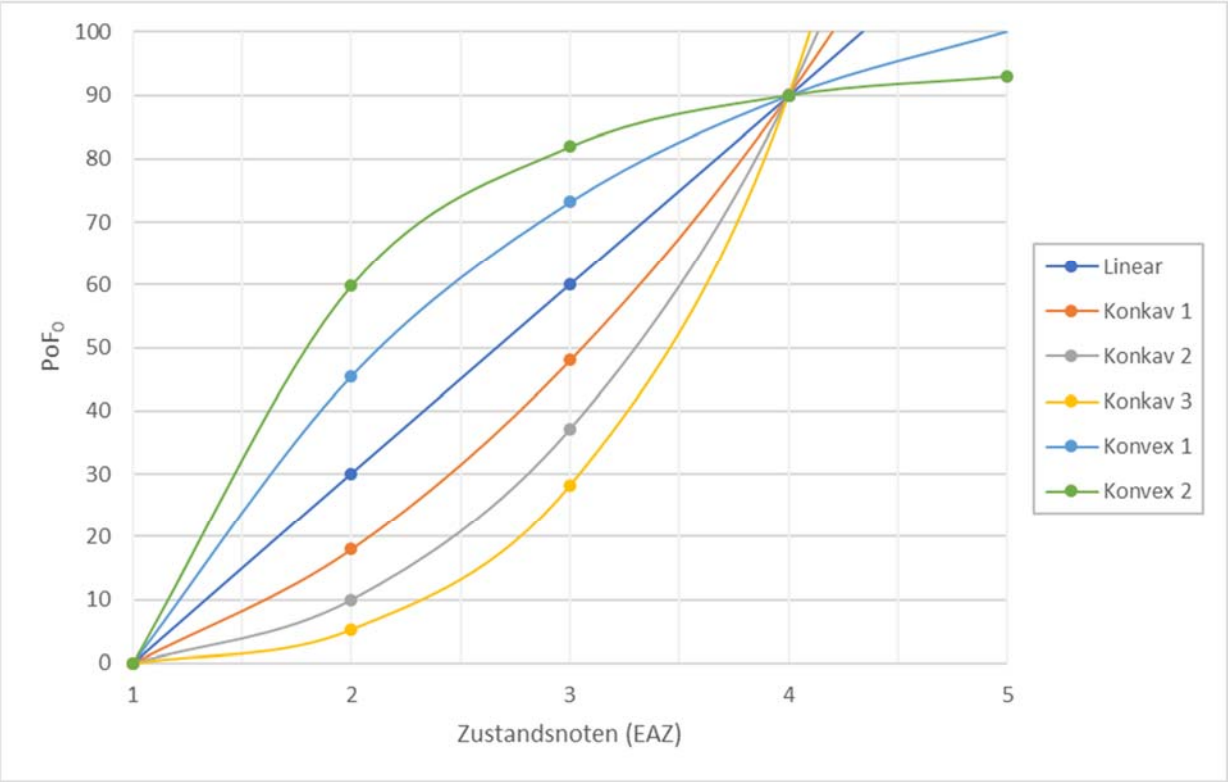


Abbildung 37: Kurvenverläufe unterschiedlicher Modelltypen der Degradation

Tabelle 29: Degradationsverläufe unterschiedlicher E&M-Gewerke

Gruppen Nr.	Gewerks-bezeichnung	Gewerks-Nr.	Gewerksbezeichnung	Modelltyp
G1	Energie	1	Mittelspannungsanlage	Konvex 1
		2	Niederspannungsanlage	Konvex 1
		3	SSV Anlage	Konvex 1
		4	Notstromaggregate	Linear
		5	Blitzschutzanlagen	Konkav 2
		6	Erdung und Potentialausgleich	Konkav 2
G2	Belüftung	7	Mechanische Anlagenteile Axialventilatoren	Linear
		8	Mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	Linear
		9	Elektromechanische Anlagen-teile Axialventilatoren	Konvex 1
		10	Elektromechanische Anlagen-teile Strahlventilatoren	Konvex 1
		11	Regelung, Steuerung	Konvex 2
		12	Gebäudelüftung, Klimaanlage	Linear
G3	Beleuchtung	13	Einfahrtsbeleuchtung	Konvex 1

Gruppen Nr.	Gewerks-bezeichnung	Gewerks-Nr.	Gewerksbezeichnung	Modelltyp
		14	Innenstreckenbeleuchtung	Konvex 1
		15	Beleuchtung Quer-schläge/Fluchtwege	Konvex 1
		16	Fluchtweghinweis/ -orientierungsleuchte	Konvex 1
		17	Regelung, Messwerterfassung	Konvex 1
G4	Messeinrichtung	18	CO-Messung	Konvex 2
		19	Trübungsmessung	Konvex 2
		20	Längsgeschwindigkeitsmessung	Konvex 2
G5	Überwachung	21	Straßenverkehrszeichen	Konvex 1
		22	Verkehrszählung	Konvex 2
		23	Videoanlagen	Konvex 2
		24	Verkehrslichtsignalanlagen	Konvex 2
		25	Höhenkontrolle	Konvex 2
		26	Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen	Konvex 2
G6	Notruf	27	Notruf	Konvex 1
G7	TelefonFunkSchall	28	Telefonanlage	Konvex 1
		29	Funkanlagen	Konvex 1
		30	Beschallungsanlage	Konvex 1
G8	AnlagenBrand	31	Brandmeldeanlage Kabel	Konvex 1
		32	Brandmeldeanlage Steuerung	Konvex 2
		33	Löscheinrichtungen	Konkav 1
		34	Löschwasserversorgung	Konkav 2
		35	Lösch- und Bindemittelvorrat	Konkav 2
G9	Steuerung	36	Automatisierung	Konvex 2
		37	Prozessvisualisierung	Konvex 2
		38	Archivierung/Datenauswertung	Konvex 1
G10	GewSchutz	39	Gewässerschutzanlagen	Konkav 3
G11	Sonstiges	40	Schachtbefahrung	Konkav 3
		41	Türen, Tore, Verkleidungen	Konkav 3
		42	Krane und Hebezeuge	Konkav 2

Tabelle 30: Degradationsverläufe unterschiedlicher baulicher Anlagenteile

Bauteil-Nr.	Bauteilbezeichnung	Modelltyp
1	Abdichtung und Entwässerung	Konkav 3
2	Ausrüstung	Linear
3	Betriebseinrichtungen und Nischen	Konkav 3
4	Erhöhter Seitenstreifen	Konkav 3
5	Fahrbahnbelag	Konkav 2
6	Fluchtwege	Konkav 3
7	Kavernen	Konkav 3
8	Portal	Konkav 2
9	Schächte	Konkav 3
10	Tunnelröhre	Konkav 2
11	Zwischendecke Tragwerk	Konkav 1

4.4.1.1 Konfidenzfaktoren der Ausfallswahrscheinlichkeit

Ziel einer Inspektion bzw. einer Prüfung ist es, den Zustand eines Bauwerks, bzw. eines Ausrüstungsteils zu bestimmen und falls bereits Schädigungen aufgetreten sind, diese direkt zu beurteilen. In der Risk Based Inspection werden sogenannte Konfidenzfaktoren (Confidence Factors, CF) verwendet, um die Qualität der Ausgangsdaten, die der Beurteilung zugrunde liegen, zu bewerten.

In der nachfolgenden Tabelle 31 und Tabelle 32 ist ein Vorschlag für derartige Konfidenzfaktoren dargestellt. Die Multiplikation der Teilwerte CF_M und CF_D mit der Grundausfallswahrscheinlichkeit (PoF_0) ergibt die Wahrscheinlichkeit eines Funktionsverlustes (PoF) für das betrachtete Objekt (bauliche Anlage, E&M Gewerk).

Liegt das Rechenergebnis ($PoF_0 > 75$, CF = 1,33) über 100, so wird von einem Funktionsverlust von 100% ausgegangen

Tabelle 31: Konfidenzfaktor für Monitoring (CF_M)

Konfidenzfaktor Monitoring	CF_M
Sondermonitoring	0,8
Monitoring gem. aktueller Richtlinien und Vorschriften (RVS)	1,0
Intervalle des Monitorings um mindestens zwei Jahre länger als gem. den Vorschriften	1,2

Tabelle 32: Konfidenzfaktor für die Datenqualität (CF_D)

Konfidenzfaktor Datenqualität	CF_D
Zusätzlich zur standardisierten Qualitätskontrolle wurden die aktuellen Daten mit Daten aus früheren Erfassungen verglichen und ggf. zum Vergleich hochgerechnet	0,9
Standardisierte Qualitätskontrolle	1,0
Mangelnde und/oder nicht nachvollziehbare Qualitätskontrolle	1,1

4.4.2 Identifikation und Quantifizierung der Konsequenzen

Auf der Konsequenzenachse der Risikomatrix wird die Auswirkung eines Ausfalls als eindimensionale Größe ausgedrückt. Aufgrund der hohen Bedeutung der Streckenverfügbarkeit bietet sich als Grundgröße die Dauer der Verfügbarkeitseinschränkung infolge eines ungeplanten Ausfalls an. Diese wird faktorisiert durch die Art der Verfügbarkeitseinschränkung (Totalsperre, Behinderung), die Verkehrsbelastung am jeweiligen Streckenabschnitt (JDTV), die Netzsensitivität (Umleitungsmöglichkeiten) und die Verfügbarkeit von Ersatzteilen der ausfallenden Komponenten:

$$\mathrm{CoF_i} = \mathrm{CF_{D,i}} \cdot \mathrm{CF_{A,i}} \cdot \mathrm{CF_V} \cdot \mathrm{CF_S} \cdot \mathrm{CF_{EV,i}} \text{ mit } [0 \leq \mathrm{CoF_i} \leq 100]$$

mit:

$CF_{D,i}$: Dauer der Verfügbarkeitseinschränkung bei Ausfall einer Komponente/Komponentengruppe

$CF_{A,i}$: Art der Verfügbarkeitseinschränkung

CF_V: Verkehrsbelastung JDTV

CF_S: Netzsensitivität: leistungsfähige Umleitung/Ausleitung vorhanden

$CF_{EV,i}$: Ersatzteilverfügbarkeit des betreffenden Gewerkes

Unter Ausfall wird hier bei elektromaschinellen Komponenten in erster Linie ein Funktionsverlust verstanden, bei bautechnischen Komponenten hingegen eine unzulässige Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit (Verkehrssicherheit). Der berechnete CoF-Wert wird für die praktische Anwendung mit einem Wert von 100 nach oben begrenzt.

Tabelle 33: Konsequenzkategorien für Tunnelbauwerke

CoF-Kategorie	Berechneter CoF-Wert
A	[0-20]
B	[20-40]
C	[40-60]
D	[60-90]
E	>90

4.4.2.1 Dauer der Verfügbarkeitseinschränkung (CF_D)

Die mit dem Faktor $CF_{D,i}$ in den Kategorien „Stunden“, „Tage“ und „Wochen“ (vgl. Tabelle 34) quantifizierte Verfügbarkeitseinschränkung umfasst die Dauer einer allfälligen Sperre einer betroffenen Röhre (Unterschreitung der minimalen Betriebsbedingungen) sowie die allfällig beschriebene Zeitspanne der jeweiligen Einschränkung infolge des unmittelbaren Ausfalls sowie die Einschränkungen zur Behebung des Ausfalls.

Ein nicht sicherheitskritisches Ausfallsereignis kann dabei zu einer Einschränkung während der notwendigen Behebung führen, muss aber nicht zwangsläufig zu einer Verfügbarkeitseinschränkung zwischen Ausfall und Behebung führen (z.B. „betriebsrelevante Ausfälle“, siehe dazu auch weiter unten Kapitel 4.4.2.2).

Tabelle 34: CF_D-Faktor

Dauer der Verfügbarkeitseinschränkung	$CF_{D,i}$
Stunden	10
Tage	40
Wochen	100

Diese Einschränkungen in den drei Kategorien (Stunden, Tage, Wochen) wurden für alle elektromaschinellen und bautechnischen Gewerke und deren Komponenten gemeinsam mit der ASFiNAG erarbeitet. Der Zuordnung der Einschränkung liegt das Szenario zugrunde, dass eine wesentliche Komponente ausfällt. Die in dieser Hinsicht ungünstigste Komponente mit der größten Verfügbarkeitseinschränkung bestimmt die Zuordnung des

jeweiligen übergeordneten Gewerks. Von der Zugrundelegung relativ unwahrscheinlicher worst-case Szenarien (z.B. gleichzeitiger Ausfall auf Feldebene sämtlicher Leuchtmittel oder Strahlventilatoren oder gleichzeitiger Ausfall aller Redundanzen und Rückfallebenen) wurde dabei Abstand genommen. Ein Ausfall von Steuerungen auf der Leitebene, welcher z.B. zum systemweiten Ausfall von Komponenten führt, wurde hingegen sehr wohl berücksichtigt.

Das Ergebnis dieser komponenten- und gewerkspezifischen Zuordnung der Dauern der Verfügbarkeitseinschränkungen ist im Anhang D zusammengefasst.

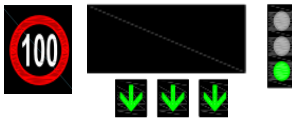
4.4.2.2 Art der Verfügbarkeitseinschränkung (CF_A)

Wenn die minimalen Betriebsbedingungen, welche im Sinne der RVS 09.04.11 [24] für den sicheren Betrieb der Anlage notwendige Voraussetzung ist, nicht mehr gegeben sind, resultiert dies in einer unmittelbar erforderlichen Sperre der betroffenen Tunnelröhre. Ein derartiges Ereignis wird als „sicherheitskritisch“ bezeichnet. Die Behebung muss schnellstmöglich erfolgen, damit die Tunnelanlage wieder in Betrieb genommen werden kann.

Wenn die Anlage trotz Ausfalls einer Komponente weiter betrieben werden kann, jedoch bis zur Behebung Verfügbarkeitseinschränkungen erforderlich werden (z.B. Sperre eines Fahrstreifens, Geschwindigkeitsreduktion), wird das Ereignis als „betriebskritisch“ bezeichnet. Die Behebung ist hier dringlich erforderlich, um die volle Verfügbarkeit alsbaldig wiederherzustellen.

Wenn der Ausfall einer Komponente an sich zunächst keine spürbare Verfügbarkeitseinschränkung erfordert, sondern erst die Behebung, dann wird das Ereignis als „betriebsrelevant“ bezeichnet. Die Behebung ist hier weniger dringlich, sondern vielmehr planbar und kann in einer absehbar verkehrsarmen Zeit (Nacht, Wochenende) disponiert werden.
Schließlich gibt es noch Komponenten und Gewerke, bei denen weder der Ausfall noch die Behebung einen spürbaren Einfluss auf die Verfügbarkeit haben (z.B. örtlicher Blitzschutz und Erdung, bauliche Ausrüstung in Lüfterkavernen).

Tabelle 35: CF_A-Faktor

Kategorie	Verfügbarkeit	Beispiel für Schaltung Verkehrsmatrix	Disposition/ Behebung	$CF_{A,i}$
Sicherheitskritisch (minimale Betriebs-bedingung nicht ge-geben)	Ausfall einer RFB/Röhre bis Behebung		sofort	1,00 RV 1,50 GV
betriebskritisch	Betriebsein-schränkung ab Ausfall bis Behe-bung		dringlich	0,50
betriebsrelevant	keine Betriebs-einschränkung ab Ausfall, je-doch während Behebung		Planbar (z.B. in verkehrsarmer Zeit)	0,25
nicht betriebsrele-vant	keinerlei Be-triebseinschrän-kung bei Ausfall und Behebung		planbar	0,00

4.4.2.3 Verkehrsbelastung im betroffenen Abschnitt (C_{FV})

Der Bedeutung der jeweiligen Tunnelanlage im Gesamtnetz wird über eine Faktorisierung entsprechend der Verkehrsstärke (JDTV) in Tabelle 36 Rechnung getragen.

Tabelle 36: CF_V-Faktor

JDTV [Kfz/24h): Gesamtquerschnitt	CF_V
<25.000	0,8
25.001 – 50.000	0,9
50.001 – 75.000	1,0
>75.000	1,1

4.4.2.4 Netzsensitivität – Umleitungsmöglichkeiten (CF_S)

Die Kritikalität der Anlage im Gesamtnetz wird über einen Faktor der Netzsensitivität abgebildet, mit den Abstufungen gemäß Tabelle 37.

Tabelle 37: CF_S-Faktor

Umleitung	CF_S
Ausleitung über ASFiNAG-Netz (A+S-Straßen) oder GV-Betriebskonzept vorhanden	0,75
Ausleitung nur über sekundäres Netz (B+L-Straßen)	1,00
Ausleitung über kommunales/städtisches Netz (G-Straßen) oder großräumige Umleitung	1,25

4.4.2.5 Ersatzteilverfügbarkeit (C_{EV})

Auf Grundlage einer Sichtung der historischen Daten bez. Alter und Ersatzteilverfügbarkeit i.S.d. RVS 13.03.41 [19] wurden alle EM-Gewerke drei verschiedenen altersabhängigen Übergängen (nach 7a, 10a bzw. 15a) zugeordnet. Bei bautechnischen Komponenten wird für den Faktor C_{EV} stets der Wert 1,0 angenommen, da hier Ersatzteilverfügbarkeit keine Relevanz hat.

5 ZIELSYSTEME FÜR OPTIMIERTE REGELELEBENSZYKLEN – DELIVERABLE 4.1

5.1 Regellebenszyklen

5.1.1 Definition Regellebenszyklus

Unter Heranziehung des anlagen- bzw. gewerkbezogenen Maßnahmenkatalogs können unterschiedliche Kombinationen von Einzelmaßnahmen zu übergeordneten Maßnahmengruppen erstellt werden, die eine wesentliche Grundlage für die Gestaltung der Regellebenszyklen bilden. Von wesentlicher Bedeutung sind die Abhängigkeiten der Erhaltungsmaßnahmen, sodass das Auslösen einer bestimmten Erhaltungsmaßnahe an einem bestimmten Gewerk oder einer bestimmten bautechnischen Anlage auch weitreichende Auswirkungen auf andere Gewerke oder Anlageteile nehmen kann. Dies bedeutet auch, dass Gewerke oder Anlagen dann instandgesetzt bzw. sogar erneuert werden müssen, wenn deren Zustand noch eine längere technische Nutzungsdauer ermöglichen würde, jedoch aufgrund der Abhängigkeiten zu anderen, bereits beeinträchtigten Gewerken oder Anlageteilen eine Erhaltungsmaßnahme unabdingbar ist.

Im Rahmen von OPtimAL wird unter einem Regellebenszyklus eine standardisierte Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen (bezogen auf die Bauteile und die Gewerke) unter der Verwendung von vorgegeben (standardisierten und technisch sinnvollen) Erhaltungsintervallen verstanden. Um der Vorgabe einer Standardisierung bzw. technisch-sinnvollen Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen gerecht zu werden, sind jedoch folgende Einschränkungen zu betrachten und zu berücksichtigen:

- Vermeidung von unkontrollierten Maßnahmenabfolgen: z.B. jedes Jahr eine kleinere und/oder größere Erhaltungsmaßname
- Bevorzugung einer Bündelung von Erhaltungsmaßnahmen zu umfangreicheren gewerk- und anlageübergreifenden Erhaltungsprojekten zur Verringerung der Verkehrsbeeinträchtigung sowie zur effizienten Gestaltung von Erhaltungsprojekten
- Abwägung der Erhaltungsintervalle zwischen der Notwendigkeit aus dem Zustand, der Verkehrsbeeinträchtigung und dem Erhaltungsrisiko (vgl. Kapitel 5.1.2)
- Reduktion der Kosten durch die Steigerung der Effizienz von abhängigen Erhaltungsmaßnahmen aus der Sicht der Verkehrsbeeinträchtigung und der Planung

5.1.2 Spannungsfeld Zustand, Verkehrsbeeinträchtigung und Erhaltungsrisiko

Die Auswahl von optimalen Zeitpunkten für das Durchführen von Erhaltungsmaßnahmen im Bereich von Tunnelobjekten ist eine komplexe Aufgabe, die von einer großen Anzahl von Einflussgrößen abhängig ist, die in die folgenden Kategorien unterteilt werden können:

- Bautechnischer bzw. technischer Zustand der Gewerke und der Anlageteile
- Auswirkungen einer Erhaltungsmaßnahme auf den Betrieb und den Verkehrsablauf im Tunnelobjekt sowie ggf. Auswirkungen auf Umleitungsstrecken bei Tunnelsperren oder intensiven verkehrlichen Beeinträchtigungen (Stichwort Umgehungsverkehr)
- Erhaltungsrisiko als Funktion der Wahrscheinlichkeit des Ausfalls einer Anlage und der damit verbundenen Konsequenzen (vgl. Deliverable 3.1 [36] bzw. Kapitel 4)

Diese Gruppierung zeigt bereits deutlich, dass die Anforderungen oft in Konkurrenz zu einander stehen und dass die Auswahl eines optimalen Erhaltungszeitpunktes nicht für jeden Teilbereich die optimale Lösung darstellen kann, sofern überhaupt eine optimale Lösung gefunden werden kann. Aus der Sicht der Verkehrsbeeinträchtigung ist jenes Szenario die optimale Lösung, welches keine Beeinträchtigung mit sich zieht, was jedoch in fast allen Fällen eine unmögliche Lösung darstellt. Die Abschätzung und letztendlich die Auswahl eines optimalen Regellebenszyklus stellt somit immer einen Kompromiss dar, in welchem zwischen Ausfallswahrscheinlichkeit und den Konsequenzen abgeschätzt werden muss. In diesem Sinn ist auch das Zielsystem für die Optimierung zu wählen, wobei die Einflussfaktoren für die Definition des Risikos (sowohl auf der Seite der PoF als auch auf der Seite der CoF) entscheidend sind.

Darüber hinaus spielen auch noch die strategischen Vorgaben der ASFINAG eine wesentliche Rolle. Die Vermeidung der Beeinträchtigung hängt nicht nur von der Verkehrsbelastung selbst, sondern auch von der Örtlichkeit der Tunnelanlage ab (Korridor) und dem Zeitpunkt, wann die Erhaltungsmaßnahme vorgenommen wird (Urlauberverkehr). Der Algorithmus von OPtimAL ist dabei so gestaltet, dass gerade im Bereich der Einflussgrößen für die Risikobewertung diesen Umständen Rechnung getragen werden kann (siehe hierzu Deliverable 3.1 [36])

5.1.3 Eingangsgrößen für die Beschreibung der Regellebenszyklen

5.1.3.1 Zustandsprognosemodelle

Eine wesentliche Eingangsgröße für die Beschreibung der standardisierten Regellebenszyklen liefern die im Rahmen des gegenständlichen Projektes entwickelten Zustandsprognosemodelle für die baulich konstruktiven Anlageteile sowie die E&M-Gewerke.

5.1.3.2 Maßnahmenabhängigkeiten

Speziell für die Beurteilung und Bewertung der Regellebenszyklen ist es erforderlich, die Abhängigkeiten zwischen den baulich-konstruktiven Anlageteilen (Bauteile) untereinander sowie den E&M-Gewerken untereinander aber auch zwischen den Bauteilen und den E&M-Gewerken zu betrachten. In diesem Zusammenhang wurde als Vorschlag für die praktische Umsetzung im Asset Management System eine solche Abhängigkeits- bzw. auf die Werke aggregierte Wechselwirkungsmatrix erstellt.

5.1.3.3 Regellebenszyklen baulich-konstruktive Anlageteile (Bauteile)

Die im Rahmen von Arbeitspaket 3 entwickelten Zustandsprognosemodelle der baulich-konstruktiven Anlageteile erlauben auch eine generelle Aussage über den Umfang der Erhaltungsmaßnahmen auf die einzelnen Bauteile. Da die absolute Anzahl der betroffenen Bauteile in einem bestimmten Jahr bzw. Intervall nur bedingt aussagekräftig ist, wird gleich der kumulierte Prozentsatz des Anlagenanteils verwendet.

Die nachfolgende Abbildung 38 zeigt die Anteile der Maßnahmeneingriffe der baulich-konstruktiven Anlageteile (Bauteile) über eine Betrachtungsperiode von 130 Jahren, was deutlich höher ist als der Zeithorizont für Analysen. Diese lange Betrachtungsperiode ermöglicht die Beurteilung von wiederkehrenden Zyklen. Hierfür wurden auch die mittleren Verhaltensfunktionen herangezogen und die Zeitpunkte der Eingriffe in solchen Jahren gewählt, in denen die Bauteile die Zustandsnote 4 aufweisen. Da die Note 4 auch über einen längeren Zeitraum in der Prognose vorhanden ist, war es einerseits möglich, die Erhaltungsmaßnahmen mit anderen Bauteilen zu kombinieren und andererseits auch die Streuung der Prognosen in den unterschiedlichen Familien herauszurechnen. Das Ergebnis dieser ingenieurmäßigen Betrachtung ist in Abbildung 38 dargestellt. Wird ein Bauteil zur Gänze instandgesetzt oder erneuert, ergibt sich ein Wert von 100%. Werden mehrere Bauteile gleichzeitig instandgesetzt, so kann in Abhängigkeit vom Umfang der Maßnahme (direkt, aufgrund der Notwendigkeit durch den Zustand des Bauteils oder des Gewerks, oder indirekt durch die

Maßnahme auf einem anderen Bauteil) auch ein hoher Gesamtprozentsatz erreicht werden (z.B. im Jahr 80 von fast 800%).

Da der Umfang jedoch von der aktuellen Note abhängig ist, werden häufig nur bestimmte Anteile des Bauteils für eine Sanierung vorgesehen. Diesem Umstand wird in dieser Auswertung Rechnung getragen. Die Anzahl der betroffenen Bauteile mal dem entsprechenden Prozentsatz der Instandsetzung ergibt die Höhe der Balken der Ordinate in Abbildung 38.

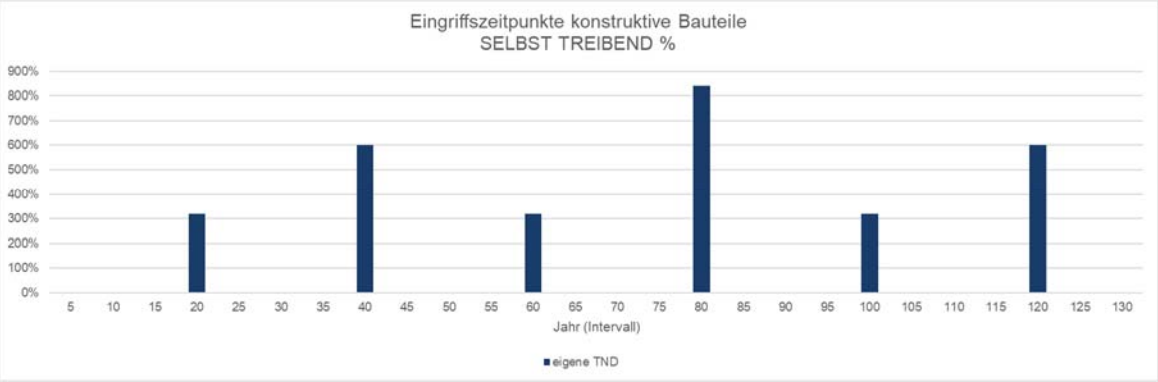


Abbildung 38: Anteil der Maßnahmeneingriffe für baulich-konstruktive Bauteile

Abbildung 38 zeigt sehr deutlich die Schwerpunktjahre für die Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen, wobei mit Ausnahme der Lüftungsschächte und Kavernen die Zustandsprognose einen 20- jährigen Zyklus erkennen lässt. Lüftungsschächte und Kavernen zeigen einen Zyklus von 40 Jahren, sodass in den Jahren 40, 80 und 120 auch der höchste Anteil erkennbar ist. Der Maßnahmenanteil am jeweiligen Bauteil (% betroffene Fläche, Länge, etc.) variiert natürlich innerhalb des Lebenszyklus. Die Anteile an betroffenen Bauteilen variiert in den jeweiligen Jahren sehr stark, wobei im Jahr 80 fast alle Bauteile mit einem hohen Prozentsatz betroffen sind.

In einem nächsten Schritt wäre es notwendig gewesen, die Abhängigkeiten der Erhaltungsmaßnahmen zwischen den Bauteilen noch explizit in diese Betrachtung einzurechnen. Da jedoch mit Ausnahme der Lüftungsschächte und Kavernen immer alle Anlageteile bzw. Bauteile im Zyklus von 20 Jahren durch Instandsetzungsmaßnahmen betroffen sind (mit unterschiedlichem Ausmaß in Abhängigkeit vom Zustand) und auch viele Bauteile nur bedingt voneinander abhängig sind, ergibt sich kein Unterschied zur Darstellung in Abbildung 38. Dieser Regellebenszyklus kann daher direkt für die weiterführenden Betrachtungen herangezogen werden.

5.1.3.4 Regellebenszyklen E&M-Gewerke

Wie bereits in der Einleitung zu diesem Bericht beschrieben, spielen die Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen E&M-Gewerken im Rahmen von Erhaltungsmaßnahmen für die Beschreibung der Regellebenszyklen eine wesentliche größere Rolle als bei den baulich-konstruktiven Anlageteilen. Gerade jene Gewerke, die in den meisten Fällen aufgrund der Abhängigkeiten nicht die technische Nutzungsdauer (TND) erreichen, erhöhen den Aufwand von Erhaltungsmaßnahmen und somit auch die damit verbundenen Kosten bzw. notwendigen Investitionen.

Die nachfolgende Abbildung 39 zeigt zunächst die Anzahl der betroffenen Gewerke in den jeweiligen Jahren (Intervallen), die aufgrund der Prognose der technischen Nutzungsdauer (TND) einer Erhaltungsmaßnahme unterzogen werden müssen. Die Grundlage hierfür sind aus Gründen der Vereinfachung die Werte der RVS 13.03.41 [19] (sind auf 5-jährige Basisintervalle abgestimmt), die, wie bereits erwähnt, sehr ähnlich zu den aus den Daten abgeleiteten Prognosemodellen sind. Die Abhängigkeiten sind dabei noch nicht berücksichtigt. Es zeigt sich jedoch bereits sehr deutlich, dass es Schwerpunktjahre gibt, wo eine hohe Anzahl von Maßnahmen durchgeführt werden kann; es sind dies zunächst die Jahre 20, 30, 40 und 60 und in einem wiederkehrenden Zyklus die Jahre 80, 90 100 und 120. Für die gegenständliche Betrachtung wurde eine Betrachtungsdauer von 130 Jahren gewählt, um wiederkehrende Muster erkennen zu können. Die Jahre mit der größten Anzahl von Gewerken sind die Jahre 60 und 120, die auch die Grenze für die wiederkehrenden kleineren Zyklen darstellen. Es zeigt sich deutlich, dass ein nahezu wiederkehrender Zyklus von 60 Jahren zu beobachten ist, wobei aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsdauern in gewisse Abweichungen zu erkennen sind (vgl. Jahr 40 und Jahr 100).

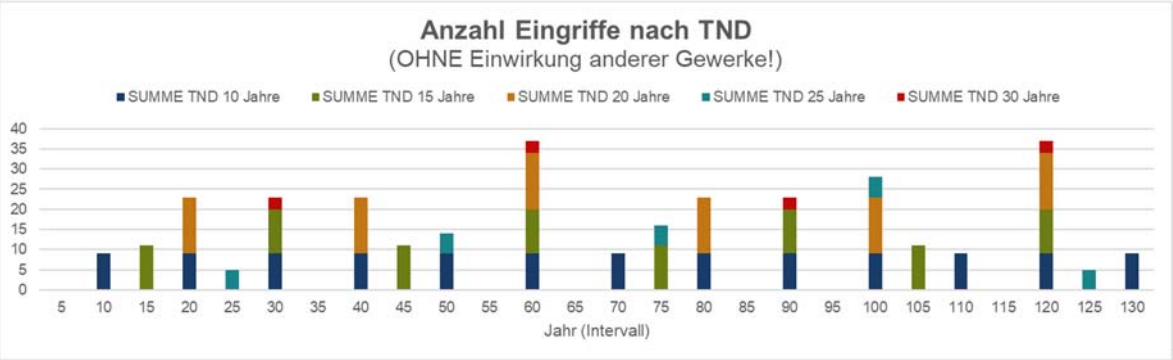


Abbildung 39: Anzahl der Maßnahmeneingriffe ohne Einwirkungen anderer Gewerke mit Information über die Gruppe der TND

Als zusätzliche Information ist in Abbildung 39 noch die Verteilung der Gruppen der technischen Nutzungsdauern im jeweiligen Jahr dargestellt. D.h., dass jene Maßnahmen, die ein

Erhaltungsintervall von 30 Jahren aufweisen (rote Kategorie) auch in den Intervallen bzw. Jahren 30, 60, 90 und 120 aufscheinen; dagegen Gewerke, deren technische Nutzungsdauer nur 10 Jahre beträgt, auch alle 10 Jahre für eine Erhaltungsmaßnahme vorgesehen sind. (dunkelblaue Kategorie).

Durch die Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen den Gewerken ändert sich das Bild deutlich. Da jedoch nicht immer ein beeinflusstes Gewerk zu 100% instandgesetzt werden muss, ist in den nachfolgenden Abbildungen auf der Ordinate der kumulierte Prozentsatz aufgetragen, sodass die Abhängigkeiten und deren Auswirkungen wesentlich besser erkannt werden können.

Abbildung 40 zeigt, in welchem Ausmaß, aufgrund der Abhängigkeiten, Gewerke von Erhaltungsmaßnahmen betroffen sind (grüne Kategorie). Es zeigt sich, dass diese Auswirkungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten sehr unterschiedlich sind. Wiederum sind die Jahre 20, 30, 40 und 60 und in einem wiederkehrenden Zyklus die Jahre 80, 90, 100 und 120 die Jahre bzw. Intervalle mit den meisten Erhaltungsmaßnahmen. Dies zeigt sich auch in der nachfolgenden Abbildung 41, wo auch die Gruppen der unterschiedlichen technischen Nutzungsdauern dargestellt sind. In dieser Abbildung ist nochmals deutlich der wiederkehrende Zyklus von 60 Jahren mit Abweichungen im Jahr 15, 40 und 50 zu Jahr 75, 100 und 110 zu erkennen.

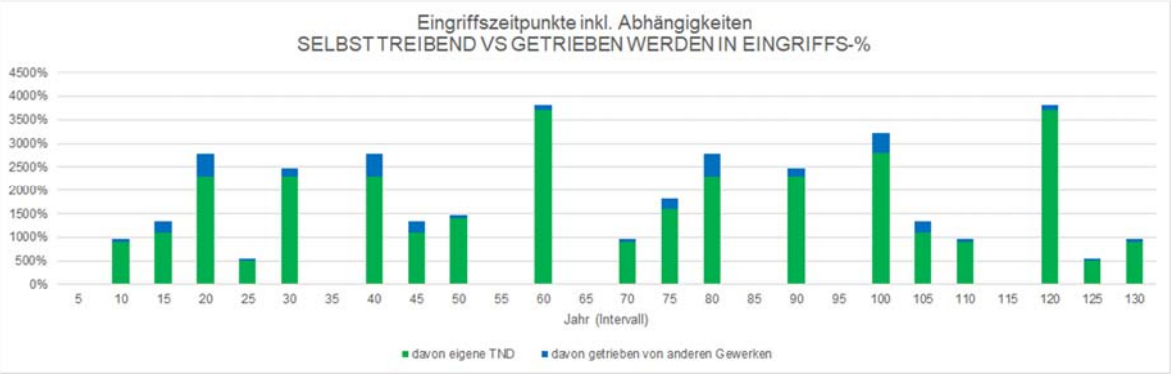


Abbildung 40: Anteil der Maßnahmeneingriffe mit Einwirkung anderer Gewerke

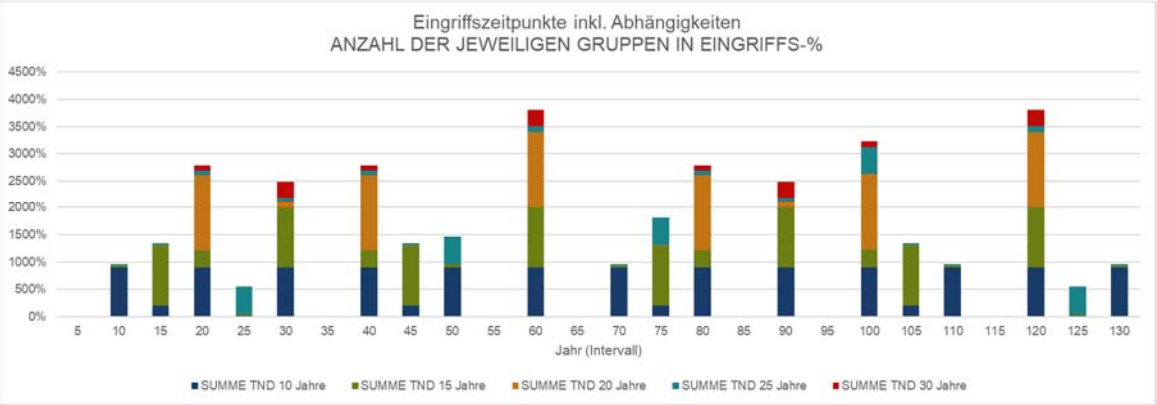


Abbildung 41: Anteil der Maßnahmeneingriffe mit Einwirkungen anderer Gewerke mit Information über die Gruppe der TND

Die Anzahl der betroffenen Gewerke als Auslöser oder als Betroffener ergibt zwar eine gute Aussage über den Umfang der Erhaltungsmaßnahmen; da jedoch die Erhaltungskosten je Gewerk sehr unterschiedlich sind, kann unter Heranziehung der von der ASFINAG zur Verfügung gestellten Kostengrundlagen diese Auswertung auch in eine monetäre Darstellung übertragen werden (vgl. Abbildung 42).

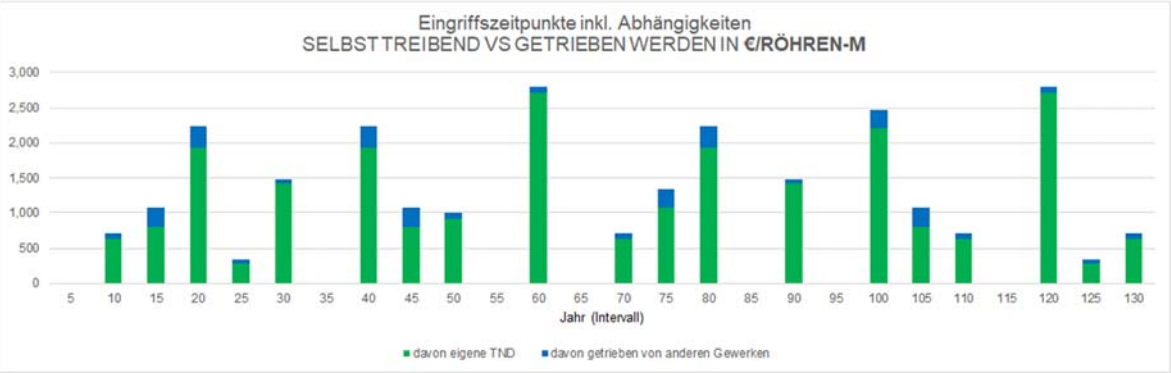


Abbildung 42: Mittlere Kosten der Maßnahmeneingriffe mit Einwirkung anderer Gewerke in €/Röhren-m

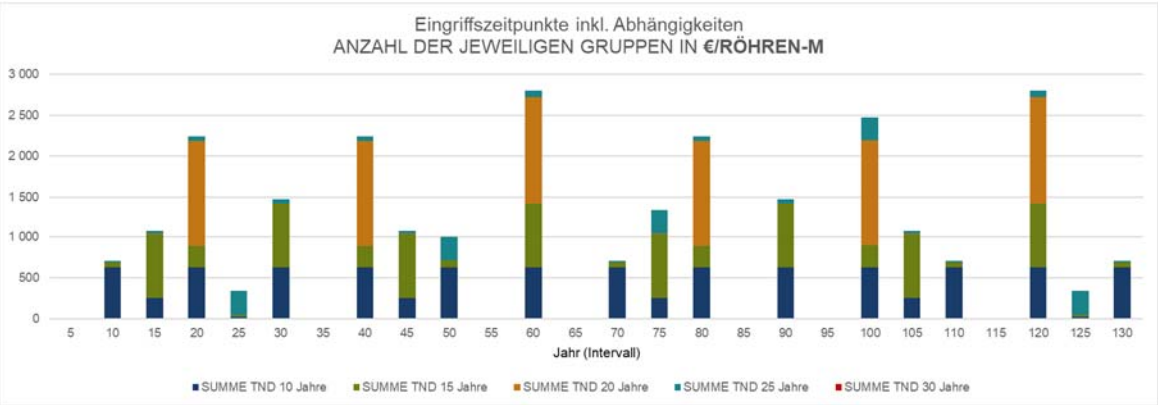


Abbildung 43: Mittlere Kosten der Maßnahmeneingriffe mit Einwirkungen anderer Gewerke mit Information über die Gruppe der TND in €/Röhren-m

Wiederum getrennt nach den unterschiedlichen Gruppen der technischen Nutzungsdauern können die Kosten der Abbildung 43 entnommen werden. Es zeigt sich in dieser Abbildung besonders gut, dass vor allem die Gewerke mit einer mittleren technischen Nutzungsdauer von 20 Jahren die Kostentreiber sind. Die identifizierten Schwerpunktjahre zeigen sich im Rahmen dieser Auswertung deutlich besser als lediglich bei der Anzahl der betroffenen auslösenden bzw. getriebenen Gewerke.

5.1.3.5 Vergleich der Regellebenszyklen der Bauteile und der E&M-Gewerke

In einem nächsten Schritt werden die Regellebenszyklen zwischen den Bauteilen und den E&M-Gewerken betrachtet, sodass bei gleichzeitiger Betrachtung und der damit verbundenen Abhängigkeiten auch eine bessere Ausgangslage für die Untersuchung bzw. Optimierung der Erhaltungsintervalle gegeben ist.

Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit sind in der nachfolgenden Abbildung 44 die Ergebnisse der Teilbetrachtungen gegenübergestellt, sodass ein direkter Vergleich möglich ist. Im Vergleich zu den E&M-Gewerken, wo Intervalle zwischen 5 und 10 Jahren den Regellebenszyklus prägen, ist das Hauptintervall der baulich-konstruktiven Anlageteile (Bauteile) mit 20 Jahren deutlich länger. Es zeigt sich jedoch, dass die Schwerpunktjahre beider Anlageteilgruppen gut übereinstimmen und damit auch die Maßnahmenabhängigkeiten nicht zu einem deutlich erhöhten Aufwand von betroffenen Gewerken (vor allem im Bereich von E&M) führen.

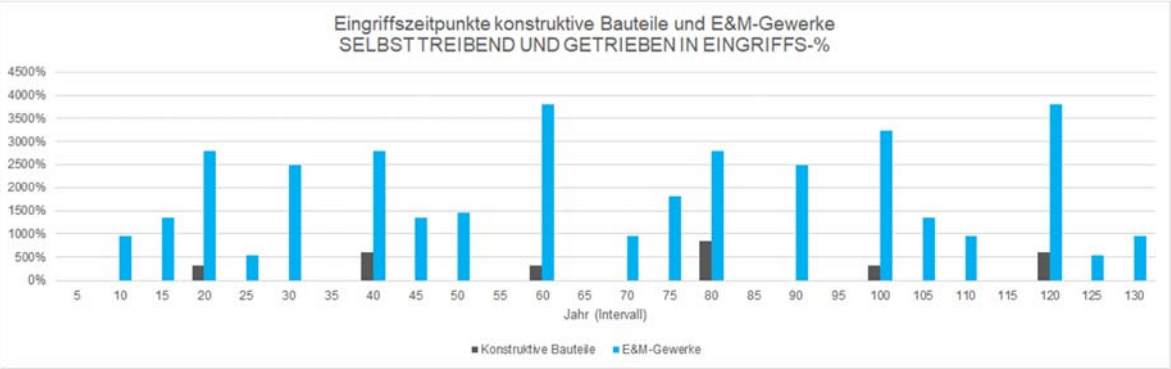


Abbildung 44: Vergleich der Regellebenszyklen baulich-konstruktive Anlageteile und E&M-Gewerke

Bei diesem Vergleich wurden mögliche Auswirkungen von E&M-Maßnahmen auf die konstruktiven Bauteile nicht berücksichtigt (z.B. Bauteil erhöhter Seitenstreifen ist von mehreren EM Gewerken betroffen und würde sich theoretisch auch zwischen den großen 20-

jährigen Intervallen bemerkbar machen), da dies zu keiner Änderung der Erkenntnisse führt. Im Rahmen der praktischen Umsetzung wurde diesem Umstand dann durch die Anwendung der zuvor erwähnten und beschriebenen Abhängigkeitsmatrix entsprechend Rechnung getragen.

Für die weiterführende Betrachtung zur Findung eines optimalen Erhaltungsintervalls sind die Informationen der hier dargestellten Regellebenszyklen eine ausreichende Grundlage. Um auch jene Gewerke effizient zu erhalten, erscheint die Optimierung eines Erhaltungsintervalls zwischen 5 und 10 Jahren sinnvoll und zweckmäßig und auch die maßgebende Randbedingung für die Festlegung des im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Zielsystems.

5.2 Definition von Zielsystemen für Regellebenszyklen

Ein wesentliches Ziel im Rahmen der gegenständlichen Aufgabenstellung liegt in der Ermittlung eines optimalen Erhaltungsintervalls für die Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen im Bereich der baulich-konstruktiven Anlageteile (Bauteile) und der E&M-Gewerke. Wie bereits im Kapitel 5.1.2 beschrieben, ist im Spannungsfeld der Entwicklung des Zustandes, der Kosten und des Erhaltungsrisikos, das Zielsystem für die Optimierung der Erhaltungsintervalle der Regellebenszyklen zu definieren.

Grundsätzlich können verschiedene Optimierungsansätze untersucht werden, die auch in unterschiedlichen Managementsystemen und für unterschiedliche Betrachtungsweisen sinnvoll und zweckmäßig erscheinen. Die nachfolgende Aufzählung gibt einen Überblick über mögliche Zielsystemformulierungen und deren Anwendungsbereiche:

- Minimierung Lebenszykluskosten: Diese Zielsystemformulierung kommt in der Regel dann zur Anwendung, wenn strikte Grenzwerte vorgegeben sind und die hierfür notwendigen Budgetmittel zur Einhaltung der strikten Grenzwerte auf jeden Fall zur Verfügung gestellt werden müssen (z.B. für die Erhaltungsplanung auf Konzessionsstrecken).
- Maximierung Level of Service: Diese Zielsystemformulierung versucht jenes Erhaltungsintervall zu definieren, dass den bestmöglichen Level of Service (LoS) unter budgetären Restriktionen findet, wobei der Level of Service in der Regel über die Anforderungen der Nutzer bestimmt wird.
- Minimierung Ausfallrate / Ausfallwahrscheinlichkeit (Maximierung Zuverlässigkeit): Diese Zielsystemformulierung geht von der Annahme aus, dass jenes Erhaltungsintervall gefunden werden muss, bei welchem die Kennzahlen für die Bestimmung

des Ausfalls zum Minimum werden, wobei in der Regel budgetäre Vorgaben einzuhalten sind. Dieses Zielsystem ist zu unterscheiden von jenem des minimierten Erhaltungsrisikos, welches neben der Ausfallsrate auch die Konsequenzen der jeweiligen Ausfälle mit bewertet (siehe weiter unten).

- Maximierung der Wirtschaftlichkeit: Diese Zielsystemformulierung versucht unter budgetären Restriktionen das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis für eine Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen auf einem Objekt und folglich über das gesamte Netz zu finden. Dabei muss ggf. auch auf konstante Intervalle bzw. auf Regellebenszyklen verzichtet werden, da die Abfolge der Maßnahmen mit unterschiedlichen Intervallen die Vielzahl von zu bewertenden Erhaltungsmaßnahmenstrategien bestimmt und häufig erst eine Optimierung ermöglicht.
- Minimierung der Verkehrsbeeinträchtigung (bzw. Maximierung der Streckenverfügbarkeit) und Minimierung der externen Kosten: Bei dieser Variante der Minimierung werden in erster Linie die Nutzerindikatoren berücksichtigt, sodass die Intervalle ausschließlich von der Wirkung auf den Nutzer abhängig gemacht werden. In den meisten Fällen bedeutet dies eine optimale Lösung im Bereich von langen Erhaltungsintervallen, bei denen der Zustand jener Anlagenteile, die keine direkten Auswirkungen auf den Nutzer aufweisen, häufig vernachlässigt werden. Auch die Investitionen zeigen Lösungen, die oft sehr schnell zu einer Verbesserung führen und tiefgreifende Maßnahmen zeitmäßig nach hinten schieben.
- Maximale Ausnutzung der Abnutzungsvorräte im zulässigen Rahmen definierter Grenzzustände: Die Abnutzungsvorräte werden soweit ausgereizt, dass zum letztmöglichen Zeitpunkt eine Erhaltungsmaßnahme vorgenommen wird. Dies bedeutet auch, dass die Erhaltungsintervalle sehr lang werden, sofern nicht durch budgetäre Restriktionen frühere und somit günstigere Maßnahmen (Instandsetzung vs. Erneuerung) erzwungen werden. Auch bei dieser Zielsystemformulierung kann nur mehr bedingt auf Standardintervalle und Regellebenszyklen zurückgegriffen werden.
- Minimierung der Erhaltungsrisiken (Verfügbarkeitsrisiko): Durch eine Verknüpfung der Ausfallswahrscheinlichkeit mit der Konsequenzenseite ergibt sich hier eine Ansprache von mehreren Zielgrößen im Rahmen der Optimierung. Wird das Erhaltungsbudget als Restriktion verwendet, muss auch in diesem Zusammenhang auf Standardintervalle und Regellebenszyklen verzichtet werden.

Die große Anzahl von möglichen Zielsystemdefinitionen (ein Anspruch auf Vollständigkeit wird an dieser Stelle nicht erhoben) zeigt bereits, dass die Auswahl für die gegenständliche Fragestellung keine einfache Aufgabe darstellt. Sie hängt auch von den strategischen Unternehmenszielen des Erhaltungsmanagements ab und ist auch für jeden anderen möglichen Anwendungsfall von den jeweiligen Fachexperten zu diskutieren ist.

Unter Bezugnahme auf die zuvor gegebene Definition eines Regellebenszyklus, sowie der Untersuchung der Erhaltungsintervalle für die baulich-konstruktiven Anlageteile (Bauteile) und die E&M-Gewerke sowie einer intensiven Diskussion der Fachexperten wurde folgendes Zielsystem für die Optimierung vorgeschlagen und nachfolgend praktisch umgesetzt.

Die Zielvorgabe der Analyse besteht darin, das **Erhaltungsrisiko**, welches im Rahmen vom Arbeitspaket 3 definiert wurde, **durch eine entsprechende Variation der Erhaltungsintervalle** zu **minimieren**. Da für die praktische Durchführung der Optimierung ein iterativer Berechnungsprozess angewendet wurde, ist eine eindeutige Definition der Zielfunktion für das Optimierungsproblem nicht erforderlich. Der Zielwert im iterativen Prozess ist das Erhaltungsintervall. Unter Bezugnahme auf das Angebot zu diesem Projekt wurde gemeinsam mit der ASFINAG diese Zielvorgabe als Berechnungsvariante gewählt.

Die Auswahl des Erhaltungsrisikos beinhaltet einerseits die Wahrscheinlichkeit eines Versagens (eines Bauteils oder eines Gewerks), andererseits aber auch die damit verbundenen Konsequenzen auf die Nutzer durch eine Abschätzung der Auswirkungen des nicht geplanten Versagens. Die Auswirkungen auf andere Stakeholder wurden dabei nicht berücksichtigt, da in erster Linie die Anwendung der ausgewählten Methodik im Vordergrund steht. Es sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass es sich nicht um die direkten Auswirkungen von geplanten Erhaltungsmaßnahmen auf den Nutzer handelt, sondern um Auswirkungen, die dann entstehen, wenn plötzlich ein Bauteil oder ein Gewerk versagt. Dies bedeutet, dass vor allem bei längeren Intervallen das Risiko von einzelnen Gewerken steigen kann, sofern diese tatsächlich auch auf der Auswirkungsseite die entsprechenden Effekte zeigen. Im Rahmen der Optimierung soll dieses optimale Erhaltungsintervall gefunden werden.

Als Randbedingungen für die Optimierung muss die Definition des Regellebenszyklus angewendet werden, was jedoch auch bedeutet, dass keine budgetären Grenzen berücksichtigt werden können. Dies würde wiederum ein variables Intervall bzw. auch eine variable Abfolge der Erhaltungsmaßnahmen erfordern. Wie bereits beschrieben, entsprechen unkontrollierte Maßnahmenabfolgen nicht einem Regellebenszyklus.

Wie bereits zuvor erwähnt, können verschiedene Zielsysteme auch verschiedene Fragen unter verschiedenen Randbedingungen beantworten. Die Formulierung der gegenständlichen Zielfunktion basiert auf einer intensiven Diskussion, in welcher Form das definierte Erhaltungsrisiko (ist auch Fragestellung des gesamten Projektes) mit den Vorgaben eines auf Regelzyklen basierenden Erhaltungsmaßnahmenmodell verknüpft werden kann. Die gegenständliche Lösung ist dabei nur eine mögliche Lösung, die jedoch aus der Sicht der Experten die Fragestellung hinreichend gut beantworten kann. Andere Fragestellungen erfordern auch andere Zielfunktionen. Ist z.B. das Erhaltungsbudget die maßgebende Restriktion, so kann auch z.B. die Maximierung der Wirtschaftlichkeit die Zielfunktion definieren. Im Rahmen des gegenständlichen Projektes werden diese weiteren Fragestellungen nicht behandelt. Sie können aber mit der hier entwickelten Methodik und Implementierung in dTIMS (vgl. 6.3) untersucht werden und es wird auch seitens der Forschungsnehmer empfohlen, diese im Rahmen von umfassenden Anwendungsfällen im Detail zu untersuchen. Wie bereits erwähnt, wurde gemeinsam mit der ASFINAG ein einziges Zielsystem für die praktische Anwendung ausgewählt (gem. den Vorgaben im Projektantrag).

Die praktische Umsetzung der Zielvorgabe bzw. des Zielsystems im verwendeten Asset Management System erfolgte im Rahmen eines heuristischen und iterativen Prozesses. Als Ergebnis kann der Zusammenhang zwischen Erhaltungsintervall, Risikoentwicklung, Zustandsentwicklung und den erforderlichen Investitionen genauer analysiert werden.

5.3 Ergebnisse der Analyse und optimales Erhaltungsintervall

5.3.1 Zielsetzung

Eine wesentliche Fragestellung des gegenständlichen Projektes war die Entwicklung der Grundlagen für das Finden eines optimalen Erhaltungsintervalls unter Bezugnahme auf das Tunnelportfolio der ASFINAG. Dabei steht zunächst nicht das Finden eines optimalen Erhaltungsintervalls im Vordergrund, sondern die Entwicklung der für die Beurteilung und Bewertung verschiedener Lösungen unter Heranziehung der im Rahmen des Projektes entwickelten Algorithmen und Modelle. Die praktische Anwendung soll auch zeigen, ob die Algorithmen und Modelle für die Beantwortung einer solchen Fragestellung herangezogen, in ein Asset Management System implementiert und die Tunneldaten damit analysiert werden können.

Natürlich spielen auch die erzielbaren Ergebnisse eine wesentliche Rolle, sodass die Anwendung der Algorithmen und Modelle auf die Daten der ASFINAG eine erste Grundlage für eine Diskussion über Erhaltungsintervalle und Regellebenszyklen darstellt, die erst im

Rahmen einer umfassenden Implementierung in die Geschäftsprozesse der ASFINAG im Asset Management detailliert analysiert und behandelt werden müssen.

5.3.2 Ergebnisse der Algorithmus- und Modellanwendungen auf das ASFINAG Tunnelportfolio

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen unterschiedliche Ergebnisse im Rahmen der Algorithmus- und Modellanwendung auf das ASFINAG Tunnelportfolio. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass fast sämtliche Tunnelobjekte der Analyse unterzogen werden konnten. Insgesamt handelt es sich um 307 Tunnelröhren bzw. -objekte, die im Rahmen des Datenmanagements erhoben bzw. mit den entsprechenden Daten hinterlegt wurden. Die Zustände und Alter der Tunnelröhren sind sehr unterschiedlich, sodass auch alle Arten von Erhaltungsmaßnahmen und Zyklenbereiche abgedeckt werden können. Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich somit auf eine Analyse sämtlicher Tunnelanlangen und zeigen natürlich auch die entsprechende Streuung. Nach der Bearbeitung der Daten hat sich gezeigt, dass entgegen dem Projektantrag, wo nur einige Tunnel einer Analyse unterzogen werden sollten, es sinnvoll und zweckmäßig ist, alle in der Datenbank befindlichen Tunnel zu analysieren. Dieser Mehraufwand führt jedoch zum Vorteil, dass die Ergebnisse der Optimierung das gesamte Tunnelportfolio repräsentieren. Es sei jedoch an dieser Stelle nochmals explizit darauf hingewiesen, dass es sich beim gegenständlichen Projekt um ein Forschungsprojekt und nicht um ein Implementierungsprojekt handelt. Daher wurden auch nicht alle Zielsysteme untersucht.

Unter Heranziehung der Risikodefinition wurde für die unterschiedlichen untersuchten Erhaltungsintervalle unter Heranziehung von Lebenszyklen der einzelnen Gewerksgruppen das mittlere Erhaltungsrisiko über alle Tunnelobjekte errechnet. Das mittlere Erhaltungsrisiko ist dabei das arithmetische Mittel der Gesamtrisiken der Einzelobjekte, wobei für die Ermittlung der Gesamtrisiken ein Durchschlagskriterium zur Anwendung gelangt. Dies bedeutet, dass das höchste Risiko eines konstruktiven Anlageteils oder E&M-Gewerkes das Gesamtrisiko für das jeweilige Tunnelobjekt bestimmt. Durchschlagskriterien sind in der Risikobetrachtung vor allem bei der Zusammenführung von unterschiedlichen Risiken eine häufig verwendete Methode. Eine Aufsummierung des Risikos wird an dieser Stelle nicht empfohlen, da das höchste Risiko repräsentativ ist und die anderen Risiken „schlägt“.

Grundsätzlich könnte in diesem Zusammenhang auch noch eine entsprechende auf das Gewerk abgestimmte Gewichtung herangezogen werden, da jedoch die Konsequenzachse bereits die Bedeutung des Gewerkes abbildet, wurde auf eine weiterführende Gliederung bzw. Gewichtung verzichtet.

Das Ergebnis kann Abbildung 45 entnommen werden und zeigt einen Verlauf, der starken Streuungen unterworfen ist. Grundsätzlich liegt das mittlere Risiko in der gelben Kategorie (siehe Legende in Abbildung 45) und schwankt je nach Erhaltungsintervall. Ein Erreichen der grünen Kategorie für alle Objekte ist nicht möglich, da durch die Erhaltungsmaßnahmen ausschließlich der PoF-Wert verändert werden kann. Der CoF-Wert bzw. die CoF-Kategorie stellt eine nahezu konstante Größe dar, die lediglich durch eine Veränderung der Verkehrsbelastung über die Zeit in eine höhere Klasse fallen kann oder durch eine Änderung der Ersatzteilverfügbarkeit im Rahmen einer Maßnahme geringfügig niedriger werden kann. Damit ist das primäre Steuerungsinstrument für die Erhaltung der PoF-Wert. Hier ist auch zu beachten, dass die Risikoverteilung keine Zustandsverteilung darstellt, wo durch intensive Investitionen das gesamte Tunnelportfolio (theoretisch) in einen guten bzw. sehr guten Zustand geführt werden kann.

Einen wesentlich besseren Überblick gibt der Durchschnitt des mittleren Erhaltungsrisikos, welches in der nachfolgenden Abbildung 46 dargestellt ist. Dabei zeigt sich wiederum, dass die Unterschiede im mittleren Risiko in Abhängigkeit vom Erhaltungsintervall relative gering sind und eine Spannweite von 0,6 Risikopunkten aufweisen, wo der geringste Wert bei einem Intervall von 6 Jahren und der höchste Wert bei einem Intervall von 9 Jahren erkennbar ist.

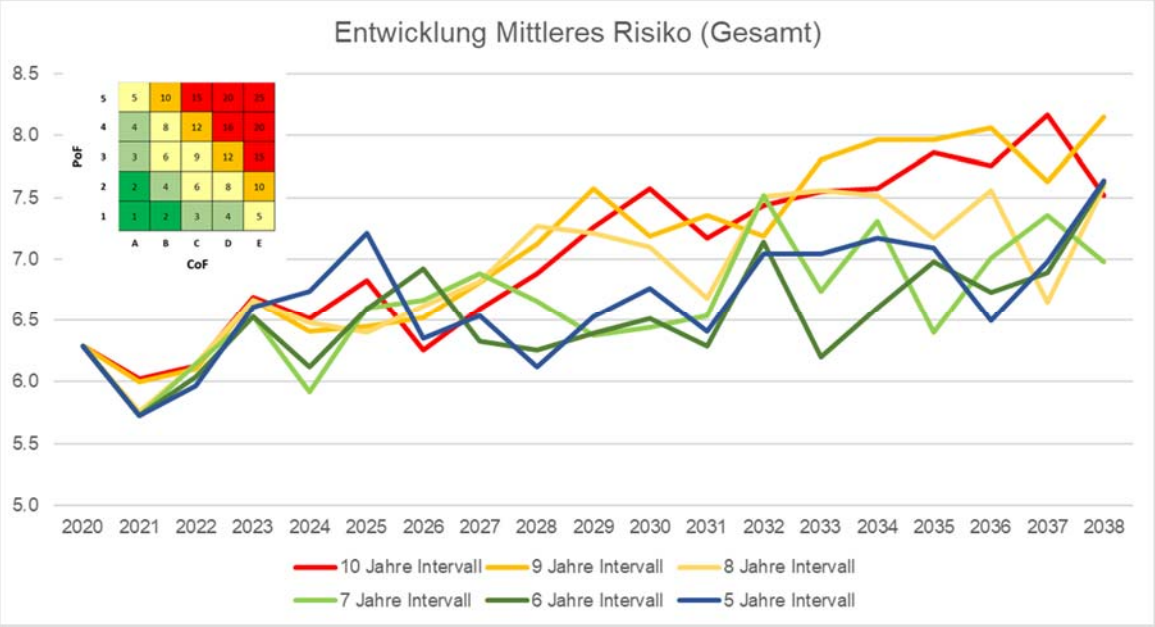


Abbildung 45: Entwicklung mittleres Erhaltungsrisiko für unterschiedliche Erhaltungsintervalle

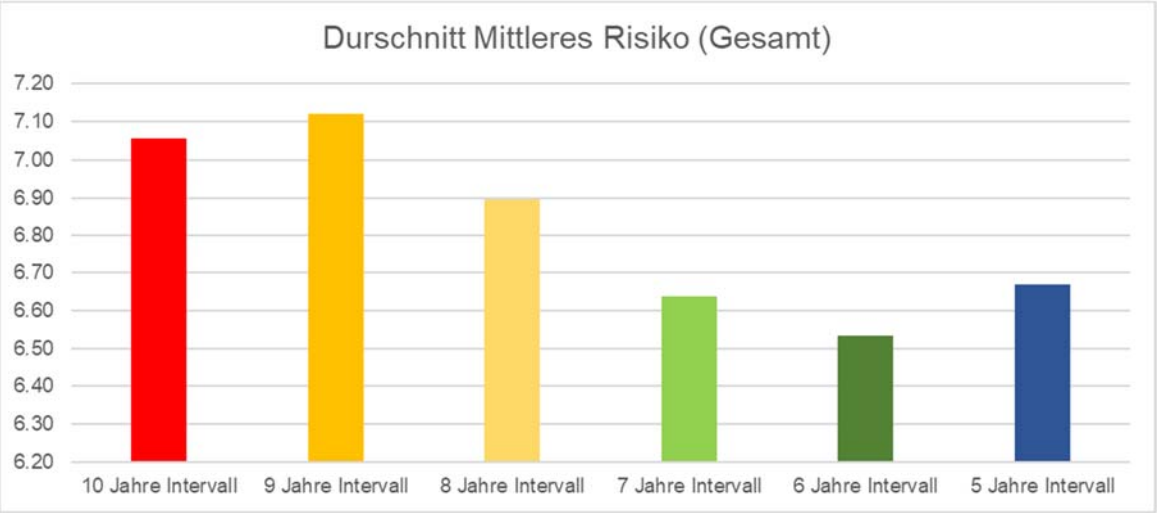


Abbildung 46: Durchschnittliches mittlere Erhaltungsrisiko für unterschiedliche Erhaltungsintervalle

Das durchschnittliche beste Risikoniveau kann anhand der Abbildung 46 für einen Erhaltungsintervallbereich von 6 und 7 Jahren festgestellt werden. Ein deutlicher Anstieg ist bereits ab einem Intervall von 8 Jahren erkennbar.

Neben dem mittleren Risiko ist natürlich auch die Verteilung des Risikos in den einzelnen Risikoklassen von wesentlicher Bedeutung. Dies kann individuell für jedes Szenario ausgewertet werden und ist auch im Rahmen der praktischen Anwendung in dTIMS durchgeführt worden (Beispiel siehe nachfolgende Abbildung 47). Diese Ergebnisse können somit abgefragt werden. Für den Vergleich ist vor allem der Anteil in den Kategorien „orange“ und „rot“ von wesentlicher Bedeutung.

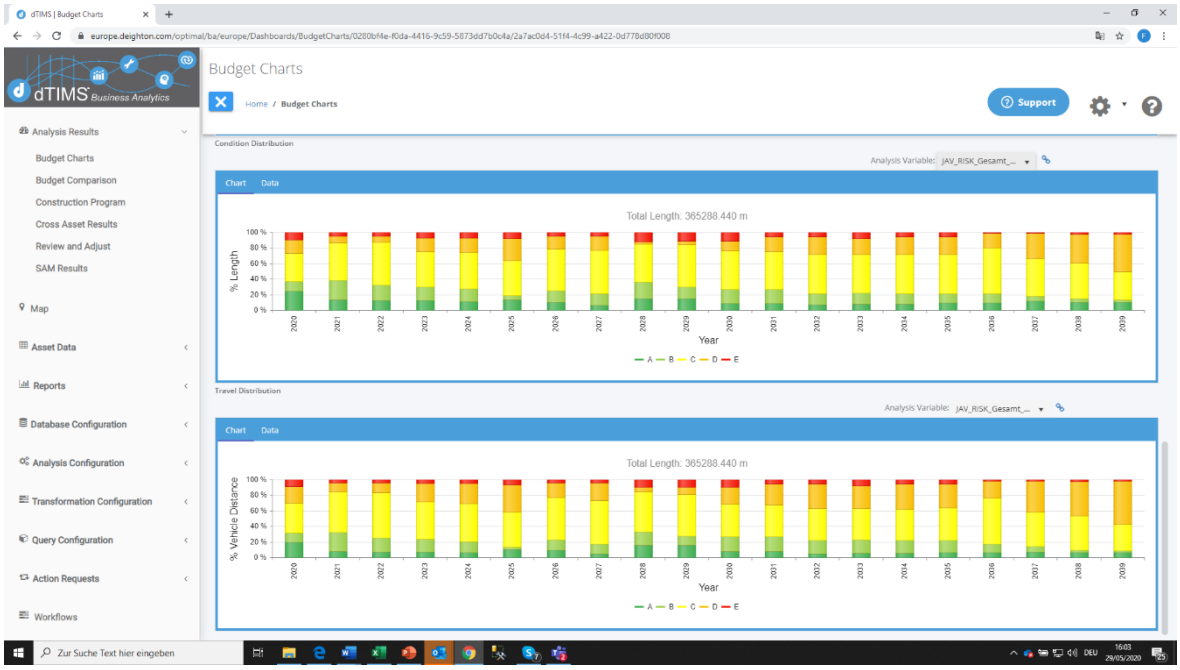


Abbildung 47: dTIMS OPtimAL Prototyp – Bildschirmausdruck – Risiko Gesamt (ohne/mit Verkehrsgewichtung)

Auf eine detaillierte Darstellung dieser Detailergebnisse wurde an dieser Stelle verzichtet, da im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes die Methodik und deren Möglichkeiten aufgezeigt werden. Im Rahmen einer praktischen Implementierung sind weiterführende Darstellungen und Berichte für die unterschiedlichen Zielsysteme unerlässlich. Die hier dargestellten Ergebnisse können daher auch nicht für strategische Entscheidungen im Erhaltungsmanagement der Tunnel herangezogen werden.

Neben dem mittleren Erhaltungsrisiko wurde deshalb nur der Erhaltungsrückstand (Länge Tunnelröhre in der orangen und roten Risikokategorie) zusätzlich beispielhaft ausgewertet. In der nachfolgenden Abbildung 48 ist der Verlauf über die 19 Jahre Betrachtungsperiode dargestellt. Sie zeigt die Längenanteile des Erhaltungsrückstandes für jedes Erhaltungsintervall. Es sei hier nochmals erwähnt, dass sämtliche Tunnel, die in der Datenbank zur Verfügung standen, für diese Darstellung verantwortlich zeichnen. Daher zeigt sich neuerlich eine starke Streuung für die unterschiedlichen Intervalle.

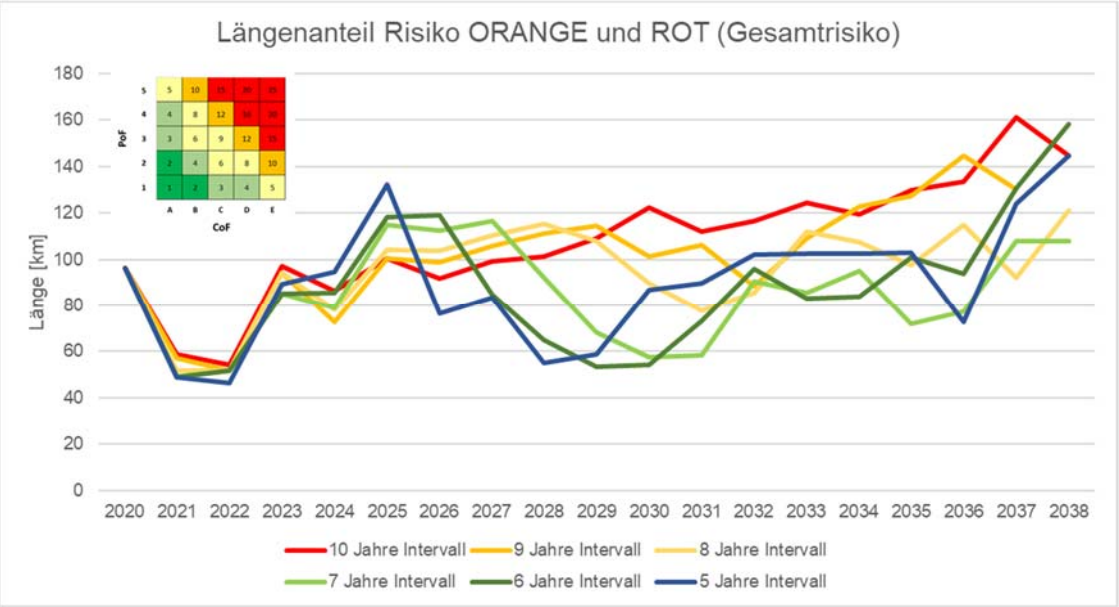


Abbildung 48: Entwicklung Erhaltungsrückstand für unterschiedliche Erhaltungsintervalle

Abbildung 49 ist wiederum eine Zusammenfassung der Ergebnisse des Risikorückstandes unter Heranziehung des Durchschnitts bzw. Mittelwertes über die Betrachtungsperiode.

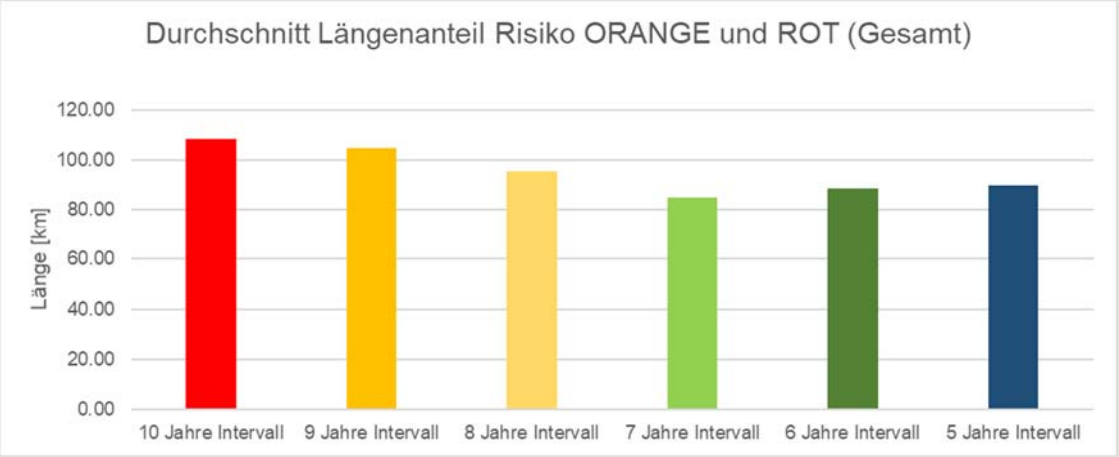


Abbildung 49: Durchschnitt Erhaltungsrückstand für unterschiedliche Erhaltungsintervalle

Auch bei diesem Ergebnis zeigt sich, dass das optimale Erhaltungsintervall bei 7 bzw. 6 Jahren gefunden werden kann. Ein Anstieg des Risikorückstandes ergibt sich wiederum ab einem Intervall von 8 Jahren mit einem deutlichen Anstieg gegenüber den Werten mit geringerem Erhaltungsintervall.

Da im Rahmen der Übergabe von Daten auch Kosten für die unterschiedlichen Erhaltungsmaßnahmen übermittelt wurden, ist es auch möglich, wiederum in Abhängigkeit vom Erhaltungsintervall, die über die Betrachtungsperiode kumulierten Kosten zu ermitteln. In der Abbildung 50 sind diese geschätzten Investitionen graphisch dargestellt.

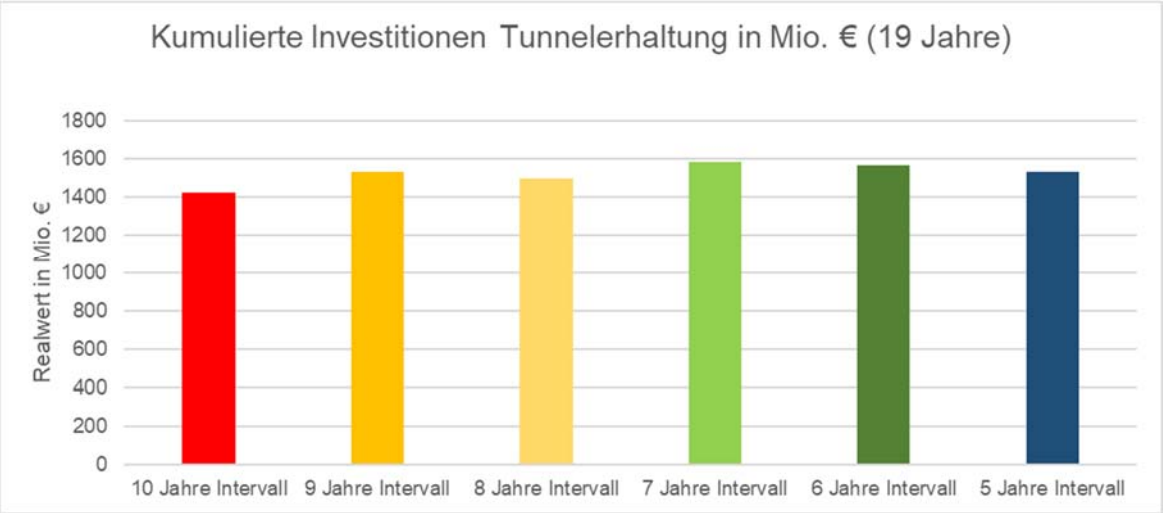


Abbildung 50: Kumulierte Erhaltungskosten für unterschiedliche Erhaltungsintervalle

Die Grafik zeigt, dass die Investitionen zwischen 1,4 und 1,6 Mrd. € (Realwert) schwanken und natürlich jene Varianten, die auch das geringste Risiko aufweisen, die höchsten Investitionen benötigen. Grundsätzlich sind die Investitionen starken jährlichen Schwankungen ausgesetzt, die sich aufgrund des aktuellen Zustandes des gesamten Tunnelportfolios und der konstanten Intervalle innerhalb eines Szenarios ergeben. Bei dieser Darstellung ist zu beachten, dass die hier dargestellten Kosten ausschließlich die Instandsetzung und Erneuerung betreffen. Erweiterungen aufgrund von Verbesserungen der Sicherheitsausstattung, der Erhöhung der Leistungsfähigkeit, etc. sind darin nicht enthalten. Auch die zur Verfügung gestellten Einheitspreise der Maßnahmen beziehen sich ausschließlich auf Bau- und Ausrüstungsleistungen. Die Kosten z.B. für Verkehrsumlegungen sind ebenfalls nicht enthalten. Aus diesem Grund ist ein Vergleich mit den tatsächlichen Investitionen bzw. mit geplanten Investitionen mit Vorsicht vorzunehmen. Im Rahmen der Diskussionen mit dem Auftraggeber wurde auf diesen Umstand hingewiesen. Die Ergebnisse in Abbildung 50 sollen aber zeigen, dass mit dieser Methodik auch die Kosten- bzw. Investitionsfrage diskutiert werden kann.

Praktisch gesehen müssten natürlich hier gezielte Anpassungen getätigt werden, wobei auch die Zuordnung eines Tunnelobjekts am Beginn der Analyse hier einen wesentlichen Einfluss hat. Ungeachtet der Streuung kann natürlich auch eine mittlere jährliche, geschätzte Investitionssumme errechnet werden, die in der nachfolgenden Abbildung 51 in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Erhaltungsintervallen grafisch dargestellt ist. Die ermittelten Werte liegen zwischen 75 und 83 Mio. €/Jahr (Realwert, Preisbasis 2019).

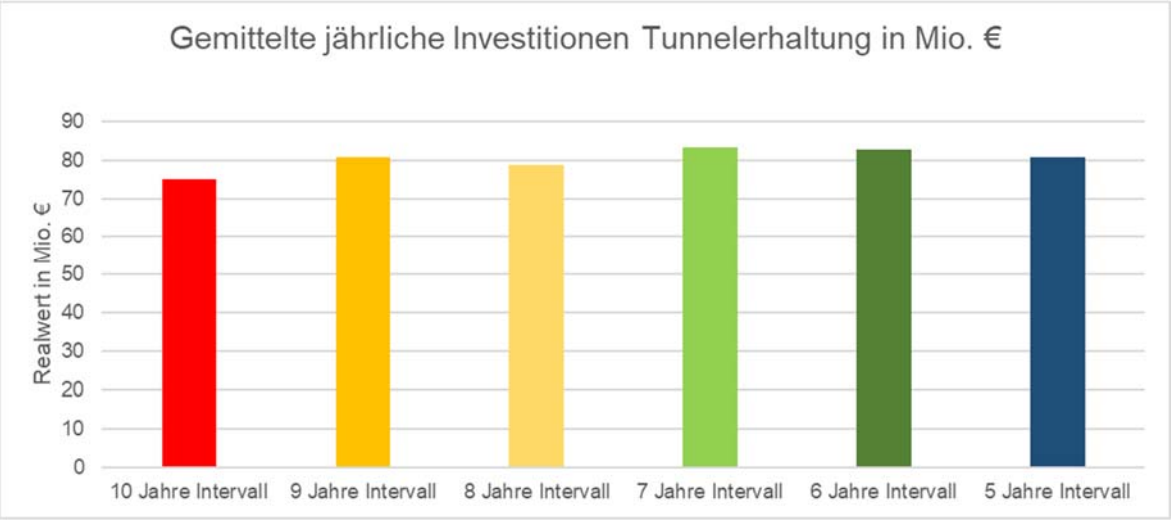


Abbildung 51: Kumulierte Erhaltungskosten für unterschiedliche Erhaltungsintervalle

Es sei hier nochmals explizit erwähnt, dass die hier dargestellten Ergebnisse für das gesamte Tunnelportfolio gelten; jedoch die Grundlagen für die netzweite Betrachtung auf den Ergebnissen jedes einzelnen Tunnelobjekts basieren. Eine Abstimmung bzw. ein Vergleich dieser Ergebnisse mit den tatsächlichen Investitionen in die untersuchten Anlagenteile wurde nicht vorgenommen und ist auch nicht die Aufgabe des gegenständlichen Projektes. Auch eine Übernahme und Untersuchung des aktuellen Bauprogramms in die Analysen wurde nicht vorgenommen, kann jedoch jederzeit unter Heranziehung der entwickelten Datenbank und Analysealgorithmen im Rahmen eines Implementierungsprojektes vollständig umgesetzt werden. Dies obliegt jedoch dem Auftraggeber.

6 ÜBERTRAGUNG AUF ASFINAG GESAMTPORTFOLIO – DELIVERBALE 5.1

6.1 Einleitung

Die Hauptaufgabe des Arbeitspaketes 5 bestand darin, die in den Arbeitspaketen (AP) 2-4 gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen eines Pilotversuchs zu testen und zu evaluieren. Hierbei werden die entwickelten Grundlagen und Ergebnisse zunächst in einen lauffähigen Lebenszyklusalgorithmus überführt und in Form einer eigenen Systemkonfiguration in die IMT-Software dTIMS (Deighton Total Infrastructure Management System) implementiert, welche von der ASFINAG im Bereich Asset Management eingesetzt wird. Die Ziele der praktischen Anwendung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Praktische Anwendung der Ergebnisse und Erkenntnisse im Rahmen des systematischen Erhaltungsmanagements der ASFINAG
- Entwicklung einer lauffähigen Systemkonfiguration für die Implementierung in das IMT der ASFINAG unter Heranziehung der Asset Management Software dTIMS in Form eines Prototyps
- Anwendung von Beispieldaten auf den Prototyp
- Entwicklung eines Implementierungshandbuches für die praktische Umsetzung unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Erstellung des Prototyps
- Darstellung von Verbesserungspotentialen in der ganzheitlichen Erhaltungsplanung

Die praktische Umsetzung der gewonnenen Erfahrungen ist ein wesentlicher Meilenstein bei der Beurteilung von theoretischen Grundlagen und somit auch eine maßgebende Zielsetzung des gegenständlichen Projektes.

6.2 Generelle Vorgehensweise

Die generelle Vorgehensweise bei der Implementierung der Algorithmen und Modelle im Rahmen einer praktischen Anwendung besteht aus den folgenden Tätigkeiten bzw. Aufgabenschwerpunkten:

6.2.1 Erstellung der IMT-Systemkonfiguration „Tunnel: Bau- und E&M-Technik“ (Prototyp)

Unter Verwendung der Asset Management Software dTIMS werden die gewonnenen Grundlagen und Ergebnisse in einen lauffähigen Lebenszyklusalgorithmus überführt und in die Software dTIMS in Form eines Prototyps implementiert. Der Algorithmus besteht dabei aus folgenden Modulen bzw. Bausteinen:

- Datenbankstruktur zur Speicherung der Daten
- Algorithmus zur Aufbereitung bzw. Zusammenführung der Daten
- Zustandsprognose unter Verwendung der zuvor entwickelten Prognosemodelle für die entsprechenden bewertungsabhängigen und zeitrelevanten Indikatoren (Analysevariablen)
- Maßnahmenkatalog Erhaltung Tunnel Bau- und E&M-Technik (Kosten, Wirkungen, Anwendungsgrenzen, Dauer etc.)
- Analyseszenarien zur Bestimmung der Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und der Optimierung (Zielfunktion)
- Erstellung von Berichtsvorlagen für die Ergebnisauswertung

6.2.2 Praktische Anwendung Lebenszyklusalgorithmus mit den Daten der ASFINAG

Im Zuge der praktischen Anwendung wird der in dTIMS implementierte Algorithmus (Prototyp) mit den von der ASFINAG übergebenen Daten befüllt und getestet. Die Analyseergebnisse (bauteil- bzw. gewerksbezogene Erhaltungsmaßnahmenvorschläge) werden auf Objekt- und Netzebene bewertet und im Hinblick auf deren Aussagegenauigkeit und Relevanz evaluiert. Darüber hinaus wird anhand der Ergebnisse auch eine Abschätzung eines optimalen Erhaltungsintervalls vorgenommen. Die praktische Anwendung mit den Daten der ASFINAG besteht somit aus folgenden Schritten:

- Import der Daten der ASFINAG
- Aufbereitung der Daten der ASFINAG
- Analyse der Daten der ASFINAG
- Kontrolle und Nachkorrektur des Analysealgorithmus anhand der Analyseergebnisse

- Analysen zur Ermittlung und Abschätzung eines optimalen Erhaltungsintervalls und Aufbereitung der Ergebnisse

6.3 Software dTIMS

dTIMS (deighton's Total Infrastructure Management System) ist ein holistisches Infrastructure Asset Management System, welches es dem Infrastrukturbetreiber erlaubt, sämtliche Anlagen der Infrastruktur zu verwalten, zu referenzieren, zu erhalten und im Rahmen einer nachhaltigen Lebenszyklusbetrachtung zu managen.

dTIMS umfasst mehrere Komponenten. Für die strategische Erhaltungsplanung steht mit dTIMS Business Analytics (dTIMS BA) ein Instrument für die Planung und die Unterstützung von Entscheidungen zur Verfügung. Für den operativen Betrieb der Infrastruktur kann auf die Systemkomponente dTIMS Operations Management (dTIMS OM) zurückgegriffen werden.

Zusammen bilden dTIMS BA, dTIMS OM und das Management Dashboard dTIMS Business Intelligence (dTIMS BI) ein Smart-Management System der vierten Generation. Im Rahmen des gegenständlichen Projektes wurde auf die Komponente dTIMS Business Analytics (dTIMS BA) zurückgegriffen.

6.4 Bausteine der Systemkonfiguration

Die für das gegenständliche Projekt erstellte Systemkonfiguration besteht aus verschiedenen Bausteinen, die wie folgt zusammengefasst werden können:

- Datenbankstruktur und Datenmanagement
  - Datentabellen
  - Attribute (Datenfelder)
  - Daten und Dateninhalte
  - Datenaufbereitung und -kontrolle
- Analysekonfiguration
  - Analysevariablen
  - Maßnahmenkatalog
  - Analyseset und Szenario für Optimierung

Eine detaillierte Beschreibung der Konfiguration kann dem Deliverable 5.1 [38] entnommen werden. Nachfolgend einige Bildschirmausdrucke der gegenständlichen dTIMS Konfiguration.

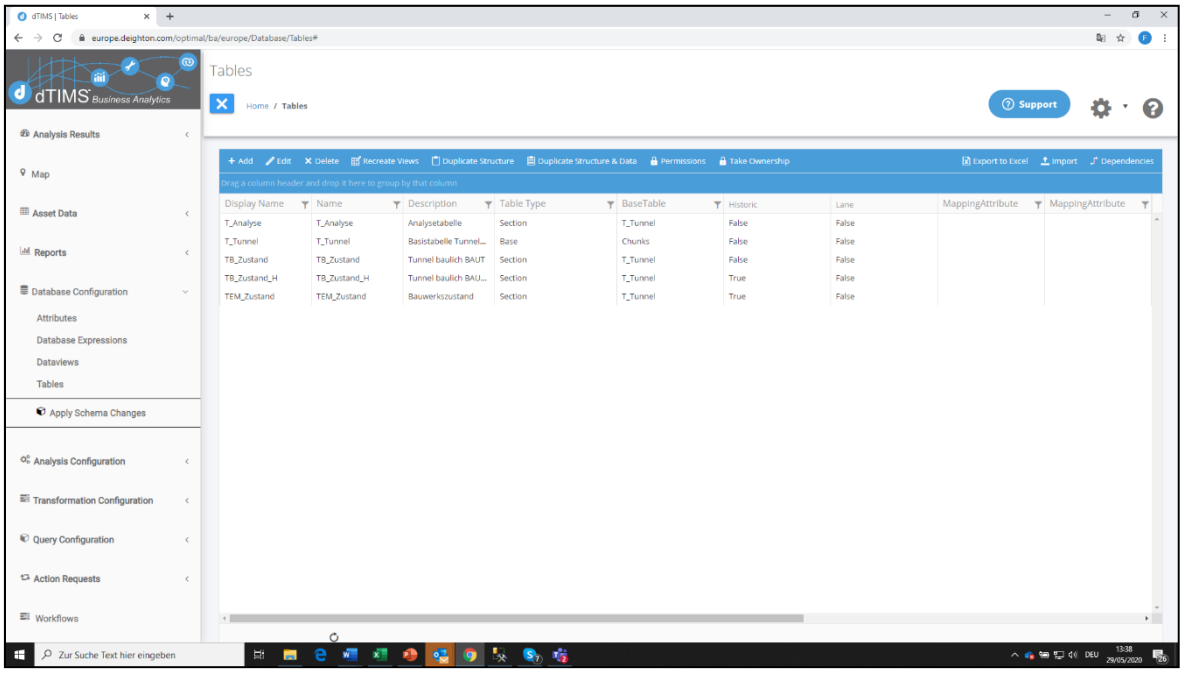


Abbildung 52: dTIMS OPtimAL Prototyp – Bildschirmausdruck - Datentabellen

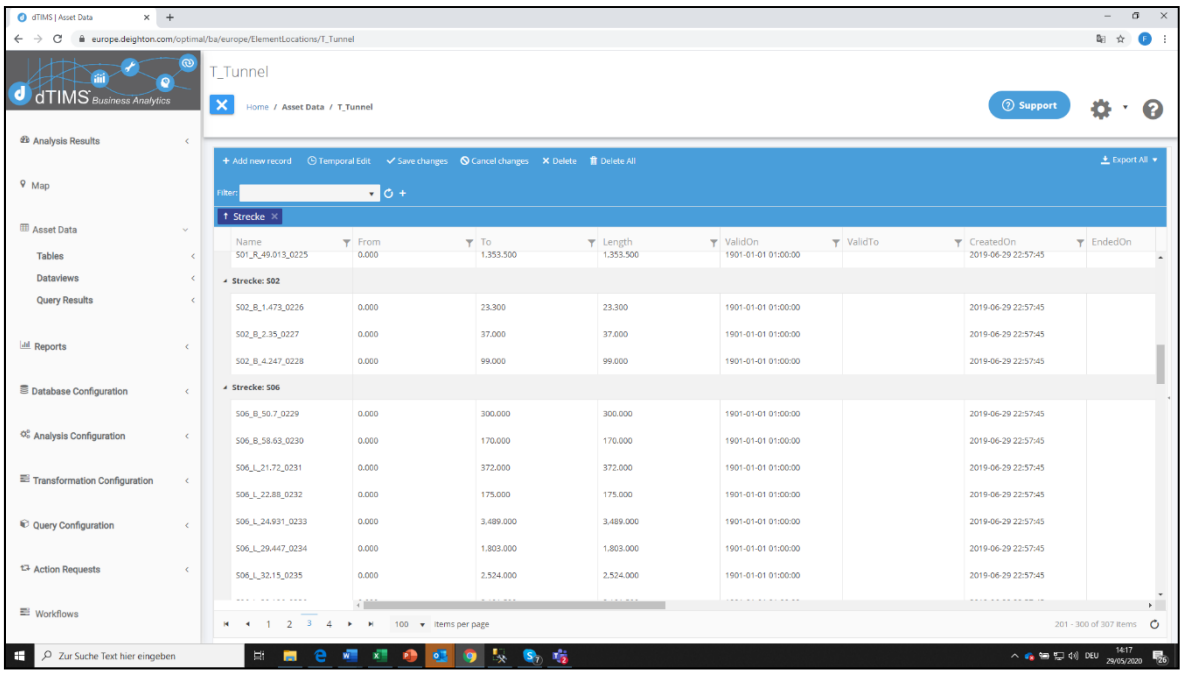


Abbildung 53: dTIMS OPtimAL Prototyp – Bildschirmausdruck – Inventardaten

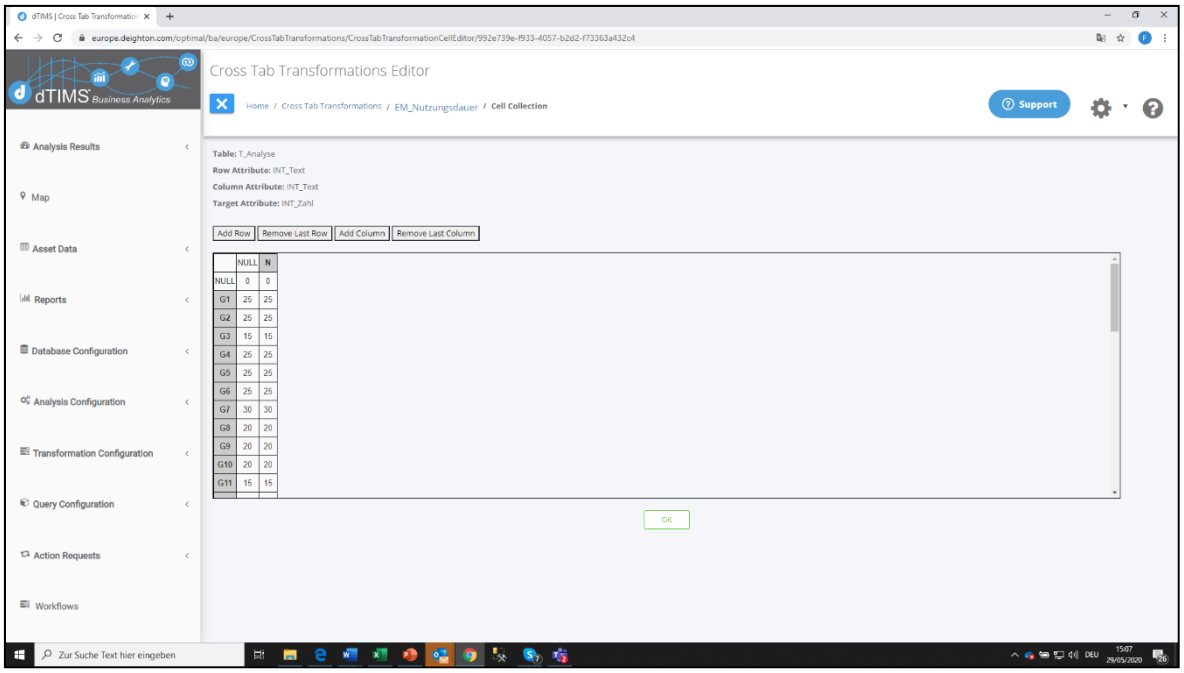


Abbildung 54: **dTIMS OPtimAL Prototyp – Bildschirmausdruck – Modellparametertabelle Nutzungsdauern E&M-Gewerke**

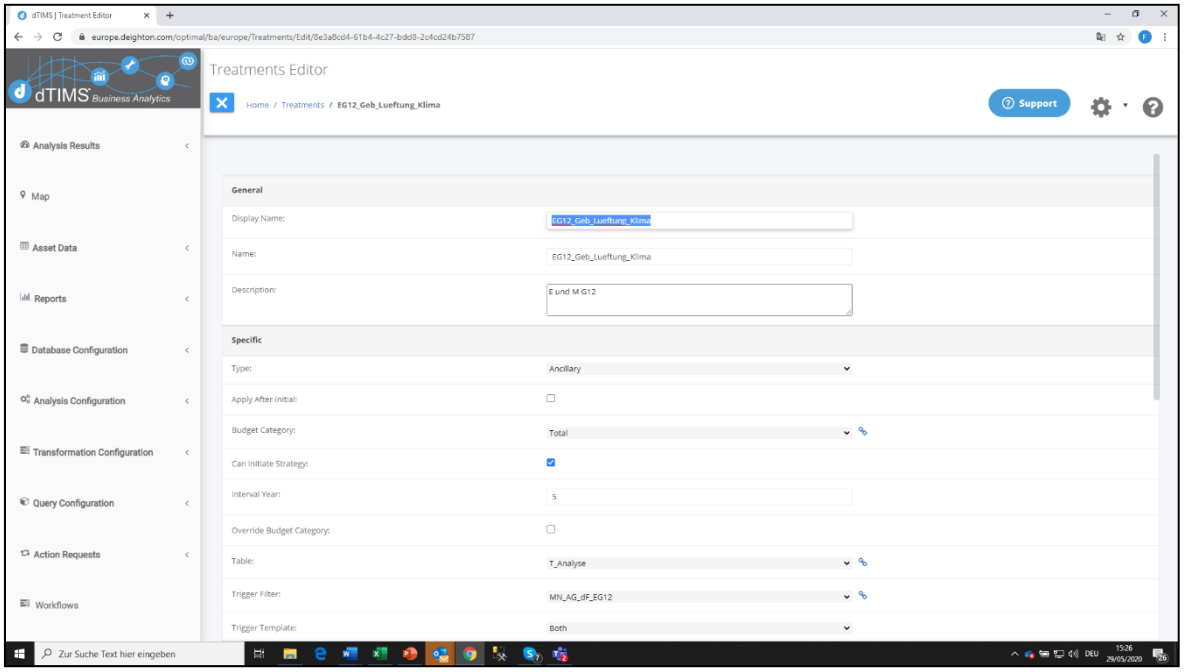


Abbildung 55: **dTIMS OPtimAL Prototyp – Eigenschaften Erhaltungsmaßnahme Gewerk 12**

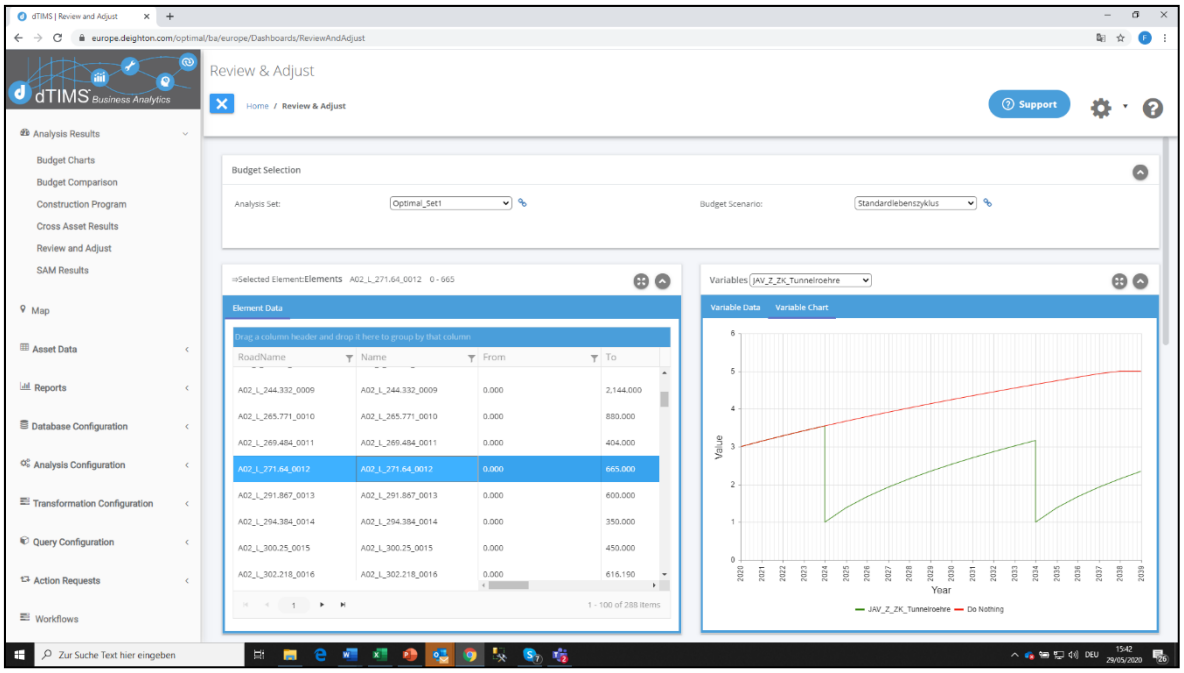


Abbildung 56: dTIMS OPtimAL Prototyp – Bildschirmausdruck – Tunnelobjektergebnisse (Verlauf Zustand Tunnelröhre)

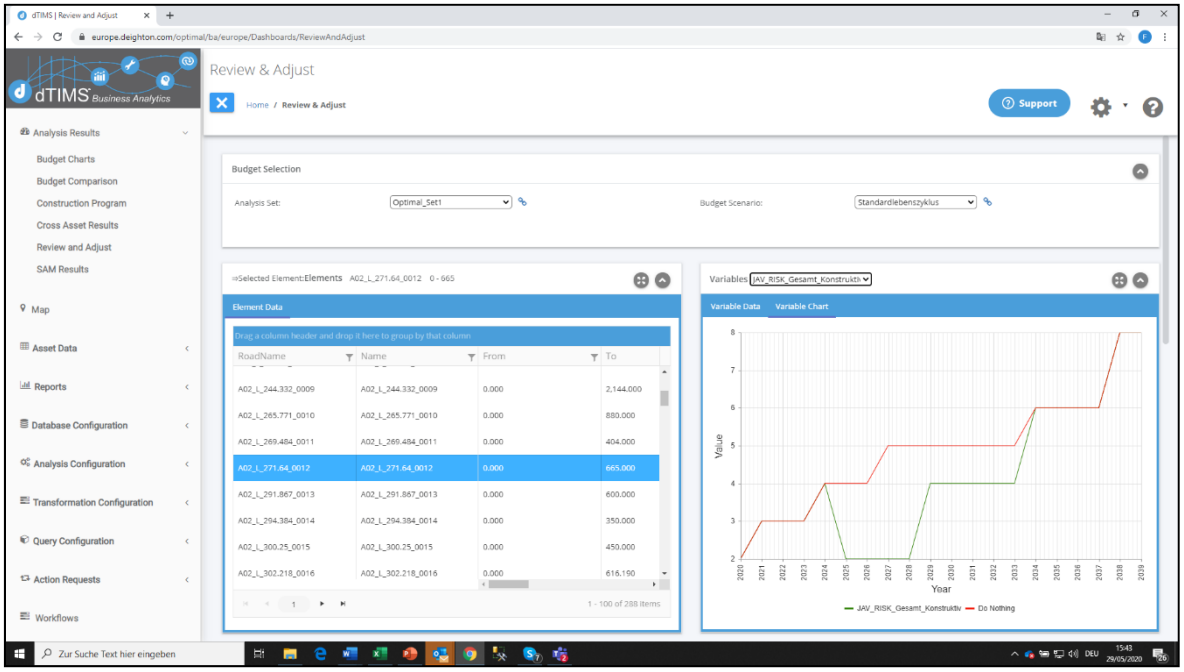


Abbildung 57: dTIMS OPtimAL Prototyp – Bildschirmausdruck – Tunnelobjektergebnisse (Verlauf Risiko Konstruktiv Gesamt)

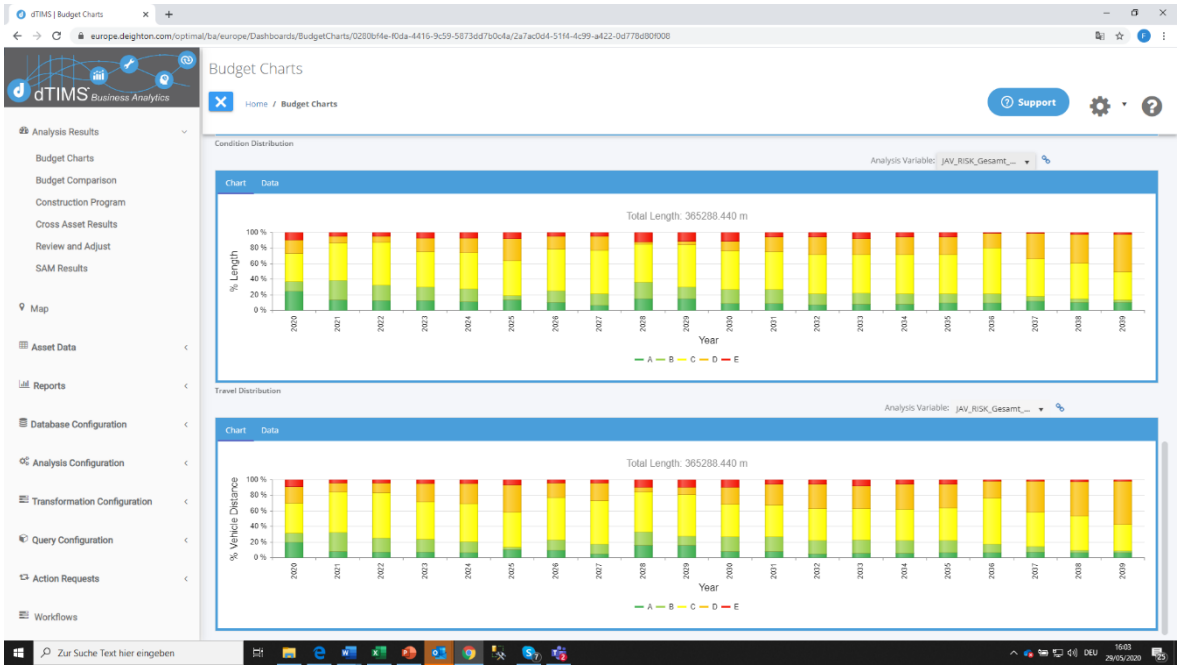


Abbildung 58: dTIMS OPtimAL Prototyp – Bildschirmausdruck – Risiko Gesamt (ohne/mit Verkehrsgewichtung)

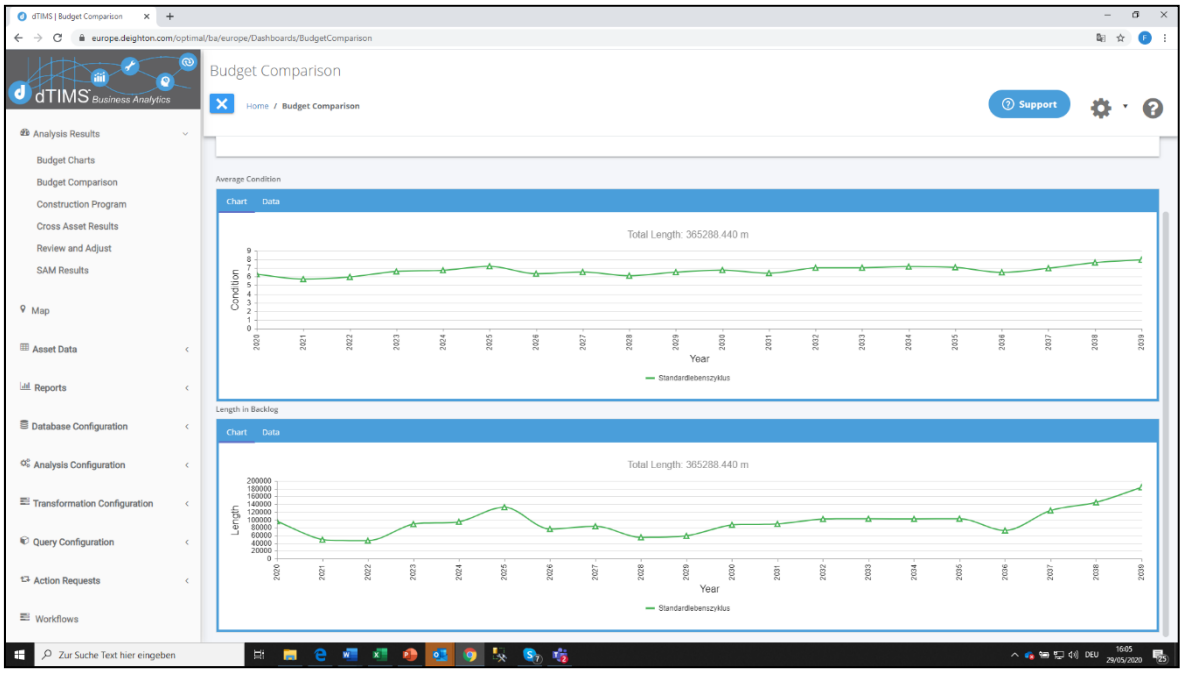


Abbildung 59: dTIMS OPtimAL Prototyp – Bildschirmausdruck – Mittleres Erhaltungsrisiko und Rückstand Tunnellänge

7 IMPLEMENTIERUNGSLEITFADEN

7.1 Einleitung

Der Implementierungsleitfaden ist ein weiteres Ergebnis des gegenständlichen Projektes im Rahmen der praktischen Anwendung der entwickelten Modelle und Algorithmen auf das Tunnelportfolio der ASFINAG[1]. Darüber hinaus ist es jedoch auch notwendig, diese Erkenntnisse mit generellen Anforderungen aus den Geschäftsprozessen des Asset Managements zur verknüpfen, sodass für eine umfassende Implementierung auch die richtigen Schritte gesetzt werden können. Die nachfolgenden Kapitel beschreiben diese Anforderungen und geben entsprechende Empfehlungen für die Implementierung.

Für eine erfolgreiche Implementierung wird ein iterativer Prozess empfohlen, wobei v.a. der Zusammenhang mit den generellen Zielsetzungen und Erwartungen des Prozesses, der für den Prozess ausgewählten Modelle und Algorithmen und der für eine Analyse zur Verfügung stehenden Daten im Vordergrund steht. Die Implementierung dieser Bausteine in ein Asset Management System ist der letzte Schritt im Rahmen der Implementierung, gefolgt von einem Lernprozess, der kontinuierlich vor allem den Umgang mit den Ergebnissen verbessern sollte.

Vor dem Start einer umfassenden Implementierung sind folgende primär organisatorische Fragen zu formulieren und mit den betroffenen Personen sind die Antworten zu diskutieren:

- Welche Anwendungsbereiche und Prozesse sollten mit den Ergebnissen von OPtimAL abgedeckt werden?
- In welchen Teilschritten des Entscheidungsprozesses können und sind die Ergebnisse einer Anwendung der OPtimAL-Algorithmen zu implementieren?
- Worin besteht der Nutzen in einer Anwendung der Ergebnisse von OPtimAL?
- Welchen Aufwand bedeutet eine Implementierung von OPtimAL?
- Was bedeutet die Implementierung für die aktuelle Datenstrukturlandschaft (Bauwerksdatenbank IMT2 / Objektdatenbank OMT, BIM)?
- Welche Anpassungen bei der Erhebung und Verarbeitung von Zustandsdaten sind erforderlich?

[1] Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der Lesbarkeit des Berichtes wurde der im Rahmen eines Implementierungshandbuches vorgesehene Implementierungsleitfaden direkt in den Bericht als eigenes Hauptkapitel integriert.

- Auf welcher Prozessebene im Asset Management Prozess soll OPtimAL eingesetzt werden?
- Wer verwendet die Ergebnisse aus dem Prozess und wie sollen die Ergebnisse aufbereitet werden?
- Sind die Ergebnisse verständlich für die unterschiedlichen Anwenderebenen?

Die nachfolgende Abbildung 60 beschreibt die hier gestellten Fragen in einem generalisierten Ablaufschema, das die Grundlage für die Gestaltung des Implementierungsprozesses darstellen sollte.

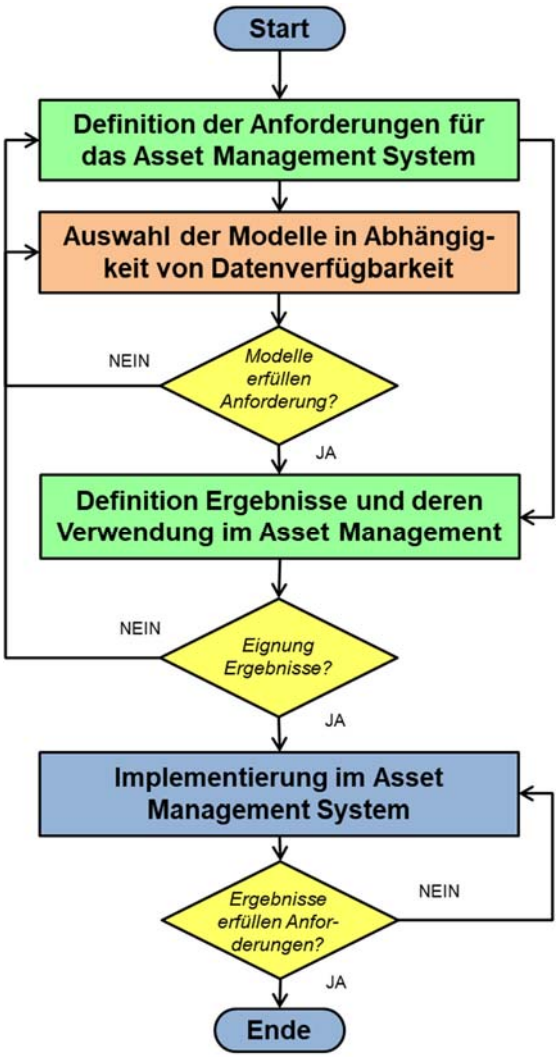


Abbildung 60: Generalisiertes Ablaufschema für den Implementierungsprozess

Die praktische Anwendung der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Modelle und Algorithmen erfolgte auf der Grundlage dieses Ablaufschemas und führte zu den im Deliverable 4.1 [37] dargestellten Ergebnissen.

7.2 Schritte der Implementierung

7.2.1 Ablaufschema der Implementierung

Wie bereits zuvor erwähnt, wurden? wesentliche Fragen vor den ersten praktischen Schritten der Implementierung zu stellen und entsprechend zu beantworten. Das nachfolgende skizzierte Ablaufschema einer Implementierung fundiert auf langjährigen Erfahrungen bei der Implementierung von Asset Management Lösungen und Systemen bei Straßenverwaltungen auf der ganzen Welt. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes ISABELA [39] wurde ein entsprechendes Ablaufschema entwickelt, welches auch für die Implementierung von OPtimAL bei der ASFINAG angewendet werden kann. Die im Rahmen der praktischen Anwendung gesetzten Schritte liefern eine Bestätigung für die Eignung des nachfolgenden Implementierungsprozesses.

Grundsätzlich wird empfohlen, eine Implementierung in zwei maßgebende Teilschritte zu unterteilen:

1. Auswahl der Modelle und Algorithmen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen und strategischer Vorgaben
2. Implementierung der ausgewählten Modelle und Algorithmen in ein Asset Management System unter den unterschiedlichen Randbedingungen einer praktischen Anwendung und der Ergebnisaufbereitung

Zeigt sich, dass die in den einzelnen Schritten geforderten Erwartungen und Zielsetzungen nicht erreicht werden können, sind die entsprechenden Abläufe zu überdenken bzw. alternative Schritte zu setzen. Dies gilt dabei sowohl für die Auswahl der Modelle und Algorithmen als auch die Implementierung in ein Asset Management System.

Um welche genauen Schritte es sich handelt, kann dem nachfolgenden detaillierten Ablaufschema (siehe Abbildung 61) entnommen werden, welches sich in die zuvor vorgestellten Teilschritte gliedert.

Die für eine Implementierung von OPtimAL zu erfüllenden Anforderungen können im Detail den nachfolgenden Kapiteln entnommen werden.

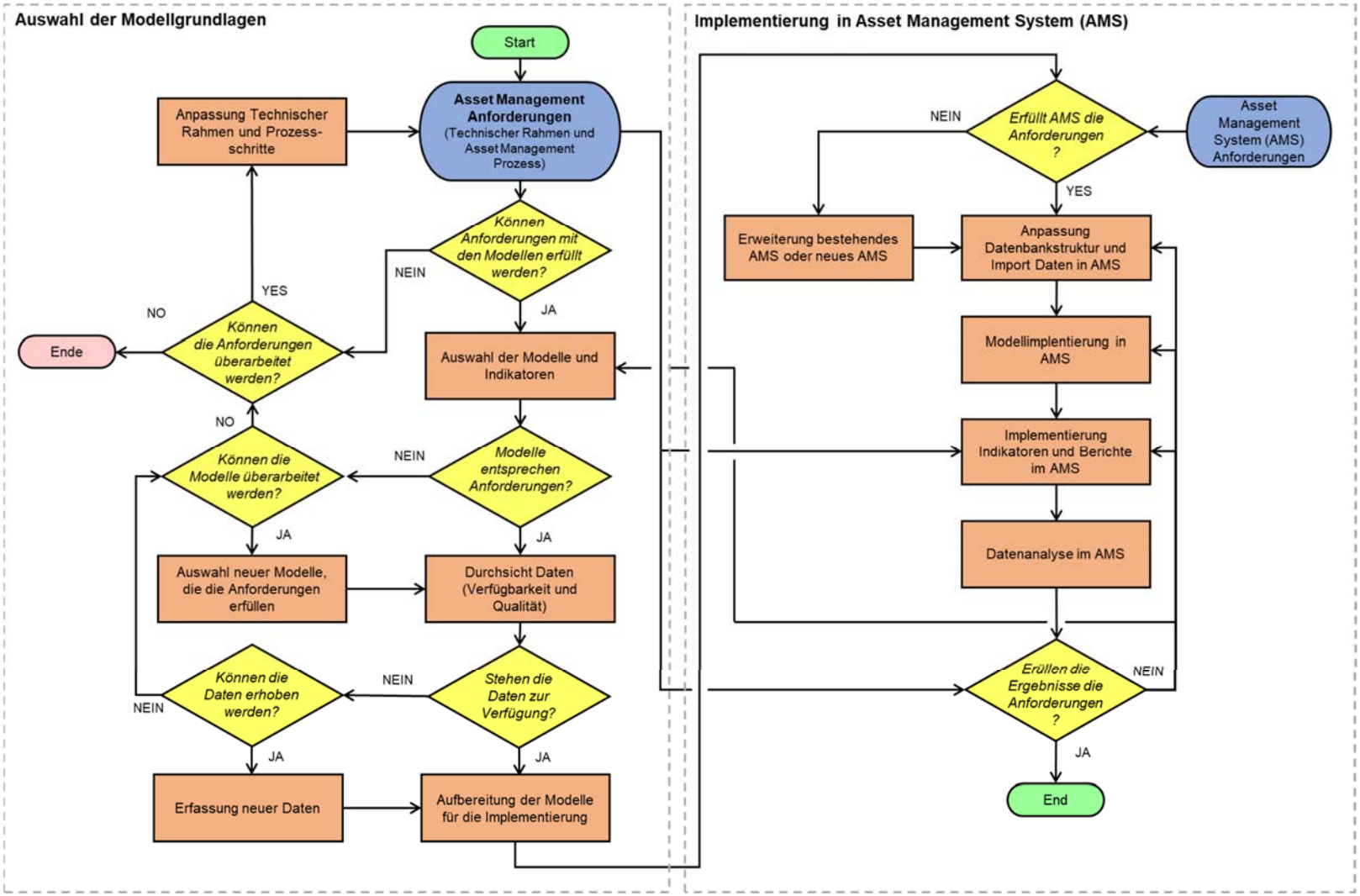


Abbildung 61: **Ablaufschema für den schrittweisen Implementierungsprozess nach [39]**

7.2.2 Anforderungen an Daten (Qualität und Quantität)

Um die Modelle und Algorithmen aus OPtimAL anwenden zu können, sind vor allem entsprechende Anforderungen an die Datenqualität und Datenverfügbarkeiten (Quantität) zu erfüllen, die hier wie folgt zusammengefasst werden können:

- Klare und eindeutige Referenzierung der Tunnelobjekte
- Vollständigkeit der Inventardaten der zu bewertenden Tunnelobjekte
- Umfassende Verfügbarkeit von Zustandsdaten der konstruktiv-baulichen Anlageteile (Bauteile) inkl. deren Längsverteilung über die Tunnelröhren
- Umfassende Verfügbarkeit von Zustandsdaten (TAZ, Ersatzteilverfügbarkeit) der E&M-Gewerke
- Kostenkatalog für die Erhaltungsmaßnahmen
- Nutzungsdauern für E&M-Gewerke

Diese Daten sollten in maschinenlesbarer Form zur Verfügung stehen und sind in die Datenbank des ausgewählten Asset Management Systems zu implementieren.

7.2.3 Anforderungen an Asset Management Systeme

Wie bereits beschrieben, wurde für das gegenständliche Projekt auf die von der ASFINAG verwendete Asset Management Software dTIMS BA zurückgegriffen. Aus Gründen der Vollständigkeit sind hier jedoch auch die Anforderungen an das Asset Management System im Überblick dargestellt:

- Möglichkeit der Anpassung der Datenbankstruktur in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit der Daten und Informationen
- Speicherung der erhaltungsrelevanten Daten aus unterschiedlichen Quellen
- Interoperabilität mit anderen Systemen
- Möglichkeit der Implementierung der Modelle und Algorithmen
- Flexibilität bei der laufenden Anpassung der Datenbankstruktur, der Modelle und Algorithmen
- Unterstützung der ausgewählten Analyseprozesse

- Unterstützung bei der Berichterstellung und Berichtslegung über standardisierte Auswertungen und Systemberichte
- Umfassender Zugriff auf das System für die jeweiligen Anwender (Web-Lösung)
- Einfache und effiziente Möglichkeit zur Aktualisierung der Daten und der damit verbundenen Ergebnisse (Batches und Workflows)

7.2.4 Anforderungen an die Ergebnisse

Die Anforderungen an die Ergebnisse hängen wesentlich von den im Rahmen einer praktischen Umsetzung definierten Zielvorgaben und dabei wesentlich von den diesen hinterlegten strategischen Zielsetzungen ab. Aus diesem Grund werden hier die Anforderungen an die Ergebnisse generell beschrieben:

- Ergebnisse der Modelle und Algorithmen für jedes untersuchte Tunnelobjekt
- Zustandsentwicklungen der Zustandsvariablen
- Risikoentwicklung der Risikovariablen
- Lebenszyklusinformationen (Maßnahmenzeitpunkt, Art der Maßnahmen, Wirkung der Maßnahme, Kostenschätzung der Maßnahme etc.)
- Vergleich von Alternativen auf Tunnelobjektebene

Neben den Ergebnissen am Einzelobjekt sind für die strategische Entscheidung auch die Ergebnisse auf Netzebene von wesentlicher Bedeutung. Unter Bezugnahme auf die praktische Anwendung sind zumindest folgende Ergebnisse aus den Analysen für die Netzebene zu generieren:

- Kostenentwicklungen und Verteilungen
- Zustandsentwicklungen und Verteilungen
- Risikoentwicklungen und Verteilungen
- Maßnahmenkostenverteilungen
- Maßnahmenlängenverteilungen
- Entwicklung mittlerer Zustand
- Entwicklung mittleres Risiko
- Entwicklung Erhaltungsrückstand Zustand (Klasse 4 und 5)
- Entwicklung Erhaltungsrückstand Risiko (Klasse rot und orange)

7.3 Vorschläge für die strategische Planung sowie die Planung auf Objektebene im Rahmen eines Bauprogramms

Die Verwendung der Ergebnisse für die strategische Planung und die langfristige Planung auf Objektebene (System liefert Vorschläge in Abhängigkeit von der Genauigkeit der Eingangsdaten und der Analyseebene) im Rahmen der Erstellung eines Bauprogramms ist eine zentrale Zielsetzung im Rahmen der praktischen Implementierung von OPtimAL.

Dabei spielt auch das im Rahmen des Optimierungsprozesses ausgewählte Zielsystem eine wesentliche Rolle. Im Rahmen der Bearbeitung des Arbeitspakets 4 (siehe Deliverable 4.1 [37]) konnten unterschiedliche Möglichkeiten aufgezeigt und im Detail diskutiert werden, die nicht unabhängig von den strategischen Zielsetzungen der ASFINAG auszuwählen sind. Es sei hier explizit nochmals darauf hingewiesen, dass das System die Projektentwicklung unterstützt und für eine genaue Festlegung der Erhaltungsmaßnahmen spezifischere Informationen notwendig sind. Die nachfolgende Liste gibt einen Überblick über eine mögliche Verwendung der Ergebnisse im Asset Management der ASFINAG auf den unterschiedlichen Entscheidungsebenen:

- Die objektbezogenen Ergebnisse liefern eine Grundlage für die Definition von Erhaltungsmaßnahmen für das langfristige Bauprogramm und für die Projektentwicklung. Ob und in welchem Ausmaß ein jeweiliges Bauteil oder E&M-Gewerk mit einer Erhaltungsmaßnahme verbessert wird, ist häufig das Ergebnis von Detailuntersuchungen auf Projektebene.

  OPtimAL liefert jedoch erste orientierende Ansätze zur Festlegung der weiteren Untersuchungen auf Projektebene und erlaubt eine erste Abschätzung des Umfangs der Erhaltungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der aktuellen und prognostizierten Zustände

- Die zeitabhängige Entwicklung von unterschiedlichen Indikatoren (Zustand, Risiko, etc.) auf Netzebene kann als Grundlage für den Netzzustandsbericht herangezogen werden

- Neben einer Beschreibung der aktuellen Situation, ist im Rahmen der Festlegung von strategischen Zielen eine Abschätzung der Auswirkungen von wesentlicher Bedeutung. Dabei sind unterschiedliche Szenarien zu untersuchen, wobei die Anwendung unterschiedlicher Zielsysteme auch eine unterschiedliche Blickweise auf bestimmte Anforderungen zulässt.

- Die Abschätzung des Erhaltungsbedarfs über eine längere Betrachtungsperiode ist für jede Asset Management Anwendung eine maßgebende Zielsetzung für die Netzebene. Im Rahmen der praktischen Anwendung konnte gezeigt werden, dass mit den entwickelten Modellen und Algorithmen auch diese Entscheidungsgröße einer Abschätzung unterzogen werden konnte.

7.4 Prozesse nach Implementierung

Die Implementierung der OPtimAL Grundlagen ist nur der Ausgangspunkt für eine nachhaltige Planung von Erhaltungsmaßnahmen im Bereich der Tunnelobjekte. Nach der Implementierung ist es notwendig, weitere Schritte zu setzen, die sich auf verschiedene Anwendungsbereiche beziehen und wie folgt zusammengefasst werden können:

- Laufende Aktualisierung der Daten und Informationen für die Analysen und die Berichte
- Laufende Verbesserung der Datenqualität zur Erhöhung der Aussagegenauigkeit
- Laufende Verbesserung der Modelle auf der Grundlage eines kontinuierlichen Lernprozesses und einer kontinuierlichen kritischen Bewertung der Ergebnisse
- Periodische Evaluierung und Bewertung der Asset Management Prozesse
- Evaluierung von möglichen Erweiterungen und Ergänzung aufgrund von aktualisierten Prozessen

7.5 Risiko der Implementierung

Noch bevor die ersten Implementierungsschritte gesetzt werden, wird empfohlen, eine Analyse des Implementierungsrisikos im Bereich des Asset Management Prozesses und im Bereich der Systemanwendung vorzunehmen. Dabei sind zumindest folgende Bereiche in die Untersuchung einzubeziehen:

- Datenverfügbarkeit und Datenqualität
- Aufwendungen zur Sammlung und Aktualisierung der Daten und Informationen
- Abweichung der Anforderungen von den Ergebnissen bei der praktischen Anwendung

- Abgrenzung des Anwendungsbereichs der Zielsetzungen vor dem Hintergrund der Erwartungen
- Erforderliches Basiswissen der im Rahmen der Implementierung und praktischen Anwendung beteiligten Personen und Personengruppen
- Zielerfüllungsgrad der Asset Management Software
- Praktische Anwendbarkeit der Asset Management Software

8 FAZIT UND EMPFEHLUNGEN

Die Beschreibung von Lebenszyklen technischer Systeme und deren systemrelevanter Komponenten für verschiedene Anlagengattungen ist in der wissenschaftlichen Literatur gut dokumentiert. Für eine umfassende Analyse der Lebenszykluskosten einer technischen Anlage sind dabei sämtliche monetarisierbaren Kosten zu erfassen, die während der Nutzungsdauer der technischen Anlage anfallen und aufgrund von notwendigen, laufenden Wartungsarbeiten sowie umfassenderen, in der Regel periodisch auftretenden Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen entstehen. Für eine strukturierte Betrachtung müssen somit sämtliche kostenbestimmende Sachverhalte in angemessenen Skalen quantifiziert und schlussendlich in Form von Schlüsselindikatoren (Geldeinheiten, Risiko, Zustand, etc.) ausgedrückt werden. Im Falle der baulichen und elektromaschinellen Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen von Straßentunneln sind dies in der Regel die anfallenden Kosten und Erhaltungsrisiken hinsichtlich Investition, Betrieb, Wartung, Instandsetzung und Rückbau bzw. Entsorgung.

Einzelne Bauwerksteile komplexer Infrastrukturen besitzen unterschiedliche theoretische Nutzungsdauern, welche zwischen wenigen Jahren (z.B. Tunnelsteuerung, Videoanlagen) und mehreren Jahrzehnten (z.B. Tunnelinnenschale, Axialventilatoren) streuen. Im Falle von Straßentunneln übersteigt die Nutzungsdauer des Bauwerks jene der technischen Ausstattung. Dazu kommt, dass bauliche Maßnahmen – auch einfache Instandsetzungen ohne Ertüchtigung oder Veränderung des baulichen Bestandes – meist nicht ohne einen Eingriff in die technische Ausstattung möglich sind.

Dies führt dazu, dass innerhalb eines Lebenszyklus des Tunnels vor allem die technischen Anlagen mehrere Erneuerungszyklen durchlaufen und zusätzlich den Randbedingungen der baulichen Instandsetzung ausgesetzt sind. Weil der technische Ausstattungsumfang in Straßentunneln über die Jahre umfassender aber auch komplexer geworden ist, führt die pauschale Annahme einer identischen Nutzungsdauer für alle betriebstechnischen Anlagen vermehrt zu verzerrten Kostenermittlungen. Pauschale Werte sind deshalb soweit wie möglich zu vermeiden. Der Weltstraßenverband PIARC hat aus diesem Grund im Jahr 2016 einen Bericht [35] veröffentlicht, der den aktuellen Stand und die geeignetsten methodischen Vorgehensweisen für Lebenszyklusbetrachtungen zur betriebstechnischen Ausstattung von Straßentunneln dokumentiert.

Mit dem Forschungsprojekt OPtimAL wurden erstmalig fundierte Regellebenszyklen (für Tunnelbauwerke erarbeitet und für eine Optimierung der Erhaltungsplanung bereitgestellt.

Erstmalig erfolgte auch eine kombinierte Synthese der Lebenszyklusplanung der baulichen und elektromaschinellen Anlagenteile des Gesamtsystems „Straßentunnel“. Die Resultate liefern einen einheitlichen Umgang mit Lebenszyklusinformationen und stellen damit eine wichtige wissenschaftliche Grundlage für eine ganzheitliche Beurteilung auf Basis eines einheitlichen gewerkeübergreifenden Bezugssystems dar. Die nachfolgende Abbildung 62 zeigt die Entwicklung des im Rahmen des Projektes definierten Erhaltungsrisikos in Abhängigkeit vom Erhaltungsintervall als Ergebnis einer auf iterativen Schritten basierenden Optimierung. Dabei ist zu erkennen, dass mit einem konstanten Erhaltungsintervall von 7 Jahren das geringste durchschnittliche Risiko bei einer Betrachtungsperiode von 19 Jahren ermittelt werden konnte. Diesen Werten liegt das gesamte Tunnelportfolio der ASFiNAG zugrunde. Ein Anstieg dieses Risikos ergibt sich erwartungsgemäß bei einer Erhöhung der Intervalle.

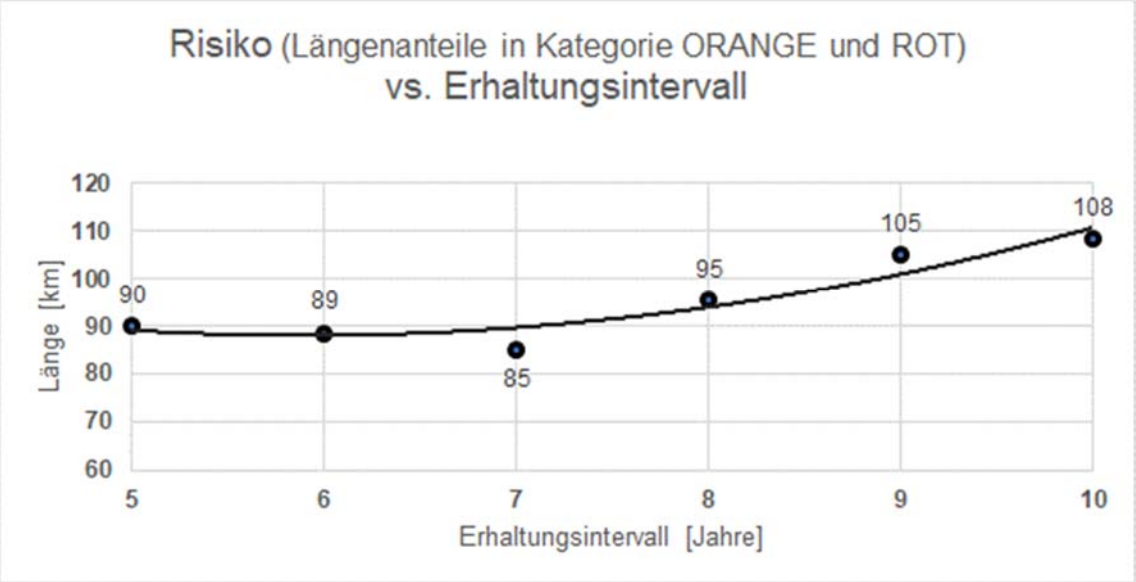


Abbildung 62: Risiko vs. Erhaltungsintervall (ausgedrückt über den Risikorückstand)

Dieses Ergebnis zeigt sehr anschaulich, dass mit bestimmten Optimierungsansätzen auch Aussagen über wesentliche Entscheidungsgrößen getätigt werden können. Weitere Fragestellungen für eine Optimierung sind im Bericht ebenfalls aufgelistet und sollten im Rahmen eines Implementierungsprojektes umfassend beantwortet werden. Der hierfür notwendige Algorithmus steht mit diesem Projekt zur Verfügung.

Der Optimierungsansatz zur Minimierung des Erhaltungsrisikos in Abhängigkeit von unterschiedlichen Erhaltungsintervallen ermöglicht auch eine Abschätzung der jeweils benötigten Investitionen. Dabei wurden Kostenansätze, die ausschließlich die Instandsetzung und

Erneuerung betreffen, herangezogen. Erweiterungen aufgrund von Verbesserungen der Sicherheitsausstattung, der Erhöhung der Leistungsfähigkeit, etc. blieben dabei unberücksichtigt. Dabei hat sich gezeigt, dass zur Minimierung des Erhaltungsrisikos in Abhängigkeit vom Erhaltungsintervall durchschnittlich pro Jahr zwischen 1,7 und 1,9 % der Errichtungskosten (baulich und E&M) für die Erhaltung der baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung aufgewendet werden müssen. Dies ist ein Durchschnittswert über alle untersuchten Tunnel mit sehr unterschiedlichen Ausstattungen (vor allem im Bereich E&M).

Die Anwendung der bereitgestellten Parameter von Regellebenszyklen der baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung in Straßentunneln als wesentliches Ergebnis dieses Projektes kann in der Praxis zu einer Standardisierung führen, was wiederum mehr Transparenz in der Ressourcenallokation und eine größere Effektivität und Effizienz der Erhaltungsplanung zur Folge hat. Weil das Projekt zur Förderung einer wirtschaftlichen Kosten- und Erhaltungsplanung von Straßentunneln im Rahmen des „Integrierten Asset Managements“ der ASFiNAG beiträgt, sind sowohl die wirtschaftliche als auch die technische Bedeutung gegeben.

Aus wissenschaftlicher Sicht, trägt das vorliegende Forschungsprojekt zur Verbreiterung des Wissensstandes bei und kann aufgrund seines Initialprojekt-Charakters einerseits weitere, tiefergehende Forschungstätigkeiten auslösen andererseits aber auch auf der Grundlage der Projektergebnisse für eine praktische Umsetzung direkt herangezogen werden. Entsprechende Anpassung in den Entscheidungsprozess einer Straßenverwaltung wie z.B. bei der ASFINAG sind einfach vorzunehmen und der im Projekt erstellte Implementierungsleitfaden liefert die entsprechenden Vorgaben für eine umfassende praktische Umsetzung. Die erarbeiteten Bausteine von OPtimAL können wie folgt zusammengefasst werden:

- Darstellung des aktuellen Standes der Forschung und Entwicklung
- Ausarbeitung von Grundlagen für die datenmäßige Ansprache von bautechnisch-konstruktiven und elektromaschinellen Anlagen in Straßentunneln sowie Entwicklung einer entsprechenden Systemarchitektur für die Verwaltung von Daten
- Entwicklung von Zustandsprognosemodellen (Degradationskurven) für bautechnisch-konstruktive und elektromaschinellen Anlagen von Straßentunneln als Grundlage für eine Lebenszyklusbewertung

- Ausarbeitung eines qualitativen Risikomodells (Risikomatrix) für die Bewertung von Erhaltungsaktivitäten im Rahmen einer Lebenszyklusbetrachtung
- Entwicklung von dynamischen standardisierten Regellebenszyklen unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Erhaltungsmaßnahmen auf unterschiedlichen bautechnisch-konstruktiven und elektromaschinellen Anlagen
- Ausarbeitung eines Vorschlages für die Bestimmung von Zielgrößen und Randbedingungen im Rahmen einer optimierten Erhaltungsplanung
- Aufzeigen der praktischen Umsetzung der entwickelten Grundlagen im Rahmen einer umfassenden Anwendung auf dem Gesamtportfolio der ASFINAG
- Implementierungsleitfaden für die praktische Anwendung bzw. Umsetzung der Ergebnisse von OPtimAL in einem Asset Management System unter Berücksichtigung verschiedener Entscheidungsprozesse im Erhaltungsmanagement

Die zuvor im Detail beschriebenen Resultate dieses Forschungsprojektes betreffen die Themenbereiche "wirtschaftlicher Umgang mit öffentlichen Geldern" und "Tunnelsicherheit". Sie sind prinzipiell in der angewandten Wissenschaft mit einem starken Praxisbezug sowie aufgrund der Schlüsselfunktion von Tunnelbauwerken im höherrangigen Verkehrsnetz einer großen volkswirtschaftlichen aber auch gesellschaftlichen Relevanz anzusiedeln.

Ein wesentliches Ziel nachhaltiger Lösungen für die Straßenverkehrsinfrastruktur liegt in der Genauigkeit der Aussagen unter Heranziehung möglichst effizienter Entscheidungsgrundlagen und -kriterien. Der Nutzen von OPtimAL, welches als „Schlüsselprojekt“ für ein nachhaltiges Bestandsmanagement angesehen werden kann, liegt nicht nur in der Verbesserung dieser Entscheidungsgrundlagen durch Fortschritte bei der Erfassung der erforderlichen Grundlagen, der Definition von objektiven Bewertungsgrößen mittels Indikatoren, sondern auch in der Integration einer anlagenspezifischen Lebenszyklusbewertung zu einem holistischen Lösungsansatz. Dabei spielt natürlich die praktische Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse eine wesentliche Rolle - was einen Schwerpunkt von OPtimAL darstellt - sodass der Nutzen nicht nur auf die theoretischen Ergebnisse, sondern auch auf den praktischen Einsatz ausgedehnt werden kann.

OPtimAL schließt bestehende Lücken im aktuellen Bewertungsprozess und erweitert diesen auf die Anforderungen einer umfassenden und nachhaltigen, auf einem Lebenszyklusansatz basierenden systematischen Erhaltungsplanung (Asset Management 4.0). Das

gegenständliche Projekt liefert eine Gesamtlösung, die nach Fertigstellung ohne zusätzlichen Aufwand in den Entscheidungsprozess der ASFiNAG implementiert werden könnte. Natürlich obliegt es letztendlich der ASFiNAG, die detaillierte Vorgehensweise intern festzuschreiben und in die konkreten Erhaltungsmanagementprozesse überzuführen (z.B. IMT). Das Instrumentarium dazu steht mit OPtimAL zur Verfügung. OPtimAL kombiniert somit die technisch-wissenschaftliche Problemlösung mit der praktischen Einsatzfähigkeit, sodass hier eine eindeutige Empfehlung für eine umfassende praktische Umsetzung bei der ASFINAG gegeben wird.

Der Nutzen für die praktische Implementierung der Ergebnisse von OPtimAL ist jedoch nicht nur bei der ASFiNAG zu sehen, sondern bei allen „Stakeholdern“, da eine verbesserte Entscheidungsgrundlage letztendlich auf den Vorgaben der unterschiedlichen Personen- und Interessensgruppen basiert. Besonders die Reduktion von negativen Auswirkungen von den Benutzern der Tunnel sollte dabei im Vordergrund stehen. OPtimAL hat gezeigt, dass mit den entwickelten Prozessen und Algorithmen diesbezügliche Fragen beantwortet werden können.

9 LITERATURVERZEICHNIS

[1] ALLEN, C.; AVERSO, M.; HARGRAVES, C.; McNeil, S. (2015): "Guide for the Preservation of Highway Tunnel Systems. Transportation Research Board, NCHRP Report 816, sponsored by the American Association of State Highway and Transportation Officials in cooperation with the Federal Highway Administration, Washington D.C., USA.

[2] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2009): "API RP 580 – Risk-Based Inspection", 2rd Edition, Washington D.C. Download unter: http://www.irantpm.ir/wp-content/uploads/2013/08/API-RP-580-Risk-Based-Inspection-2009.pdf, Abfragedatum: 18.02.2020

[3] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2016): "API RP 581 – Risk-Based Inspection Methodology", 3rd Edition, Washington D.C.

[4] ASFiNAG, Leistungsbeschreibung Technische Infrastruktur Version 003 (LB-TI-03), Wien, 2016.

[5] ASHRAE (2011): "HVAC Applications", ASHRAE Handbook. SI Edition. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, USA.

[6] ASTRA (2019): Risk Based Maintenance (RBM) – Minimierung der Nutzerrisiken und Betriebskosten mit einer risikobasierten Methode für den Unterhalt der BSA. Forschungsbericht Nr. 1648, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.

[7] AUSTRIAN STANDARDS: „ÖNORM EN 13306:2010: Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung", Ausgabe/Edition: 2018-01-15

[8] 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.

[9] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR UNTERIRDISCHES BAUEN E.V (DAUB): „Empfehlungen für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel", November 2018.

[10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): „DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung", Beuth Verlag, Berlin, Juni 2003. DIN 31051: „Grundlagen der Instandhaltung", Beuth Verlag. Berlin, 2003

[11] ENGELHARDT, S.: „Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken – Modulares Prozessmodell zur ökonomischen Optimierung von Straßentunneln“, Universität der Bundeswehr München, 2015.

[12] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (2018): “EN 16991: 2018 – Risk-based inspection framework”, Brüssel.

[13] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN): „Workshop Agreement CWA 16633: Ageing Behaviour of Structural Components with regard to Integrated Lifetime Assessment and subsequent Asset Management of Constructed Facilities, Brussels, 2013.

[14] FFG-Projekt AMBITION: „Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und Bewertung von Eisenbahn- und Straßentunnel“, Ergebnisbericht, FFG-Projekt Nr. 6618074. Wien, 2018.

[15] HAUGEN, J. M.: “RAMS and Life Cycle Cost Assessment of Road Tunnels”, Norwegian University of Science and Technology, Department of Production and Quality Engineering, 2014.

[16] MATYAS, K. (2018): Instandhaltungslogistik: Qualität und Produktivität steigern. 7., erweiterte Auflage. Praxisreiher Qualitätswissen, Carl Hanser Verlag München.

[17] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (2009): „RVS 13.04.22 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung – Bauwerksdatenbank, Straßentunnel in geschlossener Bauweise“, Wien.

[18] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (2015): „RVS 09.03.11 – Sicherheit, Tunnel-Risikoanalysemodell“, Wien.

[19] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE, SCHIENE, VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Tunnelbau, Arbeitsausschuss Erhaltung und Betrieb: „RVS 13.03.41 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Straßentunnel - Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen“, Wien, 2014.

[20] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE, SCHIENE, VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Brückenbau, Arbeitsausschuss Brückenprüfung, Brückenerhaltung und Brückendatenbank: „RVS 13.04.21 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Bauwerksdatenbank, Galerien und Tunnel in offener Bauweise“, Wien, 2009.

[21] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE, SCHIENE, VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Tunnelbau, Arbeitsausschuss Leistungsbild Bestandsprüfung von Tunnel: „RVS 13.03.31 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Straßentunnel - Baulich konstruktive Teile“, Wien, 2013.

[22] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE, SCHIENE, VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Brückenbau, Arbeitsausschuss Brückenprüfung, Brückenerhaltung und Brückendatenbank: „RVS 13.04.22 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Bauwerksdatenbank, Straßentunnel in geschlossener Bauweise“, Wien, 2009.

[23] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE, SCHIENE, VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Tunnelbau, Arbeitsausschuss Bauwerksdatenbank Betrieb und Sicherheit: „RVS 13.04.23 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Bauwerksdatenbank, Betriebs- und sicherheitstechnische Einrichtung Tunnel“, Wien, 2014.

[24] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE, SCHIENE, VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Tunnel, Arbeitsausschuss Erhaltung und Betrieb: „RVS 09.04.11 – Tunnel, Erhaltung und Betrieb“, Wien, 2018.

[25] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE, SCHIENE, VERKEHR (FSV), Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur, Version 005 (LB-VI-05), Wien, 2018.

[26] PIARC ET. AL. (2019) Introduction to the RAMS Concept for Road Tunnel Operations; Technical Committee D.5: Road Tunnel Operations; World Road Association - PIARC

[27] PREISS, R. (2009): „Methoden der Risikoanalyse in der Technik: Systematische Analyse komplexer Systeme“, TÜV Austria Akademie GmbH, Wien.

[28] SCHWEIZER NORM (SN): „Projektierung Tunnel: Straßentunnel“, SIA 197/2, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, 2004.

[29] STUVA-Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e.V.: „Sachstandsbericht 2015: Instandsetzung von Straßentunnel“, Köln, 2016.

[30] STUVA-Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e.V.: „Sachstandsbericht 2017: Instandsetzungsstrategien und -verfahren für Verkehrstunnel“, STUVA-Arbeitskreis „Instandsetzung von Verkehrstunnel“, Köln, 2018.

[31] VAN LINN, A. (2014): “Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Application for Self-Contained Power Supply of Gotthard Base Railway Tunnel. 2014 ARS, Europe: Paris, France.

[32] VOGT, P. (2012): „Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten“. Ruhr-Universität Bochum.

[33] WENINGER-VYCUDIL, A.: „Lebenszyklusanalyse Tunnel Erhaltung E&M-Technik, Pilotprojekt Landesstraßen Tirol“, Auftrag des Amtes der Tiroler Landesregierung. Ergebnisbericht, Wien-Innsbruck, 2018 (unveröffentlicht).

[34] WISTUBA, M.; LITZKA, J. und BLAB, R. (2001): „Klimakenngrößen für den Straßenoberbau in Österreich“, In: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 507, Wien.

[35] WORLD ROAD ASSOCIATION (PIARC): “Life Cycle Aspects of Electrical Road Tunnel Equipment“; Technical Committee C.4, Report 2012R14EN, 2012.

[36] OPtimAL - Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA. Forschungsprojekt im Rahmen der VIF 2017: “Deliverable D3.1: Risikobasierte Entscheidungsmodelle im Tunnel Asset Management”, Wien, 2020 (unveröffentlicht)

[37] OPtimAL – Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA. Forschungsprojekt im Rahmen der VIF 2017: “Deliverable D4.1: Zielsysteme für optimierte Regellebenszyklen”, Wien, 2020 (unveröffentlicht)

[38] OPtimAL – Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA. Forschungsprojekt im Rahmen der VIF 2017: „Deliverable D5.1: Übertragung auf ASFINAG Gesamtportfolio“, Wien, 2020 (unveröffentlicht)

[39] ISABELA - Integration of social aspects and benefits into life-cycle asset management. (2017). Research project under the CEDR transnational research program 2014, Conference of European Directors of Roads (CEDR), Brussels, Belgium, 2017.

Funktionsgruppe-Nr.	Gewerk-Nr	Komponente-Nr	Funktionsgruppe	Gewerk	Komponente	Nutzungsdauer [a] 13.03.41 / PIARC	Vogt 2012	Design Manual for Roads and Bridges, BD 78/99 V2S2 part 9	SIA 197-2	NCHRP Report 816, 2015	Haugen/ NTNU 2018	ASHRAE 2011	ASTRA 2018	Maßnahmen "kleine" Instandsetzung / Teilerneuerung	Generaler-neuerung/ Austausch	Kosten / Kennzahlen Neubau/ Austausch ASFINAG Benchmarks inkl. BGK, exkl. PM/DL/UV [EUR/lfm]
1			**Energieversorgung**													
1	1			**Mittelspannungsanlage**		25	>20									121
1	1	1			Schaltzellen			20	25-30					keine	Austausch	
1	1	2			Schutzeinrichtungen									keine	Austausch	
1	1	3			Transformatoren			30	30-40				40			
1	2			**Niederspannungsanlage**		25			25-30							66
1	2	1			Niederspannungsverteilungen in Betriebsgebäuden								30	keine	Austausch	
1	2	2			Niederspannungsverteilungen in Elektronischen								30	keine	Austausch	
1	3			**SSV Anlage**		15	>8	15	20-25							47
1	3	1			Wechsel-/Gleichrichter								25	keine	Austausch	
1	3	2			Akkumulatoren								10	keine	Austausch	
1	4			**Notstromaggregate**		25		20								39
1	4	1			Aggregat (Motor/Generatoreinheit)									keine	Austausch	
1	4	2			Treibstofftank									keine	Austausch	
1	4	3			Starterbatterie									keine	Austausch	
1	5			**Blitzschutzanlagen**		25										13
1	5	1			Blitzschutzanlage (Leitungsinstallation) in Betriebsgebäuden und im Vorportalbereich									keine	Austausch	
1	5	2			Schutzgeräte in Betriebsgebäuden (Überspannungsableiter, Sicherungen der versch. Schutzniveaus)									keine	Austausch	
1	5	3			Schutzgeräte im Vorportalbereich (Überspannungsableiter, Sicherungen der versch. Schutzniveaus)									keine	Austausch	
1	5	4			Schutzgeräte in Elektronischen (Überspannungsableiter, Sicherungen der versch. Schutzniveaus)									keine	Austausch	
1	6			**Erdung und Potentialausgleich**		25										26
1	6	1			Leitungsinstallation in Betriebsgebäuden									keine	Austausch	
1	6	2			Leitungsinstallation im Tunnel									ggf. Erder, Verbindungsleitungen	Austausch	
1	6	3			Leitungsinstallation in Elektronischen									ggf. Erder, Verbindungsleitungen	Austausch	
2			**Belüftungsanlagen**													
2	7			**Mechanische Anlagenteile Axialventilatoren**		30	>15	30								230
2	7	1			Ventilator Motor Einheit								25	Revision (Beschichtung, Lagerung)	Austausch	
2	7	2			Absperrklappen				15-20				20	Revision (Buchsentausch, Einstellung, Gängigmachen, Antriebe einstellen, Korrosionssanierung)	Austausch	
2	7	3			Leitbleche									keine	Austausch	
2	7	4			Rauchabzugsklappen in Zwischendecke				15-20				20	Revision (Buchsentausch, Einstellung, Gängigmachen, Antriebe einstellen, Korrosionssanierung)	Austausch	
2	7	5			Schalldämpfer				30-40					keine	Austausch	
2	8			**Mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren**		20	>15	18	20-35							110
2	8	1			Strahlventilatoren								25	De-/Montage; Grundreinigung, Beschichtung, Schwinungsdämpfer erneuern	Austausch	
2	8	2			Leitbleche									keine	Austausch	
2	8	3			Schalldämpfer Strahlventilatoren									keine	Austausch	
2	9			**Elektromechanische Anlagenteile Axialventilatoren**		20	>15									750
2	9	1			Elektromotor Axialventilator									Revision (Lagertausch, Überwachungseinrichtungen)	Austausch	
2	9	2			Laufschaufelverstellung von Axialventilatoren einschließlich Hydraulik									Revision (Instandsetzung)	Austausch	
2	9	3			Fremdbelüftung von Axialventilatoren									Revision (Instandsetzung)	Austausch	
2	9	4			Antriebe von Rauchabzugsklappen in Zwischendecke									Revision (Instandsetzung, Antriebe einstellen)	Austausch	
2	9	5			Antriebe von beweglichen Jalousien oder Leitblechen									Revision (Instandsetzung, Antriebe einstellen)	Austausch	
2	10			**Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilatoren**		20	>15		25-30							99
2	10	1			Elektromotor Strahlventilator (Fahrraum und Querschläge)									Revision (De-/Montage; Grundreinigung, Lagertausch, Beschichtung, Auwuchten, Überwachungseinrichtungen erneuern)	Austausch	
2	11			**Regelung, Steuerung**		15			10-15				15			46
2	11	1			Frequenzumrichter									keine	Austausch	
2	11	2			Stufenschalter									keine	Austausch	
2	11	3			Schutz- und Auswertegeräte									keine	Austausch	
2	12			**Gebäudelüftung, Klimaanlage**		15	>10									66
2	12	1			Raum-Lüftungsanlage Betriebsgebäude									keine	Austausch	
2	12	2			Klimageräte Betriebsgebäude								20	keine	Austausch	
2	12	3			Raum-Lüftungsanlage Elektronische									keine	Austausch	
2	12	4			Klimageräte Elektronische									keine	Austausch	
3			**Beleuchtung**													
3	13			**Einfahrtsbeleuchtung**		20										115
3	13	1			Leuchten		>15	18	25-30				30	Dichtungen und Scharniere instandsetzen; Gläser tauschen, Reflektoren tauschen, ggf. Tausch einzelner Komplettleuchten	Austausch	
3	13	2			Verkabelung									keine	Austausch	
3	13	3			Unterkonstruktion/Aufhängung			100	30-40					keine	Austausch	
3	13	4			Steuerungskomponenten				10-15				15	keine	Austausch	
3	14			**Innenstreckenbeleuchtung**		20										166
3	14	1			Leuchten								30	Dichtungen und Scharniere instandsetzen; Gläser tauschen, Reflektoren tauschen, ggf. Tausch einzelner Komplettleuchten	Austausch	
3	14	2			Verkabelung									keine	Austausch	
3	14	3			Unterkonstruktion/Aufhängung			100	30-40					keine	Austausch	
3	14	4			Steuerungskomponenten				10-15				15	keine	Austausch	
3	15			**Beleuchtung Querschläge/Fluchtwege**		20										66
3	15	1			Leuchten				25-30				30	Dichtungen und Scharniere instandsetzen; Gläser tauschen, Reflektoren tauschen, ggf. Tausch einzelner Komplettleuchten	Austausch	
3	15	2			Verkabelung									keine	Austausch	
3	15	3			Unterkonstruktion/Aufhängung									keine	Austausch	
3	15	4			Steuerungskomponenten				10-15					keine	Austausch	
3	16			**Fluchtweghinweis/- orientierungsleuchten**		10	>15	10								39
3	16	1			Mechanik (Gehäuse, Aufhängung)									keine	Austausch	
3	16	2			Elektrik (Beleuchtung, Verkabelung)									keine	Austausch	
3	17			**Regelung, Messwerterfassung**		15										31
3	17	1			Lichtaufnehmer (Leuchtdichtekamera) Vorportalbereich		>10	15						keine	Austausch	
3	17	2			Lichtaufnehmer (Leuchtdichtekamera) Tunnelinnenbereich		>10	15						keine	Austausch	
4			**Messeinrichtungen**													
4	18			**CO-Messung**		15	>10	13	20-25				25	keine	Austausch	46
4	19			**Trübungsmessung**		15	>10	15	20-25					keine	Austausch	33
4	20			**Längsgeschwindigkeitsmessung**		15	>10	20					25	keine	Austausch	26
5			**Überwachung / Verkehrslenkung**													
5	21			**Straßenverkehrszeichen**		10	>15	14								13
5	21	1			Wechselverkehrszeichen (Gehäuse, Aufhängung, Elektrik)				20-25				25	Dichtungen und Scharniere instandsetzen, ggf. Tausch einzelner Komplettzeichen	Austausch	
5	21	2			Hinweiszeichen (Gehäuse, Aufhängung, Elektrik)				20-25					Dichtungen und Scharniere instandsetzen, ggf. Tausch einzelner Komplettzeichen	Austausch	
5	22			**Verkehrszählung**		10		13								20
5	22	1			Zählschleifen einschließlich Verkabelung								20	keine	Austausch	
5	22	2			Auswertegeräte								15	keine	Austausch	
5	23			**Videoanlagen und akustisches Tunnelmonitoring**		10	>10		10-15							144
5	23	1			Fixkameras im Tunnelfahrraum (Kamera, Schutzgehäuse, Konsole, Verkabelung, Anschlusskasten)			15					15	keine	Austausch	
5	23	2			Schwenk-/neige/zoomkameras im Tunnelfahrraum (Kamera, Schutz-gehäuse, Konsole, Verkabelung, Antrieb, Anschlusskasten) sowie Domkameras			15					15	keine	Austausch	
5	23	3			Fix- und Schwenk-/neige/zoomkameras im Vorportalbereich (Kamera, Schutzgehäuse, Konsole, Verkabelung, Antrieb, Anschlusskasten)								15	keine	Austausch	
5	23	4			Zentrale Komponenten (Videospeichersystem, Kreuzschienen, Videodetektion, div. Steuerungsrechner)			10-20						keine	Austausch	
5	23	5			Akustisches Tunnelmonitoring (AKUT)									keine	Austausch	
5	24			**Verkehrslichtsignalanlagen**		10	>15									26
5	24	1			VLSA im Vorportalbereich und am Tunnelportal (Aufhängung, Gehäuse, Steuerungsmodule)				20-25				25	keine	Austausch	
5	24	2			VLSA im Tunnelfahrraum (Aufhängung, Gehäuse, Steuerungs-module)				20-25				25	keine	Austausch	
5	25			**Höhenkontrolle**		10	>15	15	10-15							33
5	25	1			Sensorik (mechanisch, elektrisch) einschließlich Meldung									keine	Austausch	
5	26			**Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen**		15	>15	15	10-15							53
5	26	1			Informationstafeln in Pannenbuchten (Gehäuse, Aufhängung, Netzteile, Steuerungen)									keine	Austausch	
5	26	2			Informationstafeln im Vorportalbereich (Gehäuse, Aufhängung, Netzteile, Steuerungen)									keine	Austausch	
5	26	3			Prismenwender im Tunnelfahrraum (Gehäuse, Aufhängung, Antriebe, Steuerungen)									keine	Austausch	
5	26	4			Prismenwender im Vorportalbereich (Gehäuse, Aufhängung, Antriebe, Steuerungen)									keine	Austausch	
5	26	5			Leiteinrichtungen selbstleuchtend								15	keine	Austausch	
5	26	6			Fahrstreifensignalisierung (Aufhängung, Steuerungen)								25	Dichtungen und Scharniere instandsetzen, ggf. Tausch einzelner Komplettzeichen	Austausch	
6			**Notruf**													
6	27			**Notruf**		15	>15		20-25							92
6	27	1			Sprechstelle in Notrufnische (NRN)									keine	Austausch	
6	27	2			Sprechstelle Fahrraum (NRSt)									keine	Austausch	
6	27	3			Sprechstelle in Querschlägen, Fluchtwegen									keine	Austausch	
6	27	4			Sprechstelle im Vorportalbereich (NRK)									keine	Austausch	
6	27	5			Elektrotechnische Komponenten und Elektroinstallation Notrufnischen									keine	Austausch	
7			**Telefon**													
7	28			**Telefonanlage (Festnetz)**		20		15	15-20							19
7	28	1			Telefonapparate in Betriebsgebäuden								20	keine	Austausch	
7	28	2			Telefonapparate in E-Nischen								25	keine	Austausch	
7	28	3			Telefonzentrale									keine	Austausch	
7	28	4			Telefonapparate, welche von Einsatzorganisationen genützt werden									keine	Austausch	
8			**Funk**													
8	29			**Funkanlage**		15	>15	15	15-20							131
8	29	1			Strahlerkabel im Fahrraum								30	keine	Austausch	
8	29	2			Zentrale Komponenten in E-Nischen									keine	Austausch	
8	29	3			Zentrale Komponenten in den Betriebsstation oder - zentrale									keine	Austausch	
9			**Beschallung**													
9	30			**Beschallungsanlage**		20	>10									105

Funktionsgruppe-Nr.	Gewerk-Nr	Komponente-Nr	Funktionsgruppe	Gewerk	Komponente	Nutzungsdauer [a] 13.03.41 / PIARC	Vogt 2012	Design Manual for Roads and Bridges, BD 78/99 V2S2 part 9	SIA 197-2	NCHRP Report 816, 2015	Haugen/ NTNU 2018	ASHRAE 2011	ASTRA 2018	Maßnahmen "kleine" Instandsetzung / Teilerneuerung	Generaler-neuerung/ Austausch	Kosten / Kennzahlen Neubau/ Austausch ASFINAG Benchmarks inkl. BGK, exkl. PM/DL/UV [EUR/lfm]
9	30	1			Lautsprecher samt Verstärkereinheit Vorportalbereich									keine	Austausch	
9	30	2			Lautsprecher samt Verstärkereinheit Tunnelinnenbereich									keine	Austausch	
9	30	3			NF-Komponenten in den Betriebsgebäuden									keine	Austausch	
10			**Systeme zur Branderkennung und -bekämpfung**													
10	31			**Brandmeldeanlage Kabel, Sensoren, Schalter**		20	>15		20-25							66
10	31	1			Linienbrandmeldekabel Fahrraum (Kabel, Befestigung)			5					25	keine	Austausch	
10	31	2			Handgefahrenmelder									keine	Austausch	
10	31	3			Punktbrandmelder Betriebsgebäude, E-Nischen, Kavernen			10					25	keine	Austausch	
10	32			**Brandmeldeanlage Steuerung**		10										79
10	32	1			Branderkennungszentrale für Tunnelfahrraum								15	Teilerneuerung	Austausch	
10	32	2			Branderkennungszentrale für Punktbrandmelder								15	keine	Austausch	
10	33			**Löscheinrichtungen**		20										33
10	33	1			Tragbare Feuerlöscher			7	10-15				15	keine	Austausch	
10	33	2			Wandhydranten		28	28	40-50				40	keine	Austausch	
10	33	3			Löschzubehör in Feuerlöschnischen		20	20						keine	Austausch	
10	34	4			Elektrotechnische Ausrüstung der Feuerlöschnischen									keine	Austausch	
10	34			**Löschwasserversorgung**		20										209
10	34	1			Löschwasserbehälter inkl. Pumpenstuben		>80							lokale Betonsanierungen	Neubau	
10	34	2			Drucksteigerungsanlagen (elektromechniasche Anlagenteile)		>15							keine	Austausch	
10	34	3			Löschwasserleitung einschließlich Sektionsabsperrungen und Ventile im Leitungsnetz, Frostlauf, Druckprobe		>30							keine	Austausch	
10	34	4			Wasserentnahmestellen, Absperrschieber		>50							keine	Austausch	
10	35			**Lösch- und Bindemittelvorrat**		20								keine	Austausch	13
11			**Tunnelsteuerung**				>10									
11	36			**Automatisierung**		15								ggf. Modernisierung der Controller bzw. E/A Peripherie	Austausch	162
11	37			**Prozessvisualisierung**		10								keine	Austausch	162
11	38			**Archivierung / Datenauswertung**		10								keine	Austausch	70
12			**Gewässerschutzanlagen**													
12	39			**Gewässerschutzanlagen**		20										39
12	39	1			Elektromechanische Anlagenteile (Schieber, Füllstandmessgeräte, Messeinrichtungen, Pumpen usw.)			10-15					25	ggf. Teilerneuerung Messeinrichtungen	Austausch	
12	39	2			bauliche Anlagenteile (Becken, Schächte)			10-15					25	lokale Betonsanierungen	Austausch	
13	40		**Schachtbefahrung**													
13	40			**Schachtbefahrung**		30										13
13	40	1			Mechanische Anlagenteile (Seil, Fahrkorb, Seilrolle einschließlich Lagerung)									keine	Austausch	
13	40	2			Elektrische Anlagenteile (Antriebsmotor, Kabineninstalla-tion, Elektroinstallation Windenhaus, Bedienelemente)									keine	Austausch	
14			**Türen, Tore, Verkleidungen**													
14	41			**Türen, Tore, Verkleidungen**		20			30-40							170
14	41	1			Türen Betriebsgebäude außen (Türblatt, Öffen-/Schließ-mechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)								40	Scharniere, Beschläge und Türkontakte instandsetzen	Austausch	
14	41	2			Türen Betriebsgebäude innen (Türblatt, Öffen-/Schließ-mechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)								40	Scharniere, Beschläge und Türkontakte instandsetzen	Austausch	
14	41	3			Türen Notrufnischen (Türblatt, Öffen-/Schließmechanis-mus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)									Scharniere, Beschläge und Türkontakte instandsetzen	Austausch	
14	41	4			Türen Feuerlöschnischen (Türblatt, Öffen-/Schließmecha-nismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)									Scharniere, Beschläge und Türkontakte instandsetzen	Austausch	
14	41	5			Querschlagstüren/-tore EQ (Torblatt, Öffen-/Schließmecha-nismus einschließlich Antrieb, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte								40	Scharniere, Beschläge und Türkontakte instandsetzen	Austausch	
14	41	6			Querschlagstüren/-tore GQ, EQ, GA und EA (Torblatt, Öffen-/Schließmechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte								40	Scharniere, Beschläge und Türkontakte instandsetzen	Austausch	
14	41	7			Türen Elektronischen (Türblatt, Öffen-/Schließmechanis-mus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)									Scharniere, Beschläge und Türkontakte instandsetzen	Austausch	
15			**Kräne, Hebezeuge**													
15	42			**Krane und Hebezeuge**		30										13
15	42	1			Mechanische Anlagenteile (Seil, Träger, Seilrolle einschließlich Lagerung)								30	keine	Austausch	
15	42	2			Elektrische Anlagenteile (Antriebsmotor, Elektroinstallation, Bedienelemente)									keine	Austausch	
16			**Innenausbau**													
16	43			**Gewölbe bewehrte Blöcke**					80-100					lokale Betoninstandsetzung	flächige Betoninstandsetzung, Vorsatzschale oder Neubau Innenschale	
16	44			**Gewölbe unbewehrte Blöcke**					80-100					lokale Betoninstandsetzung	flächige Betoninstandsetzung, Vorsatzschale oder Neubau Innenschale	
16	45			**Sohlgewölbe/Sohlplatte**										keine	lokale Betoninstandsetzung	
16	46			**Abdichtung**					80-100					lokale Injektionen, Fugenabdeckungen, u.dgl.	Abdichtung (KDB oder Spritzabd.)hinter neuer Vorsatzschale oder Austausch	350
17			**Tunnelleibung**													
17	47			**Beschichtung bzw. Anstrich**					20-30					Pflegeanstrich auf UG0	Erneuerung inkl. Tiefenabtrag Beton	500
17	48			**Blocknummerierungen**										keine	Austausch	2
17	49			**Brandschutzverkleidungen (Platten oder Mörtel)**										keine	Austausch	1100
17	50			**Lärmschutzverkleidungen**										keine	Austausch	
18			**Fahrbahn und Seitenstreifen**													
18	51			**Fahrbahn**					20-30					lokale Ausbesserungen, Griffigkeitsverbesserung	Neubau	450
18	52			**erhöhte Seitenstreifen**										lokale Ausbesserungen Gussasphalt und Abdeckplatten	Austausch Abdeckplatten und Gussasphalt	100
18	53			**Kabelkanäle**										keine	Neubau	40
18	54			**Bordsteine**					60-80					keine	Neubau	27
18	55			**Bodenmarkierung**										keine	Neubau	5
19			**Entwässerung im Tunnel**													
19	56			**Ulmendrainagen**					60-80					Fräsen, HD-Spülen	abschnittsweise Neubau	50
19	57			**Frostkofferentwässerung**					60-80					keine	Neubau	40
19	58			**Einlaufschächte**										lokale Ausbesserungen	Austausch	75
19	59			**Schlitzrinnen**					60-80					Fräsen, lokale Rohrsanierungen	Neubau	102
19	60			**Schachtabdeckungen Sammelleitungen**										keine	Austausch	200
20			**Fluchtwege**													
20	64			**Abschlusswände/Verschlusswände**										lokale Betoninstandsetzung	Neubau	
20	65			**Flucht-, Rettungswege und Zugänge**										lokale Betoninstandsetzungen, Fugenabdichtungen, Injektionen	Verstärkung /Ergänzung Innenschale	
20	66			**Querschläge**										lokale Betoninstandsetzungen, Fugenabdichtungen, Injektionen	Verstärkung / Ergänzung Innenschale	
21			**Nischen**													
21	67			**Nischenkörper**										lokale Betoninstandsetzungen, Fugenabdichtungen, Injektionen	lokale Betoninstandsetzungen, Fugenabdichtungen, Injektionen	
21	68			**Nischenabdeckungen**										keine	Austausch	
22			**baul. Lüftungsanlagen**													
22	69			**Lüftungsschächte**										lokale Betoninstandsetzungen, Fugenabdichtungen, Injektionen	Verstärkung/Ergänzung Innenschale	
22	70			**Lüftungstürme**										lokale Betoninstandsetzungen, Fugenabdichtungen, Injektionen	lokale Betoninstandsetzungen, Bauteilvestärkungen/-ergänzungen, Fugenabdichtungen, Injektionen	
22	71			**Zwischendecke inkl. Auflager**					60-80					lokale Betoninstandsetzungen, Fugenabdichtungen	Neubau	
22	72			**Trennwand**										lokale Betoninstandsetzungen, Fugenabdichtungen	Neubau	
22	73			**Hängestangen**										keine	Neubau	
23			**Bauliche Anlagen**													
23	74			**Betriebsgebäude**										lokale Betoninstandsetzung, Dachabdichtung, Fenstertausch	flächige Instandsetzungen, Bauteilverstärkung oder -ergänzungen, bis hin zu Neubau	
23	75			**Betriebsstationen**										lokale Betoninstandsetzung, Dachabdichtung, Fenstertausch	flächige Instandsetzungen, Bauteilverstärkung oder -ergänzungen, bis hin zu Neubau	
23	76			**Geländer und Absturzsicherungen**										keine	Austausch	
23	77			**Kabelkollektoren**										lokale Betoninstandsetzung, Abdichtungsinjektionen,	flächige Instandsetzungen, Bauteilverstärkung oder -ergänzungen, bis hin zu Neubau	
24			**Portale**													
24	78			**Portalbauwerk, Portalkranz**										lokale Betoninstandsetzungen, Fugenabdichtungen	Neubau	
24	79			**Portalwände und Flügelwände**										lokale Betoninstandsetzungen, Fugenabdichtungen	lokale Betoninstandsetzungen, Fugenabdichtungen	
24	80			**Steinschlagnetze**										keine	Austausch	
25			**Gelände über Tunnel**													
25	81			**Böschungen**										keine	keine	
25	82			**Pflasterungen**										keine	Neubau	
25	83			**Steinschlichtungen**										keine	Neubau	

Legende:
2…Instandsetzung (Zeileneintrag) bedingt wesentlichen Eingriff in Komponente (Spalteneintrag) - z.B: ebenfalls Erneuerung der betroffenen Komponente

1…Instandsetzung (Zeileneintrag) bedingt geringen Eingriff in Komponente (Spalteneintrag) - z.B. temporäre De-/Wiedermontage, lokale Anpassung.

l… Eingriff/Auswirkung "longitudinal" (über die jeweilige Länge des Eingriffs, bzw. im gesamten örtlichen Umgriff des Eingriffs)

p…Eingriff/Auswirkung "punktuell" (nur punktuell innerhalb des räumlichen Umgriffs des Eingriffs)

s…Eingriff/Auswirkung auf Systemebene (z.B. Tunnelsteuerung)

keine Angabe…keine relevante Auswirkung auf andere Komponente

Funktionsgruppe-Nr.	Gewerk-Nr	Komponente-Nr	Funktionsgruppe	Gewerk	
					223
1			Energieversorgung		223
1	1			Mittelspannungsanlage	
1	1	1			0
1	1	2			0
1	1	3			0
1	2			Niederspannungsanlage	
1	2	1			0
1	2	2			0
1	3			SSV Anlage	
1	3	1			0
1	3	2			0
1	4			Notstromaggregate	
1	4	1			0
1	4	2			0
1	4	3			0
1	5			Blitzschutzanlagen	
1	5	1			0
1	5	2			0
1	5	3			0
1	5	4			0
1	6			Erdung und Potentialausgleich	
1	6	1			0
1	6	2			0
1	6	3			0
2			Belüftungsanlagen		
2	7			Mechanische Anlagenteile Axialventilatoren	
2	7	1			3
2	7	2			1
2	7	3			1
2	7	4			1
2	7	5			0
2	8			Mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	
2	8	1			1
2	8	2			0
2	8	3			0
2	9			Elektromechanische Anlagenteile Axialventilatoren	
2	9	1			2
2	9	2			2
2	9	3			2
2	9	4			1
2	9	5			2
2	10			Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	
2	10	1			1
2	11			Regelung, Steuerung	
2	11	1			0
2	11	2			0
2	11	3			0
2	12			Gebäudelüftung, Klimaanlage	
2	12	1			0
2	12	2			0
2	12	3			0
2	12	4			0
3			Beleuchtung		
3	13			Einfahrtsbeleuchtung	
3	13	1			0
3	13	2			0
3	13	3			0
3	13	4			0
3	14			Innenstreckenbeleuchtung	
3	14	1			0
3	14	2			0
3	14	3			0
3	14	4			0
3	15			Beleuchtung Querschläge/Fluchtwege	
3	15	1			0
3	15	2			0
3	15	3			0
3	15	4			0
3	16			Fluchtweghinweis/- orientierungsleuchten	
3	16	1			1
3	16	2			1
3	17			Regelung, Messwerterfassung	
3	17	1			0
3	17	2			0
4			Messeinrichtungen		
4	18			CO-Messung	0
4	19			Trübungsmessung	0
4	20			Längsgeschwindigkeitsmessung	0
5			Überwachung / Verkehrslenkung		
5	21			Straßenverkehrszeichen	
5	21	1			0
5	21	2			0
5	22			Verkehrszählung	
5	22	1			0
5	22	2			0
5	23			Videoanlagen und akustisches Tunnelmonitoring	
5	23	1			0
5	23	2			0
5	23	3			0
5	23	4			0
5	23	5			0
5	24			Verkehrslichtsignalanlagen	
5	24	1			0
5	24	2			0
5	25			Höhenkontrolle	
5	25	1			0
5	26			Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen	
5	26	1			0
5	26	2			0
5	26	3			0
5	26	4			0
5	26	5			0
5	26	6			0
6			Notruf		
6	27			Notruf	
6	27	1			0
6	27	2			0
6	27	3			0
6	27	4			0
6	27	5			0
7			Telefon		
7	28			Telefonanlage (Festnetz)	
7	28	1			0
7	28	2			0
7	28	3			0
7	28	4			0
8			Funk		
8	29			Funkanlage	
8	29	1			0
8	29	2			0
8	29	3			0
9			Beschallung		
9	30			Beschallungsanlage	
9	30	1			0
9	30	2			0
9	30	3			0
10			Systeme zur Branderkennung und -bekämpfung		
10	31			Brandmeldeanlage Kabel, Sensoren, Schalter	
10	31	1			0
10	31	2			0
10	31	3			0
10	32			Brandmeldeanlage Steuerung	
10	32	1			3
10	32	2			0
10	33			Löscheinrichtungen	
10	33	1			0
10	33	2			0
10	33	3			0
10	33	4			0
10	34			Löschwasserversorgung	
10	34	1			0
10	34	2			0
10	34	3			0
10	34	4			0
10	35			Lösch- und Bindemittelvorrat	0
11			Tunnelsteuerung		
11	36			Automatisierung	2
11	37			Prozessvisualisierung	2
11	38			Archivierung / Datenauswertung	2
12			Gewässerschutzanlagen		
12	39			Gewässerschutzanlagen	
12	39	1			0
12	39	2			1
13			Schachtbefahrung		
13	40			Schachtbefahrung	
13	40	1			1
13	40	2			1
14			Türen, Tore, Verkleidungen		
14	41			Türen, Tore, Verkleidungen	
14	41	1			0
14	41	2			0
14	41	3			0
14	41	4			0
14	41	5			0
14	41	6			0
14	41	7			0
15			Kräne, Hebezeuge		
15	42			Krane und Hebezeuge	
15	42	1			1
15	42	2			1
16			Tunnelröhre		
16	43			Gewölbe bewehrte Blöcke	41
16	44			Gewölbe unbewehrte Blöcke	41
16	45			Sohlgewölbe/Sohlplatte	0
16	46			Abdichtung	41
17			Tunnelleibung		
17	47			Beschichtung bzw. Anstrich	17
17	48			Blocknummerierungen	0
17	49			Brandschutzverkleidungen (Platten oder Mörtel)	0
17	50			Lärmschutzverkleidungen	0
18			Fahrbahn und Seitenstreifen		
18	51			Fahrbahn	6
18	52			erhöhte Seitenstreifen	1
18	53			Kabelkanäle	0
18	54			Bordsteine	0
18	55			Bodenmarkierung	0
19			Entwässerung		
19	56			Ulmendrainagen	1
19	57			Frostkofferentwässerung	0
19	58			Einlaufschächte	4
19	59			Schlitzrinnen	0
19	60			Schachtabdeckungen Sammelleitungen	1
20			Fluchtwege		
20	64			Abschlusswände/Verschlusswände	4
20	65			Flucht-, Rettungswege und Zugänge	3
20	66			Querschläge	3
21			Nischen		
21	67			Nischenkörper	4
21	68			Nischenabdeckungen	3
22			baul. Lüftungsanlagen		
22	69			Lüftungsschächte	1
22	70			Lüftungstürme	0
22	71			Zwischendecke inkl. Auflager	11
22	72			Trennwand	3
22	73			Hängestangen	3
23			Bauliche Anlagen		
23	74			Betriebsgebäude	0
23	75			Betriebsstationen	0
23	76			Geländer und Absturzsicherungen	0
23	77			Kabelkollektoren	0
24			Portale		
24	78			Portalbauwerk, Portalkranz	2
24	79			Portalwände und Flügelwände	0
24	80			Steinschlagnetze	0
25			Gelände über Tunnel		
25	81			Böschungen	0
25	82			Pflasterungen	0
25	83			Steinschlichtungen	0

Legende:

2... Auswirkung/Einwirkung (Zeitbetrag) bedingt wesentlichen Eingriff in Komponente (Spätwirkung) – z.B. ebenfalls Erneuerung der betroffenen Komponente

1... Auswirkung/Einwirkung (Zeitbetrag) bedingt geringen Eingriff in Komponente (Spätwirkung) – z.B. temporäre De-/Wiedermontage oder temporäre Außerbetriebsetzung

l... Eingriff/Auswirkung "longitudinal" (über die jeweilige Länge des Eingriffs, bzw. im gesamten örtlichen Umgriff des Eingriffs)

p... Eingriff/Auswirkung "punktuell" (nur punktuell innerhalb des räumlichen Umgriffs des Eingriffs)

s... Eingriff/Auswirkung auf Systemebene (z.B. Tunnelsteuerung)

keine Angabe... keine relevante Auswirkung auf andere Komponente

betroffene Komponente potentiell sicherheitskritisch

Funktionsgruppe-Nr.	Gewerk-Nr	Komponente-Nr	Funktionsgruppe	Gewerk	Komponente
1			Energieversorgung		
1	1			Mittelspannungsanlage	
1	1	1			Schaltzellen
1	1	2			Schutzeinrichtungen
1	1	3			Transformatoren
1	2			Niederspannungsanlage	
1	2	1			Niederspannungsverteilungen in Betriebsgebäuden
1	2	2			Niederspannungsverteilungen in Elektronischen
1	3			SSV Anlage	
1	3	1			Wechsel-/Gleichrichter
1	3	2			Akkumulatoren
1	4			Notstromaggregate	
1	4	1			Aggregat (Motor/Generatoreinheit)
1	4	2			Treibstofftank
1	4	3			Starterbatterie
1	5			Blitzschutzanlagen	
1	5	1			Blitzschutzanlage (Leitungsinstallation) in Betriebsgebäuden und im Vorportalbereich
1	5	2			Schutzgeräte in Betriebsgebäuden (Überspannungsableiter, Sicherungen der versch. Schutzniveaus)
1	5	3			Schutzgeräte im Vorportalbereich (Überspannungsableiter, Sicherungen der versch. Schutzniveaus)
1	5	4			Schutzgeräte in Elektronischen (Überspannungsableiter, Sicherungen der versch. Schutzniveaus)
1	6			Erdung und Potentialausgleich	
1	6	1			Leitungsinstallation in Betriebsgebäuden
1	6	2			Leitungsinstallation im Tunnel
1	6	3			Leitungsinstallation in Elektronischen
2			Belüftungsanlagen		
2	7			Mechanische Anlagenteile Axialventilatoren	
2	7	1			Ventilator Motor Einheit
2	7	2			Absperrklappen
2	7	3			Leitbleche
2	7	4			Rauchabzugsklappen in Zwischendecke
2	7	5			Schalldämpfer
2	8			Mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	
2	8	1			Strahlventilatoren
2	8	2			Leitbleche
2	8	3			Schalldämpfer Strahlventilatoren
2	9			Elektromechanische Anlagenteile Axialventilatoren	
2	9	1			Elektromotor Axialventilator
2	9	2			Laufschaufelverstellung von Axialventilatoren einschließlich Hydraulik
2	9	3			Fremdbelüftung von Axialventilatoren
2	9	4			Antriebe von Rauchabzugsklappen in Zwischendecke
2	9	5			Antriebe von beweglichen Jalousien oder Leitblechen
2	10			Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	
2	10	1			Elektromotor Strahlventilator (Fahrraum und Querschläge)
2	11			Regelung, Steuerung	
2	11	1			Frequenzumrichter
2	11	2			Stufenschalter
2	11	3			Schutz- und Auswertegeräte
2	12			Gebäudelüftung, Klimaanlage	
2	12	1			Raum-Lüftungsanlage Betriebsgebäude
2	12	2			Klimageräte Betriebsgebäude
2	12	3			Raum-Lüftungsanlage Elektronische
2	12	4			Klimageräte Elektronische
3			Beleuchtung		
3	13			Einfahrtsbeleuchtung	
3	13	1			Leuchten
3	13	2			Verkabelung
3	13	3			Unterkonstruktion/Aufhängung
3	13	4			Steuerungskomponenten
3	14			Innenstreckenbeleuchtung	
3	14	1			Leuchten
3	14	2			Verkabelung
3	14	3			Unterkonstruktion/Aufhängung
3	14	4			Steuerungskomponenten
3	15			Beleuchtung Querschläge/Fluchtwege	
3	15	1			Leuchten
3	15	2			Verkabelung
3	15	3			Unterkonstruktion/Aufhängung
3	15	4			Steuerungskomponenten
3	16			Fluchtweghinweis/- orientierungsleuchten	
3	16	1			Mechanik (Gehäuse, Aufhängung)
3	16	2			Elektrik (Beleuchtung, Verkabelung)
3	17			Regelung, Messwerterfassung	
3	17	1			Lichtaufnehmer (Leuchtdichtekamera) Vorportalbereich
3	17	2			Lichtaufnehmer (Leuchtdichtekamera) Tunnelinnenbereich
4			Messeinrichtungen		
4	18			CO-Messung	
4	19			Trübungsmessung	
4	20			Längsgeschwindigkeitsmessung	
5			Überwachung / Verkehrslenkung		
5	21			Straßenverkehrszeichen	
5	21	1			Wechselverkehrszeichen (Gehäuse, Aufhängung, Elektrik)
5	21	2			Hinweiszeichen (Gehäuse, Aufhängung, Elektrik)
5	22			Verkehrszählung	
5	22	1			Zählschleifen einschließlich Verkabelung
5	22	2			Auswertegeräte
5	23			Videoanlagen und akustisches Tunnelmonitoring	
5	23	1			Fixkameras im Tunnelfahrraum (Kamera, Schutzgehäuse, Konsole, Verkabelung, Anschlusskasten)
5	23	2			Schwenk-/neige/zoomkameras im Tunnelfahrraum (Kamera, Schutz-gehäuse, Konsole, Verkabelung, Antrieb, Anschlusskasten) sowie Domkameras
5	23	3			Fix- und Schwenk-/neige/zoomkameras im Vorportalbereich (Kamera, Schutzgehäuse, Konsole, Verkabelung, Antrieb, Anschlusskasten)
5	23	4			Zentrale Komponenten (Videospeichersystem, Kreuzschienen, Videodetektion, div. Steuerungsrechner)
5	23	5			Akustisches Tunnelmonitoring (AKUT)
5	24			Verkehrslichtsignalanlagen	
5	24	1			VLSA im Vorportalbereich und am Tunnelportal (Aufhängung, Gehäuse, Steuerungsmodule)
5	24	2			VLSA im Tunnelfahrraum (Aufhängung, Gehäuse, Steuerungs-module)
5	25			Höhenkontrolle	
5	25	1			Sensorik (mechanisch, elektrisch) einschließlich Meldung
5	26			Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen	
5	26	1			Informationstafeln in Pannenbuchten (Gehäuse, Aufhängung, Netzteile, Steuerungen)
5	26	2			Informationstafeln im Vorportalbereich (Gehäuse, Aufhängung, Netzteile, Steuerungen)
5	26	3			Prismenwender im Tunnelfahrraum (Gehäuse, Aufhängung, Antriebe, Steuerungen)
5	26	4			Prismenwender im Vorportalbereich (Gehäuse, Aufhängung, Antriebe, Steuerungen)
5	26	5			Leiteinrichtungen selbstleuchtend
5	26	6			Fahrstreifensignalisierung (Aufhängung, Steuerungen)
6			Notruf		
6	27			Notruf	
6	27	1			Sprechstelle in Notrufnische (NRN)
6	27	2			Sprechstelle Fahrraum (NRSt)
6	27	3			Sprechstelle in Querschlägen, Fluchtwegen
6	27	4			Sprechstelle im Vorportalbereich (NRK)
6	27	5			Elektrotechnische Komponenten und Elektroinstallation Notrufnischen
7			Telefon		
7	28			Telefonanlage (Festnetz)	
7	28	1			Telefonapparate in Betriebsgebäuden
7	28	2			Telefonapparate in E-Nischen
7	28	3			Telefonzentrale
7	28	4			Telefonapparate, welche von Einsatzorganisationen genützt werden
8			Funk		
8	29			Funkanlage	
8	29	1			Strahlerkabel im Fahrraum
8	29	2			Zentrale Komponenten in E-Nischen
8	29	3			Zentrale Komponenten in den Betriebsstation oder -zentrale
9			Beschallung		
9	30			Beschallungsanlage	
9	30	1			Lautsprecher samt Verstärkereinheit Vorportalbereich
9	30	2			Lautsprecher samt Verstärkereinheit Tunnelinnenbereich
9	30	3			NF-Komponenten in den Betriebsgebäuden
10			Systeme zur Branderkennung und -bekämpfung		
10	31			Brandmeldeanlage Kabel, Sensoren, Schalter	
10	31	1			Linienbrandmeldekabel Fahrraum (Kabel, Befestigung)
10	31	2			Handgefahrenmelder
10	31	3			Punktbrandmelder Betriebsgebäude, E-Nischen, Kavernen
10	32			Brandmeldeanlage Steuerung	
10	32	1			Branderkennungszentrale für Tunnelfahrraum
10	32	2			Branderkennungszentrale für Punktbrandmelder
10	33			Löscheinrichtungen	
10	33	1			Tragbare Feuerlöscher
10	33	2			Wandhydranten
10	33	3			Löschzubehör in Feuerlöschnischen
10	33	4			Elektrotechnische Ausrüstung der Feuerlöschnischen
10	34			Löschwasserversorgung	
10	34	1			Löschwasserbehälter inkl. Pumpenstuben
10	34	2			Drucksteigerungsanlagen (elektromech. Anlagenteile)
10	34	3			Löschwasserleitung einschließlich Sektionsabsperrungen und Ventile im Leitungsnetz, Frostlauf, Druckprobe
10	34	4			Wasserentnahmestellen, Absperrschieber
10	35			Lösch- und Bindemittelvorrat	
11			Tunnelsteuerung		
11	36			Automatisierung	
11	37			Prozessvisualisierung	
11	38			Archivierung / Datenauswertung	
12			Gewässerschutzanlagen		
12	39			Gewässerschutzanlagen	
12	39	1			Elektromechanische Anlagenteile (Schieber, Füllstandmessgeräte, Messeinrichtungen, Pumpen usw.)
12	39	2			bauliche Anlagenteile (Becken, Schächte)
13			Schachtbefahrung		
13	40			Schachtbefahrung	
13	40	1			Mechanische Anlagenteile (Seil, Fahrkorb, Seilrolle einschließlich Lagerung)
13	40	2			Elektrische Anlagenteile (Antriebsmotor, Kabineninstalla-tion, Elektroinstallation Windenhaus, Bedienelemente)
14			Türen, Tore, Verkleidungen		
14	41			Türen, Tore, Verkleidungen	
14	41	1			Türen Betriebsgebäude außen (Türblatt, Öffen-/Schließ-mechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)
14	41	2			Türen Betriebsgebäude innen (Türblatt, Öffen-/Schließ-mechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)
14	41	3			Türen Notrufnischen (Türblatt, Öffen-/Schließmechanis-mus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)
14	41	4			Türen Feuerlöschnischen (Türblatt, Öffen-/Schließmecha-nismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)
14	41	5			Querschlagstüren/-tore EQ (Torblatt, Öffen-/Schließmecha-nismus einschließlich Antrieb, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte
14	41	6			Querschlagstüren/-tore GQ, EQ, GA und EA (Torblatt, Öffen-/Schließmechanismus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte
14	41	7			Türen Elektronischen (Türblatt, Öffen-/Schließmechanis-mus, Scharniere, Dichtungen, Türkontakte)
15			Kräne, Hebezeuge		
15	42			Krane und Hebezeuge	
15	42	1			Mechanische Anlagenteile (Seil, Träger, Seilrolle einschließlich Lagerung)
15	42	2			Elektrische Anlagenteile (Antriebsmotor, Elektroinstallation, Bedienelemente)
16			Tunnelröhre		
16	43			Gewölbe bewehrte Blöcke	
16	44			Gewölbe unbewehrte Blöcke	
16	45			Sohlgewölbe/Sohlplatte	
16	46			Abdichtung	
17			Tunnelleibung		
17	47			Beschichtung bzw. Anstrich	
17	48			Blocknummerierungen	
17	49			Brandschutzverkleidungen (Platten oder Mörtel)	
17	50			Lärmschutzverkleidungen	
18			Fahrbahn und Seitenstreifen		
18	51			Fahrbahn	
18	52			erhöhte Seitenstreifen	
18	53			Kabelkanäle	
18	54			Bordsteine	
18	55			Bodenmarkierung	
19			Entwässerung		
19	56			Ulmendrainagen	
19	57			Frostkofferentwässerung	
19	58			Einlaufschächte	
19	59			Schlitzrinnen	
19	60			Schachtabdeckungen Sammelleitungen	
20			Fluchtwege		
20	64			Abschlusswände/Verschlusswände	
20	65			Flucht-, Rettungswege und Zugänge	
20	66			Querschläge	
21			Nischen		
21	67			Nischenkörper	
21	68			Nischenabdeckungen	
22			baul. Lüftungsanlagen		
22	69			Lüftungsschächte	
22	70			Lüftungstürme	
22	71			Zwischendecke inkl. Auflager	
22	72			Trennwand	
22	73			Hängestangen	
23			Bauliche Anlagen		
23	74			Betriebsgebäude	
23	75			Betriebsstationen	
23	76			Geländer und Absturzsicherungen	
23	77			Kabelkollektoren	
24			Portale		
24	78			Portalbauwerk, Portalkranz	
24	79			Portalwände und Flügelwände	
24	80			Steinschlagnetze	
25			Gelände über Tunnel		
25	81			Böschungen	
25	82			Pflasterungen	
25	83			Steinschlichtungen	

ANHANG

7.1 Gruppierung mittels RFA und Verteilungsparameter der Übergangsdauer

LEGENDE für Tabelle 21 bis Tabelle 27

Mean … Mittelwert

SD … Standardabweichung

a_beta … erster Parameter der Beta-Verteilung

b_beta … zweiter Parameter der Beta-Verteilung

loc_beta … untere Grenze der Beta-Verteilung

scale_beta … Breite der Beta-Verteilung

Suffix "g_" … größer

Suffix "le" … kleiner gleich

Tabelle 21: Abdichtung und Entwässerung – Übergang 1➔2

Laenge_le	Laenge_g_	JDTLV_le	JDTLV_g_	Mean	SD	a_beta	b_beta	loc_beta	scale_beta
0,2				10,8960151	2,93398677	1,54564006	1,4960503	5,41793051	10,8012511
0,4	0,2			16,5480161	5,13813134	1,81895324	1,34054756	4,79800442	19,8187616
2,6	0,4	1628,5		9,27444904	2,19741172	1,43460291	2,0917758	5,75764409	9,14745581
2,6	0,4		1628,5	8,78835491	2,52709463	2,58801532	2,17700279	1,9723605	12,3975136
	2,6			10,5924798	5,21620434	1,49596325	1,31161044	0,6792966	18,5320827

Tabelle 22: Abdichtung und Entwässerung – Übergang 2➔3

Baujahr_le	Baujahr_g_	-3-start-age_l	3-start-age_g	Mean	SD	a_beta	b_beta	loc_beta	scale_beta
1982				6,66927022	2,07485563	1,65091252	1,43572459	2,51655771	7,73288921
1991,5	1982			7,2149765	1,9807762	2,43963028	2,56608908	2,11857056	10,513546
2002	1991,5	11,7		4,491544	0,9810185	1,8328533	1,50921004	2,36128106	3,8515974
2002	1991,5		11,7	5,45312091	2,12047493	1,47028988	1,35864408	1,55656816	7,57567931
	2002			2,58645683	0,92838055	1,17752561	2,11532052	1,39070541	3,69462716

Tabelle 23: Erhöhter Seitenstreifen – Übergang 1➔2

JDTV_le	JDTV_g_	Mean	SD	a_beta	b_beta	loc_beta	scale_beta
18549,5		8,64538263	3,73180281	1,70007994	2,25090211	1,62734779	16,6471719
	18549,5	13,5685522	2,49690196	1,33804098	1,30761148	9,17992804	8,51131502

Tabelle 24: Fahrbahn und Belag – Übergang 1➔2

JDTLV_le	JDTLV_g_	Mean	SD	a_beta	b_beta	loc_beta	scale_beta
1731,5		9,20549784	3,16267578	2,01744626	3,64227905	3,00304592	18,3226304
	1731,5	12,388048	3,24578156	2,5061461	1,77869313	3,58914472	14,8346172

Tabelle 25: Fahrbahn und Belag – Übergang 2➔3

-3-start-age_l	3-start-age_g	Mean	SD	a_beta	b_beta	loc_beta	scale_beta
25,2		8,19246793	2,21557202	1,74087275	2,5268476	4,29196344	10,0693254
	25,2	4,9590341	0,81919251	1,37460659	2,25731183	3,72200435	3,50706247

Tabelle 26: Tunnelröhre – Übergang 1➔2

Laenge_le	Laenge_g_	JDTLV_le	JDTLV_g_	Mean	SD	a_beta	b_beta	loc_beta	scale_beta
0,8				8,78692662	2,54729484	2,45068394	2,98426099	2,91537245	13,0095723
	0,8	2114,5		8,39296884	2,56869189	1,69664611	1,51493542	3,08871417	9,96955639
	0,8		2114,5	8,36137592	2,59408967	1,7058957	1,11641182	2,47762662	9,30304436

Tabelle 27: Tunnelröhre – Übergang 2➔3

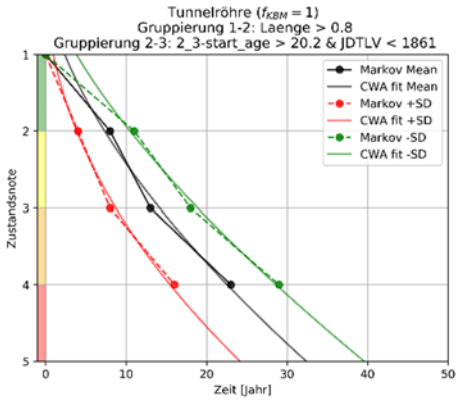
-3-start-age_	3-start-age_g	JDTLV_le	JDTLV_g_	Mean	SD	a_beta	b_beta	loc_beta	scale_beta
6,4				7,09832854	2,43607752	1,31940935	2,03560057	3,4951937	9,53424469
7,7	6,4			5,71670468	4,54977867	1,17015343	1,92387786	-0,44929752	17,1315113
10,2	7,7	1973		5,51817824	2,13812786	1,46660014	1,0976868	1,22333253	7,25909204
19,5	10,2	1973		6,67646694	1,67133613	1,60648523	1,10288954	3,14186933	5,81646285
19,5	7,7		1973	9,50794124	1,86919791	1,06490546	1,92762222	7,28478038	6,97954217
20,2	19,5			5,47014814	2,09164784	1,18123761	1,63445343	2,45200619	7,51748422
	20,2	1861		7,02796505	1,77175455	1,40156885	1,81439249	4,08023222	6,85825204
	20,2		1861	5,5613301	1,03957538	1,47443382	1,36110171	3,64764056	3,72015204

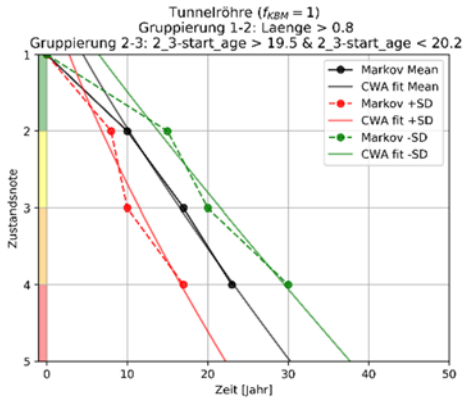
7.2 Degradationskurven für bauliche Anlagen

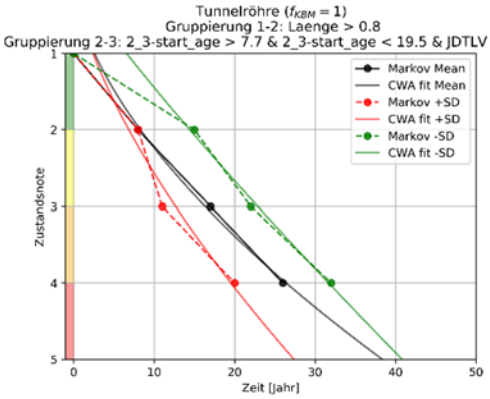
Tabelle 28: Parameter nach CEN CWA 16633 der baulichen Anlagen und deren Untergruppen

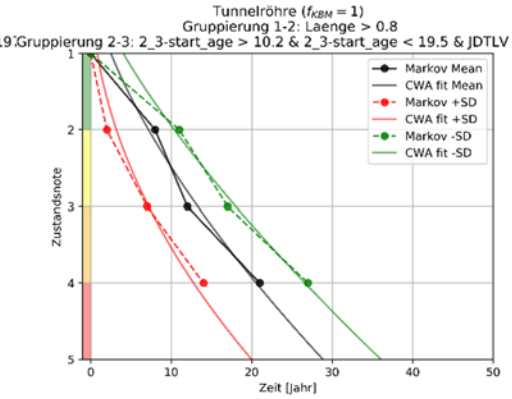
Bauteil	Gruppierung_1-2	Gruppierung_2-3	CI	b	c	b_std_minus	c_std_minus	b_std_plus	c_std_plus
Abdichtung und Entwässerung	Alle	Alle	0	0,96679235	0,5	1,2312125	0,5	0,54503265	0,62773644
Abdichtung und Entwässerung	Alle	Baujahr < 1982	0	0,96679235	0,5	1,26684057	0,5	0,54503265	0,62773644
Abdichtung und Entwässerung	Alle	Baujahr > 1982 & Baujahr < 1991.5	0	0,86762306	0,50759357	1,17138578	0,5	0,45809985	0,66094527
Abdichtung und Entwässerung	Alle	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age <11.7	0	0,93184871	0,50829055	1,06904658	0,57362741	0,58158281	0,60948108
Abdichtung und Entwässerung	Alle	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age >11.7	0	0,95179362	0,5	1,26026853	0,5	0,582518	0,59991118
Abdichtung und Entwässerung	Alle	Baujahr > 2002	0	0,86762306	0,50759357	1,14288754	0,5	0,35757086	0,73587771
Abdichtung und Entwässerung	Laenge < 0.2	Alle	0	0,86762306	0,50759357	1,21738995	0,5	0,32095385	0,77705054
Abdichtung und Entwässerung	Laenge < 0.2	Baujahr < 1982	0	0,89669024	0,5	1,24567806	0,5	0,32095385	0,77705054
Abdichtung und Entwässerung	Laenge < 0.2	Baujahr > 1982 & Baujahr < 1991.5	0	0,68323396	0,56606035	1,10561684	0,5	0,27008264	0,79801109
Abdichtung und Entwässerung	Laenge < 0.2	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age <11.7	0	0,86366809	0,52031412	1,18853372	0,5	0,35617394	0,74646655
Abdichtung und Entwässerung	Laenge < 0.2	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age >11.7	0	0,89407526	0,5	1,24567806	0,5	0,32816115	0,760132
Abdichtung und Entwässerung	Laenge < 0.2	Baujahr > 2002	0	0,76892777	0,52353907	1,10561684	0,5	0,28480635	0,77282564
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.2 & Laenge < 0.4	Alle	0	0,71793421	0,58578562	1,22130925	0,5	0,38891118	0,71655784
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.2 & Laenge < 0.4	Baujahr < 1982	0	0,78007113	0,55961387	1,22130925	0,5	0,38216305	0,73210497
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.2 & Laenge < 0.4	Baujahr > 1982 & Baujahr < 1991.5	0	0,71831936	0,57362741	1,18853372	0,5	0,33762575	0,74188436
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.2 & Laenge < 0.4	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age <11.7	0	0,71793421	0,58578562	1,18853372	0,5	0,38216305	0,73210497
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.2 & Laenge < 0.4	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age >11.7	0	0,78007113	0,55961387	1,22130925	0,5	0,38891118	0,71655784
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.2 & Laenge < 0.4	Baujahr > 2002	0	0,76187822	0,54603727	1,18853372	0,5	0,33762575	0,74188436
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV < 1628.5	Alle	0	0,98308075	0,5	1,26684057	0,5	0,68231906	0,55744148
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV < 1628.5	Baujahr < 1982	0	0,99923117	0,5	1,29970155	0,5	0,68231906	0,55744148
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV < 1628.5	Baujahr > 1982 & Baujahr < 1991.5	0	0,89669024	0,5	1,17138578	0,5	0,49728179	0,64157308
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV < 1628.5	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age <11.7	0	0,99923117	0,5	1,2681115	0,5	0,68323396	0,56606035
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV < 1628.5	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age >11.7	0	0,96679235	0,5	1,29970155	0,5	0,58158281	0,60948108
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV < 1628.5	Baujahr > 2002	0	0,89669024	0,5	1,16682193	0,5	0,35617394	0,74646655
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5	Alle	0	0,72554301	0,59474883	1,20166514	0,5	0,55337083	0,61338581
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5	Baujahr < 1982	0	0,93184871	0,50829055	1,23386292	0,5	0,582518	0,59991118
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5	Baujahr > 1982 & Baujahr < 1991.5	0	0,71831936	0,57362741	1,14288754	0,5	0,35757086	0,73587771
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age <11.7	0	0,66580537	0,63646871	0,60625311	0,82569564	0,45456973	0,6866858
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age >11.7	0	0,78007113	0,55961387	1,17138578	0,5	0,55337083	0,61338581
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5	Baujahr > 2002	0	0,71831936	0,57362741	1,14288754	0,5	0,36190855	0,72314659
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 2.6	Alle	0	0,64367217	0,6033952	0,76506548	0,63147188	0,35757086	0,73587771
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 2.6	Baujahr < 1982	0	0,76690009	0,55441104	0,87639058	0,5811413	0,35757086	0,73587771
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 2.6	Baujahr > 1982 & Baujahr < 1991.5	0	0,50606232	0,65886284	0,87920331	0,53859874	0,28898181	0,77626587
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 2.6	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age <11.7	0	0,54542823	0,65905918	0,68492681	0,66943903	0,32095385	0,77705054
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 2.6	Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age >11.7	0	0,76187822	0,54603727	1,09646245	0,5	0,30353772	0,77714197
Abdichtung und Entwässerung	Laenge > 2.6	Baujahr > 2002	0	0,51864052	0,64041398	0,87920331	0,53859874	0,19599981	0,88864402
Bauliche Ausrüstung	Alle	Alle	0	0,9228052	0,5	1,15786185	0,5	0,68567758	0,54726447
Betriebsräume und Nischen	Alle	Alle	0	0,81129791	0,5	0,98115548	0,5	0,33420872	0,71472313

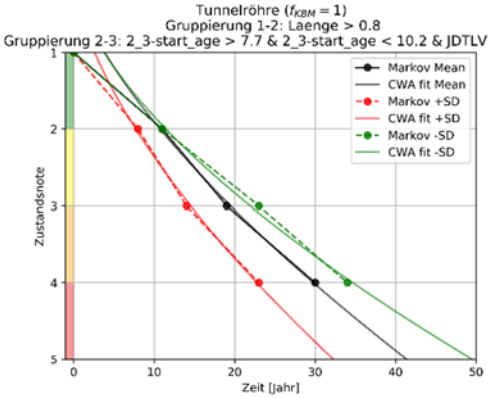
Bauteil	Gruppierung_1-2	Gruppierung_2-3	CI	b	c	b_std_minus	c_std_minus	b_std_plus	c_std_plus
Erhöhter Seiten- und Mittelstreifen	Alle	Alle	0	0,82076805	0,5	1,0483886	0,5	0,43919505	0,65524014
Erhöhter Seiten- und Mittelstreifen	JDTV < 18549.5	Alle	0	0,8499995	0,5	1,12310018	0,5	0,60466725	0,56377957
Erhöhter Seiten- und Mittelstreifen	JDTV > 18549.5	Alle	0	0,42295628	0,64041397	0,40996942	0,71238253	0,45769033	0,59912369
Fahrbahnaufbau und Belag	Alle	Alle	0	0,88519765	0,5	1,09602101	0,5	0,4306485	0,66943903
Fahrbahnaufbau und Belag	Alle	2_3-start_age < 25.2	0	0,87354588	0,5	1,07573156	0,5	0,4306485	0,66943903
Fahrbahnaufbau und Belag	Alle	2_3-start_age > 25.2	0	0,93659793	0,5	1,19794181	0,5	0,61836905	0,57498161
Fahrbahnaufbau und Belag	JDTLV < 1731.5	Alle	0	0,89751539	0,5	1,18374167	0,5	0,50289044	0,62944155
Fahrbahnaufbau und Belag	JDTLV < 1731.5	2_3-start_age < 25.2	0	0,88519765	0,5	1,12910921	0,5	0,4587321	0,65233596
Fahrbahnaufbau und Belag	JDTLV < 1731.5	2_3-start_age > 25.2	0	0,96679235	0,5	1,24567806	0,5	0,582518	0,59991118
Fahrbahnaufbau und Belag	JDTLV > 1731.5	Alle	0	0,88519765	0,5	1,09406727	0,5	0,4587321	0,65233596
Fahrbahnaufbau und Belag	JDTLV > 1731.5	2_3-start_age < 25.2	0	0,88519765	0,5	1,07062724	0,5	0,4587321	0,65233596
Fahrbahnaufbau und Belag	JDTLV > 1731.5	2_3-start_age > 25.2	0	0,95111237	0,5	1,22371749	0,5	0,68567758	0,54726447
Bauwerk (Gesamt)	Alle	Alle	0	0,89751539	0,5	1,12276351	0,5	0,49728179	0,64157308
Portal und Gesims	Alle	Alle	0	0,79319922	0,5	0,94852017	0,5	0,39934167	0,66165615
Schacht	Alle	Alle	0	0,42295628	0,64041397	0,42295628	0,64041397	0,42295628	0,64041397
Tunnelröhre	Alle	Alle	0	0,90966909	0,5	1,17138578	0,5	0,5326565	0,6139623
Tunnelröhre	Alle	2_3-start_age < 6.4	0	0,80202413	0,5	0,95848885	0,5	0,20471157	0,8662525
Tunnelröhre	Alle	2_3-start_age > 6.4 & 2_3-start_age < 7.7	0	0,80202413	0,5	0,95848885	0,5	0,20471157	0,8662525
Tunnelröhre	Alle	2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 10.2 & JDTLV < 1973	0	0,80202413	0,5	0,95848885	0,5	0,20471157	0,8662525
Tunnelröhre	Alle	2_3-start_age > 10.2 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV < 1973	0	0,99923117	0,5	1,26026853	0,5	0,72241102	0,54143685
Tunnelröhre	Alle	2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV > 1973	0	0,85119417	0,5	1,0507831	0,5	0,36864008	0,70890669
Tunnelröhre	Alle	2_3-start_age > 19.5 & 2_3-start_age < 20.2	0	0,87354588	0,5	1,06949861	0,5	0,30673148	0,80255394
Tunnelröhre	Alle	2_3-start_age > 20.2 & JDTLV < 1861	0	0,95111237	0,5	1,17138578	0,5	0,71791539	0,52739047
Tunnelröhre	Alle	2_3-start_age > 20.2 & JDTLV > 1861	0	0,98186147	0,5	1,22371749	0,5	0,68567758	0,54726447
Tunnelröhre	Laenge < 0.8	Alle	0	0,94957907	0,5	1,22371749	0,5	0,68567758	0,54726447
Tunnelröhre	Laenge < 0.8	2_3-start_age < 6.4	0	0,83621931	0,5	0,99009191	0,5	0,25741102	0,8181031
Tunnelröhre	Laenge < 0.8	2_3-start_age > 6.4 & 2_3-start_age < 7.7	0	0,83621931	0,5	0,99009191	0,5	0,25741102	0,8181031
Tunnelröhre	Laenge < 0.8	2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 10.2 & JDTLV < 1973	0	0,83621931	0,5	0,99009191	0,5	0,25741102	0,8181031
Tunnelröhre	Laenge < 0.8	2_3-start_age > 10.2 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV < 1973	0	1,03310289	0,5	1,26026853	0,5	0,84078331	0,5
Tunnelröhre	Laenge < 0.8	2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV > 1973	0	0,88156945	0,5	1,09501409	0,5	0,42083042	0,69424396
Tunnelröhre	Laenge < 0.8	2_3-start_age > 19.5 & 2_3-start_age < 20.2	0	0,89407526	0,5	1,14409613	0,5	0,36551752	0,75770789
Tunnelröhre	Laenge < 0.8	2_3-start_age > 20.2 & JDTLV < 1861	0	0,99723951	0,5	1,19794181	0,5	0,82119887	0,5
Tunnelröhre	Laenge < 0.8	2_3-start_age > 20.2 & JDTLV > 1861	0	1,03310289	0,5	1,22371749	0,5	0,83058828	0,5
Tunnelröhre	Laenge > 0.8	Alle	0	0,54503265	0,62773644	1	0,5	0,29699521	0,76335604
Tunnelröhre	Laenge > 0.8	2_3-start_age < 6.4	0	0,39913065	0,67914563	0,54021838	0,64066715	0,43362384	0,62666179
Tunnelröhre	Laenge > 0.8	2_3-start_age > 6.4 & 2_3-start_age < 7.7	0	0,39913065	0,67914563	0,54021838	0,64066715	0,43362384	0,62666179
Tunnelröhre	Laenge > 0.8	2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 10.2 & JDTLV < 1973	0	0,39913065	0,67914563	0,54021838	0,64066715	0,43362384	0,62666179
Tunnelröhre	Laenge > 0.8	2_3-start_age > 10.2 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV < 1973	0	0,54542823	0,65905918	1,11879611	0,5	0,35757086	0,73587771
Tunnelröhre	Laenge > 0.8	2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV > 1973	0	0,56446403	0,5981938	0,55865088	0,66226054	0,18991514	0,88191245
Tunnelröhre	Laenge > 0.8	2_3-start_age > 19.5 & 2_3-start_age < 20.2	0	0,27939898	0,84601648	0,44916201	0,77714026	0,18075877	0,91470847
Tunnelröhre	Laenge > 0.8	2_3-start_age > 20.2 & JDTLV < 1861	0	0,58532811	0,61683983	1,01733148	0,5	0,39490121	0,69022736
Tunnelröhre	Laenge > 0.8	2_3-start_age > 20.2 & JDTLV > 1861	0	0,59506303	0,62115749	1,09406727	0,5	0,36864008	0,70890669

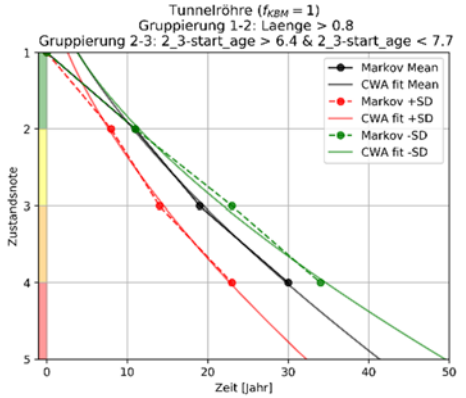

Tunnelröhre ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 20.2 & JDTLV < 1861
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

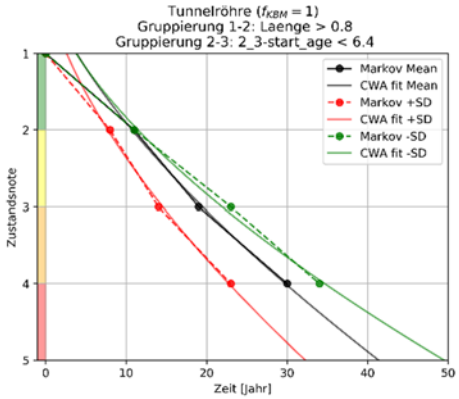

Tunnelröhre ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 19.5 & 2_3-start_age < 20.2
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

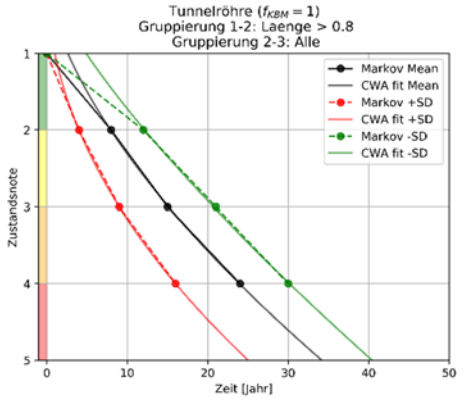

Tunnelröhre ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV > 19
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

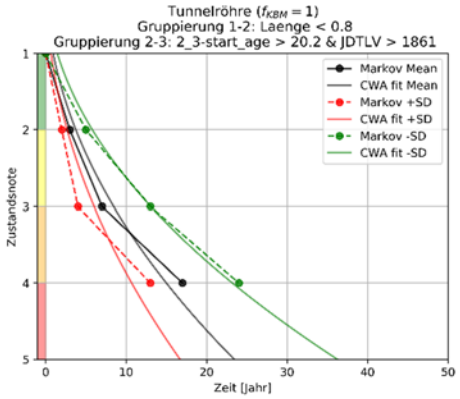

Tunnelröhre ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 10.2 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV < 19
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

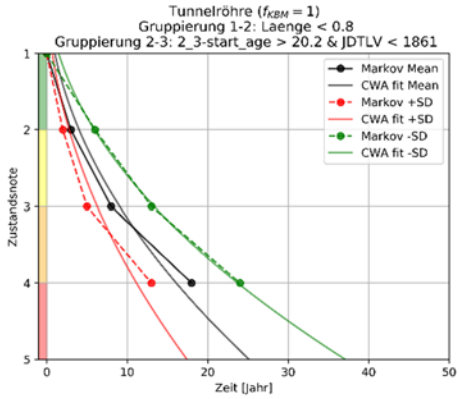

Tunnelröhre ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 10.2 & JDTLV < 19
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

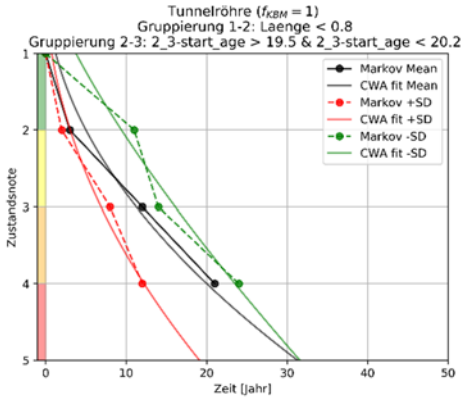

Tunnelröhre ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 6.4 & 2_3-start_age < 7.7
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

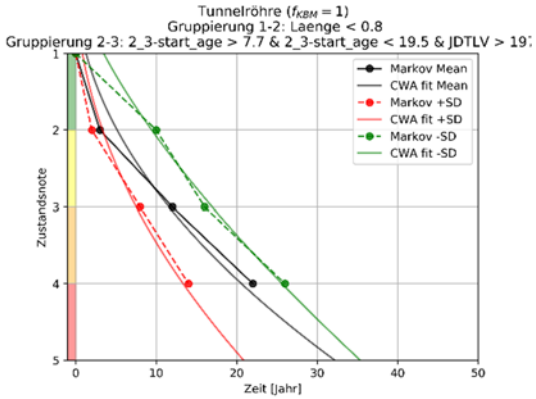

Tunnelröhre ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age < 6.4
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

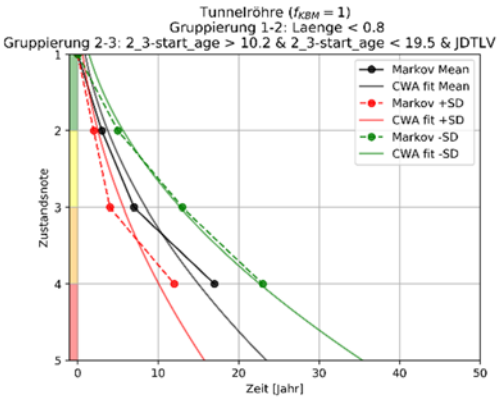

Tunnelröhre ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.8
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

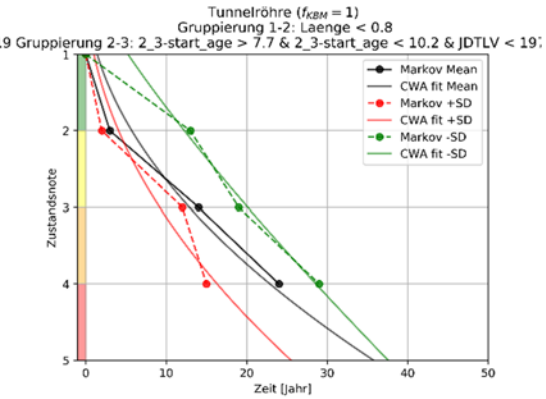

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge < 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 20.2 & JDTLV > 1861
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

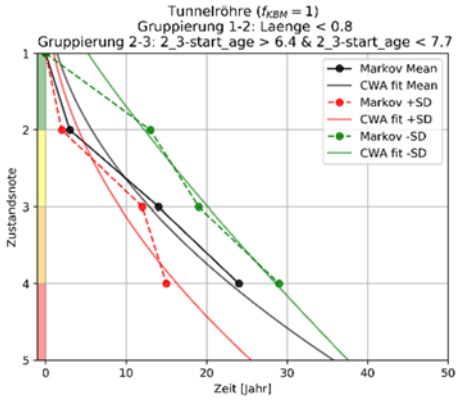

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge < 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 20.2 & JDTLV < 1861
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

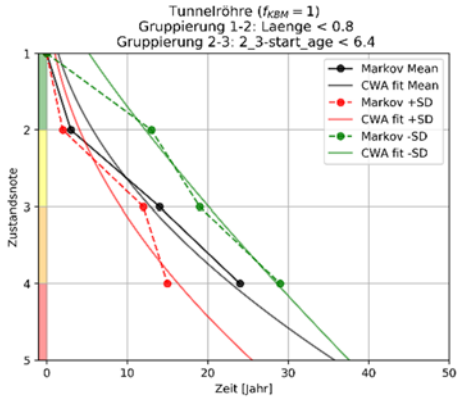

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge < 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 19.5 & 2_3-start_age < 20.2
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

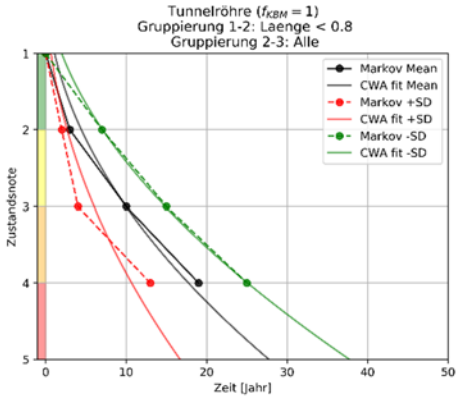

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge < 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV > 19
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

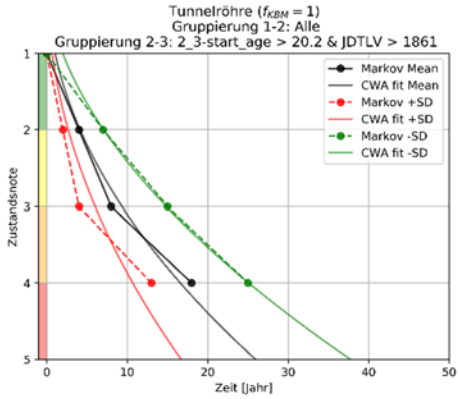

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge < 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 10.2 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV < 19
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

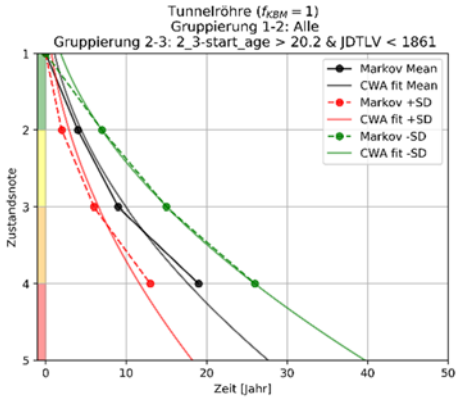

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge < 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 10.2 & JDTLV < 19
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

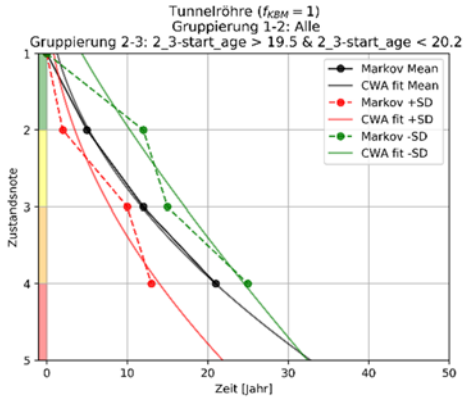

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge < 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 6.4 & 2_3-start_age < 7.7
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

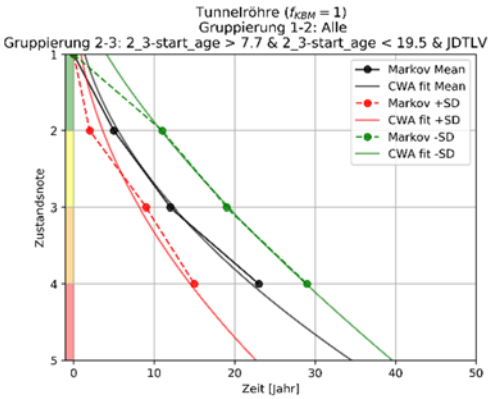

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge < 0.8
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age < 6.4
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

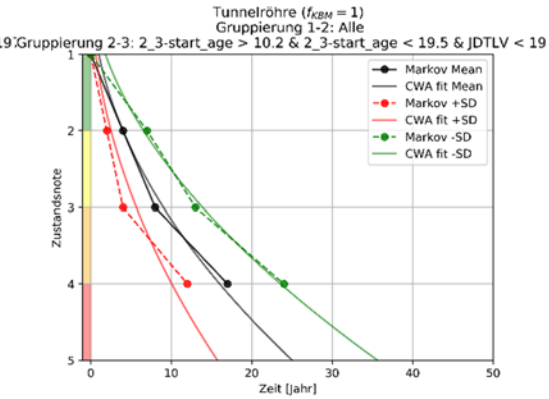

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge < 0.8
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

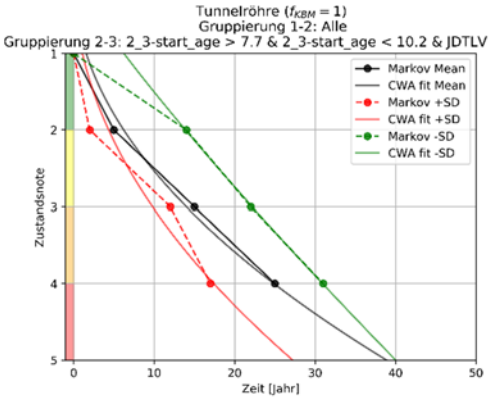

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 20.2 & JDTLV > 1861
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

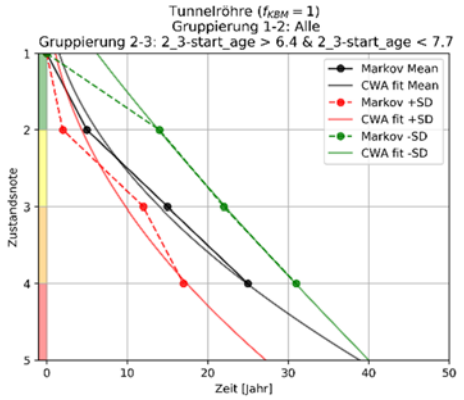

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 20.2 & JDTLV < 1861
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

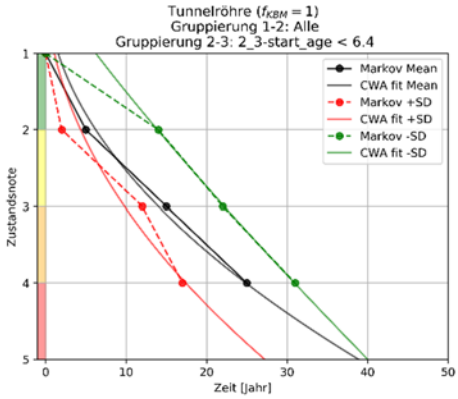

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 19.5 & 2_3-start_age < 20.2
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

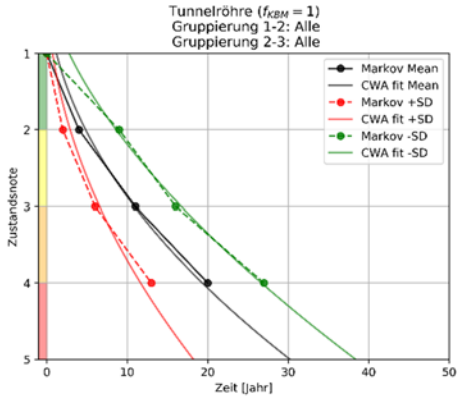

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV > 19
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

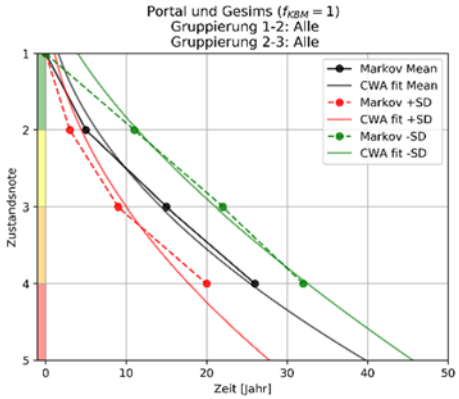

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 10.2 & 2_3-start_age < 19.5 & JDTLV < 19
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

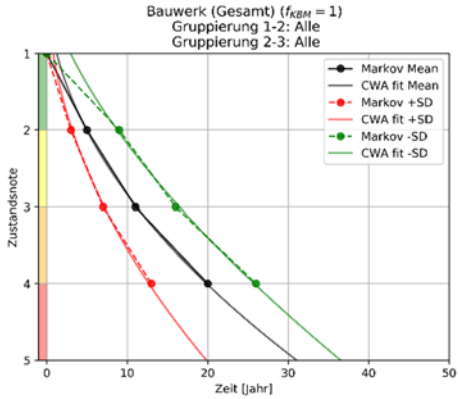

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 7.7 & 2_3-start_age < 10.2 & JDTLV < 19
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

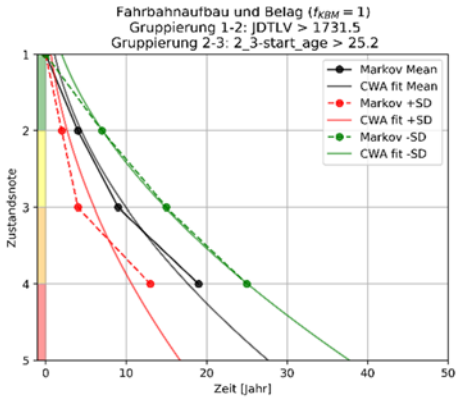

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 6.4 & 2_3-start_age < 7.7
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

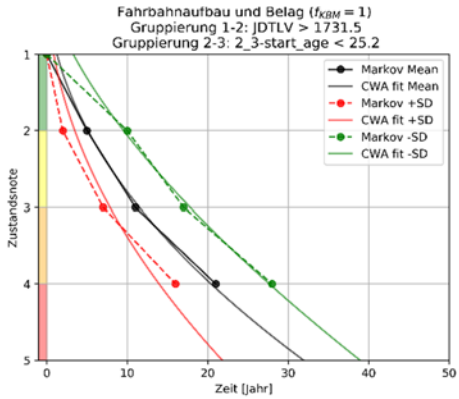

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age < 6.4
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

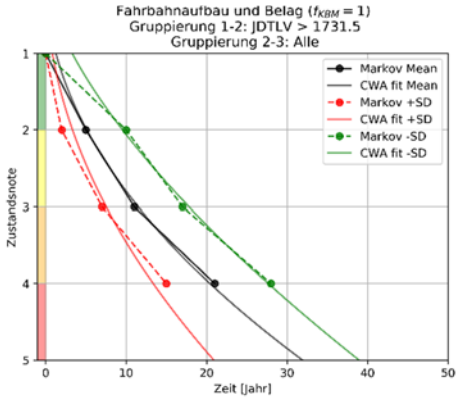

Tunnelröhre (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

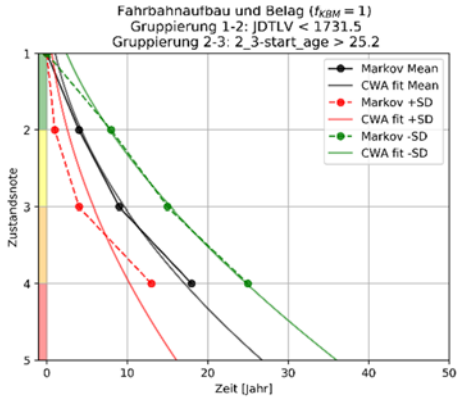

Portal und Gesims (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

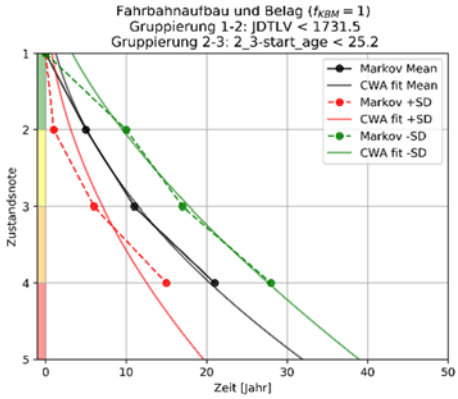

Bauwerk (Gesamt) (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

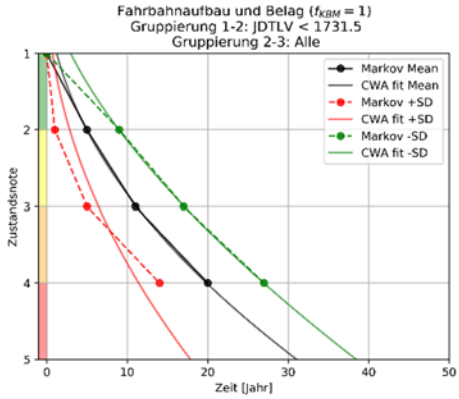

Fahrbahnaufbau und Belag (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: JDTLV > 1731.5
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 25.2
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

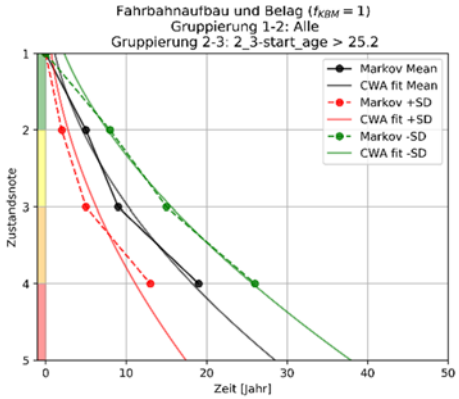

Fahrbahnaufbau und Belag (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: JDTLV > 1731.5
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age < 25.2
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

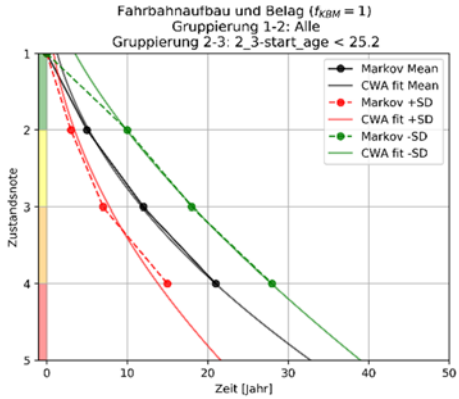

Fahrbahnaufbau und Belag (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: JDTLV > 1731.5
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

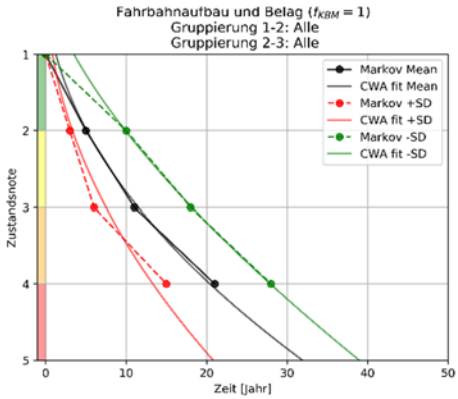

Fahrbahnaufbau und Belag (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: JDTLV < 1731.5
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 25.2
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

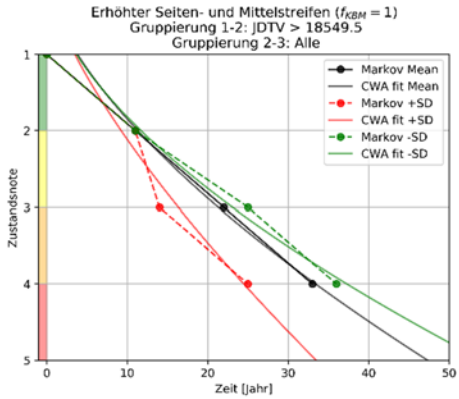

Fahrbahnaufbau und Belag (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: JDTLV < 1731.5
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age < 25.2
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

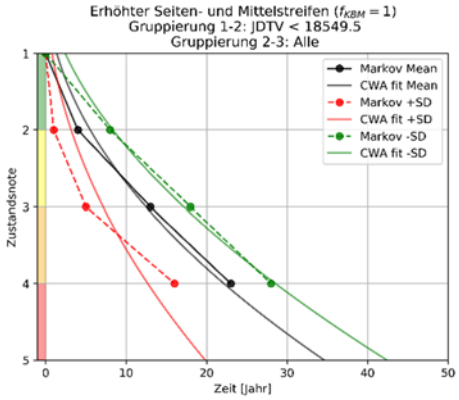

Fahrbahnaufbau und Belag (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: JDTLV < 1731.5
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

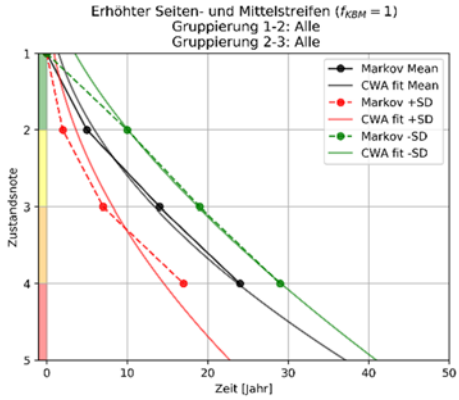

Fahrbahnaufbau und Belag (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age > 25.2
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

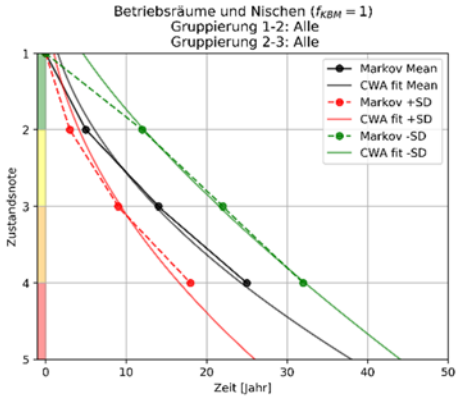

Fahrbahnaufbau und Belag (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: 2_3-start_age < 25.2
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

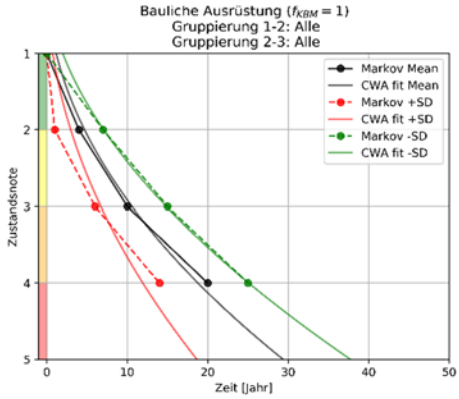

Fahrbahnaufbau und Belag (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

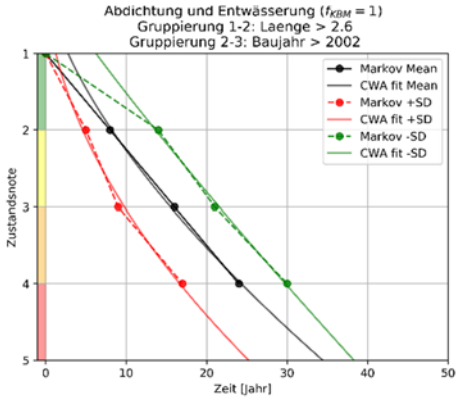

Erhöhter Seiten- und Mittelstreifen (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: JDTV > 18549.5
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

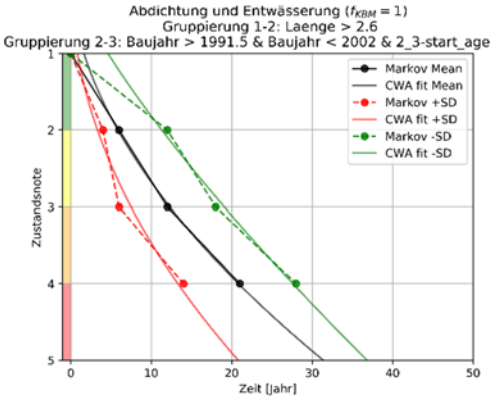

Erhöhter Seiten- und Mittelstreifen (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: JDTV < 18549.5
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

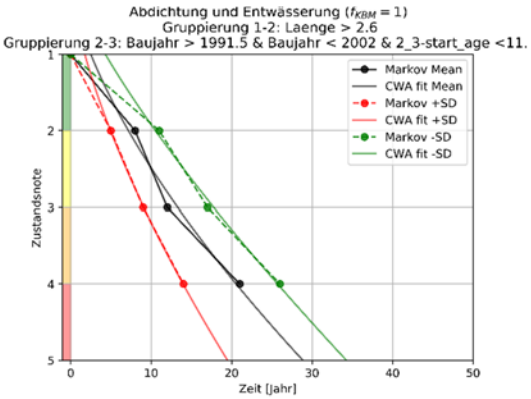

Erhöhter Seiten- und Mittelstreifen (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

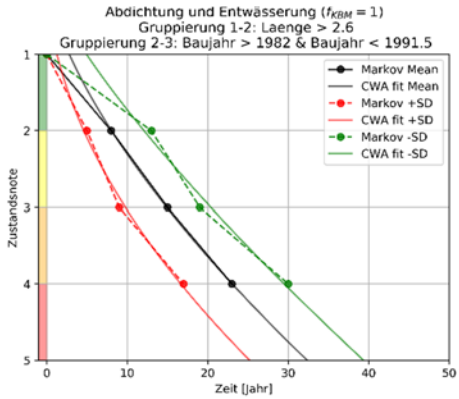

Betriebsräume und Nischen ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

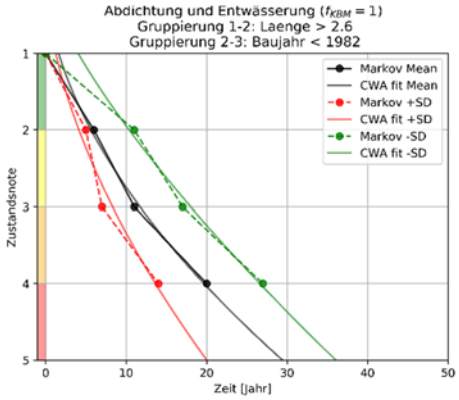

Bauliche Ausrüstung ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Alle
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

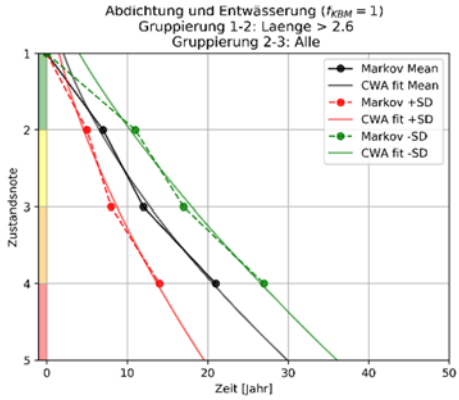

Abdichtung und Entwässerung ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 2.6
Gruppierung 2-3: Baujahr > 2002
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

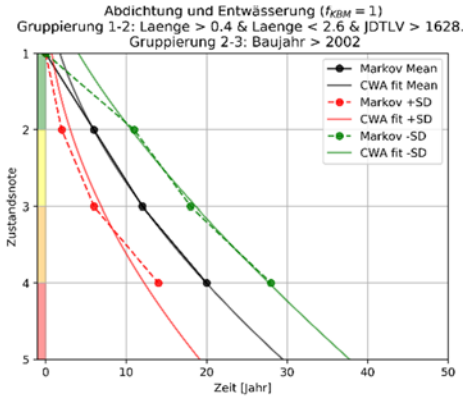

Abdichtung und Entwässerung ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 2.6
Gruppierung 2-3: Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age >11.
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

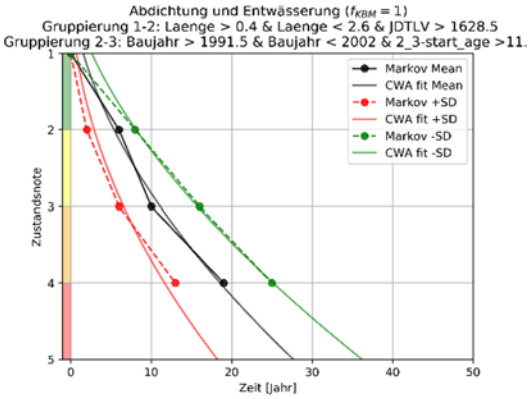

Abdichtung und Entwässerung ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 2.6
Gruppierung 2-3: Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age <11.
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

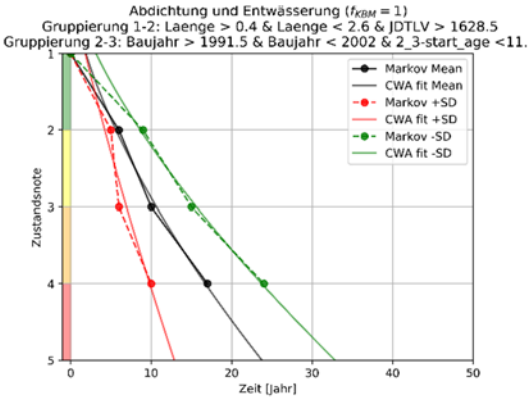

Abdichtung und Entwässerung ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 2.6
Gruppierung 2-3: Baujahr > 1982 & Baujahr < 1991.5
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

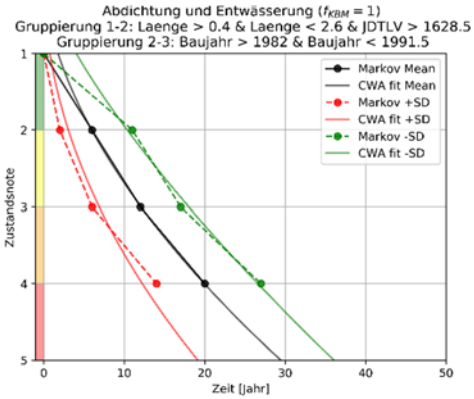

Abdichtung und Entwässerung ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 2.6
Gruppierung 2-3: Baujahr < 1982
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

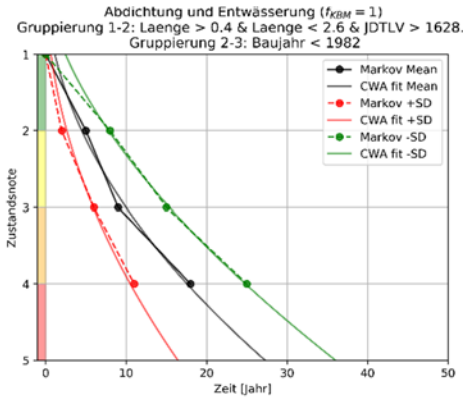

Abdichtung und Entwässerung ($f_{KBM} = 1$)
Gruppierung 1-2: Laenge > 2.6
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

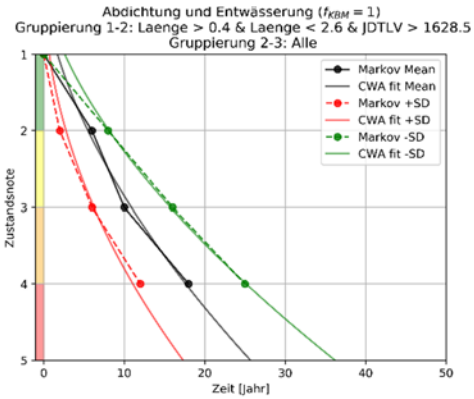

Abdichtung und Entwässerung (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5
Gruppierung 2-3: Baujahr > 2002
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

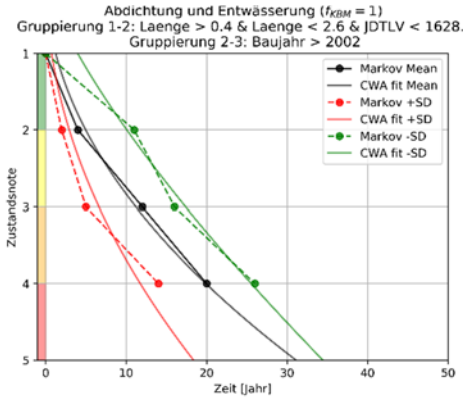

Abdichtung und Entwässerung (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5
Gruppierung 2-3: Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age >11.
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]

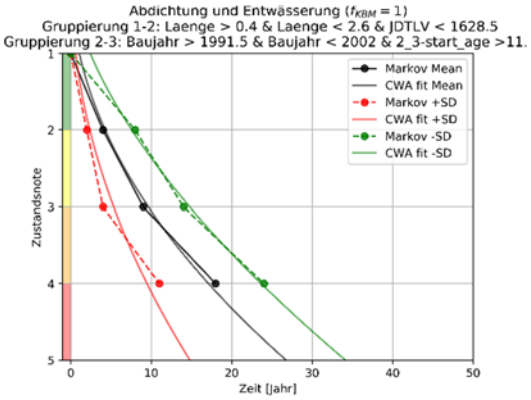

Abdichtung und Entwässerung (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5
Gruppierung 2-3: Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age <11.
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]


Abdichtung und Entwässerung (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5
Gruppierung 2-3: Baujahr > 1982 & Baujahr < 1991.5
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]


Abdichtung und Entwässerung (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5
Gruppierung 2-3: Baujahr < 1982
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]


Abdichtung und Entwässerung (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV > 1628.5
Gruppierung 2-3: Alle
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]


Abdichtung und Entwässerung (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV < 1628.5
Gruppierung 2-3: Baujahr > 2002
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]


Abdichtung und Entwässerung (f_{KBM} = 1)
Gruppierung 1-2: Laenge > 0.4 & Laenge < 2.6 & JDTLV < 1628.5
Gruppierung 2-3: Baujahr > 1991.5 & Baujahr < 2002 & 2_3-start_age >11.
Markov Mean
CWA fit Mean
Markov +SD
CWA fit +SD
Markov -SD
CWA fit -SD
Zustandsnote
Zeit [Jahr]