

Technische Anlagenbewertung im Asset-Management TAniA

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
D-A-CH Kooperation
Verkehrsinfrastrukturforschung 2018
DACH 2018

Juli 2021



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Deutschland



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität
Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2
1030 Wien
Österreich



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

Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Mühlestrasse 2, Ittigen
3003 Bern
Schweiz



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien
Österreich



FFG
Forschung wirkt.

Für den Inhalt verantwortlich:

Deighton Ingenieurbüro für Verkehrswesen und
Infrastrukturplanung GmbH
Naglergasse 7/9
1010 Wien
Österreich



TU Braunschweig, Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb,
Lehrstuhl für Infrastruktur- und Immobilienmanagement
Schleinitzstraße 23 A
38106 Braunschweig
Deutschland



TU Wien, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement,
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik;
Karlsplatz 13/234-01
1040 Wien
Österreich



AIT Austrian Institute of Technology GmbH (AIT)
Center for Mobility Systems
Giefinggasse 2
1210 Wien
Österreich



buildup AG in Kooperation mit Rubi Bahntechnik
Albisriederstrasse 203 A
CH-8047 Zürich-Albisrieden
Schweiz



Technische Anlagenbewertung im Asset-Management TAniA

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
D-A-CH Kooperation
Verkehrsinfrastrukturforschung 2018
DACH 2018
Endbericht

Juli 2021

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Dr. Alfred WENINGER-VYCUDIL, Dipl.-Ing. Dr. Barbara BROZEK
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tanja KESSEL, Janos PASDERSKI MSc, Julia SIETAS MSc
Dipl.-Ing. Bettina CHYLIK, Dipl.-Ing. Dr. Christian SCHRANZ, M.Sc.
Dipl.-Ing. Dr. Dominik PRAMMER, Dipl.-Ing. Dr. Alois VORWAGNER
Paul CURSCHELLAS, Ramón BÜHLMANN

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Deutschland
Bundesministerium für Klima usw, Österreich
Bundesamt für Strassen, Schweiz

Auftragnehmer:

Deighton Ingenieurbüro für Verkehrswesen und Infrastrukturplanung GmbH, Österreich
TU Braunschweig, Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb, Lehrstuhl für Infrastruktur-
und Immobilienmanagement, Deutschland
TU Wien, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Forschungsbereich
Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik; Österreich
AIT Austrian Institute of Technology GmbH (AIT), Österreich
buildup AG in Kooperation mit Rubi Bahntechnik, Schweiz

KURZFASSUNG

Für eine objektive Entscheidung im Erhaltungsmanagement ist der Anlagenwert der Straßeninfrastruktur (Straße, Brücke, Tunnel, etc.), der in unterschiedlicher Art und Weise berechnet werden kann (buchhalterisch, betriebswirtschaftlich, technisch), ein zentraler Parameter. In den drei D-A-CH-Ländern liegen vielversprechende Ansätze für die Ermittlung eines „zustandsbasierten Technischen Anlagenwertes“ vor, der als ein Steuerungsinstrument (Key Performance Indicator, KPI) sowie als Vergleichswert im Rahmen von Lebenszyklusbetrachtungen herangezogen werden kann. Diese sind dabei in eine vereinheitlichte Bewertungsstruktur zu integrieren.

Das Hauptziel von TAniA – Technische Anlagenbewertung im Asset-Management besteht daher in der Entwicklung und praktischen Erprobung eines Berechnungsverfahrens zur Ermittlung eines zustandsbasierten Technischen Anlagenwertes sowie des Erneuerungswertes von Anlagen der Straßeninfrastruktur im Rahmen einer nachhaltigen Lebenszyklusbetrachtung. Dies dient als Grundlage für den technischen und strategischen Entscheidungsprozess (Stichwort Erhaltungsziele). TAniA liefert eine wesentliche Entscheidungs- und Steuerungsgrundlage für die Abschätzung des Erhaltungsbedarfs unter Berücksichtigung bestimmter Zielwerte, der maßgebenden Zustandsindikatoren und der maßgebenden Einflussparameter. Eine wesentliche Voraussetzung für einen effizienten Vergleich unterschiedlicher Netze ist ein universeller Berechnungsansatz, der TAniA zu einer praxisorientierten Lösung führt.

Auf der Grundlage einer umfassenden Studie der aktuellen Literatur, der zur Verfügung stehenden Richtlinien und Standards sowie den Ergebnissen von aktuellen Projekten ist es möglich, einen holistischen Bewertungsrahmen zu definieren. Darauf aufbauend ergeben sich die entsprechenden Definitionen für den zustandsbasierten Technischen Anlagenwert, der sowohl als monetäre Größe als auch normiert (Skala 0-100) mathematisch beschrieben wird. Die entsprechende Methodik zur Berechnung des Technischen Anlagenwertes zum jeweiligen Stichtag sowie in Abhängigkeit vom Zustand bzw. von der Zustandsentwicklung und möglichen Erhaltungsmaßnahmen (Lebenszyklus und Erhaltungsmaßnahmenstrategien) kann somit für die Straßenbefestigung, die Brücken und die Tunnel (baulich-konstruktiv sowie E&M-Ausrüstung) bestimmt werden. Hierfür wurden auch die möglichen Lebenszyklen untersucht, und ein Vorschlag für die Anwendung von standardisierten Lebenszyklen ist im Projekt verankert, sodass bei einem Fehlen von Ergebnissen einer Lebenszyklusauswertung auf diese Vorschläge zurückgegriffen werden kann.

Im Rahmen einer praktischen Anwendung auf 3 Teststrecken in Deutschland, Österreich und der Schweiz und einem Teilstraßennetz in Österreich (Großraum Wien) erfolgt die

Überprüfung der Anwendbarkeit der entwickelten Algorithmen und Methoden. Die Ergebnisse erlauben eine Bewertung des Technischen Anlagenwertes für alle untersuchten Anlagen und zeigen ein hohes Potential für eine praktische Anwendung in allen D-A-CH-Ländern, wobei vor allem der normierte (skalierte) Technische Anlagenwert für Benchmarkingaufgaben herangezogen werden kann.

TAniA versucht Lücken im aktuellen Bewertungs- und Entscheidungsprozess zu schließen und liefert somit eine Erweiterung für einen nachhaltigen Lebenszyklusansatz im Rahmen des Asset Managements.

ABSTRACT

The asset value of road infrastructure assets (pavements, bridges, tunnels) can be a decisive parameter for objective decisions in the context of asset management. It can be calculated in different ways, on the one hand from a more economic and accounting point of view and on the other hand in form of a technically oriented solution. At the moment, different approaches for a technical, condition-based asset value are under investigation in the three DACH countries. It should be used as a Key Performance Indicator KPI for controlling but also for benchmarking in the context of life-cycle assessment. A unified assessment framework should be integrated anyway.

The main objective of TAniA – Technical asset value assessment within asset management – is the development and practical approach of a calculation procedure for a technical, condition-based asset value and a reconstruction value of road infrastructure assets. It should be a part of a sustainable life-cycle solution as basis for a strategic and technical decision process (keyword maintenance targets and objectives). TAniA provides an essential principle for decisions and controlling of maintenance requirements, considering target values of decisive performance indicators and their influencing factors. A basic requirement for a comparison of different road networks is a unified calculation procedure, which leads TAniA to a practical oriented solution.

Based on a comprehensive study of the actual literature, available standards and guidelines and results from actual projects a holistic framework for the assessment is defined. Using this framework, the respective definition of a condition-based technical asset value in the form of a monetary and a non-monetary indicator (scale from 0 to 100) is mathematically stated. The relevant method for the calculation of the asset value at a given point of time, considering the actual and predicted condition in combination with necessary maintenance treatments (life cycle and maintenance treatment strategies), can be applied for road pavements, bridges and tunnels (structural and electro-mechanical components). Therefore, possible life cycles have been investigated and a proposal for standard life cycles is given. In case of missing results from life cycle approaches, these standardized life cycles can be used.

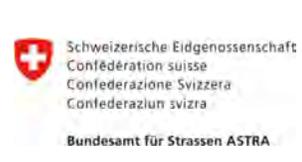
In the context of practical application on 3 test sections in Germany, Austria and Switzerland and on a sub-network in Austria (Vienna region) the applicability of the developed algorithm is being tested. The results enable an assessment of the technical asset value for all investigated assets and offer a high potential for a comprehensive practical implementation in all D-A-CH countries. Especially the normalized technical asset value can be used for benchmarking purposes.



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur



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



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA



FFG
Forschung.wirkt.

TAniA enables to close existing gaps in the actual assessment and decision processes. It extends the existing life cycle approaches, considering the requirements of a holistic and sustainable solution.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
1.1	Allgemeines	13
1.2	Anwendungsbereich	13
1.3	Ausgangssituation	14
1.4	Problemstellung	15
1.5	Zielsetzung	16
1.6	Nutzen	17
2	Grundlagen	19
2.1	Allgemeines	19
2.2	Begriffe und Definitionen.....	20
2.2.1	Schlüsselbegriffe der technischen Anlagenbewertung.....	20
2.2.2	Vergleich der maßgebenden Begriffe zwischen D-A-CH	21
2.3	Lebenszyklus und Technischer Anlagenwert	24
2.3.1	Generelle Begriffsdefinitionen für die Beschreibung des Lebenszyklus	25
2.3.2	Spezifische Begriffsdefinitionen für die Beschreibung des Lebenszyklus	32
2.3.3	Zusammenfassung der maßgebenden Begriffe	35
3	Stand der Technik.....	38
3.1	Aktuelle Literatur.....	38
3.1.1	Normen, Standards und Richtlinien	39
3.1.2	Maßgebende Projekte	45
3.1.3	Relevante internationale Literatur	46
3.2	Datengrundlagen und Datenmanagementsysteme	48
3.2.1	Deutschland	50
3.2.2	Österreich.....	54
3.2.3	Schweiz.....	59
4	Holistischer Bewertungsrahmen.....	64
4.1	Grundidee der Modellierung	64
4.1.1	Berechnungsprozess Technischer Anlagenwert.....	64
4.1.2	Konstruktions- und Ausrüstungsindikator	66
4.2	Gliederung und Struktur der Anlagen für die technische Anlagenbewertung.....	68
4.3	Anwendungsebenen	71
4.4	Eingangsgroößen	72
5	Modellierung dynamische Lebenszyklen	74
5.1	Grundlage Lebenszyklus	74
5.1.1	Definition Lebenszyklus.....	74
5.1.2	Auswahl von Zustandsprognosemodellen	76

5.1.3	Entwicklung von Zustandsprognosemodellen für TAniA	79
5.2	Empfehlungen für Zustandsprognosemodelle	92
5.2.1	Straßenoberbau	92
5.2.2	Brücken	95
5.2.3	Tunnel	99
5.3	Auswahl von Lebenszyklen	102
5.4	Standardisierte Lebenszyklen	103
5.4.1	Definition standardisierter Lebenszyklus	103
5.4.2	Grundlagen für die Auswahl von standardisierten Lebenszyklen	107
5.4.3	Vorschlag Standardlebenszyklen Straßenoberbau	108
5.4.4	Vorschlag Standardlebenszyklen Brücken	115
5.4.5	Vorschlag Standardlebenszyklen Tunnel	119
5.5	Dynamisierte Lebenszyklen	122
5.5.1	Begriff und Prozess der Dynamisierung	122
5.5.2	Überblick Prozessschritte	122
5.5.3	Auswahl Standardlebenszyklus	124
5.5.4	Auswahl aktuelles Konstruktionsintervall	125
5.5.5	Kalibrierung Konstruktionsintervall	126
5.5.6	Ermittlung des Ausrüstungsintervalls	127
5.5.7	Kalibrierung des Ausrüstungsintervalls	128
5.5.8	Berechnung der Zeitpunkte der nächsten Erhaltungsmaßnahmen im Lebenszyklus	129
5.6	Erhaltungsmaßnahmen	135
5.6.1	Allgemeines	135
5.6.2	Erhaltungsmaßnahmen im Standardlebenszyklus	136
5.6.3	Wirkungen und Abhängigkeiten von Erhaltungsmaßnahmen	139
5.6.4	Grundlagen Kosten Erhaltungsmaßnahmen	141
5.6.5	Kosten Erhaltungsmaßnahmen Straßenoberbau	142
5.6.6	Kosten Erhaltungsmaßnahmen Brücken	149
5.6.7	Kosten Erhaltungsmaßnahmen Tunnel (baulich und E&M)	153
5.6.8	Anwendungsgrenzen und -bereiche von Erhaltungsmaßnahmen	157
5.6.9	Diskontierung	157
6	Modellierung Technischer Anlagenwert und Erneuerungswert	160
6.1	Qualitativer Zusammenhang zwischen Technischem Anlagenwert und Zustand 160	
6.1.1	Bestimmung des Erneuerungswerts	161
6.1.2	Zusammenführung Kosten und Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen	161

6.1.3	Auswertung	162
6.1.4	Zusammenführung von Ausrüstung und Konstruktion zum gesamten Technischen Anlagenwert	164
6.1.5	Empfehlungen zur Ermittlung des Technischen Anlagenwertes über den Zustand der Anlagenteile.....	165
6.2	Wirtschaftlichkeit von Erhaltungs- und Investitionsmaßnahmen.....	182
6.2.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	182
6.2.2	Kennzahlen für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung Technischer Anlagenwert	182
7	Praktische Anwendung	186
7.1	Aufgabenstellungen der praktischen Anwendung	186
7.2	Auswahl Teststrecken und Teilstraßennetz.....	186
7.3	Grundlagen der Teststrecken und des Teilnetzes	190
7.3.1	Daten und Informationen	190
7.3.2	Verfügbarkeit Daten und Informationen Teststrecken und Teilnetz.....	192
7.3.3	Datenaufbereitung.....	193
7.4	Anwendung Analysealgorithmus.....	194
7.4.1	Auswahl Analysemethodik.....	194
7.4.2	Auswahl Modelle und Spezifikationen Länder	195
7.5	Implementierung Analysealgorithmus	201
7.5.1	Kurzbeschreibung Software dTIMS	201
7.5.2	Datenbankstruktur und Datenbankinhalt.....	202
7.5.3	Analysekonfiguration	206
7.5.4	Analyseset und Szenario für Optimierung.....	208
7.5.5	Arten von Ergebnissen	209
7.6	Ergebnisse der praktischen Anwendung.....	212
7.6.1	Straßenoberbau	213
7.6.2	Brücken.....	219
7.6.3	Tunnel.....	224
7.7	Empfehlungen aus praktischer Anwendung – Implementierungsleitfaden.....	228
7.7.1	Definition Implementierungsrahmen	228
7.7.2	Schritte der Implementierung.....	230
7.7.3	Anforderungen an Daten (Qualität und Quantität).....	231
7.7.4	Anforderungen an Asset-Management-Systeme	232
7.7.5	Anforderungen an die Ergebnisse	232
7.7.6	Vorschläge für die Verwendung der Ergebnisse für die strategische Erhaltungsplanung	233
7.7.7	Prozesse nach Implementierung	235

7.7.8 Risiko der Implementierung	236
Executive Summary	237
Zielsetzung und Anwendungsbereich	237
Grundlegende Definitionen	239
Modellierung	242
Technischer Anlagenwert	242
Technischer Anlagenwert im Lebenszyklus einer Anlage	243
Möglichkeiten der Zustandsprognose	245
Standardisierter und dynamisierter Lebenszyklus	245
Erhaltungsmaßnahmen im Lebenszyklus	247
Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Effektivität „TAniA“	248
Anwendungsebene	250
Praktische Anwendung	250
Empfehlungen für die praktische Umsetzung	255
Literatur	259
Abbildungsverzeichnis	268
Tabellenverzeichnis	273
Anhänge	276

1 EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

Die zunehmende Bedeutung der Erhaltung des Bestandes der Straßenverkehrsinfrastruktur und ihrer Anlagen und der damit verbundene Entscheidungsprozess im Rahmen der systematischen Erhaltungsplanung ist eine der großen Herausforderungen für die Straßenverwaltungen. Es zeigt sich, dass in den letzten Jahren gerade in den drei D-A-CH-Ländern, Deutschland (D), Österreich (A) und Schweiz (CH) der Wunsch nach einer einheitlichen bzw. harmonisierten Vorgehensweise bei der Festlegung von Entscheidungsindikatoren deutlich gestiegen ist, da neben einem „internationalen“ Vergleich der strategischen Vorgaben und Zielsetzungen auch die technische Ebene eine objektive und nachvollziehbare Grundlage benötigt, die ein Benchmarking zwischen den D-A-CH-Straßenverwaltungen zulässt.

Für eine objektive Entscheidung im Erhaltungsmanagement ist der Anlagenwert der Straßeninfrastruktur (Straße, Brücke, Tunnel etc.), der in unterschiedlicher Art und Weise berechnet werden kann (buchhalterisch, betriebswirtschaftlich, technisch), ein zentraler Parameter. In den drei D-A-CH-Ländern liegen vielversprechende Ansätze für die Ermittlung eines „Zustandsbasierten Technischen Anlagenwertes“ vor, der als ein Steuerungsinstrument sowie als Vergleichswert anhand von Parametern wie Qualität, Verfügbarkeit und Verkehrssicherheit unter Berücksichtigung von Lebenszykluskosten und Risiken herangezogen werden könnte. Voraussetzung hierfür ist eine einheitliche Bewertungsstruktur.

Der gegenständliche Endbericht (entspricht Deliverable 7.1 gem. Forschungsantrag) beinhaltet sämtliche Erkenntnisse aus den Projektbearbeitungsphasen und ist somit repräsentativ für das Projekt.

1.2 Anwendungsbereich

Das D-A-CH-Forschungsprojekt – Technische Anlagenbewertung im Asset-Management (TAniA) – beschreibt einen holistischen Bewertungsrahmen für die Ermittlung des Technischen Anlagenwertes, welcher definiert, entwickelt bzw. modelliert und anschließend praktisch angewendet wird. TAniA bezieht sich dabei entsprechend den Anforderungen der Ausschreibung ausschließlich auf den Bereich der baulichen Anlagen Straßenbefestigung

(primär Straßenoberbau), Brücken sowie Tunnel (baulich-konstruktiv und elektro-maschinelle Ausrüstung) der Bundesstraßen (hochrangiges Straßennetz).

Dieser Anwendungsbereich stellt die maßgebende Begrenzung dar, in dem die Alterungsmodelle (Zustandsverläufe), die (dynamischen) Lebenszyklen sowie die Modelle zur Bestimmung des Technischen Anlagenwertes in deren Struktur und Anwendbarkeit (Algorithmus) beschrieben und die maßgebenden Definitionen festgelegt werden. Auf der Grundlage dieser Struktur und der damit verknüpften Begriffsbestimmungen werden in den nachfolgenden Kapiteln die dazugehörigen detaillierten Berechnungsalgorithmen sowie Modelle vorgestellt und beschrieben.

Es sei an dieser Stelle auch explizit festgelegt, dass die im Rahmen von TAniA entwickelten und beschriebenen Begriffsdefinitionen und Grundlagen sich ausschließlich auf das gegenständliche Projekt beziehen. Die Aufgabe von TAniA besteht deshalb nicht in der Vereinheitlichung von Definitionen, sondern in der Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus, welcher unter der Berücksichtigung von örtlichen Randbedingungen in einer verständlichen Form angewendet werden kann. Aus diesem Grund wird auch auf eine umfassende Übersetzung in länderspezifische Begriffe verzichtet.

Darüber hinaus muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass aufgrund der Untersuchung von möglichen Definitionen und deren Festlegungen im Rahmen des Projektes auch begriffliche Abweichungen zum Angebot auftreten können. Dies betrifft insbesondere die Begriffe Wiederbeschaffungswert und Erneuerungswert (siehe hierzu Kapitel 2.3).

1.3 Ausgangssituation

Die Herausforderungen für die systematische Straßeninfrastrukturerhaltung sind in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Das Straßennetz muss unterschiedlichste Anforderungen erfüllen und die Entscheidungen für oder gegen eine bestimmte Erhaltungsstrategie werden daher zunehmend komplexer. Der Wunsch nach einfachen und objektiv nachvollziehbaren Entscheidungsgrößen steht dabei im besonderen Fokus der angewandten Forschung.

Die systematische Erhaltungsplanung oder das Asset Management fokussiert sich auf die Sicherstellung der Zuverlässigkeit von physischen Assets, wie z. B. Straßen, Ingenieurbauwerken und sonstigen Anlagen. Als ein Steuerungsinstrument im Asset Management

dienen die **Key Performance Indicators (KPIs)**, die als Vergleichswert von Parametern für Qualität, Verfügbarkeit und Verkehrssicherheit unter Berücksichtigung von Lebenszykluskosten und Risiken beruhen.

Wie bereits erwähnt, kann für einen objektiven Entscheidungsprozess der Technische Anlagenwert, der zu verwaltenden Assets, eine wesentliche Entscheidungsgröße darstellen. Dabei geht es nicht nur um den „aktuellen“ Wert einer Momentbetrachtung, sondern um eine nachhaltige Sichtweise im Rahmen von Lebenszyklusbetrachtungen unter verschiedenen Einflussgrößen, also eine dynamische Betrachtungsweise. Eine wesentliche Voraussetzung für die effiziente Verwendung eines solchen Bewertungsindikators ist eine zielorientierte Herangehensweise, die im Rahmen von TAniA zunächst erarbeitet und dann praktisch eingesetzt wird.

1.4 Problemstellung

Wie bereits erwähnt, gibt es derzeit keine standardisierte Vorgehensweise zur Bestimmung eines Technischen Anlagenwertes der Straßeninfrastruktur unter Berücksichtigung des Anlagenzustandes und dessen Entwicklung. Dies hat damit zu tun, dass zwar auf technischer Ebene bestimmte Methoden angewendet werden, diese jedoch einerseits nur bedingt in den derzeitigen Entscheidungsprozess der Erhaltungsmaßnahmenplanung einfließen und andererseits die hierfür verwendeten Grundlagen, wenn überhaupt, nur in geringem Maße jemals einer wissenschaftlichen Betrachtungsweise unterzogen wurden. Auch eine klare Definition eines Technischen Anlagenwertes bzw. eines Erneuerungswertes für die Zwecke des Erhaltungsmanagements fehlt.

Der Technische Anlagenwert bzw. Erneuerungs- oder Wiederbeschaffungswert zeigt ein sehr hohes Potential als maßgebender Indikator für den Entscheidungsprozess, allerdings nur dann, wenn seine Berechnung nach klar definierten und nachvollziehbaren Grundlagen geschieht. Auch die Komplexität von möglichen Berechnungsmethoden ist hier entscheidend. Je einfacher eine Berechnung erfolgt, desto nachvollziehbarer sind auch die Ergebnisse und desto nachvollziehbarer ist der gesamte Entscheidungsprozess. Andererseits müssen die Grundlagen auch unter allen Umständen den Anforderungen eines modernen Entscheidungsprozesses entsprechen. Die Probleme können daher wie folgt zusammengefasst werden:

- Fehlen einer einheitlichen (standardisierten) Definition des technischen Anlagenwertes bzw. Erneuerungswertes
- Fehlen eines vereinheitlichten Verfahrens zur Ermittlung des aktuellen technischen Anlagenwertes bzw. Erneuerungswertes sowie Anwendung im Rahmen einer nachhaltigen Lebenszyklusbetrachtung
- Suche nach vereinheitlichten Grundlagen und Eingangsgrößen
- Fehlen eines generellen Bewertungsprozesses unter Heranziehung des technischen Anlagenwertes bzw. Erneuerungswertes
- Fehlen von Erkenntnissen einer praktischen Anwendung

Auch der Zusammenhang zwischen Lebenszykluskosten und Lebenszyklusqualität soll im Rahmen des Projektes analysiert werden, sodass womöglich das technische Anlagevermögen nicht als monetärer Wert, sondern in Form von Qualitätsindikatoren ausgedrückt werden kann. Die primäre Aufgabe von TAniA ist daher, diese Probleme zu lösen und eine Gesamtlösung für die praktische Anwendung zur Verfügung zu stellen.

1.5 Zielsetzung

Das Hauptziel von **TAniA** - besteht in der Entwicklung und praktischen Erprobung eines Berechnungsverfahrens zur Ermittlung eines „zustandsbasierten Technischen Anlagenwertes“ (folglich auch nur als Technischer Anlagenwert bezeichnet) von Anlagen der Straßeninfrastruktur im Rahmen einer nachhaltigen Lebenszyklusbetrachtung. Dies dient als Grundlage für den technischen und strategischen Entscheidungsprozess (Stichwort Erhaltungsziele). TAniA liefert eine wesentliche Entscheidungs- und Steuerungsgrundlage für die Abschätzung des Erhaltungsbedarfs unter Berücksichtigung bestimmter Zielwerte, der maßgebenden Zustandsindikatoren und der maßgebenden Einflussparameter. Eine wesentliche Voraussetzung für einen effizienten Vergleich unterschiedlicher Netze ist ein universeller Berechnungsansatz, der mittels TAniA zu einer praxisorientierten Lösung führt. Die Ziele können daher wie folgt zusammengefasst werden:

- Definition des Technischen Anlagenwertes und des Erneuerungswertes (siehe Kapitel 2)
- Zusammenführung und Aufbereitung der Grundlagen zu einem holistischen Bewertungsrahmen (siehe Kapitel 4)

- Entwicklung einer Methodik, mit welcher der Technische Anlagenwert zum Stichtag sowie in Abhängigkeit vom Zustand bzw. der Zustandsentwicklung in Kombination mit allfälligen Erhaltungsmaßnahmen bestimmt werden kann (siehe Kapitel 5)
- Entwicklung von dynamischen Lebenszyklusprozessen für die maßgebenden Bauteile bzw. Bauteilgruppen sowie Unterkategorien (siehe Kapitel 6)
- Entwicklung eines Steuerungsprozesses¹ für die Erhaltungsplanung für unterschiedliche Entscheidungsebenen (strategisch, technisch) (siehe Kapitel 6)
- Praktische Erprobung und Entwicklung eines Implementierungsleitfadens (Handlungsempfehlung) auf der Grundlage einer umfassenden Pilotanwendung der entwickelten Algorithmen (siehe Kapitel 7)

1.6 Nutzen

Ein wesentliches Ziel von nachhaltigen Lösungen für die Straßenverkehrsinfrastruktur liegt in einer objektiven und standardisierten Vorgehensweise bei der Ermittlung eines Technischen Anlagenwertes, als wesentlicher Bestandteil des Entscheidungsprozesses im Asset Management. Der Nutzen von TAniA, welches als „Schlüsselprojekt“ für das strategische Erhaltungsmanagement angesehen wird, liegt einerseits in der Aufbereitung dieser Entscheidungsgrundlagen. Dies geschieht dabei durch eine Verbesserung der Erfassung von notwendigen Grundlagen und in der Definition von objektiven Bewertungsgrößen in Form von Schlüsselindikatoren (KPIs). Andererseits zeigt sich der Nutzen in der Integration einer anlagenspezifischen Lebenszyklusbewertung in den Entscheidungsprozess und für das Benchmarking zwischen den Straßenverwaltungen der D-A-CH-Länder. Dabei spielt die praktische Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse eine wesentliche Rolle, sodass der Nutzen nicht nur auf theoretischen Ergebnissen beruht, sondern auch auf den praktischen Einsatz ausgedehnt werden kann.

TAniA versucht Lücken im aktuellen Bewertungs- und Entscheidungsprozess zu schließen und diesen auf die Anforderungen einer umfassenden und nachhaltigen, auf einem

¹ Als Prozess wird im Rahmen des gegenständlichen Projektes ein sich über eine gewisse Zeit erstreckender Vorgang verstanden, bei dem etwas [allmählich] entsteht bzw. sich herausbildet und wo zu unterschiedlichen Zeitpunkten steuernde Entscheidungsgrößen die Lösung beeinflussen können.

Lebenszyklusansatz basierenden systematischen Erhaltungsplanungsprozess zu erweitern. Das Projekt liefert eine Gesamtlösung, die ohne großen zusätzlichen Aufwand in den Entscheidungsprozess der Straßenverwaltungen implementiert werden könnte. Natürlich obliegt es letztendlich den Erhaltern, die detaillierte Vorgehensweise intern festzuschreiben und in die konkreten Erhaltungsmanagementprozesse überzuführen. Das Instrumentarium dazu steht mit TAniA zur Verfügung. TAniA kombiniert somit die technisch-wissenschaftliche Problemlösung mit der praktischen Einsatzfähigkeit.

Der Nutzen für die praktische Implementierung der Ergebnisse von TAniA ist jedoch nicht nur bei den Straßenverwaltungen zu sehen, sondern bei allen „Stakeholdern“, da eine verbesserte Entscheidungsgrundlage letztendlich auf den Vorgaben der unterschiedlichen Personen- und Interessensgruppen basiert.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Allgemeines

Im Zuge der Grundlagenforschung wurden neben der maßgebenden Literatur die wesentlichen Begriffsdefinitionen für die Durchführung des Projekts TAniA aus den D-A-CH-Ländern gesammelt. Diese bilden die Basis für die nachfolgende Analyse der vorhandenen Begriffsbestimmungen und dienen in weiterer Folge für die Erarbeitung einheitlicher Definitionen für das gegenständliche Projekt, welche jedoch ausschließlich für die Anwendungen im Rahmen der vorliegenden Fragestellung zutreffen.

Insgesamt wurden mehr als 140 maßgebende Begriffe aus den Richtlinien und der aktuellen Literatur entnommen, die im weiteren Sinne mit dem Projekt TAniA in Verknüpfung gebracht werden können. Es sei an dieser Stelle nochmals explizit angemerkt, dass es sich hierbei um Begriffe aus dem Bereich Erhaltungsmanagement handelt und dies natürlich zu Abweichungen von Begriffen in anderen Fachgebieten führen kann.

Auf Grundlage der Ergebnisse des Arbeitspakets 2 (Deliverable 2.1 [74]) wurde im Endbericht eine Auswahl der maßgebenden Schlüsselbegriffe für die technische Anlagenbewertung vorgenommen. Die Zielsetzung besteht auch darin, hier ein vollständiges Bild von Definitionen und Begriffen zu geben, unabhängig davon, ob der entsprechende Wert zur Verfügung steht oder überhaupt in die jeweiligen Berechnungen einbezogen werden kann. Dies kann von Land zu Land unterschiedlich sein und ist zumindest aufgrund der Anforderung an die Flexibilität des Algorithmus zur Berechnung des Technischen Anlagevermögens wichtig. Es ist jedoch nicht Gegenstand des Projektes, ob und in welchem Ausmaß die Begriffe im jeweiligen Land übernommen oder angepasst werden. Es ist daher sinnvoll und zweckmäßig, die im Rahmen von TAniA verwendeten Begriffe im Detail zu erläutern und in Bezug auf deren Relevanz zur Ermittlung eines Technischen Anlagenwertes eindeutig und nachvollziehbar zu definieren. Dies kann den nachfolgenden Kapiteln entnommen werden.

2.2 Begriffe und Definitionen

2.2.1 Schlüsselbegriffe der technischen Anlagenbewertung

Für die Bestimmung des Technischen Anlagenwerts müssen die hierbei verwendeten Begriffe eindeutig definiert und durchgehend verwendet werden. Dies erfordert die Festlegung, welche Begrifflichkeiten näher betrachtet und definiert werden müssen. Dabei ist zwischen den Begriffen der systematischen Erhaltung und der Vermögensbewertung zu unterscheiden.

Die systematische Erhaltung der Straßeninfrastruktur unterscheidet zwischen der, in TAniA nicht berücksichtigten, betrieblichen Erhaltung (Kontrolle und Wartung) sowie der baulichen Erhaltung. Letztere gliedert sich in die **Instandhaltung**, **Instandsetzung** und **Erneuerung**. Diese Begrifflichkeiten werden in den nachfolgenden Abschnitten im Detail beschrieben und verglichen. Darüber hinaus ist für die Bestimmung des **Technischen Anlagenwerts** u. a. die Definition der Begriffe **Zustand** und **technische Nutzungsdauer** wichtig. Die detaillierte Beschreibung und Festlegung für den gegenständlichen Bewertungsrahmen kann dem Kapitel 2.2.2 entnommen werden [74].

In der Vermögensbewertung ist der Beschaffungswert die Basis für die Bestimmung des aktuellen Werts der Anlage. Es werden verschiedene Beschaffungswerte unterschieden. Daher werden nachfolgend der **Neubeschaffungswert**, der **Erneuerungswert** und der **Wiederbeschaffungswert** betrachtet. Auf diesen Beschaffungswerten basieren weitere Begriffe bzw. Werte der Vermögensbewertung, die ebenfalls Berücksichtigung finden sollten. In diesem Projekt gilt es den **zustandsabhängigen technischen Anlagenwert** zu definieren. Dieser ergibt sich aus dem Wertverlust gegenüber dem Verlauf des Erneuerungswerts (siehe weiter unten, Abbildung 3). Für die Ermittlung eines zustandsbasierten technischen Anlagenwertes ist zusätzlich die Festlegung der Begriffe **technischer Lebenszyklus** und **technische Nutzungsdauer** erforderlich. Die detaillierte Beschreibung und Festlegung für den gegenständlichen Bewertungsrahmen kann ebenfalls dem Kapitel 2.2.2 entnommen werden [74].

Als Eingangsgröße für die Berechnung des technischen Anlagenwerts ist es außerdem von Bedeutung, den Anlagenzustand zu berücksichtigen. In Anlehnung an die im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung verwendeten Zustandsindikatoren werden für die technische Anlagenbewertung ebenfalls **Indikatoren** gebildet, welche die wichtigsten Anlagenteile abbilden und somit einen Eindruck des Anlagenzustands geben. Die im

Rahmen des Projekts TAniA verwendeten Indikatoren werden als **Konstruktionsindikatoren** und **Ausrüstungsindikatoren** für das **Anlagevermögen** bezeichnet. Abschließend muss der Kernbegriff dieses Forschungsprojekts, der **Technische Anlagenwert**, definiert werden [74].

2.2.2 Vergleich der maßgebenden Begriffe zwischen D-A-CH

Im Zuge der Grundlagenforschung wurden die wesentlichen Begriffsdefinitionen der deutschsprachigen Länder zusammengetragen. Daraus ist ersichtlich, dass bereits innerhalb der D-A-CH-Länder zum Teil unterschiedliche Definitionen für einen Begriff vorhanden sind, welche in verschiedenen Disziplinen allgemeine Gültigkeit besitzen. Aus Gründen der Vollständigkeit wird ein Vergleich zwischen den maßgebenden Schlüsselbegriffen mit den entsprechenden Quellen nachfolgend gegeben. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass auch innerhalb der Länder die Begriffe für die unterschiedlichen Anlagen unterschiedlich definiert bzw. erläutert werden. Aus den länderspezifischen Begriffen wurden jene ausgewählt, die als allgemeingültig charakterisiert und für das gegenständliche Projekt als maßgebend eingestuft werden können. Diese Begriffe sind nachfolgend zusammengestellt [74].

Erhaltung

- D Maßnahmen der Erneuerung, Instandsetzung und Unterhaltung zur Wiederherstellung der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit eines Bauwerks bzw. einzelner Bauwerksteile.
Quelle: RI-ERH-ING – OSA [33]
-
- A Unter Erhaltung werden all jene (straßeninfrastrukturellen) Aktivitäten verstanden, die zur Aufrechterhaltung der Funktion der Infrastruktur notwendig sind. Darunter fallen alle Maßnahmen zur Sicherung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks bzw. einzelner Bauwerksteile und der Funktionsfähigkeit der Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen.
Quelle: AMBITION [3]
-
- CH Die Erhaltung umfasst die Gesamtheit aller Maßnahmen zur Gewährleistung der Betriebs- und Bauwerksicherheit sowie der Sicherstellung der Anlagesubstanz und des Anlagewertes der Straßenverkehrsanlage.
Quelle: SN 640 900a [63]
-

Erneuerung

- D Vollständige Wiederherstellung einer Verkehrsflächenbefestigung oder Teilen davon, sofern mehr als die Deckschicht betroffen ist. Dies kann durch Aufbringen neuer Schichten auf die vorhandene Befestigung im Hocheinbau oder durch Ersatz entsprechender Schichten im Tiefeinbau oder durch Kombination von Hoch- und Tiefeinbau erfolgen.

Quelle: RPE-Stra 01 [45]

- A Unter Erneuerung versteht man Maßnahmen, die zur Wiederherstellung des Straßenaufbaus führen (unter Umständen mit Änderung der Anlageverhältnisse)

Quelle: RVS 13.01.41 [49]

- CH Wiederherstellen eines gesamten Bauwerks oder von Teilen desselben in einen mit dem ursprünglichen Neubau vergleichbaren Zustand.

Quelle: SIA 469 (SN 588 469) [62]

Instandhaltung

- D Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.

Quelle: DIN 31051 [20]

- A Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann

Quelle: ÖNORM EN 13306 [38]

- CH Die Kombination aller technischen und administrativen Tätigkeiten einschließlich Aufsichtsmaßnahmen, um ein Produkt in einem Zustand zu halten oder wieder in einen Zustand zu versetzen, in dem es eine geforderte Funktion erfüllen kann

Quelle: SN EN 50126-1 [71]

Instandsetzung

- D Bauliche Maßnahmen größeren Umfangs, die der Wiederherstellung des planmäßigen Zustandes eines Bauwerks oder seiner Bauteile dienen.

Quelle: RI-ERH-ING – OSA [33]

- A Physische Maßnahme, die ausgeführt wird, um die Funktion einer fehlerhaften Einheit wiederherzustellen. Die Instandsetzung beinhaltet Maßnahmen zur Behebung von Schäden und Funktionsmängeln der Anlagen.

Quelle: RVS 13.03.41 [49]

- CH Wiederherstellen der Sicherheit und der Gebrauchstauglichkeit für eine festgelegte Dauer.

Quelle: SIA 469 (SN 588 469) [62]

Nutzungsdauer, technische

- D Zeitspanne zwischen Fertigstellung einer Anlage und dem Zeitpunkt, an dem diese soweit abgenutzt oder substanziell zerstört ist, dass eine bestimmungsgemäße Nutzung nicht mehr möglich ist.

Quelle: RPE-Stra 01 [45]

- A Zeitraum, in dem ein abnutzbarer Vermögensgegenstand technisch in der Lage ist, seine Funktion bzw. seinen Verwendungszweck zu erfüllen.

Quelle: RVS 13.05.31 [57]

- CH Zeitspanne der vorgesehenen Nutzung eines Bauwerks.

Quelle: SIA 469 (SN 588 469) [62]

Nutzungsdauer, wirtschaftliche

- D Zeitspanne zwischen Fertigstellung einer Anlage und dem Zeitpunkt, zu dem aus wirtschaftlichen Gründen eine Erneuerungsmaßnahme vorgenommen werden sollte.

Quelle: RPE-Stra 01 [45]

- A Zeitraum, welcher zum wirtschaftlich effizienten Einsatz eines Vermögensgegenstandes führt.

Quelle: RVS 13.05.31 [57]

- CH Zeitspanne der vorgesehenen Nutzung eines Bauwerks.

Quelle: SIA 469 (SN 588 469) [62]

Verhaltenskurve

D Aus Langzeitbeobachtungen und Ausfallverteilungen abgeleitete mittlere Zustandsentwicklung.
Quelle: RPE-Stra 01 [45]

A Degradations-/Alterungskurve:
Vereinfachte Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Degradation/ Alterung eines Bauteils oder eines Bauwerkes
Quelle: RVS 13.05.31 [57]

CH –

Zustandsgröße

D Anhand eines Zustandsindikators ermittelter quantitativer Ausdruck für die Ausprägung eines Zustandsmerkmals
Quelle: ZTV BEA-StB 09/13 [85]

A Die Zuordnung einer bestimmten Zustandsgröße zu einem bestimmten Bewertungswert, dem so genannten Zustandswert erfolgt dabei unter Anwendung von Normierungsfunktionen
Quelle: Handbuch PMS [79]

CH Kenngröße, Die Zustands- bzw. Kenngröße ist die Größe zur qualitativen bzw. quantitativen Beschreibung eines Zustands
Quelle: SN 640 904 [64]

2.3 Lebenszyklus und Technischer Anlagenwert

Wie in den vorangehenden Kapiteln beschrieben und diskutiert, liefern die analysierten Grundlagen eine Vielzahl von Beschreibungen und Definitionen der maßgebenden Schlüsselbegriffe, wobei diese für unterschiedliche Anwendungsfälle und Zielsetzungen gelten und daher auch nicht frei von Widersprüchen sind. Es hat sich gezeigt, dass in unterschiedlichen Bewertungsbereichen (z. B. betriebswirtschaftliche Bewertung und steuerliche Bewertung) die Begriffe auch eine unterschiedliche Bedeutung aufweisen können und darüber hinaus auch in den drei D-A-CH-Ländern häufig keine eindeutigen Festlegungen vorhanden sind. Aus diesem Grund sei hier nochmals explizit erwähnt, dass die Aufgabe des gegenständlichen Projektes nicht in der Vereinheitlichung von Definitionen besteht, sondern in der Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus, welcher unter der Berücksichtigung von örtlichen Randbedingungen in einer verständlichen Form

angewendet werden kann. Die für das Forschungsprojekt notwendigen Begrifflichkeiten bedürfen deshalb eines klaren Verständnisses der Forschungsträger und -partner.

Da in den nachfolgenden Kapiteln eine detaillierte Erläuterung der Begriffe vor dem Hintergrund des technischen Lebenszyklus erfolgt, wird auch auf eine umfassende Übersetzung in länderspezifische Begriffe verzichtet.

2.3.1 Generelle Begriffsdefinitionen für die Beschreibung des Lebenszyklus

Die Betrachtung des Lebenszyklus einer Anlage der Straßenverkehrsinfrastruktur ist die Ausgangslage für die Abschätzung des Technischen Anlagenwertes. Aus Sicht des gegenständlichen Projektes kann dabei von einem **Technischen Lebenszyklus** gesprochen werden, der in der Regel von der Errichtung der Anlage bis zu ihrem Abbruch oder der Außerdienststellung reicht. Viele Objekte müssen nicht zwangsweise abgebrochen werden, sie können auch für eine grundsätzlich andere Nutzung (z. B. als Straße oder Anlage für andere Verkehrsträger, Rückbau) herangezogen werden, sodass ein neuer technischer Lebenszyklus beginnt. Eine Erneuerungsmaßnahme (Definition siehe Kapitel 2.3.2 bzw. 2.3.3) bedeutet hingegen nicht das Ende des Technischen Lebenszyklus, sondern wird als Erhaltungsmaßnahme verstanden, die ein oder mehrere Anlagenteile betreffen kann (z. B. Erneuerung Straßenoberbau, Erneuerung Randbalken eines Brückenobjektes, Erneuerung der Tunneleinfahrtsbeleuchtung). Ob ein gesamter Lebenszyklus oder nur ein Teilausschnitt betrachtet wird, hängt vom Anwendungsfall ab.

Der Technische Lebenszyklus wird in den meisten Fällen, und so auch bei TAniA, über ein Zeit-Zustandsdiagramm dargestellt. Ein solches Zeit-Zustandsdiagramm zeigt schematisch Abbildung 1.

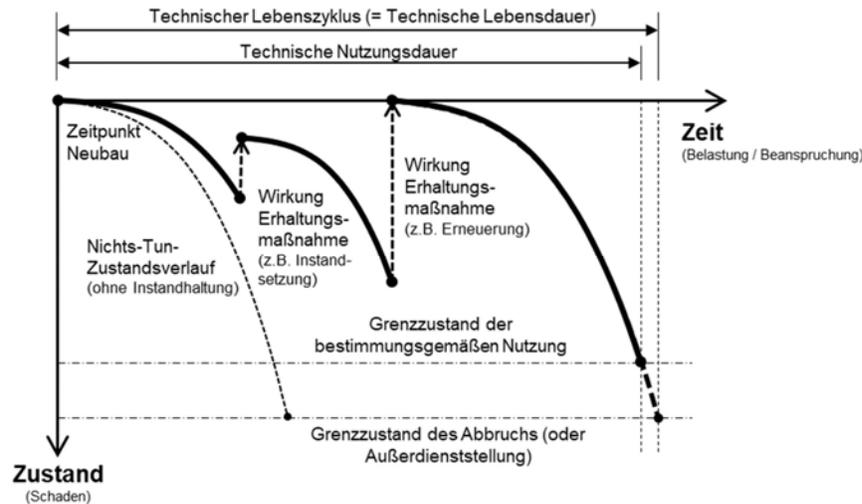


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Zustandsverlaufes im Technischen Lebenszyklus [74]

In der Regel wird auf der Abszisse der gesamte oder ein Teil des Lebenszyklus der Anlage dargestellt (Zeit- oder Belastungs- bzw. Beanspruchungsachse). Auf der Ordinate wird der Technische Zustand aufgetragen. In den meisten Fällen erfolgt die Darstellung des abnehmenden (Straßen)Zustandes nach oben, hingegen bei Ingenieurbauwerken nach unten. Die Darstellung in TAniA folgt der Darstellung der Ingenieurbauwerke, da diese im größeren Umfang im gegenständlichen Projekt behandelt werden und somit auch ein Unterschied zur Darstellung von monetären Werten gegeben ist. Die Wirkungen von unterschiedlichen Erhaltungsmaßnahmen können über die Sprünge im Zustandsverlauf charakterisiert werden, wobei die Funktion des Zustandsverlaufs in vielen Fällen bereits laufende Instandhaltungsmaßnahmen abbildet.

Der Begriff **Zustand** spielt dabei eine entscheidende Rolle. Im Rahmen von TAniA definiert sich der Zustand über das Maß der Schädigung eines Bauteils bzw. Anlagenteils oder der gesamten Anlage. Dies bedeutet aber auch, dass beim Nichtvorhandensein eines Schadens der Zustand als „ausgezeichnet“ oder „sehr gut“ definiert werden kann. Wie aus dem **Schaden** der Zustand errechnet bzw. abgeleitet wird, kann von Anlage zu Anlage bzw. von Bauteil zu Bauteil sehr unterschiedlich sein. In einem Fall können sowohl die Schadensschwere als auch das Ausmaß die maßgebenden Einflussgrößen darstellen (z. B. bei Brückenbewertungen in D), in anderen Fällen wird der Zustand über eine einzelne physikalische Größe (technischer Parameter gemäß Beschreibung COST 354 [16]), wie beispielsweise den Reibungsbeiwert der Straßenoberfläche, definiert. Wie letztendlich der

Zustand z. B. eines Brückenbauteils, einer bestimmten Oberflächeneigenschaft des Straßenoberbaus oder eines gesamten Bauwerks bestimmt wird, ist in allen drei D-A-CH-Ländern in nationalen Normen und Richtlinien geregelt. TAniA geht daher von der Annahme aus, dass der Zustand einer zu bewertenden Anlage bekannt ist und gemäß den gültigen Richtlinien auch berechnet werden kann.

Die zeitliche Änderung des Zustandes liefert die Verlaufsfunktion des Zustandes, wobei diese in Abhängigkeit vom Zustandsmerkmal und den im Laufe des technischen Lebenszyklus durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen sehr unterschiedlich aussehen kann.

Entlang der Zeitachse (manchmal auch Zeit-Belastungsachse genannt) können nun die unterschiedlichen Zeiträume definiert werden. Die **Technische Nutzungsdauer** ist dabei jener Zeitraum, in dem eine abnutzbare Anlage technisch in der Lage ist, ihren Verwendungszweck zu erfüllen. Dieser beginnt mit der Herstellung bzw. Errichtung der Anlage und endet mit jenem Zeitpunkt, zu dem die Anlage soweit abgenutzt oder substanziell zerstört ist, dass eine bestimmungsgemäße Nutzung nicht mehr möglich ist (Grenzzustand der bestimmungsgemäßen Nutzung). Etwas länger kann die technische Lebensdauer sein. Diese endet dann mit dem Abbruch oder der Außerdienststellung der gesamten Anlage (Grenzzustand des Abbruchs oder der Außerdienststellung). In bestimmten Fällen kann es auch während der Technischen Nutzungsdauer zu einer temporären Einschränkung der bestimmungsgemäßen Nutzung kommen, deren Beseitigung jedoch nicht mit einem kompletten Austausch der Anlage verbunden ist (z. B. durch Schädigung und damit zusammenhängender Einschränkung bis zu bzw. während einer Erhaltungsmaßnahme) [74].

Abbildung 1 zeigt, wie bereits erwähnt, dass der Zustandsverlauf Unstetigkeiten infolge von Erhaltungsmaßnahmen hat. Erhaltungsmaßnahmen haben in den meisten Fällen eine zustandsverbessernde Wirkung, da Schäden beseitigt werden oder zumindest die Schadensentwicklung gebremst und somit der Zustandsverlauf verändert wird. Welche Arten von Erhaltungsmaßnahmen zur Anwendung kommen, muss ebenfalls definiert und beschrieben werden.

Instandhaltungsmaßnahmen (Unterhalt/Unterhaltung in D) verringern bzw. vermeiden eine progressive Schadensentwicklung, führen jedoch nicht zu einer gänzlichen Beseitigung des Schadens bzw. der Schadensursache. Es handelt sich in der Regel um laufend durchgeführte Aktivitäten, die im Zustandsverlauf durch einen flacheren Kurvenverlauf abgebildet werden. In allen drei D-A-CH-Ländern wird davon ausgegangen,

dass auf dem höherrangigen Straßennetz Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden. **Instandsetzungsmaßnahmen** verbessern hingegen die Bausubstanz, was mit einem Sprung im Zustandsverlauf dargestellt werden kann. **Erneuerungsmaßnahmen** sind dabei so weitreichend, dass das Ergebnis einem neuwertigen Zustand entspricht (unter Berücksichtigung gewisser Bautoleranzen, jedoch unter Heranziehung des aktuellen Stands der Technik). Die Nachhaltigkeit einer Erhaltungsmaßnahme, dargestellt durch die Änderung des nachfolgenden Zustandsverlaufes, ist dabei wesentlich von der Intensität der Erhaltungsmaßnahme abhängig [74].

Abbildung 2 zeigt nun unterschiedliche Betrachtungsdauern im Lebenszyklus. Entweder wird der gesamte technische Lebenszyklus untersucht oder nur ein Ausschnitt (z. B. vom aktuellen Zeitpunkt bis zu einem bestimmten, nach vordefinierten Vorgaben gewählten Endzeitpunkt). Liegt der Endpunkt der Betrachtung nicht am Ende der technischen Nutzungsdauer, so muss unter Umständen mit einem Restwert zum Endzeitpunkt der Betrachtung gerechnet werden, der auch ein restliches technisches Anlagevermögen bestimmen kann.

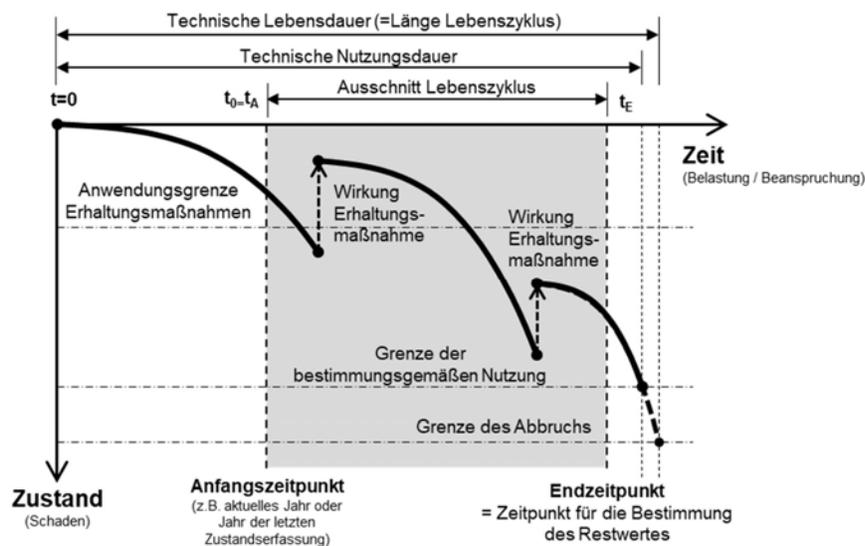


Abbildung 2: Betrachtung Teilbereich Lebenszyklus (Ausschnitt Lebenszyklus) [74]
 t_0 ...Bezugszeitpunkt = t_A ...Anfang des Ausschnitts des Lebenszyklus

Neben dem Zustandsverlauf spielt die wertmäßige Beschreibung der Anlage oder bestimmter Anlagenteile eine wesentliche Rolle. Abbildung 3 zeigt unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Begriffe den Zusammenhang zwischen dem Zustandsverlauf und

dem Wertverlauf von Anlagen der Straßenverkehrsinfrastruktur im Rahmen der systematischen Erhaltungsplanung.

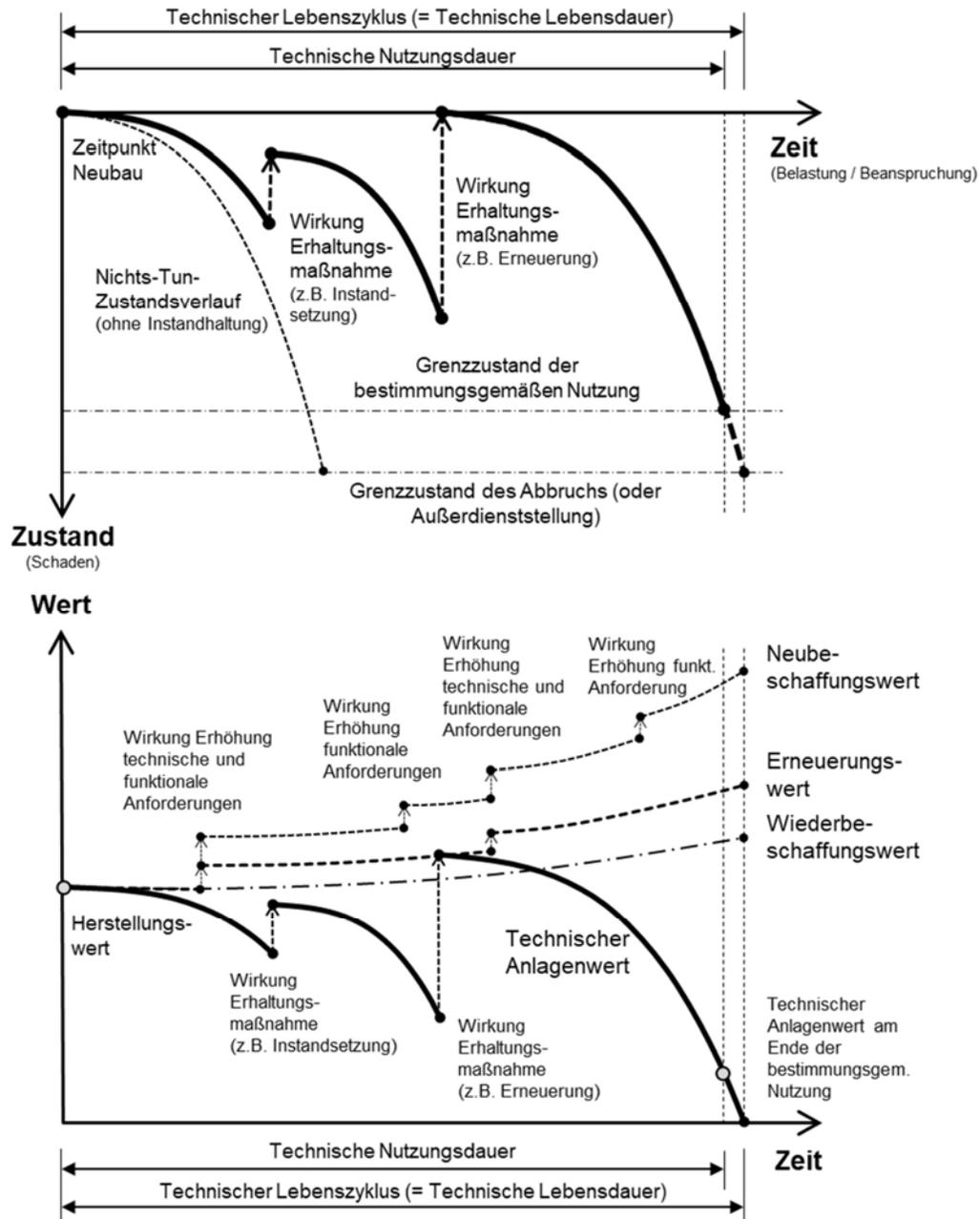


Abbildung 3: Wertmäßige Abbildung von Anlagen der Straßenverkehrsinfrastruktur für die systematische Erhaltungsplanung [74]

In Anlehnung an die zuvor zitierte Literatur liegt das Verständnis für den **Neubeschaffungswert** aus der Sicht des Projektes TAniA in einem theoretischen, monetären Wert (zugleich Synonym für Kosten), der zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgewendet werden muss, um eine Anlage nach dem aktuellen Stand der Technik (technischen Anforderungen) und nach den aktuellen funktionalen Anforderungen (z. B. Leistungsfähigkeit) wieder neu zu errichten. Dies bedeutet, dass eine Änderung der anwendbaren Richtlinien und Normen sowie eine Anpassung an aktuelle funktionale Anforderungen zu einem „Sprung“ und somit zu einer Erhöhung des Wertes zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb des Technischen Lebenszyklus führen kann (siehe Wirkung Erhöhung technische und funktionale Anforderung oder Wirkung Erhöhung funktionale Anforderungen in Abbildung 3). Eine Berücksichtigung der Indexanpassung (z. B. über die Änderung des Baupreisindex) führt zu einem leicht progressiven Anstieg des Wertes über die Zeit (siehe Verlauf Linie Neubeschaffungswert). Obwohl der Neubeschaffungswert zunächst für die Berechnung des Technischen Anlagenwertes von untergeordneter Bedeutung erscheint, ist eine klare Abgrenzung zu anderen Werten wichtig. Wie in Abbildung 3 ersichtlich, entspricht der Neubeschaffungswert zum Zeitpunkt der Errichtung sowohl dem Erneuerungswert, dem Wiederbeschaffungswert als auch dem Technischen Anlagenwert. Alle Werte haben ihren Ausgang in den Errichtungs- bzw. Herstellungskosten am Beginn des betrachteten Lebenszyklus [74].

Demgegenüber steht der **Wiederbeschaffungswert**. Dieser entspricht jenem theoretischen monetären Wert, der aufgewendet werden muss, um eine Anlage nach dem ursprünglichen Stand der Technik (Stand der Normen und Richtlinien zum Zeitpunkt der Errichtung) und nach ursprünglicher Funktionalität wieder zu errichten. Eine wertmäßige Anpassung an aktuelle Normen und Richtlinien sowie an aktuelle funktionale Anforderungen bleibt dabei unberücksichtigt, ungeachtet einer notwendigen Indexanpassung. Ähnlich wie beim Neubeschaffungswert, wird er aus Gründen der Vollständigkeit und des Verständnisses in Abbildung 3 dargestellt, jedoch im weiteren Verlauf der Berechnungen nicht berücksichtigt [74].

Im Rahmen der Berechnungsalgorithmen von TAniA ist der **Erneuerungswert** von zentraler Bedeutung. Er stellt einen theoretischen monetären Wert dar, der zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgewendet werden muss, um eine Anlage nach dem aktuellen Stand der Technik (technischen Anforderungen) zu errichten, jedoch ohne Berücksichtigung von erhöhten aktuellen funktionalen Anforderungen (z. B. Nicht-

Berücksichtigung von zusätzlichen Fahrstreifen aufgrund erhöhter Verkehrsbelastung). Er kann als Hybridlösung zwischen Neubeschaffungswert und Wiederbeschaffungswert definiert werden und berücksichtigt neben der Indexanpassung ausschließlich die periodischen Anpassungen an die zum jeweiligen Zeitpunkt gültigen Normen und Richtlinien (technischen Anforderungen). Dabei bleiben zusätzliche funktionale Anforderungen unberücksichtigt. Dies bedeutet, dass nur jene Erweiterungen berücksichtigt werden, die sich aufgrund der technischen Anforderungen zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt ergeben. Wird zum Beispiel ein Straßenoberbau strukturell verstärkt, ist dieser unter Heranziehung der aktuellen Dimensionierungsrichtlinie zu bemessen. Dabei sind auch die aktuelle Verkehrsbelastung sowie der zum aktuellen Zeitpunkt ermittelte Verkehrszuwachs zu berücksichtigen. Ähnliches gilt auch für die Verstärkung der Tragkonstruktion eines Brückenbauwerkes oder für die E&M-Ausrüstung in einem Tunnel [74].

Der Erneuerungswert ist der Basiswert für die Abschätzung bzw. Berechnung des Technischen Anlagenwertes. Abbildung 3 zeigt sehr deutlich, dass eine Berechnung des Erneuerungswertes unter Heranziehung der Herstellungskosten relativ komplex ist, da neben der Indexanpassung auch die durch Richtlinienänderungen notwendigen Werterhöhungen berücksichtigt werden müssen. Außerdem müssen die Herstellungskosten für die Anlage zur Verfügung stehen, was bei Bestandsobjekten nur bedingt gegeben ist. Wesentlich einfacher ist die Abschätzung der Erneuerungskosten zu einem bestimmten Zeitpunkt unter Verwendung aktueller Kostenschätzungen oder Preisbenchmarks (= laufende Aufzeichnung von Herstellungs- und Erneuerungskosten bestimmter Anlagenteile). Diese berücksichtigen einerseits die laufende oder periodische Indexanpassung, andererseits auch die bis zum Bezugszeitpunkt vorgenommenen wertsteigernden Verbesserungen im Bereich der technischen Anforderungen. Eine genaue Untersuchung der Entwicklung in der Vergangenheit kann damit entfallen [74].

Ungeachtet dessen, muss jedoch im Zuge einer Lebenszyklusbetrachtung auch die zukünftige Entwicklung eines Erneuerungswertes abgeschätzt werden. Genau genommen, müssten hierfür neben der zukünftigen Indexanpassung auch die Entwicklungen im Bereich der technischen Anforderungen abgeschätzt bzw. prognostiziert werden. Da vor allem zukünftige wertsteigernde technische Verbesserungen durch erhöhte technische Anforderungen rein spekulativ sind, wird auf diesen Anteil beim Erneuerungswert im Rahmen von TAniA grundsätzlich verzichtet.

Von wesentlicher Bedeutung ist bei der Ermittlung bzw. wertmäßigen Darstellung des Erneuerungswertes der Bezugszeitpunkt, welcher für jeden Erneuerungswert erkennbar sein muss. Die nachfolgende Funktion definiert den Erneuerungswert EW einer Anlage A mit Bezugszeitpunkt t_0 zum Betrachtungszeitpunkt t als Summe der Erneuerungswerte der Anlagenteile X unter Berücksichtigung einer mittleren jährlichen Indexanpassung p :

$$EW_{A,t,t_0} = \left(\sum_X EW_{X,t} \right) \cdot \left(1 + \frac{p}{100} \right)^{t-t_0} \quad \text{Gl. 1}$$

mit

- EW_{X,t,t_0} Erneuerungswert einer Anlage A mit Bezugszeitpunkt t_0 zum Betrachtungszeitpunkt t [€]
 $EW_{k,t}$ Erneuerungswert eines Anlagenteils X zum Betrachtungszeitpunkt t [€]
 p Indexanpassung [%]
 t Betrachtungszeitpunkt [Jahr]
 t_0 Bezugszeitpunkt (entspricht auch dem Anfang des Ausschnitts des Lebenszyklus t_A) [Jahr]

2.3.2 Spezifische Begriffsdefinitionen für die Beschreibung des Lebenszyklus

Neben dem hier definierten Erneuerungswert ist der **Technische Anlagenwert** die maßgebende Bewertungsgröße für die Berechnung des Anlagevermögens im Rahmen der systematischen Erhaltung der Straßeninfrastruktur. $TAniA$ definiert den Technischen Anlagenwert für die systematische Straßeninfrastrukturerhaltung **als Funktion des Zustandes und der daraus resultierenden Abminderung des Erneuerungswertes**.

Die Diskussionen mit den Straßenerhaltern bzw. Straßenbetreibern zeigen, dass auch andere Ausgangswerte, wie z. B. der Wiederbeschaffungswert, als abzumindernde Größe herangezogen werden könnten. Wie zuvor beschrieben, ist es jedoch in vielen Fällen schwierig, den Wiederbeschaffungswert aufgrund des Fehlens von Aufzeichnungen zu den Herstellungskosten genau zu berechnen. Darüber hinaus handelt es sich beim Technischen Anlagenwert um eine technische und keine betriebswirtschaftliche Größe, die für buchhalterische Abschreibungen herangezogen würde. Erneuerungsmaßnahmen innerhalb des Lebenszyklus, die in der Regel zu einem bestmöglichen Zustand führen (unter Heranziehung der aktuellen technischen Anforderungen), bedeuten auch eine Werterhöhung des Technischen Anlagenwertes auf das Niveau des Erneuerungswertes

und nicht des Wiederbeschaffungswertes. In diesem Sinn ist es notwendig, den im Rahmen von TAniA zu beurteilenden Bewertungsrahmen wie folgt zu skizzieren (siehe Abbildung 4) [74].

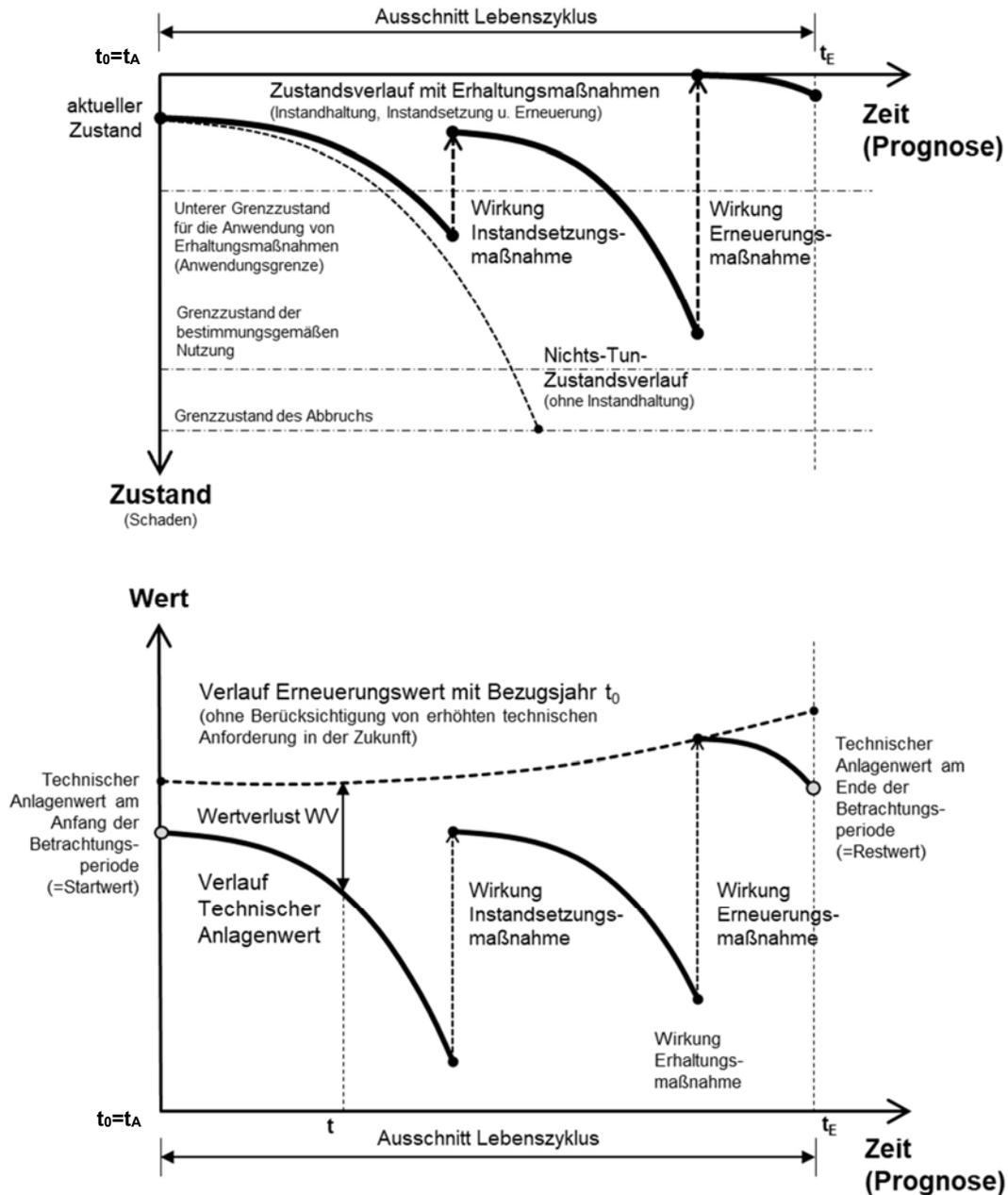


Abbildung 4: Spezifische Begriffsbestimmungen für die Lebenszyklusbewertung im Rahmen von TAniA (Ausschnitt Lebenszyklus) [74]

t_0 ...Bezugszeitpunkt = t_A ...Anfang des Ausschnitts des Lebenszyklus

Abbildung 4 zeigt sehr deutlich, dass der Verlauf des Erneuerungswertes die maßgebende Größe für die Bestimmung des Technischen Anlagenwertes im Rahmen der systematischen Straßeninfrastrukturerhaltung darstellt. Wie zuvor beschrieben, werden bei der Anwendung des Erneuerungswertes im Rahmen einer Prognose spekulative Änderungen der technischen Anforderungen nicht berücksichtigt. Jedoch werden jene vor dem Betrachtungszeitraum, zwischen der Herstellung und dem aktuellen Zeitpunkt, vorgenommenen werterhöhenden technischen Anforderungen, die sich im aktuellen Erneuerungswert wiederfinden, einbezogen. Dies bedeutet, dass die Änderungen des Technischen Anlagenwertes während der Betrachtungsperiode, welche in der Regel einen Ausschnitt des Lebenszyklus darstellt, in erster Linie vom Verlauf des Zustandes und somit von den geplanten Erhaltungsmaßnahmen, allerdings nur in geringem Ausmaß von der Anpassung des Index abhängig sind [74].

Der im Rahmen von TAniA definierte Technische Anlagenwert TAW der Konstruktion oder der Ausrüstung einer Anlage zu einem bestimmten Zeitpunkt t ist die Summe der Technischen Teilanlagenwerte der Anlagenteile X als Funktion des Zustandes Z des Anlagenteils X und dem Erneuerungswert des Anlagenteils X zum Zeitpunkt t :

$$TAW_{t,I,t_0} = \sum_X TAW_{X,t,t_0} \quad \text{mit} \quad TAW_{X,t,t_0} = f(Z_{X,t}; EW_{X,t,t_0}) \quad \text{Gl. 2}$$

mit

TAW_{t,I,t_0} Technischer Anlagenwert des Ausrüstungs- oder Konstruktionsindicators zum Zeitpunkt t mit Bezugszeitpunkt t_0 [€ oder CHF]

EW_{X,t,t_0} Erneuerungswert eines Anlagenteils X mit Bezugszeitpunkt t_0 zum Betrachtungszeitpunkt t [€ oder CHF]

TAW_{X,t,t_0} Technischer Anlagenwert eines Anlagenteils X mit Bezugszeitpunkt t_0 zum Betrachtungszeitpunkt t [€ oder CHF]

$Z_{X,t}$ Zustand des Anlagenteils X zum Betrachtungszeitpunkt t [-]

Der in Abbildung 4 dargestellte Wertverlust WV der Anlage zum Zeitpunkt t ist somit die Differenz zwischen dem Erneuerungswert zum Zeitpunkt t (als Summe aller Erneuerungswerte der Anlagenteile X) und dem Technischen Anlagenwert zum Zeitpunkt t und wird hier aus Gründen der Vollständigkeit ebenfalls mathematisch beschrieben:

$$WV_{t,I,t_0} = EW_{t,I,t_0} - TAW_{t,I,t_0} \quad \text{Gl. 3}$$

mit

WV_{t,t_0} Wertverlust der Konstruktion oder Ausrüstung einer Anlage mit
Bezugszeitpunkt t_0 zum Betrachtungszeitpunkt t [€ oder CHF]

EW_{t,t_0} Erneuerungswert der Konstruktion oder Ausrüstung einer Anlage mit
Bezugszeitpunkt t_0 zum Betrachtungszeitpunkt t [€ oder CHF]

TAW_{t,t_0} Technischer Anlagenwert der Konstruktion oder Ausrüstung einer Anlage mit
Bezugszeitpunkt t_0 zum Betrachtungszeitpunkt t [€ oder CHF]

2.3.3 Zusammenfassung der maßgebenden Begriffe

Auf Basis der vorhandenen Begriffsdefinitionen in den D-A-CH-Ländern, der Diskussionen mit den Straßenerhaltern im Zuge von Workshops sowie der für den Bewertungsrahmen von TAniA notwendigen Spezifikationen werden die maßgebenden Begriffe aus Gründen der Übersichtlichkeit nachfolgend nochmals zusammengefasst dargestellt. Weitere Details können hierzu den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2 entnommen werden) [74].

Wiederbeschaffungswert

Der Wiederbeschaffungswert entspricht dem theoretischen monetären Wert, der aufgewendet werden muss, um eine Anlage nach dem ursprünglichen Stand der Technik (Stand der Normen und Richtlinien zum Zeitpunkt der Errichtung) und nach ursprünglicher Funktionalität wieder zu errichten.

Neubeschaffungswert

Der Neubeschaffungswert entspricht dem theoretischen monetären Wert, der zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgewendet werden muss, um eine Anlage nach dem aktuellen Stand der Technik (technischen Anforderungen) und nach den aktuellen funktionalen Anforderungen (z. B. Leistungsfähigkeit) wieder neu zu errichten.

Erneuerungswert

Der Erneuerungswert entspricht dem theoretischen monetären Wert, der zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgewendet werden muss, um eine Anlage nach dem aktuellen Stand der Technik (technischen Anforderungen), jedoch ohne Berücksichtigung von erhöhten aktuellen funktionalen Anforderungen zu errichten.

Technischer Anlagenwert

Der technische Anlagenwert ist der auf Basis des aktuellen Anlagenzustands ermittelte Wert – dieser ergibt sich aus dem Erneuerungswert abgemindert um den Wertverlust infolge Abnutzung, Alterung oder Funktionsbeschränkung.

Technischer Lebenszyklus (=Lebensdauer)

Der technische Lebenszyklus (=Lebensdauer) reicht von der Errichtung oder Neukonstruktion der Anlage bis zu ihrem Abbruch oder der Außerdienststellung.

Technische Nutzungsdauer

Die technische Nutzungsdauer entspricht jenem Zeitraum, in dem eine abnutzbare Anlage technisch in der Lage ist, ihren Verwendungszweck zu erfüllen. Dieser beginnt mit der Herstellung bzw. Errichtung der Anlage und endet mit jenem Zeitpunkt, zu dem die Anlage so weit abgenutzt oder substanziell zerstört ist, dass eine bestimmungsgemäße Nutzung nicht mehr möglich ist.

Grenzzustand der bestimmungsgemäßen Nutzung

Der Grenzzustand der bestimmungsgemäßen Nutzung entspricht jenem Grenzwert des Zustandes eines Anlagenteils, ab dem dieser nicht mehr in der Lage ist, seine bestimmungsgemäße Nutzung zu erfüllen, wodurch Maßnahmen (z. B. Beschränkung der Nutzung etc.) notwendig werden.

Grenzzustand des Abbruchs

Der Grenzzustand des Abbruchs entspricht jenem Grenzwert des Zustandes eines Anlagenteils, ab dem die Anlage aus technischer Sicht abgebrochen oder demontiert wird.

Zustand

Der Zustand definiert sich über das Maß der Schädigung eines Bauteils bzw. Anlagenteils oder der gesamten Anlage.

Erhaltungsmaßnahme

Erhaltungsmaßnahmen sind bauliche Maßnahmen, die in den meisten Fällen eine zustandsverbessernde Wirkung haben, da Schäden beseitigt oder zumindest die

Schadensentwicklung gebremst und somit der Zustandsverlauf verändert wird. Hierzu zählen Instandhaltungs-, Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen.

Instandhaltung(smaßnahmen)

Instandhaltungsmaßnahmen verringern bzw. vermeiden eine progressive Schadenentwicklung, führen jedoch nicht zu einer gänzlichen Beseitigung des Schadens bzw. der Schadensursache.

Instandsetzung(smaßnahmen)

Instandsetzungsmaßnahmen stellen eine Verbesserung der Bausubstanz dar.

Erneuerung(smaßnahmen)

Erneuerungsmaßnahmen stellen weitreichende Maßnahmen dar, welche als Ergebnis einen neuwertigen Zustand auf Basis des aktuellen Stands der Technik haben.

Konstruktionsindikator

Der Konstruktionsindikator ist ein Indikator zur Beschreibung des Anlagevermögens für die konstruktiv-baulichen Teile einer Straßeninfrastrukturanlage, die innerhalb des technischen Lebenszyklus des Gesamtbauwerks in der Regel nicht zur Gänze ersetzt werden, jedoch im Rahmen von intensiven Erhaltungsmaßnahmen ertüchtigt oder (teil)erneuert werden können.

Ausrüstungsindikator

Der Ausrüstungsindikator ist ein Indikator zur Beschreibung des Anlagevermögens für die konstruktiv-funktionalen Teile einer Straßeninfrastrukturanlage, die innerhalb des Lebenszyklus des Gesamtbauwerks ein- oder mehrmals ersetzt/erneuert werden.

3 STAND DER TECHNIK

Eine wesentliche Voraussetzung für die Definition eines Bewertungsrahmens für das Anlagevermögen ist neben der Auflistung der maßgebenden Begriffe und Definitionen aus den Richtlinien, Normen und der fachtechnischen Literatur auch die Analyse der aktuellen Grundlagen und der damit verbundenen Literatur.

Neben der einschlägigen Literatur in den D-A-CH-Ländern wurde auch eine generelle Studie über aktuelle internationale Vorgaben und Projekte durchgeführt, die für das gegenständliche Projekt relevant bzw. maßgebend sein könnten. In den nachfolgenden Kapiteln sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammengefasst dargestellt [74].

3.1 Aktuelle Literatur

Die Auswahl der zu untersuchenden Literatur erfolgte unter Berücksichtigung der gestellten Forschungsfrage bzw. des Projektziels. Dabei wurde die folgende schrittweise Vorgehensweise bei der Auswahl der relevanten und letztendlich für das Projekt als maßgebend eingestuft Literatur angewendet [74]:

1. Erstellung eines generellen Überblicks von Grundlagen und einer ersten Auswahl unter Bezugnahme auf die definierten Themenbereiche und die Projektzielsetzung.
2. Auswahl und Auflistung der relevanten Literatur für Deutschland, Österreich und die Schweiz nach genereller Durchsicht der einzelnen Quellen und unter Bezugnahme auf die definierten Themenbereiche bzw. die Projektzielsetzung. Das Ergebnis dieser Untersuchung bzw. eine Zusammenstellung der ausgewählten Quellen kann den Kapiteln 3.1.1.1 (Deutschland), 3.1.1.2 (Österreich) und 3.1.1.3 (Schweiz) entnommen werden.
3. Auf der Grundlage einer weiterführenden detaillierten Durchsicht der relevanten Literatur wurden jene Grundlagen zusammenfassend aufgelistet, deren Inhalte und Vorgaben bzw. Erkenntnisse in das Projekt (direkt) übernommen werden sollten oder müssen.

3.1.1 Normen, Standards und Richtlinien

Um eine nachvollziehbare und umfassende Grundlage für die nachfolgenden Festlegungen und Entwicklungen zu erhalten, wurde die Literatur unter Bezugnahme auf das Projektziel bzw. die Forschungsfrage in nachfolgende Themenbereiche gegliedert. Diese lassen sich ebenfalls in den länderbezogenen Kapiteln wiederfinden [74].

Datenerfassung und Datenerhebung zur Bereitstellung der notwendigen Datengrundlagen für eine Berechnung eines zustandsbasierten technischen Anlagevermögens

Der Schwerpunkt bezieht sich bei diesem Thema auf bereits aufbereitete Daten (z. B. Zustandswerte bzw. Zustandsnoten zur Beschreibung des Anlagenzustands) und nicht auf Roh- oder Maschinendaten, die im Zuge einer technischen Bearbeitung für eine Weiterverwendung erst aufbereitet werden müssen. Eine detaillierte Auswahl der zur Verfügung stehenden Indikatoren erfolgte in der Literaturrecherche des Projektes (Deliverable D 2.1 [74]) und im Rahmen der Definitionen des holistischen Bewertungsrahmens (Deliverable 3.1 [75]), sodass im Rahmen des gegenständlichen Berichtes nur die maßgebende Literatur aufgelistet wird.

Lebenszyklusbewertung und Lebenszyklusanalyse

Dieser Themenbereich liefert die Grundlagen für eine Aussage zur Entwicklung von zeit- und belastungsabhängigen Zustandsgrößen bzw. -werten und der Anwendung von entsprechenden Erhaltungsmaßnahmen innerhalb des Lebenszyklus.

Vermögensbewertung

Die derzeit in Verwendung bzw. in Entwicklung befindlichen Verfahren und Methoden zur Bewertung des Vermögens (in erster Linie aus der Sicht der Straßenerhaltung) sind in diesem Themenbereich enthalten.

3.1.1.1 Deutschland

Die Untersuchung der maßgebenden Literatur in Deutschland hat gezeigt, dass für alle Bereiche Quellen vorhanden sind, diese für einige Bereiche allerdings nicht stark

ausgeprägt sind. Die nachfolgend aufgelistete Literatur liefert eine wesentliche Grundlage für dieses Projekt und wird für weiterführende Festlegungen direkt herangezogen.

Für den Bereich der **Datenerhebung bzw. des Datenmanagements** zur Beschreibung der Anlagenzustände liegen verschiedene, tiefgehende Quellen vor, die dem Projekt zugrunde gelegt werden können. Es handelt sich dabei um die folgenden Quellen:

- Straßenoberbau: ZTV ZEB-StB [86]
- Brücken: DIN 1076 [18], RI-EBW-PRÜF [42] und ASB-ING [4]
- Tunnel bauliche Teile: DIN 1076 [18], RI-EBW-PRÜF [42], ASB-ING [4] und RABT [41]
- Tunnel E&M-Ausrüstung: DIN 1076 [18], RI-EBW-PRÜF [42], ASB-ING [4] und RABT [41]

Die anhand der zuvor genannten Quellen erhobenen Zustände bilden die Basis der **Lebenszyklusbewertung und -analyse**. Auch für diesen Bereich gibt es zahlreiche Grundlagen, die im Folgenden dargestellt sind:

- Straßenoberbau: RPE-Stra 01 [45], E EMI [21], ZTV ZEB-StB [86] und RSO (noch in Erprobung) [46]
- Brücken: DIN 1076 [18], RI-EBW-PRÜF [42], Leitfaden OSA [33] und Forschungsbericht Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken [25]
- Tunnel, bauliche Teile: DIN 1076 [18], RI-EBW-PRÜF [42], Leitfaden OSA [33] und Forschungsbericht Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken [25] und „Empfehlungen für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel“ [17]
- Tunnel E&M-Ausrüstung: „Empfehlungen für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel“ [17]

Die Literatur zum Bereich **Vermögensbewertung** besteht vor allem aus Fachbüchern („Infrastrukturmanagement Straße“ [26] und „Ansätze zur Bilanzierung des staatlichen Straßeninfrastrukturvermögens“ [73]), einzelne Aspekte der Vermögensbewertung werden auch in Richtlinien o.Ä. (Ansätze zur technischen Nutzungsdauer [1],[23],[45] und [46], Wirtschaftlichkeitsberechnung bei Straßenbrücken [44], Kostenstruktur von Straßenbaumaßnahmen [2]) behandelt. Eine verbindliche und vollumfängliche Regelung zur Vermögensbewertung in Form von Richtlinien, Normen oder Gesetzen liegt allerdings

nicht vor. Die Standards staatlicher Doppik geben aber zumindest untergesetzlich Regelungen für die öffentliche Hand vor. Dies spiegelt die derzeitige Situation in Deutschland auf Bundes-, Länder- und kommunaler Ebene wider. Der Bund sieht ein verbindliches kamerales System vor, die Bundesländer und Kommunen hingegen buchen sowohl doppisch als auch kameral. Für die Bilanzierung der Infrastruktur liegen in Deutschland keine einheitlichen Vorgaben vor.

Nachfolgende Tabelle 1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über jene Grundlagen für Deutschland, die im Projekt Berücksichtigung finden.

Tabelle 1: Überblick maßgebende deutsche Literatur

Anlagenart	Datenerfassung und -erhebung	Lebenszyklusbewertung und -analyse	Vermögensbewertung
Straßenoberbau	ZTV ZEB-StB (R) [86]	RPE-Stra 01 (R) [45] E EMI (L) [21] ZTV ZEB-StB (R) [86] RSO, Erprobung (R) [46]	
Brücken	DIN 1076 (R) [18] RI-EBW-PRÜF (R) [42] ASB-ING (L) [4]	DIN 1076 (R) [18] RI-EBW-PRÜF (R) [42] Leitfaden OSA (L) [33] Algorithmen Zustandsbewertung (F) [25]	Infrastrukturmanagement Straße (FB) [26] Ansätze zur Bilanzierung (FB) [73] SsD (L) [72]
Tunnel bauliche Teile	DIN 1076 (R) [18] RI-EBW-PRÜF (R) [21] ASB-ING (L) [4] RABT (R) [41]	DIN 1076 (R) [18] RI-EBW-PRÜF (R) [42] Leitfaden OSA (L) [33] Algorithmen Zustandsbewertung (F) [25] Ermittlung von Lebenszykluskosten (L) [17]	ABBV (R) [1] RPE-Stra 01 (R) [45] EWS (R) [23] RSO, Erprobung (R) [46] RI-WI-BRÜ (R) [44] AKVS (R) [2] DIN 276 (R) [19]
Tunnel E&M Ausrüstung	DIN 1076 (R) [18] RI-EBW-PRÜF (R) [42] ASB-ING (L) [4] RABT (R) [41]	Ermittlung von Lebenszykluskosten (L) [17]	

R..... Richtlinie oder Norm L ... Leitfaden F Forschungsbericht FB .. Fachbuch

3.1.1.2 Österreich

Die Untersuchung der maßgebenden Literatur in Österreich hat gezeigt, dass in fast allen Themenbereichen entsprechende Beschreibungen und Vorgaben (z. B. über RVS-Richtlinien) zur Verfügung stehen. Die nachfolgend aufgelistete Literatur liefert eine wesentliche Grundlage für das gegenständliche Projekt und wird für weiterführende Festlegungen direkt herangezogen.

Im Bereich der **Datenerhebung bzw. des Datenmanagements** zur Beschreibung der Anlagenzustände liefern die folgenden RVS-Richtlinien die notwendigen Vorgaben und diese sind auch im Bereich der ASFINAG flächendeckend umgesetzt bzw. in Umsetzung begriffen:

- Straßenoberbau: RVS 13.01.15 [47] und RVS 13.01.16 [48]
- Brücken: RVS 13.03.11 [51] und RVS 13.04.11 [53]
- Tunnel bauliche Teile: RVS 13.03.31 [51] und RVS 13.04.21 [54]
- Tunnel E&M-Ausrüstung: RVS 13.03.41 [52] und RVS 13.04.23 [55]

Die **Lebenszyklusbewertung und -analyse** erfolgt in der Regel unter Heranziehung der systematisch erfassten Zustandsdaten der zuvor zitierten Richtlinien und Vorgaben. Auch hierfür stehen eine Reihe von Grundlagen in Form von Handbüchern, Richtlinien sowie aktuellen Forschungs- und Projektberichten zur Verfügung. Wiederum in Abhängigkeit von der Anlagenart können folgende Grundlagen für diesen Bereich als maßgebend definiert werden:

- Straßenoberbau: Handbuch Pavement Management in Österreich [79]
- Brücken: RVS 13.05.11 [56]
- Tunnel, bauliche Teile: Ergebnisbericht VIF-Projekt AMBITION [3] und VIF Projekt OPTIMAL [37]
- Tunnel E&M-Ausrüstung: Pilotprojekt E&M-Erhaltung Tunnel Tirol [81] und VIF Projekt OPTIMAL [37]

Aufgrund der notwendigen Aktivitäten im Bereich der Einführung der Bilanzbuchhaltung (Doppik) in den österreichischen Gemeinden, wurde für die **Vermögensbewertung** seitens der FSV ein Merkblatt erstellt, welches derzeit den aktuellen Entwicklungsstand bei der zustandsabhängigen Vermögensbewertung repräsentiert. Dabei handelt es sich um die

RVS 13.05.31 [57], die in Bezug zur gesetzlichen Vorgabe der Vermögensbewertung VRV 2015 [78] zu sehen ist.

Nachfolgende Tabelle 2 gibt einen zusammenfassenden Überblick über diejenigen Grundlagen, die im Projekt Berücksichtigung finden (wiederum in Abhängigkeit von der Anlagenart und dem jeweiligen Themenbereich).

Tabelle 2: Überblick maßgebende österreichische Literatur

Anlagenart	Datenerfassung und -erhebung	Lebenszyklus-bewertung und -analyse	Vermögens-bewertung
Straßenoberbau	RVS 13.01.15 [47] (R) RVS 13.01.16 [48] (R)	Handbuch PMS [79] (H)	
Brücken	RVS 13.03.11 [50] (R)	RVS 13.05.11 [56] (R)	
Tunnel bauliche Teile	RVS 13.03.31 [51] (R)	OPTIMAL [37] (F)	RVS 13.05.31 [57] (R)
Tunnel E&M Ausrüstung	RVS 13.03.41 [52] (R)	Pilotprojekt E&M- Erhaltung Tunnel Tirol [81] (P) OPTIMAL [37] (F)	

R..... Richtlinie oder Norm H..... Handbuch F..... Forschungsbericht P..... Projektbericht

3.1.1.3 Schweiz

Auch die Untersuchung der maßgebenden Literatur in der Schweiz hat gezeigt, dass in fast allen Themenbereichen entsprechende Beschreibungen und Vorgaben (z. B. über SN) zur Verfügung stehen. Die nachfolgend aufgelistete Literatur liefert eine wesentliche Grundlage für das gegenständliche Projekt und wird für weiterführende Festlegungen direkt herangezogen.

Im Bereich der **Datenerhebung bzw. des Datenmanagements** zur Beschreibung der Anlagenzustände liefern die folgenden SN-Normen die notwendigen Vorgaben und diese sind auch im Bereich des ASTRA flächendeckend umgesetzt bzw. in Umsetzung begriffen:

- Straßenoberbau: SN 640 925 B [67], SN 640 926 [68] und SN 640 904 [64]
- Brücken: ASTRA 12002 [13], SIA 269 (SN 505 269) [60], SIA 269/2 (SN 505 269/2) [61] und SIA 469 (SN 588 469) [62]
- Tunnel bauliche Teile: ASTRA 12002 [13] und SIA 469 (SN 588 469) [62]

- Tunnel E&M-Ausrüstung: ASTRA 8B310 [10], SN 640 964 [69] und AKS-CH [12][2]

Die **Lebenszyklusbewertung und -analyse** erfolgt in der Regel unter Heranziehung der systematisch erfassten Zustandsdaten der zuvor zitierten Normen und Vorgaben. Hierfür steht eine anlagenübergreifende Norm zur Verfügung. Wiederum in Abhängigkeit von der Anlagenart können folgende Grundlagen für diesen Bereich als maßgebend definiert werden:

- Straßenoberbau: SN 640 904 [64]
- Brücken: SN 640 904 [64]
- Tunnel, bauliche Teile: SN 640 904 [64]
- Tunnel E&M-Ausrüstung: SN 640 904 [64]

Auch für die **Vermögensbewertung** stehen in der Schweiz entsprechende Normen zur Verfügung, die im Rahmen des gegenständlichen Projekts als maßgebend eingestuft wurden und daher eine entsprechende Berücksichtigung finden. In Abhängigkeit von der Anlagenart sind dies folgende Normen:

- Straßenoberbau: SN 640 904 [64], SN 640 981 [70] und SN 640 907 [65]
- Brücken: SN 640 904 [64] und SN 640 907 [65]
- Tunnel, bauliche Teile: SN 640 904 [64] und SN 640 907 [65]
- Tunnel E&M-Ausrüstung: SN 640 904 [64] und SN 640 907 [65]

Die nachfolgende Tabelle 3 gibt einen zusammenfassenden Überblick über jene Grundlagen, die im Projekt Berücksichtigung finden (wiederum in Abhängigkeit von der Anlagenart und dem jeweiligen Themenbereich).

Tabelle 3: Überblick maßgebende Schweizer Literatur

Anlagenart	Datenerfassung und -erhebung	Lebenszyklus-bewertung und -analyse	Vermögens-bewertung
Straßenoberbau	SN 640 925 B [67] (R) SN 640 904 [64] (R)		SN 640 904 [64] (R) SN 640 981 [70] (R) SN 640 907 [65] (R)
Brücken	ASTRA 12002 [13] (R) SIA 469 [62] (R)	SN 640 904 [64] (R)	
Tunnel bauliche Teile	ASTRA 12002 [13] (R) SIA 469 [62] (R)		SN 640 904 [64] (R) SN 640 907 [65] (R)
Tunnel E&M Ausrüstung	ASTRA 8B310 [10] (R) SN 640 964 [69] (R)		

R..... Richtlinie oder Norm H..... Handbuch F..... Forschungsbericht P..... Projektbericht

3.1.2 Maßgebende Projekte

Neben der Analyse und Bewertung der unterschiedlichen Richtlinien und Standards wurden auch mehrere Forschungsprojekte, die in den letzten Jahren durchgeführten wurden, untersucht. Die Zielsetzung bestand darin jene Projekte zu identifizieren, die einen wesentlichen Beitrag zum gegenständlichen Projekt liefern können und deren Anwendungsbereich derzeit nicht über entsprechende Richtlinien und Standards beschrieben wird. Die nachfolgende Liste gibt einen Überblick über diese maßgebenden Projekte:

ELISA^{ASFINAG} - Erhaltungsziel integraler Substanzwert im Anlagenmanagement

der ASFINAG [80]: Das Ziel von ELISA^{ASFINAG} bestand in der Entwicklung von Grundlagen für die Definition eines strategischen Erhaltungszieles für einen „Integralen Substanzwert“, in der Darstellung der Zusammenhänge und Abhängigkeiten zu anderen, zielbehafteten Indikatoren und in der Bereitstellung eines ablauffähigen Algorithmus für das Pavement Management System (PMS) der ASFINAG. Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projektes eine Berechnungsmethode für einen technischen Anlagenwert Straßenoberbau entwickelt und erprobt.

EINSTEIN - Risikobasiertes Entscheidungsmodell zur Ermittlung des optimalen

Instandsetzungszeitpunktes von Infrastrukturbauten [22]: Ziel dieses Forschungsprojektes war es, ein auf den Prinzipien des Risikomanagements

basierendes Modell zur Optimierung der Erhaltungsstrategien für Verkehrsinfrastruktur zu entwickeln. Anhand der entwickelten Risikomodelle wurden die Auswirkungen auf die künftige bauliche Erhaltung in Form von Maßnahmenabfolgen und resultierenden Lebenszykluskosten bewertbar gemacht. Die Modelle wurden für die Auftraggeber ÖBB & ASFINAG in entsprechend spezifizierte Modellapplikationen überführt und anhand von Pilotprojekten für Straßen- und Schieneninfrastruktur getestet.

AMBITION - Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und Bewertung von Eisenbahn- und Straßentunnel [3]: Das Projekt beschäftigte sich mit der Beurteilung der Anwendbarkeit von nicht zerstörenden Messverfahren in der Zustandsbewertung von Tunneln. Zur Objektivierung der Auswahl geeigneter Messverfahren zur Rissbeurteilung sollen nun diese Ergebnisse als maßgeblicher Anhaltspunkt miteinbezogen werden.

OptimAL - Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA [37]: Im Rahmen des Projektes OPTimAL wurden die historischen Zustandsdaten der Tunnel der ASFINAG verwendet, um verschiedene Prognosemodelle für die beiden Gruppen bautechnische Anlagenteile (Tunnelröhre, Entwässerung etc.) und elektromaschinelle Gewerke (Tunnellüftung, Beleuchtung usw.) zu entwickeln. Das Projekt liefert somit eine wesentliche Grundlage für die Anwendung von Lebenszyklusbewertungen im Bereich von Straßentunneln.

3.1.3 Relevante internationale Literatur

Neben den nationalen Festlegungen, Vorgaben und ausgearbeiteten Grundlagen in den jeweiligen Ländern wurde auch aus Gründen der Vollständigkeit eine generelle internationale Literaturrecherche vorgenommen, wobei vor allem internationale Standards (z. B. ISO), aber auch entsprechende internationale Handbücher und Manuals, die sich mit dieser Thematik auseinandersetzen, untersucht wurden, die nachfolgend im Überblick aufgelistet sind [74].

Mit der Freischaltung des „**PIARC Asset Management Manuals – Guideline for Practitioners**“ [39] steht seit 2017 auch ein umfassendes Kapitel zur monetären Anlagenbewertung (*Kapitel 3.3 Asset Valuation, siehe <https://road-asset.piarc.org/en/planning/asset-valuation>*) zur Verfügung. Dieses Kapitel beinhaltet

Vorgaben und Empfehlungen für die monetäre Anlagenbewertung und befasst sich mit allen Anlagenteilen der Straßeninfrastruktur.

Auch die internationale Standardisierung ISO befasst sich vor allem im Bereich der Bauwerke mit der Planung der Lebensdauer und den damit verbundenen Aufgaben und Themen. In diesem Zusammenhang sind folgende ISO-Standards von wesentlicher Bedeutung [74]:

ISO 15686-3:2002 [29] mit dem Titel „Hochbau und Bauwerke – Planung der Lebensdauer – Fremd- und Eigenüberwachung“ (eng. „Service life planning – Performance audits and reviews“) befasst sich mit der Sicherstellung der effektiven Umsetzung der Lebensdauerplanung mit Schwerpunkt auf Datenerfassung und Datenerhebung.

ISO 15686-2:2012 [28] mit dem Titel „Hochbau und Bauwerke – Planung der Lebensdauer – Verfahren zur Voraussage der Lebensdauer“ beschreibt Verfahren, die eine Lebensdauerprognose von Bauteilen auf der Grundlage der technischen und funktionellen Leistungsfähigkeit ermöglichen. Sie bietet einen allgemeinen Rahmen, Grundsätze und Anforderungen für die Durchführung und Berichterstattung solcher Studien. Sie erstreckt sich nicht auf die Begrenzung der Lebensdauer aufgrund von Alterung oder anderen nicht messbaren oder unvorhersehbaren Leistungszuständen.

ISO 15686-5:2017-07 [30]: Diese Norm mit dem Titel „Hochbau und Bauwerke – Planung der Lebensdauer – Teil 5: Kostenberechnung für die Gesamtlebensdauer“ enthält Anforderungen und Richtlinien für die Durchführung von Lebenszykluskostenanalysen (LCC) von Gebäuden und gebauten Anlagen und deren Teilen und ist sowohl für Neubauten als auch für bestehende Bauwerke anwendbar. Diese Richtlinie liefert eine Grundlage für die Vermögensbewertung

ISO 55001:2014 [31]: Dieser ISO-Standard mit dem Titel „Asset Management – Management System, Requirements“ aus dem Jahr 2014 beschreibt die Anforderungen und Rahmenbedingungen für die Implementierung eines Asset Management System unter Berücksichtigung der notwendigen Daten und einer darauf basierenden Bewertung des Anlagevermögens. Sie kann in ihrem Grundsatz auch für die Straßenverkehrsinfrastruktur herangezogen werden.

Im Bereich der Datenerfassung und -erhebung ist auch der **FIB Model Code 2010** [24] der International Federation for Structural Concrete zu erwähnen. Hier sind im *Kapitel 9* mit dem Namen „Erhaltung“ auch einige allgemein gehaltene Beschreibungen zur Zustandkontrolle gegeben. Dabei werden sowohl Zustandserfassung, Zustandsbewertung und Dokumentation behandelt.

3.2 Datengrundlagen und Datenmanagementsysteme

Eine wesentliche Voraussetzung für die Bewertung einer Anlage der Straßenverkehrsinfrastruktur sind die Daten bzw. die hierfür herangezogenen Datengrundlagen. Daten werden dazu verwendet, um einerseits das Bauwerk und seinen Zustand zu charakterisieren, andererseits stellen sie im Rahmen der Betrachtung der zukünftigen Entwicklungen definierbarer Beanspruchungen, wie Verkehr, Lasten, Klima etc., eine maßgebende Eingangsgröße dar. Aus diesem Grund ist es erforderlich und sinnvoll, die derzeit bestehenden Datengrundlagen und die darin verwalteten Daten einer genauen Analyse zu unterziehen.

Um eine systematische Beurteilung der Daten und der Datengrundlagen zu ermöglichen, erfolgt in einem ersten Schritt eine entsprechende Kategorisierung der Daten. Dabei wurde auf bestehende Datenbestände der drei DACH-Länder entsprechend Rücksicht genommen, sodass sich folgende Kategorien ergeben [74]:

- **Netzdaten:** Netzdaten dienen zur Beschreibung der Örtlichkeit bzw. Lage der Anlage oder des Objekts im Straßennetz. Dabei können Informationen von unterschiedlichen räumlichen und/oder linearen Referenzierungssystemen herangezogen werden. Die genaue Zuordnung der Anlage bzw. des Objekts im Netz definiert dabei die Zielsetzung im Datenmanagement der Netzdaten.
- **Inventardaten:** Inventardaten dienen zur Beschreibung der baulichen Struktur bzw. im Bereich Tunnel E&M auch der E&M-Gewerke der Anlage oder des Objekts. Darunter fallen neben den Materialdaten und der Verwendung auch die Ausprägung der Anlage (Systemdaten) sowie die dem Objekt zugeordneten normativen Vorgaben.

- **Zustandsdaten:** Zustandsdaten dienen zur Beschreibung des vergangenen und des aktuellen Zustands der baulichen Elemente einer Anlage der Straßenverkehrsinfrastruktur. Diese werden entweder laufend oder periodisch in Form von Messungen und/oder Inspektionen/Prüfungen erhoben.
- **Beanspruchungsdaten:** Beanspruchungsdaten ermöglichen eine Aussage über die Belastung einer Anlage. Neben dem Verkehr und dessen Lasten können auch die Klimadaten (Temperatur, Niederschlag etc.) dieser Gruppe zugeordnet werden. Diese Daten werden in der Regel für das gesamte Netz erhoben und müssen häufig in einem Datenbearbeitungsprozess den jeweiligen Anlagen zugeordnet werden, was eine wesentliche Aufgabe im Datenmanagement darstellt.
- **Sonstige Daten:** Sonstige Daten im Erhaltungsmanagement liefern Informationen, die vor allem die Entwicklung einer Anlage beschreiben. Darunter fallen bereits durchgeführte Maßnahmen, Kosten und deren Ausführungszeitpunkt (sofern nicht in den Inventardaten abgebildet), aber auch generelle Informationen zur Verwaltung der Anlagen durch die Straßenverwaltung.

Diese Kategorisierung findet sich auch in den nachfolgenden Ergebnissen der Evaluierung des Datenbestands der einzelnen Länder für die Anlagenarten Straßenoberbau, Brücke, Tunnel baulich und Tunnel E+M wieder. Zu beachten ist hierbei, dass der Datenbestand vor dem Hintergrund der Anlagenbewertung untersucht wurde. Dies bedeutet, dass eine Beurteilung der Daten für andere Zwecke (z. B. Lebenszyklusanalyse auf Projektebene) durchwegs zu einem anderen Ergebnis kommen kann. Es sei auch an dieser Stelle explizit angemerkt, dass im Bereich der Zustandsdaten eine Beurteilung erst ab der Bewertungsebene erfolgt und nicht anhand der aus der Messung bzw. Erfassung ausgelesenen Rohdaten. Für die Bewertung wurden folgende maßgebende Kriterien herangezogen [74]:

- Datenverfügbarkeit und -vollständigkeit: Sind die Daten für eine Bewertung verfügbar und auch vollständig (>90% Netzabdeckung)?
- Datenqualität und -aktualität: Werden die Daten qualitätsgesichert abgelegt und sind die Daten aktuell, sodass sie für eine weiterführende Bearbeitung herangezogen werden können?

3.2.1 Deutschland

Die Erfassung der Daten für den Straßenoberbau (ZEB) [86] erfolgt in der Bundesrepublik Deutschland systematisch seit Beginn der 1990er-Jahre und liefert die wichtigsten Informationen für das Pavement Management. Seit der Einführung wurden etwa 450.000 Fahrstreifenkilometer erfasst und ausgewertet. Die Erfassung umfasst die Ebenheit, Griffigkeit, Substanzmerkmale (Oberfläche), Längs- und Querneigung, Krümmungen sowie Streckenbilder und Oberflächenbilder. Im Laufe der Jahrzehnte hat sich das Anwendungsspektrum der Daten laufend vergrößert und hat so dazu geführt, dass bei der BAST ein umfassendes Online-ZEB-Auskunftssystem eingeführt wurde. Dieses gesamte System aus Software und Datenbanken (einschließlich Netz- und Geometriedaten, Streckenbilddaten und Visualisierungsdienste) wird bei der BAST seit 2002 unter dem Namen IT-ZEB betrieben.

Aufgrund der dezentralen Sammlung der Inventardaten kommt seit vielen Jahren die Straßeninformationsdatenbank TT-SIB als Basis des Straßeninformationssystems unter Heranziehung der Festlegungen gemäß ASB (Anweisung Straßeninformationsbank) auf Landesebene zum Einsatz, wobei hier ebenfalls unterschiedliche Softwarelösungen zur Verfügung stehen. Die BAST sammelt die Daten systematisch, kontrolliert diese und stellt diese den Ländern für Erweiterungen und Ergänzungen zur Verfügung. Die Zusammenführung aller Daten erfolgt dabei zentral durch die BAST auf einem 100 m-Raster-Format.

Unter Bezugnahme auf die obige Kategorisierung stehen folgende Grundlagen zur Verfügung [74]:

- **Netzdaten:** Die Referenzierung der Oberbaudaten erfolgt auf die Netzknotenabschnitte des Straßennetzes, welches zentral von der BAST in Zusammenarbeit mit den Ländern verwaltet wird. Auf den Autobahnen erfolgt eine Trennung der Netzknotenabschnitte auf die Richtungsfahrbahnen, sodass eine eindeutige Zuordnung sichergestellt werden kann.
- **Inventardaten:**
 - Oberbaudaten in aktueller Form mit detaillierten Informationen zum Aufbau (Schichtart, Material, Herstellungsjahr und Dicke) für jedes einzelne Querschnittselement (inkl. Abstellstreifen und unbefestigten Seitenstreifen)
 - Querschnittsdaten mit der Anzahl der Fahrstreifen und dem Breitenband (Breite der Querschnittselemente)

- **Zustandsdaten:** Die historischen und aktuellen Zustandsdaten der Straßenoberfläche aus der periodischen messtechnischen und visuellen Straßenzustandserfassung (historisch und aktuell) in Form von 100 m-Abschnitten für jeden Fahrstreifen (Messintervall vier Jahre) gemäß den Vorgaben ZTV ZEB-StB [86] werden über den ZEB-Server verwaltet.
- **Beanspruchungsdaten:** Für die Beschreibung der Beanspruchung im Bereich des Straßenoberbaus stehen die Verkehrsbelastung in Form des DTV² und des DTV_{SV}³ sowie einer jährlichen Zuwachsrate für beide Verkehrsstärken zur Verfügung. Grundlage hierfür sind Daten von automatischen Verkehrszählstellen.
- **Sonstige Daten:**
 - Zuletzt durchgeführte Erhaltungsmaßnahmen (zwischen aktuellem Zeitpunkt und der letzten ZEB)
 - Art und Zeitpunkt der nächsten prognostizierten Erhaltungsmaßnahme aus der PMS-Berechnung für die Erhaltungsbedarfsermittlung

Die Daten zu Brückenbauwerken werden in Deutschland im Programmsystem SIB-Bauwerke geführt. Die Version 1.9 des Programmsystems basiert auf der „Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten“ (ASB-ING) Ausgabe 10/2013 [4]. Die ASB-ING beschreibt die Struktur und den Inhalt der Datenbank in Verbindung mit den technischen Regelwerken DIN 1076 [18] und RI-EBW-PRÜF [42], die die Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken festlegt. Die Bauwerksdaten gemäß ASB-ING unterteilen sich in Konstruktions-, Prüfungs- und Zustandsdaten, Verwaltungs- und Sachverhaltsdaten. Eine Erfassung erfolgt bezogen auf die Bauwerke und ihre Teilbauwerke [74].

- **Netzdaten:** Teil C der ASB-ING regelt die Netz- und Bestandsdaten. Hierbei wird zunächst eine GIS-Zuordnung vorgenommen, die die Lage des Teilbauwerks bezüglich der Straße (Netzknoten, Station) oder mit Koordinaten beschreibt (ASB-ING, Teil C, Nr. 1). Zusätzlich werden Verkehrswege, Gewässer, Gebäude und Landschaften festgehalten, die auf, unter oder entlang dem Teilbauwerk liegen (ASB-ING, Teil C, Nr. 2, sogenannte „Sachverhalte“). Des Weiteren wird eine Netzzuordnung vorgenommen (Kilometrierung usw.) und Informationen zur Straße

² durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in KFZ/24h

³ durchschnittliche tägliche Schwerverkehrsstärke für LKW>=3,5t HzG in LKW/24h

(Anzahl Fahrstreifen, Fahrbahnbreite etc.) sowie Durchfahrtshöhen, Beläge und Beschilderung erfasst (ASB-ING, Teil C, Nr. 3-8).

- **Inventardaten:** Zum einen werden allgemeine Daten zur Brücke (Gesamtlänge, (Gesamt-) Breite, Brückenfläche usw.) und zu den Brückenfeldern und -stützungen (Art der Stützung, Stützweite, Stützungshöhe etc.) beschrieben (ASB-ING Teil B, Nr. 3-4). Zum anderen werden konstruktive Daten erfasst, wie etwa zum statischen System, Gründungen, Lagern, Fahrbahnübergängen, Ausstattung und Baustoffen (ASB-ING Teil B, Nr. 18-36).
- **Zustandsdaten:** Die Überwachung und Prüfung der Ingenieurbauwerke bzw. Brücken erfolgt nach DIN 1076 und RI-EBW-PRÜF. Neben Information zur Prüfungsvorbereitung (ASB-ING Teil B, Nr. 37-38) werden die durchgeführten Prüfungen, der gegenwertig dokumentierte Bauwerkszustand und die zugehörigen Empfehlungen, Schäden und die Zuordnung von Maßnahmen und Schäden im Programmsystem festgehalten (ASB-ING Teil B, Nr. 39-43). Außerdem sind die Ergebnisse abgeschlossener Prüfungen und die entsprechenden Empfehlungen und Schäden abgelegt (ASB-ING Teil B, Nr. 44-46).
- **Beanspruchungsdaten:** Für die Beanspruchung aus dem Verkehr ist u.a. die DTV-Kfz bezogen auf das Teilbauwerk, der Anteil des Schwerverkehrs und die zulässigen Geschwindigkeiten im SIB-Bauwerke festgehalten (ASB-ING Teil C, Nr. 9). Beanspruchung aus Wetter wird im Programmsystem nicht erfasst.
- **Sonstige Daten:** Als Sonstige Daten im Erhaltungsmanagement werden gemäß ASB-ING Entwürfe und Berechnungen, die BMS-Strategie, BMS-Maßnahmen, Nachrechnungen und Ertüchtigungen, Verwaltungsmaßnahmen und Sondervereinbarungen, Bau- und Erhaltungsmaßnahmen sowie die Kosten für Bau, Erhaltung und Betrieb festgehalten (ASB-ING Teil B, Nr. 47-53).

Auch die Daten zu baulichen Anlagen von Tunneln werden in Deutschland im Programmsystem SIB-Bauwerke geführt. Die technischen Regelwerke DIN 1076 und RI-EBW-PRÜF sowie die Struktur und der Inhalt nach ASB-ING gelten hier entsprechend den Brückenbauwerken. Unterschiede finden sich lediglich in den Inventardaten der baulichen Tunnelanlagen [74]:

- **Inventardaten:** Für Tunnel und ihre Tunnelsegmente werden allgemeine Informationen aufgenommen wie z. B. Gradienten, Überdeckungshöhen und

Abmaß der Segmente (ASB-ING, Teil B, Nr. 6-7). Darüber hinaus werden konstruktive Daten erfasst, wobei die Kategorien, wie etwa Gründungen, Fahrbahnübergänge und Baustoffe, denen der Brückenbauwerke entsprechen (ASB-ING Teil B, Nr. 18-36).

Neben den Daten zu Brückenbauwerken und den baulichen Anlagen von Tunneln werden auch die Daten zu elektromaschinellen Anlagen (E&M-Anlagen) von Tunneln in Deutschland im SIB-Bauwerke erfasst. Die technischen Regelwerke DIN 1076 [18] und RI-EBW-PRÜF [42] sowie die Struktur und der Inhalt nach ASB-ING [4] gelten hier entsprechend den Brückenbauwerken. Bei den elektromaschinellen Anlagen in Tunneln bestehen ausschließlich bei den Inventar- und Zustandsdaten Unterschiede zu den Brückenbauwerken [74]:

- **Inventardaten:** Von den elektromaschinellen Anlagen werden die Tunnelbeleuchtung, die Tunnelbelüftung, Einrichtungen zur Tunnelsicherheit wie z. B. Notrufstationen, Brandmeldeanlagen und Lautsprecher, und Anlagen der Verkehrseinrichtungen, wie z. B. Verkehrszeichenanlagen und Schrankenanlagen erfasst (ASB-ING, Teil B, Nr. 8-11 und 11-12).
- **Zustandsdaten:** Nach DIN 1076 sind maschinelle und elektrische Anlagen von Ingenieurbauwerken auch nach anderen Vorschriften und Normen im Rahmen einer Prüfung nach besonderen Vorschriften zu prüfen. So macht etwa die RABT [41] (auch M KWPT [34]) Vorgaben für die Überprüfung der technischen Ausrüstung. Die Zustandsdaten werden von den Tunnelbetreibern geführt und nicht zentral gesammelt.

In Tabelle 4 wird ein Überblick über die in Deutschland für die betrachteten Anlagearten vorhandenen Daten und ihre Qualität gegeben.

Tabelle 4: Zusammenfassung Daten und Datengrundlagen in Deutschland [74]

Datenkategorie	Straßen- oberbau	Brücke	Tunnel baulich	Tunnel E&M
Netzdaten	● ■	● ■	● ■	○ □
Inventardaten	● ■	● ■	● ■	○ □
Zustandsdaten	● ■	● ■	● ■	○ □
Beanspruchungsdaten	● ■	○ □	○ □	○ □
Sonstige Daten	● ■	● ■	● ■	○ □

- ... Daten vollständig und verfügbar
- ... Daten nicht vollständig und nur bedingt verfügbar
- Erforderliche Datenqualität vorhanden
- Erforderliche Datenqualität nur bedingt vorhanden

Netzdaten liegen für die Anlagearten Straßenoberbau, Brücke und Tunnel baulich vor. Da die Verantwortung für die elektromaschinelle Ausrüstung der Tunnel in Deutschland bei den jeweiligen Betreibern liegt, liegen hier sowohl für die Netzdaten als auch für alle weiteren Daten im Bereich Tunnel E&M keine vollständigen und verfügbaren Daten vor und auch deren Qualität ist nicht bekannt. Die Inventar- und Zustandsdaten für die Anlagearten Straßenoberbau, Brücke und Tunnel baulich liegen vor und haben eine geeignete Qualität. Beanspruchungsdaten liegen nur für den Bereich Straßenoberbau vor. Für die Brücken und Tunnel E&M sind die Wetterdaten nicht in SIB-Bauwerke erfasst. Sonstige Daten, wie z. B. durchgeführte Maßnahmen, liegen für die Anlagearten Straßenoberbau, Brücke und Tunnel baulich im Programmsystem SIB-Bauwerke vor [74].

3.2.2 Österreich

Die Erfassung der Daten für den Straßenoberbau erfolgt in Österreich systematisch seit den 1990er-Jahren und liefert die wichtigsten Informationen für das Pavement Management System der ASFINAG (VIAPMS-ASFINAG). Die Daten sind in umfangreicher Form in der zentralen VIAPMS-ASFINAG-Datenbank (IMT-Pavement, Infrastructure Management Tool Pavement) abgelegt und können für die Berechnung eines technischen Anlagenwerts direkt herangezogen werden. Eine detaillierte Beschreibung des Datenmanagements kann dem Handbuch Pavement Management in Österreich (aktuelle Fassung 2016) [79] entnommen werden. Für die Anwendung der Daten im gegenständlichen Projekt können die für die

PMS-Analyse aufbereiteten PMS-Abschnitte herangezogen werden. Unter Bezugnahme auf die obige Kategorisierung stehen folgende Grundlagen zur Verfügung [74]:

- **Netzdaten:** Die Referenzierung der Oberbaudaten erfolgt auf die Achsen der Richtungsfahrbahnen und der Rampen bezogen, unter Heranziehung der Betriebskilometrierung. Einige Daten sind dabei auch auf einzelne Fahrstreifen bezogen, wobei auch hier eine eindeutige Festlegung der Zuordnung gegeben ist
- **Inventardaten:**
 - Oberbaudaten in aktueller und historischer Form mit detaillierten Informationen zum Aufbau (Schichtart, Material, Herstellungsjahr und Dicke) für jeden einzelnen Fahrstreifen (inkl. Abstellstreifen)
 - Querschnittsdaten mit der Anzahl der Fahrstreifen und dem Breitenband (Breite der Querschnittselemente)
- **Zustandsdaten:**
 - Zustandsdaten Straßenoberfläche aus der periodischen messtechnischen und visuellen Straßenzustandserfassung (historisch und aktuell) in Form von 50 m-Abschnitten für jeden Fahrstreifen (Messintervall vier bis fünf Jahre) gemäß den Vorgaben der RVS 13.01.15 [47] und RVS 13.01.16 [48]
 - Zustandsdaten aus Abnahmeprüfungen und Prüfungen am Ende der Gewährleistungsfrist gem. den Vorgaben der RVS 13.01.15 [47] und RVS 13.01.16 [48]
 - Lärmdaten aus Lärmmessungen für die Abschnitte mit lärmindernden Deckschichten
- **Beanspruchungsdaten:**
 - Verkehrsbelastung in Form des JDTV⁴ und des JDTLV⁵ sowie einer jährlichen Zuwachsrate für beide Verkehrsstärken. Grundlage hierfür sind die automatischen Verkehrszählstellen der ASFINAG.
 - Klimadaten mit Temperatur (Minimal- und Maximaltemperatur in °C), Frostindex (Grad Celsius Tage °Cd oder Kelvin-Stunden Kh) auf der Grundlage von Wistuba et al. [84]

⁴ jährlich durchschnittliche Verkehrsstärke in KFZ/24h

⁵ jährliche durchschnittliche Lastverkehrsstärke für LKW \geq 3,5t HzG (höchst zulässiges Gesamtgewicht) in LKW/24h

- **Sonstige Daten:**

- Aktuelles, 6-jähriges Bauprogramm (IIP – Infrastruktur-Investitionsprogramm)
- Maßnahmenkatalog Erhaltungsmaßnahmen mit Einheitspreisen
- Abschnitte mit Brücken und Tunnel mit einer Gesamtlänge von mehr als 50 m

Neben den Oberbaudaten werden die Brückendaten seit den 1990er-Jahren systematisch erhoben und verwaltet. Im Jahr 2018 wurde die ASFINAG-Datenbank BAUT durch die IMT-Datenbank ersetzt (dTIMS-Datenbank), welche die aktuelle Datenbank für die Brückenobjekte darstellt und somit maßgebend für das gegenständliche Projekt ist. Die maßgebende Richtlinie für die Datengranularität ist die RVS 13.04.11 [53]. Die Daten beziehen sich dabei auf sogenannte Objekte, welche ein konstruktiv unabhängiges Brückenobjekt darstellen. Gemäß der verwendeten Kategorisierung stehen folgende Grundlagen zur Verfügung [74]:

- **Netzdaten:** Das Basiselement in der Brückendatenbank ist das Objekt, welches jedoch in der IMT-Datenbank zur Straße (Zentralachse, Richtungsfahrbahnachse, Rampenachse) linear referenziert und über ein geometrisches Element im GIS referenziert vorliegt. Darüber hinaus werden sämtliche Objekte hinsichtlich ihrer Ebene definiert (Ebene 0 = Straßenachsebene der Zentralachse der Autobahn bzw. der Richtungsfahrbahn)
- **Inventardaten:** Die Datengruppen und deren Datenattribute sind gemäß den Vorgaben der RVS 13.04.11 [53] definiert:
 - Konstruktionsdaten mit unterschiedlichen Untertabellen (z. B. Lager, Unterbau)
 - Systemdaten (inkl. Querschnittsband)
- **Zustandsdaten:** Die Erfassung des Zustands der Brücken erfolgt auf der Grundlage der RVS 13.03.31 [51]. Welche Daten wie abgelegt werden, definiert die RVS 13.04.11 [53]. Die gesamten bauteilbezogenen Zustandsdaten der Kontrollen (in der Regel alle zwei Jahre) und der Inspektionen (in der Regel alle 6 Jahre) werden in der Datenbank historisch verwaltet und beinhalten:
 - Zustandsnoten der Bauteile
 - Gesamtnote Objekt

- **Beanspruchungsdaten:**
 - Beanspruchungsdaten in Form der Verkehrsbelastung werden derzeit nicht direkt in der Datenbank abgespeichert, liegen jedoch flächendeckend (im PMS) vor und können mit jedem Objekt verknüpft werden.
 - Klimadaten mit Temperatur (Minimal- und Maximaltemperatur in °C), Frostindex (Grad Celsius Tage °Cd oder Kelvin-Stunden Kh) auf der Grundlage von Wistuba et al. [84]
- **Sonstige Daten:** Für diesen Anlagentyp stehen derzeit keine sonstigen Daten in systematisch abgelegter Form zur Verfügung.

Auf Grundlage der RVS 13.04.22 [54] werden in Österreich systematisch Daten der baulichen Anlagen von Tunneln erhoben und in der Bauwerksdatenbank (BAUT) der ASFINAG hinterlegt. In der BAUT Tunnel sind 248 Bauwerke des Autobahn- und Schnellstraßennetz angeführt.

- **Netzdaten:** Bauwerke in der Datenbank sind lagemäßig über die Straßenachse sowie die Kilometrierung definiert, es wird allerdings keine Angabe zur Richtungsfahrbahn oder Ebene gemacht.
- **Inventardaten:** Leider sind nicht alle in der Datenbank angeführten Attribute befüllt. Üblicherweise liegen das Baujahr, die Tunnellänge, das Material und die Bauweise vor.
- **Zustandsdaten:** Die Erfassung des Zustands erfolgt auf Grundlage der RVS 13.03.31 [51]. Sofern Zustandsnoten in die Datenbank eingetragen wurden, liegt immer zumindest die Gesamtnote vor. Meist stehen auch die Bauteilnoten der Tunnelröhre, des Fahrbahnbelags, des erhöhten Seitenstreifens und der Abdichtung zur Verfügung. Aktuell liegen Zustandsnoten im Zeitraum von 1991 bis 2017 (26 Jahre) vor, wobei 90 % der in der BAUT dokumentierten Erhebungen zwischen 2004 und 2017 (13 Jahre) stattfanden.
- **Beanspruchungsdaten:**
 - Verkehrsbelastung, welche verantwortlich für Spritzwasser/Sprühnebel, Vibrationen und dynamische Beanspruchungen durch Druckunterschiede sein kann, steht in Form des JDTV⁶ und des JDTLV⁷ sowie einer jährlichen

⁶ jährlich durchschnittliche Verkehrsstärke in KFZ/24h

⁷ jährliche durchschnittliche Lastverkehrsstärke für LKW \geq 3,5t HzG (höchst zulässiges Gesamtgewicht) in LKW/24h

Zuwachsrate für beide Verkehrsstärken 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 Wistuba et al. [84]
- **Sonstige Daten:** Für diesen Anlagentyp stehen derzeit keine sonstigen Daten in systematisch abgelegter Form zur Verfügung.

Die Informationen der elektromaschinellen Anlagen werden seit mehreren Jahren in tunnelbezogenen MS Excel-Formularen abgespeichert, wobei in der Regel jede einzelne Tunnelröhre individuell verwaltet wird. Die maßgebende Richtlinie ist hierfür die RVS 13.04.23 [55]:

- **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.
- **Zustandsdaten:** Jedem einzelnen Gewerk werden unter Heranziehung der RVS 13.03.41 [52] die folgenden Informationen zugeordnet:
 - Technischer Anlagenzustand
 - Altersindex
 - Ersatzteilverfügbarkeit
- **Beanspruchungsdaten:** Die Beanspruchungsdaten dieser Anlagengruppe in Form der Verkehrsbelastung werden nicht direkt in den Excel-Tabellen abgespeichert, liegen jedoch flächendeckend (im PMS) vor und können somit mit jedem Objekt verknüpft werden. Darüber hinaus wurde jedem Tunnel eine Gefährdungsklasse zugeteilt, die vor allem den Umfang der Tunnelausrüstung bestimmt.
- **Sonstige Daten:** Für diesen Anlagentyp stehen derzeit keine sonstigen Daten in systematisch abgelegter Form zur Verfügung.

Nachfolgende Tabelle 5 soll einen Überblick hinsichtlich des untersuchten Datenbestands und dessen Grundlagen geben. Sie zeigt auch einen Vergleich zwischen den zu untersuchenden Anlagenarten.

Tabelle 5: Zusammenfassung Daten und Datengrundlagen in Österreich [74]

Datenkategorie	Straßen- oberbau	Brücke	Tunnel baulich	Tunnel E&M
Netzdaten	● ■	● ■	● □	● □
Inventardaten	● ■	● ■	● ■	● ■
Zustandsdaten	● ■	● ■	● ■	● ■
Beanspruchungsdaten	● ■	● ■	○ □	● ■
Sonstige Daten	● ■	-	-	-

● ... Daten vollständig und verfügbar
 ○ ... Daten nicht vollständig und nur bedingt verfügbar
 ■ ... Erforderliche Datenqualität vorhanden
 □ ... Erforderliche Datenqualität nur bedingt vorhanden

Grundsätzlich liegen auch in Österreich die notwendigen Daten in ausreichender Qualität und Quantität vor, sodass einerseits für die Modellierung andererseits auch für die nachfolgende praktische Anwendung derzeit keine Einschränkungen erkennbar sind.

3.2.3 Schweiz

Das ASTRA (Bundesamt für Straßen) entwickelte vor ca. zehn Jahren ein Managementinformationssystem Straße und Straßenverkehr (MISTRA). MISTRA ist ein integratives, modular aufgebautes Informationssystem. Es besteht aus einem Basissystem und einem Datawarehouse (DWH) sowie weiteren, davon abhängigen Fachapplikationen. Das Basissystem stellt den anderen Fachapplikationen georeferenzierte Daten und Basisfunktionalitäten zur Verfügung. Mit der Fachapplikation „Trassee“ von MISTRA steht für den Straßenoberbau eine umfassende Datengrundlage für das Erhaltungsmanagement zur Verfügung. Unter Bezugnahme auf das Fachhandbuch „Trassee / Umwelt (FHB T/U)“ [7] aus dem Jahr 2019 sowie dem Datenerfassungshandbuch MISTRA Trassee – TRA [11] lässt sich die Granularität und Struktur der Daten genau beschreiben. Unter Heranziehung der ausgewählten Kategorisierung stehen folgende Grundlagen für den Straßenoberbau zur Verfügung [74]:

- **Netzdaten:** Die Netzdaten basieren auf einem Basisbezugssystem (RBBS), welches als lineares Bezugssystem gemäß VSS - Norm SN 640 912 [66] definiert ist. Die Sektorlänge, also die Distanz zwischen Bezugspunkten, kann grundsätzlich frei definiert werden. In der Regel werden auf Autobahnen ca. alle 1000 m Bezugspunkte gesetzt. Die Referenzierung der Oberbaudaten erfolgt auf die Achsen der Richtungsfahrbahnen und der Rampen unter Heranziehung der Bezugspunkte. Eine Reihe von Daten sind dabei auch auf einzelne Fahrstreifen bezogen, wobei auch hier eine eindeutige Festlegung der Zuordnung in Querrichtung gegeben ist.
- **Inventardaten:**
 - Oberbaudaten in aktueller und historischer Form mit detaillierten Informationen zum Aufbau (Schichtart, Material, Herstellungsjahr und Dicke) für jeden einzelnen Fahrstreifen
 - Querschnittsdaten mit der Anzahl der Fahrstreifen und dem Breitenband (Breite der Querschnittselemente)
- **Zustandsdaten:**
 - Zustandsdaten Straßenoberfläche aus der periodischen messtechnischen und visuellen Straßenzustandserfassung (historisch und aktuell) in Form von Messabschnitten für jeden Fahrstreifen (Messintervall vier bis fünf Jahre) gemäß den Vorgaben der SN 640 925 B [67] bzw. der SN 640 926 [68],
 - Lärmdaten aus Lärmmessungen
- **Beanspruchungsdaten:** Für die Beschreibung der Beanspruchung im Bereich des Straßenoberbaus stehen in der Fachapplikation VMON (Verkehrsmonitoring – Verwaltung der Messstellen und der Messwerte) sowie des SASVZ (Schweizerische automatische Strassenverkehrszählung) flächendeckend die Daten des DTV⁸ und DTV SV⁹ zur Verfügung.
- **Sonstige Daten:**
 - Ergebnisse der Mehrjahresplanung gem. Datenerfassungshandbuch MISTRA Trasse – TRA [11]
 - Erhaltungsobjekte gem. Datenerfassungshandbuch MISTRA Trasse – TRA [11]

⁸ durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in KFZ/24h

⁹ durchschnittliche tägliche Schwerverkehrsstärke für LKW>=3,5t HzG in LKW/24h

Auch bei den Brücken spielt das Managementinformationssystem Straße und Straßenverkehr (MISTRA) eine wesentliche Rolle. Mit der Fachapplikation KUBA steht für die Brücken eine umfassende Datengrundlage für das Erhaltungsmanagement zur Verfügung. Das Datenerfassungshandbuch „KUBA 5.0, Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel“ [9] liefert eine genaue Beschreibung der Datengrundlagen für die Brücken [74]:

- **Netzdaten:** Das Basiselement in KUBA ist das Hauptinfrastrukturobjekt, welches auf die RBBS-Achsen (Basisbezugssystem, siehe hierzu [66]) linear referenziert ist.
- **Inventardaten:** Die Inventardaten werden gemäß Datenerfassungshandbuch „KUBA 5.0, Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel“ [9] als „Substanzdaten“ bezeichnet. Mit der Erfassung der Substanzdaten werden die Bauwerksstruktur abgebildet und die Eigenschaften der einzelnen Elemente des Bauwerks erfasst. Es handelt sich dabei um eine hierarchische Datenbankstruktur bei der ausgehend vom Haupt-Infrastrukturobjekt (= erste Strukturierungsebene) mehrere Unter-Infrastrukturobjekte definiert werden. Die Unterteilung erfolgt dabei generell in Bauwerksebene, Bauwerksteilebene und Oberflächenschutz und beinhaltet die Beschreibung des Objekts aus bautechnischer Sicht über Bauart, Bauteileigenschaften (Baumaterial, Herstellungsjahr, Norm etc.), Bauwerksfunktion etc.
- **Zustandsdaten:** Die Erfassung des Zustands der Brücken erfolgt auf der Grundlage der ASTRA-Richtlinie „Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstraßen (ASTRA 12002) [13] bzw. KUBA 5.0 Anwendungshandbuch – KUBA-MS [8] (Schadenskatalog). Welche Daten wie abgelegt werden, definiert wiederum das Datenerfassungshandbuch „KUBA 5.0, Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel“ [9]. Die maßgebenden Informationen sind dabei:
 - Zustandsbewertung auf Bauwerksteilebene
 - Zustandsbewertung auf übergeordneten Ebenen der Bauwerksstruktur
- **Beanspruchungsdaten:** Die Beanspruchungsdaten in Form der Verkehrsbelastung werden nicht direkt in der FA KUBA abgespeichert, liegen jedoch flächendeckend vor und können somit mit jedem Objekt verknüpft werden.
- **Sonstige Daten:** Unter Bezugnahme auf das Datenerfassungshandbuch „KUBA 5.0, Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel“ [9] stehen die Maßnahmen Daten

von Erhaltungsmaßnahmen mit Kosten, die für das gegenständliche Projekt von Bedeutung sein könnten, zur Verfügung.

Da eine Trennung zwischen Brücken und anderen Kunstbauten gem. den Anforderung von MISTRA FA KUBA nicht vorhanden ist, stehen für den konstruktiven Teil der Tunnel die gleichen Datengrundlagen wie bei den Brücken zur Verfügung.

Mit der Fachapplikation Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen Sofortlösung (FA BSAS) des MISTRA steht auch für die elektromaschinelle Ausrüstung der Tunnel eine ausgezeichnete Datengrundlage zur Verfügung. Aufgrund der Komplexität der unterschiedlichen Ausrüstungen sind die Daten in die Bereiche Energieversorgung, Beleuchtung, Lüftung, Signalisation, Überwachungsanlagen, Kommunikation und Leittechnik, Kabelanlage und Nebeneinrichtung gegliedert, wobei nicht jede Gruppe bei den Tunneln zu finden ist. Die Struktur und Gliederung der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen erfolgen dabei gemäß der ASTRA-Richtlinie „Struktur und Gliederung der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (AKS-CH)“ [12] aus dem Jahr 2014. Das Datenerfassungshandbuch „Fachapplikation Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen Sofortlösung (FA BSAS)“ [6] aus dem Jahr 2012 regelt darauf aufbauend die Datengrundlagen im Bereich der Inventardaten mit einem hohen Detaillierungsgrad an Informationen [74].

- **Netzdaten:** Die Objektorganisation in der FA BSAS (Aspekt Ort, Aspekt Produkt und Aspekt Zugehörigkeit) erfolgt unter Heranziehung des MISTRA Basissystem (BS), welches den Ort über die RBBS-Achsen (Basisbezugssystem, siehe hierzu [69]) linear referenziert.
- **Inventardaten:** Wie bereits erwähnt, liegen die Inventardaten in detaillierter Form gemäß den Vorgaben des Datenerfassungshandbuch „Fachapplikation Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen Sofortlösung (FA BSAS)“ [6] in der FA BSAS vor und können somit für eine Bewertung herangezogen werden.
- **Zustandsdaten:** Die Daten zur Beschreibung des Zustands der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (entsprechend der Dokumentation ASTRA 8B310 „Methodologie der Bewertung für die Zustandserfassung der BSA“ [10]) sind gemäß Daten BSA Erhaltungsplanung [5] im Detail definiert und somit in der FA BSAS datenbankkonform umgesetzt (9 Koeffizienten).

- **Beanspruchungsdaten:** Die Beanspruchungsdaten in Form der Verkehrsbelastung werden nicht direkt in der FA BSAS abgespeichert, liegen jedoch flächendeckend vor und können somit mit jedem Objekt verknüpft werden.
- **Sonstige Daten:** Erhaltungsmaßnahmen für die einzelnen Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen können eingegeben und somit datenbankmäßig verwaltet werden.

Nachfolgende Tabelle 6 soll einen Überblick hinsichtlich des untersuchten Datenbestands und dessen Grundlagen geben. Sie zeigt auch einen Vergleich zwischen den zu untersuchenden Anlagenarten.

Tabelle 6: Zusammenfassung Daten und Datengrundlagen in der Schweiz [74]

Datenkategorie	Straßen- oberbau	Brücke	Tunnel baulich	Tunnel E&M
Netzdaten	● ■	● ■	● ■	● ■
Inventardaten	● ■	● ■	● ■	● ■
Zustandsdaten	● ■	● ■	● ■	● ■
Beanspruchungsdaten	● ■	● ■	● ■	● ■
Sonstige Daten	● ■	● ■	● ■	● ■

● ... Daten vollständig und verfügbar
 ○ ... Daten nicht vollständig und nur bedingt verfügbar
 ■ ... Erforderliche Datenqualität vorhanden
 □ ... Erforderliche Datenqualität nur bedingt vorhanden

Die Schweiz zeigt sehr deutlich, dass ein zentrales Datenbanksystem wesentliche Vorteile im Hinblick auf das Datenmanagement aufweist und die entsprechenden Richtlinien und Vorgaben hier in den letzten zehn Jahren intensiv entwickelt bzw. implementiert wurden. Auch in der Schweiz stehen weiterhin die laufende Aktualisierung sowie Erweiterung im Vordergrund. Es sei jedoch an dieser Stelle auch explizit angemerkt, dass die Kosten für die Implementierung von MISTRA ein Vielfaches der Kosten der Datenbanksysteme der anderen beiden Länder betragen und, dass auch für die Wartung jährlich hohe Summen vom ASTRA zur Verfügung gestellt werden. Somit kann auch eine entsprechende Betreuung dieses umfassenden Datenbanksystems flächendeckend, unter Berücksichtigung der organisatorischen Anforderungen sichergestellt werden.

4 HOLISTISCHER BEWERTUNGSRAHMEN

Die Grundlage für die Berechnung des Technischen Anlagenwertes wird durch einen genau definierten Anwendungsbereich und den damit verbundenen Bewertungsrahmen bestimmt. Dabei spielt der anzuwendende Prozess eine wesentliche Rolle, da er jene Bereiche definiert, die betrachtet, bewertet und analysiert werden müssen. Dieser stellt das Grundgerüst dar, in dem die Alterungsmodelle und die Anlagenwertmodelle aufgebaut und die maßgebenden Definitionen gegeben werden. Die nachfolgenden Kapitel 4ff beschreiben daher dieses Grundgerüst und stellen den anzuwendenden Prozess im Detail dar. Die mathematische Ausformulierung erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln 5ff.

4.1 Grundidee der Modellierung

4.1.1 Berechnungsprozess Technischer Anlagenwert

Die Grundidee der Ermittlung und Prognose des Technischen Anlagenwertes eines Bauwerks besteht zuerst einmal darin, die Anlagenwerte der einzelnen Anlagenteile getrennt zu bestimmen und in weiterer Folge aufzusummieren. Der Technische Anlagenwert eines Anlagenteils ergibt sich dabei aus der Verbindung eines gegebenen Zustands und eines definierten Zusammenhangs von Zustand und Wert. Konkret bedeutet das nun bei einer Betrachtung über die Zeit $Z(t)$, dass eine vergangene oder prognostizierte Zustandsentwicklung über die Zeit $Z(t)$ und der bereits erwähnte definierte Zusammenhang von Zustandsnote und Technischem Anlagenwert eines Anlagenteils TAW_z in einen Technischen Anlagenwert als zeitabhängige Größe TAW_t übergeführt werden [75].

Der zeitliche Verlauf der Degradation des Zustandes $Z_{x,t}$ der einzelnen Anlagenteile X kann auf Basis von Literaturdaten bzw. wo nicht vorhanden anhand von historischen Zustandsdaten der Betreiber, unter anderem mit Zuhilfenahme von „Machine Learning Algorithmen“ ermittelt werden. Die für TAniA entwickelte Vorgehensweise wird im Kapitel 5.1.3 genauer beschrieben. Die mathematische Formulierung der Abhängigkeit zwischen Zustandsnote und Technischem Anlagenwert eines Anlagenteils TAW_x wird ebenfalls im Kapitel 5.1.3 dargestellt. Die Ermittlung dieses Zusammenhanges basiert auf Daten der Betreiber zu Instandsetzungs- und Neubaukosten.

Der Rahmen der Grundidee und prinzipiellen Vorgehensweise bei der Ermittlung des Technischen Anlagenwertes als zeitabhängige Größe $TAW_{x,t}$ ist in nachfolgender Abbildung 5 für einen Anlagenteil schematisch dargestellt.

Ist der Technische Anlagenteilwert für einen bestimmten Zustand bekannt, so kann über die Verknüpfung mit dem Zustandsverlauf (und der Bedeutung des Anlagenteils) sowie dem Erneuerungswert EW_X des Anlagenteils X der Verlauf des Technischen Anlagenteilwerts über die Zeit bestimmt werden $TAW_{X,t}$ [75].

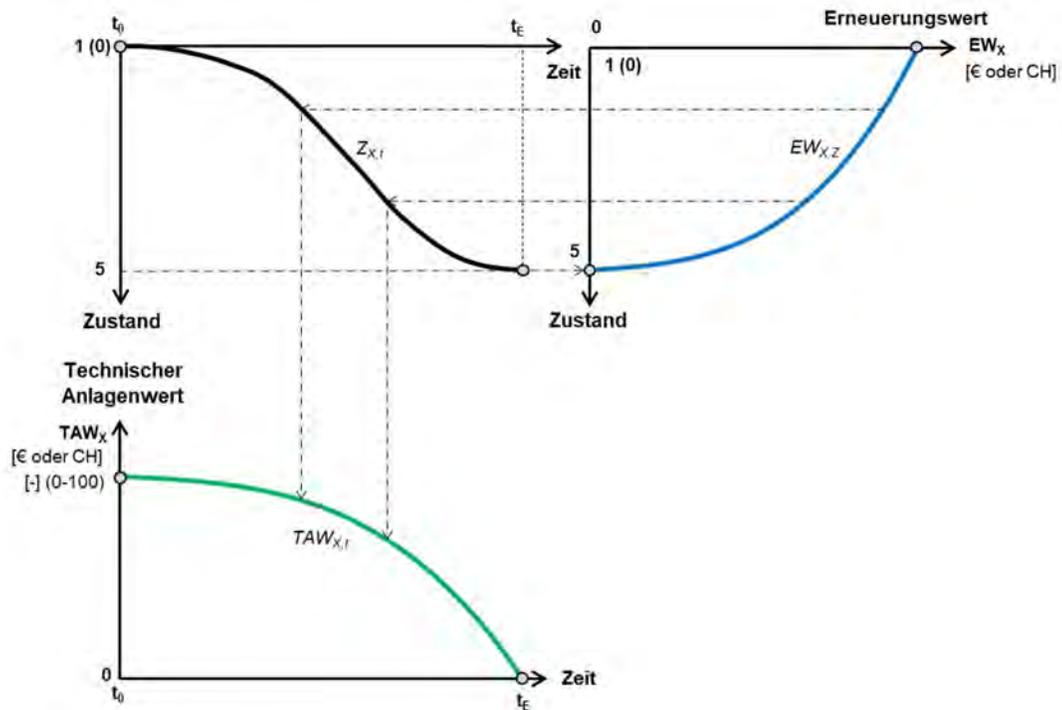


Abbildung 5: Grundidee der Berechnung des Anlagenteilspezifischen Technischen Anlagenteilwerts. Die Skala des Zustandes wird vom besten Zustand (0 bzw. 1) bis zum schlechtesten Zustand (5) dargestellt, TAW_X bezeichnet den technischen Anlagenteilwert eines Anlagenteils [75]

Wie in Kapitel 2.3.2 mathematisch beschrieben, ergibt sich der Technische Anlagenwert einer Anlage anschließend durch Aufsummieren des jeweiligen Technischen Anlagenwertes der einzelnen Anlagenteile. In Österreich werden die Anlagenteile auch als Bauteile bezeichnet, in Deutschland als Bauteilgruppe und der Schweiz als Bauwerksteil. In diesem Bewertungsrahmen wird als die unterste Ebene immer die des Anlagenteils gewählt. Diese Vorgehensweise gründet zum einen darauf, dass Baupreise und Herstellungskosten von Instandsetzungen üblicherweise in diesem Detaillierungsgrad vorliegen. Zum anderen sind auch historische Zustandsdaten, welche zur Ermittlung der Degradationskurven herangezogen werden, auf Anlagenteilebene verfügbar. Des Weiteren können durch diese Herangehensweise Gewichtungsfaktoren für Anlagenteile vermieden

werden, welche bei Analysen auf Bauwerksebene eingesetzt werden müssten, um eine „bedeutungsmäßige“ Bewertung der Anlagenteile vorzunehmen [75].

4.1.2 Konstruktions- und Ausrüstungsindikator

Um eine korrekte Ansprache der Lebenszyklen zu ermöglichen, werden, wie bereits erwähnt, zwei maßgebende Begriffe definiert, die eine Bewertung der Konstruktion und eine Bewertung der Funktion bzw. Ausrüstung ermöglichen. Der **Konstruktionsindikator** (KI) dient dabei zur Beschreibung des Technischen Anlagenwertes für die konstruktiv-baulichen Anlagenteile einer Straßeninfrastrukturanlage, die innerhalb des technischen Lebenszyklus des Gesamtbauwerks nicht zur Gänze ersetzt werden.

Im Vergleich dazu dient der **Ausrüstungsindikator** (AI) zur Beschreibung des Technischen Anlagenwertes für die konstruktiv-funktionalen Teile einer Straßeninfrastrukturanlage, die innerhalb des Lebenszyklus des Gesamtbauwerks ein- oder mehrmals ersetzt bzw. erneuert werden. Eine detaillierte Zuordnung der entsprechenden Anlagenteile zu den beiden Indikatoren kann dem nachfolgenden Kapitel 4.2 entnommen werden. Abbildung 6 zeigt schematisch eine Gegenüberstellung der beiden Indikatoren innerhalb des Lebenszyklus [75].

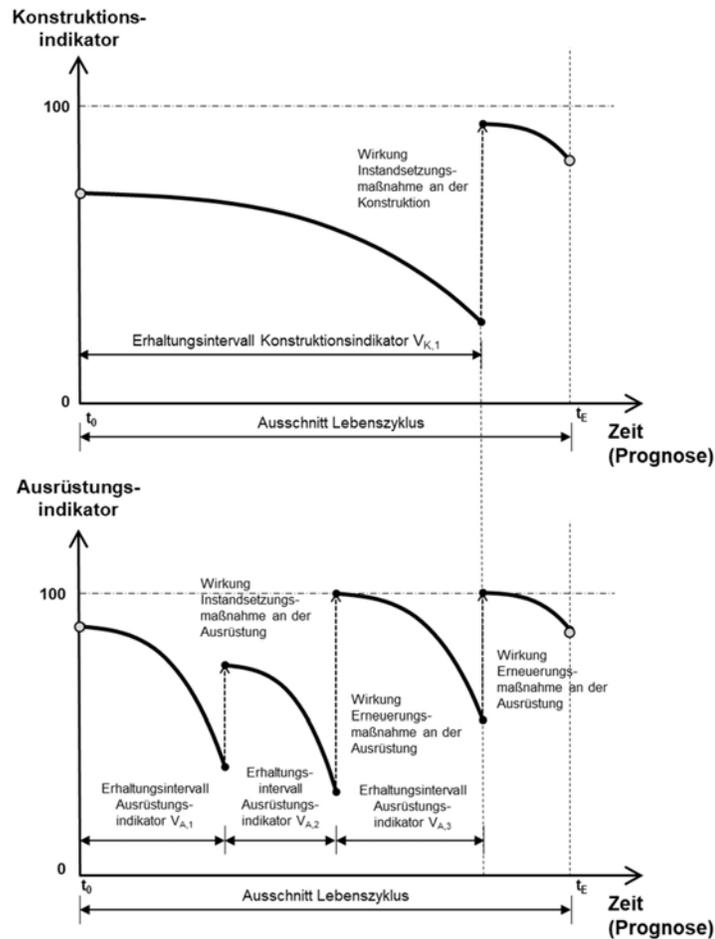


Abbildung 6: Erhaltungsintervalle Konstruktionsindikator und Ausrüstungsindikator [75]

Ändern sich im Laufe eines Lebenszyklus die Anforderungen an ein Bauwerk (z. B. geänderte Normenlage, geänderte funktionelle Anforderungen o. Ä.) wird in der Berechnung des Technischen Anlagenwertes wie auch der Indikatoren (KI und AI) erst nach einer Instandsetzung das neue Anforderungsniveau berücksichtigt. Vor einer Instandsetzung wird also der aktuelle Erneuerungswert bis zu eben dieser herangezogen. Nach dem Eingriff bzw. der Instandsetzung beziehen sich die Indikatoren dann auf den Neubeschaffungswert bzw. den Erneuerungswert unter Berücksichtigung der geänderten funktionalen Anforderungen, wobei die Skala von 0 bis 100 für jede Phase des Lebenszyklus beibehalten wird (siehe Abbildung 7).

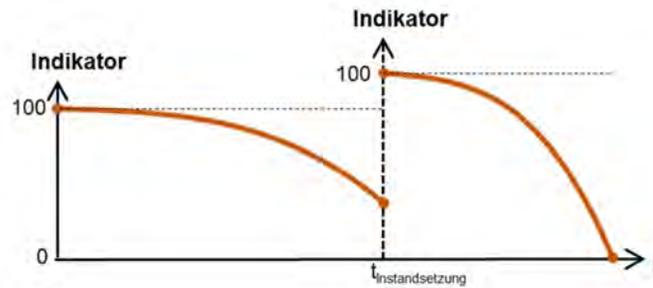


Abbildung 7: Bezug der Indikatoren vor und nach einer Instandsetzung mit geänderten Anforderungen [75]

Ein wesentlicher Punkt in der Berechnung des Technischen Anlagenwertes stellt auch die Berücksichtigung von Abhängigkeiten bei Instandsetzungen dar. Im Zuge der bautechnischen Umsetzung haben Maßnahmen an einem Anlagenteil in vielen Fällen direkte Auswirkung auf andere. Einige Anlagenteile sind beispielsweise nur unter Entfernung anderer instandsetzbar (z. B. Erneuerung der Brückenabdichtung und noch intakte Randbalken).

4.2 Gliederung und Struktur der Anlagen für die technische Anlagenbewertung

Wie bereits in Kapitel 4.1.2 erwähnt, werden für die praktische Anwendung normierte Indikatoren definiert, die einen direkten Vergleich zwischen einzelnen Anlagen ermöglichen. Tabelle 7 zeigt die generelle Zuordnung der Anlagenteile zum Konstruktions- und Ausrüstungsindikator [75].

Tabelle 7: Bewertungsrahmen für die Anlagenbewertung in Abhängigkeit der Anlageart [75]

Art der Anlage	Konstruktionsindikator	Ausstattungsindikator	
Straßenoberbau	gebundene und ungebundene Tragschichten, Unterbau	Decke (Deckschicht und Binderschicht)	
Brücken	Unterbau/Fundierung, Überbau, sonstige konstruktive Bauteile (z. B. Mauern, Anker)	kurz	Fahrbahnübergang, sonst. Ausrüstung (Schnee-/Spritzschutz, Abwurfsicherung, Leitungen, VZ, etc.), Korrosionsschutz [Der Brückenbelag kann über die Straße abgebildet werden (Vermeidung einer Doppelbewertung).]
		lang	Randbalken, Abdichtung/Entwässerung, Lager, Geländer, FRS, Beleuchtungen
Tunnel – baulich	Außenschale/Tragkonstruktion, Innenschale, Portal, Zwischendecken, Nischen, Kavernen und Stollen, Entwässerung	Erhöhter Seitenstreifen <i>[Der Oberbau im Tunnel kann über die Straße abgebildet werden (Vermeidung einer Doppelbewertung).]</i>	
Tunnel – E&M-Ausrüstung	Betriebsgebäude	kurz	E&M-Ausrüstung mit kurzer Lebensdauer bis 10 Jahre, z. B. Videoanlagen, Verkehrslichtsignalanlagen
		lang	E&M-Ausrüstung mit mehr als 10 Jahre Lebensdauer, z. B. Beleuchtung, Brandmeldeanlage

Zur detaillierten Gliederung müssen die Anlagenteile unterschiedlicher Straßeninfrastrukturanlagen (Brücke, Tunnel und Straßenoberbau) den jeweiligen Indikatoren zugeordnet werden. Dazu wird auf bereits bestehende Regelwerke der jeweiligen D-A-CH-Länder zurückgegriffen. Die maßgebenden Regelwerke für die Ingenieurbauwerke können wie folgt zusammengefasst werden [75]:

- Für Deutschland wurde die in der ASB-ING [4] angeführten Bauteilgruppen übernommen, wobei für Tunnel einige Bauteile entfallen.
- Für Österreich wurden die Anlagenteile (Bauteile) von Brückenbauwerken aus der RVS 13.03.11 [50] und von Tunneln aus RVS 13.03.31 [51] entnommen. Da hier schon eine eindeutige Zuweisung von Bauteilen für beide Bauwerkstypen existierte, wurde diese auch übernommen.

- Für die Schweiz wurden die in KUBA 5.0 Datenerfassungshandbuch [9] enthaltenen Bauwerksteile für die Zuteilung zu Brücken und Tunnel herangezogen.

Die Zuordnung der Anlagenteile nach Land ist für Straßen in Tabelle 8, Brücken in Tabelle 9 und für Tunnel in Tabelle 10 ersichtlich, je nach Bauwerk muss es allerdings nicht alle Bauteile an einem Bauwerk geben.

Tabelle 8: Zuordnung Anlagenteile von Straßen zu den beiden Indikatoren KI und AI [75]

Österreich	Deutschland	Schweiz
Konstruktionsindikator		
gebundene Tragschichten	gebundene Tragschichten	gebundene Tragschichten
ungebundene Tragschichten	ungebundene Tragschichten	ungebundene Tragschichten
Unterbau	Unterbau	Unterbau
Ausrüstungsindikator		
Deckschicht	Deckschicht	Deckschicht
Binderschicht	Binderschicht	Binderschicht

Tabelle 9: Zuordnung Anlagenteile von Brücken zu den beiden Indikatoren KI und AI [75]

Österreich	Deutschland	Schweiz
Konstruktionsindikator		
Überbau	Überbau	Bauwerksteile von Brückenüberbauten
Unterbau	Unterbau	Stützen, Pfeiler, Pylone
-	Bauwerk	Widerlager
-	Vorspannung	-
-	Gründung	Foundation
-	Erd- und Felsanker	Unterirdische Bauwerksteile
Ausrüstungsindikator		
Lager	Lager	Lager, Gelenke
Fahrbahnübergang	Fahrbahnübergänge	Fahrbahnübergang
Abdichtung, Entwässerung	Abdichtungen	Abdichtung
-	-	Entwässerung
Randbalken	Kappen	-
Sonstige Ausrüstung	Sonstige	Einrichtungen
Besichtigungseinrichtungen	Schutzeinrichtungen	Sicherheitseinrichtung
-	Brückenseile und -kabel	-

**Tabelle 10: Zuordnung Anlagenteile von Tunneln (baulich)
zu den beiden Indizes KI und AI [75]**

Österreich	Deutschland	Schweiz
Konstruktionsindikator		
Tunnelröhre, Portal	Überbau (Hauptbauteile der Tunnel)	Unterirdische Bauwerksteile
Schächte	Unterbau (Hauptbauteile der Tunnel)	Bauwerksteile verschiedener Tragwerke
-	Gründung	Fundation
-	Erd- und Felsanker	-
Zwischendecke	-	-
Nischen, Kavernen, Fluchtwege	-	-
Sonstige bauliche Anlagen	-	-
Ausrüstungsindikator		
Abdichtung und Entwässerung	Abdichtung	Abdichtung
-	-	Entwässerung
-	Schutzeinrichtung	Sicherheitseinrichtung
Sonstige Ausrüstung	Sonstige Einrichtungen	Sonstige Einrichtungen

4.3 Anwendungsebenen

Der holistische Bewertungsrahmen ist so definiert, dass eine **Anwendung auf Netzebene mit Objektgenauigkeit** möglich ist. Im Bereich des Straßenoberbaus kann auch von Abschnitts- oder Streckenebene gesprochen werden. Dies bedeutet, dass durch eine individuelle Auswahl, Anpassung und Zuordnung der vorgegebenen oder Standardisierten Lebenszyklen zu jedem zu untersuchenden Objekt, die Entwicklung des Technischen Anlagenwertes auf dieser Ebene dargestellt werden kann, sofern die entsprechenden Eingangsdaten auch für das Einzelobjekt zur Verfügung stehen. Die Genauigkeit der Aussage am Einzelobjekt hängt jedoch wesentlich von der dem Objekt zugeordneten bzw. durch die dynamischen Zustandsverläufe kalibrierten Erhaltungsmaßnahmenstrategie ab. Ist die Erhaltungsmaßnahmenstrategie das Ergebnis einer detaillierten Analyse in einem Pavement Management System (PMS), Brücken Management System (BMS) oder Tunnel Management System (TMS), so können auch die Ergebnisse des Technischen Anlagenwertes auf dieses Objekt direkt übertragen werden. Wurden hingegen standardisierte bzw. generalisierte Annahmen getätigt, so ist das objektbezogene Ergebnis mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet, sodass hier die dargestellte Entwicklung des Technischen Anlagenwertes nur bedingt aussagekräftig ist. Durch eine Zusammenführung auf Netzebene gleichen sich diese Unschärfen auf dem Objekt jedoch wieder aus. Aus der

Anwendung auf Objektebene lassen sich durch eine entsprechende gewichtete Aufsummierung unterschiedliche Aussagen auf Netzebene quantifizieren. Dabei können folgende Ergebnisse für die Entscheidungsfindung im Bereich von Erhaltungsstrategien oder Infrastrukturinvestitionen für die Netzebene abgeleitet werden [75]:

- Entwicklung des (mittleren) Technischen Anlagenwertes individuell für Straßenbefestigung, Brücke, Tunnel konstruktiv und Tunnel E&M sowie über alle Anlagenteile
- Entwicklung des (mittleren) jährlichen Wertverlustes für Straßenbefestigung, Brücke, Tunnel konstruktiv und Tunnel E&M sowie über alle Anlagentypen
- Vergleich von unterschiedlichen Erhaltungsmaßnahmenstrategien über den Technischen Anlagenwert oder den Wertverlust und Auswahl einer optimalen Lösung über die Optimierung des Indexquotienten unter vorgegebenen Randbedingungen (dies ermöglicht auch die Zuordnung der optimalen Erhaltungsmaßnahmenstrategie zu jedem analysierten Objekt)

4.4 Eingangsrößen

Wie im Kapitel 3.2 beschrieben, stehen im Bereich der systematischen Straßeninfrastruktur-erhaltung unterschiedliche Daten und Informationen zur Verfügung, die auch für die Berechnung des Technischen Anlagenwertes herangezogen werden können. Die Frage nach den Mindestanforderungen an die Daten ist eine wesentliche Diskussionsgrundlage. Dabei spielen einerseits die Wahl des Algorithmus sowie die angestrebte Aussagegenauigkeit eine zentrale Rolle. Unter Bezugnahme auf die im Kapitel 3.2 aufgelisteten Datengrundlagen wurde die nachfolgende Auflistung von notwendigen Eingangsrößen erstellt [75]:

- **Netzdaten und Daten zur Referenzierung:** Da im Rahmen von TAniA keine Bauprogramme entwickelt werden, sondern der aktuelle und zukünftige Technische Anlagenwert ermittelt wird, sind rudimentäre Informationen über die Örtlichkeit einer zu bewertenden Anlage ausreichend. Wichtig ist in diesem Zusammenhang vor allem die Zuordnung zur Straße bzw. den zu bewertenden Straßenabschnitt sowie die Örtlichkeit innerhalb dieses Abschnittes (vor allem bei der Bewertung des Oberbaus).

- **Aktueller Zustand und Informationen über die Zustandentwicklung:** Da der Wert einer Anlage oder eines Anlagenteils wesentlich vom Zustand abhängig ist, müssen zumindest die Zustandsdaten zur Beschreibung der Konstruktion und der Ausrüstung zur Verfügung stehen. Dabei ist es erforderlich mindestens eine maßgebende Größe zur Verfügung zu haben. Grundsätzlich ist es auch möglich, eine Gesamtnote zu verwenden, jedoch ist dann die Aussagegenauigkeit wesentlich geringer. Neben dem aktuellen Zustand ist es auch von Vorteil, die Entwicklung des Zustandes aus einem PMS, BMS oder TMS zur Verfügung zu haben, wobei durch die Anwendung von Standardmodellen (siehe Kapitel 5.4) auch eine entsprechende Alternative zur Verfügung steht. Eine wesentliche Voraussetzung ist jedoch die Definition oder Abbildung eines Lebenszyklus.
- **Inventardaten:** Die Inventardaten spielen vor allem für die Auswahl des Lebenszyklusmodells und die Abschätzung der Kosten eine wesentliche Rolle. Vor allem die konstruktiven Eigenschaften sind maßgebend für die Auswahl und Anwendung der Zustandsprognosemodelle. Dafür ist es notwendig, das Alter und die maßgebenden Informationen über Bauweise und Material zu kennen. Informationen über das Ausmaß (Länge, Fläche, Anzahl etc.) sind notwendige Eingangsdaten für die Abschätzung der Kosten (siehe hierzu Kapitel 5.6). Ist die grundlegende Struktur oder Gliederung eines Objektes unbekannt (Bauteilart, Anzahl der Bauteile etc.) ist eine Anwendung von TAniA nicht zielführend und auch nur bedingt möglich.
- **Beanspruchungsdaten:** Neben den Inventardaten spielt vor allem die Verkehrsbelastung für die Auswahl des Lebenszyklus eine maßgebende Rolle. Da jedoch auch hier ggf. auf die Ergebnisse von Lebenszyklusanwendungen im PMS, BMS oder TMS zurückgegriffen werden kann, wo diese Eingangsgröße bereits berücksichtigt wurde, sind die Beanspruchungsdaten in diesem Fall von untergeordneter Bedeutung.
- **Kostendaten:** Eine wesentliche Eingangsgröße bilden die Kosteninformationen für die Erhaltungsmaßnahmen. Vor allem die monetäre Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen, die zu einer deutlichen Verbesserung des Zustandes führen (siehe hierzu Kapitel 5.6), ist von wesentlicher Bedeutung, da sie in Kombination mit dem Zustand verantwortlich für den Wert des Anlagenteils ist. Dabei spielen auch die Anwendungsgrenzen der Erhaltungsmaßnahmen eine wesentliche Rolle.

5 MODELLIERUNG DYNAMISCHE LEBENSZYKLEN

5.1 Grundlage Lebenszyklus

5.1.1 Definition Lebenszyklus

Die Lebenszyklusanalyse oder Lebenszyklusbewertung ist ein weltweit verbreitetes Verfahren zur Beurteilung von Erhaltungsaktivitäten technischer Einrichtungen. Die Auswahl einer optimalen Erhaltungsmaßnahmenstrategie unter vorgegebenen Randbedingungen ist fast immer das oberste Ziel von Erhaltungsmanagementsystemen, wobei als Randbedingungen entweder monetäre (budgetäre) Restriktionen oder Anforderungen an den Zustand definiert werden. Im Zusammenhang mit der Erhaltung des Zustandes von Anlagen der Straßeninfrastruktur hat sich die Lebenszyklusanalyse ebenfalls als geeignetes Verfahren zur Beurteilung der Erhaltungsnotwendigkeiten erwiesen. Sie liefert die Grundlage für eine effiziente und nachvollziehbare Erhaltungsplanung. Heute kann die Lebenszyklusanalyse als „Stand der Technik“ für die Planung von baulichen Erhaltungsmaßnahmen auf sensiblen Straßennetzen angesehen werden [79].

Die zeitabhängige Änderung des Anlagenzustandes, ausgedrückt über entsprechende Degradationskurven (auch als Verhaltensfunktionen bezeichnet), ist ein entscheidender Faktor bei der Beurteilung von Erhaltungsmaßnahmen und -strategien im Rahmen der Lebenszyklusanalyse. Das Ziel der Zustandsprognose unter Heranziehung ausgewählter Degradationskurven besteht darin, jenen Zeitpunkt zu errechnen, bei welchem ein bestimmter kritischer Zustand erreicht wird und daher Erhaltungsmaßnahmen notwendig werden. Die Zustandsprognose ist – wie jede andere Prognose auch – von den zur Verfügung stehenden Eingangsinformationen signifikant abhängig. Dies bedeutet, dass die Genauigkeit der Aussage von der Qualität und Quantität dieser Informationen wesentlich beeinflusst wird. Darüber hinaus sind in vielen Fällen die Eingangsgrößen selbst zeitlich veränderliche Variablen, die entsprechend hochgerechnet oder prognostiziert werden müssen. Dadurch handelt es sich um eine komplexe Fragestellung, die über mathematische Modelle gelöst bzw. geschätzt werden kann. Dies definiert auch die entsprechenden Anforderungen an moderne Erhaltungsmanagementsysteme.

Unter Lebenszyklus kann daher die Entwicklung des Zustandes und eventuell zustandswirksamer Erhaltungsmaßnahmen innerhalb einer vordefinierten Zeitperiode verstanden werden. Der gesamte technische Lebenszyklus reicht von der Errichtung oder

Neukonstruktion der Anlage bis zu ihrem Abbruch oder der Außerdienststellung. Die nachfolgende Abbildung 8 (siehe hierzu auch Kapitel 2.3) zeigt nochmals das Verständnis des Lebenszyklus im Rahmen des Projektes TAniA in schematischer Form [79].

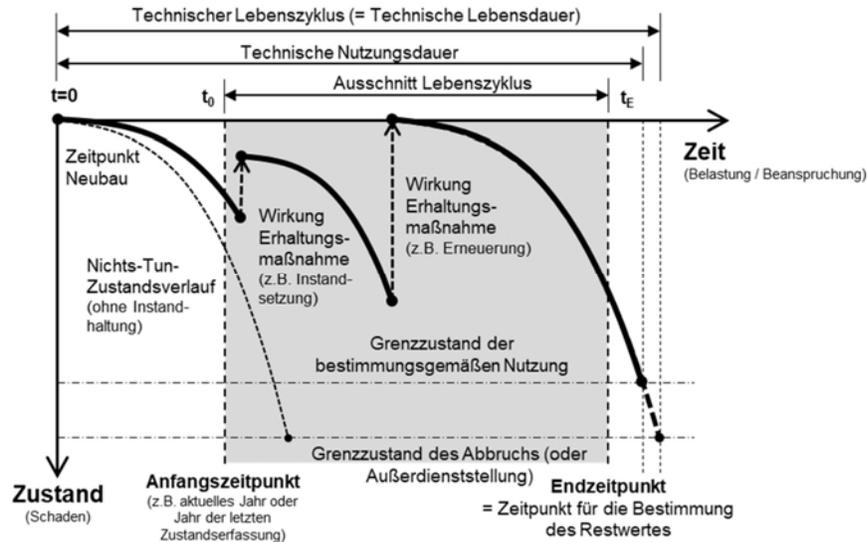


Abbildung 8: Betrachtung Teilbereich Lebenszyklus (Ausschnitt Lebenszyklus) [79]

Da im Rahmen des gegenständlichen Projektes nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden kann, dass für jede zu untersuchende Anlage bzw. für jeden zu beurteilenden Anlagenteil auch entsprechende auf die Lebenszyklusanalyse basierende Managementsysteme zur Verfügung stehen, die den optimalen Zeitpunkt einer Erhaltungsmaßnahme ermitteln, muss ein wesentlich pragmatischeres Verfahren angewendet werden, welches jedem Objekt einen vordefinierten, jedoch kalibrierten, Standardlebenszyklus zuordnet. Die dynamische Anpassung eines standardisierten Lebenszyklus erfolgt, sofern möglich, über entsprechende dem Einzelobjekt zugeordnete Degradationskurven und eine damit verbundene Aussage über den Zeitpunkt der nächsten Erhaltungsmaßnahme und eine Anpassung der Erhaltungsintervalle, wobei die Abfolge, der im standardisierten Lebenszyklus definierten Maßnahmen nicht verändert wird. Ist eine Kalibrierung, aufgrund des Fehlens von objektbezogenen Degradationskurven nicht möglich, so kann für eine Abschätzung des Technischen Anlagenwertes zumindest auf die nicht-kalibrierten, standardisierten Lebenszyklen zurückgegriffen werden. Dabei ist lediglich der aktuelle Zustand (Ausgangssituation) für die Bestimmung des „Startpunktes“ des standardisierten Lebenszyklus heranzuziehen.

5.1.2 Auswahl von Zustandsprognosemodellen

Zur Prognose der technischen Degradation bzw. der Alterung eines Anlagenteils ist bei der Modellierung vorgesehen, Zustandsprognosemodelle in Form von Degradationskurven für verschiedene Ausführungen und Einwirkungen entsprechend aufzubereiten und als maßgebende Eingangsgröße zur Bestimmung der Entwicklung des Technischen Anlagenwertes über die Zeit (entsprechend dem vordefinierten bzw. ausgewähltem Lebenszyklusmodell) zu verwenden. Die technischen Degradationskurven müssen entsprechend den Anforderungen des Projektes ausgewählt werden (siehe Kapitel 5.1.2.2) und beziehen sich entweder auf Zustandseinzelmerkmale oder auf Teilwerte (z. B. Gebrauchswert Straßenoberbau).

Aufgrund der Tatsache, dass Degradationskurven in fast allen Managementsystemen, die eine Lebenszyklusbewertung beinhalten, integriert sind und auch die Literatur hier in fast allen Bereichen umfassende Grundlagen zur Verfügung stellt, können und sollten diese Verhaltensmodelle direkt in den Berechnungsprozess übernommen werden. Es sei hier auch explizit erwähnt, dass die primäre Aufgabe von TAniA nicht in der Entwicklung neuer Degradationskurven besteht, sondern in der Modellierung des Technischen Anlagenwertes auf der Grundlage vorhandener Ergebnisse von Lebenszyklusbetrachtungen in den jeweiligen Managementsystemen. Da jedoch auch davon ausgegangen werden muss, dass einerseits die Modelle nicht den Anforderungen entsprechen (siehe Kapitel 5.1.2.2) und andererseits nicht für alle Teilaspekte derzeit geeignete Modelle zur Verfügung stehen, wird eine einfache und effiziente Methodik für die Entwicklung von Degradationskurven unter Heranziehung von Zustandsnoten (primär auf Bauwerke bezogen) aufgezeigt (siehe Kapitel 5.1.3) und deren praktische Anwendung auch auf einigen Teststrecken sowie dem Teilnetz durchgeführt.

5.1.2.1 Arten von Zustandsprognosemodellen und deren Verwendung im Asset Management

Unter Bezugnahme auf die aktuelle Literatur sowie eine Vielzahl von praktischen Anwendungen von Degradationskurven in Form von Zustandsprognosemodellen in Erhaltungsmanagementsystemen, können die Modelle in unterschiedliche Kategorien gruppiert werden, wobei folgende Basisunterscheidung möglich ist [79]:

- Mechanistische (analytische) Modelle basieren auf der theoretischen Ermittlung der Primärwirkungen (Dehnungen und Spannungen) unter äußeren Einwirkungen

(Lasten, Temperatur, etc.) und der Anwendung materialspezifischer Verhaltensgesetze;

- Empirische Modelle basieren auf der Beobachtung des tatsächlichen Verhaltens und versuchen, einen kausalen Zusammenhang zwischen verschiedenen Einflussgrößen und der zeitlichen Veränderung des Zustandes zu finden.

Aufgrund der Komplexität und der Vielzahl von notwendigen Eingangsgrößen ist die direkte Anwendung von mechanistischen (analytischen) Prognosemodellen auf Netzebene aus heutiger Sicht zwar möglich, aber in vielen Fällen zu komplex und mit einem hohen Aufwand für die Erhebung der Eingangsgrößen (erklärenden Variablen) verbunden. Sie können jedoch für die Beurteilung verschiedener Eingangsgrößen eine wesentliche Hilfestellung bieten und auch für Untersuchungen auf einzelnen Abschnitten auf Projektebene eine Lösung darstellen. Dies bedeutet, dass für die Abschätzung von Langzeiteffekten auf Netzebene in erster Linie empirische Modelle in Frage kommen. Empirische Zustandsprognosemodelle können in Abhängigkeit vom gewählten statistischen Auswerteverfahren zusätzlich wie folgt unterschieden werden [35]:

- Stochastische/Probabilistische Modelle: Diese sagen die Wahrscheinlichkeitsverteilung des zukünftigen Anlagenzustandes voraus und nehmen somit auf Unsicherheiten und die Unschärfe von Daten Rücksicht;
- Deterministische Modelle: Diese versuchen die exakte Zustandsgröße bzw. den exakten Zustandswert (abhängige Variable) in Abhängigkeit von gewissen Einflussgrößen (unabhängige bzw. erklärende Variablen) zu jedem zukünftigen Zeitpunkt vorausszusagen. Der funktionelle Zusammenhang zwischen den abhängigen und unabhängigen Variablen wird dabei auch häufig als „Verhaltensfunktion“ bezeichnet (vor allem im Bereich des Straßenoberbaus).

Welches Modell für die Bestimmung des Technischen Anlagenwertes angewendet wird, hängt von den Anforderungen, welche im Kapitel 5.1.2.2 beschrieben sind, ab. Grundsätzlich können dabei sowohl stochastische als auch deterministische Lösungen zur Anwendung gelangen, wobei eine wesentliche Voraussetzung die Verfügbarkeit der für die Berechnung notwendigen Eingangsgrößen darstellt. Stochastische Modelle eignen sich gut für eine rein datenbasierte Herangehensweise. Es hat sich auch im Rahmen der

praktischen Anwendung von Erhaltungsmanagementsystemen (PMS, BMS) gezeigt, dass mit deterministischen Degradationskurven in fast allen Fällen die Zielsetzung erfüllt werden kann und diese auch den entsprechenden Anforderungen genügen.

5.1.2.2 Anforderung an die Auswahl von Degradationskurven für die technische Anlagenbewertung

Eine wesentliche Fragestellung im Rahmen des gegenständlichen Projektes ist die zeitliche Änderung des Technischen Anlagenwertes innerhalb des Lebenszyklus einer Anlage. Dazu ist es notwendig, wie bereits erwähnt, eine Aussage über das Alterungsverhalten bzw. über die Entwicklung der maßgebenden Zustandsindikatoren (Zustandsgrößen, Zustandswerte oder Zustandsnoten bzw. -klassen) zu tätigen, was in der Regel über Degradationskurven erfolgt. Degradationskurven können daher auch als Zustandsprognosemodelle verwendet werden, wenn auf Grundlage des aktuellen Zustandes die Kurve (mathematische Funktion) für die Ermittlung des künftigen Zustandes herangezogen wird.

Im Gegensatz zu den anlagenspezifischen Managementsystemen, die eine genaue Aussage über die Art der Maßnahme, den Zeitpunkt der Maßnahme und den Umfang der Maßnahme ermöglichen, steht bei der Abschätzung des Technischen Anlagenwertes vor allem die Zuordnung zu einem (vorgegebenen) standardisierten Lebenszyklus im Vordergrund, der „lediglich“ an die objektspezifischen Eigenschaften angepasst werden muss. Die Anwendung von Degradationskurven ist auch bei dieser Anwendung von den objektspezifischen Eigenschaften abhängig (Ausgangszustand, Ausgangsalter etc.), wobei folgende maßgebende Aussagen aus dem Modell für die Bestimmung des Technischen Anlagenwertes abgeleitet werden müssen [79]:

- Auswahl und Kalibrierung des standardisierten Lebenszyklus in Abhängigkeit der Degradation des Zustands der maßgebenden Anlagenteile zur Bestimmung der Erhaltungsintervalle des Ausrüstungsindikators und des Konstruktionsindikators (= dynamische Anpassung auf Objektebene).
- Zuordnung des Objektes in ein bestimmtes Erhaltungsintervall des standardisierten (kalibrierten) Lebenszyklus zur Abschätzung der nächsten Erhaltungsmaßnahmen (und somit Wirkungen auf den Technischen Anlagenwert) aus Sicht der Funktion (Ausrüstungsindikator) und der strukturellen Beschaffenheit (Konstruktionsindikator).

Um diese Prozessschritte ausführen zu können, müssen die Zustandsprognosemodelle bzw. Degradationskurven zumindest folgende Anforderungen erfüllen:

- Die Eingangsdaten für das ausgewählte Zustandsprognosemodell müssen (flächendeckend) vorhanden sein und müssen eine Prognose des Zustandes ermöglichen.
- Die ausgewählten Zustandsprognosemodelle müssen sich auf die maßgebenden Anlagenteile beziehen.
- Das ausgewählte Zustandsprognosemodell muss unter Heranziehung der aktuellen Situation (Alter, Zustand, Belastung etc.) den Zeitpunkt bis zum Erreichen eines kritischen Zustandes sowohl aus Sicht der Ausrüstung als auch aus Sicht der Konstruktion abschätzen können, sodass ein bestimmtes Objekt einem bestimmten Intervall des standardisierten (kalibrierten) Lebenszyklus zugeordnet werden kann.
- Das ausgewählte Zustandsprognosemodell muss für eine Kalibrierung des standardisierten Lebenszyklus herangezogen werden können (siehe hierzu Kapitel 5.3).

5.1.3 Entwicklung von Zustandsprognosemodellen für TAniA

Für Bauwerke bzw. Anlagenteile, für die keine Zustandsprognosemodelle zur Verfügung stehen, müssen also solche entwickelt werden. Die im Folgenden beschriebene Prozedur wurde dabei im Zuge des Projekts entwickelt und angewendet.

Der gewählte Ansatz zur Prognose der Alterungskurven ist in Abbildung 9 als Ablaufdiagramm dargestellt. Er baut auf einem rein datenbasierten Ansatz mit „Machine Learning- Elementen“ auf, welcher die Entwicklung der Zustandsdaten aus Bauwerksdatenbanken unter Berücksichtigung weiterer Attribute (Geometrie, Bauweise, etc.) ebendieser Datenbanken sowie Komplementärdaten (z.B. Wetteraufzeichnungen, Verkehr, Errichtungszeitpunkt Norm etc.) analysiert. Datenbasierte Modelle von Erhaltungsdatenbanken sind weitgehend objektiv und eignen sich sowohl zur Auswertung der wesentlichen Einflussgrößen auf Bauwerksalterung, aber auch zur Erstellung und Ableitung objektiver auf historischen Zustandsdaten aufbauende Bauwerksalterungskurven. Je nach Datenqualität, Vollständigkeit und Konsistenz der Datenbanken können unterschiedliche genaue Prognosen erstellt werden.

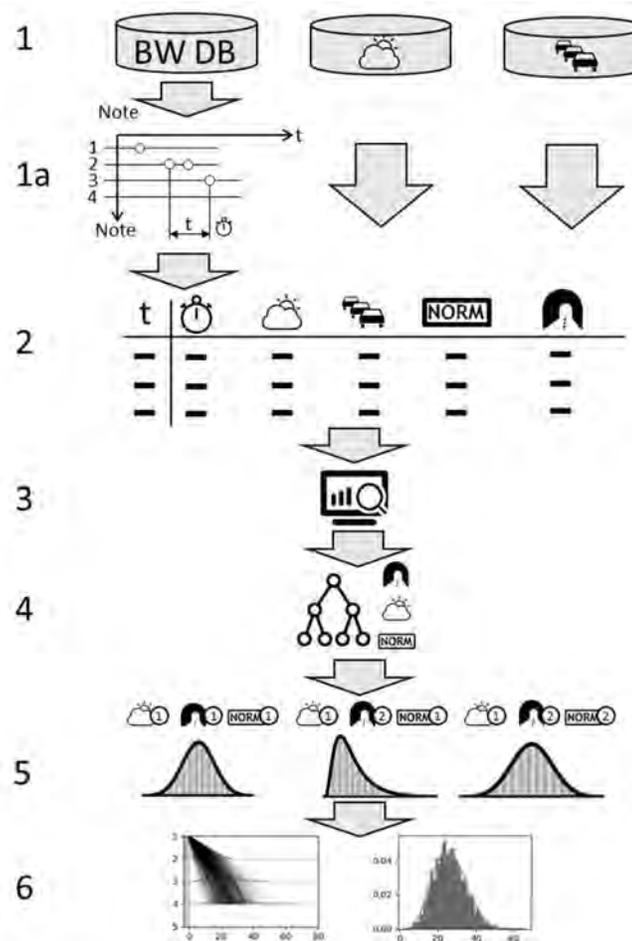


Abbildung 9: Ablauf der Erstellung von ausföhrungs- und umwelteinflussabhängigen Degradationskurven in sechs Schritten [79]

Der Ablaufentwickelte Ansatz lässt sich folgendermaßen unterteilen:

- Zuerst (1) wird eine Auswahl von Datenbanken, die historische Zustandsdaten bzw. mögliche Einflussparameter beinhalten, getroffen. Im nächsten Schritt (1a) werden aus der Datenbank der historischen Zustandsdaten Übergangsdauern von einer Zustandsnote auf die nächstschlechtere ermittelt (=Verweilzeit in der Zustandsklasse bzw. Bauwerksnote).
- Im nächsten Schritt (2) werden mögliche Einflussparameter und Übergangsdauern in einer neuen Datenbank zusammengefasst.

- Mit der Datenbank wird in weiterer Folge (3) eine Random-Forest-Analyse (RFA)¹⁰ durchgeführt. Als Ergebnis dieser erhält man die wichtigsten Einflussparameter auf die Übergangsdauer der Zustandsverschlechterung um einen Notengrad. Damit wird für jede vordefinierte analysierte Zustandsnotenverschlechterung ein separates Parameterset erzeugt.
- Mit den gewählten Einflussparametern kann eine Entscheidungsbaumanalyse (EBA) (4) durchgeführt werden, welche in erster Linie der Clusterung des Datensatzes (bzw. der Bauteile) dient. Ergebnis dieses Schrittes sind mehrere Entscheidungsbäume – für jeden Übergang/für jede Verschlechterung einer Zustandsnote (z. B. 1 auf 2 oder 2 auf 3) einer.
- In den letzten beiden Schritten (5 und 6) werden nun mit den in den Schritten 1-4 durchgeführten Vorauswertungen datenbasierte Degradationskurven des Zustandes von Bauwerkstypen gebildet, welche eine strategische Erhaltungsplanung unterstützen können.

5.1.3.1 Clusterung nach Degradationsgeschwindigkeit

Die Clusterung oder Gruppierung des Datensatzes erfolgt dem Ablauf in Abbildung 9 entsprechend, unter Heranziehung der RFA in Kombination mit einer EBA. Die RFA wird dabei lediglich zur Bestimmung des Einflusses und in weiterer Folge zur Auswahl wichtiger Parameter herangezogen. Die endgültige Clusterung unter Heranziehung der in der RFA ausgewählten Einflussparameter erfolgt schlussendlich unter Anwendung der EBA.

Für die RFA ist es ausreichend, lediglich potenziell wichtige Parameter vorzubestimmen, da die Wichtigkeit der einzelnen Parameter ohnehin im Zuge der Analyse später automatisch ermittelt wird, und die vielversprechendste Kombination für die EBA verwendet wird. Um im weiteren Verlauf Degradationskurven mit möglichst kleiner Streubreite zu erhalten, ist eine korrekte Anpassung und Ermittlung der das Ergebnis beeinflussenden Parameter in entsprechende Subgruppen entscheidend.

¹⁰ Ein Random Forest ist ein Klassifikations- und Regressionsverfahren, das aus mehreren unkorrelierten Entscheidungsbäumen besteht. Alle Entscheidungsbäume sind unter einer bestimmten Art von Randomisierung während des Lernprozesses gewachsen. Für eine Klassifikation darf jeder „Baum“ in diesem Wald eine Entscheidung treffen und die Klasse mit den meisten Stimmen entscheidet die endgültige Klassifikation. Wikipedia:
https://de.wikipedia.org/wiki/Random_Forest (Abfrage am 19.7.2021)

Vor Beginn einer RFA muss definiert sein, welche möglichen Einflussparameter für die Zielvariable vorliegen. Als Zielvariable wird die Dauer einer bestimmten Verschlechterung (z. B. die Verschlechterung eines Bauteils um eine Zustandsnote) verwendet. Als Einflussparameter wurden Verkehr, Klima, Bauwerksalter, Errichtungszeitpunkt und vorliegende Normen und Standards festgelegt, und entsprechend an vorliegende Datenquellen angepasst.

5.1.3.2 Bestimmung der Zielvariable

Die Bestimmung der Verweildauer des Bauwerkszustandes in einem bestimmten Zustandsnotenbereich bedingt eine vollständige und konsistente Erfassung in der Zustandsdatenbank. Da Zustandsnoten aber nicht zwingend in zeitlich regelmäßigen Abständen zur Verfügung stehen und sich auch die Zustände in einem anderen Maß als für die RFA benötigt verändern können (z. B. Verschlechterung von einem Datenbankeintrag zum nächsten um zwei Zustandsnoten statt um eine), wird die Zustandsnote zwischen den Beobachtungen interpoliert. Wenn also, wie beispielsweise in Österreich und der Schweiz, Zustandsnoten zwischen 1 und 5 im ganzzahligen Bereich existieren, scheint es sinnvoll, die Übergangsdauern um einen ganzen Notengrad zu ermitteln, wobei hier immer die Dauer bis zum Schnitt der Interpolation mit dem Mittelwert zwischen zwei aufeinanderfolgenden Notengraden definiert wurde.

Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt das Vorgehen bei der Ermittlung der Übergangsdauer um eine bestimmte Verschlechterung (Δt) und des Alters am Beginn des Übergangs (t_{SA}) in allgemeiner Form (oberer Teil der Abbildung) wie auch am Beispiel der österreichischen Zustandsnoten (unterer Teil der Abbildung). Die blauen Punkte stellen die Messpunkte (Inspektionsergebnisse) dar, die grauen Linien die lineare Interpolation zwischen den Messungen und die rote Linie zeigt die Länge der Übergangsdauer auf den nächsten Notengrad.

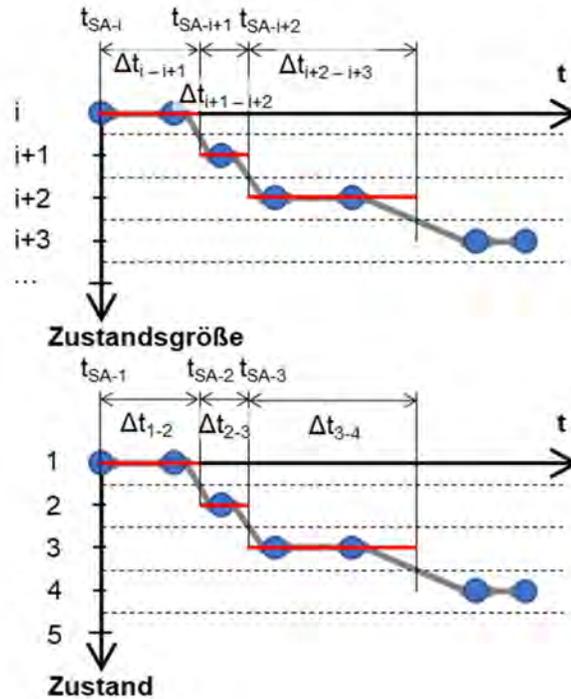


Abbildung 10: Vorgehen beim Ermitteln der Übergangsdauer [76]

Bis zum Schnittpunkt wird also die ursprüngliche Zustandsnote gehalten. Wird diese überschritten, wird die darauffolgende, schlechtere Zustandsnote zugewiesen. Für Deutschland ist hier eine feinere Unterteilung möglich, da die Zustandsnoten auch im einstelligen Kommabereich vorliegen.

Als am besten geeignete Zielvariable (engl. Label) der RFA hat sich die Verschlechterungsdauer (Δt_{i-i+1}) von einer definierten Zustandsgröße Z_i auf eine Z_{i+1} erwiesen. Wichtig ist in diesem Prozess, dass auch das Alter am Beginn eines Überganges (t_{SA-ZG}) ermittelt wird, da dieses, vor allem nach Instandsetzungen, als möglicher wichtiger Einflussparameter auf die Alterungsgeschwindigkeit interpretiert wird.

5.1.3.3 Vorauswahl von Einflussparametern

Wie bereits erwähnt wird die RFA zur Bestimmung der Wichtigkeit der einzelnen Parameter verwendet. Die Vorauswahl eines unwichtigen Parameters (=Variable) beim Start der RFA hat auf das Ergebnis grundsätzlich nur einen geringen Einfluss – dies gilt allerdings nur sofern für die gewählten Parameter auch für alle Bauwerke bzw. Bauteile Einträge vorliegen. Eine Analyse kann immer nur für die Bauwerke oder Anlagenteile durchgeführt

werden, für die auch alle Parameter verfügbar sind. In der Vorauswahl der Parameter ist also zu bedenken, dass ein schlechter Befüllungsgrad eines Parameters die Größe des Datensatzes und damit die Qualität der Analyse stark dezimieren kann. Weiter ist darauf zu achten, dass auch ein kausaler oder begründbarer Zusammenhang zwischen Anlagenteilverschlechterung und Einflussparameter besteht.

Zu diesem Zweck wurden zum einen die Erhaltungsmanagementdatenbanken der drei D-A-CH-Länder nach möglicherweise wichtigen Parametern der Infrastrukturanlagen durchsucht. Zum anderen wurden weitere Daten der Umgebungseinflüsse, Klimaeinwirkung, sofern nicht im Datensatz der historischen Zustandsentwicklung vorhanden, mit ebendiesem verschnitten.

In Tabelle 11 ist die Parametervorauswahl für ausgewählte Bauteile der österreichischen Daten dargestellt. Wobei hier als Parameter der Umgebungseinflüsse der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) und der durchschnittliche tägliche Schwerverkehr ($DTV_{sv} = JDTLV$) herangezogen wurden. Für die Klimaeinwirkung standen flächendeckend der Frostindex (FiKh), die maximale Straßenoberflächentemperatur (T_{max_50}) und minimale Lufttemperatur (T_{min}) (alle drei Parameter nach [84]) zur Verfügung. Außerdem wurde die für die Erhaltung zuständige Behörde (Erhalter) berücksichtigt, da es Überlegungen zum Einfluss der Erhaltungsstrategie auf die Degradationsgeschwindigkeit gab.

Tabelle 11: Vorausgewählte Attribute für die RFA für den österreichischen Datensatz [79]

Überbau	Unterbau	FÜG	Lager	Randbalken	Ausrüstung	Entwässerung
Baujahr	Baujahr	Baujahr	Baujahr	Baujahr	FIKh	FIKh
FIKh	FIKh	FIKh	FIKh	FIKh	Tmax50	Tmax50
Tmax50	Tmax50	Tmax50	Tmax50	Tmax50	DTV	DTV
Brückenklasse	DTV	DTV	DTV	DTV	DTV _{sv}	DTV _{sv}
DTV	DTV _{sv}	DTV _{sv}	DTV _{sv}	DTV _{sv}	Tmin	Tmin
DTV _{sv}	Tmin	Tmin	Tmin	Tmin	Erhalter	Erhalter
Tmin	Art-Konstruktion	Hersteller	Hersteller	Erhalter	Fahrbahnbreite	Fahrbahnbreite
Norm-Ausgabe	Gründung	Konstruktionstyp	Lagertyp	Fahrbahnbreite	Brückenklasse	Brückenklasse
Statisches-System	Erhalter	Erhalter	Erhalter	Brückenklasse	-	Länge
Fahrbahnbreite	-	-	-	-	-	-
Länge	-	-	-	-	-	-
Erhalter	-	-	-	-	-	-

5.1.3.4 Parameterselektion mit Random-Forest-Analyse

Da es Parameter gibt, bei denen die Abwägung zwischen Wichtigkeit und Befüllungsgrad vorab nicht festgestellt werden kann, ist im Framework eine Wiederholung der RFA vorgesehen, wobei bei jedem neuen Durchlauf der Parameter mit dem geringsten Einfluss auf das Ergebnis weggelassen wird (Tabelle 12).

Als Endergebnis der RFA wird dann die Teilanalyse genommen, deren Ergebnis die höchste Genauigkeit (Accuracy) hat. Davon ausgehend, dass nie alle Parameter der Datenbank vollständig befüllt sind, ist aus Gründen der breiteren Anwendungsfähigkeit des endgültigen Modells, eine möglichst geringe Anzahl an Eingangsparametern wünschenswert. Eine Bevorzugung von Modellen mit geringerer Parameteranzahl scheint unter diesem Gesichtspunkt also zielführend.

Im Zuge des gewählten Ansatzes wurde dies umgesetzt. So wurde die Konvention getroffen, dass eine Verminderung der Genauigkeit um 0,1 Jahre pro weggelassenen Parameter akzeptabel ist. Das Ergebnis einer RFA ist die Auswahl an Parametern, mit

denen die EBA im Folgenden eine Gliederung vornimmt. Im Beispiel in Tabelle 12 wird aufgrund der höchsten Genauigkeit, wie auch der geringsten Anzahl an Parametern Run 12 als optimale Parameterkombination gewählt. Unter den Einflussparametern ist die Wichtigkeit des Parameters in Prozent zu sehen. Gewählt wurde schlussendlich die Kombination der Zeile 12 (dick umrahmt, der dazugehörige Entscheidungsbaum) aufgrund des kleinsten Fehlers bei kleinster Parameteranzahl

Tabelle 12: Beispiel der Bestimmung der Genauigkeit bei verschiedenen Einflussparameterkombinationen (Übergang des Überbaus von Zustandsnote 2 auf 3). [79]

Run	Mean Absolute Error [years]	Typ Text	Baujahr	Seehöhe	Erhaltungspflichtiger	Laenge	Breite	Objektnutzungen	Funktionen	Belastungsnorm Text	Bauwerksteil-Typ Text	Bauwerksteil-Bauart Text	Bauwerksteil-Ausmass	Baumateriale	Oberflächenschutz vorhanden	2-3-start-age
1	1.44	3.11	11.96	4.53	23.22	3.38	5.25	0.7	1.15	0.93	1.28	0.18	3.41	4.96	0.78	36.43
2	1.44	3.14	11.98	4.55	23.22	3.4	5.26	0.7	1.15	0.93	1.29	0	3.42	4.97	0.78	36.47
3	1.44	3.15	12.06	4.62	23.24	3.48	5.37	0	1.16	0.94	1.28	0	3.49	4.98	0.78	36.69
4	1.44	3.14	12.39	4.59	23.42	3.46	5.29	0	1.18	0.94	1.29	0	3.42	5.01	0	37.14
5	1.51	2.12	9.64	3.78	5.82	3.11	5.84	0	1.63	0	0.76	0	2.67	8.27	0	57.11
6	1.51	1.38	9.67	3.83	5.85	3.17	5.91	0	1.66	0	0	0	2.73	8.26	0	57.53
7	1.52	0	9.72	4.02	5.88	3.95	5.97	0	1.69	0	0	0	2.81	8.27	0	57.67
8	1.5	0	10.09	4.19	5.83	4.15	6.27	0	0	0	0	0	2.89	8.32	0	58.26
9	1.44	0	13.05	4.06	8.35	5.04	6.34	0	0	0	0	0	0	5.68	0	57.47
10	1.46	0	13.61	0	8.6	5.72	6.96	0	0	0	0	0	0	5.84	0	59.28
11	1.45	0	14.48	0	8.83	0	8.67	0	0	0	0	0	0	6.05	0	61.95
12	1.44	0	16.83	0	11.53	0	8.2	0	0	0	0	0	0	0	0	63.44
13	1.51	0	16.1	0	10.39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73.5
14	1.55	0	15.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84.2
15	1.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

5.1.3.5 Clusterung Entscheidungsbaumanalyse

Wie zu Beginn des Kapitels gezeigt, bietet die RFA eigentlich eine aus der EBA weiterentwickelte Prognose, jedoch wurde im Wesentlichen aus zwei Gründen für die Clusterung die EBA herangezogen. Zum einen ist ein visuell überprüfbarer Entscheidungsbaum Voraussetzung für die folgenden Schritte des Gesamttablaufs (Abbildung 9), da in weiterer Folge, vor allem bei den Markov-Ketten, jährliche Übergangswahrscheinlichkeiten aus dem Ursprungsdatensatz (um auch die Beobachtungen ohne

Verschlechterung berücksichtigen zu können) berechnet werden. Zum anderen wurde, um einen Entscheidungsbaum auf Basis des gesamten Datensatzes (ohne Aufteilung in Trainings- und Testdaten) zu erhalten, eine separate EBA durchgeführt. Ein aus der RFA extrahierter Einzelbaum erfüllt diese Voraussetzung nicht.

Die nun erfolgende EBA basiert auf demselben Datensatz wie jener der RFA, jedoch wird dieser nicht in Trainings- und Testdaten unterteilt und auch nicht durch das „Bagging“ weiter dezimiert, wie es bei einem Einzelbaum der RFA der Fall wäre. Um eine Überanpassung zu vermeiden ist in diesem Schritt das Abschneiden des Entscheidungsbaumes auf ein brauchbares Maß erforderlich. Ohne dieses Abschneiden würde das Ergebnis der EBA ein Entscheidungsbaum sein, der derart viele innere Knoten aufweist, dass jeder Blattknoten (leaf nodes – unterste Ebene des Entscheidungsbaumes, der sich nicht weiter aufteilt) nur noch ein Sample repräsentiert. Es ist also zielführend, den Baum entweder in einer früheren Ebene zu kappen, eine Mindestanzahl an Samples oder eine tolerierbare Fehlertoleranz (diese wird im Zuge der Überprüfung des Modells mit den Testdaten für jeden Knoten ermittelt) im Blatt zu definieren, um den Baum auf ein überschaubares und repräsentatives Maß und nicht zur Überanpassung neigendes Maß zu verkleinern.

Für die RFA wurde das Softwarepaket für Machine Learning von „RandomForestRegressor“ bzw. für die EBA das Paket „DecisionTreeRegressor“ verwendet. Beide sind Teil der Programmbibliothek „sklearn.ensemble“ (scikit-learn Version 0.21.2) in Python (Version 3.7.3.final.0).

5.1.3.6 Erstellung der Degradationskurven mit probabilistischem Ansatz

Dieser Ansatz basiert grundsätzlich auf probabilistischen Überlegungen. Um im Resultat die Verteilung der Daten in den einzelnen Blättern des Entscheidungsbaumes in diesem Ansatz berücksichtigen zu können, wird vorab die diesem Teildatensatz zugrundeliegende Verteilung für das Blatt des Entscheidungsbaumes analysiert. Wobei hier auf eine Anpassung (Fit) einer in der Statistik gebräuchlichen Beta-Verteilung zurückgegriffen wird, da dieser Verteilungstyp den Vorteil hat, flexibel an verschiedenste Formen angepasst werden zu können, aber auch Grenzwerte definiert werden können. Damit werden unrealistische oder negative Werte verhindert.

Des Weiteren lässt sich der Ablauf der Erstellung einer Degradationskurve durch folgende Schritte beschreiben (Nummerierung der Schritte siehe auch Abbildung 11):

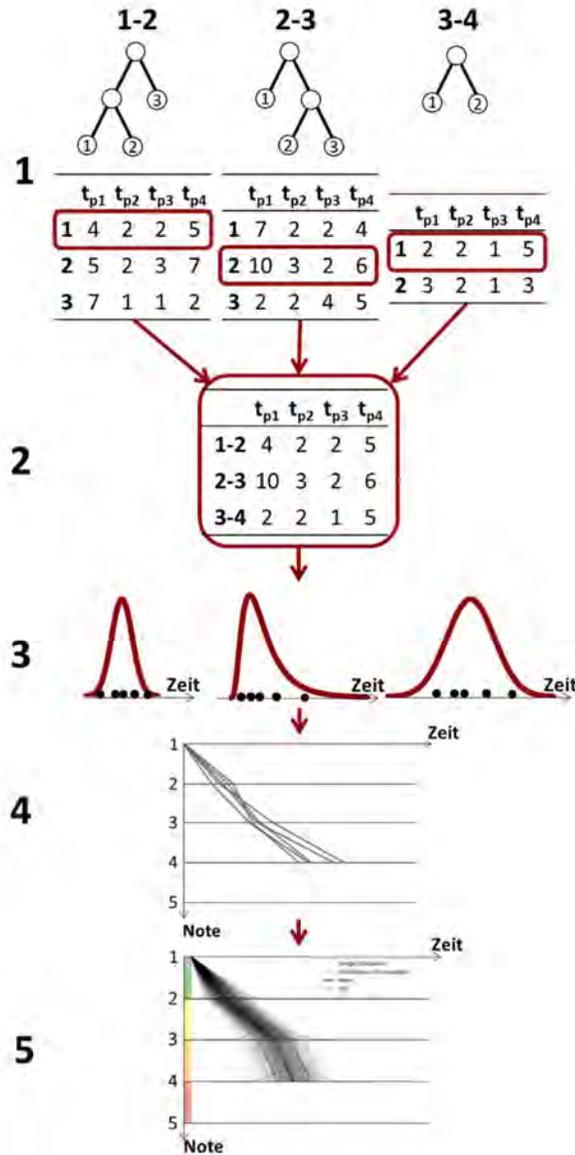


Abbildung 11: Ablauf der Erstellung der individuellen Degradationskurven mit dem probabilistischen Ansatz anhand eines Beispiels [76]

1. Zuerst werden dem Parametersetting des betrachteten Bauwerkes entsprechend die Blätter identifiziert und die vorab bestimmten Verteilungsparameter der Verweildauer t_{pi} in der jeweiligen Zustandsnote ausgelesen.
2. Für das betrachtete Bauwerk bzw. den Anlagenteil stehen Verteilungsparameter der Verweildauer t_{pi} für jeden Verschlecherungs-schritt (von der Note i zu $i+1$) für das betrachtete Bauwerk zur Verfügung.

3. Für jede dieser Verteilungen werden Monte-Carlo Zufallszahlen (Samples) generiert.
4. Diese Zufallszahlen werden schrittweise aufsummiert. Es ergibt sich eine Kurvenschar von Degradationskurven.
5. Für diese Kurvenschar kann für jeden Notenschritt die Eintrittswahrscheinlichkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt bestimmt werden. Zur besseren Lesbarkeit der Ergebnisse wird die Degradationskurve mit dem Erwartungswert und der Standardabweichung dargestellt.

Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass für die Erstellung der Degradationskurven beliebige Verteilungen für die Blätter des Entscheidungsbaumes mit den jeweiligen zugrundeliegenden Daten berücksichtigt werden können. Der Datensatz wird, dem Entscheidungsbaum folgend, für ein Blatt gefiltert. Daran kann eine Verteilung für die darin enthaltenen Übergangsdauern angepasst werden, welche in weiterer Folge in der Kurvenerstellung Anwendung findet. Der gesamte Prozess vom Ermitteln der Übergangsdauern, über das Anpassen der Verteilungen, bis hin zum Erstellen der Degradationskurven erfolgt ohne Verwendung von vorbestimmten Funktionen oder Faktoren.

Nachteilig an diesem Ansatz ist allerdings, dass hier nur Daten von beobachteten Übergängen einfließen. Wenn also ein Bauteil den Zustand über einen sehr langen Zeitraum hält, und nur aus Gründen fehlender Begutachtungen oder abweichender Intervallabstände kein Übergang beobachtet wurde, wird dieses Bauteil nicht im Ansatz berücksichtigt. Aus der Methodik ergeben sich also zu kurze Degradationskurven.

5.1.3.7 Erstellung der Degradationskurven mit zeitinhomogener Markov-Kette

Der zweite Ansatz, der im Projekt verfolgt wurde, lehnt sich stark an den von den Autoren in OPTimAL [37] entwickelten Ansatz an. Die Degradationskurven werden hier mit sogenannten zeitinhomogenen Markov-Ketten erstellt. In diesem Modell werden nicht nur Übergänge von einem Zustandsnotengrad auf den nächstschlechteren herangezogen, sondern alle Beobachtungen berücksichtigt. Dazu wird der Ursprungsdatensatz (also jener der zwar schon mit allen Parametern verschnitten wurde, jedoch nicht jener mit aufbereiteter Zielvariable) für einen Anlagenteil den Entscheidungsbäumen folgend geclustert.

Die Grundidee ist, ausgehend von einem aktuellen Zustand s_i Wahrscheinlichkeiten $p_{s_i \rightarrow s_j}$ zu definieren, die den möglichen Nachfolgezustand s_j bestimmen. Schleifen in Abbildung 12 stellen die Wahrscheinlichkeit eines gleichbleibenden Zustands im nächsten Zeitschritt dar, alle anderen Pfeile Verschlechterungen um einen oder mehr Zustandsnotengrade.

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. Die sich ergebenden, jährlich variierenden Übergangswahrscheinlichkeiten sind beispielhaft in Tabelle 13 dargestellt. Es gibt also meist eine recht hohe Wahrscheinlichkeit, dass die aktuelle Zustandsnote auch im folgenden Jahr erhalten bleibt, eine relativ kleine, dass es eine Verschlechterung um einen Notengrad gibt und eine verschwindend kleine, dass die Verschlechterung mehr als einen Notengrad ausmacht. Bei jedem Notenübergang wird der „Jahreszähler“ wieder auf das Jahr 0 gesetzt. Als Übergänge sind nur Verschlechterungen (Pfeile zu einem höheren Notenindex - siehe Abbildung 12) oder gleichbleibende Zustandsnoten zulässig [76].

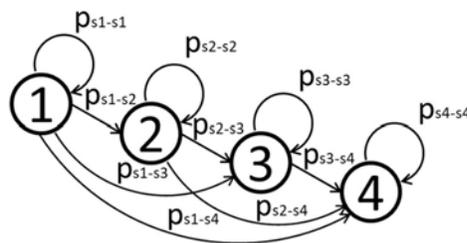


Abbildung 12: Markov-Kette mit vier Zuständen und möglichen Zustandsübergängen [76]

Vorteil dieses Modells ist, dass der vorliegende Datensatz in einem viel größeren Umfang verwendet werden kann. Allerdings überschätzt diese Methodik die Übergangsdauern in Fällen, in denen kein Übergang zu einer schlechteren Zustandsnote beobachtet wurde. Da davon auszugehen ist, dass es in der Zukunft einen Übergang geben wird (beispielsweise, weil es sich um den aktuellsten und damit letzten Eintrag in der Datenbank handelt) bzw. gegeben hätte (weil vor der Verschlechterung eine Instandhaltungsmaßnahme umgesetzt wurde), wird diesem aber bei einem rein datenbasierten Vorgang in den Übergangswahrscheinlichkeiten nie Rechnung getragen.

Tabelle 13: Jährlich ändernde Übergangswahrscheinlichkeiten einer zeitinhomogenen Markov-Kette (Ausschnitt der ersten Beobachtungsjahre) am Beispiel des Überbaus bei Brücken (Österreich) [76]

Beobachtungsjahr	$p_{1 \rightarrow 1}$	$p_{1 \rightarrow 2}$	$p_{1 \rightarrow 3}$	$p_{1 \rightarrow 4}$	$p_{1 \rightarrow 5}$	$p_{2 \rightarrow 2}$	$p_{2 \rightarrow 3}$...
0	0,84	0,16	0,00	0,00	0,00	0,98	0,02	...
1	0,89	0,11	0,00	0,00	0,00	0,95	0,05	...
2	0,83	0,17	0,00	0,00	0,00	0,92	0,08	...
3	0,92	0,08	0,00	0,00	0,00	0,94	0,06	...
4	0,83	0,17	0,00	0,00	0,00	0,93	0,06	...
...

Allerdings lässt sich mit Hilfe der Tabelle der Übergangswahrscheinlichkeiten (z. B.: Ausschnitt in Tabelle 13), in Kombination mit einer Tabelle der Anzahl der Beobachtungen je Zeitschritt, eine Aussage darüber treffen, wie viele Beobachtungen im Laufe der Zeit nicht bzw. noch nicht weiterverfolgt wurden. An dieser Stelle können die Übergangswahrscheinlichkeiten mit Expertenwissen korrigiert werden. So besteht die Möglichkeit der Angabe einer maximalen Verweildauer oder angepasster Übergangswahrscheinlichkeiten für definierte Jahre.

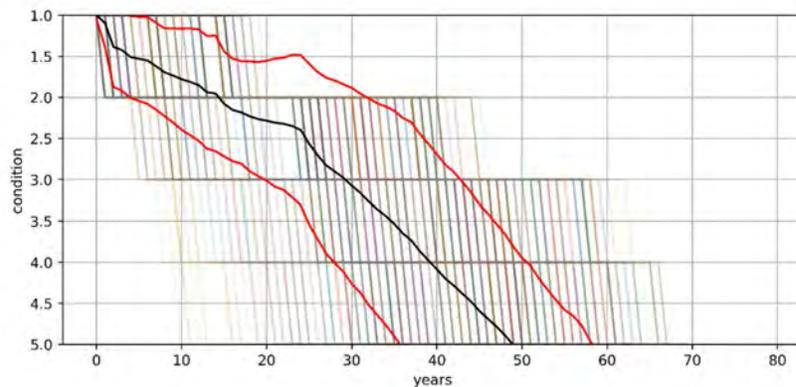


Abbildung 13: Beispiel einer mit zeitinhomogenen Markov-Ketten entwickelten Degradationskurve (Mittelwert (schwarz), Standardabweichung (rot) und Einzelsimulationen (bunte, stark transparente Linien im Hintergrund)) [76]

Weitere Details zur Entwicklung der Prognosemodelle sowie die detaillierten Ergebnisse der Analysen der zur Verfügung gestellten Daten können dem Anhang A entnommen werden.

5.2 Empfehlungen für Zustandsprognosemodelle

5.2.1 Straßenoberbau

Aufgrund der Tatsache, dass die ersten auf Lebenszyklusanalysen basierenden Erhaltungsmanagementsysteme im Bereich des Straßenoberbaus (PMS) zur Anwendung gelangten, ergibt sich auch eine große Vielfalt von Degradationskurven für den Straßenoberbau, die als Zustandsprognosemodelle herangezogen werden können. Diese Modelle werden in den D-A-CH-Ländern auf unterschiedlichen Straßennetzen mehr oder weniger intensiv eingesetzt und entsprechen in den meisten Fällen den im Kapitel 5.1.2.2 beschriebenen Anforderungen. Es ist auch sinnvoll und zweckmäßig, diese lokalen Modelle in den jeweiligen Ländern anzuwenden, da neben den verfügbaren Eingangsdaten auch die örtlichen Gegebenheiten berücksichtigt werden.

Aus Gründen der Vollständigkeit wird im Rahmen des gegenständlichen Projektes ein entsprechender Querverweis zu diesen Modellen gegeben, sodass im Rahmen einer umfangreichen praktischen Anwendung des TAniA-Prozesses keine neuerliche Suche nach entsprechenden Grundlagen erfolgen muss.

Unter Bezugnahme auf aktuelle PMS-Anwendungen in den drei D-A-CH-Ländern und unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.1.2.2 beschriebenen Anforderungen, werden für den Straßenoberbau folgende Empfehlungen gegeben [76]:

Deutschland

Deterministische Verhaltensfunktionen zur Modellierung der Zustandsgrößen nach Hinsch et al. [27]: Diese Modelle wurden durch Oertelt [36] 2007 empirisch kontrolliert bzw. abgesichert [36]. Die nachfolgende Abbildung 14 zeigt für das Zustandsmerkmal Spurrinntiefe (Zustandsgröße) die Degradationskurve als Funktion der kumulierten Lastübergänge.

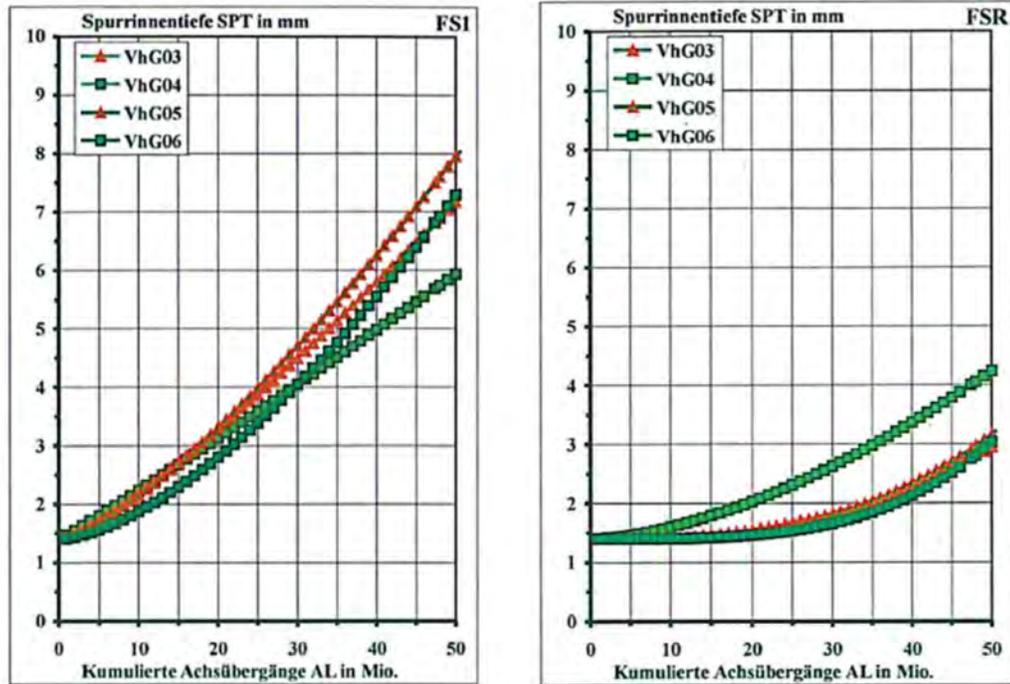


Abbildung 14: Beispiel Degradationskurve (Verhaltensfunktion) Spurrinnentiefe für verhaltenshomogene Asphaltoberbaukonstruktionen nach [27] (FS1...rechter Fahrstreifen, FSR...restliche Fahrstreifen, VhG...verhaltenshomogene Gruppe)

Österreich

Deterministische Verhaltensfunktionen zur Modellierung der Zustandsgrößen nach Molzer et al. [35]: Diese im Jahr 2000 von der TU Wien entwickelten Modelle, die mit ZEB-Daten aus dem Jahr 2001 bzw. 2002 nochmals aktualisiert wurden, bilden nach wie vor die Basis für die Zustandsprognose in den österreichischen PMS-Anwendungen und sind im Handbuch Pavement Management in Österreich [79] im Detail beschrieben.

Die nachfolgende Abbildung 15 zeigt für das Zustandsmerkmal Risse (Zustandsgröße) die Degradationskurve als Funktion über die Zeit.

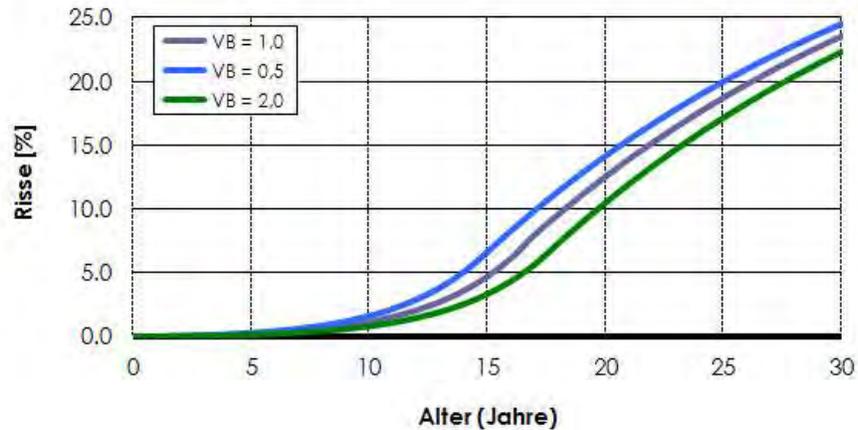


Abbildung 15: Beispiel Degradationskurve Risse Bautype Asphalt Neubau (AS_N) mit AC deck [76]

Schweiz

Deterministische Verhaltensfunktionen zur Modellierung der Zustandswerte (Indexwerte) nach Scazziga I. (2008) [58]: Diese 2008 entwickelten und auf die Indexwerte des Schweizer Zustandsbewertungssystems bezogenen Degradationskurven stellen derzeit die aktuelle Grundlage von Prognosemodellen dar und werden auch in einer Reihe von PMS-Anwendungen in der Schweiz praktisch eingesetzt. Die nachfolgende Abbildung 16 beinhaltet die Empfehlungen für die Nationalstraßen nach [58].

Parameter	Strasstyp	Bedingung	Modell	R ²
Index I _{A1}	National-	rechter FS	kein Modell	
Oberflächenglätte	strassen	linker FS	kein Modell	
Index I _{A2}	(Autobahnen,	rechter FS	$y = 1.3413 \cdot \text{Alter}^{0.2692}$	0.50
Belagschäden	HLS)	linker FS	$y = 1.2934 \cdot \text{Alter}^{0.3201}$	0.62
Index I _{A3}		rechter FS	kein Modell, siehe I ₃	
Belagverformungen		linker FS	kein Modell, siehe I ₃	
Index I _{A4}		rechter FS	kein Modell, siehe I ₂	
strukturelle Schäden		linker FS	kein Modell, siehe I ₂	
S _w -Wert		rechter FS	$y = 0.025 \cdot \text{Alter} + 1.5448$	0.52
(Index I ₂)		linker FS	$y = 0.0051 \cdot \text{Alter} + 1.7527$	0.06
Spurtiefe T _{max}		Kriechspur	$y = 4.9139 \cdot \text{Ln}(\text{Alter}) - 1.3569$	0.63
(Index I ₃)		rechter FS	$y = 3.09499 \cdot \text{Ln}(\text{Alter}) - 1.0249$	0.64
		linker FS	$y = 0.5394 \cdot \text{Ln}(\text{Alter}) + 3.0613$	0.29

Abbildung 16: Beispiel Empfehlung von Degradationskurven für die Indexwerte auf den Nationalstraßen in der Schweiz nach [58]

Wie bereits erwähnt, sind die hier aufgelisteten Modelle eine Empfehlung, können jedoch durch aktuellere Modelle bzw. erweiterte Modelle ersetzt werden, sofern es möglich ist, mit diesen Modellen den standardisierten Lebenszyklus zu kalibrieren bzw. den Startwert für den kalibrierten Lebenszyklus genau zu bestimmen.

5.2.2 Brücken

Obwohl im Bereich der Daten und Datengrundlagen für Brückenobjekte eine große Anzahl von Informationen zur Verfügung steht, wird in vielen BMS auf eine Prognose des Zustandes in Form von Degradationskurven verzichtet. Dies ist einerseits auf den Umstand zurückzuführen, dass eine Prognose der Zustandsnoten, aufgrund der mangelnden Aussagefähigkeit, von den Brückenexperten teilweise abgelehnt wird, andererseits aber auch die Ergebnisse solcher Prognosen oft im Widerspruch zur ingenieurmäßigen Einschätzung der notwendigen Erhaltungsaktivitäten stehen. Da im Rahmen von TAniA nicht der Anspruch erhoben wird, eine genaue Aussage über den Erhaltungsbedarf zu tätigen, sondern die Degradationskurven zur Kalibrierung und Anpassung von Standardlebenszyklen herangezogen werden, ist die Anforderung deutlich geringer. Trotzdem muss das Modell zumindest eine gewisse Aussagekraft zeigen, sodass die Entwicklung des Technischen Anlagenwertes im Lebenszyklus nicht zu sehr von den Erwartungen der Experten divergiert.

Wie in Kapitel 5.1.3 beschrieben, konnten anhand der Analysen der zur Verfügung gestellten Daten entsprechende Degradationskurven für die unterschiedlichen Anlagenteile von Brücken entwickelt werden (Beispiel siehe Abbildung 17). Dementsprechend stehen diese Grundlagen für eine praktische Anwendung zur Verfügung [79].

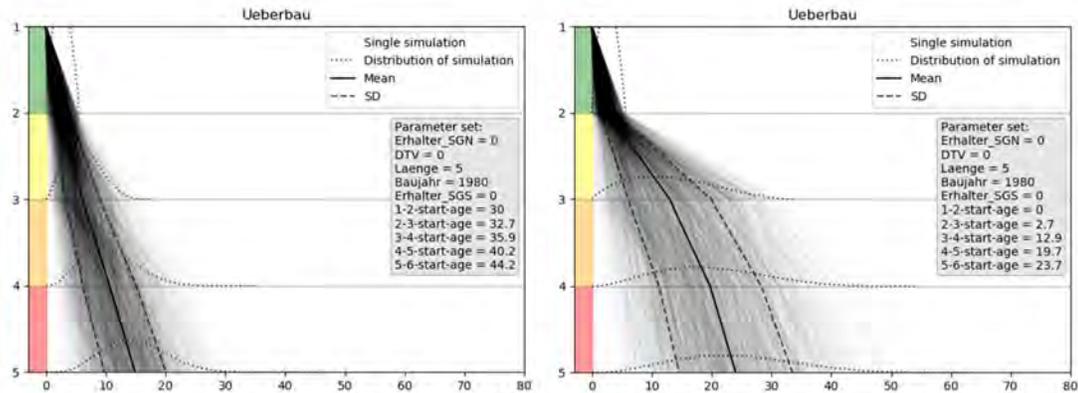


Abbildung 17: Zwei Beispiele möglicher Degradationskurven von Überbauten [76]

Eine weitere wesentliche Quelle sind die aktuellen Ergebnisse aus den statistischen Auswertungen der ASFINAG. Unter Heranziehung der mehrjährigen erhobenen Daten und Informationen sowie den Erfahrungen bei der Anwendung einer bauteilbezogenen Zustandsprognose wurde ein stochastischer Ansatz gewählt, der in Abhängigkeit von jedem einzelnen Bauteil eine Markov-Kette definiert. Eine Unterscheidung in Abhängigkeit von Bauweise und Material wurde aus Gründen der fehlenden Verfügbarkeit an vollständigen Detaildaten bzgl. Material und Bauweise der einzelnen Bauteile nicht vorgenommen. Die nachfolgenden Tabellen zeigen die im österreichischen BMS der ASFINAG (dTIMS IMT-Brücken) verankerten Übergangswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Bauteilen [83].

Tabelle 14: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Unterbau [83]

Bauteil 1: Unterbau						
		Zustandsnote (Ziel)				
		1	2	3	4	5
Zustandsnote (Quelle)	1	0.8429	0.1449	0.0119	0.0003	0
	2	0	0.9294	0.0681	0.0025	0
	3	0	0	0.9751	0.0246	0.0004
	4	0	0	0	0.9978	0.0022
	5	0	0	0	0	1

Tabelle 15: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Überbau [83]

Bauteil 2: Überbau						
		Zustandsnote (Ziel)				
		1	2	3	4	5
Zustandsnote (Quelle)	1	0,8725	0,1212	0,0060	0,0002	0
	2	0	0,9339	0,0633	0,0027	0,0001
	3	0	0	0,9722	0,0277	0,0002
	4	0	0	0	0,9957	0,0043
	5	0	0	0	0	1

Tabelle 16: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Lager [83]

Bauteil 3: Lager						
		Zustandsnote (Ziel)				
		1	2	3	4	5
Zustandsnote (Quelle)	1	0,8484	0,1359	0,0129	0,0027	0
	2	0	0,9373	0,0557	0,0068	0,0002
	3	0	0	0,9588	0,0410	0,0002
	4	0	0	0	0,9957	0,0043
	5	0	0	0	0	1

Tabelle 17: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil FÜK [83]

Bauteil 4: FÜK (FÜG)						
		Zustandsnote (Ziel)				
		1	2	3	4	5
Zustandsnote (Quelle)	1	0,7713	0,1739	0,0394	0,0151	0,0004
	2	0	0,8753	0,1060	0,0184	0,0004
	3	0	0	0,9397	0,0590	0,0013
	4	0	0	0	0,9921	0,0079
	5	0	0	0	0	1,0000

Tabelle 18: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Deckschicht (Belag) [83]

Bauteil 5: Deckschicht (Belag)						
		Zustandsnote (Ziel)				
		1	2	3	4	5
Zustandsnote (Quelle)	1	0,7951	0,1803	0,0229	0,0017	0
	2	0	0,9101	0,0817	0,0080	0,0002
	3	0	0	0,9646	0,0348	0,0006
	4	0	0	0	0,9970	0,0030
	5	0	0	0	0	1

Tabelle 19: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Entwässerung [83]

Bauteil 6: Entwässerung						
		Zustandsnote (Ziel)				
		1	2	3	4	5
Zustandsnote (Quelle)	1	0,8463	0,1256	0,0261	0,0020	0,0001
	2	0	0,9024	0,0910	0,0065	0,0001
	3	0	0	0,9604	0,0394	0,0001
	4	0	0	0	0,9967	0,0033
	5	0	0	0	0	1

Tabelle 20: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Randbalken [83]

Bauteil 7: Randbalken						
		Zustandsnote (Ziel)				
		1	2	3	4	5
Zustandsnote (Quelle)	1	0,8229	0,1617	0,0136	0,0018	0
	2	0	0,9147	0,0792	0,0058	0,0003
	3	0	0	0,9542	0,0449	0,0009
	4	0	0	0	0,9897	0,0103
	5	0	0	0	0	1

Tabelle 21: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Ausrüstung [83]

Bauteil 8: Ausrüstung						
		Zustandsnote (Ziel)				
		1	2	3	4	5
Zustandsnote (Quelle)	1	0,839046756	0,144586021	0,014981074	0,001332836	5,33134E-05
	2	0	0,930974734	0,06291349	0,006080272	3,1504E-05
	3	0	0	0,968187423	0,031565968	0,000246609
	4	0	0	0	0,994755245	0,005244755
	5	0	0	0	0	1

Für die Entwicklung bzw. Modellierung der Gesamtnote wurde ebenfalls eine Matrix in das BMS der ASFINAG implementiert, die in Tabelle 22 dargestellt ist.

Tabelle 22: Übergangswahrscheinlichkeiten Gesamtnote [83]

Gesamtnote						
		Zustandsnote (Ziel)				
		1	2	3	4	5
Zustandsnote (Quelle)	1	0,862625324	0,122169843	0,014275281	0,000929553	0
	2	0	0,934040098	0,063325859	0,002634042	0
	3	0	0	0,971562104	0,028239861	0,000198035
	4	0	0	0	0,99643738	0,00356262
	5	0	0	0	0	1

5.2.3 Tunnel

Die Literatur liefert derzeit nur sehr wenige Anhaltspunkte für Degradationskurven für baulich-konstruktive Anlagenteile von Tunnel und für die E&M-Ausrüstung. In den meisten Fällen erfolgt die Degradation über geschätzte Lebensdauern der Anlagenteile, die auch eine Aussage über zukünftige Erhaltungsaktivitäten zulassen. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen des österreichischen VIF 2017-Forschungsprojekts OPTimAL [37], in welchem auch Schweizer Partner tätig waren, eine umfassende Grundlage für die Lebenszyklusbewertung und die Risikoanalyse aus der Sicht der Erhaltung erstellt. Gemeinsam mit dem FFG-Projekt AMBITION [3] stehen hier aktuelle Ergebnisse zur Verfügung, die einerseits den Anforderungen für die Anwendung von Degradationskurven

in TAniA entsprechen und andererseits den Stand der Technik auf diesem Gebiet darstellen. Aus diesem Grund erfolgt eine Empfehlung für diese Modelle. In den nachfolgenden Kapiteln werden diese Modelle im Überblick beschrieben. Die Details können dem Endbericht von OPTimAL [37] entnommen werden.

Im Forschungsprojekt OPTimAL [37] wurde zur Erstellung der Kurven ein ähnlicher Ansatz verfolgt. Auch hier wurde der Datensatz mit RFA geclustert. Dabei standen Zustandsnoten des Zeitraumes zwischen 1991 und 2017 von 215 Tunnel der Baujahre zwischen 1965 und 2017 als Datenbasis zur Verfügung. Jedoch mit dem Unterschied, dass aufgrund des im Vergleich zu den Brücken sehr kleinen Datensatzes die Übergangsdauern um einen Notengrad mithilfe eines Kurvenfits bestimmt wurden. Der zweite Unterschied besteht darin, dass die Erstellung der Degradationsmodelle im Projekt OPTimAL [37] mit zeitinhomogenen Markov-Ketten erfolgte, was allerdings nur zu minimalen Unterschieden im Endergebnis führte.

Auch hier gab es das Problem, dass für den Übergang von Zustandsnote 4 auf 5 keine Daten zur Verfügung standen. Hier wurden die Ergebnisse der zeitinhomogenen Markov-Kette, um genau zu sein der Mittelwert und die positive sowie negative Standardabweichung, als Datenbasis für Kurvenanpassungen mit der Degradationsfunktion nach CEN CWA 16633 [15] verwendet. Diese angepasste Kurve wurde dann zur Extrapolation bis zur Zustandsnote 5 verwendet (siehe Abbildung 18). Die Gleichung nach CEN CWA 16633 [15] ist folgende:

$$C(t) = C_i + b \cdot t^c \quad \text{Gl. 4}$$

mit

$C(t)$ Zustandsnote zum Alter t

C_i Anfangszustand

b Parameter der Neigung der Verschlechterung

c Parameter der Beschleunigung (Exponent) der Verschlechterung

t Alter

Die Vorgehensweise der Anpassung der CEN CWA-Kurve an das Ergebnis der zeitinhomogenen Markov-Kette ist beispielhaft in Abbildung 18 dargestellt. Die angepassten Parameter der Kurve sind als Ergebnis der Auswertungen im Endbericht des Projektes OPTimAL [37] beschrieben und stehen somit zur Verfügung.

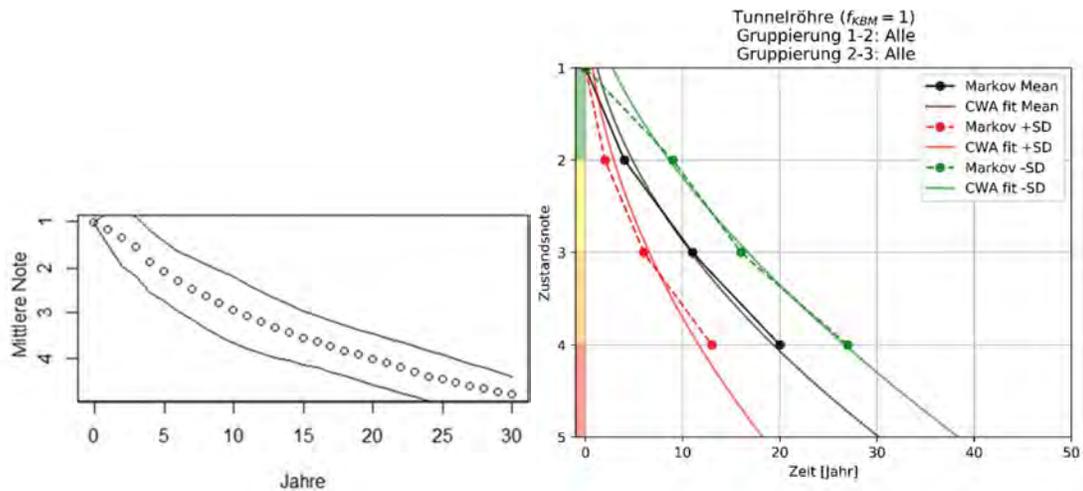


Abbildung 18: Beispiel einer Modellrechnung mit zeitinhomogener Markov-Kette für den Zustandsverlauf der Gesamtnote von Tunneln (links) und die daraus abgeleitete (angepasste) CEN CWA 16633 Kurve (rechts) [76]

Neben den baulich-konstruktiven Anlagenteilen bestand ein Schwerpunkt von OPTimal [37] auch in der Entwicklung von Degradationskurven der elektro-maschinellen Anlagenteile (dort als Gewerke bezeichnet). Die Degradationskurven der elektro-maschinellen Anlagenteile von Tunneln wurden mit derselben Herangehensweise erstellt, wie jene der baulichen Anlagen von Tunneln. Wobei hier aufgrund der Datenstruktur keine Clustering mit RFA vorgenommen wurde. Es gibt also für jedes der Gewerke lediglich eine Degradationskurve in Form eines Mittelwertes und der positiven wie auch negativen Standardabweichung.

Der Datensatz der elektro-maschinellen Gewerke umfasste 239 Bauwerke. Bewertungen fanden hier zwischen 2010 und 2019 statt, wobei für die meisten der gem. RVS definierten 42 Gewerke (siehe hierzu [37]), sofern vorhanden, eine Zeitreihe von etwa acht Jahren mit Messintervallen von zwei oder vier Jahren zur Verfügung stand. Es gab für viele Übergänge keine Daten, daher wurde eine Sprungwahrscheinlichkeit unabhängig von der aktuellen Zustandsnote ausgewertet. In diesem Ansatz wird also eine Degradationsgerade rein aus der Wahrscheinlichkeit einer Verschlechterung um einen Zustandsnotengrad berechnet.

Ergebnisse dieser Analyse sind nun lineare Degradationsgeraden (Beispiel siehe Abbildung 19). Ein großer Nachteil dieser Methode ist, neben der sehr kleinen Datenbasis, dass die Streuung rein eine Funktion der Sprungwahrscheinlichkeit ist. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse sowie eines Vergleichs mit den ingenieurmäßig bewerteten Lebensdauern der 42 Gewerke, liefert OPTimal [37] dennoch einen Vorschlag

für Degradationskurven in einem sehr hohen Detaillierungsgrad. Auch hier sind alle Ergebnisse in Form von CEN CWA-Kurven verfügbar und können dem Endbericht des Projektes OPTimAL [37] entnommen werden.

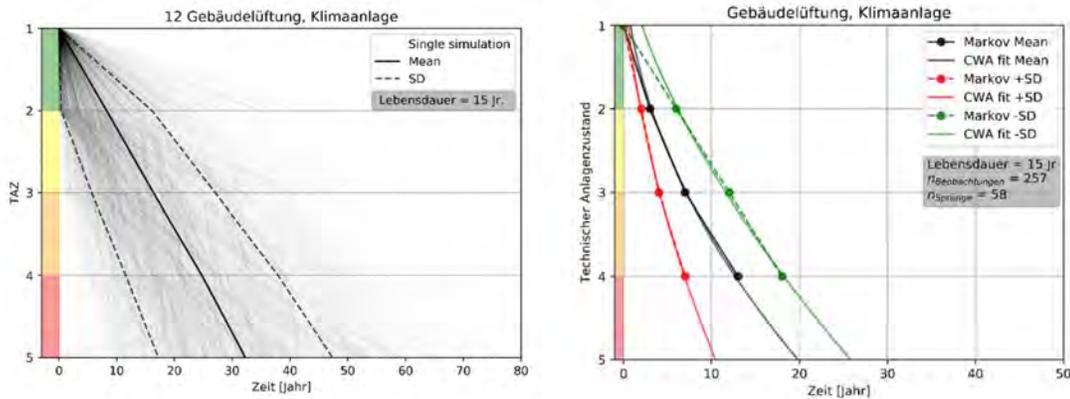


Abbildung 19: Beispiel einer Degradationskurve für E&M mit vereinfachter Methode (links) und mit zeitinhomogener Markov-Kette (rechts) nach [37].

5.3 Auswahl von Lebenszyklen

Den Lebenszyklus einer Anlage oder eines Anlagenteils können unterschiedliche Degradationskurven und unterschiedliche Abfolgen von Erhaltungsmaßnahmen definieren. Dies führt auch zu unterschiedlichen Lösungen bei der Berechnung des Technischen Anlagenwertes. Welcher Lebenszyklus bzw. welche Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen für die Berechnung des Technischen Anlagenwertes herangezogen wird, ist von den zur Verfügung stehenden Grundlagen bzw. von der Verfügbarkeit von Lebenszyklusbewertungen im Rahmen der praktischen Anwendung von Erhaltungsmanagementsystemen (PMS, BMS, TMS) abhängig. Unter Bezugnahme auf die durchgeführten Untersuchungen können folgende maßgebende Varianten unterschieden werden [76]:

- **Variante A:** Der Lebenszyklus und die damit verbundenen Erhaltungsmaßnahmen werden aus dem Erhaltungsmanagementsystem (PMS, BMS, TMS) direkt geliefert und stellen somit die Eingangsgröße für die Berechnung des Technischen Anlagenwertes dar. Welche Art von Erhaltungsmaßnahme zu welchem Zeitpunkt für welchen Anlagenteil vorgeschlagen wird, ist das Ergebnis dieser „externen“ Analysen und Betrachtungen und kann auch für unterschiedliche Szenarien unterschiedliche Lösungen aufweisen.

- **Variante B:** Auf der Grundlage eines ausgewählten Standardlebenszyklus wird der Technische Anlagenwert unter Heranziehung von anwendbaren Degradationskurven (Zustandsprognosemodell) über die Veränderung der Erhaltungsintervalle kalibriert. Der aktuelle Zustand liefert den Zeitpunkt der nächsten Erhaltungsmaßnahmen. Ein vordefinierter Maßnahmenkatalog bestimmt die Abfolge der Erhaltungsmaßnahmen. Eine Untersuchung unterschiedlicher Abfolgen von Erhaltungsmaßnahmen mit unterschiedlichen Intensitäten wird dabei ausgeschlossen.
- **Variante C:** Ein ausgewählter Standardlebenszyklus wird für die Ermittlung des Technischen Anlagenwertes direkt herangezogen. Lediglich der aktuelle Zustand liefert den Zeitpunkt der nächsten Erhaltungsmaßnahmen. Die Abfolge und Intensität der Erhaltungsmaßnahmen erfolgt nach den Vorgaben des Standardlebenszyklus und den darin verankerten Erhaltungsmaßnahmen. Die Variante C entspricht der Variante B ohne Kalibrierung durch anwendbare Zustandsprognosemodelle.

Es sei an dieser Stelle explizit erwähnt, dass die Aufgabe von TAniA nicht darin bestand, einen Algorithmus zu entwickeln, der für eine Anlage bzw. einen Anlagenteil verschiedene Erhaltungsmaßnahmenstrategien definiert, sondern entweder auf einen vorhandenen Lebenszyklus zurückgreift oder einen (angepassten) Standardlebenszyklus für die Berechnung verwendet. Was unter einem standardisierten Lebenszyklus im Rahmen von TAniA zu verstehen ist, kann dem nachfolgenden Kapitel 5.4 entnommen werden.

5.4 Standardisierte Lebenszyklen

5.4.1 Definition standardisierter Lebenszyklus

Eine wesentliche Zielsetzung des Projektes TAniA besteht in der Abschätzung der wahrscheinlichsten Entwicklung des Technischen Anlagenwertes unter Heranziehung von standardisierten, an die Einzelobjekte angepassten Lebenszyklen, wobei die Auswahl der standardisierten Lebenszyklen dem jeweiligen Anwender (Land, Verwaltung etc.) obliegt. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, den Begriff „standardisierter Lebenszyklus“ für die oben beschriebenen Varianten B und C genau zu definieren (siehe Kapitel 5.3), sodass hier auch die Vorgaben für die Entwicklung bzw. Erweiterung bestehender Lebenszyklen

möglich sind. Eine wesentliche Aufgabenstellung des Forschungsprojektes TAniA besteht auch in der Erarbeitung von Vorschlägen für standardisierte Lebenszyklen.

Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit wird hier nochmals auf die Abbildung 6 im Kapitel 4.1.2 verwiesen [75].

Wie dort erläutert, wird für die praktische Anwendung der Indikatoren im Rahmen von TAniA der monetäre Technische Anlagenwert für jede Anlage in einer Skala von 0 bis 100 normiert, sodass hier direkte Vergleiche zwischen einzelnen Anlagen sowie Zusammenführungen auf Netzebene möglich sind. Ein Wert von 100 entspricht einer Anlage mit dem höchsten Technischen Anlagenwert.

Ein **Standardisierter Lebenszyklus** im Rahmen des TAniA-Projektes ist eine vordefinierte Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen (= Erhaltungsmaßnahmenstrategie) in Abhängigkeit von bestimmten Eigenschaften einer zu bewerteten Anlage auf der Grundlage des Zustandes, ausgedrückt über die maßgebenden Anlagenteile der Konstruktion und der Ausrüstung. Damit ist es möglich, sowohl den Konstruktionsindikator als auch den Ausrüstungsindikator in nachfolgenden Prozessschritten zu berechnen. Die nachfolgende Abbildung 20 zeigt den auf den Zustand der Konstruktion und der Ausrüstung bezogenen Lebenszyklus in Form einer schematischen Darstellung mit den wesentlichen Begriffsbestimmungen [76].

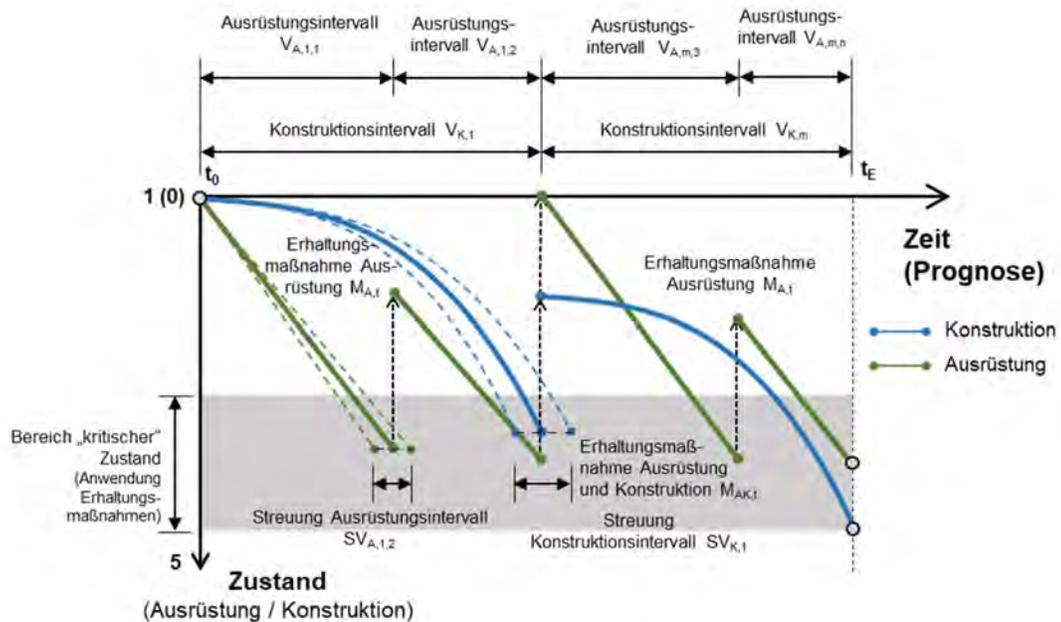


Abbildung 20: Definition standardisierter Lebenszyklus [76]

Unter Bezugnahme auf Abbildung 20, ergeben sich die nachfolgend beschriebenen Kenngrößen des standardisierten Lebenszyklus:

$V_{K,n}$ Konstruktionsintervall zur Beschreibung der Dauer (Jahre) zwischen zwei Erhaltungsmaßnahmen, die aufgrund des Zustandes bzw. der Zustandsentwicklung der maßgebenden konstruktiven Anlagenteile entstehen

$V_{A,n,m}$ Ausrüstungsintervall zur Beschreibung der Dauer zwischen zwei Erhaltungsmaßnahmen, die aufgrund des Zustandes bzw. der Zustandsentwicklung der maßgebenden Anlagenteile der Ausrüstung oder der Konstruktion entstehen

$SV_{K,m}$ Streuung des Konstruktionsintervall

$SV_{A,m,n}$ Streuung des Ausrüstungsintervalls

Wie bereits erwähnt, sollten die Abhängigkeiten zwischen den Anlagenteilen auch bei den zu verwendenden Erhaltungsmaßnahmenstrategien in einem standardisierten Lebenszyklus Berücksichtigung finden, sodass bei der Wahl der Maßnahmen keine grundsätzlichen bautechnischen Widersprüche entstehen. Von wesentlicher Bedeutung ist in diesem Zusammenhang das Konstruktionsintervall $V_{K,n}$ und das Ausrüstungsintervall

$V_{A,n,m}$ und deren Abhängigkeit zueinander. Um diese Abhängigkeit zu beschreiben, sollte daher folgende mathematische Beziehung bei der Festlegung der Erhaltungsintervalle eines Standardlebenszyklus angewendet werden [76]:

$$V_{K,n} = \sum_m V_{A,n,m} \quad \text{Gl.5}$$

mit

$V_{K,n}$ Konstruktionsintervall n [Jahre]

$V_{A,n,m}$ Ausrüstungsintervall m im Konstruktionsintervall n [Jahre]

Die Länge des jeweiligen Erhaltungsintervalls wird durch eine maßgebende Eigenschaft der Anlage und/oder durch ein maßgebendes Anlagenteil bestimmt, sodass gerade bei der Kalibrierung der standardisierten Lebenszyklen diesem Umstand spezielle Rechnung getragen werden muss.

Die Abfolge der Erhaltungsmaßnahmen wird als Erhaltungsmaßnahmenstrategie definiert und zeigt in Abhängigkeit von der Intensität und vom Umfang der Maßnahmen entsprechend hohe oder niedrige Auswirkungen direkt auf den Zustand und den anschließenden Zustandsverlauf über den betrachteten Zeitraum. Umfang und Intensität der Erhaltungsmaßnahmen, innerhalb des betrachteten Lebenszyklusabschnitts, sind dabei wiederum eine Funktion der Zustände der Anlagenteile (ausgedrückt über Bauteilnote bzw. Bauteilgruppennote), wobei nicht jede Erhaltungsmaßnahme zwangsweise zu einer Maßnahme bei jedem Anlagenteil führen muss (erst beim Erreichen eines gewissen Grenzzustandes), sofern nicht entsprechende Abhängigkeiten gegeben sind.

Wie die Definition des standardisierten Lebenszyklus zeigt, ist die Anzahl der Intervalle im Bereich der Konstruktion und im Bereich der Ausrüstung wesentlich von der Art der Anlage und den Eigenschaften der Anlage abhängig. Ein standardisierter Lebenszyklus im Straßenoberbau für eine Betondecke zeigt deutliche Unterschiede zu einem standardisierten Lebenszyklus eines Asphaltoberbaus mit einer Deckschicht aus Drainasphalt (PA). Aus diesem Grund müssen und werden auch in den Kapiteln 5.4.3, 5.4.4 und 5.4.5 Vorschläge für standardisierte Lebenszyklen gemacht. Diese können, je nach Bedarf und Notwendigkeit erweitert, verändert oder ergänzt werden.

5.4.2 Grundlagen für die Auswahl von standardisierten Lebenszyklen

Um eine praktische Anwendung des zuvor beschriebenen Prozesses (Variante B und C) zu ermöglichen, muss auf standardisierte Lebenszyklen zurückgegriffen werden, welche die Erhaltungsmaßnahmenstrategien über eine längere Periode im Lebenszyklus definieren. Es obliegt dem Anwender, welcher Standardlebenszyklus zur Anwendung gelangt und wie stark die unterschiedlichen Standardlebenszyklen variieren können. Aktuelle Untersuchungen im Bereich der ASFINAG [82] definieren z. B. für den Straßenoberbau drei maßgebende Standardlebenszyklen, die auch im österreichischen PMS eingesetzt werden und als Zielgröße für eine generelle Erhaltungsstrategie sowie als Vergleich für die Erhaltungsmaßnahmen im Bauprogramm herangezogen werden. Auch im Bereich der Brücken setzt die ASFINAG entsprechende Standardlebenszyklen ein, die ebenfalls eine wesentliche Grundlage für das BMS darstellen [76].

Im Prozessschritt der Kalibrierung eines Standardlebenszyklus muss auf entsprechende Degradationskurven zurückgegriffen werden, die das Konstruktionsintervall und/oder das Ausrüstungsintervall, in Abhängigkeit von den objektbezogenen Eigenschaften, verändern. Da auch von dem Umstand ausgegangen werden muss, dass geeignete Degradationskurven für diesen Kalibrierschritt nicht zur Verfügung stehen, werden den Standardlebenszyklen auch entsprechende Funktionen für die Modellierung des Zustandsverlaufes aus der Sicht der Konstruktion und der Ausrüstung zugeordnet.

Die nachfolgend dargestellten Standardlebenszyklen sind Vorschläge auf der Grundlage der Diskussionen im Rahmen des gegenständlichen Projektes, die ergänzt, erweitert und abgeändert werden können. Auch die Zuordnung dieser Vorgaben zu bestimmten objektspezifischen Eigenschaften stellt einen Vorschlag dar, der auch noch präzisiert und erweitert werden kann. Aus diesen Gründen wird kein Anspruch auf Vollständigkeit gegeben.

Die nachfolgenden Standardlebenszyklen enthalten folgende Informationen, die für eine Anwendung der im Kapitel 5.5.1 beschriebenen Prozessschritte notwendig sind [76]:

- Auswahlparameter
- Standardisierter Lebenszyklus, unter Heranziehung einer Zustandsbewertung von 1 bis 5 bzw. 0 bis 5 (für CH)
- Erhaltungsintervalle für Konstruktion und Ausrüstung inkl. Angaben zur Streuung

- Standardprognosemodelle (bezogen auf Zustandswerte für eine Skala von 1 bis 5 bzw. 0 bis 5)
- Informationen zu Erhaltungsmaßnahmen

Die Darstellungen der Zustandsverläufe in den Diagrammen wurden grundsätzlich so gewählt, dass ein kontinuierlicher Verlauf (Zustandsverschlechterung) erkennbar ist und über einen Zustandswert (reelle Zahl) modelliert werden kann. In diesem Zusammenhang wurde explizit auf eine stufenweise Darstellung verzichtet, welche die Sprünge zwischen den Zustandsklassen abbildet, da diese vor allem beim Straßenoberbau nicht zur Anwendung gelangt. Die Verläufe repräsentieren somit die Degradationskurven (Verhaltensfunktionen) und ermöglichen auch Zwischenwerte bzw. Rücksetzwerte auf bestimmte Klassengrenzen (z. B. Zustandswert 1,5 als Grenze zwischen Zustandsnote 1 und 2 in Deutschland und Österreich).

Die Standardlebenszyklen zeigen auch, dass beim Erreichen des Zustandswertes 4 die Erhaltungsmaßnahmen „angesetzt“ werden. Auch hierbei handelt es sich um eine pragmatische Festlegung, die ggf. individuell angepasst oder abgeändert werden kann.

Es sei hier nochmals explizit erwähnt, dass die Erhaltungsmaßnahmen in den Standardlebenszyklen zu einer nachhaltigen Verbesserung führen, die auch zum Ziel haben, die geschätzte Dauer der nachfolgenden Erhaltungsintervalle zu erreichen. Eine Untersuchung von anderen Erhaltungsmaßnahmen mit anderen Wirkungen und mit Zeitpunkten, die früher oder später im Vergleich zu den Standardlebenszyklen stattfinden, kann ebenfalls vorgenommen werden. Dabei handelt es sich jedoch nicht um die Anwendung von Standardlebenszyklen. Der Algorithmus für die Entscheidung der nächsten Erhaltungsmaßnahme im Standardlebenszyklus ist im Kapitel 5.5 im Detail beschrieben [76].

5.4.3 Vorschlag Standardlebenszyklen Straßenoberbau

Die nachfolgenden Vorschläge sowie die darin präsentierten Werte basieren primär auf den Ergebnissen von PMS-Anwendungen und Erfahrungswerten in Deutschland, Österreich und der Schweiz, unter Heranziehung von Lebenszyklusbetrachtungen (siehe z. B. [45], [79], und [82]). Unter Berücksichtigung dieser Grundlagen, wurden insgesamt fünf Vorschläge ausgearbeitet, die unterschiedliche Anwendungsbereiche aufweisen und in der

nachfolgenden Tabelle 23 definiert sind. Eine Präzisierung durch entsprechende Werte kann individuell für jede Verwaltung im Rahmen der Validierung bzw. Anpassung der Standardlebenszyklen vorgenommen werden. Dies bedeutet, dass eine Kontrolle und ggf. Anpassung der einzelnen Werte als ein notwendiger Schritt im Rahmen einer praktischen Implementierung definiert werden muss [76].

Tabelle 23: Auswahlvorschläge Standardlebenszyklus Straßenoberbau [76]

Kriterium	Gruppe und Gesamtnutzungsdauer				
	Asphalt, konventionelle Deckschicht	Asphalt, kurze Lebensdauer Deckschicht	Asphalt, lange Lebensdauer Deckschicht	Beton	Beton mit Asphalt- deckschicht
	44 Jahre	36 Jahre	38 Jahre	44 Jahre	36 Jahre
Bauweise	Flexibel und halbstarr	Flexibel und halbstarr	Flexibel und halbstarr	Starr	Starr
Art Deckschicht	AC deck, SMA	PA, BBTM	MA	Beton	AC deck, SMA

In den nachfolgenden Tabellen sind diese Standardlebenszyklen im Detail dargestellt.

Tabelle 24: Standardlebenszyklus Asphaltoberbau mit konventioneller Deckschicht [76]

Straßenoberbau – Asphaltoberbau mit konventioneller Deckschicht				
Auswahlparameter (siehe Tabelle 23)		Bauweise: Asphaltoberbau oder halbstarrer Oberbau (Zementstabilisierung) Deckschichtmaterial: AC deck, SMA		
Standardisierter Lebenszyklus (Zustandsbewertung 1 bis 5 bzw. 0 bis 5)				
Intervalle	V _A	16 Jahre	12 Jahre	16 Jahre
	S _{V_A}	±3 Jahre		
	V _K	28 Jahre		16 Jahre
	S _{V_K}	±5 Jahre		
Prognosemodell Z _A ¹⁾		Z _{A,t} =1,0+0,1875*t	Z _{A,t} =1,0+0,25*t	Z _{A,t} =1+0,1875*t
Prognosemodell Z _K ¹⁾		Z _{K,t} =1,0+0,00255*t ²		Z _{K,t} =1,0+0,0781*t ²
Erhaltungsmaßnahme		Deckschichtmaßnahme (Deck- und Binderschicht)	Verstärkungsmaßnahme (Deck-, Binderschicht und tlw. gebunden TS)	

¹⁾ Modell bezieht sich auf eine Bewertungsskala des Zustandes von 1 bis 5

Tabelle 25: Standardlebenszyklus Asphaltoberbau mit kurzer technischer Lebensdauer der Deckschicht [76]

Straßenoberbau – Asphaltoberbau mit kurzer technischer Lebensdauer der Deckschicht				
Auswahlparameter (siehe Tabelle 23)		Bauweise: Asphaltoberbau oder halbstarrer Oberbau (Zementstabilisierung) Deckschichtmaterial: PA, BBTM, etc.		
Standardisierter Lebenszyklus (Zustandsbewertung 1 bis 5 bzw. 0 bis 5)				
Intervalle	V _A	12 Jahre	12 Jahre	12 Jahre
	S _{V_A}	±2 Jahre		
	V _K	36 Jahre		
	S _{V_K}	±5 Jahre		
Prognosemodell Z _A ¹⁾		Z _{A,t} =1,0+0,25*t	Z _{A,t} =1,0+0,25*t	Z _{A,t} =1+0,25*t
Prognosemodell Z _K ¹⁾		Z _{K,t} =1,0+0,00231*t ²		
Erhaltungsmaßnahme		1. Deckschichtmaßnahme (Deckschicht)	2. Deckschichtmaßnahme (Deck-, Binderschicht)	

¹⁾ Modell bezieht sich auf eine Bewertungsskala des Zustandes von 1 bis 5

Tabelle 26: Standardlebenszyklus Asphaltoberbau mit langer technischer Lebensdauer der Deckschicht [76]

Straßenoberbau – Asphaltoberbau mit langer technischer Lebensdauer der Deckschicht			
Auswahlparameter (siehe Tabelle 23)		Bauweise: Asphaltoberbau oder halbstarrer Oberbau (Zementstabilisierung) Deckschichtmaterial: MA	
Standardisierter Lebenszyklus (Zustandsbewertung 1 bis 5 bzw. 0 bis 5)			
Intervalle	V _A	20 Jahre	18 Jahre
	SV _A	±3 Jahre	
	V _K	38 Jahre	
	SV _K	±5 Jahre	
Prognosemodell Z _A ¹⁾		Z _{A,t} =1,0+0,15*t	Z _{A,t} =1+0,1667*t
Prognosemodell Z _K ¹⁾		Z _{K,t} =1,0+0,00208*t ²	
Erhaltungsmaßnahme		Deckschichtmaßnahme (Deckschicht)	

¹⁾ Modell bezieht sich auf eine Bewertungsskala des Zustandes von 1 bis 5

Tabelle 27: Standardlebenszyklus Betonoberbau [76]

Straßenoberbau – Betonoberbau				
Auswahlparameter (siehe Tabelle 23)		Bauweise: Betonoberbau Deckschichtmaterial: Beton		
Standardisierter Lebenszyklus (Zustandsbewertung 1 bis 5 bzw. 0 bis 5)				
Intervalle	V_A	32 Jahre	12 Jahre	
	SV_A		±5 Jahre	±8 Jahre
	V_K	32 Jahre	12 Jahre	
	SV_K		±5 Jahre	±8 Jahre
Prognosemodell Z_A ¹⁾		$Z_{A,t}=1,0+0,00195*t^2$	$Z_{A,t}=1+0,0139*t^2$	
Prognosemodell Z_K ¹⁾		$Z_{K,t}=1,0+0,00195*t^2$	$Z_{K,t}=1+0,0139*t^2$	
Erhaltungsmaßnahme		(umfangreichere) Betonplattenauswechslungen		

¹⁾ Modell bezieht sich auf eine Bewertungsskala des Zustandes von 1 bis 5

Tabelle 28: Standardlebenszyklus Betonoberbau mit Asphaltdeckschicht [76]

Straßenoberbau – Betonoberbau mit Asphaltdeckschicht				
Auswahlparameter (siehe Tabelle 23)		Bauweise: Betonoberbau Deckschichtmaterial: AC deck, SMA, PA, BBTM, etc.		
Standardisierter Lebenszyklus (Zustandsbewertung 1 bis 5 bzw. 0 bis 5)				
Intervalle	V _A	12 Jahre	12 Jahre	12 Jahre
	S _{V_A}	±2 Jahre		±2 Jahre
	V _K	36 Jahre		
	S _{V_K}	±5 Jahre		
Prognosemodell Z _A ¹⁾		Z _{A,t} =1,0+0,25*t	Z _{A,t} =1,0+0,25*t	Z _{A,t} =1+0,25*t
Prognosemodell Z _K ¹⁾		Z _{K,t} =1,0+0,00231*t ²		
Erhaltungsmaßnahme		1. Deckschichtmaßnahme (Deckschicht)	2. Deckschichtmaßnahme (Deckschicht)	

¹⁾ Modell bezieht sich auf eine Bewertungsskala des Zustandes von 1 bis 5

5.4.4 Vorschlag Standardlebenszyklen Brücken

Die nachfolgenden Vorschläge basieren primär auf den Ergebnissen von BMS-Anwendungen in Österreich, unter Heranziehung von Lebenszyklusanalysen sowie auf der Grundlage der durchgeführten und im Kapitel 5.1.3 beschriebenen Ergebnisse der Modellierung mit zur Verfügung gestellten Daten.

Darüber hinaus wurden die Vorschläge intensiv mit Brückenexperten diskutiert und somit einer ingenieurmäßigen Bewertung unterzogen. Die Zuordnung der Brücken zu den drei Nutzungsdauern 60, 70 und 80 Jahre erfolgte auf Grundlage der statistischen Auswertung der Daten sowie der Erfahrungen der ASFINAG im Rahmen der BMS-Lebenszyklusanalyseimplementierung, wobei auch hier strategische Zielsetzungen für den Anlagentyp Brücke Eingang fanden. Um einen pragmatischen und anwendbaren Zugang zu ermöglichen, der auch einen mangelnden Datenbestand berücksichtigt, sollte die Auswahl des jeweiligen Standardlebenszyklus auf Grundlage einer einfachen Kategorisierung erfolgen, die der nachfolgenden Auswahltablette entnommen werden kann. Eine Präzisierung durch entsprechende Werte kann individuell für jede Verwaltung im Rahmen der Validierung bzw. Anpassung der Standardlebenszyklen im Detail vorgenommen werden [76].

Tabelle 29: Auswahlvorschläge Standardlebenszyklus Brücken [76]

Kriterium	Gesamtnutzungsdauer		
	60 Jahre	70 Jahre	80 Jahre
Schwerverkehr ¹⁾	hoch	mittel	gering
Bauweise Tragwerk (Überbau)	Stahl, Verbundbrücken	Stahlbeton, Spannbeton, Verbundbrücken	Stahlbeton, Spannbeton
Erhaltungsintervall Ausrüstung 1	<15 Jahre	15 bis 18 Jahre	> 18 Jahre
Anzahl Felder	mehr als 3	1 bis 3	1

1) Mögliche Kategorisierung in Abhängigkeit vom Mittelwert des Schwerverkehrs sowie der einfachen Standardabweichung

Die hier aufgelisteten Kriterien sind nur generelle Hinweise. Mit großer Wahrscheinlichkeit ergeben sich unterschiedliche Zuordnungen zu den aufgelisteten Kategorien der Gesamtnutzungsdauer, sodass vor allem die Schwerverkehrsbelastung sowie die Bauweise des Tragwerks (Überbau) die maßgebenden Entscheidungsgrößen definieren. Der sich daraus ergebende, geringere Wert sollte dann herangezogen werden. In den nachfolgenden Tabellen 29 bis 31 sind diese Standardlebenszyklen im Detail dargestellt.

Tabelle 30: Standardlebenszyklus Brücken 70 Jahre [76]

Brücken – Standardintervall Brücken mit Lebensdauer ca. 70 Jahre					
Auswahlparameter (siehe Tabelle 29)		Bauweise: Beton, Stahlbeton, Spannbeton; Tragwerke mit mehr als 1 Feld bis maximal 3 Felder			
Standardisierter Lebenszyklus (Zustandsbewertung 1 bis 5 bzw. 0 bis 5)					
Intervalle	V _{A1}	18 Jahre	17 Jahre	18 Jahre	15 Jahre
	SV _{A1}	±2 Jahre		±2 Jahre	
	V _{A2}	35 Jahre		33 Jahre	
	SV ₂	±4 Jahre		±4 Jahre	
	V _K	35 Jahre		33 Jahre	
	SV _K	±4 Jahre		±4 Jahre	
Prognosemodell Z _{A1} ¹⁾	$Z_{A,t}=1,0+0,00926*t^2$	$Z_{A,t}=1,0+0,00831*t^2$	$Z_{A,t}=1,0+0,00926*t^2$	$Z_{A,t}=1,0+0,0133*t^2$	
Prognosemodell Z _{A2} ¹⁾	$Z_{A,t}=1,0+0,0875*t$		$Z_{A,t}=1,0+0,0909*t$		
Prognosemodell Z _K ¹⁾	$Z_{K,t}=1,0+0,00245*t^2$		$Z_{K,t}=1,0+0,002296*t^2$		
Erhaltungsmaßnahme	1. Instandsetzung (Anlagenteile Ausrüstung 1)	2. Instandsetzung (alle Anlagenteile Konstruktiv und Ausrüstung 1+2)	3. Instandsetzung (Anlagenteile Ausrüstung 1)		

¹⁾ Modell bezieht sich auf eine Bewertungsskala des Zustandes von 1 bis 5

Ausrüstung 1: FÜK, sonst. Ausrüstung (Schnee-/Spritzschutz, Abwurfsicherung, Leitungen, VZ, etc.), Fahrbahnbelag, Korrosionsschutz

Ausrüstung 2: Randbalken, Abdichtung/Entwässerung, Lager, Geländer, FRS, Beleuchtungen

Konstruktion: Überbau, Unterbau

Tabelle 31: Standardlebenszyklus Brücken 80 Jahre [76]

Brücken – Standardintervall Brücken mit Lebensdauer ca. 80 Jahre					
Auswahlparameter (siehe Tabelle 29)		Bauweise: Beton, Stahlbeton, Spannbeton; Tragwerke mit 1 Feld Erhaltungsintervall Ausrüstung 1: Standardintervall ca. 19 Jahre			
Standardisierter Lebenszyklus (Zustandsbewertung 1 bis 5 bzw. 0 bis 5)					
Intervalle	VA1	19 Jahre	19 Jahre	19 Jahre	19 Jahre
	SVA1	±2 Jahre		±2 Jahre	
	VA2	35 Jahre		33 Jahre	
	SV2	±4 Jahre		±4 Jahre	
	VK	35 Jahre		33 Jahre	
	SVK	±4 Jahre		±4 Jahre	
Prognosemodell ZA1 ¹⁾		$Z_{A,t}=1,0+0,00831*t^2$	$Z_{A,t}=1,0+0,00831*t^2$	$Z_{A,t}=1,0+0,00831*t^2$	$Z_{A,t}=1,0+0,0831*t^2$
Prognosemodell ZA2 ¹⁾		$Z_{A,t}=1,0+0,07895*t$		$Z_{A,t}=1,0+0,07895*t$	
Prognosemodell ZK ¹⁾		$Z_{K,t}=1,0+0,002078*t^2$		$Z_{K,t}=1,0+0,001731*t^2$	
Erhaltungsmaßnahme		1. Instandsetzung (Anlagenteile Ausrüstung 1)	2. Instandsetzung (alle Anlagenteile Konstruktiv und Ausrüstung 1+2)	3. Instandsetzung (Anlagenteile Ausrüstung 1)	

¹⁾ Modell bezieht sich auf eine Bewertungsskala des Zustandes von 1 bis 5

Ausrüstung 1: FÜK, sonst. Ausrüstung (Schnee-/Spritzschutz, Abwurfsicherung, Leitungen, VZ, etc.), Fahrbahnbelag, Korrosionsschutz

Ausrüstung 2: Randbalken, Abdichtung/Entwässerung, Lager, Geländer, FRS, Beleuchtungen

Konstruktion: Überbau, Unterbau

Tabelle 32: Standardlebenszyklus Brücken 60 Jahre [76]

Brücken – Standardintervall Brücken mit Lebensdauer ca. 60 Jahre						
Auswahlparameter (siehe Tabelle 29)		Bauweise: Beton, Stahlbeton, Spannbeton, Stahl, Verbund; Brücken mit hoher Verkehrsbelastung Erhaltungsintervall Ausrüstung 1: Standardintervall 15 Jahre				
Standardisierter Lebenszyklus (Zustandsbewertung 1 bis 5 bzw. 0 bis 5)						
Intervalle	V _{A1}	15 Jahre	15 Jahre	15 Jahre	15 Jahre	
	SV _{A1}	±2 Jahre		±2 Jahre		±2 Jahre
	V _{A2}	30 Jahre		30 Jahre		
	SV ₂	±3 Jahre			±3 Jahre	
	V _K	30 Jahre		30 Jahre		
	SV _K	±3 Jahre			±3 Jahre	
Prognosemodell Z _{A1} ¹⁾		Z _{A,t} =1,0+0,01333*t ²	Z _{A,t} =1,0+0,01333*t ²	Z _{A,t} =1,0+0,01333*t ²	Z _{A,t} =1,0+0,01333*t ²	
Prognosemodell Z _{A2} ¹⁾		Z _{A,t} =1,0+0,1*t		Z _{A,t} =1,0+0,1*t		
Prognosemodell Z _K ¹⁾		Z _{K,t} =1,0+0,003333*t ²		Z _{K,t} =1,0+0,002778*t ²		
Erhaltungsmaßnahme		1. Instandsetzung (Anlagenteile Ausrüstung 1)	2. Instandsetzung (alle Anlagenteile Konstruktiv und Ausrüstung 1+2)	3. Instandsetzung (Anlagenteile Ausrüstung 1)		

¹⁾ Modell bezieht sich auf eine Bewertungsskala des Zustandes von 1 bis 5
Ausrüstung 1: FÜK, sonst. Ausrüstung (Schnee-/Spritzschutz, Abwurfsicherung, Leitungen, VZ, etc.), Fahrbahnbelag, Korrosionsschutz
Ausrüstung 2: Randbalken, Abdichtung/Entwässerung, Lager, Geländer, FRS, Beleuchtungen
Konstruktion: Überbau, Unterbau

5.4.5 Vorschlag Standardlebenszyklen Tunnel

Die nachfolgenden Vorschläge für die Standardlebenszyklen im Bereich der baulich-konstruktiven und elektro-maschinellen Anlagenteile basieren primär auf den Ergebnissen der VIF-Forschungsprojekte OPTimal [37] und AMBITION [3] und den daraus abgeleiteten Erkenntnissen für eine umfassende Lebenszyklusbewertung. Insgesamt konnten jedoch derzeit nur zwei Vorschläge ausgearbeitet werden, die folgende Anwendungsbereiche aufweisen und auf einem 10-jährigen Standarderhaltungsintervall und alternativ einem 7-jährigen Erhaltungsintervall aufbauen [76].

Tabelle 33: Auswahlvorschlag Standardlebenszyklus Tunnel [76]

Kriterium	Gesamtnutzungsdauer	
	Erhaltungsintervall 10 Jahre 80 Jahre	Erhaltungsintervall 7 Jahre 63 Jahre
Bauweise	Bergmännische Bauweise	Offene Bauweise, Unterflurtrassen
Verkehrsbelastung	Gering bis mittel	Hoch (Stadttunnel)

In den nachfolgenden Tabellen sind diese Standardlebenszyklen im Detail dargestellt. Dabei werden, entsprechend der Einteilung des Ausrüstungsindikators für den Bereich Tunnel E&M, (siehe Kapitel 4.2, Tabelle 10) die Funktionen für diesen Indikator zumindest in zwei Verläufe unterteilt (kurze Lebensdauer, lange Lebensdauer)

Tabelle 34: Standardlebenszyklus Tunnel in geschlossener Bauweise [76]

Tunnel – Tunnel in geschlossener Bauweise (keine Stadttunnel)										
Auswahlparameter		Bauweise: Bergmännische Bauweise, keine Stadttunnel Erhaltungsintervall Ausrüstung: Maximales Erhaltungsintervall								
Standardisierter Lebenszyklus (Zustandsbewertung 1 bis 5 bzw. 0 bis 5)										
Intervalle	V _{A1}	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre	
	S _{V_{A1}}	±2 Jahre	±2 Jahre	±2 Jahre	±2 Jahre	±2 Jahre	±2 Jahre	±2 Jahre	±2 Jahre	±2 Jahre
	V _{A2}	20 Jahre		20 Jahre		20 Jahre		20 Jahre		
	S _{V_{A2}}	±4 Jahre		±4 Jahre		±4 Jahre		±4 Jahre		
	V _K	20 Jahre		20 Jahre		20 Jahre		20 Jahre		
	S _{V_K}	±5 Jahre		±5 Jahre		±5 Jahre		±5 Jahre		±5 Jahre
Prognosemodell Z _{A1} ¹⁾		$Z_{A1,t}=1,0+0,3*t$								
Prognosemodell Z _{A2} ¹⁾		$Z_{A2,t}=1,0+0,15*t$								
Prognosemodell Z _K ¹⁾		$Z_{K,t}=1,0+0,0075*t^2$		$Z_{K,t}=2,0+0,005*t^2$		$Z_{K,t}=1,0+0,0075*t^2$		$Z_{K,t}=2,0+0,005*t^2$		
Erhaltungsmaßnahme Ausrüstung (Anteil betroffener Anlagenteile)		Instandsetzungsmaßnahmen (Austausch) E&M-Teile in Abhängigkeit vom Erhaltungsintervall 55% 80% 60% 100% 35% 90% 70%								
Erhaltungsmaßnahme Konstruktion (Anteil betroffener Anlagenteile)		Instandsetzungsmaßnahmen konstruktive Anlagenteile in Abhängigkeit vom Erhaltungsintervall 40% 70% 40%								

¹⁾ Modell bezieht sich auf eine Bewertungsskala des Zustandes von 1 bis 5

Tabelle 35: Standardlebenszyklus Tunnel in offener Bauweise, Unterflurtrassen und Stadttunnel [76]

Tunnel – Tunnel in offener Bauweise, Unterflurtrassen, Stadttunnel													
Auswahlparameter		Bauweise: Tunnel in offener Bauweise, Unterflurtrassen, Stadttunnel Erhaltungsintervall Ausrüstung: Minimales Erhaltungsintervall											
Standardisierter Lebenszyklus (Zustandsbewertung 1 bis 5 bzw. 0 bis 5)													
Intervalle	V _{A1}	7 Jahre	7 Jahre	7 Jahre	7 Jahre	7 Jahre	7 Jahre	7 Jahre	7 Jahre	7 Jahre			
	SV _{A1}	±2 Jahre		±2 Jahre		±2 Jahre		±2 Jahre		±2 Jahre			
	V _{A2}	14 Jahre			14 Jahre			14 Jahre					
	SV _{A2}	±3 Jahre				±3 Jahre			±3 Jahre				
	V _K	21 Jahre				21 Jahre			21 Jahre				
	SV _K	±5 Jahre					±5 Jahre						
Prognosemodell Z _{A1} ¹⁾		$Z_{A1,t}=1,0+0,4286*t$											
Prognosemodell Z _{A2} ¹⁾		$Z_{A2,t}=1,0+0,2143*t$											
Prognosemodell Z _K ¹⁾		$Z_{K,t}=1,0+0,0068*t^2$				$Z_{K,t}=2,0+0,00454*t^2$				$Z_{K,t}=1,0+0,0068*t^2$			
Erhaltungsmaßnahme Ausrüstung (Anteil betroffener Anlagenteile)		Instandsetzungsmaßnahmen (Austausch) E&M-Teile in Abhängigkeit vom Erhaltungsintervall 50% 80% 70% 60% 35% 90% 50% 80%											
Erhaltungsmaßnahme Konstruktion (Anteil betroffener Anlagenteile)		Instandsetzungsmaßnahmen konstruktive Anlagenteile in Abhängigkeit vom Erhaltungsintervall 40% 70%											

¹⁾ Modell bezieht sich auf eine Bewertungsskala des Zustandes von 1 bis 5

5.5 Dynamisierte Lebenszyklen

5.5.1 Begriff und Prozess der Dynamisierung

Die zuvor vorgestellten standardisierten Lebenszyklen können nur dann angewendet werden, wenn es möglich ist, jedem zu untersuchenden Objekt einen Lebenszyklus zuzuordnen. Unter Heranziehung der aktuellen Werte, muss zunächst der Anfangspunkt im Lebenszyklus durch eine horizontale Verschiebung des Objektes entlang der Zeitachse in das wahrscheinlichste Erhaltungsintervall durchgeführt werden. Darüber hinaus müssen die Erhaltungsintervalle angepasst werden, wenn geeignete Zustandsprognosemodelle zur Verfügung stehen. Diese Art der Kalibrierung kann unter dem Begriff „Dynamisierung“ zusammengefasst werden, da sie einerseits zu einer Streuung der Zustandsentwicklungen und andererseits zu einer Verteilung von Erhaltungsmaßnahmen über die Zeit führen. Die meisten PMS, BMS oder TMS, die mit Lebenszyklusbewertungen arbeiten, führen diesen Schritt für jedes zu untersuchende Objekt automatisiert durch, in Abhängigkeit von der gewählten Erhaltungsstrategie, die sich im individuellen, objektbezogenen Lebenszyklus widerspiegelt. Die nachfolgenden Kapitel 5.5ff beschreiben die Prozessschritte für die Durchführung einer solchen „Dynamisierung“ unter Heranziehung der zuvor beschriebenen standardisierten Lebenszyklen. Für die Variante A wurde dies bereit im PMS, BMS oder TMS durchgeführt [76].

5.5.2 Überblick Prozessschritte

Für die Auswahl und Zuordnung bzw. Kalibrierung von standardisierten Lebenszyklen zu einem bestimmten Objekt einer bestimmten Anlage sind mehrere Schritte notwendig, die im nachfolgenden Flussdiagramm im Überblick dargestellt sind. Die Zielsetzung liegt in einer pragmatischen Lösung, die jenen Zeitpunkt im Lebenszyklus ermittelt, welcher die Ausgangssituation für die zukünftige Entwicklung des Technischen Anlagenwertes darstellt, und die auch beim Nichtvorhandensein von speziellen Degradationskurven angewendet werden kann.

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Prozessschritte kann den nachfolgenden Kapiteln entnommen werden [76].

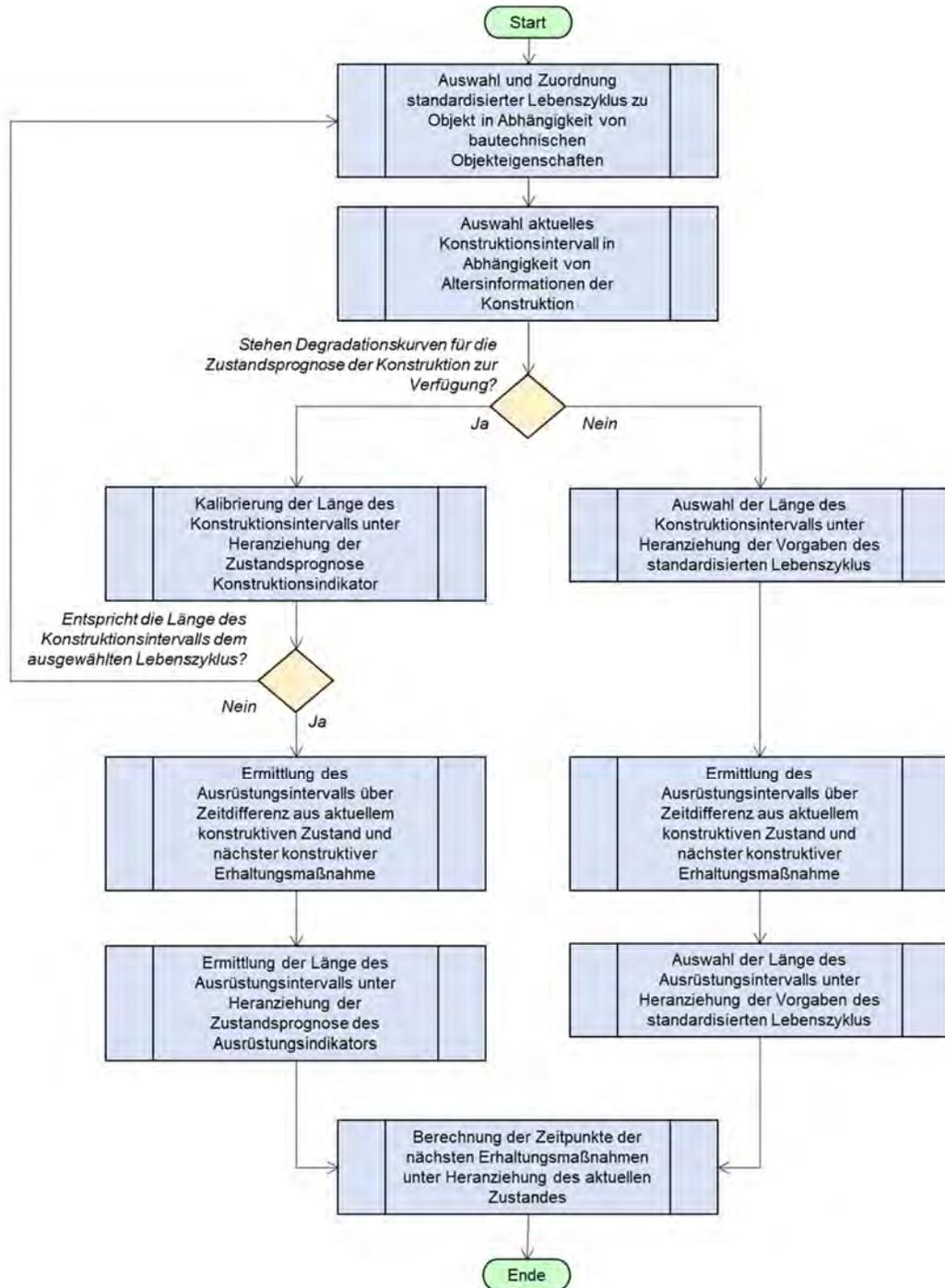


Abbildung 21: Prozessschritte für die Zuordnung eines Lebenszyklus zu einem Objekt (Variante B und C) [76]

5.5.3 Auswahl Standardlebenszyklus

Unter der Voraussetzung, dass für die zu untersuchenden Arten von Anlagen zumindest zwei standardisierte Lebenszyklen definiert wurden, erfolgt die Zuordnung unter Heranziehung folgender bautechnischer Objekteigenschaften [76]:

- Bauweise und erwartete Lebensdauer (in Abhängigkeit von der zu erwartenden Verkehrsbelastung) der maßgebenden Anlagenteile zur Beschreibung der Konstruktion
- Material und erwartete technische Lebensdauer der maßgebenden Anlagenteile zur Beschreibung der Ausrüstung
- Alter des Objektes bzw. der maßgebenden Anlagenteile zur Beschreibung der Konstruktion

Die nachfolgende Tabelle 36 gibt einen Überblick über die entsprechenden Daten und Objektinformationen, die für eine Auswahl des standardisierten Lebenszyklus zur Verfügung stehen sollten.

Tabelle 36: Daten und Objektinformationen für die Auswahl des Standardlebenszyklus [76]

Anlagenart	Daten und Objektinformationen
Straßenoberbau	Bauweise Art der Deckschicht Mittleres Alter gebundene Tragschicht
Brücken	Material des Überbaus Alter des Überbaus Mittleres Erhaltungsintervall der Ausrüstung
Tunnel – konstruktive Anlagenteile	Bauweise des Tunnels Alter des Tunnels
Tunnel – E&M-Anlagenteile	Umfang der E&M-Anlagenteile Mittleres Erhaltungsintervall E&M-Anlagenteile

Grundsätzlich ist es sinnvoll und zweckmäßig, die Zuordnung zu einem bestimmten standardisierten Lebenszyklus im Rahmen einer ingenieurmäßigen Bewertung vorzunehmen. Ist dies aufgrund der hohen Anzahl von Anlagen bzw. Daten manuell nicht möglich, können hier auch generelle Zuordnungen in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Errichtung bzw. in Abhängigkeit von regionalen Einschätzungen durchgeführt werden. Das

Ergebnis dieses Bewertungsschrittes ist die Zuordnung eines bestimmten standardisierten Lebenszyklus zu einem bestimmten Objekt [76].

5.5.4 Auswahl aktuelles Konstruktionsintervall

Der nächste Schritt im Rahmen dieses Prozesses besteht in der Auswahl des aktuellen Konstruktionsintervalls im zugeordneten Lebenszyklus. Auch hier ist es notwendig, auf bestimmte Objektinformation zuzugreifen, wie das Alter des Bauwerks bzw. der maßgebenden konstruktiven Anlagenteile. Die nachfolgende Tabelle 37 zeigt wiederum für die unterschiedlichen Anlagenarten die entsprechenden Parameter, die für eine solche Auswahl notwendig sind und verwendet werden sollten. Auch hier ist es möglich, eine entsprechende ingenieurmäßige Einschätzung zuzulassen [76].

Tabelle 37: Daten und Objektinformationen für die Auswahl des Konstruktionsintervalls [76]

Anlagenart	Daten und Objektinformationen
Straßenoberbau	Alter der gebundenen Tragschichten oder mittleres Alter der (aktiven) gebundenen Tragschichten bei mehrmals strukturell verstärkten Asphaltoberbaukonstruktionen Alter der Betondecke bei starren Oberbaukonstruktionen
Brücken	Alter des Überbaus
Tunnel	Alter des Tunnels (Tunnelröhre bzw. Tunnelwand)

Die nachfolgende Abbildung 22 zeigt die Auswahl des aktuellen Konstruktionsintervalls in schematischer Darstellung unter Heranziehung der maßgebenden Altersvariable, entsprechend den Vorschlägen in Tabelle 37.

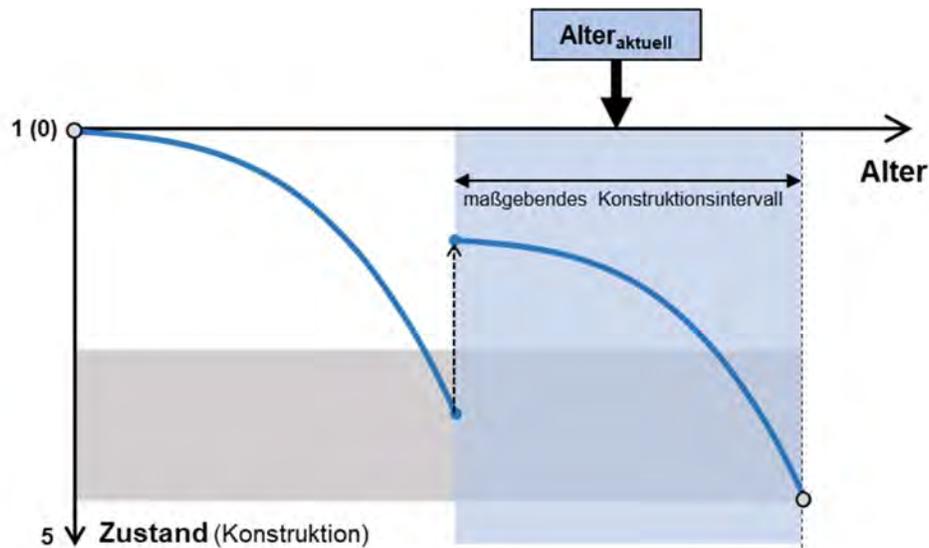


Abbildung 22: Auswahl aktuelles Konstruktionsintervall [76]

Liegt die Altersvariable außerhalb des ausgewählten Lebenszyklus, so ist das letzte Konstruktionsintervall für die weiteren Prozessschritte zu verwenden.

5.5.5 Kalibrierung Konstruktionsintervall

Eine Kalibrierung des aktuellen Konstruktionsintervalls kann nur dann vorgenommen werden, wenn eine Degradationskurve für das maßgebende konstruktive Anlagenteil oder einen, den die Konstruktion beschreibenden, Zustandsindikator (z. B. Substanzwert im Bereich des Straßenoberbaus) vorliegt. Die maßgebende Kenngröße ist in diesem Zusammenhang die aus der Degradationskurve zurückgerechnete Dauer zwischen einem ausgezeichneten strukturellen Zustand (oder einem angestrebten Zustand nach dem Durchführen einer konstruktiven Erhaltungsmaßnahme) und dem Erreichen eines Zustandes, bei welchem eine (konstruktive bzw. strukturelle) Erhaltungsmaßnahme notwendig wird. Die nachfolgende Gleichung definiert diesen Berechnungsprozess und gibt auch die entsprechenden Randbedingungen für die Dauer des zu kalibrierenden Konstruktionsintervalls an [76]:

$$V_{K,m} = \text{Alter}_{K,t=\text{krit}} - \text{Alter}_{K,t=0} \quad \text{Gl. 6}$$

$$[(V_{K,m,stand} - SV_{K,m,stand}) \leq V_{K,m} \leq (V_{K,m,stand} + SV_{K,m,stand})]$$

$$\text{Alter}_{K,t=krit} = f(Z_{K,krit})$$

$$\text{Alter}_{K,t=0} = f(Z_{K,0})$$

mit

$V_{K,m}$ Konstruktionsintervall

$V_{K,m,stand}$ Standardkonstruktionsintervall

$SV_{K,m,stand}$ Streuung Standardkonstruktionsintervall

$\text{Alter}_{K,t=krit}$ Alter maßgebendes konstruktives Anlagenteil zum kritischen Zeitpunkt t (= Zeitpunkt zum Durchführen einer konstruktiven Erhaltungsmaßnahme)

$\text{Alter}_{K,t=0}$ Alter maßgebendes konstruktives Anlagenteil zum Zeitpunkt 0 (= Zeitpunkt der Errichtung oder der letzten konstruktiven Erhaltungsmaßnahme)

$Z_{K,krit}$ Kritischer Zustand (Zustandsgröße Zustandswert, Zustandsnote) des maßgebenden KonstruktionsAnlagenteil

$Z_{K,0}$ Zustand (Zustandsgröße Zustandswert, Zustandsnote) zum Zeitpunkt 0 (= Zeitpunkt der Errichtung oder der letzten konstruktiven Erhaltungsmaßnahme)

Da möglicherweise das errechnete Konstruktionsintervall nicht der ingenieurmäßigen Einschätzung entspricht, sind folgende Optionen zu bewerten bzw. anzuwenden [76]:

- Der ausgewählte Standardlebenszyklus entspricht nicht den Erkenntnissen aus den Berechnungen, sodass eine Änderung der Auswahl des standardisierten Lebenszyklus notwendig ist.
- Die Berechnung zeigt zwar einen deutlichen Unterschied zur Intervalllänge des Standardlebenszyklus, es wird jedoch empfohlen, die maximalen und minimalen Konstruktionsintervalle aus den Standardlebenszyklen als Grenzgrößen zu verwenden.

5.5.6 Ermittlung des Ausrüstungsintervalls

Liegt die Dauer für das aktuelle Konstruktionsintervall vor – errechnet entweder direkt aus dem Standardlebenszyklus oder über eine Berechnung unter Heranziehung der maßgebenden Degradationskurven (siehe Kapitel 4.3) – so ist in einem nächsten Schritt

das Ausrüstungsintervall zu bestimmen, sofern das aktuelle Konstruktionsintervall mehr als ein Erhaltungsintervall des Ausrüstungsindikators aufweist. Dazu muss der aktuelle Zustand des maßgebenden konstruktiven Anlagenteils verwendet werden, da in den meisten Fällen die zuvor verwendete Altersvariable nicht dem aktuellen Zustand der Konstruktion entspricht. Ist innerhalb des Konstruktionsintervalls nur ein einziges Ausrüstungsintervall definiert, entspricht das Ausrüstungsintervall automatisch dem bereits gewählten Konstruktionsintervall. Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt jedoch schematisch jenen Fall, bei welchem zumindest zwei Ausrüstungsintervalle in einem Konstruktionsintervall vorzufinden sind [76].

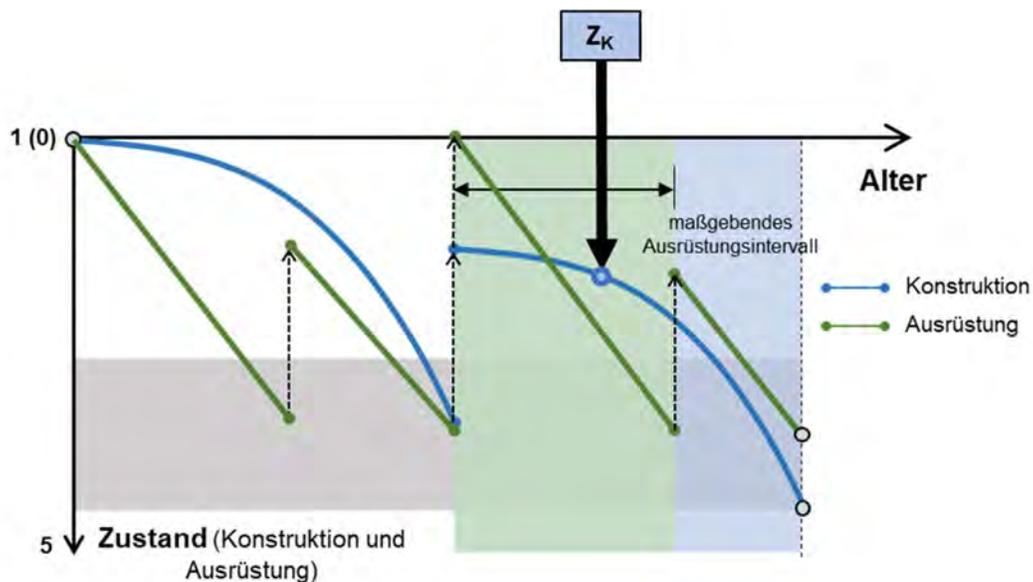


Abbildung 23: Auswahl aktuelles Ausrüstungsintervall [76]

5.5.7 Kalibrierung des Ausrüstungsintervalls

In ähnlicher Weise wie beim Konstruktionsintervall kann nun auch das Ausrüstungsintervall, unter Heranziehung der Degradationskurve (Zustandsprognose) des maßgebenden Anlagenteils der Ausrüstung, kalibriert werden. Ist eine solche Funktion nicht vorhanden, so ist die Länge bzw. Dauer des im standardisierten Lebenszyklus definierten Ausrüstungsintervalls zu verwenden.

Die maßgebende Kenngröße ist auch in diesem Zusammenhang die aus der Degradationskurve zurückgerechnete Dauer zwischen einem ausgezeichneten Zustand der Ausrüstung (oder einem angestrebten Zustand nach dem Durchführen einer

Erhaltungsmaßnahme) und dem Erreichen eines Zustandes, bei welchem eine Erhaltungsmaßnahme für die maßgebende Ausrüstung notwendig wird. Die nachfolgende Gleichung definiert diesen Berechnungsprozess und gibt auch die entsprechenden Randbedingungen für die Dauer des zu kalibrierenden Ausrüstungsintervalls wieder [76]:

$$V_{A,m,n} = \text{Alter}_{A,t=\text{krit}} - \text{Alter}_{A,t=0} \quad \text{Gl. 7}$$

$$[(V_{A,m,n,\text{stand}} - SV_{A,m,n,\text{stand}}) \leq V_{A,m,n} \leq (V_{A,m,n,\text{stand}} + SV_{A,m,n,\text{stand}})]$$

$$\text{Alter}_{A,t=\text{krit}} = f(Z_{A,\text{krit}})$$

$$\text{Alter}_{A,t=0} = f(Z_{A,0})$$

mit

$V_{A,m,n}$ Ausrüstungsintervall

$V_{A,m,n,\text{stand}}$ Standardausrüstungsintervall

$SV_{A,m,n,\text{stand}}$ Streuung Standardausrüstungsintervall

$\text{Alter}_{A,t=\text{krit}}$ Alter maßgebendes Anlagenteil der Ausrüstung zum kritischen Zeitpunkt t (= Zeitpunkt zum Durchführen einer Erhaltungsmaßnahme)

$\text{Alter}_{A,t=0}$ Alter maßgebendes Anlagenteil der Ausrüstung zum Zeitpunkt 0 (= Zeitpunkt der Errichtung oder der letzten Erhaltungsmaßnahme)

$Z_{A,\text{krit}}$ Kritischer Zustand (Zustandsgröße Zustandswert, Zustandsnote) des maßgebenden Anlagenteils der Ausrüstung

$Z_{A,0}$ Zustand (Zustandsgröße Zustandswert, Zustandsnote) zum Zeitpunkt 0 (= Zeitpunkt der Errichtung oder der letzten Erhaltungsmaßnahme)

Da die Prognosemodelle der Ausrüstungsintervalle sehr starke Streuungen aufweisen können, wird empfohlen, die maximalen und minimalen Ausrüstungsintervalle aus den Standardlebenszyklen als Grenzgrößen zu verwenden.

5.5.8 Berechnung der Zeitpunkte der nächsten Erhaltungsmaßnahmen im Lebenszyklus

Liegt eine Auswahl des Konstruktionsintervalls und des zugeordneten Ausrüstungsintervalls vor, so kann auf Grundlage des aktuellen Zustandes (ausgedrückt durch den Zustandswert, ggf. durch die Zustandsnote bei den Bauwerken) des maßgebenden konstruktiven Anlagenteils und des maßgebenden Anlagenteils für die Ausrüstung der Startzeitpunkt für die Lebenszyklusbetrachtung diskutiert bzw. berechnet

werden. Dabei sind in einem ersten Schritt die Dauern bis zur nächsten Erhaltungsmaßnahme zu bestimmen. Die nachfolgende Abbildung 24 zeigt jenen Fall, bei welchem die drei maßgebenden Dauern unterschiedliche Werte aufweisen [76].

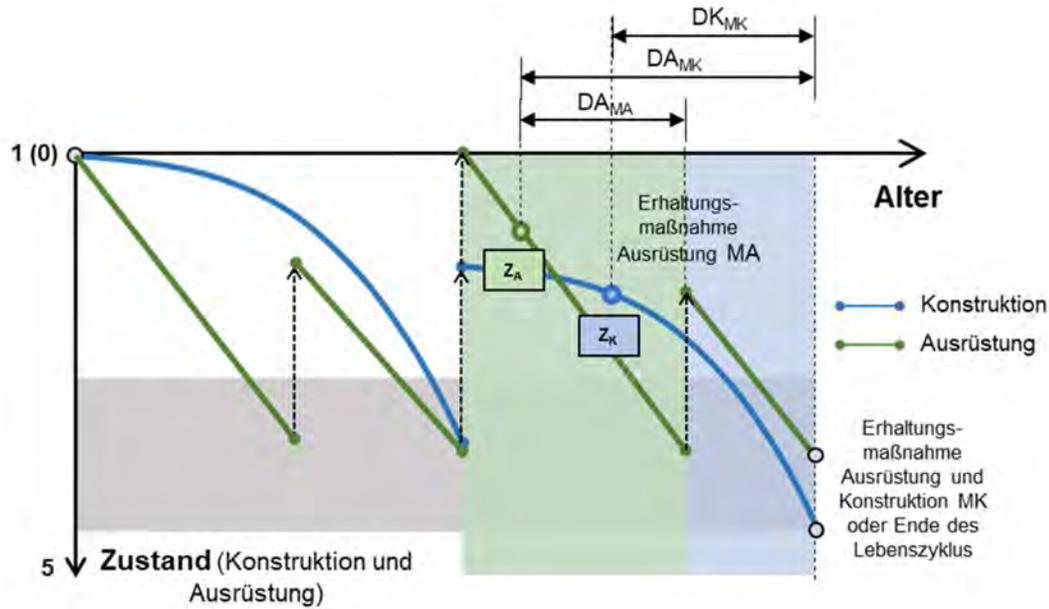


Abbildung 24: Definition der Dauern bis zur nächsten Erhaltungsmaßnahme [76]

DK_{MK} Dauer bis zur nächsten konstruktiven Maßnahme MK (oder Ende des Lebenszyklus) auf der Grundlage des aktuellen Zustandes des maßgebenden konstruktiven Anlagenteils

DA_{MK} Dauer bis zur nächsten konstruktiven Maßnahme MK (oder Ende des Lebenszyklus) auf der Grundlage des aktuellen Zustandes des maßgebenden Anlagenteils der Ausrüstung

DA_{MA} Dauer bis zur nächsten Maßnahme der Ausrüstung MA auf der Grundlage des aktuellen Zustandes des maßgebenden Anlagenteils der Ausrüstung

Ist das aktuelle Ausrüstungsintervall vor einer konstruktiven Erhaltungsmaßnahme angeordnet (siehe Abbildung 25) so ergibt sich, dass $DA_{MK} = DA_{MA}$.

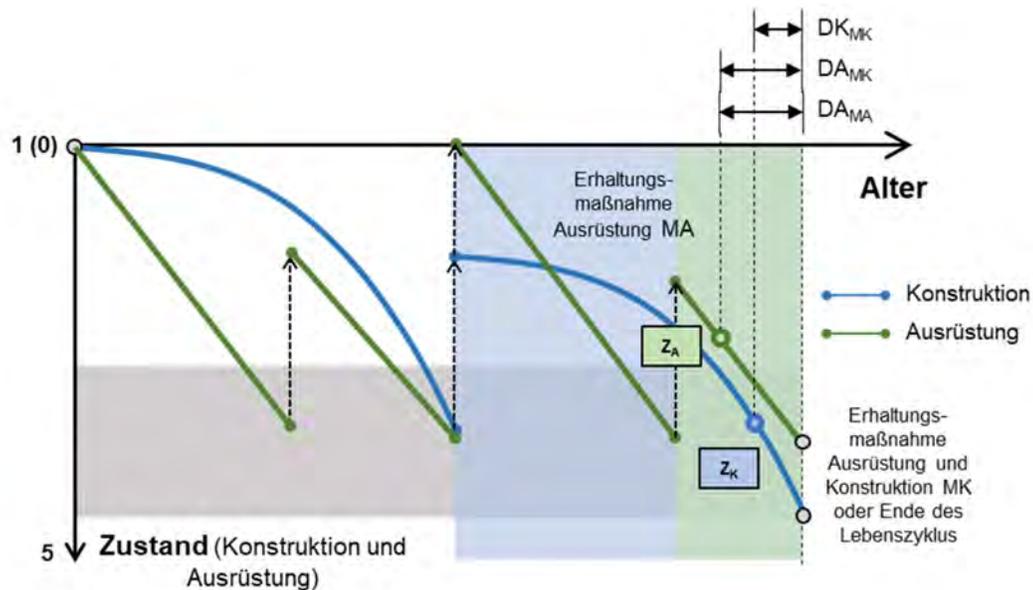


Abbildung 25: Definition der Dauern bis zur nächsten Erhaltungsmaßnahme – nächste Erhaltungsmaßnahme = konstruktive Erhaltungsmaßnahme (oder Ende des Lebenszyklus) [76]

Wie bereits beide Abbildungen oben zeigen, ergeben die Zustände der Ausrüstung (Z_A) und die Zustände der Konstruktion (Z_K) unterschiedliche Zeitpunkte für die nächste konstruktive Erhaltungsmaßnahme, wobei die Zustände durch die Zustandswerte (ggf. durch die Zustandsnoten bei Bauwerken) definiert sind. Dadurch ist es notwendig, weitere Festlegungen für die Bestimmung des Zeitpunktes der nächsten Erhaltungsmaßnahmen zu definieren. Zunächst ist es notwendig, die unterschiedlichen Zeitpunkte für die nachfolgenden Festlegungen wie folgt zu präzisieren (siehe auch Abbildung 26) [76]:

- t_{MK} Zeitpunkt für die nächste konstruktive Erhaltungsmaßnahme MK bzw. das Ende des Lebenszyklus
- t_{MA} Zeitpunkt für die nächste Erhaltungsmaßnahme aus Sicht der Ausrüstung (entweder Erhaltungsmaßnahme der Ausrüstung MA oder Erhaltungsmaßnahme der Konstruktion MK)
- t_{ZK} Zeitpunkt des konstruktiven Zustandes (rückgerechnet aus Degradationskurve oder Standardprognosemodell)
- t_{ZA} Zeitpunkt des Zustandes der Ausrüstung (rückgerechnet aus Degradationskurve oder Standardprognosemodell)

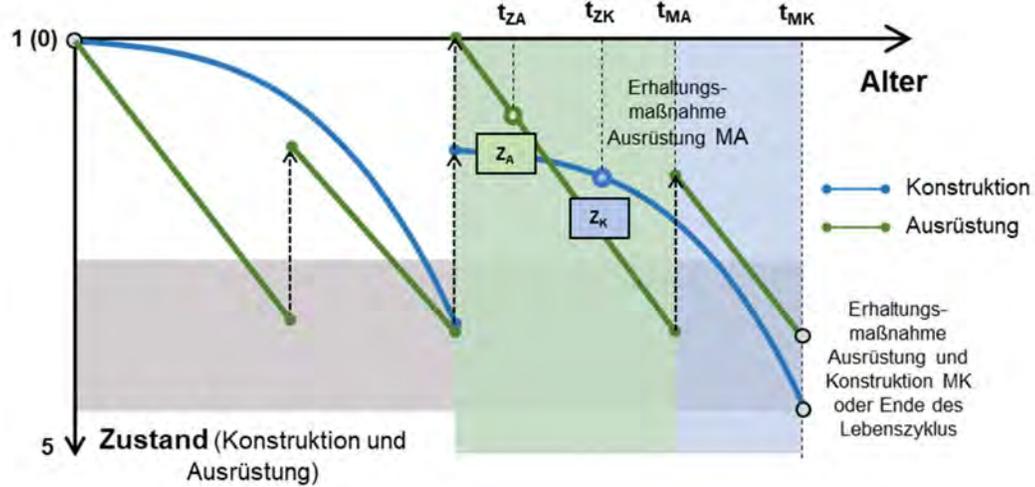


Abbildung 26: Zeitpunktdefinitionen im Lebenszyklus [76]

Grundsätzlich sollte für den Zeitpunkt der nächsten konstruktiven Erhaltungsmaßnahme die kürzere Dauer aus Sicht der Konstruktion und aus Sicht der Ausrüstung herangezogen werden. Es ergeben sich jedoch auch eine Reihe von Fällen, die weitere Festlegungen erfordern und in der nachfolgenden Tabelle 38 aufgelistet sind. Auch hierbei handelt es sich zum Teil um pragmatische Festlegungen, die durch die jeweilige Straßenverwaltung angepasst bzw. erweitert werden können [76].

Tabelle 38: Zeitpunkte der nächsten Erhaltungsmaßnahmen [76]

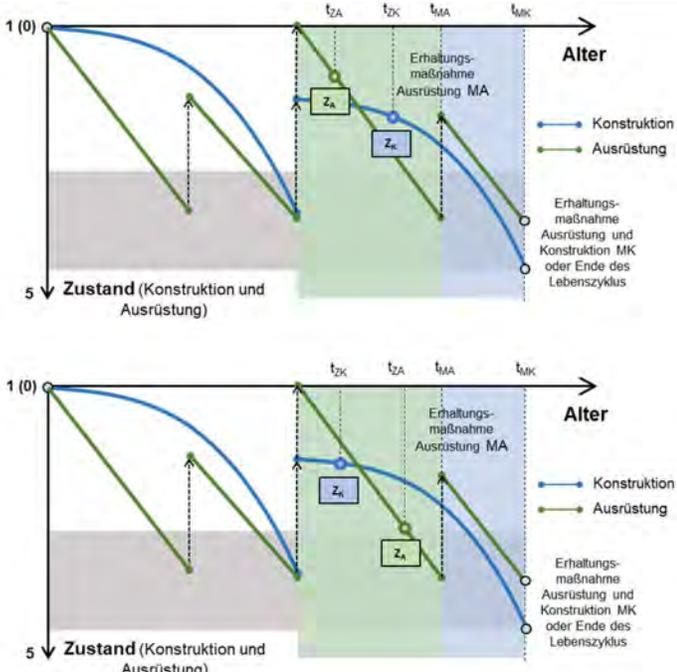
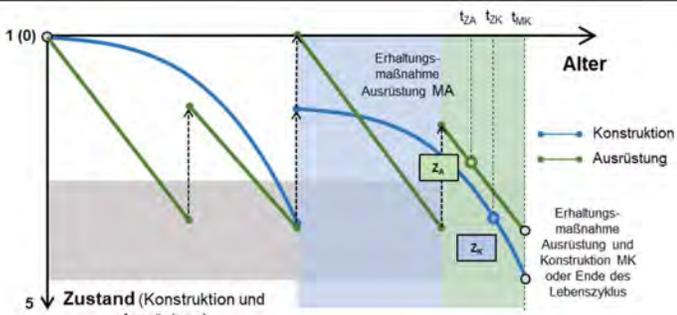
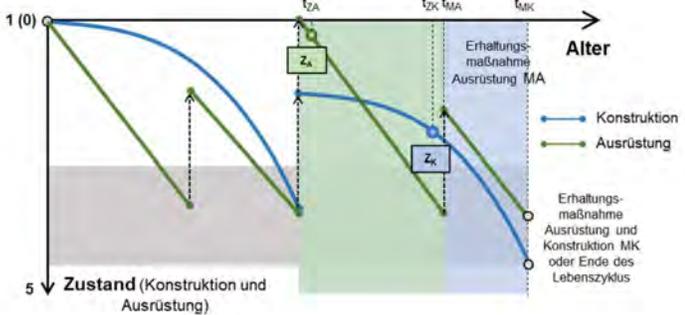
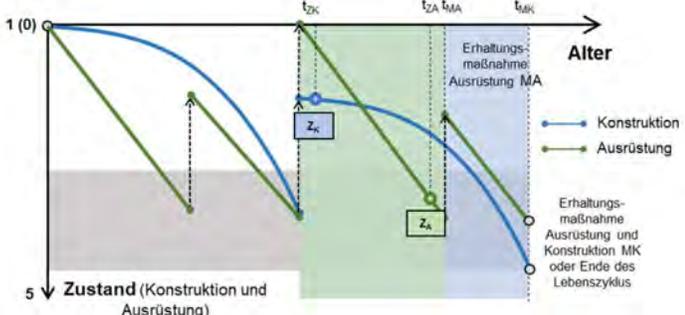
Fall und Beschreibung	Berechnung Zeitpunkte
<p>Objekt nicht im letzten Ausrüstungsintervall und Zustände Ausrüstung und Konstruktion ähnlich</p> <ul style="list-style-type: none"> Nächste Erhaltungsmaßnahme ist Maßnahme Ausrüstung MA Zeitpunkt des konstruktiven Zustandes t_K und Zeitpunkt des Zustandes der Ausrüstung t_A liegen innerhalb einer Toleranzgrenze, die der Länge des Ausrüstungsintervalls $V_{A,m,n}$ abzgl. des 2-fachen Streuungswertes dieses Ausrüstungsintervalls $SV_{A,m,n}$ entspricht  <p>The figure contains two graphs. Both graphs plot 'Zustand (Konstruktion und Ausrüstung)' on the y-axis (from 5 to 1) against 'Alter' on the x-axis. Two curves are shown: a blue curve for 'Konstruktion' and a green curve for 'Ausrüstung'. Vertical dashed lines mark time points t_A and t_K. In the top graph, $t_A < t_K$. In the bottom graph, $t_K < t_A$. Shaded regions indicate maintenance intervals: green for 'Erhaltungsmaßnahme Ausrüstung MA' and blue for 'Erhaltungsmaßnahme Ausrüstung und Konstruktion MK'. Points z_A and z_K are marked on the curves.</p>	$t_{MK} = t_{ZK} + \min(DK_{MK}; DA_{MK})$ $t_{MA} = t_{ZA} + DA_{MA}$ $ DA_{MK} - DK_{MK} < (V_{A,m,n} - 2 \cdot SV_{A,m,n})$
<p>Objekt im letzten Ausrüstungsintervall</p> <ul style="list-style-type: none"> Nächste Erhaltungsmaßnahme ist Maßnahme Konstruktion MK  <p>The graph plots 'Zustand (Konstruktion und Ausrüstung)' on the y-axis (from 5 to 1) against 'Alter' on the x-axis. Two curves are shown: a blue curve for 'Konstruktion' and a green curve for 'Ausrüstung'. Vertical dashed lines mark time points t_A and t_K. In this graph, $t_K < t_A$. Shaded regions indicate maintenance intervals: green for 'Erhaltungsmaßnahme Ausrüstung MA' and blue for 'Erhaltungsmaßnahme Ausrüstung und Konstruktion MK'. Points z_A and z_K are marked on the curves.</p>	$t_{MK} = t_{ZK} + \min(DK_{MK}; DA_{MK})$ $t_{MA} = t_{MK}$

Tabelle 38: Zeitpunkte der nächsten Erhaltungsmaßnahmen – Fortsetzung [76]

Fall und Beschreibung	Berechnung Zeitpunkte
<p>Objekt nicht im letzten Ausrüstungsintervall und Zustände Ausrüstung und Konstruktion zeigen deutliche Differenzen wobei Zustand Konstruktion schlechter als Zustand Ausrüstung ist</p> <ul style="list-style-type: none"> Nächste Erhaltungsmaßnahme wäre Maßnahme Ausrüstung MA Zeitpunkt des konstruktiven Zustandes t_K und Zeitpunkt des Zustandes der Ausrüstung t_A liegen außerhalb einer Toleranzgrenze, die der Länge des Ausrüstungsintervalls $V_{A,m,n}$ abzgl. des 2-fachen Streuungswertes dieses Ausrüstungsintervalls $SV_{A,m,n}$ entspricht Zustand Konstruktion $Z_K >$ Zustand Ausrüstung Z_A Nächste Maßnahme Ausrüstung MA wird ausgesetzt und konstruktive Maßnahme MK wird vorgezogen 	
	$t_{MK} = t_{ZK} + DK_{MK}$ $t_{MA} = t_{MK}$ $ DA_{MK} - DK_{MK} \geq (V_{A,m,n} - 2 \cdot SV_{A,m,n})$ $Z_K > Z_A$
<p>Objekt nicht im letzten Ausrüstungsintervall und Zustände Ausrüstung und Konstruktion zeigen deutliche Differenzen wobei Zustand Ausrüstung schlechter als Zustand Konstruktion ist</p> <ul style="list-style-type: none"> Nächste Erhaltungsmaßnahme ist Maßnahme Ausrüstung MA Zeitpunkt des konstruktiven Zustandes t_K und Zeitpunkt des Zustandes der Ausrüstung t_A liegen außerhalb einer Toleranzgrenze, die der Länge des Ausrüstungsintervalls $V_{A,m,n}$ abzgl. des 2-fachen Streuungswertes dieses Ausrüstungsintervalls $SV_{A,m,n}$ entspricht Zustand Ausrüstung $Z_A >$ Zustand Konstruktion Z_K Es wird eine weitere Maßnahme der Ausrüstung in das Konstruktionsintervall eingefügt. Die Dauer des neuen Ausrüstungsintervall $V_{A,m,n=neu}$ entspricht der Dauer des nächsten ursprünglich geplanten Ausrüstungsintervalls $= V_{A,m,n+1}$ 	
	$t_{MK} = t_{ZK} + DK_{MK}$ $t_{MA} = t_{ZA} + DA_{MA}$ $t_{MA,neu} = t_{MA} + V_{A,m,n+1}$ $ DA_{MK} - DK_{MK} \geq (V_{A,m,n} - 2 \cdot SV_{A,m,n})$ $Z_A > Z_K$

5.6 Erhaltungsmaßnahmen

5.6.1 Allgemeines

Neben der Prognose des Straßeninfrastrukturzustandes sind es die Erhaltungsmaßnahmen, die einen Lebenszyklus einer Anlage bzw. eines Anlagenteils charakterisieren. Wie im Rahmen der Definition beschrieben (siehe Kapitel 5.1.1), können unterschiedliche Abfolgen von Erhaltungsmaßnahmen betrachtet werden, die auch zu unterschiedlichen Lösungen führen. Dabei spielen zusätzliche Vorgaben, wie z. B. Erhaltungsbudget, strategische Erhaltungsziele, Bauprogrammfestlegungen eine wesentliche Rolle und beeinflussen maßgebend die Entwicklung des Technischen Anlagenwertes. Es sei an dieser Stelle nochmals explizit erwähnt, dass die Aufgabe von TAniA nicht darin bestand, einen Algorithmus zu entwickeln, der für eine Anlage bzw. einen Anlagenteil verschiedene Erhaltungsmaßnahmenstrategien definiert, sondern entweder auf einen vorhandenen Lebenszyklus zurückgreift oder einen (angepassten, dynamischen) Standardlebenszyklus für die Berechnung verwendet. Aus diesem Grund werden wiederum die nachfolgenden Varianten unterschieden [76]:

- **Variante A:** Der Lebenszyklus und die damit verbundenen Erhaltungsmaßnahmen werden aus dem Erhaltungsmanagementsystem (PMS, BMS, TMS) direkt geliefert und stellen somit die Eingangsgröße für die Berechnung des Technischen Anlagenwertes dar. Welche Art von Erhaltungsmaßnahme zu welchem Zeitpunkt für welchen Anlagenteil vorgeschlagen wird, ist das Ergebnis dieser „externen“ Analysen und Betrachtungen und kann auch für unterschiedliche Szenarien unterschiedliche Lösungen aufweisen. Auch die Zusammenhänge bzw. Abhängigkeiten zwischen bestimmten Erhaltungsmaßnahmen sollten dabei Berücksichtigung gefunden haben, sofern das Erhaltungsmanagementsystem entsprechend konfiguriert ist.
- **Variante B:** Auf Grundlage eines ausgewählten Standardlebenszyklus wird dieser unter Heranziehung von anwendbaren Degradationskurven (Verhaltensfunktionen) über die Veränderung der Erhaltungsintervalle kalibriert. Der aktuelle Zustand liefert den Zeitpunkt der nächsten Erhaltungsmaßnahmen. Die Maßnahmen sind dabei so zu definieren, dass neben bestimmten Abhängigkeiten zwischen den Anlagenteilen, nach dem Durchführen der Erhaltungsmaßnahme, ein „sehr guter“ Zustand (Zustandsnote 1) zur Verfügung steht und die im Standardlebenszyklus definierten nachfolgenden Erhaltungsintervalle auch erreicht werden können. Eine

Untersuchung unterschiedlicher Abfolgen von Erhaltungsmaßnahmen mit unterschiedlichen Intensitäten (z. B. Untersuchung von Zwischensanierung) wird, wie bereits erwähnt, dabei ausgeschlossen.

- **Variante C:** Ein ausgewählter Standardlebenszyklus wird für die Ermittlung des Technischen Anlagenwertes direkt herangezogen. Lediglich der aktuelle Zustand liefert den Zeitpunkt der nächsten Erhaltungsmaßnahmen. Die Abfolge und Intensität der Erhaltungsmaßnahmen erfolgt nach den Vorgaben des Standardlebenszyklus, wiederum unter Berücksichtigung entsprechender Abhängigkeiten und der Vorgabe, dass nach dem Durchführen der Erhaltungsmaßnahme die Zustandsnote 1 erreicht werden kann.

5.6.2 Erhaltungsmaßnahmen im Standardlebenszyklus

Da im Zuge des Projektes eine Betrachtung auf Netzebene stattfindet und dadurch typischerweise abgestimmte Erhaltungsmaßnahmen anzustreben sind, ist die Entwicklung standardisierter Lebenszyklen ein zentraler Punkt. Im Rahmen von TAniA wird eine genaue Untersuchung der unterschiedlichen Erhaltungsmaßnahmen vor dem Hintergrund der Kosten vorgenommen, sodass die nachfolgenden Beschreibungen einen Rahmen für mögliche Erhaltungsmaßnahmen liefern [76].

5.6.2.1 Straßenoberbau

Im Bereich des Straßenoberbaus sind für die Standardlebenszyklen Erhaltungsmaßnahmen zu wählen, die zu einer geforderten Verbesserung des Zustands führen. Dabei ist wiederum zwischen dem Ausrüstungsindikator und dem Konstruktionsindikator zu unterscheiden. Je intensiver eine Erhaltungsmaßnahme desto wahrscheinlicher ist auch die Wirkung auf die Substanz und somit auf den Konstruktionsindikator. Die nachfolgende Tabelle 39 zeigt den technischen Rahmen für die Auswahl von Erhaltungsmaßnahmen für den Standardlebenszyklus im Bereich des Straßenoberbaus sowie die danach typischerweise resultierende Zustandsnote (siehe hierzu [79] und [83]):

Tabelle 39: Erhaltungsmaßnahmen Straßenoberbau für Standardlebenszyklen [76]

Indikator	Erhaltungsmaßnahme	Zustand nach der Maßnahme
Ausrüstungsindikator	Deckschichtmaßnahme mit Erneuerung Deckschicht bei Asphaltoberbau	Zustandsnote 1
	Deckschichtmaßnahme mit Erneuerung Deck- und Binderschicht bei Asphaltoberbau	Zustandsnote 1
	(umfangreiche) Auswechslung von Betonplatten bei Betondecken ¹⁾	Zustandsnote 2
Konstruktionsindikator	Verstärkungsmaßnahme mit Erneuerung Deck- und Binderschicht sowie teilweiser Ersatz der gebundenen Tragschicht bei Asphaltoberbau (ggf. mit Austausch der ungebundenen Tragschichten)	Zustandsnote 1
	Umfangreiche Auswechslung von Betonplatten bei Betondecken ¹⁾	Zustandsnote 2

1) Da bei Betonplattenauswechslungen nur die geschädigten Platten saniert werden und der restliche Straßenoberbau nicht betroffen ist, wird der Zustand nicht auf eine Note von 1,0 zurückgesetzt.

5.6.2.2 Brücken

Auf Grundlage der umfangreichen Analysen zur Definition von Degradationskurven von Brücken ist es auch möglich, eine Aussage über die Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen vorzunehmen. Nachfolgend sind diese Erkenntnisse im Überblick dargestellt. In Tabelle 40 sind typische Instandsetzungsarbeiten im Standardlebenszyklus von Brückenbauwerken dargestellt. Auch hier ist die daraus resultierende Zustandsnote von der Intensität der Erhaltungsmaßnahmen abhängig.

Der nachfolgende Standardlebenszyklus in Abbildung 27 ergibt sich bei Anwendung der zuvor beschriebenen Erhaltungsmaßnahmen und Degradationskurven, unter Heranziehung einer „neuen“ Brücke. Er basiert auf einer technischen Nutzungsdauer einer Brücke von 70 Jahren und wurde von der ASFINAG für BMS-Lebenszyklusanalysen entwickelt und implementiert [83].

Tabelle 40: Erhaltungsmaßnahmen Brücken für Standardlebenszyklen [76]

Indikator	Anlagenteil	Erhaltungsmaßnahme	Zustand der Maßnahme
Ausrüstungs- indikator 1 und 2 (kurz und lang)	Fahrbahnübergangs- konstruktion	Tausch bei jeder Instandsetzung	Zustandsnote 1
	Lager	Lagertausch (einmal im Lebenszyklus)	Zustandsnote 1
	Randbalken	Vollständige Erneuerung einmal im Lebenszyklus	Zustandsnote 1
	Entwässerung	Vollständige Erneuerung einmal im Lebenszyklus (Abdichtungserneuerung und Entwässerungs- instandsetzung)	Zustandsnote 1
	Ausrüstung	Vollständige Erneuerung einmal im Lebenszyklus	Zustandsnote 1
Konstruktions- indikator	Überbau	Instandsetzung evtl. mit Ertüchtigung	Zustandsnote 1-2
	Unterbau	Instandsetzung	Zustandsnote 1-2

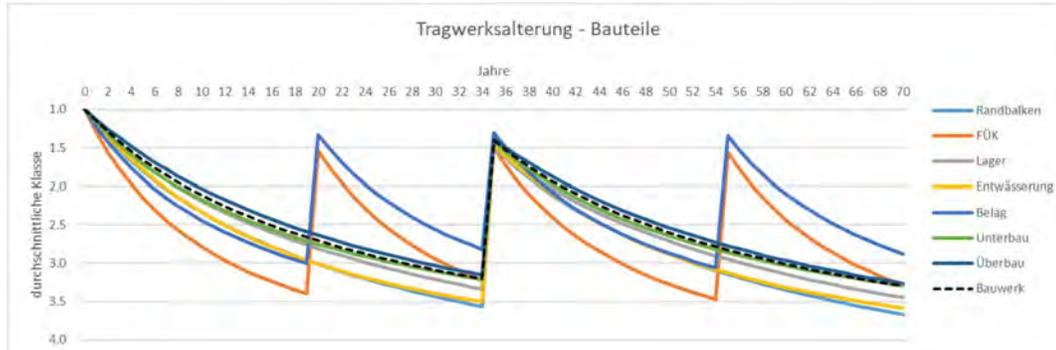


Abbildung 27: Standardisierter Lebenszyklus auf der Grundlage der Zustandsprognose der Bauteile nach [83]

5.6.2.3 Tunnel (baulich-konstruktiv und E&M-Ausrüstung)

Gerade bei den Tunneln zeigt sich, dass die Vielzahl von Abhängigkeiten der Maßnahmengeschehen an den einzelnen Anlagenteilen bzw. Gewerken die Entscheidung maßgebend beeinflusst. Im Rahmen des VIF-Forschungsprojektes OPTimAL [37] wurde ein umfassender Maßnahmenkatalog erstellt, der auf Standardlebenszyklen basiert und eine umfassende Abhängigkeits-Erhaltungs-Matrix (AEM) beinhaltet. Im Bereich der E&M-

Anlagenteile (Gewerke) wird davon ausgegangen, dass beim Durchführen einer Erhaltungsmaßnahme (entweder als Auslöser oder als Betroffener) mit einem Vollersatz gerechnet werden muss, um die Anforderungen eines Zustandes 1 zu erfüllen. Dieser „Vollersatz“ bedeutet nicht zwangsweise, dass der komplette E&M-Anlagenteil ersetzt werden muss, jedoch ist die Maßnahme so umfangreich, dass die Kosten, zumindest nahezu, einem Vollersatz entsprechen.

Die aus dem Projekt OPTimAL [37] gewonnen Erkenntnisse wurden als Prozentwert des Austausches von Anlagenteilen sowohl für die baulich-konstruktiven Anlagenteile als auch für die E&M-Anlagenteile in Abhängigkeit von Erhaltungsintervallzyklus in die vorgeschlagenen Standardlebenszyklen übernommen und können dem Kapitel 5.4.5 entnommen werden.

5.6.3 Wirkungen und Abhängigkeiten von Erhaltungsmaßnahmen

Es ist sinnvoll und zweckmäßig die Abhängigkeiten von Erhaltungsmaßnahmen von Anlagenteilen aufgrund von hierarchischen Zusammenhängen und Verknüpfungen bei den Standardlebenszyklen zu berücksichtigen. Dies zeigt sich vor allem bei den Wirkungen auf den Zustand und die Kosten einer Erhaltungsmaßnahme. Dabei spielt nicht nur die Abhängigkeit bei den Erhaltungsintervallen eine wesentliche Rolle, sondern auch die baulichen Abhängigkeiten, die Maßnahmen an Anlagenteilen verursachen, die womöglich aufgrund des Zustandes noch nicht behandelt werden müssen, aber durch die Maßnahmen an verbundenen Anlagenteilen betroffen sind. So ist z. B. bei der Erneuerung der Brückenabdichtung auch eine Erneuerung bzw. ein Ersatz der Deckschicht (Brückenbelag) sowie ggf. des Randbalkens und der damit kombinierten Ausrüstung notwendig. Bei einer ausschließlichen Sanierung der Deckschicht ist dies nicht der Fall. Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, dass neben Abhängigkeiten aus Erhaltungsintervallen auch die baulichen Abhängigkeiten zwischen den Anlagenteilen zu berücksichtigen sind. Die nachfolgende Tabelle 41 zeigt die Struktur einer Abhängigkeit-Erhaltungs-Matrix (AEM), die aus der baulichen Situation und der Art der Erhaltungsmaßnahme entsteht [76].

Tabelle 41: Grundstruktur Abhängigkeits-Erhaltungs-Matrix (AEM) [76]

		Betroffener (betroffenes Anlagenteil)			
		Anlagenteil A	Anlagenteil B	...	Anlagenteil X
Verursacher (verursachendes Anlagenteil)	Anlagenteil A	1	Abh _{AB}		Abh _{AX}
	Anlagenteil B	Abh _{BA}	1		Abh _{BX}
	...			1	
	Anlagenteil X	Abh _{XA}	Abh _{XB}		1

Die AEM stellt den Verursacher, also jenen Anlagenteil, der für eine Erhaltungsmaßnahme verantwortlich ist, und die infolge dieser Maßnahme betroffenen Anlagenteile mit deren Abhängigkeiten dar. Das gleiche Anlagenteil kann durch sich selbst nur zu 100% (1,0) betroffen sein. Die Wirkung auf andere betroffene Anlagenteile wird durch die Abhängigkeitszahl (Abh) beschrieben, die einen Wert zwischen 0 (0% - keine Abhängigkeit) und 1 (100% - volle Abhängigkeit) annehmen kann.

Eine AEM muss zeigen, dass bei Maßnahmen, die mit einer Erneuerung bzw. einem Ersatz eines Anlagenteils verbunden sind, deutliche Auswirkungen auf davon abhängige andere Anlagenteile gegeben sind. Bei Brückenobjekten ist dies noch übersichtlich, auch beim Straßenoberbau, wo vor allem bei Erneuerungsmaßnahmen zumindest sämtliche gebundenen Schichten betroffen sind. Deutlich komplexer ist die Situation bei Tunnelobjekten, vor allem die Abhängigkeit zwischen den baulich-konstruktiven Anlagenteilen und der E&M-Ausrüstung. Dabei ergeben sich hier komplexe AEM, die eine Vielzahl von Abhängigkeiten definieren. Als Grundlage dient dabei das Forschungsprojekt OPTimAL, welches ebenfalls eine umfassende AEM beinhaltet und für das Projekt herangezogen werden kann [37].

In den meisten Managementteilsystemen (PMS, BMS, TMS) sind diese Abhängigkeiten in der Regel verankert und auch die Vorschläge aus einer Lebenszyklusbetrachtung verwenden diese Beziehungen. Bei der Anwendung von Standardlebenszyklen (Varianten B und C) sind die Abhängigkeiten in Form der Maßnahmenbeschreibungen (Hauptmaßnahme mit zugeordneter Teilmaßnahme) zu definieren, was auch im Kapitel 5.4 vorgenommen wurde und somit in den Standardlebenszyklen verankert ist.

Des Weiteren muss die Wirkung der Erhaltungsmaßnahmen bezogen auf die Veränderung des Zustands des Anlagenteils bekannt sein. Hier wird in TAniA für die Varianten B und C nur der Fall betrachtet, in dem der Zustand immer wieder auf die Zustandsnote 1 oder 2 verbessert wird (eine Ausnahme bilden hier im Bereich Straßenoberbau die Betondecken, da hier die umfangreichen Betonplattenauswechslungen zur Verlängerung der Lebensdauer punktuelle Maßnahmen darstellen). Wenn die Datenlage es zulässt, können bzw. sollten aber auch Erhaltungsmaßnahmen berücksichtigt werden, die diese reduzierten Zustandsveränderungen bewirken. Hier muss allerdings immer berücksichtigt werden, in welchem Umfang diese Maßnahmen auch in der Praxis durchgeführt werden.

5.6.4 Grundlagen Kosten Erhaltungsmaßnahmen

Sowohl für Deutschland als auch für Österreich und die Schweiz liegen Kostendaten vor, die als Grundlage für das gegenständliche Projekt herangezogen werden können. Die ASFINAG sammelt zum Beispiel seit mehreren Jahrzehnten Informationen über Preise von unterschiedlichen Bau- und Erhaltungsmaßnahmen für unterschiedliche Anlagen. Die in Österreich unter dem Titel „Baukennzahlen“ bzw. „Preisbenchmarks“ zusammengestellten Daten [14] werden dabei auch für das Asset Management herangezogen und dienen ausschließlich für die amts-interne Verwendung. Diese Informationen werden zum Teil laufend aktualisiert und angepasst. Es handelt sich dabei sowohl um Mittelwerte als auch um Maximal- und Minimalpreisbenchmarks auf Grundlage von Angeboten und durchgeführten Bauprojekten. Darüber hinaus beinhalten die Baukennzahlen auch unterschiedliche Genauigkeitsebenen, sodass die entsprechenden Informationen nicht nur für Gesamtanlagen (Bauwerksebene), sondern auch für Anlagenteile zur Verfügung stehen (Bauteilebene). Auf Bauwerksebene handelt es sich bei den Baukennzahlen um Gesamtkosten inkl. Grundeinlöse (Grunderwerb), Baukosten, Projektmanagement etc. Die Baukennzahlen auf Bauteilebene beinhalten die Preisanteile für die Baustelleneinrichtung jedoch nicht die Anteile aus Grundeinlöse, Verkehrsführung, Projektmanagement etc.

Da sämtliche Baukennzahlen und Preisbenchmarks als streng vertraulich eingestuft werden müssen, werden die zur Verfügung gestellten Detaildaten hier nicht dargestellt. Lediglich die Ergebnisse der Untersuchungen, können als Zusammenfassung den nachfolgenden Kapiteln entnommen werden.

Für alle drei D-A-CH-Länder erfolgte die Aufbereitung der Kostendaten in gleicher Weise. Zunächst wurden die verfügbaren Daten zusammengetragen und anschließend so aufbereitet, dass sie für TAniA verwendet werden konnten. Die Ergebnisse dieser

Aufbereitung wurden übersichtlich dargestellt und dabei immer in die drei untersuchten Anlagenarten Straßenoberbau, Brücken und Tunnel baulich / E&M eingeordnet. Weitere Details zur Auswertung der Kostendaten können den Anhängen B1 bis B3 entnommen werden.

5.6.5 Kosten Erhaltungsmaßnahmen Straßenoberbau

5.6.5.1 Kostendaten Deutschland

Unter der Prämisse, dass die Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen ein Indiz dafür sind, dass sich der Technische Anlagenwert verringert hat, sind in Tabelle 42 die spezifischen Maßnahmen aufgelistet, die in Deutschland angewandt werden. Aspekte der Instandhaltung werden im Projekt nicht weiterverfolgt, da es sich bei derartigen Maßnahmen um die fortlaufende Durchführung kleinflächiger Maßnahmen handelt, die einen zu geringen Einfluss auf den Technischen Anlagenwert haben und vernachlässigt werden können.

Tabelle 42: Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen des Straßenoberbaus (ZTV BEA-StB, S.34 - 53, [85] und ZTV BEB-StB, S. 43 – 61, [86])

Maßnahmen	Asphaltbauweise	Betonbauweise
Instandsetzung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oberflächenbehandlung (OB) ▪ Dünne Asphaltdeckschichten in Kaltbauweise (DSK) ▪ Dünne Asphaltdeckschichten in Heißbauweise (DSH) ▪ Rückformen (RF) ▪ Ersatz einer Asphaltdeckschicht (EAD) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oberflächenbehandlung mit Reaktionsharz ▪ Oberflächenbeschichtung mit Reaktionsharzmörtel ▪ Ersatz von Fugenfüllungen ▪ Heben und Festlegen von Platten ▪ Ersatz von Platten und Plattenteilen ▪ Streifenweiser Ersatz
Erneuerung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erneuerung bei vollständigem Ersatz der vorhandenen Befestigung ▪ Erneuerung bei teilweisem Ersatz der vorhandenen Befestigung ▪ Erneuerung (Neueinbau von Schichten) auf der vorhandenen Befestigung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erneuerung im Hocheinbau ▪ Erneuerung im Tiefeinbau ▪ Erneuerung in Kombination von Hoch- und Tiefeinbau

Da die spezifischen Erhaltungsmaßnahmen unterschiedliche Bestandteile des Straßenoberbaus betreffen, ist an dieser Stelle die grundsätzliche Einteilung in Konstruktions- und Ausrüstungsindikatoren innerhalb des Projektes hervorzuheben.

Fehlende Bereitstellung, Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von Kostenkennwerten, die den Straßenoberbau betreffen, erfordern, dass auf Kennwerte aus bereits abgeschlossenen Projekten zurückgegriffen werden muss. Maßnahmenkosten für den Straßenoberbau werden daher aus dem Bericht zur „Übernahme und Weiterführung der Projektaktivitäten im Rahmen des Projektes Nr. 450004307 (Aufbau eines Qualitätssicherungsverfahrens für die systematische Erhaltungsplanung der Bundesfernstraßen)“ [40] entnommen und fungieren als Wertegerüst für Deutschland. Hierbei sind jedoch leicht abweichende Maßnahmenlisten zu Tabelle 42 zu berücksichtigen.

In der nachfolgenden Tabelle 43 sind die Einheitspreise für diese Erhaltungsmaßnahmen dargestellt. Bei diesen Kosten handelt es sich um aktuelle Einheitspreise inkl. Nebenarbeiten mit Preisbasis 2018 (siehe hierzu [40]). Das Jahr 2018 wird fortan als Ausgangsjahr bzw. Vergleichsjahr fungieren. Eine Anpassung der Maßnahmenkosten mittels Indizierung ist hier daher nicht notwendig.

Tabelle 43: (gekürzte) Maßnahmenkosten (Dokumentation Grundlagen, Tabelle 18, S. 31, [40])

Maßnahme	Beschreibung	Zuordnung zu Indikator	Freie Strecke Kosten [€/m ²]	Ortsbereich Kosten [€/m ²]
I1	Instandsetzung Deckschicht	Ausrüstungsindikator	8,0	10,0
I2	Instandsetzung Deck- u. Binderschicht	Ausrüstungsindikator	20,0	20,0
E1	Erneuerung Decke ((strukturelle Verbesserung Oberbau durch Ersatz von Deck- und Binderschicht)	Konstruktionsindikator	35,0	45,0
E2	Erneuerung gebundener Oberbau	Konstruktionsindikator	120,0	130,0

5.6.5.2 Kostendaten Österreich

Die in der Einleitung beschriebenen Preisbenchmarks [14] bilden die Grundlage für den Maßnahmenkatalog des PMS der ASFINAG. Hierfür sind im Handbuch Pavement Management in Österreich [79] die entsprechenden Maßnahmen beschrieben und mit Preisen hinterlegt. Die nachfolgende Tabelle 44 zeigt die Kategorisierung dieser Erhaltungsmaßnahmen nach [79].

Tabelle 44: Kategorisierung Erhaltungsmaßnahmen Straßenoberbau nach [79]

Gruppe	Abk. ¹⁾	Bezeichnung	Beschreibung
Z	Z_AS	Zwischensanierung Asphalt	Ausbesserung von lokalen Schadstellen, örtliche Reparatur, über den gesamten Querschnitt
Z	Z_BE	Zwischensanierung Beton	Ausbesserung von lokalen Schadstellen, örtliche Reparatur, über den gesamten Querschnitt
I	I_OB#	Instandsetzung Aufbringung Dünnschichtdecke	Aufbringen einer dünnen Deckschicht (DD, OBH) auf die bestehende Befestigung
I	I_DE#	Instandsetzung Erneuerung Decke	Fräsen der alten Deckschicht und Aufbringen einer neuen bituminösen Deckschicht
I	I_VT#	Instandsetzung Verstärkung im Tiefeinbau oder teilweisen Tiefeinbau	Fräsen der alten Deckschicht und eines Teils der geb. Tragschichten, Aufbringen einer neuen Trag- und Deckschicht
E	E_AS	Erneuerung Oberbau in Asphaltbauweise	Abtrag und Neubau des gesamten geb. Oberbaus in Asphaltbauweise
E	E_BE	Erneuerung Oberbau in Betonbauweise	Abtrag und Neubau des gesamten geb. Oberbaus in Betonbauweise

¹⁾ # = Hauptfahrstreifen (HFS) oder Nebenfahrstreifen (NFS) bei fahrestreifenspezifischer Maßnahmenzuordnung; bei Zuordnung der Maßnahme auf die Fahrbahn kann die Nummer aus Gründen der Vereinfachung entfallen

In Tabelle 45 sind die Einheitspreise für die oben aufgelisteten Erhaltungsmaßnahmen dargestellt. Bei diesen Kosten handelt es sich um aktuelle Einheitspreise inkl. Nebenarbeiten mit Preisbasis 2020, die direkt aus dem PMS der ASFINAG (dTIMS IMT Pavement) entnommen wurden und für die aktuellen PMS-Analysen herangezogen werden.

Tabelle 45: Maßnahmenkosten Erhaltungsmaßnahmen Straßenoberbau Österreich nach [79]

Abkürzung	Beschreibung	Zuordnung zu Indikator	Kosten [€/m ²]
I_DE	Fräsen der alten Deckschicht und Aufbringen einer neuen bituminösen Deckschicht	Ausrüstungsindikator	20,0
I_DEBI	Fräsen der alten Deck- und Binderschicht und Aufbringen einer neuen bituminösen Deck- und Binderschicht	Ausrüstungsindikator	37,0
I_VT	Fräsen der alten Deckschicht und eines Teils der geb. Tragschichten, Aufbringen einer neuen Trag-, Binder und Deckschicht (gesamt 12cm)	Ausrüstungsindikator	59,0 ¹⁾
E_AS	Abtrag und Neubau des gesamten geb. Oberbaus in Asphaltbauweise (LK25)	Konstruktionsindikator	124,0 ¹⁾
E_BE	Abtrag und Neubau des gesamten geb. Oberbaus in Betonbauweise	Konstruktionsindikator	124,0

¹⁾ Berechnung siehe nachfolgende Funktionen

Die Kosten von Verstärkungs- oder Erneuerungsmaßnahmen in Asphaltbauweise sind abhängig von der Gesamtdicke des neu aufzubringenden bzw. zu errichtenden gebundenen Schichtpakets. Dabei wurden auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Informationen bzgl. den Einheitspreisen einfache Funktionen ermittelt, die eine Abschätzung der Kosten in Abhängigkeit von der Verstärkungsdicke oder der Erneuerungsdicke zulassen, wobei auch diese Funktionen einer laufenden Überprüfung unterzogen werden. Nachfolgend sind diese Funktionen aus Gründen der Vollständigkeit im Überblick dargestellt [79]:

- Verstärkung im Tiefereinbau oder teilweisen Tiefereinbau (I_VT)

$$EP_{I_{VT}} = \frac{EP_{I_{VT},12}}{29,7} \cdot (4,5 + 2,1 \cdot D_{\text{Verstärkung}}) \quad \text{Gl. 8}$$

EP_{I_VT}..... Einheitspreis Verstärkung im Tiefeinbau oder teilweisen Tiefeinbau in [€/m²]

EP_{I_VT,12} Einheitspreis Verstärkung im Tiefeinbau oder teilweisen Tiefeinbau für
Gesamtverstärkungsdicke von 12cm (Decke + geb. bit. TS) in [€/m²]

D_{Verstärkung} Dicke Verstärkung in [cm]

- Erneuerung in Asphaltbauweise (E_AS)

$$EP_{E_AS} = \frac{EP_{E_AS,LK25}}{51,0} \cdot [1 + 2 \cdot (2,8289 \cdot \ln(\text{BNLW} \cdot 1.000.000)) - 23.113] \quad \text{Gl. 9}$$

EP_{E_AS}..... Einheitspreis Erneuerung in Asphaltbauweise [€/m²]

EP_{E_AS,LK25} Einheitspreis Erneuerung in Asphaltbauweise Lastklasse LK25 gem.
RVS 03.08.63 [€/m²]

BNLW Bemessungsnormlastwechsel in Mio. gem. RVS 03.08.63

Nach [79] konnte eine Abhängigkeit der Einheitspreise von der Dicke der Betondecke, anhand der zur Verfügung stehenden Daten und Informationen auf den Autobahnen und Schnellstraßen in Österreich, nicht eindeutig nachgewiesen werden, da die Abhängigkeit von der Dicke deutlich innerhalb der Schwankungsbreite der Preise liegt.

5.6.5.3 Kostendaten Schweiz

Die Schweizer Norm SN 640 907 behandelt „Grundlagen zur Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement EM“ [65]. In dieser werden Maßnahmenkosten für verschiedene Maßnahmen an Straßen angegeben. Hieraus lassen sich die nachfolgend aufgeführten Maßnahmenkategorien unterscheiden.

Reparaturen und Instandhaltungen werden aufgrund ihrer geringen Bedeutung für den Technischen Anlagenwert von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Tabelle 46: (gekürzte) Einteilung der Maßnahmen an Straßen in Asphalt- und Betonbauweise in der Schweiz [65]

Maßnahmen	Asphaltbauweise	Betonbauweise
Instandsetzung	z. B. Deckschichtersatz bis 40 mm	z. B. Deckschichtüberzug 40 mm
Verstärkungen	z. B. Deck- und Binderschicht bis 100 mm, Oberbauverstärkungen	z. B. Fahrbahnverstärkung 100 bis 180 mm
Erneuerung	z. B. Gesamt- oder Teilerneuerung (3-schichtig), Gesamt- oder Teilerneuerung Straßenoberbau bis 600 mm	
Neubau, Ersatz	Neubau, Umgestaltung, Gesamterneuerung inkl. Abschlüsse, Verkehrslastenwechsel	Neubau, Umgestaltung, Plattenersatz

Die Klassifizierung nach Ausrüstungs- und Konstruktionsindikator folgt genau den gleichen Bedingungen wie in Deutschland und Österreich. Dem Konstruktionsindikator zugehörig sind gebundene Tragschichten, ungebundene Tragschichten und der Unterbau. Deck- und Binderschicht gehören zu den Anlagenteilen des Ausrüstungsindikators.

Ähnlich wie in Deutschland ist ein Zugriff auf Datenbanken oder Übersichten zu aktuellen Kostenkennwerten im Straßenbau nicht möglich. Fortan wird bei Kostensätzen für Maßnahmen an der Fahrbahn auf das schweizerische Regelwerk SN 640 907 [65] verwiesen. Die dort hinterlegten Kostensätze stammen aus anderen Normen, Analysen und von Forschungsberichten aus der Schweiz und dem Ausland sowie aus Datenerhebungen bei Bund, Kantonen und Gemeinden in den letzten zehn Jahren.

Die zur Verfügung stehenden Kostensätze für Maßnahmen an bitumenhaltigen Fahrbahnen (Basis 2011) gliedern sich in Nationalstraßen, Kantonsstraßen außerorts und Straßen innerorts. Hier werden aufgrund des Projektzuschnitts des TAniA-Projekts nur die Nationalstraßen betrachtet. Dabei sind mögliche Spannweiten für die Kosten je Fläche (CHF/m²) hinterlegt.

Der Fokus der Aufbereitung der verfügbaren Kostenkennwerte zum Straßenoberbau liegt auf der Indizierung der Werte auf das Vergleichsjahr 2018. Mittels des sich jährlich aktualisierten Schweizerischen Baupreisindex kann die Umrechnung der Kostenkennwerte

auf das Jahr 2018 erfolgen. Die genutzten Indizes sind direkt beim Schweizerischen Bundesamt für Statistik abrufbar.

Für die Umrechnung der Kostenkennwerte wurde ein Mittelwert des Baupreisindex für das Jahr 2011 errechnet. Gleiches gilt für den Baupreisindex für das Vergleichsjahr 2018. Auf Basis der berechneten Mittelwerte werden die Kosten aus dem Jahr 2011 auf das Jahr 2018 umgerechnet bzw. indiziert. Das Ergebnis der Indizierung für bitumenhaltige Schichten und Betonfahrbahnen ist in den nachfolgenden Tabellen dargestellt (siehe Tabelle 47 und Tabelle 48). Zur Bestimmung des Technischen Anlagenwerts des Straßenoberbaus in der Schweiz werden die folgenden Kennzahlen herangezogen.

Tabelle 47: Maßnahmenkosten für bitumenhaltige Schichten an Nationalstraßen in der Schweiz (Preisbasis 2018)

Maßnahme	Maßnahmenkosten 2018 [CHF/m ² Maßnahme]		
	Min	Max	Mittelwert
Instandsetzung z. B. Deckschichtersatz bis 40 mm	22,74	51,68	37,21
Verstärkungen z. B. Deck- und Binderschicht bis 100 mm, Oberbauverstärkung	46,51	103,35	74,93
Erneuerung z. B. Gesamt- oder Teilerneuerung (3-schichtig), Gesamt- oder Teilerneuerung Strassenoberbau bis 600 mm	103,35	165,36	134,36
Neubau, Ersatz Neubau, Umgestaltung, Gesamterneuerung inkl. Abschlüsse, Verkehrslastklassenwechsel	165,36	248,05	206,70

Tabelle 48: Maßnahmenkosten für Betonfahrbahnen in der Schweiz (Preisbasis 2018) [77]

Maßnahme	Maßnahmenkosten 2018 [CHF/m ²]		
	Min	Max	Mittelwert
Instandsetzung Deckschichtüberzug 4 cm	34,11	56,84	45,47
Verstärkungen Fahrbahnverstärkungen 10 bis 18 cm	56,84	103,35	80,10
Erneuerung	87,85	206,70	147,28
Neubau, Ersatz Neubau, Umgestaltung, Plattenersatz	372,07	465,09	418,58

5.6.6 Kosten Erhaltungsmaßnahmen Brücken

5.6.6.1 Kostendaten Deutschland

Zum Zeitpunkt dieses Berichtes konnten keine Kostendaten für Brückenbauwerke in Deutschland zur Verfügung gestellt werden. Gegebenenfalls liegen auf Ebene der Bundesländer Kostenkataloge vor, die etwa bei der Kalkulation der Ausschreibungshöhen angesetzt werden. Diese sind allerdings für das Projektteam zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht zugänglich.

Ähnlich wie in Österreich sollten daher zukünftig Kostendaten bei der Durchführung von Neubau-, Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen einheitlich gesammelt und zusammengefasst werden. Dabei sollten für die Erfassung der Kostendaten gewisse Mindeststandards und -anforderungen gelten.

5.6.6.2 Kostendaten Österreich

In gleicher Weise wie beim Straßenoberbau kann auch bei den Brücken auf die Baukennzahlen der ASFINAG (Preisbenchmarks) [14] zurückgegriffen werden.

Unter Bezugnahme auf die Festlegungen der ASFINAG Lebenszyklusanalyse Brücken aus dem Jahr 2019 [83], kann für TAniA auch im Bereich der Brücken eine zielorientierte Zuordnung in Maßnahmenkategorien sowie zu den jeweiligen Indikatoren vorgenommen werden. Anhand dieser Clusterung erfolgt die Zuordnung von Maßnahmenkosten in Österreich.

Tabelle 49: Bauteilbezogene Maßnahmenliste zur Erhaltung des Brückenbauwerks nach [83]

Abkürzung	Beschreibung	Zuordnung zu Indikator
BT1UntBE	Erneuerung Unterbau	Konstruktionsindikator
BT2UebBE	Erneuerung Überbau	Konstruktionsindikator
BT3LagE	Erneuerung Lager	Ausrüstungsindikator
BT4FUGE	Erneuerung FÜG	Ausrüstungsindikator
BT5DeE	Erneuerung Belag (Decke)	Ausrüstungsindikator
BT6AbdE	Erneuerung Abdichtung / Entwässerung	Ausrüstungsindikator
BT7RBE	Erneuerung Randbalken	Ausrüstungsindikator
BT7AusrE	Erneuerung Ausrüstung	Konstruktionsindikator

Die Zusammenführung der bauteilbezogenen Erhaltungsmaßnahmen zu objektbezogenen Erhaltungsmaßnahmen kann nach [83] der nachfolgenden Tabelle 50 entnommen werden.

Tabelle 50: Objektbezogene Maßnahmenliste zur Erhaltung des Brückenbauwerks nach [83]

Abkürzung	Beschreibung	Zuordnung zu Indikator
I1	1. Instandsetzung: Erneuerung Belag und Fahrbahnübergangskonstruktion	Konstruktionsindikator
I2	2. Instandsetzung: Erneuerung Randbalken, Belag, Abdichtung, Ausrüstung, Entwässerung, Fahrbahnübergangskonstruktion, Lager, Korrosionsschutz und zusätzliche Betonsanierung	Konstruktionsindikator und Ausrüstungsindikator
I3	3. Instandsetzung: Erneuerung Belag und Fahrbahnübergangskonstruktion, zusätzliche Betonsanierung	Ausrüstungsindikator
I4 oder NB	Neubau oder 4. Instandsetzung mit Erneuerung Randbalken, Belag, Abdichtung, Ausrüstung, Entwässerung, Fahrbahnübergangskonstruktion, Lager, Korrosionsschutz und zusätzliche Betonsanierung (Wirkungsdauer >20 Jahre)	Konstruktionsindikator und Ausrüstungsindikator

In der nachfolgenden Tabelle 51 sind die Einheitspreise für die zuvor aufgelisteten Erhaltungsmaßnahmen dargestellt. Bei diesen Kosten handelt es sich um aktuelle Einheitspreise inkl. Nebenarbeiten mit Preisbasis 2020, die direkt aus dem BMS der

ASFINAG (dTIMS IMT Brücken) entnommen wurden. Sie basieren auf den Baukennzahlen der ASFINAG [14].

Tabelle 51: Maßnahmenkosten Erhaltungsmaßnahmen Brücken Österreich [83]

Abkürzung	Beschreibung	Zuordnung zu Indikator	Kosten [€]
BT1UntBE	Erneuerung Unterbau	Konstruktionsindikator	Gesamtfläche * 156 €
BT2UebBE	Erneuerung Überbau	Konstruktionsindikator	Gesamtfläche * 156 €
BT3LagE	Erneuerung Lager	Ausrüstungsindikator	Anzahl Lager * 6000 €
BT4FUGE	Erneuerung FÜG	Ausrüstungsindikator	FÜK Länge * 3000 €
BT5DeE	Erneuerung Belag (Decke)	Ausrüstungsindikator	Gesamtfläche * 31 €
BT6AbdE	Erneuerung Abdichtung / Entwässerung	Ausrüstungsindikator	Gesamtfläche * 99 €
BT7RBE	Erneuerung Randbalken	Ausrüstungsindikator	2 * Brückenlänge * 1300 €
BT7AusrE	Erneuerung Ausrüstung	Konstruktionsindikator	2 * Brückenlänge * 366 €

Für die Kostenberechnung eines Neubaus (Preisbasis €/m²) kann auf die nachfolgende Funktion zurückgegriffen werden, die aus Gründen der Vollständigkeit hier ebenfalls angeführt wird [83]:

$$EP_{\text{Neubau}} = 6,5509 \cdot \text{Stützweite}_{\text{max}} + 1413,9 \quad \text{Gl. 10}$$

EP_{Neubau} Einheitspreis Neubau Brücken [€/m²]

5.6.6.3 Kostendaten Schweiz

Die Recherche der Grundlagen hat gezeigt, dass es derzeit in der Schweiz keine allgemein gültigen Baukennzahlen für den Bereich der Brücken gibt. Dafür besitzt die ASTRA ein umfangreiches Managementinformationssystem Straße und Straßenverkehr (MISTRA), dessen Fachapplikation KUBA für Kunstbauten eine wesentliche Datengrundlage für die Darstellung des Technischen Anlagenwerts im Bereich der Brücken liefert.

Aus den übermittelten Daten der Schweizer KUBA-Datenbank konnten eine Reihe von Maßnahmenkosten je Bauteileinheit gewonnen werden. In Abbildung 28 ist die Anzahl an Datensätzen mit Maßnahmenkosten je Bauteileinheit [CHF/Einheit] pro Bauwerksteilgruppe

für Erhaltungsmaßnahmen mit Zustandsverbesserungen auf Zustand 1 zu sehen. Dabei ist zu erkennen, dass für Erhaltungsmaßnahmen von Zustand 4 auf 1 (Instandsetzungen und Erneuerungen) nur eine sehr geringe Datenmenge und für Verbesserungen von Zustand 5 auf 1 gar keine Daten zur Verfügung stehen. Zusätzlich ist aus der Analyse klar ersichtlich, dass für die Bauwerksteilgruppen Korrosions- & Oberflächenschutz, Mauer/Wand, Treppe, Unterirdische Bauwerksteile und Verkleidung keine Daten für Instandhaltungs-/Instandsetzungsmaßnahmen im Schweizer Datensatz vorhanden sind. Abbildung 29 zeigt die vorhandenen Datensätze für den Ersatz oder die Erneuerung von Bauteilen zur Verbesserung des Zustands auf 1. Hierbei ist zu erkennen, dass der Schweizer Datensatz nur eine sehr geringe Anzahl an Kosten für den Ersatz von Bauteilen enthält. Die Kosten des Austauschs von Fahrbahnübergangskonstruktionen für eine Zustandsverbesserung von 2 auf 1 stellt mit 4 Datensätzen die größte Menge an Werten dar.

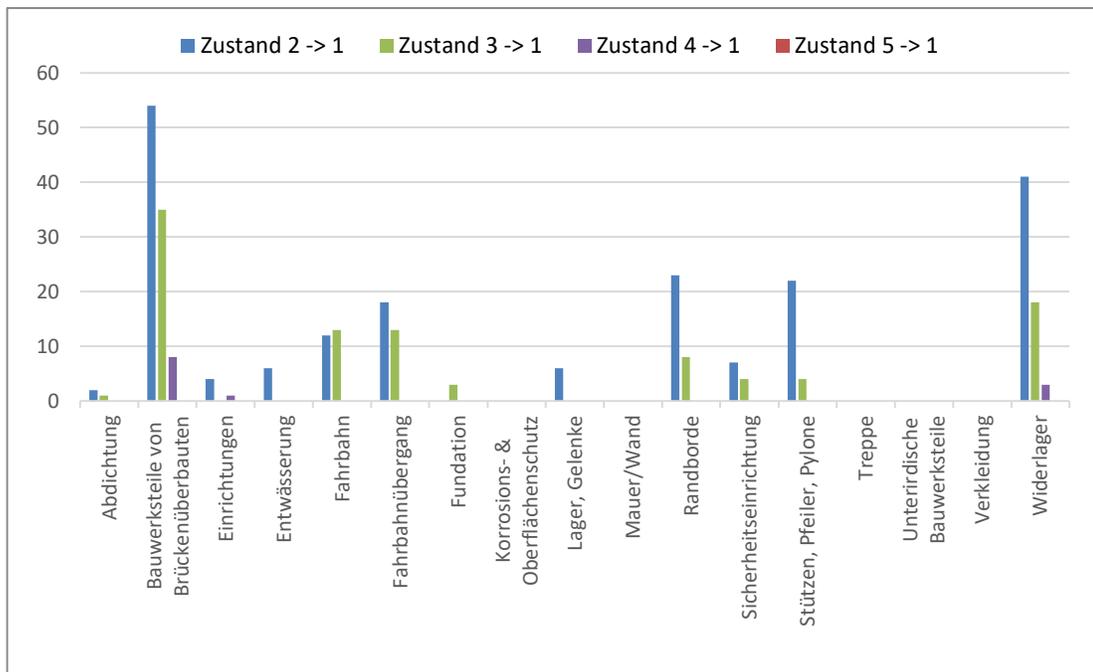


Abbildung 28: Anzahl an Datensätzen mit Maßnahmenkosten [CHF/Einheit] pro Bauwerksteilgruppe für Instandhaltungen des Schweizer Datensatzes [77]

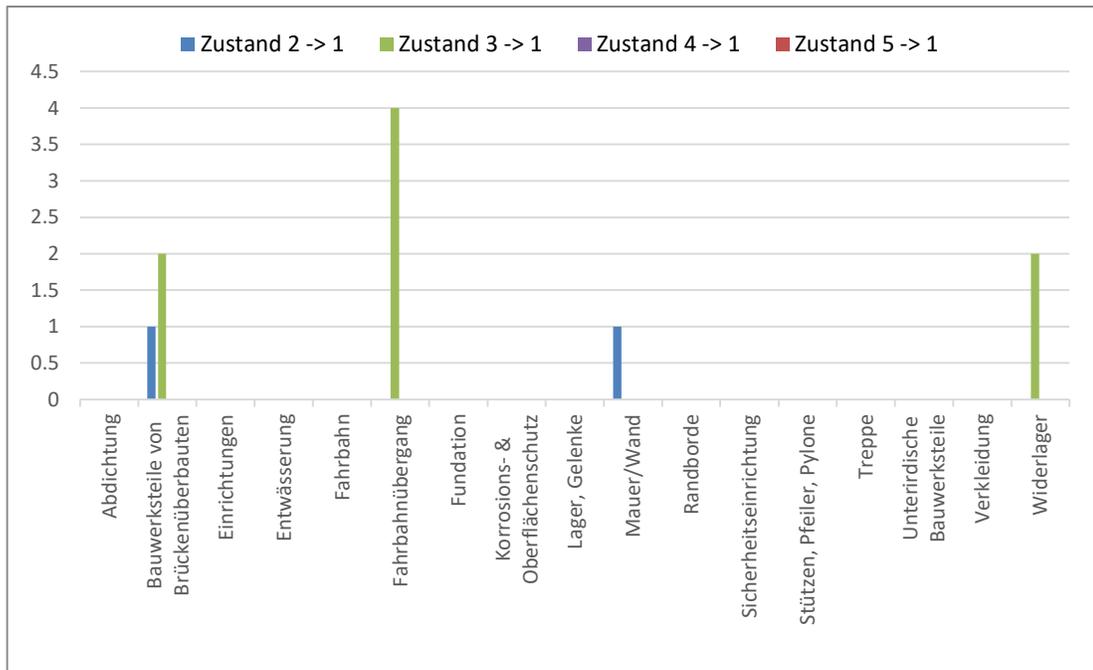


Abbildung 29: Anzahl an Datensätzen mit Maßnahmenkosten [CHF/Einheit] pro Bauwerksteilgruppe für Ersatz des Schweizer Datensatzes [77]

Bei der Ermittlung der Maßnahmenkosten für Brücken ist zu berücksichtigen, dass in der Schweizer KUBA-Datenbank nur eine geringe Anzahl an Werten für längerfristige Prognosen vorhanden ist. Insbesondere die Daten der Instandhaltungskosten je Bauteileinheit sind aufgrund fehlender Angaben zum Ausmaß der Bauwerksteile oder unplausibler Eintragungen zu den Kosten für eine zukünftige Verwendung in Prognosemodellen nicht zielführend. Diesbezüglich weist das Projektteam darauf hin, dass eine präzisere Sammlung der Maßnahmenkosten zu einer größeren Datenmenge und in weiterer Folge zu einer genaueren Ermittlung zukünftiger Kosten führt.

5.6.7 Kosten Erhaltungsmaßnahmen Tunnel (baulich und E&M)

5.6.7.1 Kostendaten Deutschland

Da zum Berichtszeitpunkt keine Kostendaten für bauliche und elektromaschinelle Anlagenteile von Tunnelbauwerken in Deutschland vorliegen, konnte keine Aufbereitung der Daten erfolgen.

5.6.7.2 Kostendaten Österreich

Auch bei den Tunneln kann auf eine umfassende Grundlage der ASFINAG zurückgegriffen werden. Einerseits bilden die Baukennzahlen bzw. Preisbenchmarks der ASFINAG für die baulich-konstruktiven Tunnelteile eine wesentliche Preisbasis (siehe [14]), darüber hinaus verwalten die Fachabteilungen der Bereiche Tunnel einen umfassenden Kostenkatalog für die unterschiedlichen E&M-Gewerke. Tabelle 52, auf der nachfolgenden Seite, ist ein Auszug aus den Baukennzahlentabellen der ASFINAG für die Tunnel.

Im Rahmen des österreichischen Forschungsprojektes OPTimAL [37] wurden die Erhaltungskosten im Detail untersucht und zu einem umfassenden Maßnahmenkatalog zusammengestellt, der auch die Einheitspreise aller E&M-Gewerke beinhaltet. In diesem Zusammenhang wird daher auf diesen Maßnahmen- und Kostenkatalog verwiesen (siehe [37]). Dieser Maßnahmen- und Kostenkatalog wurde auch in die dTIMS OPTimAL-Anwendung (dTIMS = Deighton Total Infrastructure Management System = Asset Management Software) implementiert und für die praktische Erprobung des in OPTimAL entwickelten Lebenszyklusrisikobewertungserfahrens herangezogen. Abbildung 30 zeigt das Ergebnis dieser Anwendung in Form eines Bildschirmausdrucks.

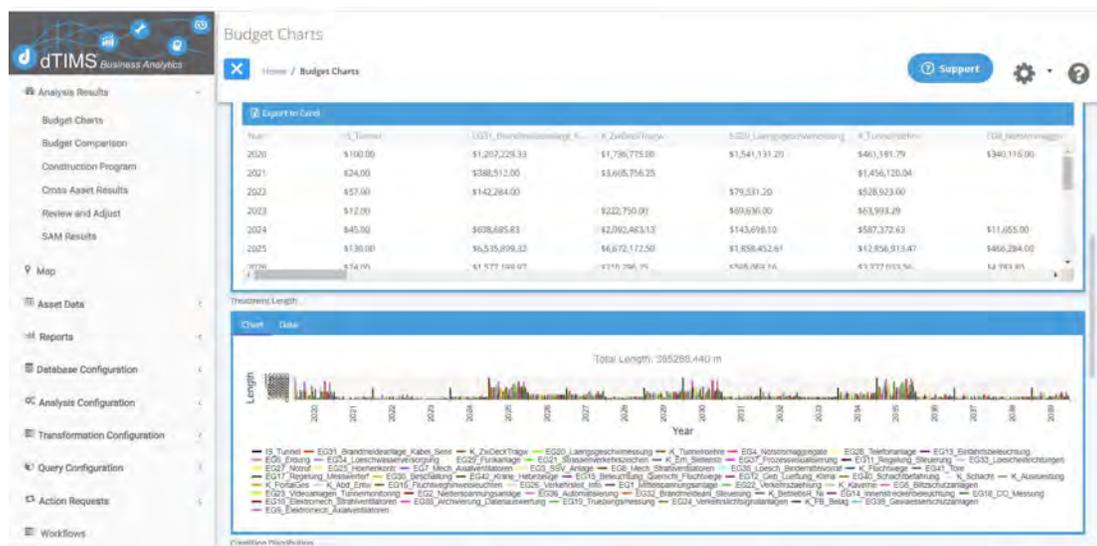


Abbildung 30: Bildschirmausdruck dTIMS OPTimAL-Anwendung mit Gewerke-bezogenen Maßnahmenkosten [37]

In der nachfolgenden Tabelle 52 sind die Einheitspreise für die Erhaltungsmaßnahmen dargestellt. Bei diesen Kosten handelt es sich um aktuelle Einheitspreise inkl. Nebenarbeiten mit Preisbasis 2020, die direkt aus dem Projekt OPTimAL [37] entnommen werden konnten.

Tabelle 52: Maßnahmenkosten Erhaltungsmaßnahmen Tunnel Österreich [37]

Abkürzung	Beschreibung	Zuordnung zu Indikator	Kosten [€/Röhren -m]
EG1_Mittelspannungsanlage	Mittelspannungsanlage	Ausrüstungsindikator	131,0
EG2_Niederspannungsanlage	Niederspannungsanlage	Ausrüstungsindikator	71,0
EG3_SSV_Anlage	SSV Anlage	Ausrüstungsindikator	51,0
EG4_Notstromaggregate	Notstromaggregate	Ausrüstungsindikator	42,0
EG5_Blitzschutzanlagen	Blitzschutzanlagen	Ausrüstungsindikator	14,0
EG6_Erdung	Erdung und Potentialausgleich	Ausrüstungsindikator	28,0
EG7_Mech_Axialventilatoren	Mechanische Anlagenteile Axialventilatoren	Ausrüstungsindikator	230,0
EG8_Mech_Strahlventilatoren	Mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	Ausrüstungsindikator	119,0
EG9_Elektromech_Axialventilatoren	E-mechanische Anlagenteile Axialventilatoren	Ausrüstungsindikator	750,0
EG10_Elektromech_Strahlventilatoren	E-mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren	Ausrüstungsindikator	107,0
EG11_Regelung_Steuerung	Regelung, Steuerung	Ausrüstungsindikator	50,0
EG12_Geb_Lueftung_Klima	Gebäudelüftung, Klimaanlage	Ausrüstungsindikator	71,0
EG13_Einfahrtsbeleuchtung	Einfahrtsbeleuchtung	Ausrüstungsindikator	124,0
EG14_Innenstrecken-beleuchtung	Durchfahrtsbeleuchtung	Ausrüstungsindikator	179,0
EG15_Beleuchtung_Querschl_Fluchtwege	Beleuchtung Querschläge/Fluchtwege	Ausrüstungsindikator	71,0
EG16_Fluchtweghinweis-leuchten	Fluchtweghinweis/-orientierungsleuchten	Ausrüstungsindikator	42,0
EG17_Regelung_Messwerterf	Regelung, Messwerterfassung	Ausrüstungsindikator	34,0
EG18_CO_Messung	CO-Messung	Ausrüstungsindikator	49,0
EG19_Truebungsmessung	Trübungsmessung	Ausrüstungsindikator	35,0
EG20_Laengsgeschwsmessung	Längsgeschwindigkeitsmessung	Ausrüstungsindikator	28,0
EG21_Strassenverkehrszeichen	Straßenverkehrszeichen	Ausrüstungsindikator	14,0
EG22_Verkehrsaehlung	Verkehrszählung	Ausrüstungsindikator	21,0
EG23_Videoanlagen_Tunnelmonitoring	Videoanlagen	Ausrüstungsindikator	155,0
EG24_Verkehrslichtsignalanlagen	Verkehrslichtsignalanlagen	Ausrüstungsindikator	28,0
EG25_Hoehenkontr	Höhenkontrolle	Ausrüstungsindikator	35,0

Tabelle 52: Maßnahmenkosten Erhaltungsmaßnahmen Tunnel Österreich- Fortsetzung [37]

Abkürzung	Beschreibung	Zuordnung zu Indikator	Kosten [€/Röhren-m]
EG26_Verkehrsleit_Info	Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen	Ausrüstungsindikator	56,0
EG27_Notruf	Notruf	Ausrüstungsindikator	99,0
EG28_Telefonanlage	Telefonanlage (Festnetz)	Ausrüstungsindikator	14,0
EG29_Funkanlage	Funkanlage	Ausrüstungsindikator	141,0
EG30_Beschallung	Beschallungsanlage	Ausrüstungsindikator	113,0
EG31_Brandmeldeanlage Kabel_Sens	Brandmeldeanlage Kabel	Ausrüstungsindikator	71,0
EG32_Brandmeldeanl_Steuerung	Brandmeldeanlage Steuerung	Ausrüstungsindikator	85,0
EG33_Loescheinrichtungen	Löscheinrichtungen	Ausrüstungsindikator	35,0
EG34_Loeschwasserversorgung	Löschwasserversorgung	Ausrüstungsindikator	225,0
EG35_Loesch_Bindemittelvorrat	Lösch- und Bindemittelvorrat	Ausrüstungsindikator	14,0
EG36_Automatisierung	Automatisierung	Ausrüstungsindikator	174,0
EG37_Prozessvisualisierung	Prozessvisualisierung	Ausrüstungsindikator	174,0
EG38_Archivierung_Daten-auswertung	Archivierung / Datenauswertung	Ausrüstungsindikator	75,0
EG39_Gewaesserschutzanlagen	Gewässerschutzanlagen	Ausrüstungsindikator	42,0
EG40_Schachtbefahrung	Schachtbefahrung	Ausrüstungsindikator	13,0
EG41_Tore	Türen, Tore, Verkleidungen	Ausrüstungsindikator	183,0
EG42_Krane_Hebezeuge	Krane und Hebezeuge	Ausrüstungsindikator	13,0
K_Tunnelroehre	Tunnelröhre Geschlossene Bauweise Offene Bauweise Gemischte Bauweise	Konstruktionsindikator	383,0 ¹⁾ 938,0 ¹⁾ 661,0 ¹⁾
K_Ausruestung	Bauliche Ausrüstung	Ausrüstungsindikator	754,0
K_FB_Belag	Fahrbahn	Ausrüstungsindikator	770,0
K_Erh_Seitenstr	erhöhter Seitenstreifen	Ausrüstungsindikator	400,0
K_Abd_Entw	Abdichtung/Entwässerung	Ausrüstungsindikator	1088,0
K_Fluchtwege	Fluchtwege	Konstruktionsindikator	159,0
K_BetriebsR_Ni	Betriebsräume/Nischen	Konstruktionsindikator	116,0
K_ZwDeckTragw	Zwischendecke / Trennwand	Konstruktionsindikator	675,0
K_Schacht	Lüftungsschacht	Konstruktionsindikator	116,0
K_PortalGes	Portal / Gesims	Konstruktionsindikator	938,0

¹⁾ Die Kosten für das längenbezogene Anlagenteil Tunnelröhre werden in Abhängigkeit von der Zustandsnote bestimmt. Bei einer Zustandsnote von 3 wird ein Längenanteil von 20%, bei einer Zustandsnote von 4 ein Längenanteil von 40% und bei einer Zustandsnote von 5 ein Längenanteil von 50% in den Kostenberechnungen berücksichtigt (siehe hierzu Forschungsprojekt OPTimAL [37]).

5.6.7.3 Kostendaten Schweiz

Aufgrund der fehlenden Daten für die baulichen und elektromaschinellen Anlagenteile von Tunnelbauwerken in der Schweiz, konnte keine Aufbereitung der Daten erfolgen.

5.6.8 Anwendungsgrenzen und -bereiche von Erhaltungsmaßnahmen

Die Anwendungsgrenzen der Erhaltungsmaßnahmen definieren jenen Zustand, ab welchem eine Erhaltungsmaßnahme technisch begründbar durchgeführt werden kann. Dabei spielt vor allem der Zustand der Anlage oder des Anlagenteils eine wesentliche Rolle. In der Regel ist auch die Intensität der Erhaltungsmaßnahme wesentlich vom Zustand der einzelnen Anlagenteile abhängig. So können sich die Erhaltungsmaßnahmen bei einem bestimmten Zustand des Ausrüstungsindikators deutlich von Erhaltungsmaßnahmen bei gleichem Zustand des Konstruktionsindikators unterscheiden. Da in den meisten Fällen nicht von strikten Anwendungsgrenzen einer bestimmten Erhaltungsmaßnahme ausgegangen werden kann, müssen auch „Anwendungsbereiche“ für bestimmte Erhaltungsmaßnahmen verwendet werden, die in den meisten Fällen mit bestimmten Zustandsklassen übereinstimmen. Unter Heranziehung der Grundlagen, die in den unterschiedlichen Maßnahmenkatalogen zur Verfügung stehen, ist eine Zuordnung von Erhaltungsmaßnahmen und Anwendungsbereichen in Form von Zustandsklassen möglich und somit die Ausgangslage für die Ermittlung des gesuchten Zusammenhangs zwischen dem Technischen Anlagenwert und den Erneuerungskosten (siehe hierzu Kapitel 6.1) gegeben.

5.6.9 Diskontierung

Die Berechnung des Technischen Anlagenwerts basiert innerhalb des Projekts TAniA auf der Barwertberechnung im Sinne der Finanzmathematik. Dabei handelt es sich um jenen Wert, den eine zukünftige Zahlung in der Gegenwart unter Berücksichtigung von Zinseszinsen besitzt. Dieser Rechenvorgang wird als Abzinsung (Diskontierung¹¹) definiert [77].

¹¹ In Österreich wird auch häufig der Begriff „Valorisierung“ verwendet. Dabei handelt es sich aber nur um die Anpassung eines Wertes an die Teuerungsrate, die Inflation. Bei der Diskontierung geht es jedoch auch um die Berücksichtigung einer (theoretischen) Verzinsung, also einer werterhöhenden Wirkung.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der Wert des Anfangskapitals (Barwert) K^{bar} mit Hilfe des Werts des Endkapitals (Endwert) K^{end} , einem gleichbleibenden festgelegten Zinssatz i und einer festgelegten Laufzeit von n Jahren ermittelt werden kann. Bei Bedarf wird auch die Inflationsrate π berücksichtigt. Der Barwert einer zukünftigen Kapitalinvestition kann durch Multiplikation des zukünftig benötigten Endwerts mit dem zugehörigen Abzinsungsfaktor berechnet werden. Dabei gelten für eine einmalige Investition die folgenden finanzmathematischen Formeln (vgl. Kruschwitz [32]):

$$q = 1 + i - \pi \quad \text{Gl. 11}$$

$$K^{bar} = K^{end} \cdot q^{-n} \quad \text{Gl. 12}$$

mit

- q Zinsfaktor
- i Zinssatz
- π Inflationsrate
- n Laufzeit [Jahren]
- K^{end} Endwert des Kapitals [€, CHF]
- K^{bar} Barwert des Kapitals [€, CHF]

Geht man davon aus, dass jährlich ein gleichbleibender Betrag zusätzlich investiert wird, wie beispielsweise bei der Aufteilung von Erhaltungskosten durch einen jährlichen Faktor, so muss die zuvor eingeführte Formel erweitert werden. Hierbei wird in der Finanzmathematik von einer geometrischen Reihe des Ab- bzw. Aufzinsungsfaktors ausgegangen, wodurch man durch Umformungen zur Berechnungsformel des Endwerts nach n Jahren gelangt [77]:

$$K^{end} = K_j \cdot \frac{q^n - 1}{i} \quad \text{Gl. 13}$$

mit

- q Zinsfaktor
- i Zinssatz
- n Laufzeit [Jahren]
- K^{end} Endwert des Kapitals [€, CHF]
- K^{bar} Barwert des Kapitals [€, CHF]
- K_j jährlicher Kapitalzuwachs [€, CHF]

Bei einer Berücksichtigung von Jahren, in denen die (ev. veränderlichen) Zinssätze und Inflationsraten bekannt sind, lauten die finanztechnischen Formeln abgewandelt:

$$q_j = 1 + i_j - \pi_j \quad \text{Gl. 14}$$

$$K^{\text{end}} = K^{\text{bar}} \cdot \prod_{j=1}^n q_j \quad \text{Gl. 15}$$

mit

j Index des jeweiligen Jahres

q_j Zinsfaktor des Jahres j

i_j Zinssatz des Jahres j

π_j Inflationsrate des Jahres j

n Laufzeit [Jahren]

K^{end} Endwert des Kapitals [€]

K^{bar} Barwert des Kapitals [€]

Geht man davon aus, dass bei der Ermittlung des Technischen Anlagenwerts über einen Zeitraum von mehreren Jahren unterschiedlich hohe Investitionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (t_1, t_2, \dots, t_x) anfallen und zusätzlich eine laufende Instandhaltung über eine gleichbleibende jährliche Investition berücksichtigt wird, so ist folgende Summenformel zu berücksichtigen:

$$K^{\text{end}} = \sum_{x=1}^m K_{t_x}^{\text{bar}} \cdot q^{n(t_x)} + K_j \cdot \frac{q^n - 1}{i} \quad \text{Gl. 16}$$

mit

q Zinsfaktor

i Zinssatz

π Inflationsrate

n Laufzeit [Jahren] der jährlichen Investition

$n(t_x)$ Laufzeit [Jahren] abhängig vom Zeitpunkt t_x

K^{end} Endwert des Kapitals [€, CHF]

$K_{t_x}^{\text{bar}}$ Barwert des Kapitals [€, CHF] zum Zeitpunkt t_x

K_j jährlicher Kapitalzuwachs [€, CHF]

6 MODELLIERUNG TECHNISCHER ANLAGENWERT UND ERNEUERUNGSWERT

6.1 Qualitativer Zusammenhang zwischen Technischem Anlagenwert und Zustand

Wie die Definition des Technischen Anlagenwerts in Kapitel 2.3 bereits aufgezeigt hat, ist der Erneuerungswert die Ausgangsgröße des Technischen Anlagenwerts. Der Erneuerungswert des entsprechenden Anlagenteils entspricht dabei dem Technischen Anlagenwert im besten Zustand (Zustandsnote 1 bzw. 0) [77].

Infolge von Abnutzung, Alter und Funktionsbeeinträchtigung vermindert sich der Technische Anlagenwert. Um Abnutzungserscheinungen und Funktionsbeeinträchtigungen entgegenzuwirken, sind Erhaltungsmaßnahmen notwendig, die einen Teil des Lebenszyklus darstellen (siehe Kapitel 5.1).

Zur Verbesserung des Zustandes bzw. für die Durchführung der erwähnten Erhaltungsmaßnahmen sind gewisse Aufwendungen in Form von Material, Geräten, Personal bzw. Löhnen usw. notwendig. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht spiegeln sich diese Aufwendungen in den Kosten der Erhaltungsmaßnahme wider. Die Summe der Kosten, die aufzuwenden sind, um den besten Zustand des Anlagenteils wiederherzustellen, ergeben den Betrag, um welchen sich der Technische Anlagenwert bis dahin abgemindert hat. Die Maßnahmenkosten für das Erreichen des bestmöglichen Zustandes (Neubauzustand) bilden daher die Differenz zwischen Erneuerungswert (also dem Technischen Anlagenwert im besten Zustand mit der Zustandsnote 1 bzw. 0) und aktuellem Technischen Anlagenwert. Somit wird der aktuelle Technische Anlagenwert eines Anlagenteils bestimmt, indem vom Erneuerungswert des Anlagenteils die durchschnittlichen Kosten für die Instandsetzungsmaßnahmen, die nötig sind, um aus dem gegenwärtigen Zustand den besten Zustand zu erreichen, abgezogen werden.

Der Verlauf des aktuellen Technischen Anlagenwerts eines Anlagenteils hängt vom Zustandsverlauf und vom Verlauf des Zusammenhangs zwischen Technischem Anlagenwert und Zustandsnote eines Anlagenteils ab. Der Verlauf des Zustandes ist aus Kapitel 5.1 bekannt. Der Verlauf des Zusammenhangs zwischen Technischem Anlagenwert und Zustandsnote eines Anlagenteils ist zu ermitteln. Die Bestimmung des Verlaufs des Technischen Anlagenwerts wird nachfolgend beschrieben.

6.1.1 Bestimmung des Erneuerungswerts

Der Erneuerungswert muss für jedes Anlagenteil der verschiedenen Anlagentypen bestimmt werden. Herangezogen werden können hier z. B. von Straßenbauverwaltungen ermittelte Neubaukennwerte für einzelne Anlagenteile, gängige Marktpreise oder Schätzungen aufgrund von ingenieurmäßigen Überlegungen. Natürlich gibt es hier infolge unterschiedlicher Einflussfaktoren deutliche Streuungen, sodass bei der praktischen Anwendung überlegt werden muss, ob lokale Kennwerte oder Mittelwerte, die über ein größeres Gebiet errechnet wurden, herangezogen werden. Dies hängt vom Anwendungsbereich ab: Wird ein gesamtes Bundesgebiet betrachtet, so sind wahrscheinlich Mittelwerte zielführender, im Vergleich zu projekt- oder streckenspezifischen Bewertungen, wo lokale Preise anzusetzen sind, vorausgesetzt, dass lokale Preise auch zur Verfügung stehen.

Der Erneuerungswert wurde, über die in Anhang B1 bis B3 aufgelisteten Erneuerungskosten, für die verschiedenen Länder ermittelt bzw. ausgewählt.

6.1.2 Zusammenführung Kosten und Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen

Für die Bestimmung des aktuellen Technischen Anlagenwerts sind verschiedene Informationen zu Erhaltungsmaßnahmen von Bedeutung (siehe hierzu Kapitel 5.6). Zum einen müssen die möglichen Erhaltungsmaßnahmen der Anlagenteile aller betrachteten Anlagentypen bekannt sein. Darüber hinaus muss bekannt sein, bei welchem Zustand welche Erhaltungsmaßnahmen relevant sind bzw. vom zuständigen Ingenieur gewählt werden.

Zudem müssen die Kosten, die bei den verschiedenen Erhaltungsmaßnahmen entstehen, bekannt sein. Hierbei kann beispielsweise auf Daten vergangener Maßnahmen zurückgegriffen werden. Dabei muss allerdings ggf. eine Diskontierung (siehe Kapitel 5.6.9) vorgenommen werden.

Des Weiteren muss die Wirkung der Erhaltungsmaßnahmen, bezogen auf die Veränderung des Zustands eines Anlagenteils sowie die Abhängigkeit von Erhaltungsmaßnahmen untereinander (Stichwort: Abhängigkeits-Erhaltungs-Matrix AEM), bekannt sein (siehe hierzu Kapitel 5.6.3). Hier wird in TAniA primär jener Fall betrachtet, bei dem der Zustand immer wieder auf die Zustandsnote 1 (bzw. 0 in der CH) verbessert wird. D. h. es werden in der Regel keine Erhaltungsmaßnahmen betrachtet, die den Zustand z. B. von Zustandsnote 3 auf Zustandsnote 2 verbessern. Wenn die Datenlage es zulässt oder wenn

die Vorgaben aus einer bereits vorhandenen Lebenszyklusbetrachtung im PMS, BMS oder TMS direkt übernommen werden (Variante A), können bzw. sollten aber auch Erhaltungsmaßnahmen berücksichtigt werden, die andere, geringere Zustandsveränderungen bewirken.

Um diese Informationen zu bestimmen, stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Sind Bestandsdaten vorhanden, können diese unter Berücksichtigung einer eventuellen Diskontierung (siehe Kapitel 5.6.9) verwendet werden. Hier muss eine Plausibilisierung der erhobenen Daten erfolgen und der Datensatz eine repräsentative Größe aufweisen. Darüber hinaus können Informationen aus Normen, Regelwerken oder ähnlichen Quellen entnommen werden. Zusätzlich stellt die ingenieurmäßige Bewertung von Kosten und Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen eine weitere Möglichkeit dar. Da die Qualität der durchgeführten Anlagenbewertung maßgeblich von den vorliegenden Kostenkennzahlen abhängig ist, sollte für eine zukünftige Anwendung des Technischen Anlagenwerts im Erhaltungsmanagement die Erfassung geeigneter Kostendaten priorisiert werden.

Im Rahmen des Kapitels 5 wurde sehr intensiv die Frage nach dem Ablauf von Erhaltungsmaßnahmen in einem Lebenszyklus diskutiert. Die daraus abgeleiteten Optionen ermöglichen die Zuordnung von Erhaltungsmaßnahmen zu einem bestimmten Zustand, sodass dies hier nicht mehr im Detail beschrieben werden muss. Voraussetzung für die Berechnung ist jedoch die Kenntnis, wann welche Erhaltungsmaßnahme zur Anwendung gelangt und welche Anlagenteile von dieser Maßnahme betroffen sind.

Die in den Anhängen B1 bis B3 im Detail beschriebenen Grundlagen bilden die nächste Eingangsgröße. Dabei sind die Kosten von jenen Erhaltungsmaßnahmen maßgebend, die zu einer vollständigen Beseitigung der Schäden bzw. zu einer Herstellung des Ausgangszustandes (ggf. unter Berücksichtigung von Toleranzen des Neubaus) führen. Die Auswahl der jeweiligen Maßnahmen und der damit verbundenen Kosten erfolgt durch die ingenieurmäßige Beurteilung dieser Maßnahmen von den Fachexperten der Straßenverwaltungen.

6.1.3 Auswertung

Aus der Differenz zwischen dem Erneuerungswert und den Kosten der Erhaltungsmaßnahmen lässt sich zumindest punktuell ein Zusammenhang darstellen, der anschließend wiederum einer ingenieurmäßigen Bewertung unterzogen werden muss. Das Ergebnis kann dabei durch eine Regressionslinie oder durch eine zwischen den ermittelten Punkten abgeleitete lineare Funktion dargestellt werden und auf den Anteil am

Erneuerungswert normiert werden. Die nachfolgende Abbildung 31 zeigt die zuvor beschriebene Vorgehensweise schematisch.

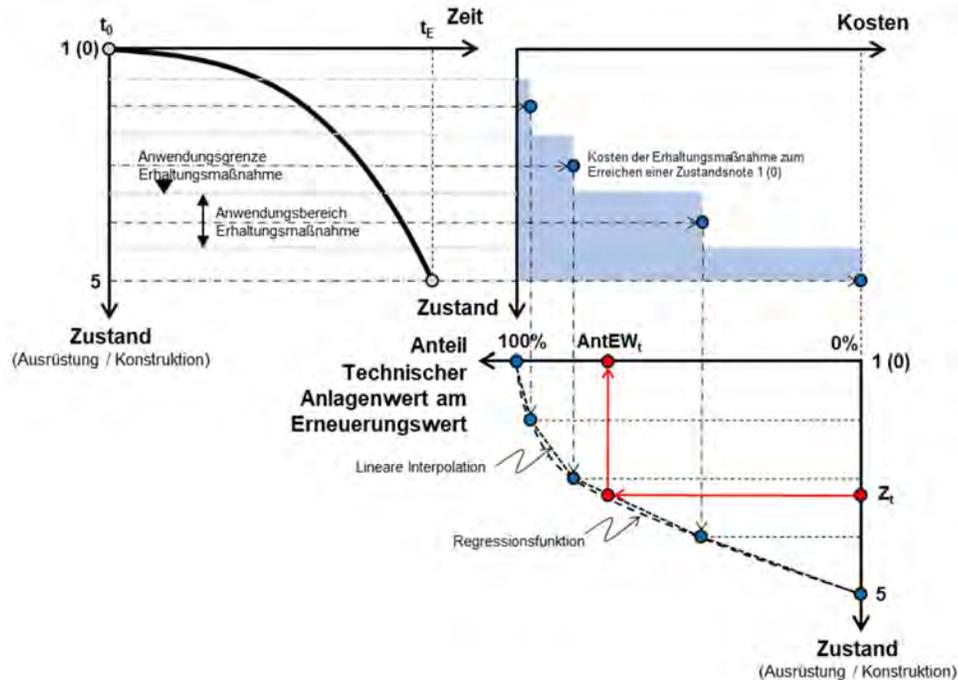


Abbildung 31: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW [77]

Über die Anwendungsgrenzen bzw. die Anwendungsbereiche der Erhaltungsmaßnahmen und die mit den Erhaltungsmaßnahmen verbundenen Kosten ist es möglich, ein Kosten-Zustands-Diagramm (rechtes oberes Diagramm in Abbildung 31) zu entwickeln.

Die Kosten für die komplette Erneuerung der Ausrüstung bzw. der Konstruktion liefern einen Anteil des Technischen Anlagenwerts am Erneuerungswert von 0% (Diagramm rechts unten Abbildung 31), da Investitionen in der Höhe des Erneuerungswertes notwendig sind, um einen ausgezeichneten Zustand wiederherzustellen. Hingegen ein Zustand, der noch „keine Maßnahmen“ erfordert, liefert einen Anteil des Technischen Anlagenwerts am Erneuerungswert von 100%, sodass sich daraus das rechte untere Diagramm transponieren lässt. Auch die Kennstellen des Kosten-Zustands-Diagrammes lassen sich nun einfach transponieren und liefern die Grundlage für die Ermittlung des Zusammenhanges zwischen dem Zustand und dem Technischen Anlagenwert,

ausgedrückt über den Anteil des Technischen Anlagenwerts am Erneuerungswert (*AntEW*). Es kann somit in Abhängigkeit vom Zustand (als Funktion der Zeit zu einem bestimmten Zeitpunkt t) dieser Anteil ermittelt werden (siehe rote Punkte im rechten unteren Diagramm), sofern sich die aus den relevanten „Stützpunkten“ aus der transponierten Kosten Zustandsfunktion (siehe blaue Punkte im rechten unteren Diagramm) ergebende Funktion mathematisch formulieren lässt. Dabei kann grundsätzlich sowohl auf eine Regressionsfunktion als auch auf eine lineare Interpolation zwischen den „Stützpunkten“ zurückgegriffen werden.

Die in den nachfolgenden Kapiteln 6.1.5 beschriebenen Zusammenhänge sind das Ergebnis der Datenauswertung (Erhaltungsmaßnahmen, Anwendungsgrenzen, Kosten Erhaltungsmaßnahmen) der zur Verfügung gestellten Daten. Dabei hat sich gezeigt, dass in den meisten Fällen eine Regressionsfunktion deutliche Abweichungen zu den „Stützpunkten“ liefert und eine lineare Interpolation die zur Verfügung gestellten Werte besser abbildet. Dies kann jedoch sehr einfach geändert werden. Derzeit ist eine solche Vorgehensweise jedoch nicht möglich und sinnvoll, weil dazu deutlich mehr Daten vorliegen müssen.

Darum wird hier nochmals explizit darauf hingewiesen, dass die den linearen Funktionen zu Grunde liegenden „Stützpunkte“ örtliche Schwankungen und Streuung aufweisen können und somit in jedem Anwendungsfall zu überprüfen und anzupassen sind. Der Grund liegt zum einen in den möglicherweise stark streuenden Zustandsverläufe, zum anderen in der Unsicherheit der Ermittlung der spezifischen Kosten der Erhaltung des Zustandes 1 (0). **Das Ergebnis der nachfolgenden Datenauswertungen liefert somit in erster Linie einen qualitativen Verlauf der Funktionen und keinen absolut gültigen Zusammenhang.**

6.1.4 Zusammenführung von Ausrüstung und Konstruktion zum gesamten Technischen Anlagenwert

Die Bestimmung des Technischen Anlagenwerts von mehreren Anlagenteilen eines Bauwerks bzw. für das gesamte Bauwerk erfolgt durch Aufsummieren der Technischen Anlagenwerte der einzelnen Anlagenteile des Bauwerks.

Grundsätzlich können sowohl die Anlagenteile als auch die Indikatoren individuell ausgewertet und auf eine Skala von 0 bis 100 normiert werden, jedoch ist für eine Gesamtbewertung eine Zusammenführung der monetären Werte erforderlich. Die monetären Werte zwischen Konstruktion und Ausrüstung sind in der Regel sehr

unterschiedlich, sodass in den meisten Fällen die Konstruktion den größten Anteil am Technischen Anlagenwert liefert. Die nachfolgende Funktion zeigt die Aufsummierung der Einzelwerte der Indikatoren bzw. der Anlagenteile zum gesamten Technischen Anlagenwert:

$$TAW_{t,I} = \sum_X TAW_{X,t} = \sum_X AntEW_{X,t} \cdot EW_X \quad \text{Gl. 17}$$

mit

$TAW_{t,I}$ Technischer Anlagenwert des Ausrüstungs- oder Konstruktionsindikators zum Zeitpunkt t in € oder CHF

$TAW_{X,t}$ Technischer Anlagenwert des Anlagenteils X zum Zeitpunkt t in € oder CHF

$AntEW_{X,t}$ Anteil Erneuerungswert am Technischen Anlagenwert des Anlagenteils X in %

EW_X Erneuerungswert Anlagenteil X

Der Übergang vom monetären zum normierten Technischen Anlagenwert ergibt sich dabei wie folgt:

$$TAW_{t,n} = \frac{\sum TAW_{t,I}}{\sum EW_X} \cdot 100 \quad \text{Gl. 18}$$

mit

$TAW_{t,n}$ normierter Technischer Anlagenwert des Ausrüstungs- oder Konstruktionsindikators zum Zeitpunkt t [0-100]

$TAW_{t,I}$ Technischer Anlagenwert des Ausrüstungs- oder Konstruktionsindikators zum Zeitpunkt t in € oder CHF

EW_X Erneuerungswert Anlagenteil X

6.1.5 Empfehlungen zur Ermittlung des Technischen Anlagenwertes über den Zustand der Anlagenteile

Die nachfolgenden Empfehlungen zur Ermittlung des Technischen Anlagenwertes bzw. des Anteils des Technischen Anlagenwertes am Erneuerungswert (*AntEW*) sind das Ergebnis der zuvor beschriebenen Untersuchungen und Bewertungen. Es wird im Rahmen einer praktischen Anwendung empfohlen, diese Vorschläge ingenieurmäßig zu überprüfen und ggf. mit vorhandenen Preisen entsprechend den örtlichen Gegebenheiten zu kalibrieren.

6.1.5.1 Straßenoberbau

Für den Anlagentyp Straßenoberbau werden ausschließlich die qualitativen Verläufe des Ausrüstungs- und Konstruktionsindikators unterschieden. Eine Darstellung der qualitativen Verläufe auf Ebene der Oberbauschichten ist nicht sinnvoll, da die verschiedenen Erhaltungsmaßnahmen jeweils die Schichten des Ausrüstungs- oder Konstruktionsindikators als Ganzes betreffen. Der qualitative Verlauf des Zusammenhangs zwischen Technischem Anlagenwert und Zustand ergibt sich für das Forschungsprojekt TAniA nach Tabelle 53 unter Heranziehung der zur Verfügung gestellten Daten. Der aktuelle Technische Anlagenwert im betrachteten Zustand wird, wie bereits zuvor beschrieben, dabei als prozentualer Anteil vom Erneuerungswert (= Technischer Anlagenwert im Zustand 1) dargestellt [77].

Tabelle 53: Qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den Straßenoberbau [77]

	Zustandsnote				
	1	2	3	4	5
Ausrüstungsindikator (SI Decke, GI)	100,0 %	99,2 %	68,0 %	40,0 %	0 %
Konstruktionsindikator (SI)	100,0 %	100,0 %	83,3 %	50,0 %	0 %

SI Decke Substanzwert Decke
GI..... Gebrauchswert
SI Substanzwert (Bestand bzw. Tragfähigkeit)

Beim Ausrüstungsindikator zeigt sich, dass bereits bei Auftreten einer Zustandsnote 2, durch notwendige Instandhaltungsmaßnahmen und deren Kosten, eine Reduktion des Anteils erkennbar ist. Beim Konstruktionsindikator hingegen werden in der Regel erst ab einer Zustandsnote 3 entsprechende Maßnahmen gesetzt, die wiederum zu einem neuwertigen Zustand führen. In den nachfolgenden Abschnitten wird dieser Verlauf grafisch dargestellt und eingehender erläutert.

Ausrüstungsindikator

In Abbildung 32 ist der qualitative Verlauf des Zusammenhangs zwischen dem Anteil des Technischem Anlagenwerts am Erneuerungswert und Zustand (ausgedrückt durch die

Zustandsnote) dargestellt. Dabei werden sowohl der lineare Verlauf des Zusammenhangs (links) als auch der stufenförmige Verlauf (rechts) abgebildet.

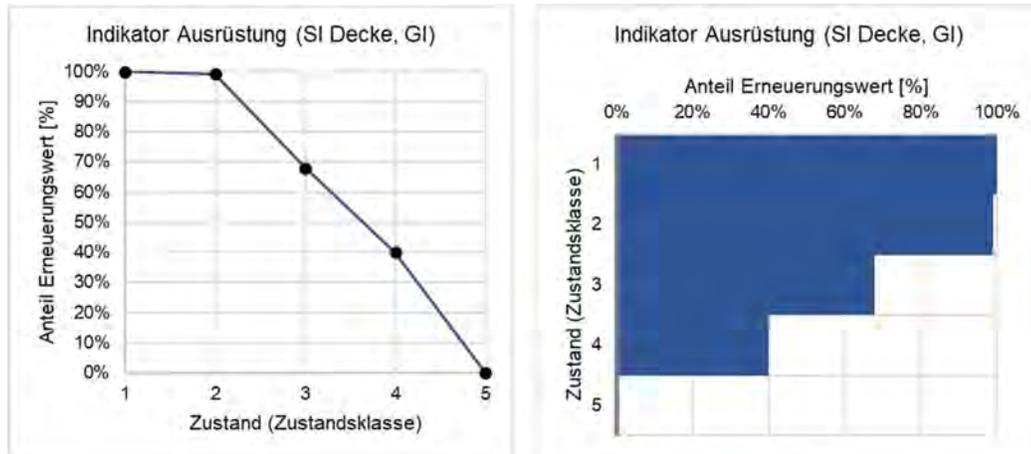


Abbildung 32: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den Ausrüstungsindikator Straßenoberbau

Typisch für den Straßenoberbau ist zunächst die konstante Entwicklung im Bereich der Zustandsklassen 1 bis 2, die auch den Toleranzbereich des Baus darstellen. Anschließend ist eine lineare Abnahme erkennbar, die vor allem auf die Entwicklung von Eigenschaften der Straßenoberfläche zurückzuführen ist.

Konstruktionsindikator

Eine deutlich stärkere Abnahme zeigt der Konstruktionsindikator, was in fast allen Fällen auch mit der Entwicklung der Tragfähigkeit von Oberbaukonstruktionen gleichgesetzt werden kann (siehe Abbildung 33).

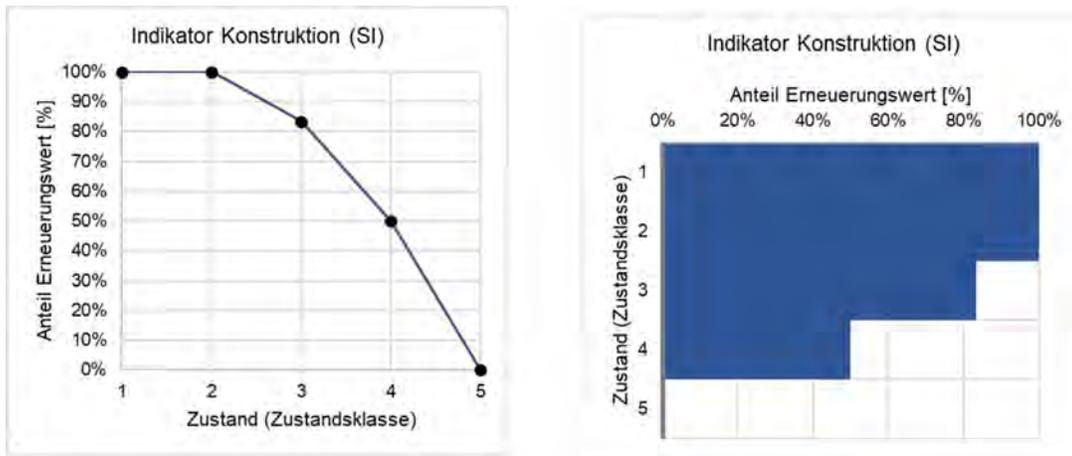


Abbildung 33: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den Konstruktionsindikator Straßenoberbau [77]

6.1.5.2 Brücken

Für den Anlagentyp der Brückenbauwerke werden verschiedene Anlagenteile betrachtet, die entweder dem Ausrüstungs- oder Konstruktionsindikator zuzuordnen sind.

Die Brückenobjekte zeigen dabei ein anderes Bild als der Straßenoberbau (ausgenommen Decke bzw. Brückenbelag). Die hohen Investitionen werden aus Sicherheitsgründen bereits bei einer Zustandsnote 4 durchgeführt, sodass ein Brückenobjekt erst gar nicht in die kritische Klasse 5 gelangen kann. Auch bei den Brücken ist zu erkennen, dass sich im Bereich der Klassen 1 und 2 nur eine geringfügige Abnahme des Wertes einstellt, da auch hier Toleranzen zu berücksichtigen sind bzw. in den meisten Fällen bei diesem Zustand keine bzw. nur kleinere Instandhaltungen durchgeführt werden. Der Wert eines Objektes bleibt damit im Wesentlichen erhalten. Aufgrund dieser Randbedingungen ergibt sich in den meisten Fällen eine S-Funktion, die aus Gründen der Vereinfachung in lineare Teilbereiche unterteilt ist. Ausnahmen bilden dabei, wie bereits erwähnt, der Fahrbahnbelag aber auch der Unterbau und zum Teil der Überbau. Sowohl Überbau als auch Unterbau sind die maßgebenden Tragelemente einer Brücke und deren Technischer Anlagenwert ist dabei wesentlich von der Entwicklung der Tragsicherheit bzw. Standsicherheit abhängig, ähnlich wie beim Konstruktionsindikator des Straßenoberbaus.

Die Tabelle 54 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Technischen Anlagenwert und der Zustandsnote für die genannten Anlagenteile von Brücken. Wichtig ist hier, dass sich der Erneuerungswert und damit die in Tabelle 54 angegebenen prozentualen Anteile bei den

Bauteilen des Ausrüstungsindikators auf eine vollständige Erneuerung beziehen. Bei den Bauteilen des Konstruktionsindikators (also für den Unter- und Überbau) trifft dies allerdings nicht zu. Dies liegt darin begründet, dass der Aufwand zur Herstellung einer funktionsfähigen Brücke, gemessen an den Erneuerungskosten (von Unter- und Überbau) und den damit einhergehenden volkswirtschaftlichen Folgen, erst im schlechten Zustand sinnvoll ist. Stattdessen wird bis zur Zustandsnote 4 davon ausgegangen, dass lediglich (Beton)Instandsetzungen (in der Tabelle abgekürzt mit BI) durchgeführt werden, die mit zunehmender Zustandsnote auch in größerem Umfang notwendig werden. Bei Zustandsnote 5 wird dann vom gesamten Ersatzneubau des Unter- bzw. Überbaus ausgegangen. Dementsprechend ergibt sich der Technische Anlagenwert in den Zustandsnoten 1 bis 4 aus 100 % der Erneuerungskosten abzüglich des prozentualen Anteils der Kosten für Instandsetzungen. Um den Technischen Anlagenwert bei Zustandsnote 5 in vollem Umfang wiederherzustellen, muss der volle Erneuerungswert aufgewendet werden.

Tabelle 54: Qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Anlagenteile von Brücken [77]

	Zustandsnote				
	1	2	3	4	5
Randbalken	100,0 %	85,0 %	60,0 %	10,0 %	0 %
Fahrbahnübergangs- konstruktion	100,0 %	90,0 %	10,0 %	0 %	0 %
Fahrbahnbelag	100,0 %	99,2 %	68,0 %	40,0 %	0 %
Lager	100,0 %	85,0 %	60,0 %	10,0 %	0 %
Abdichtung und Entwässerung	100,0 %	85,0 %	60,0 %	10,0 %	0 %
Sonstige Ausrüstung	100,0 %	85,0 %	60,0 %	10,0 %	0 %
Unterbau	100,0 % der Betonkubatur abzüglich				0 %
	0 % Kosten BI ¹⁾	20,0 % Kosten BI ¹⁾	50,0 % Kosten BI ¹⁾	100,0 % Kosten BI ¹⁾	
Überbau	100,0 % Betonkubatur abzüglich				0 %
	0 % Kosten BI ¹⁾	20,0 % Kosten BI ¹⁾	50,0 % Kosten BI ¹⁾	100,0 % Kosten BI ¹⁾	

1) BI = Betoninstandsetzungen

In den folgenden Abschnitten sind die Zusammenhänge für die verschiedenen Anlagenteile grafisch dargestellt sowie näher beschrieben.

Randbalken

Der Randbalken zählt zu den Bauteilen, bei denen davon ausgegangen wird, dass sie üblicherweise instandgesetzt werden und nur etwa einmal im Lebenszyklus erneuert werden. Da das Bauteil erst erneuert wird, wenn die erforderlichen Betoninstandsetzungen ein recht hohes Maß überschreiten, wird angenommen, dass die Abnahme bis zur Zustandsnote 3 40 % beträgt. Danach erfolgt eine sehr rasche Entwertung, da davon ausgegangen wird, dass ein Randbalken mit Zustandsnote 4 fast immer und mit Zustandsnote 5 immer vollständig erneuert werden muss (siehe Abbildung 34).

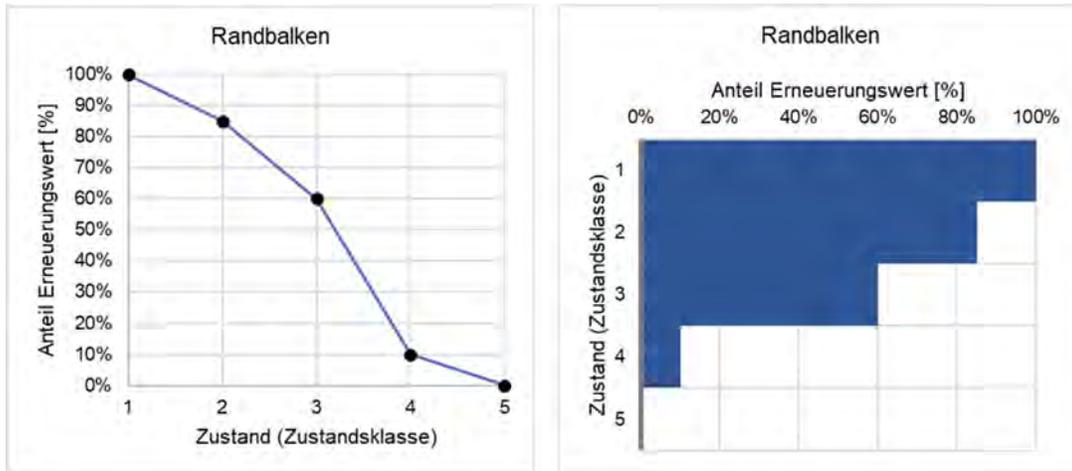


Abbildung 34: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Randbalken von Brücken [77]

Fahrbahnübergangskonstruktion

Die Fahrbahnübergangskonstruktion ist das einzige Bauteil der Brücke, bei dem davon ausgegangen wird, dass es bei jeder Instandsetzung erneuert werden muss. Da Instandsetzungen des Fahrbahnbelags häufig in einem Rhythmus von ca. 20 Jahren durchgeführt werden, erfolgt die Erneuerung häufig gemeinsam mit dem Belag aber auch vor dem Hintergrund des Risikos eines plötzlichen Versagens vor dem Erreichen der Zustandsnote 3 (siehe Abbildung 35).

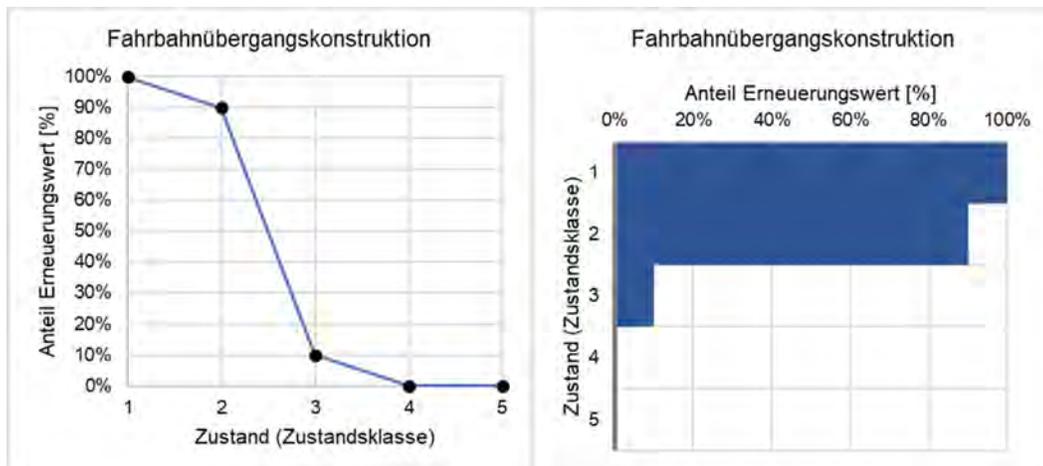


Abbildung 35: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Fahrbahnübergangskonstruktionen von Brücken [77]

Fahrbahnbelag

Für die Beschreibung des qualitativen Verlaufs zwischen Technischem Anlagenwert und Zustand (Abbildung 36) wird für den Brückenbelag auf Kapitel 6.1.5.1 (Ausrüstungsindikator Straßenoberbau) verwiesen.

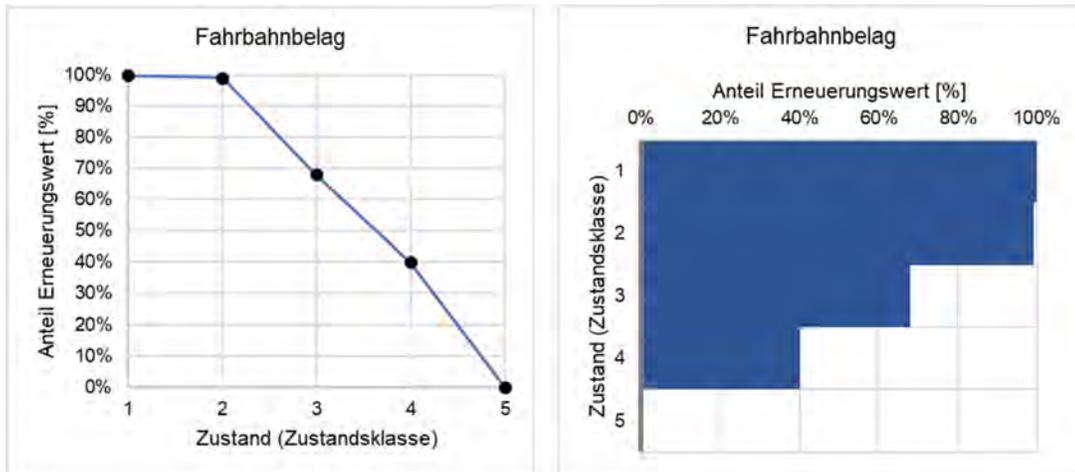


Abbildung 36: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Fahrbahnbeläge von Brücken [77]

Lager

Das Lager zählt, wie auch der Randbalken, zu den Bauteilen, bei denen davon ausgegangen wird, dass sie üblicherweise instandgesetzt werden und nur etwa einmal im Lebenszyklus erneuert werden müssen. Da das Bauteil erst erneuert wird, wenn Schäden ein recht hohes Maß überschreiten, wird hier ebenfalls angenommen, dass die Abnahme bis zur Zustandsnote 3 „nur“ 40 % beträgt. Danach erfolgt eine sehr rasche Entwertung, da davon ausgegangen wird, dass ein Lager mit Zustandsnote 4 fast immer und mit Zustandsnote 5 immer vollständig erneuert werden muss (Abbildung 37).

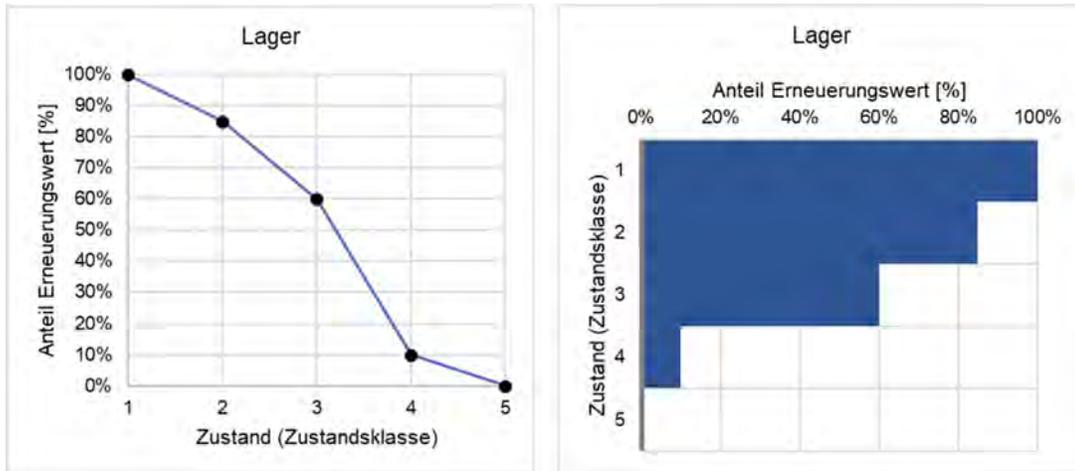


Abbildung 37: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Lager von Brücken [77]

Abdichtung und Entwässerung

Für Abdichtung und Entwässerung wird von der gleichen Erneuerungsstrategie ausgegangen, wie auch bei Lagern und Randbalken. Da das Bauteil erst erneuert wird, wenn Schäden ein recht hohes Maß überschreiten, wird wiederum angenommen, dass die Abnahme bis zur Zustandsnote 3 „nur“ 40 % beträgt. Danach erfolgt eine sehr rasche Entwertung, da davon ausgegangen wird, dass eine Abdichtung mit Zustandsnote 4 fast immer und mit Zustandsnote 5 immer vollständig erneuert werden muss (siehe Abbildung 38).

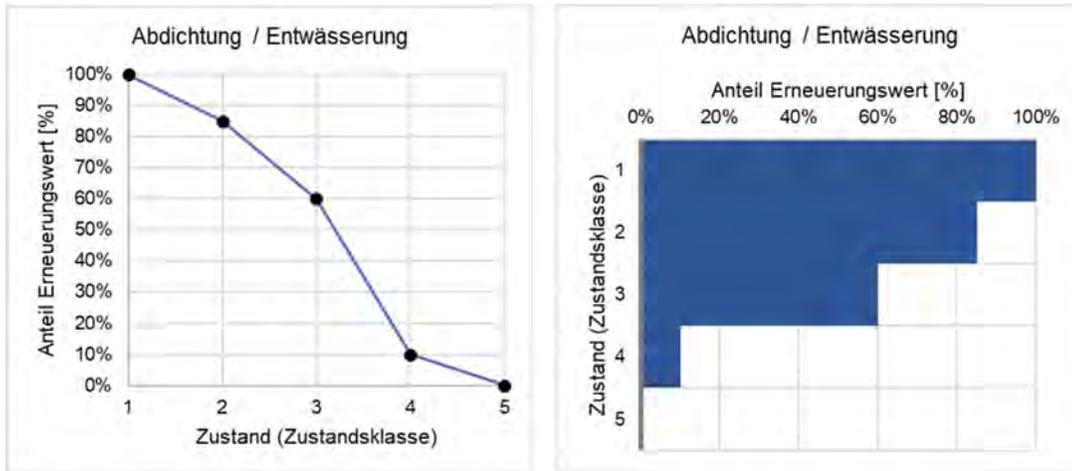


Abbildung 38: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Abdichtung und Entwässerung von Brücken [77]

Sonstige Ausrüstung

Hier gilt das gleiche wie bei Randbalken, Lager und Entwässerung, wie in Abbildung 39 ersichtlich.

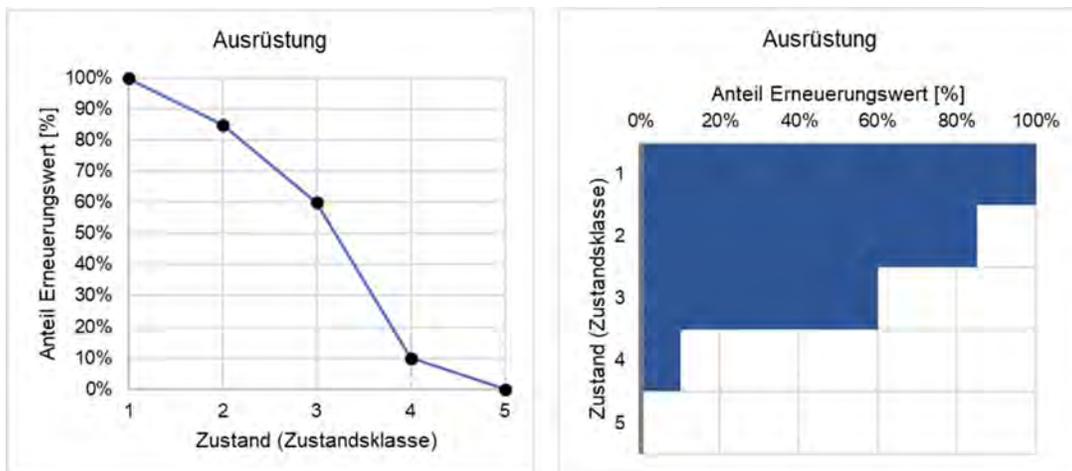


Abbildung 39: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die sonstige Ausrüstung von Brücken [77]

Unterbau

Wie eingangs ausgeführt, wird für den Unterbau bis zur Zustandsnote 4 davon ausgegangen, dass lediglich Betoninstandsetzungen mit steigendem Umfang durchgeführt werden. Bei Zustandsnote 5 muss dann allerdings mit einem vollständigen Ersatz des

Unterbaus gerechnet werden, sodass hier ein starker Abgang des Anteils am Erneuerungswert die Folge ist (Beispiel siehe Abbildung 40).

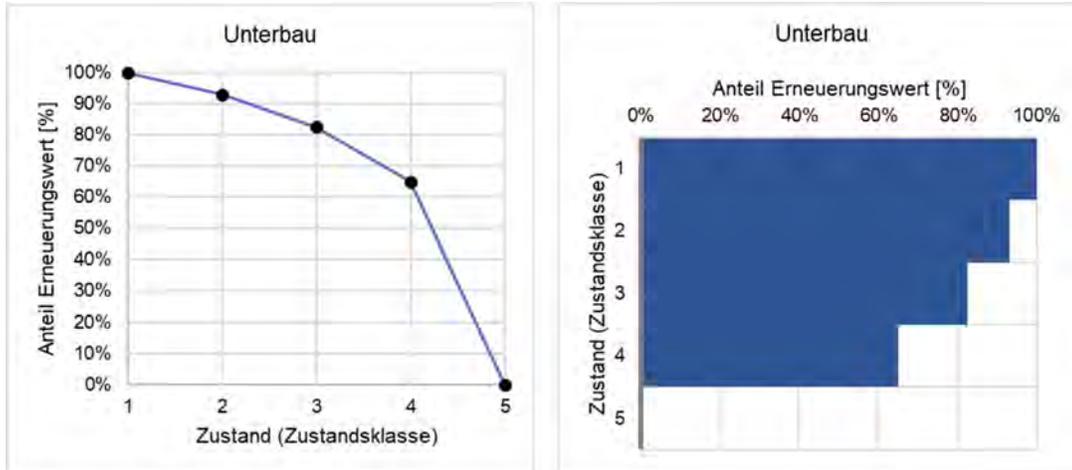


Abbildung 40: Beispiel eines linear interpolierten (links) und stufenförmigen (rechts) qualitativen Zusammenhangs TAW - Zustand für den Unterbau von Brücken [77]

Überbau

Hier gilt grundsätzlich dasselbe wie beim zuvor beschriebenen Unterbau, jedoch sind die Erhaltungsmaßnahmen bei besseren Zustandsnoten deutlich intensiver, was sich auch im beispielhaften Verlauf der Abbildung 41 erkennen lässt.

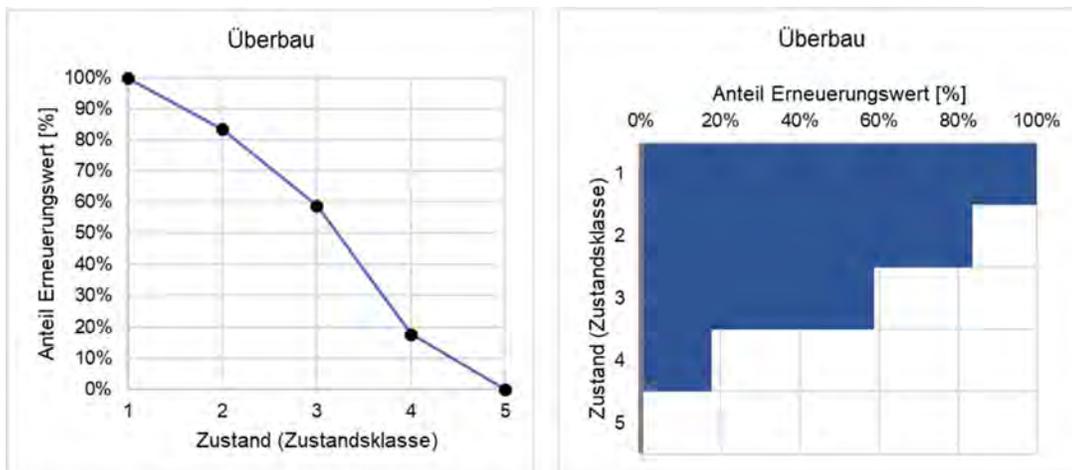


Abbildung 41: Beispiel eines linear interpolierten (links) und stufenförmigen (rechts) qualitativen Zusammenhangs TAW - Zustand für den Überbau von Brücken [77]

6.1.5.3 Tunnel baulich / E&M

Tunnelbauwerke können in zwei Anlagenarten unterschieden werden, Tunnel baulich und E&M-Anlagenteile.

In Tabelle 55 wird für diese Anlagenteile der qualitative Zusammenhang zwischen Technischem Anlagenwert und Zustandsnote aufgezeigt. Auch für diesen Anlagentyp wurde auf die in Kapitel 6.1.2 beschriebene Vorgehensweise zurückgegriffen, wobei auch die Ergebnisse der Brücken eine maßgebende Grundlage darstellen, um einen qualitativen Zusammenhang zwischen Zustand und Technischem Anlagenwert zu ermitteln.

Tabelle 55: Qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Anlagenteile von Tunneln [77]

	Zustandsnote				
	1	2	3	4	5
Abdichtung und Entwässerung	100,0 %	85,0 %	60,0 %	10,0 %	0 %
Ausrüstung	100,0 %	85,0 %	60,0 %	10,0 %	0 %
Fahrbahnbelag	100,0 %	99,2 %	68,0 %	40,0 %	0 %
Tunnelröhre	100,0 %	93,0 %	82,5 %	65,0 %	0 %
Erhöhter Seitenstreifen	100,0 %	85,0 %	60,0 %	10,0 %	0 %
Fluchtwege, Nischen, Schächte	100,0 %	93,0 %	82,5 %	65,0 %	0 %
Zwischendecke	100,0 %	83,6 %	58,9 %	17,8 %	0 %
Portal / Gesims	100,0 %	83,6 %	58,9 %	17,8 %	0 %
E&M-Ausrüstung	100,0 %	75,0 %	50,0 %	25,0 %	0 %

Die Verläufe der baulich-konstruktiven Anlagenteile für Tunnel wurden in Anlehnung an jene der Brückenobjekte definiert, da hierfür nur wenige Kosteninformationen zur Verfügung standen. Der im Kapitel 6.1.2 beschriebene S-Kurven-Verlauf erscheint auch für die meisten baulich-konstruktiven Anlagenteile sinnvoll und nachvollziehbar. Der Fahrbahnbelag verhält sich dabei ähnlich zum Ausrüstungsindikator Straßenoberbau. Die

Anlagenteile Tunnelröhre, Fluchtwege, Nischen und Schächte sind in Anlehnung an den Brückenunterbau definiert. Der Zusammenhang zwischen Zustand und Technischem Anlagenwert für die Zwischendecken und Portale ist ähnlich dem Überbau einer Brücke und zeigt somit einen flachen S-Kurven-Verlauf.

Eine deutlich andere Funktion liegt den E&M-Anlagenteilen zu Grunde. Da es sich um eine sehr heterogene Anlagengruppe handelt, die neben elektrischen und mechanischen Bauteilen auch elektronische und konstruktive Elemente aufweist. Daraus ergeben sich komplexe Zusammenhänge, die auch wesentlich vom Typ der Anlage, dem Hersteller und dem Ausmaß an unterschiedlichen Elementen abhängig sind. Aus diesem Grund wurde ein einfacher linearer Zusammenhang gewählt, der zumindest eine erste Näherung darstellt und somit eine mögliche Fehleinschätzung minimiert. Auch im Rahmen des österreichischen Forschungsprojektes OPTimAL [37] wurden fast ausschließlich lineare Verhaltungsfunktionen für die Modellierung der zeitabhängigen Änderung des Zustandes gewählt.

Abdichtung und Entwässerung

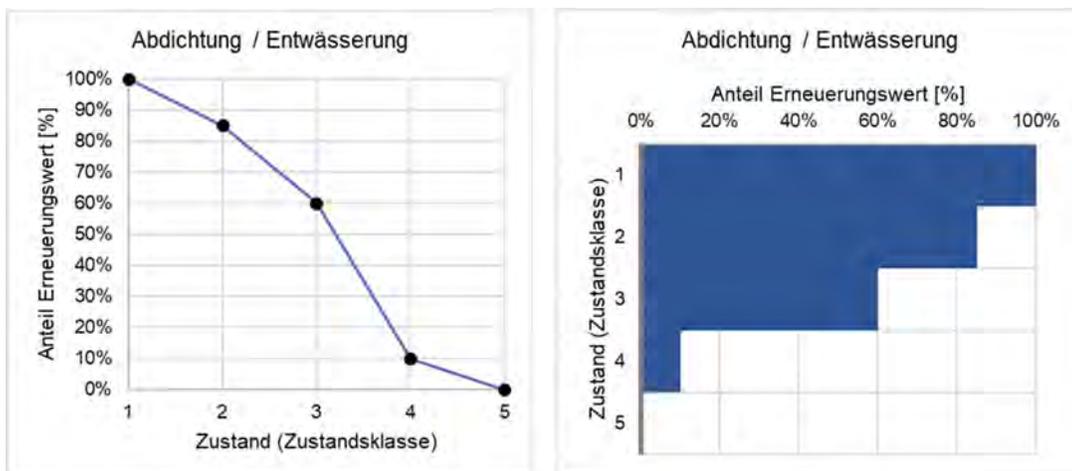


Abbildung 42: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Abdichtung und Entwässerung von Tunnelbauwerken [77]

Ausrüstung

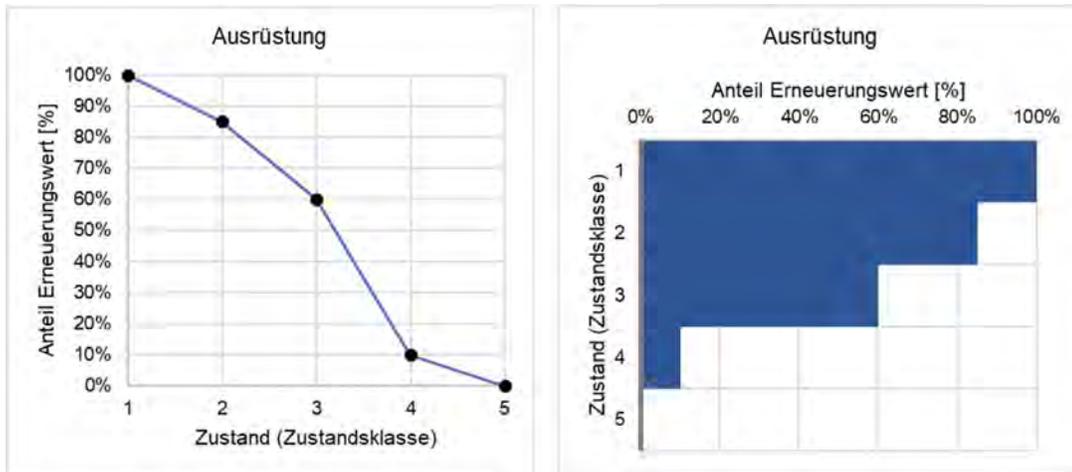


Abbildung 43: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Ausrüstung von Tunnelbauwerken [77]

Fahrbahnbelag

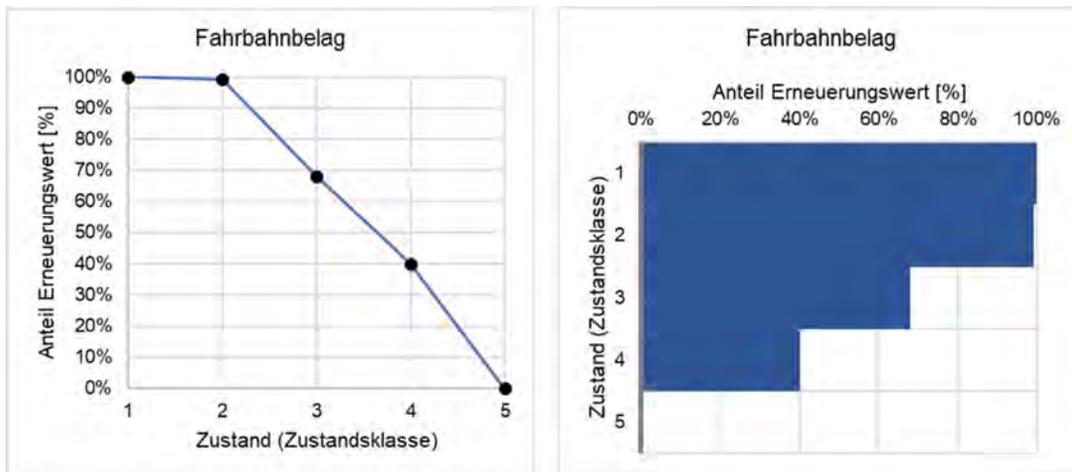


Abbildung 44: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den Fahrbahnbelag [77]

Tunnelröhre

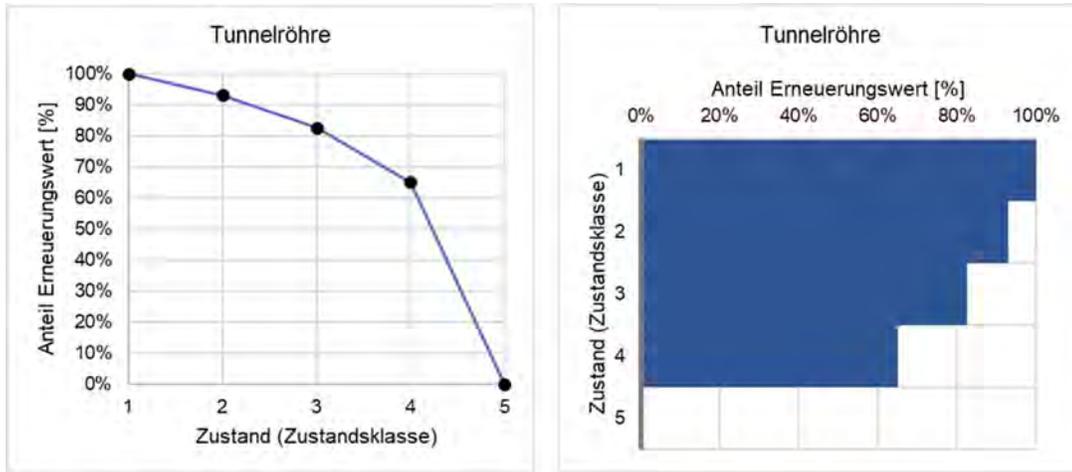


Abbildung 45: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Tunnelröhre von Tunnelbauwerken [77]

Erhöhter Seitenstreifen

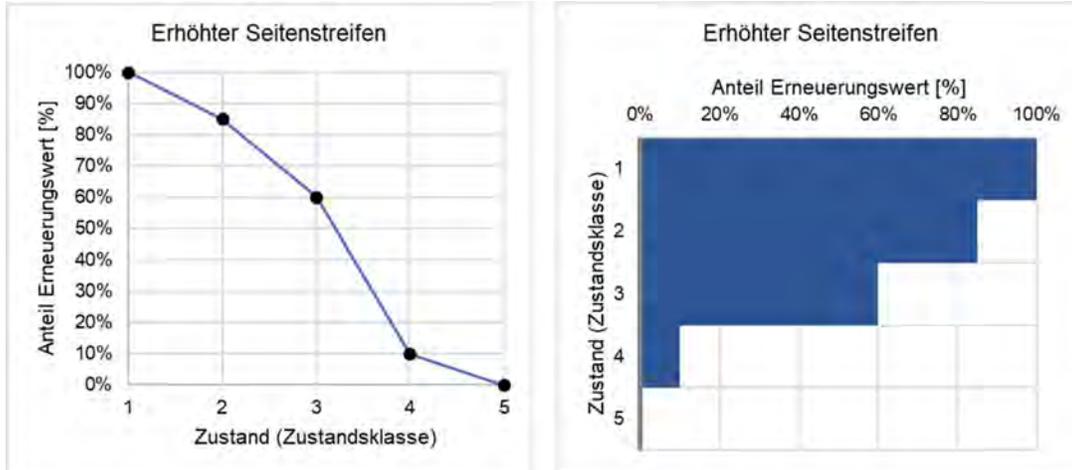


Abbildung 46: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den erhöhten Seitenstreifen von Tunnelbauwerken [77]

Fluchtwege, Nischen, Schächte

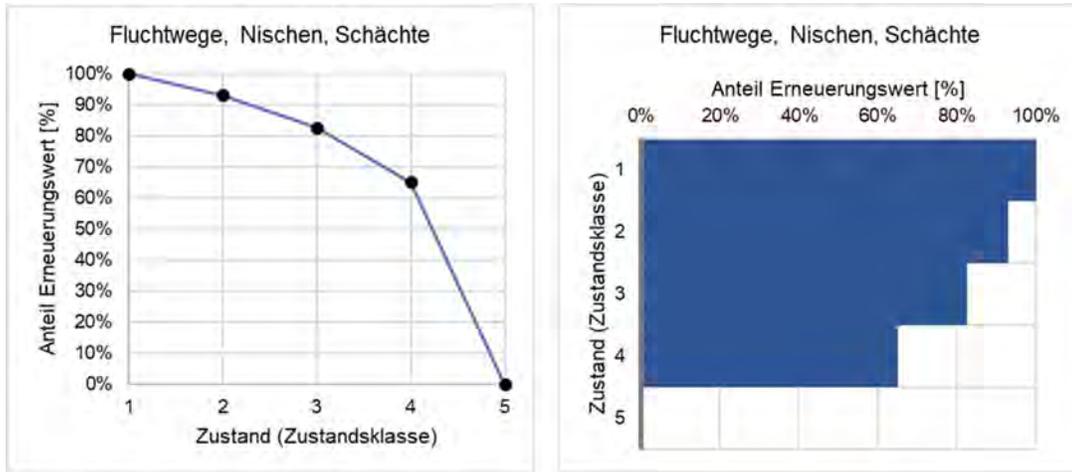


Abbildung 47: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Fluchtwege, Nischen und Schächte von Tunnelbauwerken [77]

Zwischendecke

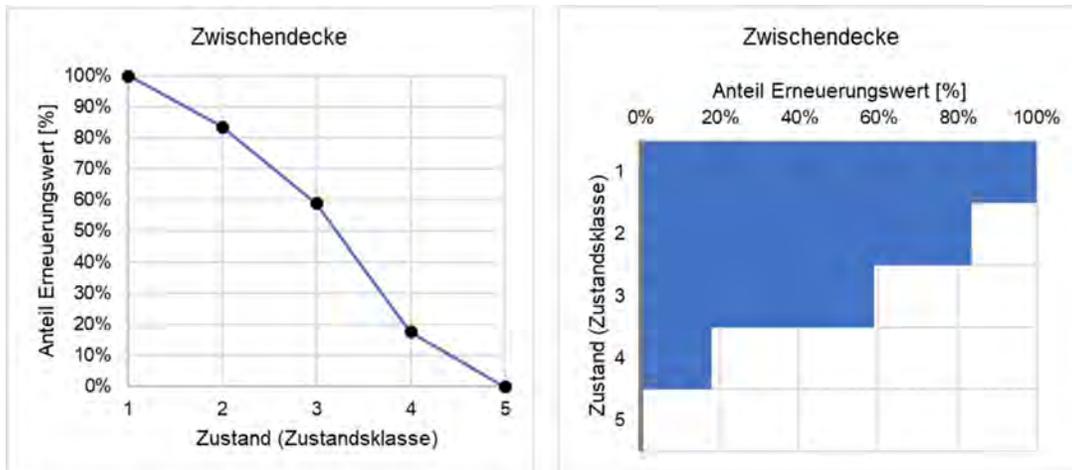


Abbildung 48: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Zwischendecken von Tunnelbauwerken [77]

Portal / Gesims

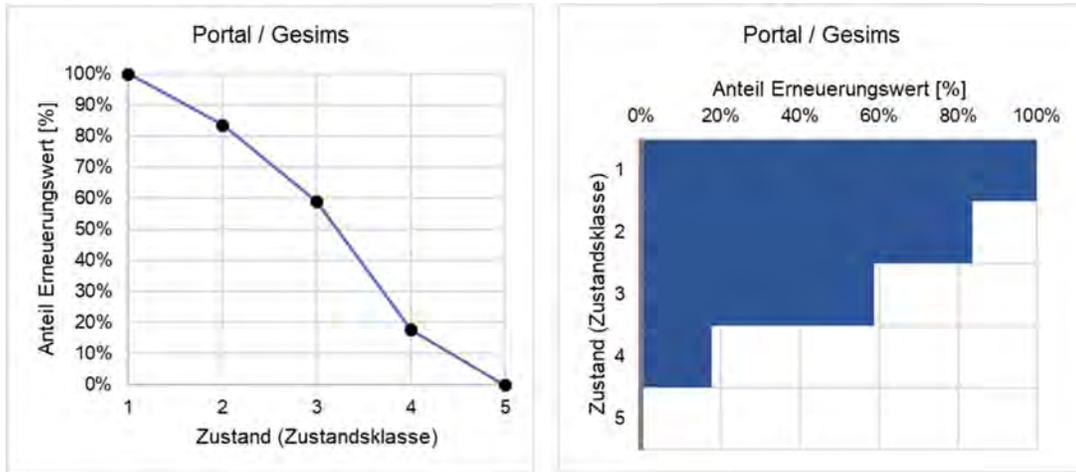


Abbildung 49: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Portal und Gesims von Tunnelbauwerken [77]

E&M-Ausrüstung

Unter Bezugnahme auf die Ergebnisse des Forschungsprojektes OPTimAL [37] wurde für alle E&M-Gewerke eine einzige lineare Funktion gewählt.

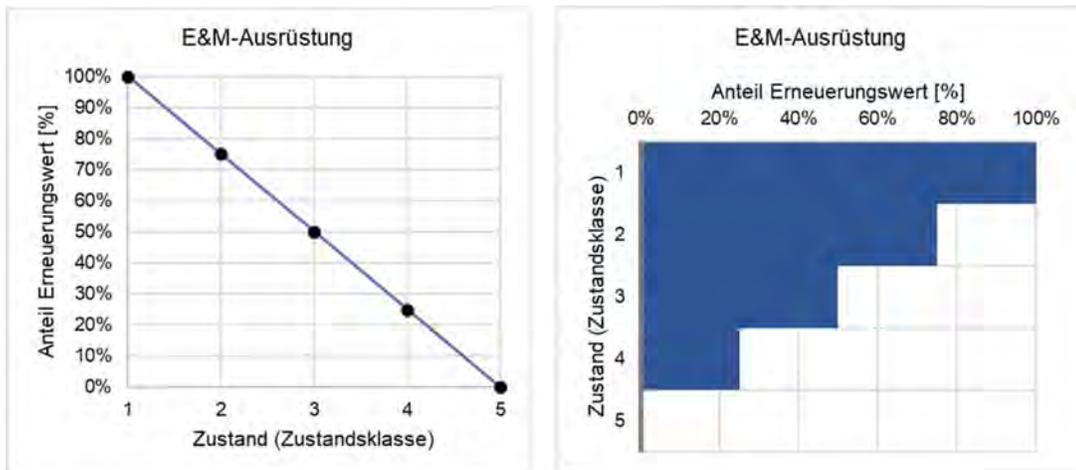


Abbildung 50: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die E&M-Ausrüstung von Tunnelbauwerken [77]

6.2 Wirtschaftlichkeit von Erhaltungs- und Investitionsmaßnahmen

6.2.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Neben der Berechnung des Technischen Anlagenwertes über die Zeit, spielt auch eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahmenstrategie eines ausgewählten Lebenszyklus eine wesentliche Rolle bei der Bewertung von Anlagen [77].

Eine Wirtschaftlichkeitsbewertung ist dabei als Vergleich zwischen unterschiedlichen Varianten von Maßnahmenstrategien sinnvoll und zweckmäßig, setzt jedoch voraus, dass mehr als eine Maßnahmenstrategie für eine bestimmte Anlage zur Verfügung steht. Dies kann bei PMS- und BMS-Anwendungen der Fall sein, sodass ein relativer Vergleich möglich ist. In welchem Umfang ein Vergleich zwischen mehreren Anlagen eines bestimmten Anlagentyps möglich ist, soll hier ebenfalls diskutiert werden. Auf jeden Fall sind nur dann anlagenübergreifende Vergleiche möglich, wenn auch identische Anlagen und deren Erhaltungsmaßnahmen gegenübergestellt werden können. Aus diesem Grund wird auch eine Vermischung von Ausrüstungs- und Konstruktionsindikatoren hinsichtlich der Sinnhaftigkeit diskutiert. Dies bedeutet aber, dass auch die Wirtschaftlichkeit aus Sicht der Ausrüstung und aus Sicht der Konstruktion sehr unterschiedlich sein kann, jedoch die Gesamtbetrachtung im Vordergrund steht.

6.2.2 Kennzahlen für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung Technischer Anlagenwert

Aus dem Zustandsverlauf sowie den Wirkungen der Maßnahmenstrategien auf den Konstruktions- und Ausrüstungsindikator können die zu bewertenden Kennzahlen ermittelt werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch die maßgebenden Kennzahlen für einen Technischen Anlagenwert einer Anlage oder eines Anlagenteils X.

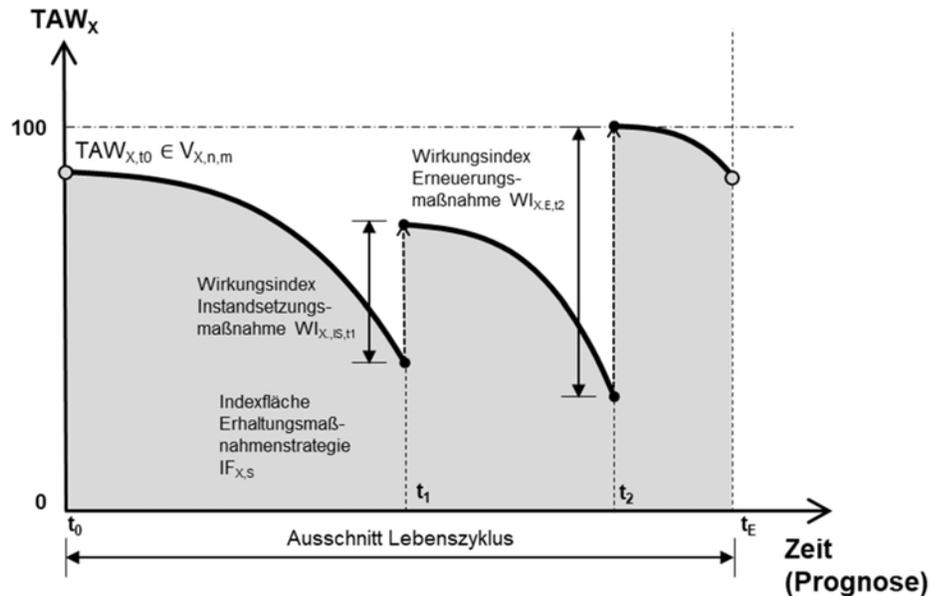


Abbildung 51: Kennzahlen für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit für Indikator X

Neben der Wirkung der Erhaltungsmaßnahmen, ausgedrückt über den Wirkungsindex WI (als Anteil am Technischen Anlagenwert im jeweiligen Jahr der Erhaltungsmaßnahme, siehe Abbildung 51) ist vor allem die Indexfläche IF der Erhaltungsmaßnahmenstrategie S unterhalb des Verlaufs des TAW (graue Fläche in Abbildung 51) von wesentlicher Bedeutung. Beide Kenngrößen können wie folgt berechnet werden:

$$WI_{X,N,t_n} = TAW_{X,t_n,nach} - TAW_{X,t_n,vor} \quad \text{Gl. 19}$$

$$IF_{X,S} = \sum_{t=t_0}^{t_E} TAW_{X,t} \quad \text{Gl. 20}$$

mit

WI_{X,N,t_n} Wirkungsindex der Erhaltungsmaßnahme N zum Zeitpunkt t_n

$TAW_{X,t_n,nach}$ TAW des Anlagenteils X zum Zeitpunkt t_n nach der Erhaltungsmaßnahme N

$TAW_{X,t_n,vor}$ TAW des Anlagenteils X zum Zeitpunkt t_n vor der Erhaltungsmaßnahme N

$IF_{X,S}$ Indexfläche TAW des Anlagenteils X der Erhaltungsmaßnahmenstrategie S

$TAW_{X,t}$ TAW des Anlagenteils X zum Zeitpunkt t

Ob eine Erhaltungsmaßnahmenstrategie eine gute oder schlechte (wirtschaftliche) Lösung darstellt, lässt sich ebenfalls über diese Kennzahlen berechnen, wobei im Rahmen von TAniA ein „Effektivitätsdiagramm“ für die weiterführende Beurteilung von zentraler Bedeutung ist.

Das Effektivitätsdiagramm „TAniA“ beschreibt graphisch das Verhältnis zwischen der Indexfläche und dem kumulierten Wirkungsindex über die Betrachtungsperiode, also den aufsummierten Wirkungen der Erhaltungsmaßnahmen auf den Technischen Anlagenwert TAW. Nachfolgende Abbildung 52 zeigt schematisch das Effektivitätsdiagramm TAniA und die daraus ableitbaren Bewertungen.

Ob eine Erhaltungsmaßnahmenstrategie eine gute oder schlechte (wirtschaftliche) Lösung darstellt, lässt sich ebenfalls über die oben beschriebenen Kennzahlen berechnen. Für die weiterführende Beurteilung im Rahmen von TAniA sind Effektivitätsdiagramme von zentraler Bedeutung: Das Effektivitätsdiagramm „TAniA“ beschreibt graphisch das Verhältnis zwischen der Indexfläche und dem kumulierten Wirkungsindex über die Betrachtungsperiode, also den aufsummierten Wirkungen der Erhaltungsmaßnahmen auf den Technischen Anlagenwert TAW. Nachfolgende Abbildung 52 zeigt schematisch das Effektivitätsdiagramm TAniA und die daraus ableitbaren Bewertungen.

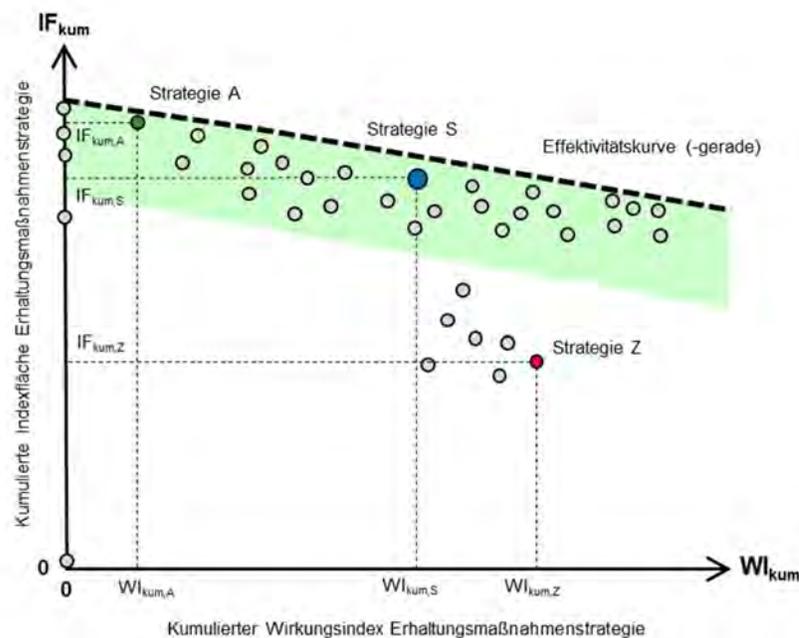


Abbildung 52: Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Erhaltungsmaßnahmenstrategien unter Heranziehung des Technischen Anlagenwertes (Effektivitätsdiagramm)

Jeder einzelne Punkt im TAniA-Effektivitätsdiagramm zeigt eine Erhaltungsmaßnahmenstrategie. Grundsätzlich ist es dabei möglich, mehrere, für eine einzige Anlage ermittelte Erhaltungsmaßnahmenstrategien, miteinander zu vergleichen (Alternativen), oder einzelne Erhaltungsmaßnahmenstrategien von unterschiedlichen Anlagen gleichen Typs gegenüberzustellen. Da die Indikatoren auf eine Skala von 0 bis 100 normiert sind (vorausgesetzt, dass die Anzahl der Konstruktions- und Ausrüstungsindikatoren für einen Anlagentyp identisch ist), lässt sich ein solcher Vergleich bzw. eine solche Analyse durchführen.

Abbildung 52 zeigt sehr deutlich, dass jede mögliche Strategie bewertet werden kann. Je weiter eine Erhaltungsmaßnahmenstrategie im oberen linken Bereich angeordnet ist, desto höher ist das Niveau des TAW und desto geringer sind die notwendigen Erhaltungsmaßnahmen, um dieses Niveau zu halten. Es gibt auch eine Anzahl von Anlagen, die keine oder nur „kleinere“ Erhaltungsmaßnahmen im betrachteten Analysezeitraum beinhalten und eine hohe Indexfläche aufweisen (auf der Ordinate, im oberen linken Bereich). Das sind in den meisten Fällen Anlagen mit kürzlich erfolgter Inbetriebnahme bzw. kürzlich sanierte Anlagen (siehe z. B. Strategie A).

Je näher eine Erhaltungsmaßnahmenstrategie bei der Effektivitätskurve bzw. bei der Effektivitätsgeraden liegt, desto wirtschaftlicher – aus Sicht des TAW – ist die jeweilige Strategie (siehe Strategie S). Dies bedeutet, dass mit einem „wirtschaftlichen“ Aufwand ein hohes Niveau gehalten werden kann.

Die Effektivitätskurve bzw. -gerade ist die Umhüllende der „Punktwolke der Erhaltungsmaßnahmenstrategien“ und definiert die Grenze, welche maximale Wirkung durch Erhaltungsmaßnahmen erreicht werden kann. Dies bedeutet jedoch auch, dass unwirtschaftliche Lösungen herausgefiltert werden können, wie z. B. die Strategie Z in Abbildung 52. Es gibt vergleichbare Erhaltungsmaßnahmenstrategien, die mit gleichem Aufwand eine höhere Wirkung erzielen und somit eine wirtschaftlichere Lösung aus der Sicht des Technischen Anlagenwertes darstellen. Im Rahmen der praktischen Anwendung wird gezeigt, wie eine solche Bewertung der Wirtschaftlichkeit über den Technischen Anlagenwert möglich ist (siehe Kapitel 7.6).

7 PRAKTISCHE ANWENDUNG

7.1 Aufgabenstellungen der praktischen Anwendung

Ein wesentlicher Bestandteil des Projektes TAniA besteht in der praktischen Erprobung der in den vorigen Kapiteln beschriebenen Modellierungen und Algorithmen. Hierzu wurden mehrere Teststrecken sowie ein Teilstraßennetz im Einvernehmen mit den Auftraggebern ausgewählt (siehe Kapitel 7.2).

Es sei an dieser Stelle jedoch auch explizit angemerkt, dass im Rahmen der praktischen Anwendung auf bestehende Systeme bzw. auf Ergebnisse bestehender Erhaltungsmanagementsysteme zurückgegriffen wurde. Die Erstellung eines Algorithmus zur Entwicklung von Erhaltungsmaßnahmenstrategien im Rahmen von Lebenszyklusanalysen war nicht Gegenstand von TAniA.

Im Zuge der praktischen Anwendung ist es zunächst notwendig, die entwickelten Prozesse und Algorithmen in ein Asset-Management-System zu überführen und einen Prototypen für die Berechnung des Technischen Anlagenwertes zu entwickeln. Dies erfolgt dabei unter Heranziehung der flexiblen Asset-Management-Software dTIMS (Deighton Total Infrastructure Management System), welche von der ASFINAG seit 1998 und auch von der BASt seit 1997 verwendet wird.

Die praktische Anwendung kann wie folgt präzisiert werden:

- Aufbau eines Moduls zur Berechnung des Technischen Anlagenwertes in einem offenen Asset Management System
- Datenaufbereitung der Testdaten, ggf. Ergänzung mit Ersatzwerten oder repräsentativen Werten
- Implementierung der Daten in den Prototypen und Analyse der Daten
- Aufbereitung und ingenieurmäßige Bewertung der Ergebnisse und des Prozesses, ggf. Verbesserung des Prozesses bzw. einzelner Schritte, Modelle, Verfahren etc. bei Nichterreicherung der strategischen Ziele des Straßenerhalters

7.2 Auswahl Teststrecken und Teilstraßennetz

Entsprechend den Projektanforderungen ist es notwendig, drei Teststrecken (jeweils eine Strecke aus Deutschland, Österreich und der Schweiz) sowie ein Teilnetz für die praktische

Anwendung heranzuziehen. Jede Teststrecke sowie das Teilnetz sollten eine entsprechende Anzahl von Anlagen für die Bewertung aufweisen, wobei auch die zur Verfügung stehende Datenqualität und -quantität in den Untersuchungen beurteilt wurde.

Im Einvernehmen mit den Auftraggebern wurden verschiedene Teststrecken und das Teilnetz ausgewählt (Abbildung 53 und Tabelle 56).



Abbildung 53: Überblick Teststrecken und Teilnetz in D-A-CH-Länder

Tabelle 56: Teststrecken und Teilnetz

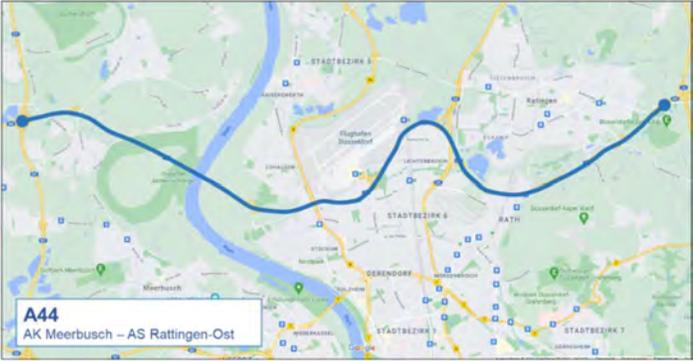
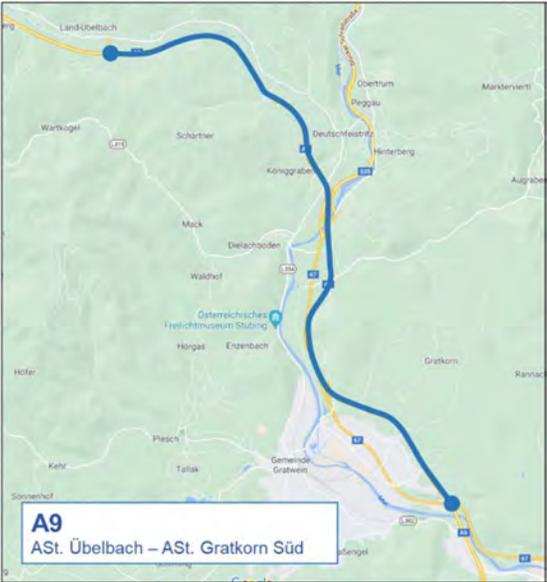
Art	Land	Strecke	Länge
Teststrecke	D	<p>A44 AK Meerbusch – AS Rattigen - Ost (NK 4705066A – NK 4706171A)</p> 	21 km
Teststrecke	A	<p>A9 ASt. Übelbach – ASt. Gratkorn Süd (km 157 bis km 173)</p> 	16 km

Tabelle 56: Teststrecken und Teilnetz - Fortsetzung

Art	Land	Strecke	Länge
Teststrecke	CH	<p>N1 Yverdon-les-Bains – Payerne (km 92 bis km 118)</p> 	26 km
Teilnetz	A	<p>Teilstraßennetz Raum Wien</p> <ul style="list-style-type: none"> • A4 (km 0 bis km 67) – Stadt- und Freilandautobahn • A6 (km 0 bis km 22) – Freilandautobahn • A21 (km 1 bis km 38) – Gebirgsautobahn • A23 (km 0 bis km 17) – Stadtautobahn 	141 km

7.3 Grundlagen der Teststrecken und des Teilnetzes

7.3.1 Daten und Informationen

Um die Analysen auf den Teststrecken und auf dem Teilnetz durchführen zu können, wurden die erforderlichen Daten bei den Auftraggebern abgefragt. Dabei handelt es sich um folgende Inventar- und Zustandsdaten (siehe hierzu auch Kapitel 4.4), die unbedingt notwendig sind, um eine der beschriebenen Varianten anwenden zu können:

Straßenoberbau

- Abschnittsinformationen
 - Straße und Richtungsfahrbahn
 - Von [km] und Bis [km]
 - Länge [km]
 - Fahrstreifen
 - Breite Fahrstreifen [m]
 - Breite Fahrbahn [m]
- Oberbauinformationen
 - Bauweise (Asphalt/Beton)
 - Zulässige Normlastwechsel (Lastklasse) in Mio.
 - Deckschichtart
 - Dicke Asphaltdeckschicht [cm]
 - Herstellungsjahr Asphaltdeckschicht
 - Dicke Binderschicht [cm]
 - Herstellungsjahr Binderschicht
 - Dicke gebundene Tragschicht [cm]
 - Herstellungsjahr gebundene Tragschicht
 - Dicke Betondecke [cm]
 - Herstellungsjahr Betondecke
- Zustandsdaten (aktuell)
 - Zustandsgrößen
 - Zustandswerte
 - Teilwerte (Gebrauchswert, Substanzwert Bestand, Substanzwert Oberflächen)

Brückendaten

- Objektinformationen
 - Straße und Richtungsfahrbahn
 - Brücken-ID und Brückenbezeichnung
 - Von [km] und Bis [km]
- Inventardaten
 - Länge [m]
 - Breite [m]
 - Fläche [m²]
 - Ebene (0=Straßenachse, 1=Überführung)
 - Bauweise Überbau (Stahl, Spannbeton, etc.)
 - Herstellungsjahr Überbau
 - Anzahl Brückenfelder
 - Maximale Feldlänge [m]
- Zustandsdaten (aktuell)
 - Bauteil(gruppen)noten
 - Gesamtnote
 - Letzte Erhaltungsmaßnahme

Tunnel

- Objektinformationen
 - Straße
 - Tunnel-ID und Tunnelbezeichnung
 - Richtungsfahrbahn
 - Von [km] und Bis [km]
- Inventardaten
 - Länge [m]
 - Fahrbahnbreite [m]
 - Typ Tunnel (bergmännisch, offene Bauweise)
 - Herstellungsjahr
- Zustandsdaten (aktuell)
 - Bauteil(gruppen)noten
 - Zustandsnote E&M-Gewerke

- Letzte Erhaltungsmaßnahme

Für die Anwendung der Variante A ist es darüber hinaus notwendig, die Ergebnisse der Lebenszyklusbetrachtungen (Zustandsverläufe für ausgewählte Erhaltungsmaßnahmenstrategien) aus einem PMS, BMS oder TMS zur Verfügung zu haben.

7.3.2 Verfügbarkeit Daten und Informationen Teststrecken und Teilnetz

Die nachfolgende Tabelle 57 gibt einen Überblick über die Anlagen auf den Teststrecken und dem Teilnetz, die für die praktische Anwendung zur Verfügung standen. Der Klammerwert zeigt die Anzahl der analysierten Objekte, wenn nicht alle Daten zur Verfügung gestellt werden konnten. Weitere Detailinformationen können der nachfolgenden Tabelle 58 entnommen werden.

Tabelle 57: Anlagen Teststrecken und Teilnetz

Strecke	Oberbau	Brücken	Tunnel
Teststrecke D	41,590 km RFb	65 Objekte	6 (0) Objekte
Teststrecke A	31,982 km RFb	49 Objekte	6 Objekte
Teststrecke CH	49,968 km RFb	23 Objekte	12 Objekte
Teilnetz	283,863 km RFb	312 Objekte	12 (10) Objekte

Der Klammerwert zeigt die Anzahl der analysierten Objekte, RFb...Richtungsfahrbahn

Um eine den Anforderungen entsprechende Analyse einer Anlage durchführen zu können, müssen die zuvor aufgelisteten Informationen zur Verfügung stehen. Die nachfolgende Tabelle 58 gibt einen Überblick über die Quantität der Daten für die Analysen.

Tabelle 58: Quantität der Daten auf den Teststrecken und dem Teilnetz

Strecke	Oberbau	Brücken	Tunnel (baulich)	Tunnel(E&M-Ausrüstung)
Teststrecke D	●	○	-	-
Teststrecke A	●	●	●	●
Teststrecke CH	●	●	○	-
Teilnetz	●	●	●	●

- ... Daten vollständig und verfügbar
- Daten nicht vollständig verfügbar, vereinfachte Analyse jedoch möglich
- Daten für eine Analyse nicht ausreichend verfügbar

Da nicht immer sämtliche Informationen bereitgestellt werden konnten, wurden auch Vereinfachungen in der Analyse vorgenommen und in den dTIMS TAniA Prototypen implementiert.

Die Tabelle 58 zeigt, dass die Mindestanforderungen an die Tunneldaten in Deutschland nicht erfüllt werden konnten und eine Analyse daher nicht möglich war. Auch auf dem österreichischen Teilnetz blieben aufgrund von fehlenden Zustandsdaten zwei Tunnelobjekte unberücksichtigt. Vor allem die Daten für die E&M-Ausrüstung wurden weder für die deutsche noch für die schweizerische Teststrecke zur Verfügung gestellt.

Eine vereinfachte Analyse wurde im Bereich der Brücken auf der A44 (Deutschland) und im Bereich der Tunnel auf der N1 (Schweiz) durchgeführt. Für diese Objekte standen nur rudimentäre Zustandsdaten (Gesamtnote) zur Verfügung.

Grundsätzlich ist die Verfügbarkeit der Daten im Bereich Straßenoberbau ausgezeichnet, wobei die Daten mit einer hohen Granularität zur Verfügung gestellt wurden (Datenaufbereitung siehe Kapitel 7.3.3). Auch die Daten im Bereich der Brückenobjekte entsprechen in Österreich und in der Schweiz den Anforderungen. In Deutschland stand für die Analysen der Brückenobjekte nur eine Gesamtnote des Objektes zur Verfügung. Diese konnte in einer vereinfachten Analyse verwendet werden. Wie bereits beschrieben, konnte für die Tunnel in der Schweiz nur eine, die Konstruktion beschreibende, Gesamtnote zur Verfügung gestellt werden, die in einer vereinfachten Analyse zur Anwendung gelangte. Da eine wesentliche Aufgabe des Projektes auch darin bestand, Daten in der Analyse zu berücksichtigen, die nicht direkt den Anforderungen entsprechen, wurden für die Anlagen Vereinfachungen im Algorithmus vorgenommen. Die länderspezifischen Anpassungen des Analysealgorithmus sind im Kapitel 7.4.2 beschrieben.

7.3.3 Datenaufbereitung

Mit Ausnahme der österreichischen Datengrundlagen, die ohne weitere Aufbereitung in den dTIMS TAniA-Prototypen übernommen werden konnten – dies liegt auch an der Tatsache, dass die ASFINAG dTIMS als Erhaltungsmanagementsystem verwendet – mussten die Daten aus Deutschland und aus der Schweiz vor der Implementierung entsprechend aufbereitet werden. Die zum Teil sehr umfassende Datenaufbereitung erfolgte in erster Linie im Bereich der Straßenoberbaus und bestand aus folgenden Teilaufgaben:

- Bildung von homogenen Oberbauabschnitten aus 100 m-Abschnitten der Zustandserfassung und -bewertung

- Verschneidung der homogenen, fahrstreifenspezifischen Oberbaudatensätze über den Querschnitt
- Kombination der Einzelmerkmale zu Teilwerten (siehe auch Kapitel 7.4.2)

7.4 Anwendung Analysealgorithmus

7.4.1 Auswahl Analysemethodik

In Abhängigkeit von der Verfügbarkeit der Daten sowie den Ergebnissen aus Lebenszyklusanalysen im Bereich PMS, BMS und TMS können, entsprechend den Beschreibungen im Kapitel 5.3, folgende Varianten im Rahmen der Analyse ausgewählt werden, die hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nochmals kurz beschrieben sind:

- **Variante A:** Der Lebenszyklus und die damit verbundenen Erhaltungsmaßnahmen werden aus dem Erhaltungsmanagementsystem (PMS, BMS, TMS) direkt geliefert und stellen somit die Eingangsgröße für die Berechnung des Technischen Anlagenwertes dar.
- **Variante B:** Auf der Grundlage eines ausgewählten Standardlebenszyklus wird der Technische Anlagenwert unter Heranziehung von anwendbaren Degradationskurven (Zustandsprognosemodell) über die Veränderung der Erhaltungsintervalle kalibriert.
- **Variante C:** Ein ausgewählter Standardlebenszyklus wird für die Ermittlung des Technischen Anlagenwertes direkt herangezogen.

Die nachfolgende Tabelle 59 zeigt die Zuordnung der Variante zu den jeweiligen Teststrecken und zum Teilnetz, in Abhängigkeit von der Art der Anlagen. Eine Zielsetzung des Projektes TAniA bestand auch in der Überprüfung der Anwendbarkeit der unterschiedlichen, zuvor beschriebenen Varianten. Die Tabelle 59 zeigt auch, dass alle Varianten im Rahmen der praktischen Anwendung untersucht wurden.

Tabelle 59: Zuordnung Analysemethodik zu Teststrecken und Teilnetz in Abhängigkeit von der Art der Anlage

Strecke	Oberbau	Brücken	Tunnel (baulich)	Tunnel(E&M-Ausrüstung)
Teststrecke D	C	B	-	-
Teststrecke A	A	A	A	A
Teststrecke CH	B	B	C	-
Teilnetz	A	A	A	A

7.4.2 Auswahl Modelle und Spezifikationen Länder

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die im Rahmen der praktischen Anwendung auf den Teststrecken und dem Teilnetz angewendeten Modelle und Algorithmen auf Grundlage der in Tabelle 59 beschriebenen Varianten. Darüber hinaus werden länderspezifische Spezifikationen beschrieben, wenn diese von den in Kapitel 5 und in Kapitel 6 beschriebenen Modellen abweichen. Die hier beschriebenen Modelle und Algorithmen definieren die Systemkonfiguration des dTIMS TAniA-Prototypen, welche im nachfolgenden Kapitel 7.5 im Überblick dargestellt ist.

7.4.2.1 Allgemeine Festlegungen

Um den Technischen Anlagenwert über die Zeit zu berechnen, wurden die Ergebnisse der Lebenszyklusbetrachtungen in Form von jährlichen Zustandsinformationen (für die einzelnen Zustandsmerkmale) in den dTIMS TAniA-Prototypen implementiert. Diese Zustandsverläufe, die auch die Wirkungen der Erhaltungsmaßnahmen beinhalten, wurden im Vorfeld der Implementierung mit einem Tabellenkalkulationsprogramm aufbereitet und einer ingenieurmäßigen Beurteilung unterzogen, sofern diese Daten nicht direkt aus einem PMS, BMS oder TMS entnommen werden konnten (wie für die Teststrecke und das Teilnetz in Österreich).

Darüber hinaus wurden die für den Lebenszyklus verantwortlichen Zustandsverläufe mit den aktuellen Zustandsdaten (Werten und Noten) verknüpft, sodass das Verhaltensmodell als Ausgangspunkt (Startpunkt) immer den aktuellen Zustand verwendet. Auch diese Aufbereitung erfolgte über ein Tabellenkalkulationsprogramm im Vorfeld der Implementierung und betrifft alle im Rahmen der praktischen Anwendung untersuchten Anlagen (Oberbau, Brücken und Tunnel).

7.4.2.2 Modelle und Spezifikationen Straßenoberbau

Die nachfolgende Tabelle 60 ist eine Zusammenfassung der Analysegrundlagen und Modelle für den Straßenoberbau, in Abhängigkeit von den Teststrecken und dem Teilnetz.

Tabelle 60: Modelle und Spezifikationen Straßenoberbau

Strecke	Grundlage	Beschreibung
Teststrecke D	Variante	C (gem. Kapitel ...)
	Prognosemodelle	Gem. Vorgaben Kapitel 5.4.3
	Lebenszyklus	Gem. Vorgaben Kapitel 5.4.3, siehe nachfolgende Erläuterungen
	Kostenkatalog	Gem. Vorgaben Kapitel 5.6.5
	Grundlage TAW	Gem. Vorgaben Kapitel 6.1.5.1
Teststrecke A	Variante	A
	Prognosemodelle	Modelle gem. Handbuch PMS [79]
	Lebenszyklus	dTIMS IMT Pavement ASFINAG (Standardszenario 170 Mio. €/Jahr inkl. Bauprogramm)
	Kostenkatalog	Gem. Vorgaben Kapitel 5.6.5
	Grundlage TAW	Gem. Vorgaben Kapitel 6.1.5.1
Teststrecke CH	Variante	B
	Prognosemodelle	Modelle gem. Ausarbeitungen Scazziga I. [58] [59]. Die Umrechnung von der Skala 0 bis 5 auf die Skala 1 bis 5 erfolgte aus Gründen der Vereinfachung im Rahmen einer linearen Transformation.
	Lebenszyklus	Gem. Vorgaben Kapitel 5.4.3 Für den AI wurden die Merkmale l_2 , l_3 und l_4 und für den KI das Merkmal l_0 verwendet (keine Teilwerte in CH vorhanden), siehe nachfolgende Erläuterungen
	Kostenkatalog	Gem. Vorgaben Kapitel 5.6.5
	Grundlage TAW	Gem. Vorgaben Kapitel 6.1.5.1
Teilnetz A	Variante	A
	Prognosemodelle	Modelle gem. Handbuch PMS [79]
	Lebenszyklus	dTIMS IMT Pavement ASFINAG (Standardszenario 170 Mio. €/Jahr inkl. Bauprogramm)
	Kostenkatalog	Gem. Vorgaben Kapitel 5.6.5
	Grundlage TAW	Gem. Vorgaben Kapitel 6.1.5.1

Um die Auswirkungen einer Verschlechterung des Zustandes im Technischen Anlagenwert bestmöglich darzustellen, wurde bei der Teststrecke in Deutschland auf die

Standardlebenszyklen zurückgegriffen und die Erhaltungsmaßnahmen zu einem „späten“ Zeitpunkt angesetzt, bei welchem der Gebrauchswert einen Wert um 4,0 aufweist und der Substanzwert sogar die Zustandsnote 5 erreichen kann. Dies entspricht auf vielen Abschnitten den Tatsachen und erlaubt somit auch eine Bewertung einer solchen Vorgehensweise.

Auf der schweizerischen Teststrecke erfolgte die Auswahl für den Zeitpunkt der Erhaltungsmaßnahmen in erster Linie unter Berücksichtigung des Alters, da auf vielen Abschnitten das Deckschichtalter bereits sehr hoch ist, jedoch die Zustandswerte für dieses hohe Alter sehr niedrig, also sehr gut sind. Um hier unrealistisch hohe Alterswerte zu vermeiden, wurden auf dieser Teststrecke die Empfehlungen mit Bezug zum Alter umgesetzt, was bedeutet, dass auf einigen Abschnitten Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden, bei denen der Zustand noch nicht als „kritisch“ eingestuft wird.

In beiden Fällen wurde jedoch darauf geachtet, dass die Maßnahmen „zeitlich gebündelt“ auf den Teststrecken zur Anwendung gelangen. Dies entspricht sowohl in Deutschland als auch in der Schweiz der Praxis. Durch diese Festlegungen soll auch gezeigt werden, in welchem Ausmaß eine solche „Bündelung“ zu unwirtschaftlichen Lösungen – aus Sicht des Technischen Anlagenwertes – führt. Dazu werden die Vorschläge für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit gemäß Kapitel 6.2 herangezogen.

7.4.2.3 Modelle und Spezifikationen Brücken

Die nachfolgende Tabelle 61 ist eine Zusammenfassung der Analysegrundlagen und Modelle für die Brücken auf den Teststrecken und dem Teilnetz. Auch hier wurden unterschiedliche Ansätze gewählt, die es ermöglichen, die Auswirkungen anhand der Ergebnisse zu zeigen.

Tabelle 61: Modelle und Spezifikationen Brücken

Strecke	Grundlage	Beschreibung
Teststrecke D	Variante	B
	Prognosemodelle	Entwicklung Modelle gem. den Beschreibungen in Kapitel 5.1.3 (Verlauf Gesamtnote als Polynom 3. Ordnung)
	Lebenszyklus	Gesamtnote auf Basis Verlauf KI, gem. Vorgaben Kapitel 5.4.4 (siehe auch nachfolgende Beschreibung)
	Kostenkatalog	Kostenwert (Erneuerungswert) mit Bezug zur Gesamtnote mit 2.100 €/m ² (siehe auch nachfolgende Erläuterungen)
	Grundlage TAW	Siehe nachfolgende Beschreibung
Teststrecke A	Variante	A
	Prognosemodelle	Modelle gem. Ausarbeitungen Weninger, et al. [83]
	Lebenszyklus	dTIMS IMT Brücken ASFINAG (Szenario 120 Mio. €/Jahr inkl. Bauprogramm)
	Kostenkatalog	Gem. Vorgaben Kapitel 5.6.6
	Grundlage TAW	Gem. Vorgaben Kapitel 6.1.5.2
Teststrecke CH	Variante	B
	Prognosemodelle	Entwicklung Modelle gem. den Beschreibungen in Kapitel 5.1.3 (Verlauf Bauteilnoten als Polynom 3. Ordnung)
	Lebenszyklus	Gem. Vorgaben Kapitel 5.4.4
	Kostenkatalog	Datenauswertung KUBA-Datenbankauszug und ingenieurmäßige Bewertung: Ausrüstung: 700 CHF/m Abdichtung: 75 CHF/m ² FUEK: 7000 CHF/m Lager: 2500 CHF/Stk Unterbau: 600 CHF/m ² Überbau: 600 CHF/m ²
	Grundlage TAW	Gem. Vorgaben Kapitel 6.1.5.2
Teilnetz A	Variante	A
	Prognosemodelle	Modelle gem. Ausarbeitungen Weninger, et al. [83]
	Lebenszyklus	dTIMS IMT Brücken ASFINAG (Szenario 120 Mio. €/Jahr inkl. Bauprogramm)
	Kostenkatalog	Gem. Vorgaben Kapitel 5.6.6
	Grundlage TAW	Gem. Vorgaben Kapitel 6.1.5.2

Für die Implementierung des Analysealgorithmus für die Brückenbauwerke der Teststrecke in Deutschland mussten wesentliche Anpassungen vorgenommen werden. Grundsätzlich muss zunächst eine Anpassung der in Kapitel 6.1.5.2 gezeigten qualitativen Verläufe erfolgen, die auf dem österreichischen Notensystem basiert. Die Zustandsbewertung in Deutschland erfolgt jedoch nicht mit Zustandsnoten von 1 bis 5, wie in Österreich (RVS 13.03.11, Anhang 5, S. 23 f., [50]) und der Schweiz (Richtlinie Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstraßen, S. 18, [13]), sondern mit Werten zwischen 1 und 4 (RI-EBW-PRÜF, S. 13 f., [42]). Folgende Umrechnung wurde hierfür vorgenommen:

Tabelle 62: Umrechnung der Zustandsnoten für Brückenbauwerke

Österreich		Schweiz		Deutschland	
Note	Beschreibung	Note	Beschreibung	Note	Beschreibung
1,0	sehr guter Zustand	1,0	guter Zustand	1,0	sehr guter Zustand
2,0	guter Zustand	2,0	akzeptabler Zustand	1,5	guter Zustand
3,0	ausreichender Zustand	3,0	beschädigter Zustand	2,0	befriedigender Zustand (2,0 - 2,4), ausreichender Zustand (2,5 - 2,9)
4,0	mangelhafter Zustand	4,0	schlechter Zustand	3,0	nicht ausreichender Zustand (3,0 - 3,4), ungenügender Zustand (3,5 - 4,0)
5,0	schlechter Zustand	5,0	alarmierender Zustand	4,0	
		9,0	Zustand unkontrollierbar bzw. nicht inspizierbar		

Des Weiteren lagen, wie bereits erwähnt, für die Brückenbauwerke der deutschen Teststrecke nur Gesamtnoten für das Bauwerk vor, d. h. es konnte nicht nach Ausrüstungs- und Konstruktionsindikator unterschieden werden. Um dennoch die qualitativen Verläufe aus Kapitel 6.1 nutzen zu können, wurde aus den Verläufen der verschiedenen Anlagenteile folgender gemittelter Verlauf für das gesamte Brückenbauwerk ermittelt (siehe Abbildung 54).

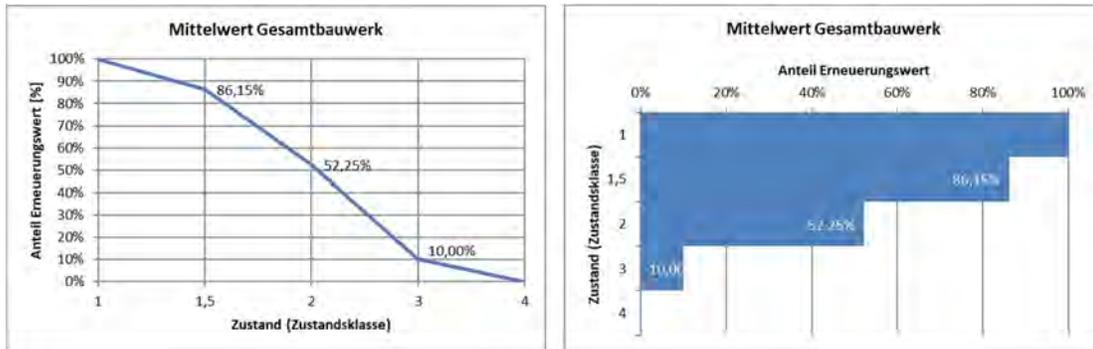


Abbildung 54: Qualitativer Verlauf des Technischen Anlagenwerts für das Gesamtbauwerk

Für die Bestimmung des Technischen Anlagenwerts der Gesamtbauwerke im Analysealgorithmus musste dann der Erneuerungswert von Brückenbauwerken in Deutschland festgelegt werden. Hierfür wurde aufgrund einer aktuellen Literaturrecherche von Preisen auf Landesebene durch die TU Braunschweig ein Wert von 2.100 €/m² für die Berechnung angesetzt. Durch die Skalierung bzw. Normierung von 0 auf 100 ist ein relativer Vergleich möglich, da der Wert eine Einzelgröße für das gesamte Bauwerk darstellt und auch keine Relation zu Kosten für andere Bauteile möglich und notwendig ist.

7.4.2.4 Modelle und Spezifikationen Tunnel

Die nachfolgende Tabelle 61 ist eine Zusammenfassung der Analysegrundlagen und Modelle für die Tunnel, auf den Teststrecken und dem Teilnetz.

Auch bei den Tunneln mussten einige Vereinfachungen vorgenommen werden. Da für die Schweizer Tunnel nur eine Gesamtnote zur Beschreibung der baulich-konstruktiven Anlagenteile zur Verfügung stand, erfolgte die Bewertung ausschließlich über den Konstruktionsindikator KI. Die hierfür angesetzten Kosten beinhalten aber alle gemäß Kapitel 5.6.7 definierten Anlagenteile, die dem KI zugeordnet werden können. Um dem Unterschied zwischen dem österreichischen und dem schweizerischen Preisniveau Rechnung zu tragen, wurden unter Heranziehung der aus der Schweiz zur Verfügung stehenden Kostendaten der anderen Anlagentypen, die österreichischen Kostendaten für die Analyse der Schweizer Tunnel entsprechend hochgerechnet. Daraus ergibt sich ein Faktor von 1,8. Details hierzu können der Tabelle 63 entnommen werden.

Tabelle 63: Modelle und Spezifikationen Tunnel (bauliche Anlagenteile, E&M-Anlagenteile)

Strecke	Grundlage	Beschreibung
Teststrecke D	Variante	Keine Analyse möglich
Teststrecke A	Variante	A
	Prognosemodelle	Modelle gem. Ausarbeitungen Projekt OPTimAL [37]
	Lebenszyklus	Szenario Erhaltungsintervall 10 Jahre gem. Ausarbeitungen Projekt OPTimAL [37]
	Kostenkatalog	Gem. Vorgaben Kapitel 5.6.7
	Grundlage TAW	Gem. Vorgaben Kapitel 6.1.5.3
Teststrecke CH	Variante	C (nur Tunnel konstruktiv)
	Prognosemodelle	Ausschließlich KI, gem. Vorgaben Kapitel 5.4.5
	Lebenszyklus	Ausschließlich KI, gem. Vorgaben Kapitel 5.4.5
	Kostenkatalog	Gem. Vorgaben Kapitel 5.6.7 mit Umrechnung auf CHF sowie Anpassung Preisniveau CH (Faktor 1,8): Geschlossene Bauweise: 10800 CHF/m Offene Bauweise: 12000 CHF/m Gemischte Bauweise: 11400 CHF/m
	Grundlage TAW	Basis = Tunnelröhre, gem. Vorgaben Kapitel 6.1.5.3
Teilnetz A	Variante	A
	Prognosemodelle	Modelle gem. Ausarbeitungen Projekt OPTimAL [37]
	Lebenszyklus	Szenario Erhaltungsintervall 10 Jahre gem. Ausarbeitungen Projekt OPTimAL [37]
	Kostenkatalog	Gem. Vorgaben Kapitel 5.6.7
	Grundlage TAW	Gem. Vorgaben Kapitel 6.1.5.3

7.5 Implementierung Analysealgorithmus

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Systembausteine und Funktionalitäten des dTIMS TAniA Prototyps. Die Details können dem elektronischen Anhang C (MS Excel-Tabellen) entnommen werden. Aus Gründen der Vollständigkeit wird in den einzelnen Kapiteln nochmals explizit darauf hingewiesen, was dem Anhang beigefügt wurde.

7.5.1 Kurzbeschreibung 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. Das System wird seit mehr als 20 Jahren in allen drei D-A-CH-Ländern auf unterschiedlichen Straßennetzen

eingesetzt und ist für die ASFANAG das maßgebende System für die PMS, BMS und TMS-Analysen.

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.

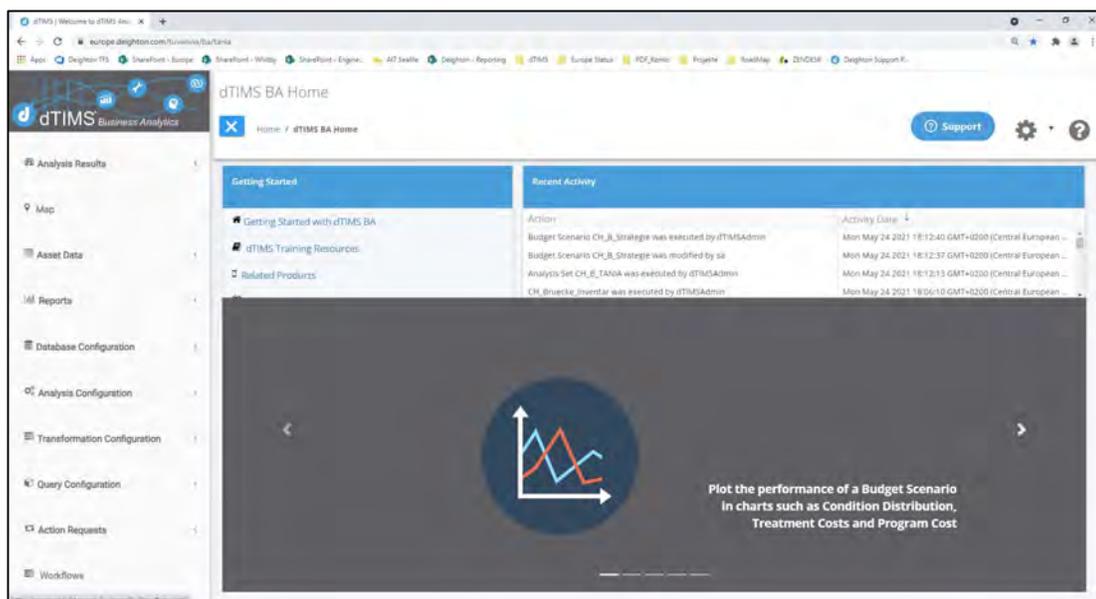


Abbildung 55: Web-Anwendung dTIMS TAniA Prototyp

7.5.2 Datenbankstruktur und Datenbankinhalt

7.5.2.1 Datentabellen

Zur Übernahme der Daten sowie zur Speicherung der Algorithmen wurde eine SQL-Datenbank (SQL 2016) entsprechend konfiguriert. Diese Datenbank enthält eine größere Anzahl von Datentabellen, die in Tabelle 64 aufgelistet sind

Tabelle 64: Datentabellen dTIMS TAniA Prototyp

Tabelle	Beschreibung
Base	Speicherung der Straßenabschnitte der Teststrecken und des Teilnetzes (Basistabelle)
AT_B_Analyse	Speicherung der Inventardaten Brücken und Analysetabelle (Österreich)
AT_B_Prognose	Speicherung der Prognosedaten Zustand Brücken (Österreich)
AT_P_Analyse	Speicherung der Inventardaten Straßenoberbau und Analysetabelle (Österreich)
AT_P_Prognose	Speicherung der Prognosedaten Zustand Straßenoberbau (Österreich)
AT_T_Analyse	Speicherung der Inventardaten Tunnel und Analysetabelle (Österreich)
AT_T_Prognose	Speicherung der Prognosedaten Zustand Tunnel (Österreich)
CH_B_Analyse	Speicherung der Inventardaten Brücken und Analysetabelle (Schweiz)
CH_B_Prognose	Speicherung der Prognosedaten Zustand Brücken (Schweiz)
CH_P_Analyse	Speicherung der Inventardaten Straßenoberbau und Analysetabelle (Schweiz)
CH_P_Prognose	Speicherung der Prognosedaten Zustand Straßenoberbau (Schweiz)
CH_T_Analyse	Speicherung der Inventardaten Tunnel und Analysetabelle (Schweiz)
CH_T_Prognose	Speicherung der Prognosedaten Zustand Tunnel (Schweiz)
DE_B_Analyse	Speicherung der Inventardaten Brücken und Analysetabelle (Deutschland)
DE_B_Prognose	Speicherung der Prognosedaten Zustand Brücken (Deutschland)
DE_P_Analyse	Speicherung der Inventardaten Straßenoberbau und Analysetabelle (Deutschland)
DE_P_Prognose	Speicherung der Prognosedaten Zustand Straßenoberbau (Deutschland)

Die nachfolgende Abbildung 56 zeigt einen Bildschirmausdruck der Konfigurationstabelle für die Datentabellen. Sämtliche Details zu den Datentabellen können dem elektronischen Anhang C entnommen werden.

Display Name	Name	Description	Table Type	Base Table	Primary	Long	Mapping Attribute
AT_Analyse_Bruecken	AT_Analyse_Bruecken	AT - Analysetabelle ...	Section	Base	False	False	
AT_Analyse_Oberbau	AT_Analyse_Oberbau	AT Analysetabelle O...	Section	Base	False	False	
AT_Analyse_Tunnel	AT_Analyse_Tunnel	AT - Analysetabelle ...	Section	Base	False	False	
AT_Prognose_Bruec...	AT_Prognose_Bruec...	Prognosewerte Bruec...	Other	Base	False	False	
AT_Prognose_Oberb...	AT_Prognose_Oberb...	Prognosewerte Oberb...	Other	Base	False	False	
AT_Prognose_Tunnel	AT_Prognose_Tunnel	Prognosewerte Tun...	Other	Base	False	False	
CH_Analyse_Brueck...	CH_Analyse_Brueck...	CH - Analysetabelle ...	Section	Base	False	False	
CH_Analyse_Oberbau	CH_Analyse_Oberbau	CH Analysetabelle O...	Section	Base	False	False	
CH_Analyse_Tunnel	CH_Analyse_Tunnel	CH - Analysetabelle ...	Section	Base	False	False	
CH_Prognose_Bruec...	CH_Prognose_Bruec...	Prognosewerte Bruec...	Other	Base	False	False	
CH_Prognose_Ober...	CH_Prognose_Ober...	Prognosewerte Ober...	Other	Base	False	False	
CH_Prognose_Tunnel	CH_Prognose_Tunnel	Prognosewerte Tun...	Other	Base	False	False	
DE_Analyse_Bruecken	DE_Analyse_Bruecken	AT - Analysetabelle ...	Section	Base	False	False	
DE_Analyse_Oberbau	DE_Analyse_Oberbau	AT Analysetabelle O...	Section	Base	False	False	
DE_Analyse_Tunnel	DE_Analyse_Tunnel	AT - Analysetabelle ...	Section	Base	False	False	
DE_Prognose_Bruec...	DE_Prognose_Bruec...	Prognosewerte Bruec...	Other	Base	False	False	

Abbildung 56: dTIMS TAniA Prototyp – Bildschirmausdruck – Datentabellen

7.5.2.2 Attribute (Datenfelder)

Jeder einzelnen Tabelle ist eine größere Anzahl von Attributen (Datenfeldern) zugeordnet. Diese Felder können wie folgt gruppiert werden:

- Interne Attribute zur Speicherung von Systemdaten und der Referenzierung
- Inventardatenfelder zur Speicherung der Inventarinformationen
- Zustandsdatenfelder zur Speicherung der Zustandseigenschaften der Anlagen
- Analyseattribute zur Speicherung der Analysevariablen
- Sonstige Attribute zur Speicherung weiterer Informationen (Datum, Kontrollattribute etc.)

Die nachfolgende Abbildung 57 zeigt einen Bildschirmausdruck der Konfigurationstabelle für die Attribute. Sämtliche Details zu den Attributen können dem elektronischen Anhang C entnommen werden.

Display Name	Name	Description	Table	Type	Expression	Size	Scale	Minimum
ALT_Jahr	ALT_Jahr	Alter - Jahr der Anst...	AT_Analyse_Bruecken	int		1	0	0
ALT_Jahresbezeichn...	ALT_Jahresbezeichn...	Jahresbezeichnung f...	AT_Analyse_Bruecken	nvarchar		50	0	
INT_Kosten	INT_Kosten	Interines Attribut für...	AT_Analyse_Bruecken	Decimal		15	5	0
INV_Anzahl_Bruecke...	INV_Anzahl_Bruecke...	Anzahl Brückenfelder	AT_Analyse_Bruecken	Smallint		1	0	1
INV_Bauweise	INV_Bauweise	Bauweise Brücke	AT_Analyse_Bruecken	nvarchar		50	0	
INV_Breite	INV_Breite	Breite (m)	AT_Analyse_Bruecken	Decimal		5	2	0
INV_Breite_NPS	INV_Breite_NPS	Breite Nebenfahstr...	AT_Analyse_Bruecken	Decimal		4	1	0
INV_Bruecken_ID	INV_Bruecken_ID	Bruecken ID	AT_Analyse_Bruecken	nvarchar		50	0	
INV_Brueckenbezeich...	INV_Brueckenbezeich...	Brueckenbezeichnung	AT_Analyse_Bruecken	nvarchar		200	0	
INV_DTV	INV_DTV	Gesamverkehr	AT_Analyse_Bruecken	bigint		1	0	0
INV_Ebene	INV_Ebene	Brückeneben (D+Str...	AT_Analyse_Bruecken	Smallint		1	0	-2
INV_Feldlaenge_max	INV_Feldlaenge_max	Maximale Feldlänge...	AT_Analyse_Bruecken	Decimal		5	2	0
INV_Flaeche	INV_Flaeche	Brückenfläche	AT_Analyse_Bruecken	Decimal		8	2	0
TAW_AL1	TAW_AL1	Technischer Anlage...	AT_Analyse_Bruecken	Decimal		8	3	0
TAW_AL2	TAW_AL2	Technischer Anlage...	AT_Analyse_Bruecken	Decimal		8	3	0

Abbildung 57: dTIMS TAniA Prototyp – Bildschirmausdruck – Attribute (Datenfelder)

7.5.2.3 Daten und Dateninhalte

Wie bereits erwähnt, wurden die übermittelten Daten aus den unterschiedlichen Quellen in den dTIMS TAniA-Prototyp übertragen. Die Daten wurden importiert und in der zugrundeliegenden SQL-Datenbank abgelegt.

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen Bildschirmausdrucke der Datentabellen im dTIMS TAniA Prototyp.

The screenshot shows the dTIMS Business Analytics interface for 'AT_Analyse_Oberbau'. The table displays asset data with columns for RowID, Name, jYear, INV_Baujahr_Deckschl., INV_Baujahr_gesOB., INV_Bauweise, INV_Breite_HFS, and INV.

RowID	Name	jYear	INV_Baujahr_Deckschl.	INV_Baujahr_gesOB.	INV_Bauweise	INV_Breite_HFS	INV
AD4_1	AD4_110	2016	2016	2000	A-Asphalt	3,8	3,8
AD4_1	AD4_11900	2016	1999	1999	A-Asphalt	3,8	3,8
AD4_1	AD4_11706	1987	1987	1987	B-Beton	3,8	3,8
AD4_1	AD4_17325	1999	1999	1999	B-Beton	3,8	3,8
AD4_1	AD4_14628	2000	2000	2000	B-Beton	3,8	3,8
AD4_1	AD4_15520	2016	2016	2016	A-Asphalt	3,8	3,8
AD4_1	AD4_14625	1999	1998	1998	B-Beton	3,8	3,8
AD4_1	AD4_18668	2002	2002	2002	B-Beton	3,8	3,8
AD4_1	AD4_16800	1999	1999	1999	B-Beton	3,8	3,8
AD4_1	AD4_17295	1998	1998	1998	B-Beton	3,8	3,8
AD4_1	AD4_18260	1998	1998	1998	B-Beton	3,8	3,8

Abbildung 58: dTIMS TAnIA Prototyp – Bildschirmausdruck – Inventardaten

The screenshot shows the dTIMS Business Analytics interface for 'AT_Prognose_Bruecken'. The table displays forecast data with columns for Name, CreatedDate, Abschnitt_Merkmal, CreatorBy, jYear_1, jYear_10, and jYear_11.

Name	CreatedDate	Abschnitt_Merkmal	CreatorBy	jYear_1	jYear_10	jYear_11
A00000800060215_219ABD	2021-05-09 14:22:04	A00000800060215_219ABD	dbo	1,000	1,370	1,400
A00000800060215_219AUSR	2021-05-09 14:22:04	A00000800060215_219AUSR	dbo	1,000	2,174	2,268
A00000800060215_219BEL	2021-05-09 14:22:04	A00000800060215_219BEL	dbo	0,000	0,000	0,000
A00000800060215_219FUEK	2021-05-09 14:22:04	A00000800060215_219FUEK	dbo	0,000	0,000	0,000
A00000800060215_219LAG	2021-05-09 14:22:04	A00000800060215_219LAG	dbo	0,000	0,000	0,000
A00000800060215_219R8	2021-05-09 14:22:04	A00000800060215_219R8	dbo	1,000	2,245	2,536
A00000800060215_219UEB	2021-05-09 14:22:04	A00000800060215_219UEB	dbo	1,000	1,951	2,029
A00000800060215_219UNL	2021-05-09 14:22:04	A00000800060215_219UNL	dbo	1,000	2,095	2,175
A00040800020290_218ABD	2021-05-09 14:22:04	A00040800020290_218ABD	dbo	1,833	2,657	2,723
A00040800020290_218AUSR	2021-05-09 14:22:04	A00040800020290_218AUSR	dbo	1,000	2,174	2,268
A00040800020290_218BEL	2021-05-09 14:22:04	A00040800020290_218BEL	dbo	1,000	1,951	2,029

Abbildung 59: dTIMS TAnIA Prototyp – Bildschirmausdruck – Prognosedaten

7.5.3 Analysekonfiguration

Die Modellierung der Lebenszyklusanalyse erfolgt durch die Implementierung sogenannter Analysevariablen. Diese Variablen beschreiben die zeitliche Änderung der unterschiedlichen, zu untersuchenden Eigenschaften und beinhalten somit auch die

Modelle für die Zustandsprognose aus den Prognosetabellen. Die Analysevariablen können dabei in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- Zustandsanalysevariablen zur Beschreibung der Zustandsprognose
- Beanspruchungsanalysevariablen zur Beschreibung der Beanspruchungen über die Zeit (z. B. Verkehrsbelastung)
- Wertvariablen zur Beschreibung der zeitlichen Änderung der Indikatoren, entweder ausgedrückt durch die dimensionslose Skala 0 - 100 oder über den monetären Technischen Anlagenwert
- Summationsvariablen zur Beschreibung von Summenwerten am Ende der Betrachtungsperiode (z. B. kumulierter Wirkungsindex, Indexfläche)

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen Bildschirmausdrucke zur Definition der Analysevariablen im dTIMS TAniA-Prototyp. Sämtliche Details zu den Analysevariablen können dem elektronischen Anhang C entnommen werden.

Display Name	Name	Description	Attribute	Initialize Attribute	Initialize Expression
CH_B_JAV_KST_Max...	CH_B_JAV_KST_Max...	Maximalmassen	CH_Analyse_Bruecken-INT_Kosten	CH_Analyse_Bruecken-INT_Kosten	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Al_1
CH_B_JAV_TAW_Al_1	CH_B_JAV_TAW_Al_1	TAW Auslastungsindikator 1	CH_Analyse_Bruecken-TAW_Al_1	CH_Analyse_Bruecken-TAW_Al_1	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Al_1
CH_B_JAV_TAW_Al_2	CH_B_JAV_TAW_Al_2	TAW Auslastungsindikator 2	CH_Analyse_Bruecken-TAW_Al_2	CH_Analyse_Bruecken-TAW_Al_2	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Al_2
CH_B_JAV_TAW_Ges...	CH_B_JAV_TAW_Ges...	Technischer Anlagenwert Gesamt Netz	CH_Analyse_Bruecken-TAW_Al_1	CH_Analyse_Bruecken-TAW_Al_1	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Ges
CH_B_JAV_TAW_Ind...	CH_B_JAV_TAW_Ind...	Technischer Anlagenwert Index Gesamt	CH_Analyse_Bruecken-TAW_Index...	CH_Analyse_Bruecken-TAW_Index...	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Ges
CH_B_JAV_TAW_KI	CH_B_JAV_TAW_KI	Technischer Anlagenwert Konstruktionsindex	CH_Analyse_Bruecken-TAW_KI	CH_Analyse_Bruecken-TAW_KI	CH_B_JAN_INPUT_TAW_KI
CH_B_JAV_TAW_Wir...	CH_B_JAV_TAW_Wir...	Wirkungsindex	CH_Analyse_Bruecken-INT_Kosten	CH_Analyse_Bruecken-INT_Kosten	CH_B_JAN_INPUT_TAW_KI
CH_B_JAV_ZU_Abdic...	CH_B_JAV_ZU_Abdic...	Zustand Abdichtung	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Abdichtu...	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Abdichtu...	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Ges
CH_B_JAV_ZU_Ausri...	CH_B_JAV_ZU_Ausri...	Zustand Ausriktung	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Ausriest...	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Ausriest...	CH_B_JAN_INPUT_TAW_KI
CH_B_JAV_ZU_Belag	CH_B_JAV_ZU_Belag	Zustand Belag	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Belag	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Belag	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Ges
CH_B_JAV_ZU_FUEK	CH_B_JAV_ZU_FUEK	Zustand FÜK	CH_Analyse_Bruecken-ZU_FUEK	CH_Analyse_Bruecken-ZU_FUEK	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Ges
CH_B_JAV_ZU_Lager	CH_B_JAV_ZU_Lager	Zustand Lager	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Lager	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Lager	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Ges
CH_B_JAV_ZU_Randba...	CH_B_JAV_ZU_Randba...	Zustand Randballen	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Randba...	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Randba...	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Ges
CH_B_JAV_ZU_Unterb...	CH_B_JAV_ZU_Unterb...	Zustand Unterbau	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Unterbau	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Unterbau	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Ges
CH_B_JAV_ZU_Unter...	CH_B_JAV_ZU_Unter...	Zustand Unterbau	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Unterbau	CH_Analyse_Bruecken-ZU_Unterbau	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Ges
CH_B_KAV_KST_Nut...	CH_B_KAV_KST_Nut...	Nutzen	CH_Analyse_Bruecken-INT_Kosten	CH_Analyse_Bruecken-INT_Kosten	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Ges
CH_B_KAV_KST_Stra...	CH_B_KAV_KST_Stra...	Stromkosten	CH_Analyse_Bruecken-INT_Kosten	CH_Analyse_Bruecken-INT_Kosten	CH_B_JAN_INPUT_TAW_Ges

Abbildung 60: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Transformationsroutinen zur Aufbereitung der Daten

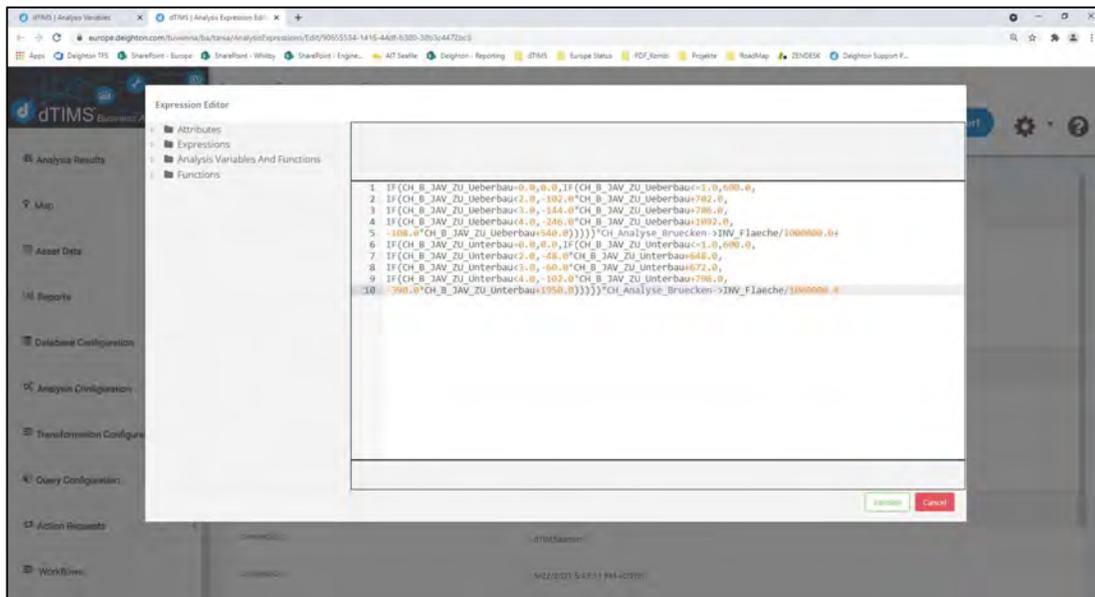


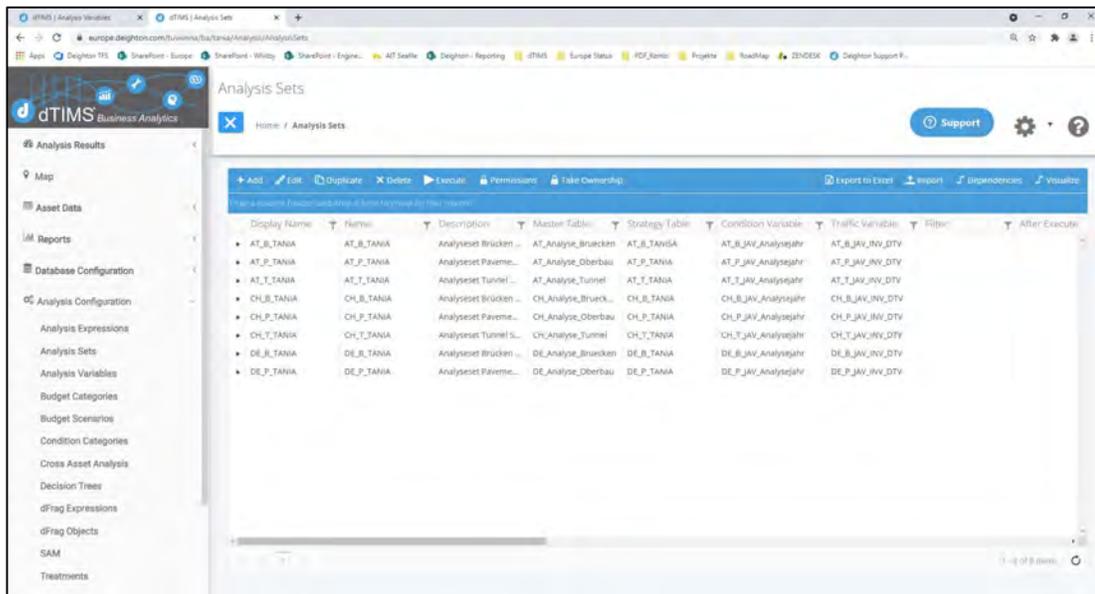
Abbildung 61: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Formeln zur Berechnung der Analysevariablen

7.5.4 Analyseset und Szenario für Optimierung

Die Zusammenführung der unterschiedlichen Analysevariablen mit den Daten erfolgt im sogenannten Analyseset. Darüber hinaus wird im Analyseset der Zeitrahmen für die Analyse bestimmter Parameter der Lebenszyklusanalyse definiert. Im Rahmen der Definition eines Szenarios werden die Randbedingungen für die Optimierung festgelegt. Für die Konfiguration des dTIMS TAniA-Prototyp wurden folgende Festlegungen implementiert:

- Analysesets für eine 15-jährige Analyseperiode von 2021 bis 2036 (Verfügbarkeit Analysedaten aus PMS, BMS und TMS über maximal 15 Jahre und somit Vergleichbarkeit mit Ergebnissen aus Variante B und C)
- Szenario Strategie zur Auswahl der Erhaltungsmaßnahmenstrategie (ist erforderlich zu Definition der Optimierungsaufgabe und zum Anzeigen der Ergebnisse)

Die nachfolgende Abbildung 62 zeigt einen Bildschirmausdruck zur Definition des Analysesets und des Analyseszenarios im dTIMS TAniA-Prototyp.



Display Name	Name	Description	Master Table	Strategy Table	Conversion Variable	Traffic Variable	Filter	After Execute
AT_B_TANIA	AT_B_TANIA	Analyseset Brücken ...	AT_Analyse_Bruecken	AT_B_TANIA	AT_B_JAV_Analysejahr	AT_B_JAV_INV_DTV		
AT_P_TANIA	AT_P_TANIA	Analyseset Paveme...	AT_Analyse_Oberbau	AT_P_TANIA	AT_P_JAV_Analysejahr	AT_P_JAV_INV_DTV		
AT_T_TANIA	AT_T_TANIA	Analyseset Tunnel...	AT_Analyse_Tunnel	AT_T_TANIA	AT_T_JAV_Analysejahr	AT_T_JAV_INV_DTV		
CH_B_TANIA	CH_B_TANIA	Analyseset Brücken ...	CH_Analyse_Brueck...	CH_B_TANIA	CH_B_JAV_Analysejahr	CH_B_JAV_INV_DTV		
CH_P_TANIA	CH_P_TANIA	Analyseset Paveme...	CH_Analyse_Oberbau	CH_P_TANIA	CH_P_JAV_Analysejahr	CH_P_JAV_INV_DTV		
CH_T_TANIA	CH_T_TANIA	Analyseset Tunnel S...	CH_Analyse_Tunnel	CH_T_TANIA	CH_T_JAV_Analysejahr	CH_T_JAV_INV_DTV		
DE_B_TANIA	DE_B_TANIA	Analyseset Brücken ...	DE_Analyse_Bruecken	DE_B_TANIA	DE_B_JAV_Analysejahr	DE_B_JAV_INV_DTV		
DE_P_TANIA	DE_P_TANIA	Analyseset Paveme...	DE_Analyse_Oberbau	DE_P_TANIA	DE_P_JAV_Analysejahr	DE_P_JAV_INV_DTV		

Abbildung 62: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck –Liste Analysesets

7.5.5 Arten von Ergebnissen

Nach dem Durchführen der Analyse stehen sowohl für jede einzelne Anlage als auch für die gesamte Teststrecke bzw. für das Teilnetz in Abhängigkeit von der Anlagenart die Berechnungsergebnisse zur Verfügung. Die Ergebnisse der Teststrecken bzw. des Teilnetzes sind eine Zusammenfassung der anlagenspezifischen Ergebnisse. Dabei handelt es sich grundsätzlich um folgende Ergebnisse:

- Technischer Anlagenwert (monetär und normiert von 0 bis 100) in jedem Jahr der Betrachtungsperiode für jede einzelne analysierte Anlage
- Werte der Indikatoren in jedem Jahr der Betrachtungsperiode für jede einzelne analysierte Anlage
- Verläufe der Zustände mit den Wirkungen der Erhaltungsmaßnahmen
- Parameter der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung gem. Kapitel 6.2.2
- Entwicklung Technischer Anlagenwert als monetäre Größe über den gesamten Analysezeitraum für die gesamte Teststrecke bzw. das Teilnetz
- Entwicklung Technischer Anlagenwert auf einer Skala von 0 bis 100 über den gesamten Analysezeitraum für die gesamte Teststrecke bzw. das Teilnetz

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen einige Bildschirmausdrucke dieser Ergebnisse im dTIMS TAniA-Prototyp für die D-A-CH-Länder.

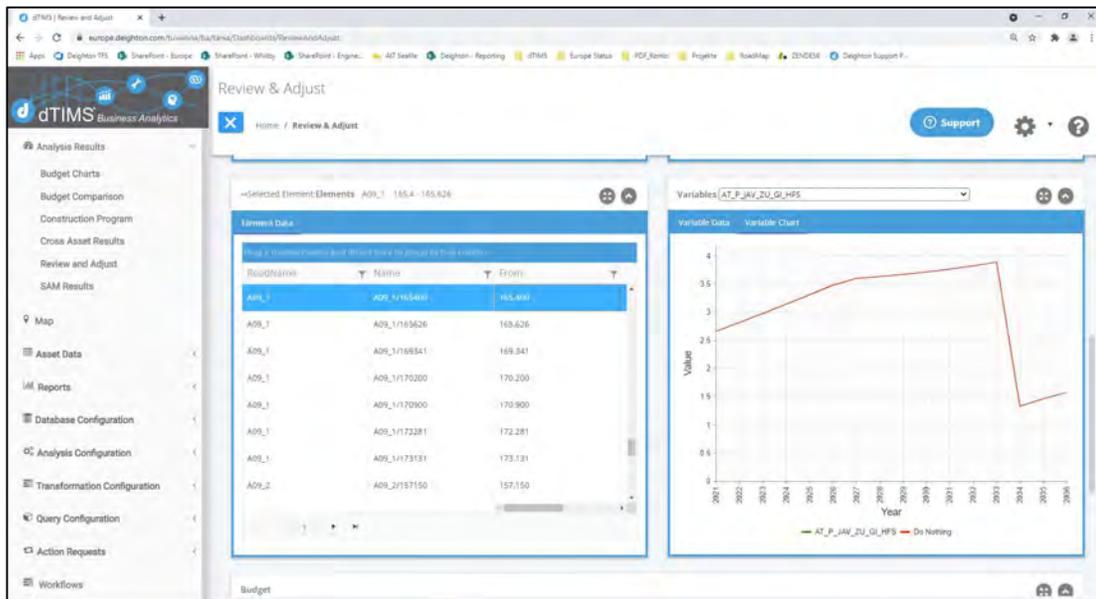


Abbildung 63: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Verlauf Zustand Gebrauchswert Straßenoberbau Teststrecke Österreich

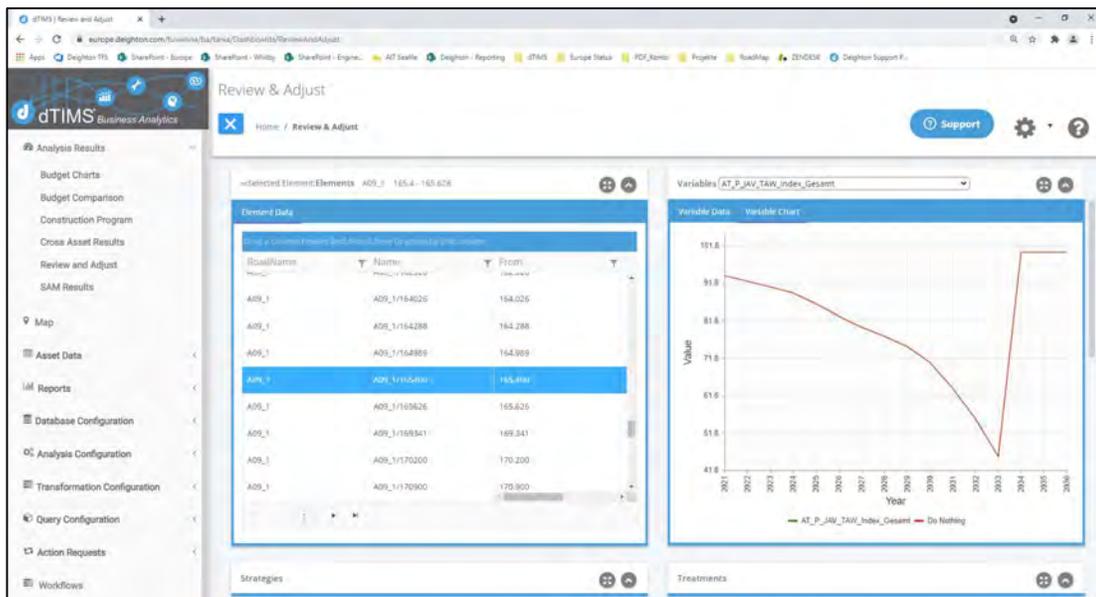


Abbildung 64: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Verlauf Technischer Anlagenwert Straßenoberbau Teststrecke Österreich

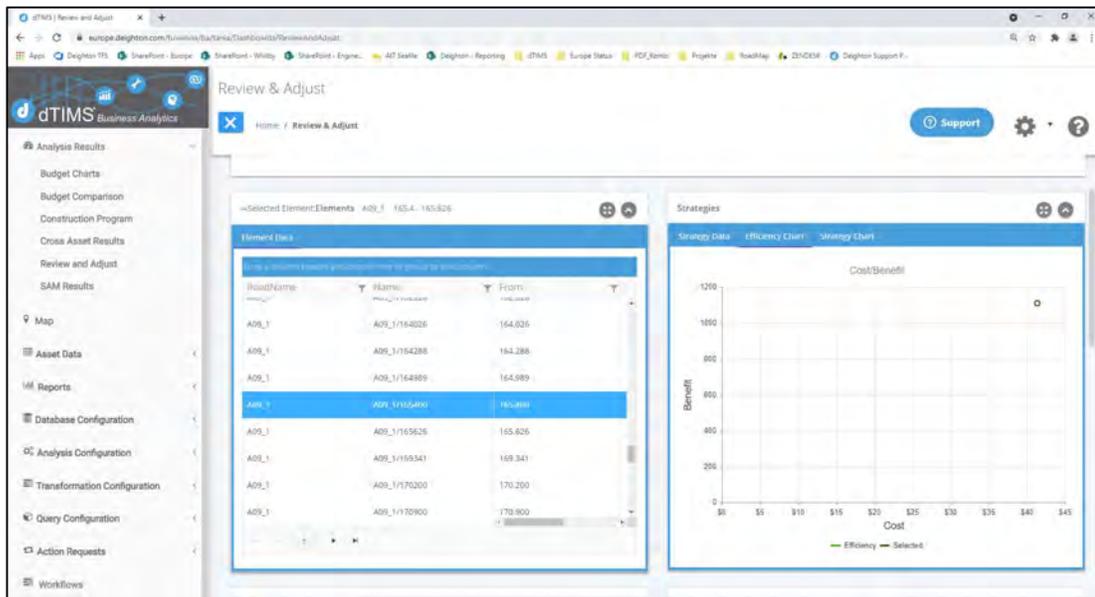


Abbildung 65: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Wirtschaftlichkeitsparameter Straßenoberbau Teststrecke Österreich

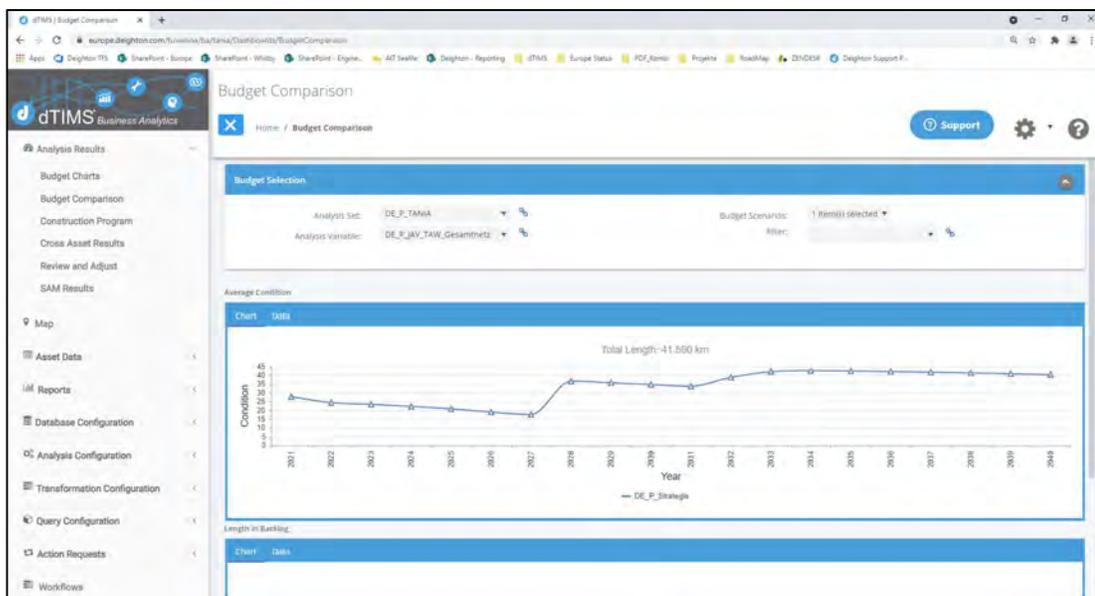


Abbildung 66: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Entwicklung Technischer Anlagenwert (monetär, in Mio. €) Straßenoberbau, Teststrecke Deutschland

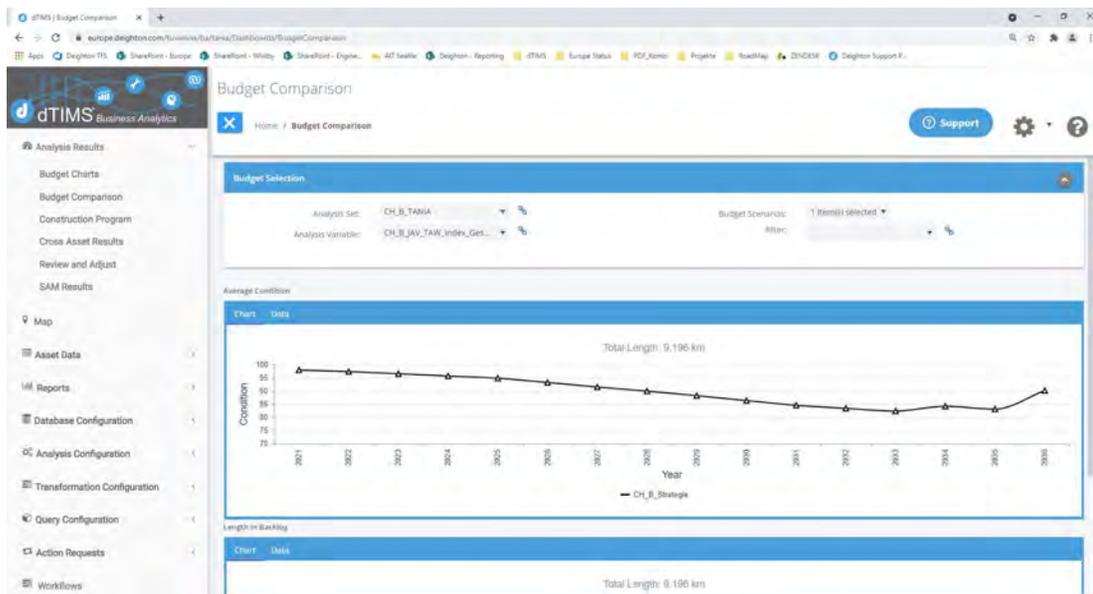


Abbildung 67: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Entwicklung Technischer Anlagenwert (Skala 0-100) Brücken, Teststrecke Schweiz

7.6 Ergebnisse der praktischen Anwendung

Die nachfolgenden Kapitel zeigen die Ergebnisse der praktischen Anwendung des Projektes TAniA für die drei Teststrecken und das Teilnetz. Die Details zu den Teststrecken sowie zum Teilnetz können dem Kapitel 7.2 bzw. dem Kapitel 7.4 entnommen werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und des besseren Vergleichs, erfolgt die Strukturierung der nachfolgenden Ergebnisse in Abhängigkeit vom Typ der Anlage.

Wie bereits mehrfach erwähnt, obliegt die Auswahl bzw. die Vorgabe für die Erhaltungsmaßnahmen im Lebenszyklus dem Anwender, sodass TAniA hier nur Vorschläge machen kann. Um die Auswirkungen von unterschiedlichen Ansätzen in den Ergebnissen zu zeigen, wurden, wie in Kapitel 7.4 beschrieben, auch unterschiedliche Varianten gewählt. Vor allem im Bereich der Auswahl von Standardlebenszyklen ergeben sich verschiedene Möglichkeiten (siehe Kapitel 5.4). Einerseits kann das Alter der Anlage oder eines Anlagenteils für den Zeitpunkt einer Erhaltungsmaßnahme herangezogen werden, andererseits kann der Zustand als maßgebende Anwendungsgrenze Verwendung finden. In den meisten Fällen liefern Alter und Zustand divergierende Lösungen, sodass der Anwender auf jeden Fall eine ingenieurmäßige Analyse und Bewertung vornehmen muss.

Im Rahmen der praktischen Anwendung wurde versucht darzustellen, welche Auswirkungen der jeweilige Ansatz zeigt, sodass TAniA auch für diese Fragestellung eine Empfehlung abgeben kann.

7.6.1 Straßenoberbau

Die nachfolgende Abbildung 68 zeigt den Verlauf des längengewichteten mittleren Technischen Anlagenwertes für den Straßenoberbau in einer dimensionslosen Skalierung von 0 bis 100 für die drei untersuchten Teststrecken und das Teilnetz.

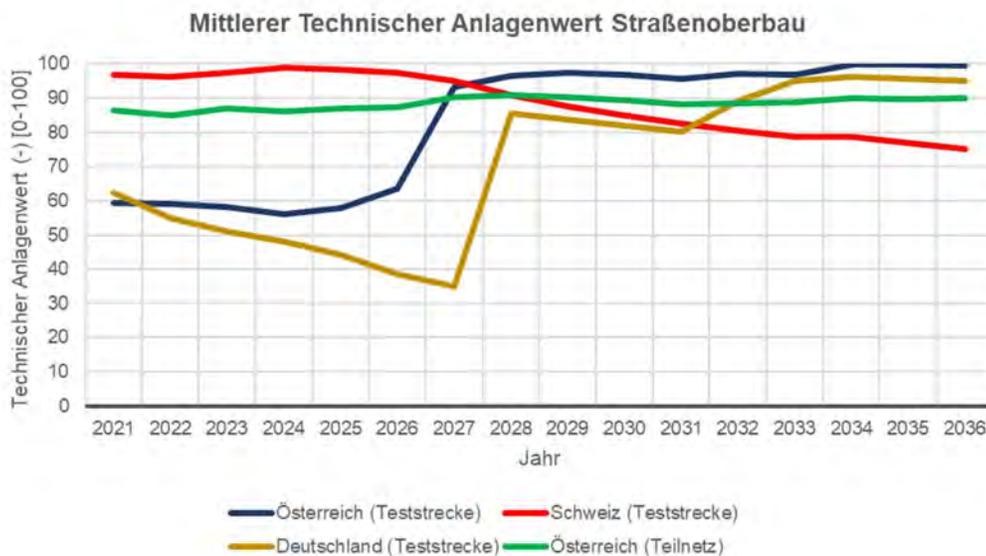


Abbildung 68: Mittlerer Technischer Anlagenwert Straßenoberbau

Die Verläufe zeigen nachvollziehbar die Wirkungen der „gebündelten“ Erhaltungsmaßnahmen auf den Teststrecken. Vor allem der späte Zeitpunkt für die Durchführung der Erhaltungsmaßnahmen auf der deutschen Teststrecke A44 liefert hier den erwarteten „Sprung“ im Technischen Anlagenwert von unter 40 auf fast 90. Einige Abschnitte werden aufgrund ihrer Zustandsentwicklung erst nach dem „Sprung“ instandgesetzt bzw. erneuert.

Die Grundlage des Lebenszyklus für die österreichische Teststrecke A9 wurde direkt aus dem österreichischen PMS der ASFINAG entnommen und zeigt die Wirkung der im Bauprogramm vorgesehenen Maßnahmen auf den Technischen Anlagenwert im Jahr 2026. Ein nahezu konstanter Verlauf kann dem Teilnetz zugeordnet werden und eine

geringe Abnahme ist auf der Schweizer Teststrecke erkennbar, wobei diese ein hohes Anfangsniveau aufweist. Der mittlere Technische Anlagenwert hat Einschränkungen, er zeigt nicht wie die Werte auf den Teststrecken und auf dem Teilnetz verteilt sind.

Eine wesentlich bessere Aussage liefert somit die Verteilung des Technischen Anlagenwertes in Form von unterschiedlichen Kategorien, wie sie in den nachfolgenden Abbildung 69 bis 71 dargestellt ist. Damit lässt sich sehr gut zeigen, welcher Streckenanteil einen geringen und welcher Streckenanteil einen hohen Technischen Anlagenwert aufweist (wiederum bezogen auf die Skala von 0 bis 100).

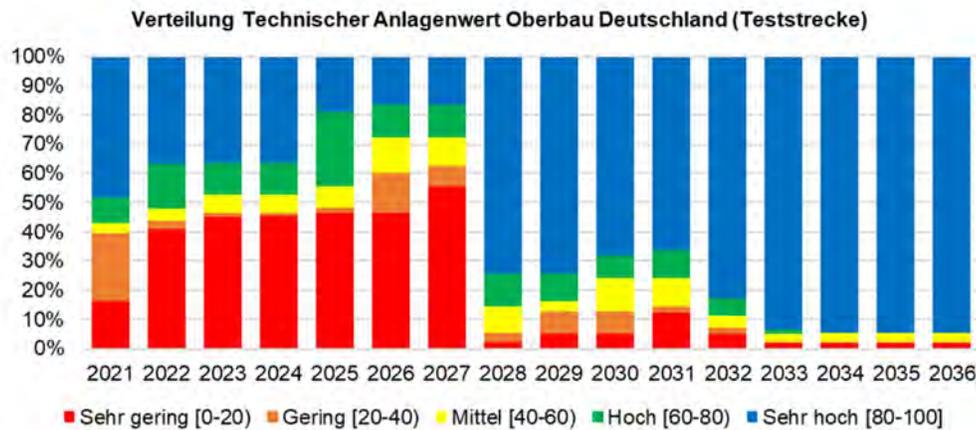


Abbildung 69: Verteilung Technischer Anlagenwert Oberbau Teststrecke Deutschland

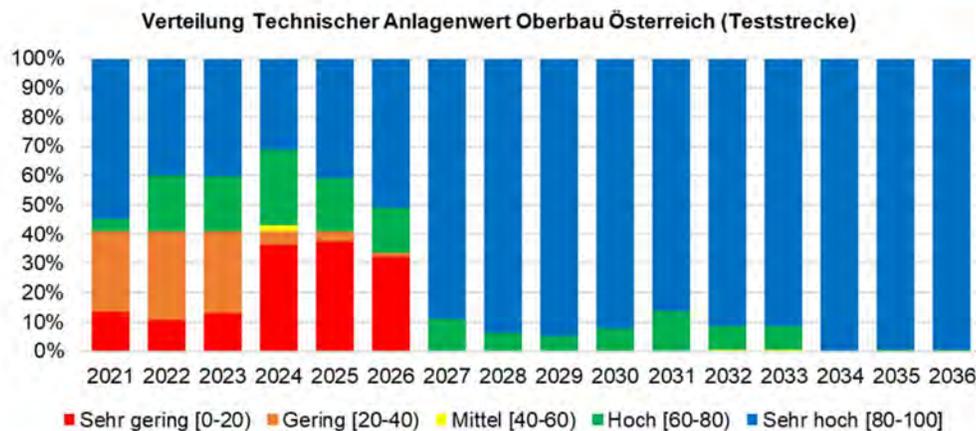


Abbildung 70: Verteilung Technischer Anlagenwert Oberbau Teststrecke Österreich

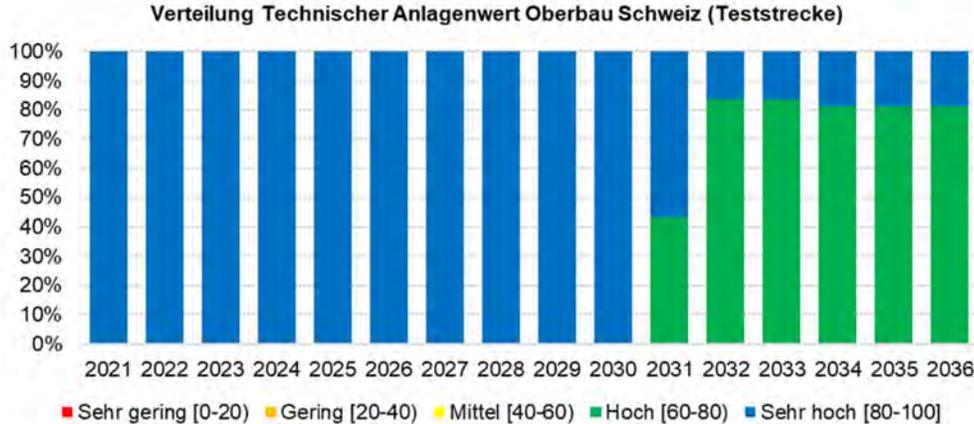


Abbildung 71: Verteilung Technischer Anlagenwert Oberbau Teststrecke Schweiz

Die Teststrecken zeigen eine hohe Sensitivität in der Verteilung durch die angesetzten Erhaltungsmaßnahmen. Ein interessantes Ergebnis liefert die schweizerische Teststrecke. Obwohl dort Erhaltungsmaßnahmen angesetzt werden, ist deren Wirkung praktisch nicht erkennbar. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass, wie bereits beschrieben, der Auslöser für die Erhaltungsmaßnahmen das Alter ist und nicht der Zustand, der auf der Teststrecke stark vom Alter divergiert (sehr guter Zustand bei hohem Alter). Da die Berechnung des Technischen Anlagenwertes der Strecken jedoch auf dem Zustand basiert und nicht auf dem Alter, ist die Verteilung als logisch einzustufen. Darüber hinaus werden für die Bewertung des Zustandes in der Schweiz ausschließlich Oberflächenmerkmale (I_0 bis I_4) herangezogen, im Vergleich zu Deutschland und Österreich, wo das Alter im Substanzwert „Bestand“ bzw. im Substanzwert „Tragfähigkeit“ eine maßgebende Einflussgröße darstellt und sich somit im Konstruktionsindikator abbildet. Ob das Fehlen des Alters bei der Zustandsbewertung in der Schweiz zu einer Verfälschung des gegenständlichen Ergebnisses führt, kann nicht ausgeschlossen werden. Die Vergleichbarkeit ist dadurch auf jeden Fall eingeschränkt.

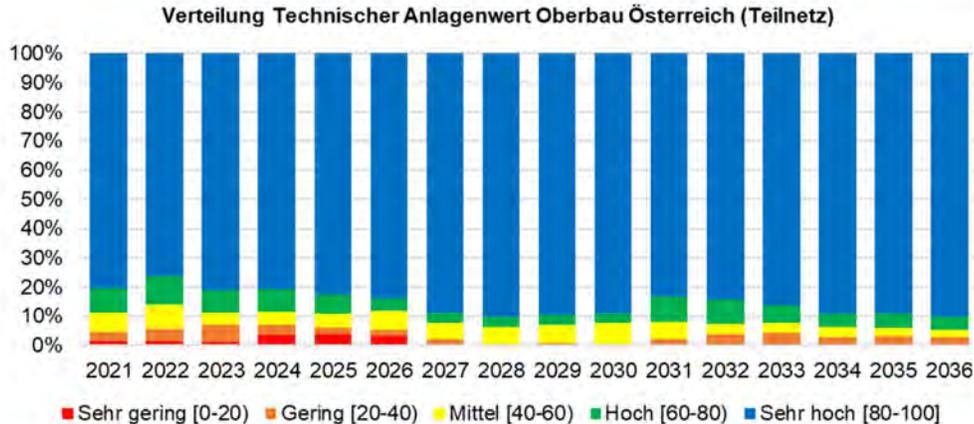


Abbildung 72: Verteilung Technischer Anlagenwert Oberbau Teilnetz Österreich

Die Verteilung über das Teilnetz bestätigt die Strategie der ASFINAG, deren Ziel darin besteht eine mittelfristige Verbesserung des Zustandes zu erzielen, was sich auch im Technischen Anlagenwert entsprechend wiederfindet.

Aus Gründen der Vollständigkeit wurden auch die monetären Größen des Technischen Anlagenwertes ausgewertet, wobei ein Vergleich zwischen den Teststrecken und der Teilstrecke aufgrund unterschiedlicher Währungen und Preisniveaus nicht sinnvoll ist. Die Absolutwerte wurden unter Heranziehung der Länge der Teststrecken bzw. des Teilnetzes in €/km oder in CHF/km umgerechnet.

Die Darstellung ist natürlich „ähnlich“ zur Entwicklung des mittleren Technischen Anlagenwertes und zeigt auch besonders gut die „monetären Sprünge“ im Wert durch die Erhaltungsmaßnahmen auf den Teststrecken sowie die konstante Entwicklung auf dem Teilnetz (siehe Abbildung 73).

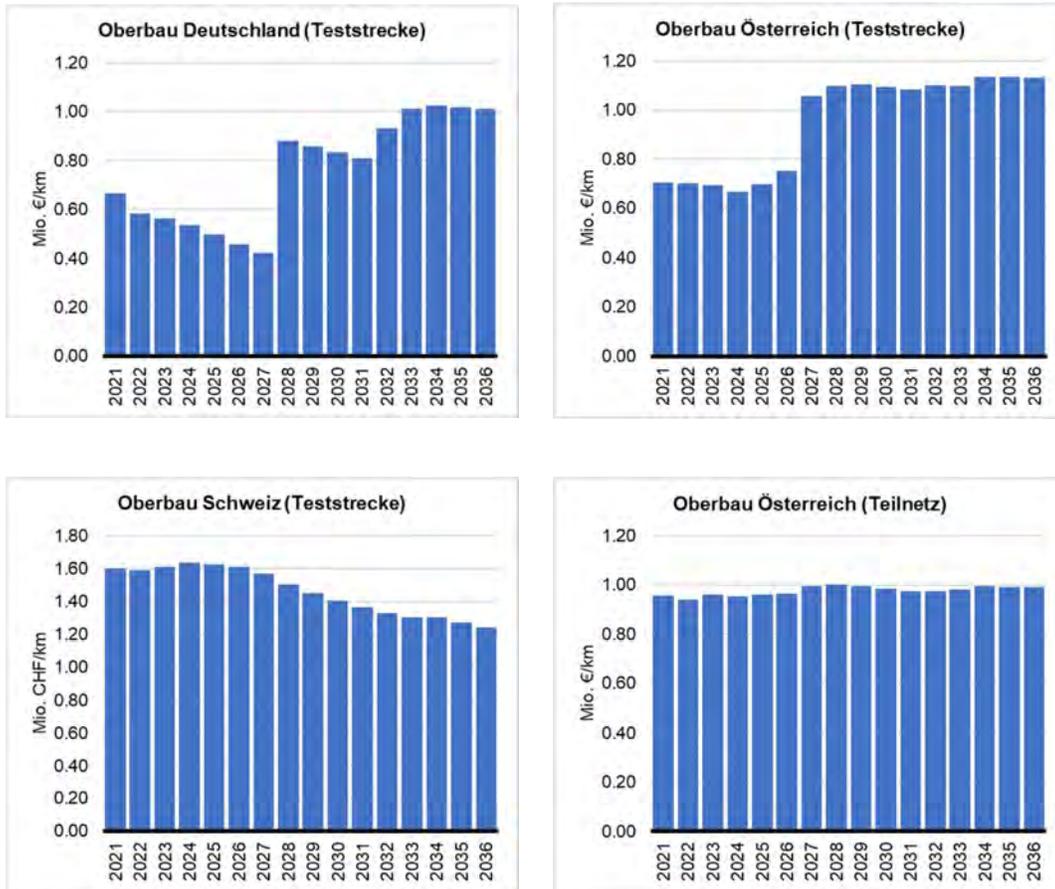


Abbildung 73: monetärer Technischer Anlagenwert Teststrecken und Teilnetz

Die Prüfung, ob eine gewählte Erhaltungsmaßnahmenstrategie eine gute Lösung darstellt, ist auch die Aufgabe der Wirtschaftlichkeitsbeurteilung gemäß Kapitel 6.2. Die nachfolgende Abbildung 74 zeigt die Effektivitätsdiagramme TAniA für die Teststrecken und das Teilnetz. Um einen besseren Vergleich zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse der Teststrecke Österreich mit dem Teilnetz Österreich in einer einzigen Grafik erkennbar dargestellt (siehe Abbildung 74). Die Punkte in den Diagrammen sind die einzelnen Strecken, da für jede einzelne Strecke nur jeweils eine einzige Erhaltungsmaßnahmenstrategie untersucht wird

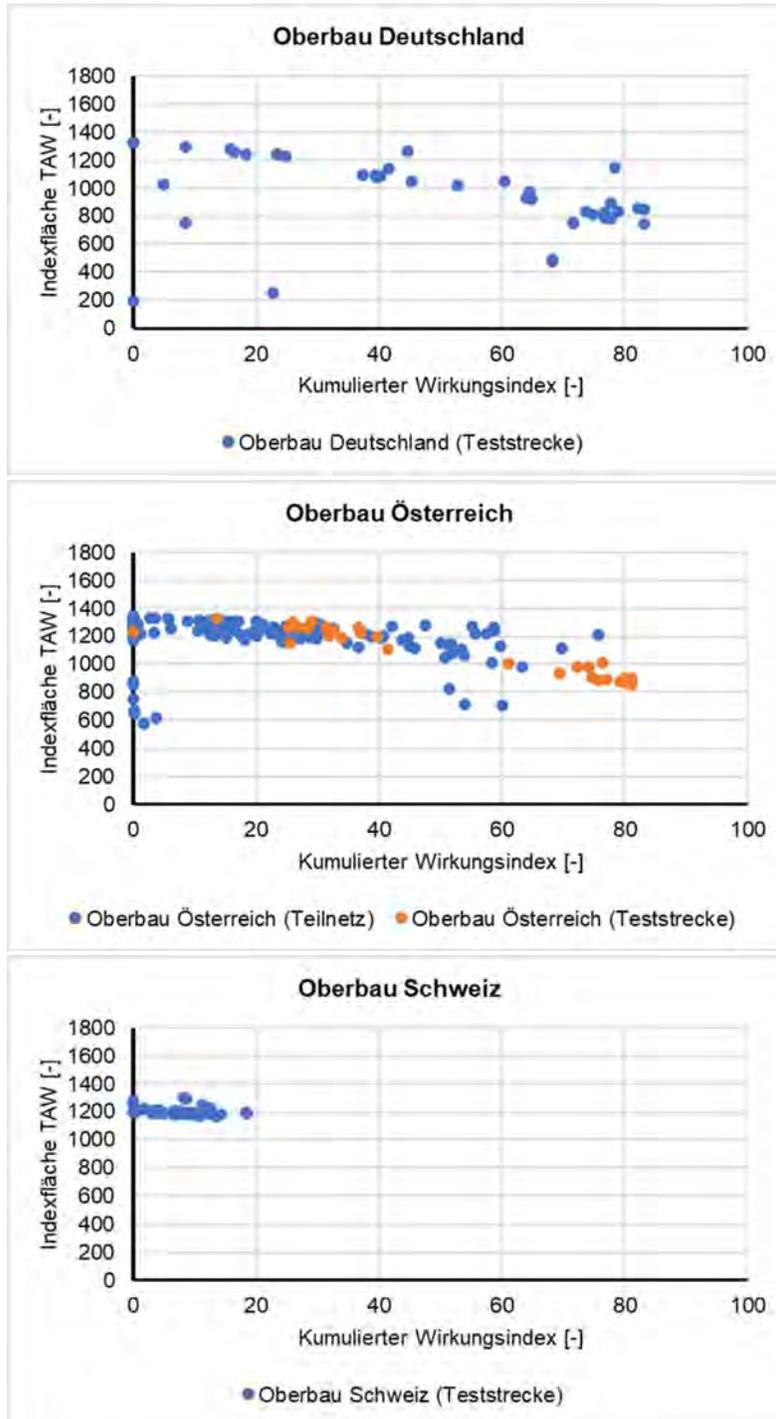


Abbildung 74: Effektivitätsdiagramme „TAniA“ Oberbau Teststrecken und Teilnetz

Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zeigt, dass fast alle Erhaltungsmaßnahmenstrategien aus der Sicht des Technischen Anlagenwertes als „wirtschaftlich“ eingestuft werden können und nur einzelne Abschnitte (infolge Homogenisierung, Vorgaben im Bauprogramm etc.) eine geringe Effektivität aufweisen. Etwas mehr Ausreißer zeigt die Teststrecke Deutschland, was darauf hinweist, dass vielleicht doch einige Abschnitte früher instandgesetzt bzw. erneuert werden sollten. Eine Besonderheit ist wiederum die Schweiz, da durch den guten Zustand auch die kumulierte Wirkung der Erhaltungsmaßnahmen auf den Technischen Anlagenwert gering ist, dadurch aber das hohe Niveau gehalten werden kann. Ob diese Strategie aus der Sicht der erforderlichen Investitionen eine gute Lösung darstellt, kann allein durch den Technischen Anlagenwert nicht bewertet werden. Das dargestellte Ergebnis ist jedoch maßgebend vom Umstand beeinflusst, dass nur die Oberflächenmerkmale den Wert des Straßenoberbaus bestimmen.

7.6.2 Brücken

Die nachfolgende Abbildung 75 zeigt den Verlauf des mittleren Technischen Anlagenwertes für die Brückenobjekte in einer Skalierung von 0 bis 100 für die drei Teststrecken und das Teilnetz.

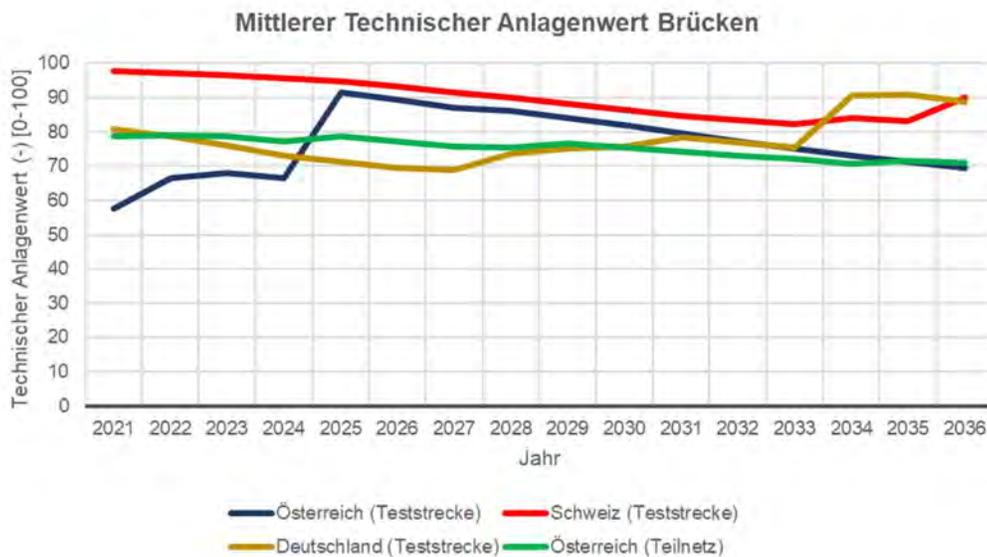


Abbildung 75: Mittlerer Technischer Anlagenwert Brücken

Die in Abbildung 75 dargestellten Verläufe des mittleren (längengewichteten) Technischen Anlagenwertes zeigen für die untersuchten Teststrecken und das Teilnetz durchwegs

unterschiedliche Verläufe. Auf der österreichischen Teststrecke A9 ist für das Jahr 2024 gemäß dem vorgegebenen Szenario eine umfangreiche Sanierung geplant (vorlaufend zur Sanierung des Straßenoberbaus). Dies zeigt sich sehr deutlich in der Steigerung des Technischen Anlagenwertes im Jahr 2025.

Auch hier liefern die Verteilungen der unterschiedlichen Klassen eine wesentlich bessere Aussage als der Mittelwert. Diese können den nachfolgenden Abbildungen 76 bis 79 entnommen werden.

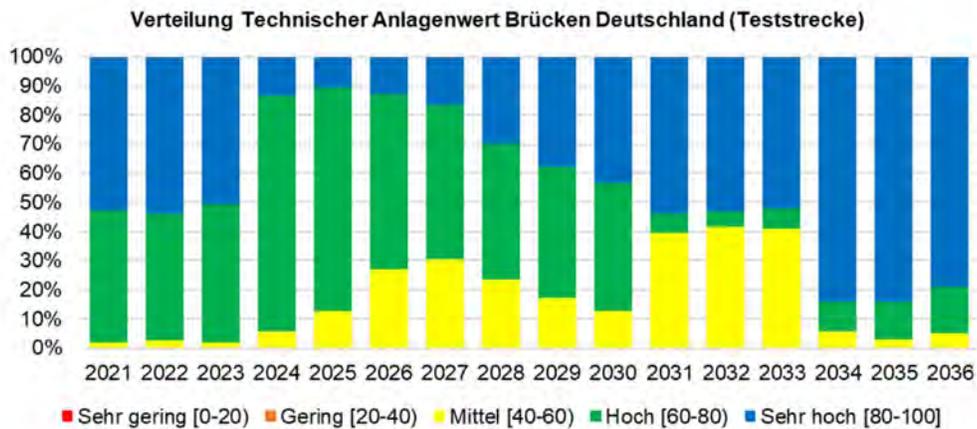


Abbildung 76: Verteilung Technischer Anlagenwert Brücken Teststrecke Deutschland

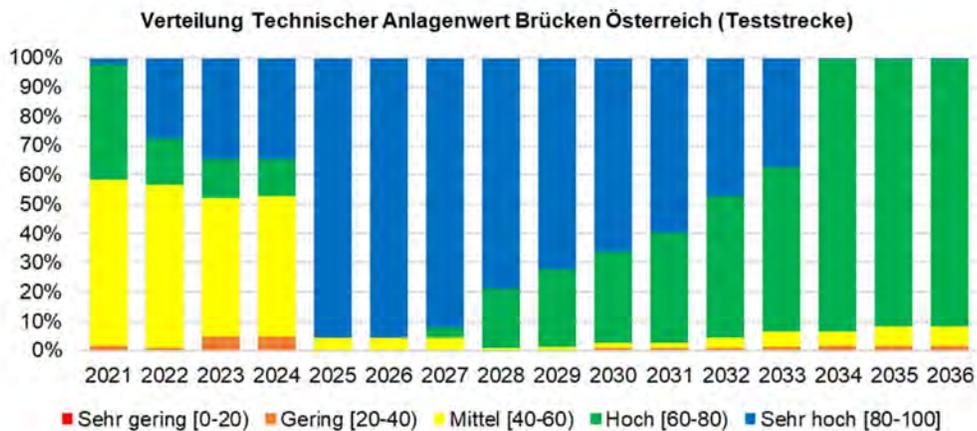


Abbildung 77: Verteilung Technischer Anlagenwert Brücken Teststrecke Österreich

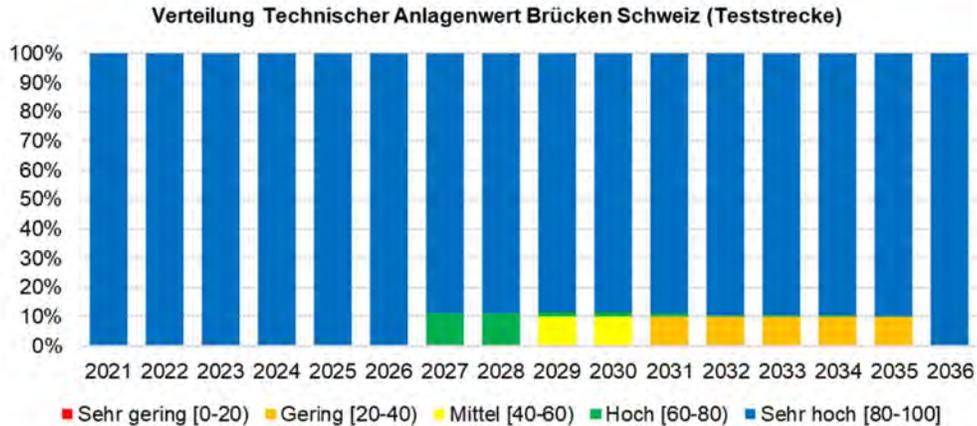


Abbildung 78: Verteilung Technischer Anlagenwert Brücken Teststrecke Schweiz

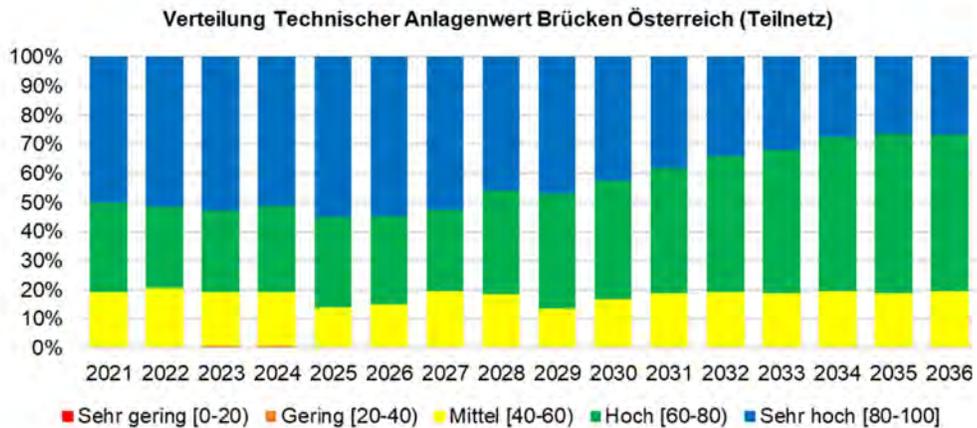


Abbildung 79: Verteilung Technischer Anlagenwert Brücken Teilnetz Österreich

Im Vergleich zum Straßenoberbau, wo sowohl auf den Teststrecken als auch auf dem Teilnetz Abschnitte mit sehr geringem Technischen Anlagenwert vorhanden sind, zeigt die Verteilung bei den Brücken ein besseres Bild. Dies ist auch auf den Umstand zurückzuführen, dass die Erhaltungsmaßnahmen in der Regel früher durchgeführt bzw. bestimmte Zustände nicht zugelassen werden. Dementsprechend hoch ist der Technische Anlagenwert, der als monetäre Größe in €/km bzw. CHF/km in der nachfolgenden Abbildung 80 dargestellt ist. Dabei ist wiederum zu beachten, dass in den drei D-A-CH-Ländern unterschiedliche Preisniveaus vorherrschen und in der Schweiz mit den Schweizer Franken eine andere Währung gilt (Schweizer Franken [CHF]).

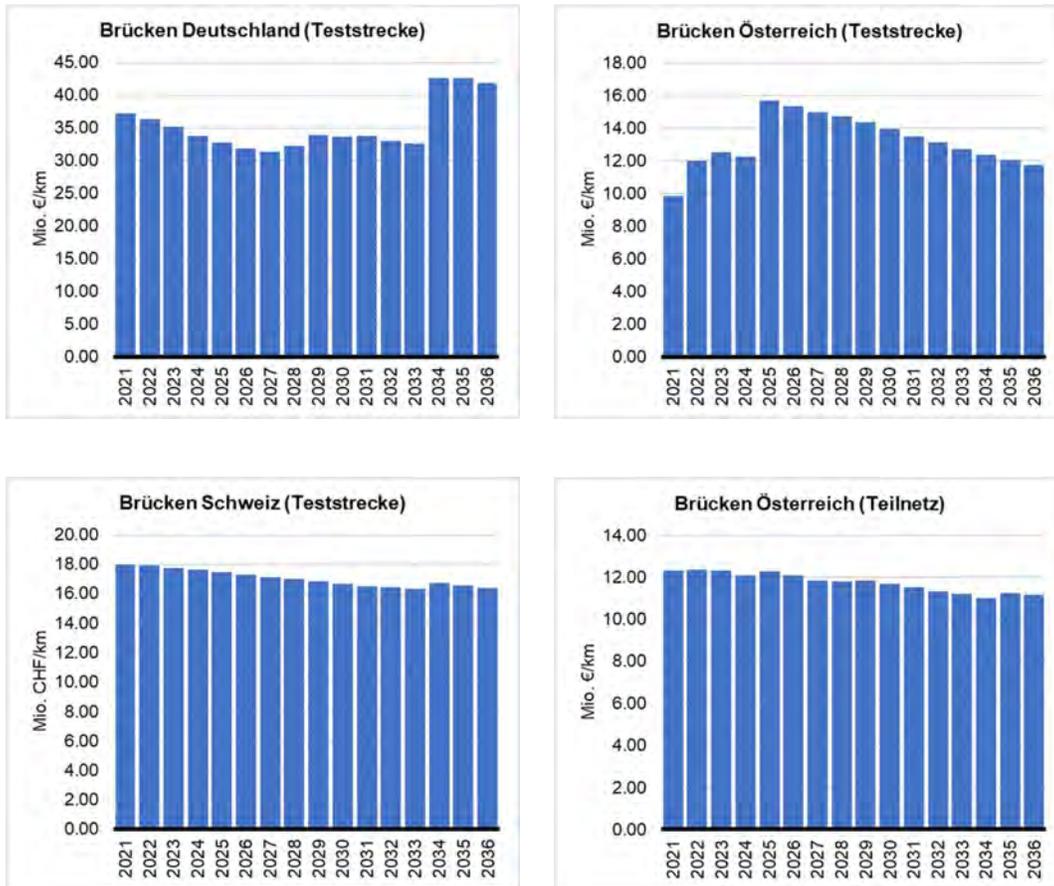


Abbildung 80: monetärer Technischer Anlagenwert Brücken Teststrecken und Teilnetz

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung bzw. der Bewertung der Effektivität können der nachfolgenden Abbildung 81 entnommen werden. Die Teststrecke Österreich und das Teilnetz Österreich ausgewählte Teilnetz wurden auch hier wieder zusammengefasst. Jeder Punkt entspricht in der Abbildung einem Objekt, da je Objekt nur eine einzige Erhaltungsmaßnahmenstrategie untersucht wurde.

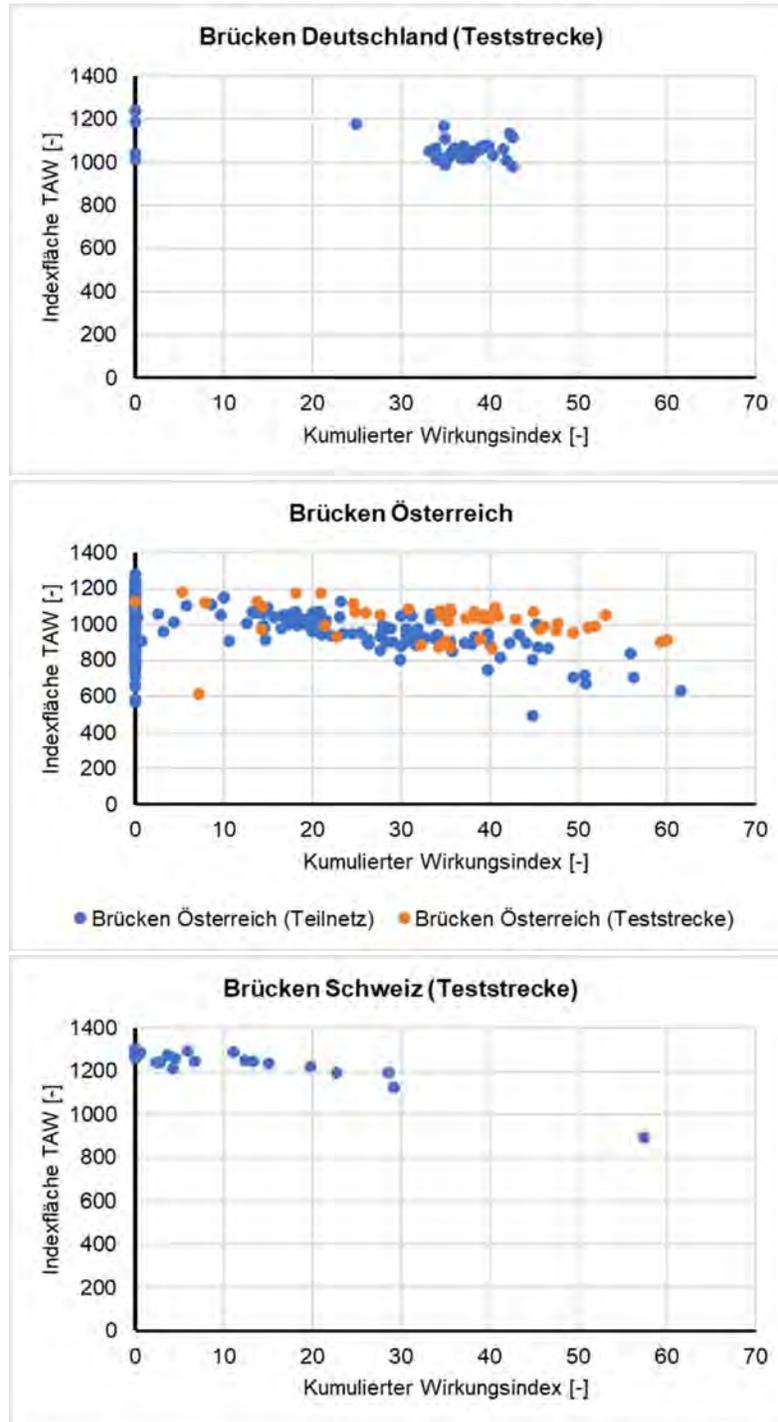


Abbildung 81: Effektivitätsdiagramme „TAniA“ Brücken Teststrecken und Teilnetz

Fast alle untersuchten Erhaltungsmaßnahmenstrategien zeigen eine hohe Effizienz aus der Sicht des Technischen Anlagenwertes. Bei der Betrachtung der Ergebnisse am Teilnetz zeigt sich auch ein hoher Anteil an Objekten, die in den nächsten 15 Jahren mit keiner Erhaltungsmaßnahme verknüpft sind, was in erster Linie auf die Betrachtungsperiode von nur 15 Jahren zurückzuführen ist. Einige dieser Objekte weisen jedoch eine geringe Indexfläche auf, sodass auch Objekte davon betroffen sind, die schon einen schlechteren Zustand aufweisen. Durch die direkte Übernahme der Analyseergebnisse aus dem BMS der ASFINAG wurde dieser Umstand nicht weiter untersucht und ist auch nicht Gegenstand dieses Projektes. Insgesamt ist die Anzahl der Ausreißer sehr gering und die gewählten Strategien können aus der Sicht des Technischen Anlagenwertes als wirkungsvoll eingestuft werden.

7.6.3 Tunnel

Die nachfolgende Abbildung 82 zeigt den Verlauf des mittleren Technischen Anlagenwertes für die untersuchten Tunnelobjekte in einer Skalierung von 0 bis 100 für die Teststrecken in Österreich und in der Schweiz sowie für das österreichische Teilnetz. Die Tunnelobjekte auf der A44 in Deutschland konnten, wie bereits erwähnt, aufgrund von unzureichenden Daten nicht analysiert werden. Bei den Schweizer Tunnelobjekten wurde nur der baulich-konstruktive Bereich betrachtet (daher auch praktische kein Abfall des Mittelwertes).

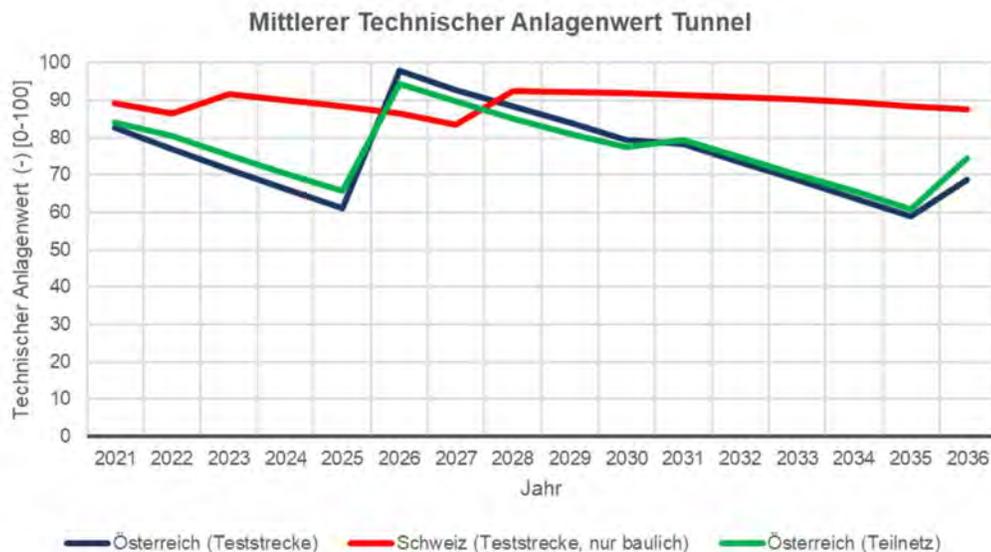


Abbildung 82: Mittlerer Technischer Anlagenwert Tunnel

Die geringe Anzahl der Objekte führt dazu, dass jede Erhaltungsmaßnahme zu einer deutlichen Zunahme des Technischen Anlagenwertes führt. Interessant und bedingt zufällig ist das Zusammenfallen der Maßnahmen auf dem Teilnetz Österreich und der Teststrecke Österreich, wobei auf der Teststrecke ein höherer Längenanteil an Tunnelobjekten vorhanden ist als auf dem gesamten untersuchten Teilnetz. Im Rahmen des Projektes OPTimAL [37] wurden Standardintervalle untersucht, die von optimalen Erhaltungsintervallen abweichen und daher auch die Wirtschaftlichkeit beeinflussen. Die untersuchten Tunnelobjekte haben einen sehr ähnlichen Verlauf im Zustand, da ein Basisintervall von fünf Jahren definiert wurde und bei fast allen Objekten nach den ersten fünf Jahren Erhaltungsmaßnahmen (vorwiegend im Bereich der E&M-Ausrüstung) definiert wurden. Es sei an dieser Stelle jedoch nochmals explizit darauf hingewiesen, dass die Wahl des Lebenszyklus für diese Tunnelobjekte auf der Grundlage der TMS-Analysen im Rahmen von OPTimAL [37] erfolgte und nicht Gegenstand des Projektes TAniA ist.

Nachfolgend finden sich wieder die Verteilungen des Technischen Anlagenwertes in fünf Kategorien (in analoger Weise zum Oberbau und zu den Brücken). Auch bei diesem Anlagentyp ist sehr gut erkennbar, dass die Tunnelanteile mit niedrigem Technischen Anlagenwert praktisch nicht vorhanden sind, bzw. die ausgewählten Erhaltungsmaßnahmenstrategien ein hohes Niveau des Technischen Anlagenwertes zur Folge haben (Abbildung 83 bis 85).

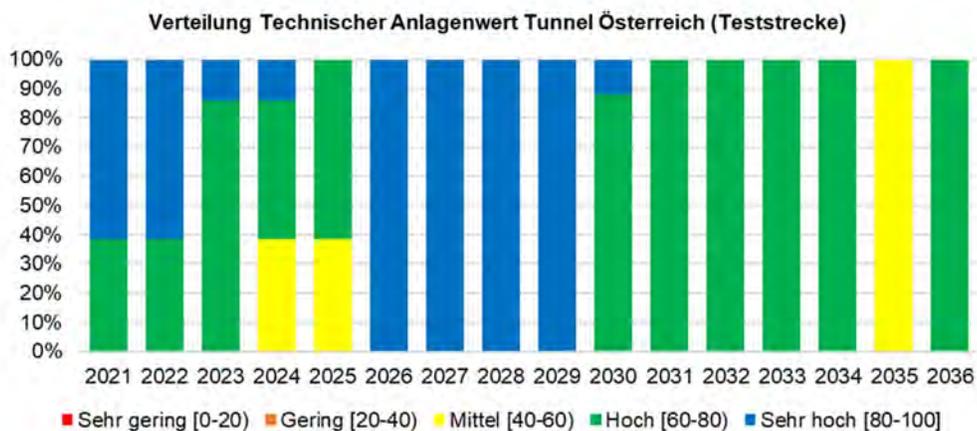


Abbildung 83: Verteilung Technischer Anlagenwert Tunnel Teststrecke Österreich

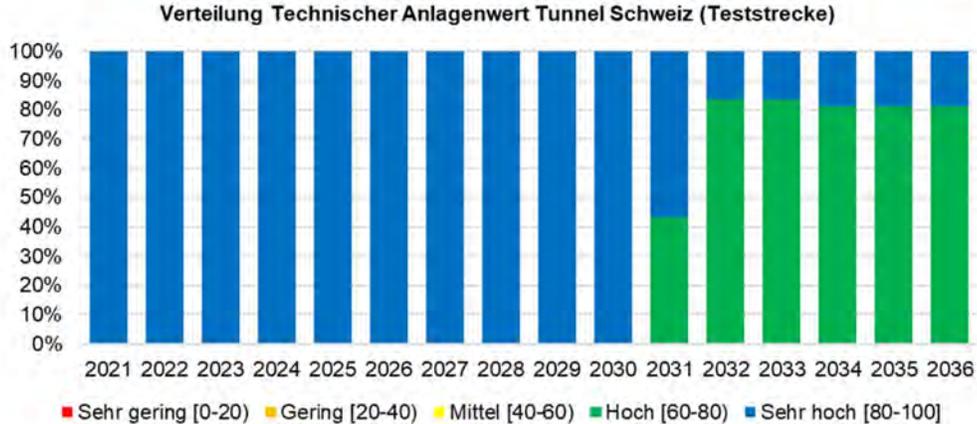


Abbildung 84: Verteilung Technischer Anlagenwert Tunnel Teststrecke Schweiz (ausschließlich konstruktive Anlagenteile)

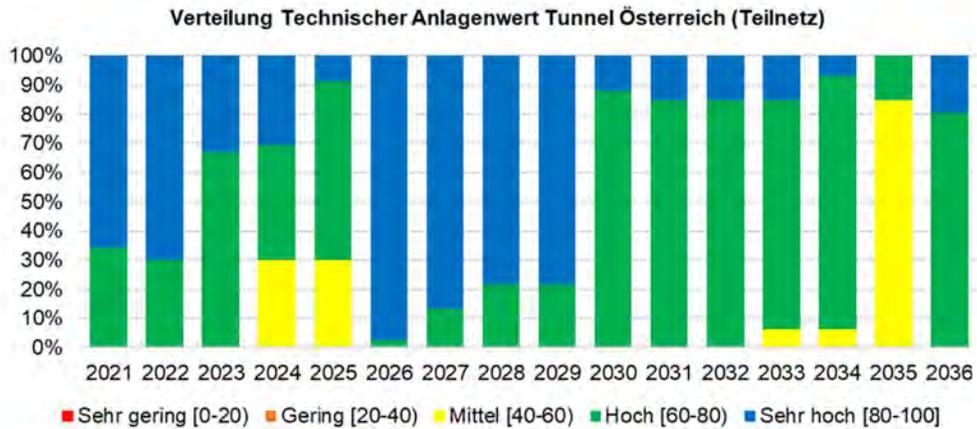


Abbildung 85: Verteilung Technischer Anlagenwert Brücken Teilnetz Österreich

Der monetäre Technische Anlagenwert kann der nachfolgenden Abbildung 86 entnommen werden, wobei neben unterschiedlichen Preisniveaus und Währungseinheiten auch der Umstand berücksichtigt werden muss, dass bei den Schweizer Tunnelobjekten nur die baulich-konstruktiven Anlagenteile betrachtet werden. Auch bei den Tunneln wurden die monetären Werte je km-Tunnellänge umgerechnet.

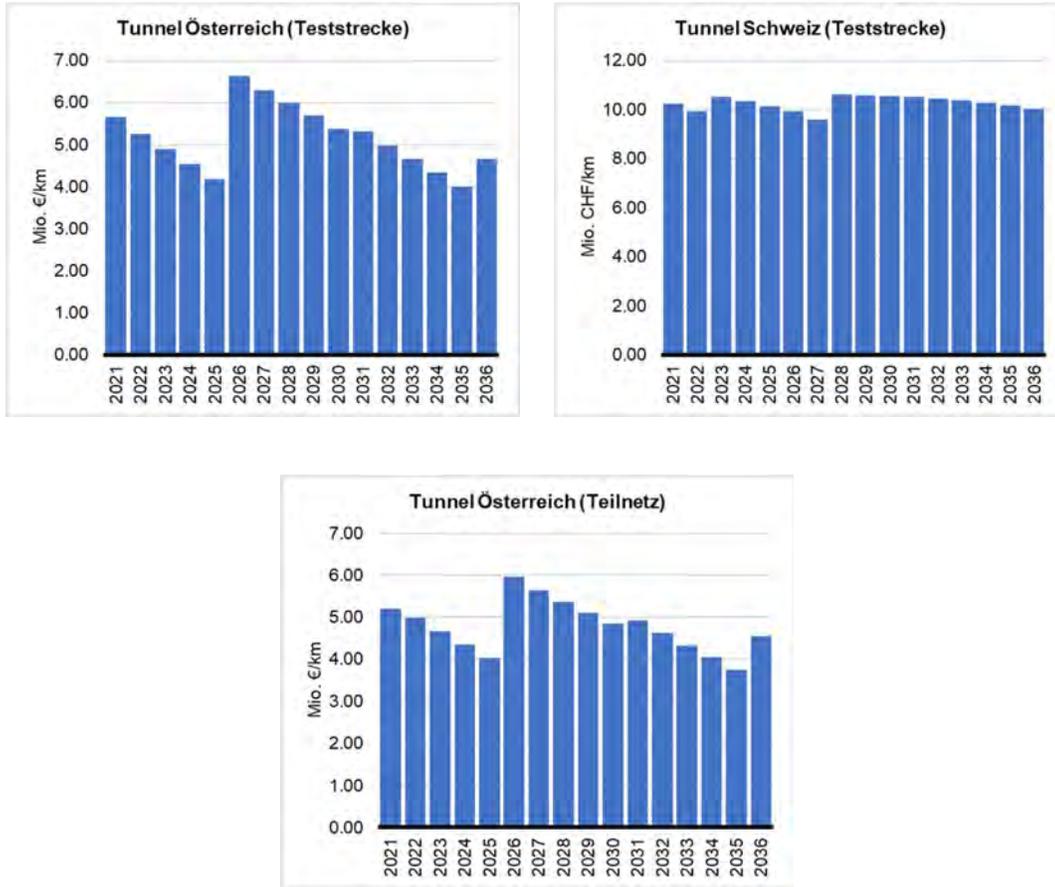


Abbildung 86: monetärer Technischer Anlagenwert Tunnel Teststrecken und Teilnetz

Die Effektivität der Erhaltungsmaßnahmenstrategien für die untersuchten Tunnelobjekte auf den österreichischen und den Schweizer Strecken kann der nachfolgenden Abbildung 87 entnommen werden. Die Auswertung zeigt, dass die Effektivität der gewählten Erhaltungsmaßnahmenstrategien auf der österreichischen Teststrecke und dem Teilnetz eine starke Streuung aufweist, was bedeutet, dass die gewählte Lösung (Standardintervall gemäß Vorgaben der Analysen im Projekt OPTimAL [37]) im Hinblick auf den Technischen Anlagenwert bei einigen Objekten Verbesserungspotential im Hinblick auf den gewählten Lebenszyklus aufzeigt. Dies bedeutet, dass ein Abweichen von einem Standardintervall auch eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit aus der Sicht des Technischen Anlagenwertes ermöglicht. Die Schweizer Teststrecke zeigt hingegen eine gute TAniA-Effektivität für alle untersuchten Objekte, wobei hier ausschließlich die baulich-

konstruktiven Anlagenteile berücksichtigt wurden. Auch bei dieser Darstellung steht jeder Punkt für ein einziges Tunnelobjekt.

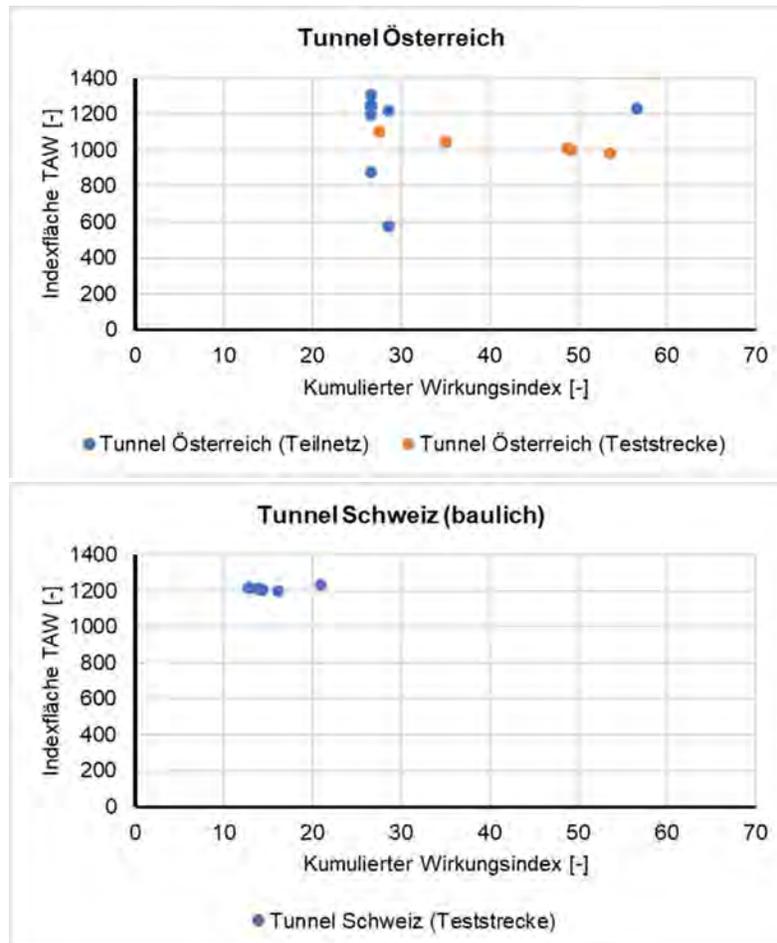


Abbildung 87: Effektivitätsdiagramme „TAniA“ Tunnel Teststrecken und Teilnetz

7.7 Empfehlungen aus praktischer Anwendung – Implementierungsleitfaden

7.7.1 Definition Implementierungsrahmen

Die nachfolgenden Empfehlungen sind ein weiteres Ergebnis des gegenständlichen Projektes im Rahmen der praktischen Anwendung der entwickelten Modelle und Algorithmen. Darüber hinaus ist es notwendig, diese Erkenntnisse mit generellen Anforderungen aus den Geschäftsprozessen des Asset Managements der Straßenerhalter zu verknüpfen, sodass für eine umfassende Implementierung auch die richtigen Schritte

gesetzt werden können. Die nachfolgenden Kapitel beschreiben diese Anforderungen und geben entsprechende Empfehlungen für eine umfassende Implementierung.

Für eine erfolgreiche Implementierung wird ein iterativer Prozess empfohlen. Dabei sind folgende Randbedingungen zu beachten:

- Zusammenhang und Verknüpfung mit den generellen Zielsetzungen
Erwartungen aus dem Asset Management (technische Ziele und strategische Ziele)
- Auswahl der Modelle und Algorithmen in Abhängigkeit von den Zielen und Vorgaben
- Verfügbarkeit der für die Modellierung und die Anwendung des Algorithmus erforderlichen Eingangsdaten

Die Implementierung dieser Bausteine in ein Asset-Management-System ist der letzte Schritt im Rahmen der Implementierung, gefolgt von einem Verbesserungsprozess, der kontinuierlich vor allem den Umgang mit den Ergebnissen einer solchen Anwendung optimieren sollte.

Vor dem Start einer umfassenden Implementierung sind folgende, primär organisatorische Fragen mit den betroffenen Personen und Interessensgruppen (Stakeholder) zu diskutieren:

- Welche Anwendungsbereiche und Prozesse sollten mit den Ergebnissen von TAniA abgedeckt werden?
- In welchen Teilschritten des Entscheidungsprozesses können und sind die Ergebnisse einer Anwendung der TAniA-Algorithmen zu implementieren?
- Worin besteht der Nutzen in einer Anwendung der Ergebnisse von TAniA?
- Welchen Aufwand bedeutet eine Implementierung von TAniA?
- Was bedeutet die Implementierung für die aktuelle Datenstrukturlandschaft?
- Welche Anpassungen bei der Erhebung und Verarbeitung von Zustandsdaten sind erforderlich?
- Auf welcher Prozessebene im Asset Management Prozess soll TAniA 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 praktische Anwendung der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Modelle und Algorithmen erfolgte auf der Grundlage eines entsprechenden Ablaufschemas, welches im nachfolgenden Kapitel beschrieben ist, und führte zu den im Kapitel 7.6 dargestellten Ergebnissen.

7.7.2 Schritte der Implementierung

Das nachfolgend beschriebene generelle Ablaufschema einer Implementierung fundiert auf langjährigen Erfahrungen bei der Implementierung von Asset-Management-Lösungen und -Systemen bei Straßenverwaltungen auf der ganzen Welt. 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

Die nachfolgende Abbildung 88 beschreibt die hier gestellten Fragen in einem generalisierten Ablaufschema, welches die Grundlage für die Gestaltung des Implementierungsprozesses darstellen sollte und für fast alle Erweiterungen in einem modernen Asset-Management-Prozess herangezogen werden kann.

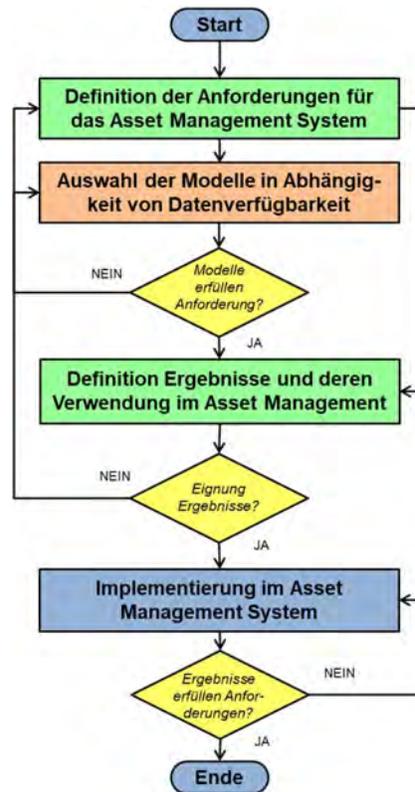


Abbildung 88: Generalisiertes Ablaufschema für den Implementierungsprozess

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.

7.7.3 Anforderungen an Daten (Qualität und Quantität)

Um die Modelle und Algorithmen aus TAniA anwenden zu können, sind vor allem entsprechende Anforderungen an die Datenqualität und Datenverfügbarkeiten (Quantität) zu erfüllen, die hier wie folgt zusammengefasst werden können (siehe hierzu auch Kapitel 4.4 und Kapitel 7.3.1):

- Klare und eindeutige Referenzierung der Anlagen
- Vollständigkeit der Inventardaten der zu bewertenden Anlagen
- Umfassende Verfügbarkeit von Zustandsdaten
- Umfassende Verfügbarkeit von Lebenszyklen für die Anlagenteile der Anlagen

- Kostenkatalog für die Abschätzung des monetären Technischen Anlagenwertes

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

7.7.4 Anforderungen an Asset-Management-Systeme

Wie bereits beschrieben, wurde für das gegenständliche Projekt auf die auch 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 und mögliche Softwarelösungen 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)

Aufgrund der komplexen Berechnungsalgorithmen sowie der Anwendung auf Netzebene wird empfohlen, die vorgeschlagenen Algorithmen und Methoden in eine Asset-Management-Softwarelösung zu implementieren.

7.7.5 Anforderungen an die Ergebnisse

Die Anforderungen an die Ergebnisse hängen wesentlich von den im Rahmen einer praktischen Umsetzung definierten Zielvorgaben und dabei insbesondere von den zugrunde liegenden strategischen Zielsetzungen ab. Als generelle Anforderungen an die Ergebnisse können folgende Aspekte festgehalten werden:

- Ergebnisse der Modelle und Algorithmen für jede untersuchte Anlage
- Zustandsentwicklungen der Zustandsvariablen
- Entwicklung des Technischen Anlagenwertes
- Lebenszyklusinformationen (Maßnahmenzeitpunkt, Art der Maßnahmen, Wirkung der Maßnahme, Kostenschätzung der Maßnahme etc.)

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:

- Entwicklung des monetären Technischen Anlagenwertes für Gesamtnetze oder für Teilnetze für unterschiedliche Erhaltungsstrategien (ausgedrückt durch unterschiedliche Lebenszyklusansätze oder Szenarien aus Lebenszyklusanalysen mit entsprechenden Zielsetzungen)
- Entwicklung des normierten Technischen Anlagenwertes (vor allem als Vergleichsgröße im Rahmen des Benchmarkings)

7.7.6 Vorschläge für die Verwendung der Ergebnisse für die strategische Erhaltungsplanung

Die Verwendung der Ergebnisse für die strategische Planung im Rahmen der Erstellung eines Bauprogramms ist eine zentrale Zielsetzung im Rahmen der praktischen Implementierung von TAniA. Die nachfolgende Liste gibt einen Überblick über eine mögliche Verwendung der Ergebnisse im Asset Management der Straßenerhalter auf den unterschiedlichen Entscheidungsebenen (Technische Ebene und Strategische Ebene):

- Die anlagenbezogenen Ergebnisse liefern eine Grundlage für die Definition von Erhaltungsmaßnahmen für das langfristige Bauprogramm und für die Projektentwicklung. TAniA liefert Ansätze zur Beurteilung von Erhaltungsmaßnahmenstrategien aus der Sicht der Technischen Anlagenbewertung auf Objektebene (Technische Ebene).
- Die zeitabhängige Entwicklung des Technischen Anlagenwertes auf Netzebene kann als Grundlage für den Netzzustandsbericht herangezogen werden (Strategische Ebene).

- 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, die zu unterschiedlichen Entwicklungen des Technischen Anlagenwertes führen (Strategische Ebene).
- 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 durch die Berechnung des Technischen Anlagenwertes einer Abschätzung unterzogen werden konnte (Technische Ebene und Strategische Ebene).

Wie zuvor beschrieben, kann der Technische Anlagenwert als Steuerungsgröße für die Entscheidungsfindung herangezogen werden. Dabei spielen vor allem die Ergebnisse auf Netzebene eine wesentliche Rolle, da sie es ermöglichen, die aktuellen und zukünftigen Investitionen entsprechend zu bewerten und eine Grundlage für mögliche Anpassungen darstellen. Die nachfolgende Abbildung 89 zeigt einen solchen vorgeschlagenen Steuerungsprozess für die Anwendung der Ergebnisse von TAniA im Rahmen des strategischen Erhaltungsmanagements.

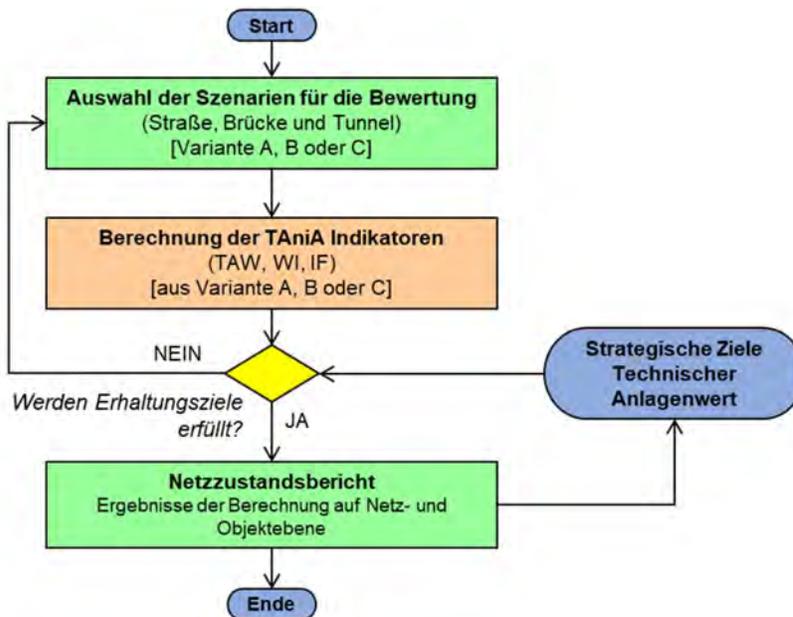


Abbildung 89: Vorgeschlagener Steuerungsprozess TAniA

Der Prozess zeigt sehr deutlich, dass für eine Bewertung ein Vergleich mit vorgegebenen strategischen Zielen im Bereich des Technischen Anlagenwertes notwendig ist. Damit kann auch festgestellt werden, welches Szenario die Anforderungen erfüllt und welche Szenarien auch für einen Netzzustandsbericht geeignet sind, um bestimmte Aussagen zu tätigen.

Aufgrund der Tatsache, dass erst nach einem gewissen „Lernprozess“ solche strategischen Ziele definiert werden können, empfiehlt es sich, keine absoluten Ziele am Beginn einer Implementierung zu verwenden, sondern einen Vergleich bzw. Trend zum aktuellen Technischen Anlagenwert herzustellen. Dabei können folgende Überlegungen für die Festlegung von Zielen miteinbezogen werden:

- Trend des Technischen Anlagenwertes für die zu untersuchenden Szenarien für die unterschiedlichen Anlagen (z.B. konstante Entwicklung, Erhöhung auf den Transitrouten)
- Trend des Anteils des Technischen Anlagenwertes mit geringem Wert (z.B. Reduktion bei Brücken, konstante Entwicklung im Bereich Straßenbefestigung)
- Anteil der Maßnahmenstrategien im wirtschaftlichen Bereich aus der Sicht der TAW (z.B. > X%)

7.7.7 Prozesse nach Implementierung

Die Implementierung der TAniA Grundlagen ist nur der Ausgangspunkt für eine nachhaltige systematische Erhaltungsplanung. Nach der Implementierung ist es notwendig, weitere Schritte zu setzen, die sich auf verschiedene Anwendungsbereiche beziehen, eine laufende Verwendung des Technischen Anlagenwertes anstreben 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 (z.B. Zustandsprognosemodelle) auf der Grundlage eines kontinuierlichen Verbesserungsprozess und einer kontinuierlichen kritischen Bewertung der Ergebnisse
- Periodische Evaluierung und Bewertung der Asset-Management-Prozesse vor dem Hintergrund der Erfüllung der Zielvorgaben

- Evaluierung von möglichen Erweiterungen und Ergänzung aufgrund von aktualisierten Prozessen im Asset Management

7.7.8 Risiko der Implementierung

Noch bevor die ersten Implementierungsschritte gemacht 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 der unterschiedlichen Personen- und Interessensgruppe (Welche Aussagen sind mit dem Technischen Anlagenwert möglich?)
- 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

Jeder hier aufgelistete Risikobereich sollte zumindest diskutiert werden und ggf. mit entsprechenden Risikobewertungsverfahren (z.B. Risikomatrix) evaluiert werden. Darauf aufbauend sind die entsprechenden Schritte zur Minimierung des Risikos zu planen und im Rahmen der Implementierung umzusetzen.

EXECUTIVE SUMMARY

Zielsetzung und Anwendungsbereich

Die zunehmende Bedeutung der Erhaltung des Bestandes der Straßenverkehrsinfrastruktur und ihrer Anlagen und der damit verbundene Entscheidungsprozess im Rahmen der systematischen Erhaltungsplanung ist eine der großen Herausforderungen für die Straßenverwaltungen. Es zeigt sich, dass in den letzten Jahren gerade in den drei D-A-CH-Ländern, Deutschland (D), Österreich (A) und Schweiz (CH) der Wunsch nach einer einheitlichen bzw. harmonisierten Vorgehensweise bei der Festlegung von Entscheidungsindikatoren deutlich gestiegen ist, da neben einem „internationalen“ Vergleich der strategischen Vorgaben und Zielsetzungen auch die technische Ebene eine objektive und nachvollziehbare Grundlage benötigt, die ein Benchmarking zwischen den D-A-CH-Straßenverwaltungen zulässt.

Der Technische Anlagenwert zeigt ein sehr hohes Potential als maßgebender Indikator (**KPI**) für den Entscheidungsprozess, jedoch nur dann, wenn seine Berechnung nach klar definierten und nachvollziehbaren Grundlagen geschieht. Auch die Komplexität von möglichen Berechnungsmethoden ist hier entscheidend. Je einfacher eine Berechnung erfolgt, desto nachvollziehbarer sind auch die Ergebnisse und desto nachvollziehbarer ist der gesamte Entscheidungsprozess. Andererseits müssen die Grundlagen auch den Anforderungen eines modernen Entscheidungsprozesses entsprechen, was eine grundlegende Voraussetzung darstellt.

Das Hauptziel von **TAniA - Technische Anlagenbewertung im Asset-Management** besteht in der Entwicklung und praktischen Erprobung eines Berechnungsverfahrens zur Ermittlung eines „zustandsbasierten Technischen Anlagenwertes (TAW)“ von Anlagen der Straßeninfrastruktur im Rahmen einer nachhaltigen Lebenszyklusbetrachtung. Dies dient als Grundlage für den technischen und strategischen Entscheidungsprozess (Stichwort Erhaltungsziele). TAniA liefert eine wesentliche Entscheidungs- und Steuerungsgrundlage für die Abschätzung des Erhaltungsbedarfs unter Berücksichtigung bestimmter Zielwerte, der maßgebenden Zustandsindikatoren und natürlich der maßgebenden Einflussparameter. Eine wesentliche Voraussetzung für einen effizienten Vergleich unterschiedlicher Netze ist ein universeller Berechnungsansatz, der mittels TAniA zu einer praxisorientierten Lösung führt. Die Ziele können daher wie folgt zusammengefasst werden:

- Definition des Technischen Anlagenwertes und des Erneuerungswertes (siehe Kapitel 2)

- Zusammenführung und Aufbereitung der Grundlagen zu einem holistischen Bewertungsrahmen (siehe Kapitel 4)
- Entwicklung einer Methodik, mit welcher der technische Anlagenwert zum Stichtag sowie in Abhängigkeit vom Zustand bzw. der Zustandsentwicklung in Kombination mit allfälligen Erhaltungsmaßnahmen (Lebenszyklus und Erhaltungsmaßnahmenstrategien) bestimmt werden kann (siehe Kapitel 6)
- Entwicklung von dynamischen Lebenszyklusprozessen für die maßgebenden Bauteile bzw. Bauteilgruppen sowie Unterkategorien (siehe Kapitel 5)
- Praktische Erprobung und Entwicklung eines Implementierungsleitfadens (Handlungsempfehlung) auf der Grundlage einer umfassenden Pilotanwendung der entwickelten Algorithmen (siehe Kapitel 7)
- Entwicklung eines Steuerungsprozesses¹² für die Erhaltungsplanung für unterschiedliche Entscheidungsebenen (strategisch, technisch) (siehe Kapitel 7.7)

TAniA beschreibt einen holistischen Bewertungsrahmen für die Ermittlung des Technischen Anlagenwertes, welcher definiert, entwickelt bzw. modelliert und anschließend praktisch angewendet wird. Das Projekt bezieht sich dabei auf den Bereich der baulichen Anlagen Straßenbefestigung (primär Straßenoberbau), Brücken sowie Tunnel (baulich-konstruktiv und elektro-maschinelle Ausrüstung) der Bundesstraßen (hochrangiges Straßennetz).

Dieser Anwendungsbereich stellt die maßgebende Begrenzung dar, in dem die Alterungsmodelle (Zustandsverläufe), die (dynamischen) Lebenszyklen sowie die Modelle zur Bestimmung des Technischen Anlagenwertes in deren Struktur und Anwendbarkeit (Algorithmus) beschrieben und die maßgebenden Definitionen festgelegt werden. Auf der Grundlage dieser Struktur und der damit verknüpften Begriffsbestimmungen werden in den nachfolgenden Kapiteln die dazugehörigen detaillierten Berechnungsalgorithmen sowie Modelle vorgestellt und beschrieben.

Es sei an dieser Stelle auch explizit festgelegt, dass die im Rahmen von TAniA entwickelten und beschriebenen Begriffsdefinitionen und Grundlagen sich ausschließlich auf das

¹² Als Prozess wird im Rahmen des gegenständlichen Projektes ein sich über eine gewisse Zeit erstreckender Vorgang verstanden, bei dem etwas [allmählich] entsteht bzw. sich herausbildet und wo zu unterschiedlichen Zeitpunkten steuernde Entscheidungsgrößen die Lösung beeinflussen können.

gegenständliche Projekt beziehen. Die Aufgabe TAniA besteht deshalb nicht in der Vereinheitlichung von Definitionen, sondern in der Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus, welcher unter der Berücksichtigung von örtlichen Randbedingungen in einer verständlichen Form angewendet werden kann. Aus diesem Grund wird auch auf eine umfassende Übersetzung in länderspezifische Begriffe verzichtet.

Darüber hinaus muss an dieser Stelle nochmals festgehalten werden, dass aufgrund der Untersuchung von möglichen Definitionen und deren Festlegungen im Rahmen des Projektes auch begriffliche Abweichungen zum Angebot auftreten. Dies betrifft insbesondere die Begriffe Wiederbeschaffungswert und Erneuerungswert.

Grundlegende Definitionen

Im Zuge der Grundlagenforschung wurden neben der maßgebenden Literatur die wesentlichen Begriffsdefinitionen aus den D-A-CH-Ländern gesammelt. Dies bildet die Basis für die Analyse der vorhandenen Begriffsbestimmungen und diente in weiterer Folge für die Erarbeitung einheitlicher Definitionen (siehe hierzu auch Kapitel 2.2).

Der **Technische Anlagenwert** ist die maßgebende Bewertungsgröße für die Berechnung des Anlagevermögens im Rahmen der systematischen Erhaltung der Straßeninfrastruktur. TAniA definiert den Technischen Anlagenwert für die systematische Straßeninfrastruktur-erhaltung als Funktion des Zustandes und der daraus resultierenden Abminderung des Erneuerungswertes. Darüber hinaus handelt es sich beim Technischen Anlagenwert um eine technische und keine betriebswirtschaftliche Größe. Erneuerungsmaßnahmen innerhalb des Lebenszyklus, die in der Regel zu einem bestmöglichen Zustand führen, bedeuten auch eine Werterhöhung des Technischen Anlagenwertes auf das Niveau des Erneuerungswertes. In diesem Sinn ist es notwendig, den im Rahmen von TAniA zu beurteilenden Bewertungsrahmen wie folgt zu skizzieren (siehe Abbildung 90) [74].

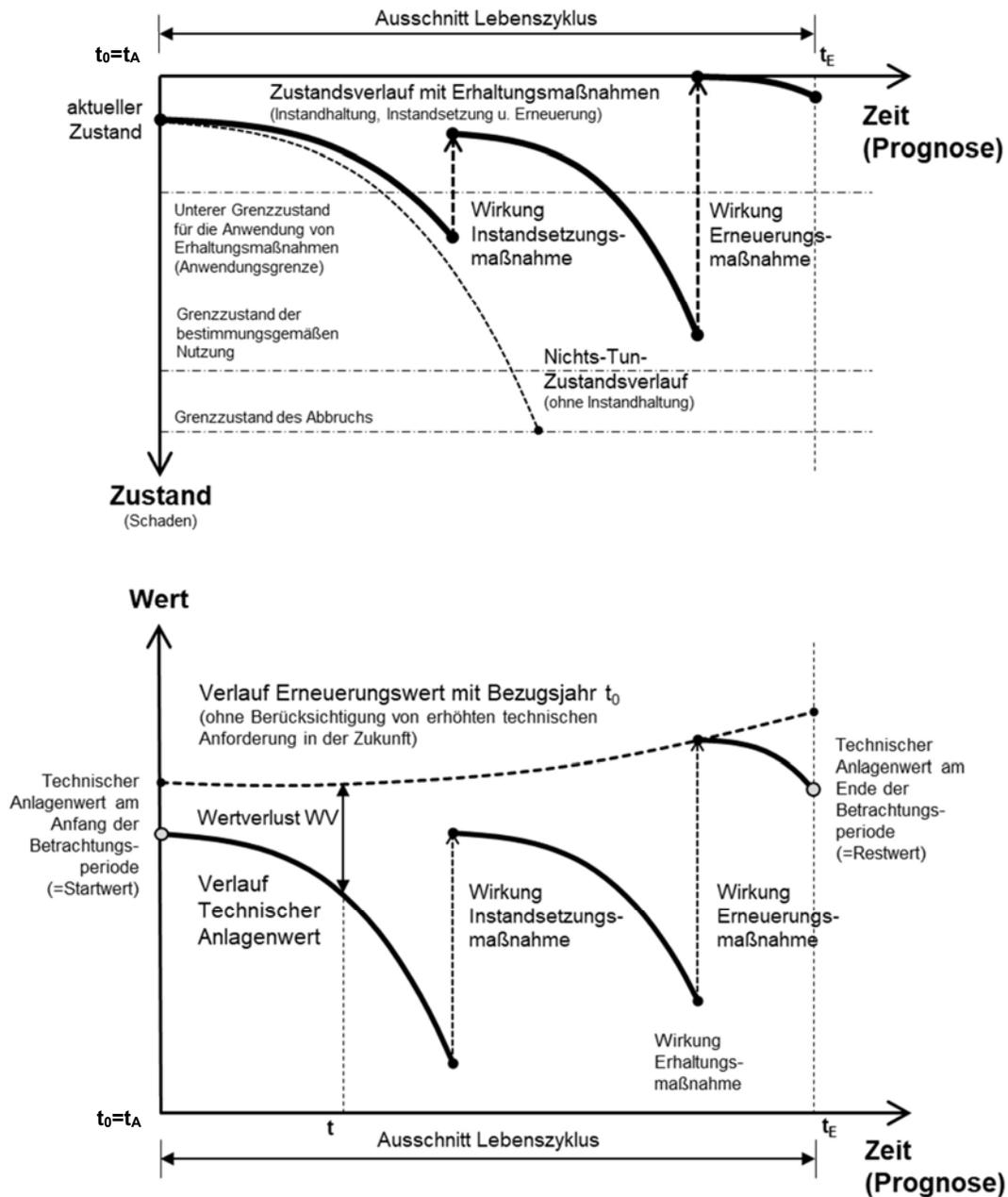


Abbildung 90: Spezifische Begriffsbestimmungen für die Lebenszyklusbewertung im Rahmen von TAniA (Ausschnitt Lebenszyklus) [74]

t_0 ...Bezugszeitpunkt = t_A ...Anfang des Ausschnitts des Lebenszyklus

Im Rahmen der Berechnungsalgorithmen ist neben dem Technischen Anlagenwert der **Erneuerungswert** von zentraler Bedeutung. Er stellt einen theoretischen monetären Wert dar, der zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgewendet werden muss, um eine Anlage nach

dem aktuellen Stand der Technik (technischen Anforderungen) zu errichten, jedoch ohne Berücksichtigung von erhöhten aktuellen funktionalen Anforderungen (z.B. Nicht-Berücksichtigung von zusätzlichen Fahrstreifen aufgrund erhöhter Verkehrsbelastung). Er kann als Hybridlösung zwischen Neubeschaffungswert und Wiederbeschaffungswert definiert werden und berücksichtigt neben der Indexanpassung ausschließlich die periodischen Anpassungen an die zum jeweiligen Zeitpunkt gültigen Normen und Richtlinien (technischen Anforderungen). Dabei bleiben zusätzliche funktionale Anforderungen unberücksichtigt. Dies bedeutet, dass nur jene Erweiterungen berücksichtigt werden, die sich aufgrund der technischen Anforderungen zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt ergeben.

Demgegenüber steht der **Wiederbeschaffungswert**. Dieser entspricht jenem theoretischen monetären Wert, der aufgewendet werden muss, um eine Anlage nach dem ursprünglichen Stand der Technik (Stand der Normen und Richtlinien zum Zeitpunkt der Errichtung) und nach ursprünglicher Funktionalität wieder zu errichten. Eine wertmäßige Anpassung an aktuelle Normen und Richtlinien sowie an aktuelle funktionale Anforderungen bleibt dabei unberücksichtigt, ungeachtet einer notwendigen Indexanpassung. Da die Erneuerungsmaßnahmen jedoch immer die aktuellen funktionalen Anforderungen berücksichtigen und auch die aktuellen Kosten einer Erhaltungsmaßnahme beinhalten, wird der Wiederbeschaffungswert im Berechnungsalgorithmus nicht weiter verwendet.

Um eine korrekte Ansprache der Lebenszyklen zu ermöglichen, werden zwei zusätzliche maßgebende Begriffe definiert, die eine Bewertung der Konstruktion und eine Bewertung der Funktion / Ausrüstung einer Anlage ermöglichen. Der **Konstruktionsindikator** (KI) dient dabei zur Beschreibung des Technischen Anlagenwertes für die konstruktiv-baulichen Anlagenteile einer Straßeninfrastrukturanlage, die innerhalb des technischen Lebenszyklus des Gesamtbauwerks nicht zur Gänze ersetzt werden. Im Vergleich dazu dient der **Ausrüstungsindikator** (AI) zur Beschreibung des Technischen Anlagenwertes für die konstruktiv-funktionalen Teile einer Straßeninfrastrukturanlage, die innerhalb des Lebenszyklus des Gesamtbauwerks ein- oder mehrmals ersetzt bzw. erneuert werden. Eine detaillierte Zuordnung der entsprechenden Anlagenteile zu den beiden Indikatoren wurde im Rahmen des gegenständlichen Projektes vorgenommen.

Modellierung

Technischer Anlagenwert

Der Technische Anlagenwert eines Anlagenteils ergibt sich aus der Verbindung von einem gegebenen Zustand und einem definierten Zusammenhang von Zustand und Wert. Ist der Zustandsverlauf bekannt, so kann durch den Zusammenhang zwischen Zustand und den Kosten einer Erhaltungsmaßnahme zum Erreichen der Zustandsnote „sehr gut“ (0 oder 1) der Technische Anlagenwert als Anteil am Erneuerungswert mathematisch bestimmt werden (siehe Abbildung 92 und Kapitel 6.1).

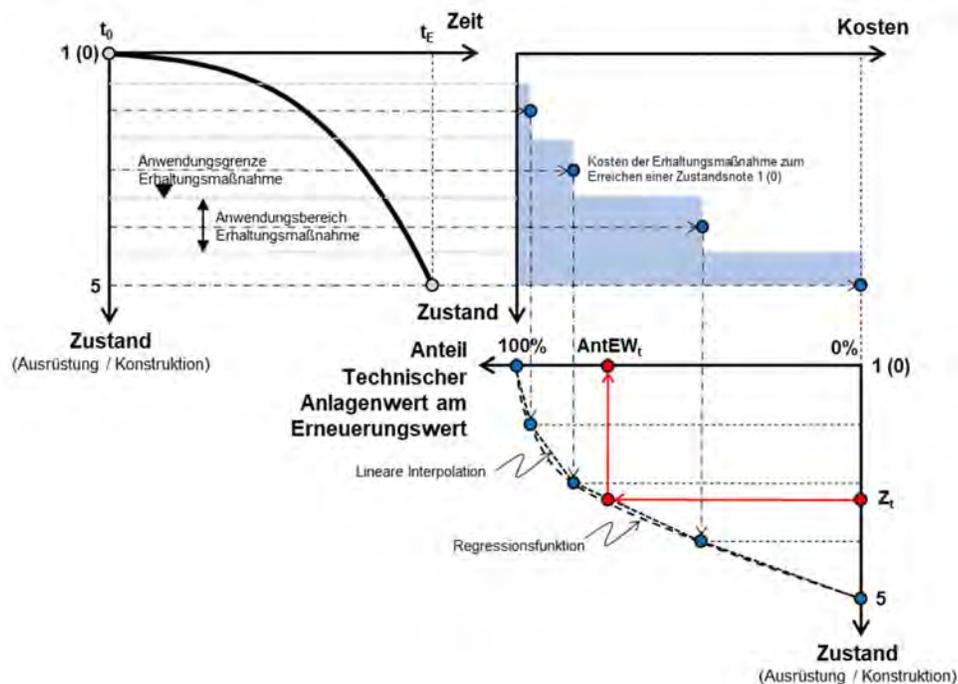


Abbildung 91: Modell zur Berechnung des Technischen Anlagenwertes [77]

Grundsätzlich können sowohl die Anlagenteile als auch die Indikatoren individuell ausgewertet und auf die vorgeschlagene Skala des Technischen Anlagenwertes von 0 bis 100 normiert werden, jedoch ist für eine Gesamtbewertung eine Zusammenführung der monetären Werte erforderlich. Die monetären Werte zwischen Konstruktion und Ausrüstung sind in der Regel sehr unterschiedlich, sodass in den meisten Fällen die Konstruktion den größten Anteil am Technischen Anlagenwert liefert. Der im Rahmen von TAniA definierte monetäre Technische Anlagenwert *TAW* zu einem bestimmten Zeitpunkt *t*

für einen bestimmten Indikator I (Ausrüstung oder Konstruktion) ergibt sich durch das Aufsummieren der Einzelwerte der Anlagenteile wie folgt:

$$TAW_{t,I} = \sum_X TAW_{X,t} = \sum_X \text{AntEW}_{X,t} \cdot EW_X \quad \text{Gl. 21}$$

mit

$TAW_{t,I}$ Technischer Anlagenwert des Ausrüstungs- oder Konstruktionsindikators zum Zeitpunkt t in € oder CHF

$TAW_{X,t}$ Technischer Anlagenwert des Anlagenteils X zum Zeitpunkt t in € oder CHF

$\text{AntEW}_{X,t}$ Anteil Erneuerungswert am Technischen Anlagenwert des Anlagenteils X in %

EW_X Erneuerungswert Anlagenteil X

Der Übergang vom monetären, auf den Konstruktions- bzw. Ausrüstungsindikator bezogenen Technischen Anlagenwerte zu einem auf eine Skala von 0 bis 100 normierten gesamten Technischen Anlagenwert ergibt sich dabei wie folgt:

$$TAW_{t,n} = \frac{\sum TAW_{t,I}}{\sum EW_X} \cdot 100 \quad \text{Gl. 22}$$

mit

$TAW_{t,n}$ normierter Technischer Anlagenwert des Ausrüstungs- oder Konstruktionsindikators zum Zeitpunkt t [0-100]

$TAW_{t,I}$ Technischer Anlagenwert des Ausrüstungs- oder Konstruktionsindikators zum Zeitpunkt t in € oder CHF

EW_X Erneuerungswert Anlagenteil X

Technischer Anlagenwert im Lebenszyklus einer Anlage

Um eine Aussage über die Entwicklung des Technischen Anlagenwertes über die Zeit zu ermöglichen und somit auch die Wirkungen von zukünftigen Erhaltungsmaßnahmen (abfolgen), sogenannten Erhaltungsmaßnahmenstrategien zu bewerten, müssen die Lebenszyklen der Anlagen bzw. der Anlagenteile in den Berechnungsprozess integriert werden (siehe hierzu auch Kapitel 5). Grundlage hierfür sind Lebenszyklusanalysen oder Lebenszyklusbewertungen. Die Lebenszyklusanalyse oder Lebenszyklusbewertung ist ein weltweit verbreitetes Verfahren zur Beurteilung von Erhaltungsaktivitäten technischer Einrichtungen und somit auch eine wesentliche Grundlage für TAniA. Unter Lebenszyklus

wird die Entwicklung des Zustandes und eventuell zustandswirksamer Erhaltungsmaßnahmen innerhalb einer vordefinierten Zeitperiode verstanden werden. Der gesamte „technische“ Lebenszyklus reicht von der Errichtung oder Neukonstruktion der Anlage bis zu ihrem Abbruch oder der Außerdienststellung. Die nachfolgende Abbildung 92 zeigt das Verständnis des Lebenszyklus im Rahmen des Projektes TAniA in schematischer Form [76].

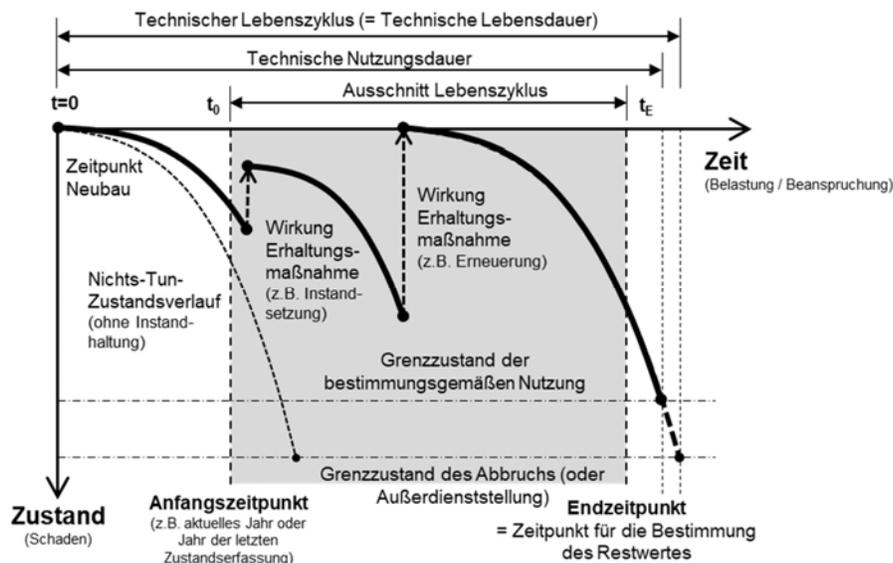


Abbildung 92: Betrachtung Teilbereich Lebenszyklus (Ausschnitt Lebenszyklus) [79]

Den Lebenszyklus einer Anlage oder eines Anlagenteils können unterschiedliche Degradationskurven und unterschiedliche Abfolgen von Erhaltungsmaßnahmen definieren. Dies führt auch zu unterschiedlichen Lösungen bei der Berechnung des Technischen Anlagenwertes. Welcher Lebenszyklus bzw. welche Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen für die Berechnung des Technischen Anlagenwertes herangezogen wird, ist von den zur Verfügung stehenden Grundlagen bzw. von der Verfügbarkeit von Lebenszyklusbewertungen im Rahmen der praktischen Anwendung von Erhaltungsmanagementsystemen (PMS, BMS, TMS) abhängig. Unter Bezugnahme auf die durchgeführten Untersuchungen können folgende maßgebende Varianten unterschieden werden [76]:

- **Variante A:** Der Lebenszyklus und die damit verbundenen Erhaltungsmaßnahmen werden aus dem Erhaltungsmanagementsystem (PMS, BMS, TMS) direkt geliefert

und stellen somit die Eingangsgröße für die Berechnung des Technischen Anlagenwertes dar.

- **Variante B:** Auf der Grundlage eines ausgewählten Standardlebenszyklus wird der Technische Anlagenwert unter Heranziehung von anwendbaren Degradationskurven (Zustandsprognosemodell) über die Veränderung der Erhaltungsintervalle kalibriert. Der aktuelle Zustand liefert den Zeitpunkt der nächsten Erhaltungsmaßnahmen. Ein vordefinierter Maßnahmenkatalog bestimmt die Abfolge der Erhaltungsmaßnahmen.
- **Variante C:** Ein ausgewählter Standardlebenszyklus wird für die Ermittlung des Technischen Anlagenwertes direkt herangezogen. Lediglich der aktuelle Zustand liefert den Zeitpunkt der nächsten Erhaltungsmaßnahmen. Die Abfolge und Intensität der Erhaltungsmaßnahmen erfolgt nach den Vorgaben des Standardlebenszyklus und den darin verankerten Erhaltungsmaßnahmen.

Es sei an dieser Stelle explizit erwähnt, dass die Aufgabe von TAniA nicht darin besteht, einen Algorithmus zu entwickeln, der für eine Anlage bzw. einen Anlagenteil verschiedene Erhaltungsmaßnahmenstrategien definiert, sondern entweder auf einen vorhandenen Lebenszyklus zurückgreift oder einen (angepassten) Standardlebenszyklus für die Berechnung verwendet.

Möglichkeiten der Zustandsprognose

TAniA liefert für alle drei Varianten die entsprechenden Grundlagen. Dazu werden zunächst die Möglichkeiten der Zustandsprognose durch die Auswahl von auf die Anlagenteile bezogenen Degradationskurven untersucht. Da bereits seit vielen Jahren für die unterschiedlichen Anlagen Lebenszyklusbetrachtungen vorgenommen werden, stehen auch für viele Anlagen diese Zustandsprognosemodelle zur Verfügung. Eine Empfehlung im Hinblick auf deren Auswahl und Anwendung wird im Kapitel 5.2 gegeben. Aus Gründen der Vollständigkeit wird im Rahmen eines Exkurses eine Methodik zur Entwicklung von eigenen Zustandsprognosemodellen präsentiert.

Standardisierter und dynamisierter Lebenszyklus

Neben den entsprechenden Vorschlägen für die Verwendung von Zustandsprognosemodellen werden auch Vorschläge für Standardisierte Lebenszyklen für den Straßenoberbau, die Brücken und die Tunnel (baulich-konstruktiv, E&M-Technik) gegeben.

Ein **Standardisierter Lebenszyklus** im Rahmen des TAniA-Projektes ist eine vordefinierte Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen (= Erhaltungsmaßnahmenstrategie) in Abhängigkeit von bestimmten Eigenschaften einer zu bewerteten Anlage auf der Grundlage des Zustandes, ausgedrückt über die maßgebenden Anlagenteile der Konstruktion und der Ausrüstung (siehe hierzu auch Kapitel 5.5). Damit ist es möglich, sowohl den Konstruktionsindikator als auch den Ausrüstungsindikator in nachfolgenden Prozessschritten zu berechnen. Die nachfolgende Abbildung 93 zeigt den auf den Zustand der Konstruktion und der Ausrüstung bezogenen Lebenszyklus in Form einer schematischen Darstellung mit den wesentlichen Begriffsbestimmungen [76].

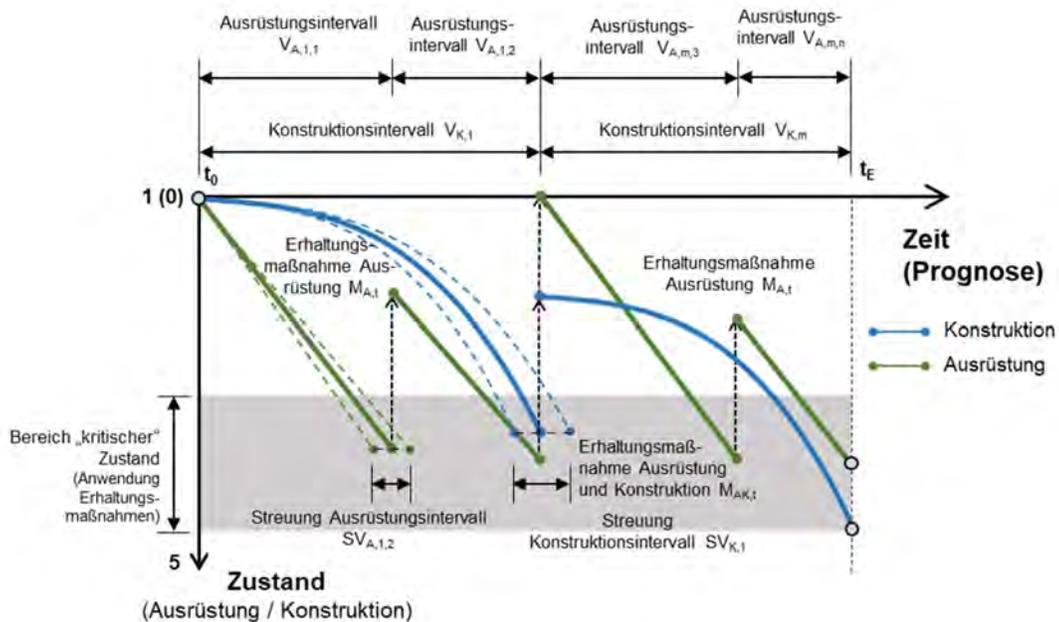


Abbildung 93: Definition standardisierter Lebenszyklus [79][76]

Unter Bezugnahme auf die Abbildung 93 ergeben sich die nachfolgend beschriebenen Kenngrößen des standardisierten Lebenszyklus:

- $V_{K,m}$ Konstruktionsintervall zur Beschreibung der Dauer (Jahre) zwischen zwei Erhaltungsmaßnahmen, die aufgrund des Zustandes bzw. der Zustandsentwicklung der maßgebenden konstruktiven Anlagenteile entstehen

- $V_{A,m,n}$ Ausrüstungsintervall zur Beschreibung der Dauer zwischen zwei Erhaltungsmaßnahmen, die aufgrund des Zustandes bzw. der Zustandsentwicklung der maßgebenden Anlagenteile der Ausrüstung oder der Konstruktion entstehen
- $SV_{K,m}$ Streuung des Konstruktionsintervall
- $SV_{A,m,n}$ Streuung des Ausrüstungsintervalls

Diese standardisierten Lebenszyklen können nur dann angewendet werden, wenn es möglich ist, jedem zu untersuchenden Objekt einen Lebenszyklus zuzuordnen. Unter Heranziehung der aktuellen Werte muss zunächst der Anfangspunkt im Lebenszyklus durch eine horizontale Verschiebung des Objektes entlang der Zeitachse in das wahrscheinlichste Erhaltungsintervall durchgeführt werden. Darüber hinaus müssen die Erhaltungsintervalle angepasst werden, wenn geeignete Zustandsprognosemodelle zur Verfügung stehen. Diese Art der Kalibrierung kann unter dem Begriff „Dynamisierung“ zusammengefasst werden, da sie einerseits zu einer Streuung der Zustandsentwicklungen und andererseits zu einer Verteilung von Erhaltungsmaßnahmen über die Zeit führen.

Erhaltungsmaßnahmen im Lebenszyklus

Neben der Prognose des Straßenzustandes sind es die Erhaltungsmaßnahmen, die einen Lebenszyklus einer Anlage bzw. eines Anlagenteils charakterisieren. Wie im Rahmen der Definition beschrieben, können unterschiedliche Abfolgen von Erhaltungsmaßnahmen betrachtet werden, die auch zu unterschiedlichen Lösungen führen. Aus diesem Grund war es notwendig die möglichen Erhaltungsmaßnahmen, vor allem jene, die zu einem „ausgezeichneten“ Zustand führen in allen drei Ländern im Detail zu untersuchen (siehe hierzu auch Kapitel 5.6). Aus den Analysen der Kosten, der Anwendungsgrenzen und der Wirkungen, wurden die in Abbildung 91 beschriebenen Zusammenhänge für alle notwendigen Anlagenteile ermittelt und dargestellt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch den ermittelten qualitativen Zusammenhang zwischen Technischem Anlagenwert und Zustand für einen beispielhaften Brückenüberbau und den Konstruktionsindikator Straßenoberbau.

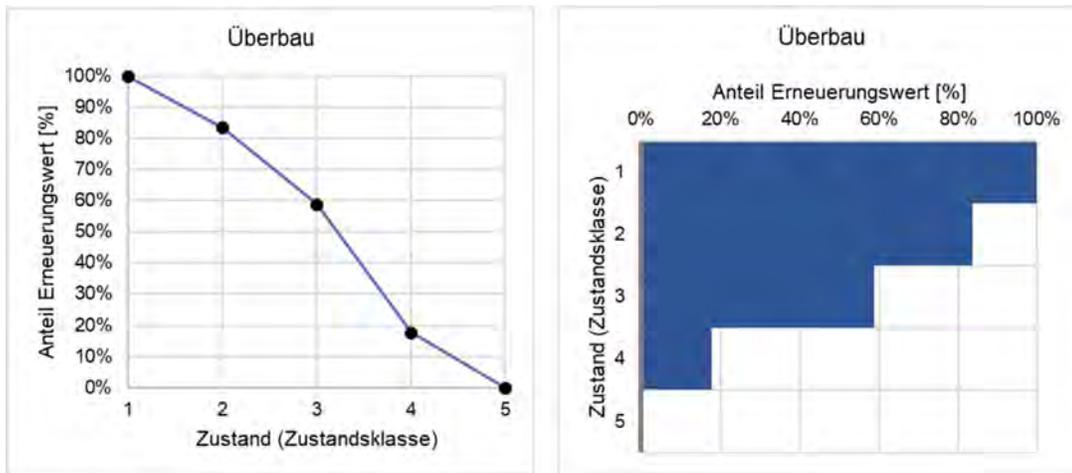


Abbildung 94: Beispiel eines linear interpolierten (links) und stufenförmigen (rechts) qualitativen Zusammenhangs TAW - Zustand für den Überbau von Brücken [77]

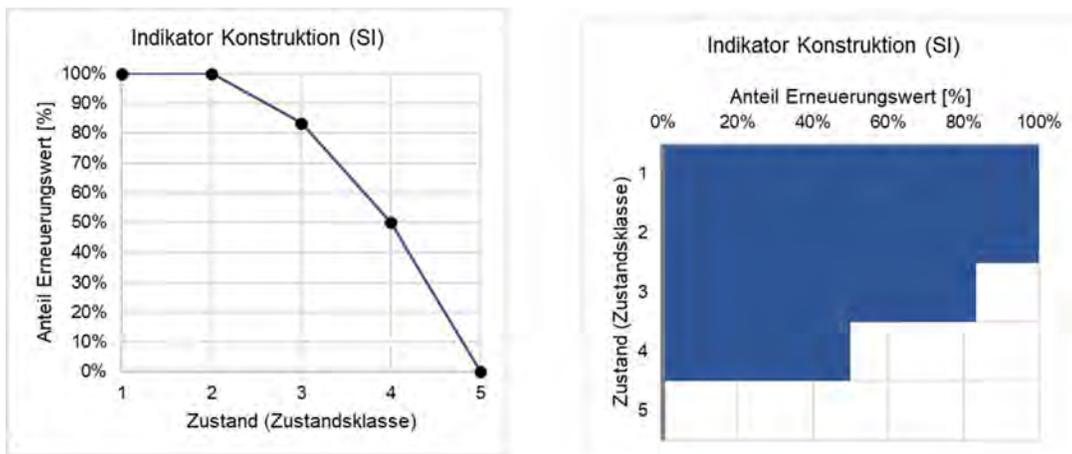


Abbildung 95: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den Konstruktionsindikator Straßenoberbau [77]

Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Effektivität „TAniA“

Neben der Berechnung des Technischen Anlagenwertes über die Zeit spielt auch eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahmenstrategie eines ausgewählten Lebenszyklus eine wesentliche Rolle. Aus dem Zustandsverlauf sowie den Wirkungen der Erhaltungsmaßnahmen auf den Konstruktions- und Ausrüstungsindikator können die zu bewertenden Kennzahlen ermittelt werden (siehe hierzu auch Kapitel 6.2). Neben der

Wirkung der Erhaltungsmaßnahmen, ausgedrückt über den Wirkungsindex WI ist vor allem die Indexfläche IF der Erhaltungsmaßnahmenstrategie S von wesentlicher Bedeutung. Diese Kennzahlen sind in nachfolgender Abbildung 96 schematisch abgebildet.

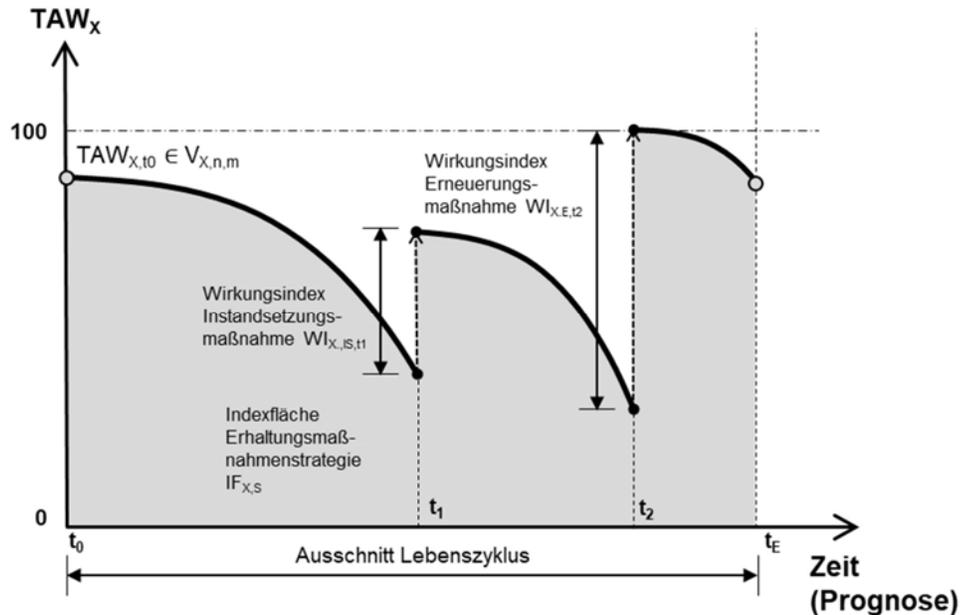


Abbildung 96: Kennzahlen für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit für Indikator X

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit bzw. der Effektivität von Erhaltungsmaßnahmenstrategien in Abhängigkeit vom Technischen Anlagenwert wurde eine graphische Methodik entwickelt, die eine Bewertung ermöglicht. Das Effektivitätsdiagramm „TAniA“ beschreibt graphisch das Verhältnis zwischen der Indexfläche und dem kumulierten Wirkungsindex über die Betrachtungsperiode, also den aufsummierten Wirkungen der Erhaltungsmaßnahmen auf den Technischen Anlagenwert TAW. Nachfolgende Abbildung 97 zeigt schematisch das Effektivitätsdiagramm TAniA und die daraus ableitbaren Bewertungen. Jene Strategien die im linken oberen Bereich angeordnet sind bzw. nahe der Effektivitätskurve (Umhüllende der Punktwolke der Erhaltungsmaßnahmenstrategien) gezeichnet werden können, zeigen eine gute Effektivität im Hinblick auf den Technischen Anlagenwert.

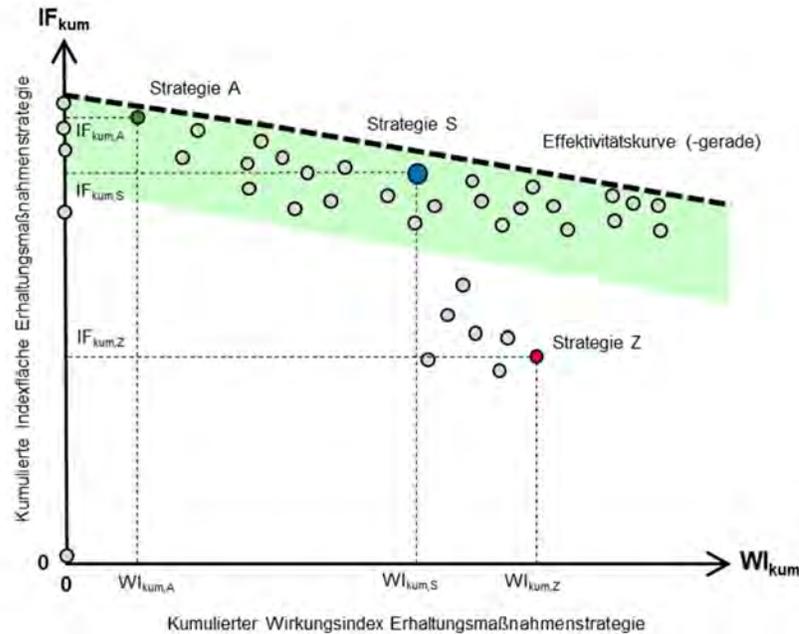


Abbildung 97: Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Erhaltungsmaßnahmenstrategien unter Heranziehung des Technischen Anlagenwertes (Effektivitätsdiagramm)

Anwendungsebene

Der hier dargestellte holistische Bewertungsrahmen ist so definiert, dass eine **Anwendung auf Netzebene mit Objektgenauigkeit** möglich ist. Im Bereich des Straßenoberbaus kann auch von Abschnitts- oder Streckenebene gesprochen werden. Dies bedeutet, dass durch eine individuelle Auswahl, Anpassung und Zuordnung der vorgegebenen oder standardisierten Lebenszyklen zu jedem zu untersuchenden Objekt, die Entwicklung des Technischen Anlagenwertes auf dieser Ebene vorgenommen werden kann, sofern die entsprechenden Eingangsdaten auch für das Einzelobjekt zur Verfügung stehen.

Praktische Anwendung

Entsprechend den Anforderungen in der Ausschreibung war es notwendig, drei Teststrecken (jeweils eine Strecke aus Deutschland, Österreich und der Schweiz) sowie ein Teilnetz für die praktische Erprobung der entwickelten Modellierungen und Algorithmen heranzuziehen (siehe hierzu auch Kapitel 7). Jede Teststrecke sowie das Teilnetz sollten eine entsprechende Anzahl von Anlagen für die Bewertung aufweisen, wobei auch die zur Verfügung stehende Datenqualität und -quantität in den Untersuchungen beurteilt wurde.

Im Einvernehmen mit den Auftraggebern wurden verschiedene Teststrecken und das Teilnetz ausgewählt (siehe Tabelle 65). Diese Teststrecken und das Teilnetz können im Überblick Abbildung 98 bzw. Tabelle 65 entnommen werden.

Abbildung 98: Überblick Teststrecken und Teilnetz in D-A-CH-Länder



Tabelle 65: Anlagen Teststrecken und Teilnetz

Strecke	Oberbau	Brücken	Tunnel
Teststrecke D	41,590 km RFb	65 Objekte	6 (0) Objekte
Teststrecke A	31,982 km RFb	49 Objekte	6 Objekte
Teststrecke CH	49,968 km RFb	23 Objekte	12 Objekte
Teilnetz	283,863 km RFb	312 Objekte	12 (10) Objekte

Der Klammerwert zeigt die Anzahl der analysierten Objekte

Um den Technischen Anlagenwert über die Zeit zu berechnen, wurden die Ergebnisse der Lebenszyklusbetrachtungen in Form von jährlichen Zustandsinformationen (für die einzelnen Zustandsmerkmale) in den dTIMS TAniA-Prototypen implementiert. 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. Für das gegenständliche Projekt wurde auf diese Software zurückgegriffen und eine für die Analysen erforderliche Konfiguration in das System implementiert. Nach dem Durchführen der Analyse stehen sowohl für jede einzelne Anlage als auch für die gesamte Teststrecke bzw. für das Teilnetz in Abhängigkeit von der Anlagenart die Berechnungsergebnisse zur Verfügung. Die Ergebnisse der Teststrecken bzw. des Teilnetzes sind eine Zusammenfassung der anlagenspezifischen Ergebnisse. Dabei handelt es sich grundsätzlich um folgende Ergebnisse:

- Technischer Anlagenwert (monetär und normiert von 0 bis 100) in jedem Jahr der Betrachtungsperiode für jede einzelne analysierte Anlage
- Werte der Indikatoren in jedem Jahr der Betrachtungsperiode für jede einzelne analysierte Anlage
- Verläufe der Zustände mit den Wirkungen der Erhaltungsmaßnahmen
- Parameter der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung gem. Kapitel 6.2.2
- Entwicklung Technischer Anlagenwert als monetäre Größe über den gesamten Analysezeitraum für die gesamte Teststrecke bzw. das Teilnetz
- Entwicklung Technischer Anlagenwert auf einer Skala von 0 bis 100 über den gesamten Analysezeitraum für die gesamte Teststrecke bzw. das Teilnetz

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse aus der praktischen Anwendung anhand einiger Beispiele. Die umfangreichen zur Verfügung stehenden Ergebnisse und deren Interpretation können im Detail dem Kapitel 7.6 entnommen werden.

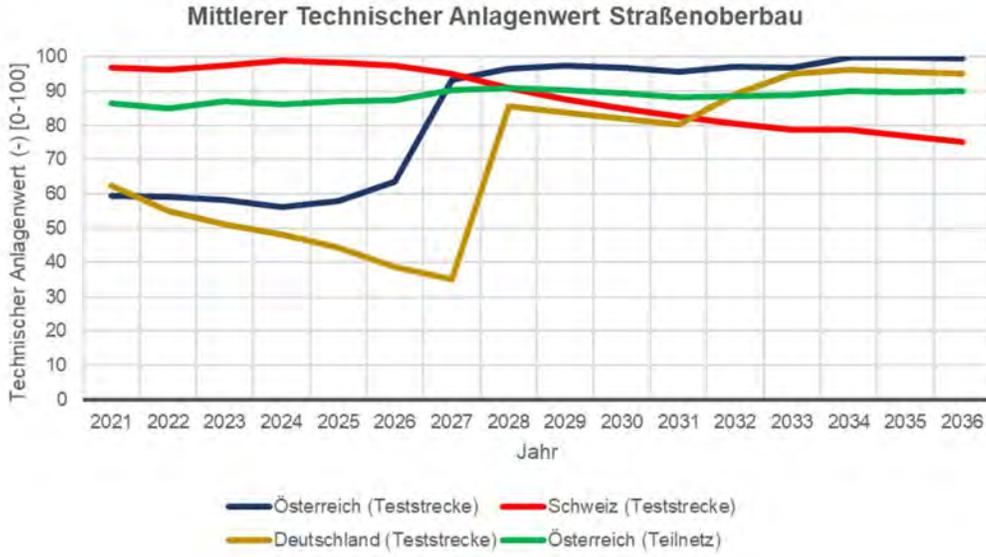


Abbildung 99: Beispiel Mittlerer Technischer Anlagenwert Straßenoberbau als Vergleich zwischen den Teststrecken und dem Teilnetz

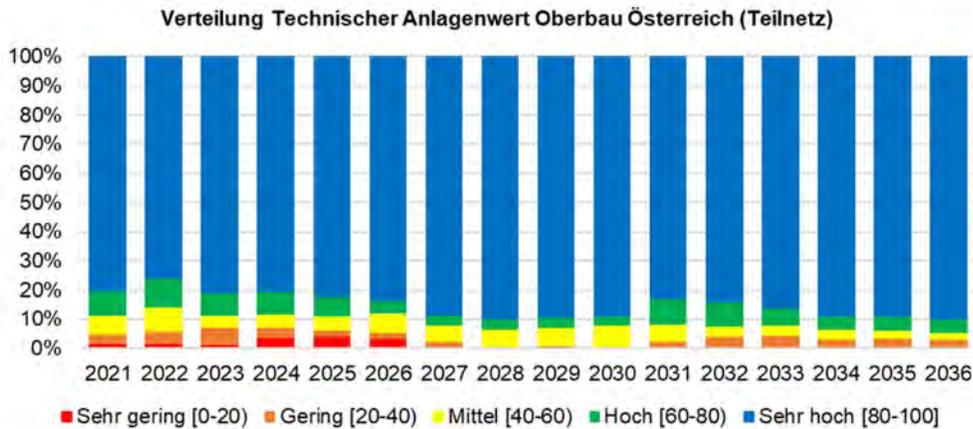


Abbildung 100: Beispiel Verteilung Technischer Anlagenwert in unterschiedliche Kategorien Oberbau Teilnetz Österreich

Grundsätzlich erfüllen die Ergebnisse die Erwartungen und auch die daraus ableitbaren Zusammenhänge ermöglichen eine Aussage über die Entwicklung des Technischen Anlagenwertes über die Zeit und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Lebenszyklen. Auch die Untersuchung der Effektivität liefert eindeutige Aussagen im Hinblick auf die Wirkungen auf den Technischen Anlagenwert (Beispiel siehe Abbildung 101).

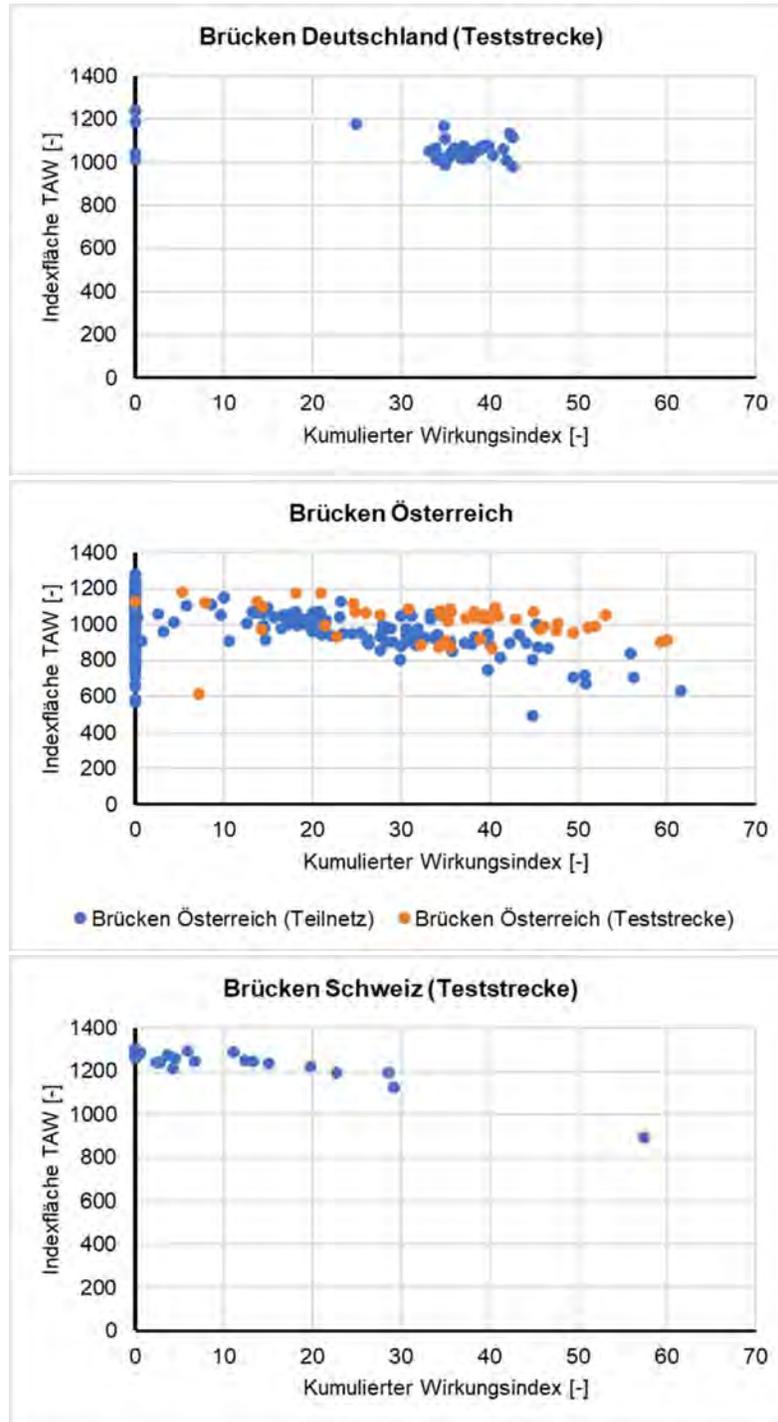


Abbildung 101: Effektivitätsdiagramme „TAniA“ Brücken Teststrecken und Teilnetz

Empfehlungen für die praktische Umsetzung

Ein wesentliches Ziel von nachhaltigen Lösungen für die Straßenverkehrsinfrastruktur liegt in einer objektiven und standardisierten Vorgehensweise bei der Ermittlung eines Technischen Anlagenwertes als wesentlichen Bestandteil des Entscheidungsprozesses im Asset Management. Der Nutzen von TAniA, welches als „Schlüsselprojekt“ für das strategische Erhaltungsmanagement angesehen wird, liegt einerseits in der Aufbereitung dieser Entscheidungsgrundlagen durch eine Verbesserung der Erfassung von notwendigen Grundlagen und in der Definition von objektiven Bewertungsgrößen in Form von Schlüsselindikatoren (KPIs), andererseits auch in der Integration einer anlagenspezifischen Lebenszyklusbewertung in den Entscheidungsprozess und für das Benchmarking zwischen den Straßenverwaltungen der D-A-CH-Länder. TAniA versucht Lücken im aktuellen Bewertungs- und Entscheidungsprozess zu schließen und diesen auf die Anforderungen einer umfassenden und nachhaltigen, auf einem Lebenszyklusansatz basierenden systematischen Erhaltungsplanung zu erweitern. Das Projekt liefert eine Gesamtlösung, die ohne großen zusätzlichen Aufwand in den Entscheidungsprozess der Straßenverwaltungen implementiert werden könnte. Natürlich obliegt es letztendlich den Straßenerhaltern bzw. den Straßenbetreibern, die detaillierte Vorgehensweise intern festzuschreiben und in die konkreten Erhaltungsmanagementprozesse zu überführen. Das Instrumentarium dazu steht mit TAniA zur Verfügung. TAniA kombiniert somit die technisch-wissenschaftliche Problemlösung mit der praktischen Einsatzfähigkeit.

Die nachfolgenden Empfehlungen sind ein weiteres Ergebnis des gegenständlichen Projektes im Rahmen der praktischen Anwendung der entwickelten Modelle und Algorithmen. Darüber hinaus ist es notwendig, diese Erkenntnisse mit generellen Anforderungen aus den Geschäftsprozessen des Asset Managements der Straßenerhalter zu verknüpfen, sodass für eine umfassende Implementierung auch die richtigen Schritte gesetzt werden können. Für eine erfolgreiche Implementierung wird ein iterativer Prozess empfohlen. Dabei sind folgende Randbedingungen zu beachten:

- Zusammenhang und Verknüpfung mit den generellen Zielsetzungen
Erwartungen aus dem Asset Management (technische Ziele und strategische Ziele)
- Auswahl der Modelle und Algorithmen in Abhängigkeit von den Zielen und Vorgaben

- Verfügbarkeit der für die Modellierung und die Anwendung des Algorithmus erforderlichen Eingangsdaten

Die Implementierung dieser Bausteine in ein Asset-Management-System ist der letzte Schritt im Rahmen der Implementierung, gefolgt von einem Verbesserungsprozess, der kontinuierlich vor allem den Umgang mit den Ergebnissen einer solchen Anwendung optimieren sollte. Vor dem Start einer umfassenden Implementierung sind folgende, primär organisatorische Fragen mit den betroffenen Personen und Interessensgruppen (Stakeholder) zu diskutieren:

- Welche Anwendungsbereiche und Prozesse sollten mit den Ergebnissen von TAniA abgedeckt werden?
- In welchen Teilschritten des Entscheidungsprozesses können und sind die Ergebnisse einer Anwendung der TAniA-Algorithmen zu implementieren?
- Worin besteht der Nutzen in einer Anwendung der Ergebnisse von TAniA?
- Welchen Aufwand bedeutet eine Implementierung von TAniA?
- Was bedeutet die Implementierung für die aktuelle Datenstrukturlandschaft?
- Welche Anpassungen bei der Erhebung und Verarbeitung von Zustandsdaten sind erforderlich?
- Auf welcher Prozessebene im Asset Management Prozess soll TAniA eingesetzt werden?
- Wer verwendet die Ergebnisse aus dem Prozess und wie sollen die Ergebnisse aufbereitet werden?
- Sind die Ergebnisse verständlich für die unterschiedlichen Anwenderebenen?

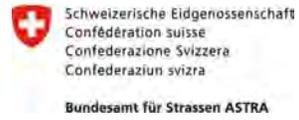
Die Verwendung der Ergebnisse für die strategische Planung im Rahmen der Erstellung eines Bauprogramms ist eine zentrale Zielsetzung im Rahmen der praktischen Implementierung von TAniA. Die nachfolgende Liste gibt einen Überblick über eine mögliche Verwendung der Ergebnisse im Asset Management der Straßenerhalter auf den unterschiedlichen Entscheidungsebenen (Technische Ebene und Strategische Ebene):

- Die anlagenbezogenen Ergebnisse liefern eine Grundlage für die Definition von Erhaltungsmaßnahmen für das langfristige Bauprogramm und für die

Projektentwicklung. TAniA liefert Ansätze zur Beurteilung von Erhaltungsmaßnahmenstrategien aus der Sicht der Technischen Anlagenbewertung auf Objektebene (Technische Ebene).

- Die zeitabhängige Entwicklung des Technischen Anlagenwertes auf Netzebene kann als Grundlage für den Netzzustandsbericht herangezogen werden (Strategische Ebene).
- 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, die zu unterschiedlichen Entwicklungen des Technischen Anlagenwertes führen (Strategische Ebene).
- 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 durch die Berechnung des Technischen Anlagenwertes einer Abschätzung unterzogen werden konnte (Technische Ebene und Strategische Ebene).

Die praktischen Anwendungen auf den Teststrecken und dem Teilnetz haben gezeigt, dass der Technische Anlagenwert als Vergleichsgröße im Rahmen von Benchmarkingaufgaben besonders gut geeignet ist. Wie bereits erwähnt, ist eine effiziente Verwendung jedoch maßgeblich von den zur Verfügung stehenden Grundlagen abhängig. Mit Ausnahme der ASFINAG, wo für jeden untersuchten Anlagentyp tatsächlich auf die Ergebnisse von PMS-BMS- oder TMS-Anwendungen zurückgegriffen werden konnte, die auch über eine längere Betrachtungsperiode (>10 Jahre) den Lebenszyklus jeder einzelnen Anlage bewerten, ist die Vorbereitung und Aufbereitung der Daten sowie die Zuordnung von standardisierten Lebenszyklen (Variante B und C) mit einem hohen Aufwand verbunden. Natürlich ist es möglich, den aktuellen Zustand für die Ermittlung des Technischen Anlagenwertes heranzuziehen und somit eine „Momentaufnahme“ zu erzeugen, jedoch ist die Entwicklung des Technischen Anlagenwertes in Anbetracht unterschiedlicher Erhaltungsstrategien ein wesentlicher Mehrwert. Es wird daher empfohlen, die Asset Management Systeme mit Lebenszyklusmodellen zu vervollständigen, um diesen Nutzen quantitativ aber auch



qualitativ im Entscheidungsprozess einer systematischen Straßeninfrastrukturerhaltung zu realisieren.

LITERATUR

- [1] ABBV: Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung), 2010
- [2] AKVS: Anweisung zur Kostenermittlung und zur Veranschlagung von Straßenbaumaßnahmen. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2014
- [3] AMBITION: Entwicklung eines integrativen Ansatzes zur Messung und Bewertung von Eisenbahn- und Straßentunnel – Ergebnisbericht, Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF), Wien, 2015
- [4] ASB-ING: Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) Abteilung Straßenbau, 2013
- [5] ASTRA (Bundesamt für Strassen): Daten BSA Erhaltungsplanung, ASTRA, Bern, 2018.
- [6] ASTRA (Bundesamt für Strassen): Fachapplikation Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen Sofortlösung (FA BSAS), Datenerfassungshandbuch, ASTRA 63014, Bern, 2012.
- [7] ASTRA (Bundesamt für Strassen): Fachhandbuch Trasse / Umwelt (FHB T/U). ASTRA 21001, Bern, 2019
- [8] ASTRA (Bundesamt für Strassen): KUBA 5.0, Anwendungshandbuch - KUBA-MS“, IT-Dokumentation ASTRA 62110, Bern, 2011.
- [9] ASTRA (Bundesamt für Strassen): KUBA 5.0, Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel. Datenerfassungshandbuch, ASTRA 62014, Bern, 2012
- [10] ASTRA (Bundesamt für Strassen): Methodologie der Bewertung für die Zustandserfassung der BSA, ATRSA 8B310, Bern, 2016
- [11] ASTRA (Bundesamt für Strassen): MISTRA Trasse TRA. Datenerfassungshandbuch, ASTRA 61 014, Bern, 2018
- [12] ASTRA (Bundesamt für Strassen): Richtlinie – Struktur und Kennzeichnung der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (AKS-CH). ASTRA 13013, Bern, 2014

- [13] ASTRA (Bundesamt für Strassen): Richtlinie – Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen. ASTRA 12002, Bern, 2005.
- [14] ASFINAG: Baukennzahlen (Preisbenchmarks), Wien 2020 (unveröffentlicht, vertraulich)
- [15] 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.
- [16] COST 354, 2008: Litzka, J., Leben, B., La Torre, F., Weninger-Vycudil, A., de Lurdes Antunes, M., Kokot, D., Mladenović, G., Brittain, S., Viner, H. The Way Forward for Pavement Performance Indicators Across Europe, COST Action 354 Performance Indicators for Road Pavements Final Report, FSV – Austrian Transportation Research Association, Karls gasse 5, 1040 Vienna, Austria
- [17] DAUB Arbeitsgruppe Lebenszykluskosten: Empfehlungen für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), 2018
- [18] DIN 1076:1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 1999
- [19] DIN 276: Kosten im Bauwesen. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2018
- [20] DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, 2012
- [21] E EMI: Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2012
- [22] EINSTEIN - Risikobasiertes Entscheidungsmodell zur Ermittlung des optimalen Instandsetzungszeitpunktes von Infrastrukturbauten. Ergebnisbericht, Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF), Wien, 2015
- [23] EWS: Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 1997
- [24] FIB Model Code 2010. International Federation for Structural Concrete, Switzerland, 2010

- [25] Haardt P.: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B22, Bergisch-Gladbach, 1999
- [26] Hess R., Schweibenz B., Stöckner M., Zander U.: Infrastrukturmanagement Straße - Erhaltung Maßnahmenkoordination Wirtschaftlichkeit Vermögensbewertung. Kirschbaum, Bonn, 2018
- [27] Hinsch, K., Krause, G. u. Maerschalk, G., Rübensam, J. (2005) Katalogisierung von beschreibenden Größen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahnbefestigungen und die Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 915, BMVBW Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bonn 2005
- [28] ISO 15686-2:2012. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 2: Service life prediction procedures. ISO – International Organization for Standardization, Switzerland, 2012
- [29] ISO 15686-3:2002. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 3: Performance audits and reviews. ISO – International Organization for Standardization, Switzerland, 2002
- [30] ISO 15686-5:2017. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle costing. ISO – International Organization for Standardization, Switzerland, 2017
- [31] ISO 55001:2014. Asset management – Management systems – Requirements. ISO – International Organization for Standardization, Switzerland, 2014
- [32] Kruschwitz L.: Finanzmathematik – Lehrbuch der Zins-, Renten-, Tilgungs-, Kurs- und -renditenrechnung (5., überarbeitete Auflage). Oldenbourg Verlag München GmbH, München, 2010
- [33] Leitfaden OSA: Leitfaden Objektbezogene Schadenanalyse. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS), 2007
- [34] M KWPT: Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2015
- [35] Molzer, C., Felsenstein, K., Viertl, R., Litzka, J. u. Weninger-Vycudil, A. (2000) Statistische Methoden zur Auswertung von Straßenzustandsdaten.

Straßenforschung Heft 499, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie BMVIT. Wien 2000

- [36] Oertelt St. (2007) Empirische Absicherung der Verhaltensfunktionen für Wirtschaftlichkeitsrechnungen und PMS-Anwendungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 965, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bonn 2007
- [37] OPTIMAL – Optimierte Instandsetzungsplanung der tunnelspezifischen baulichen und elektromaschinellen Ausrüstung mittels LCA. VIF-Projekt 2018, Wien, 2020
- [38] ÖNORM EN 13306: Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung (mehrsprachige Fassung: en/fr/de). Austrian Standards, Wien, 2018
- [39] PIARC: Asset Management Manuals – Guideline for Practitioners. World Road Association, France, Paris, 2017
- [40] PMS-Consult, Ingenieurbüro für Verkehrswesen und Infrastrukturplanung GmbH: Übernahme und Weiterführung der Projektstätigkeiten im Rahmen des BAST-Projektes Nr. 450004307 (Aufbau eines Qualitätssicherungsverfahrens für die systematische Erhaltungsplanung der Bundesfernstraßen), Dokumentation Grundlagen, August 2018
- [41] RABT: Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2006
- [42] RI-EBW-PRÜF: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2017
- [43] RI-ERH-ING – OSA: Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten – Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, 2007
- [44] RI-WI-BRÜ: Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2004
- [45] RPE-Stra 01: Richtlinie für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2001

- [46] RSO Asphalt: Richtlinien zur Beurteilung der strukturellen Substanz von Asphaltstraßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, seit 2014 in Erprobung
- [47] RVS 13.01.15: Beurteilungskriterien für messtechnische Zustandserfassung mit dem System RoadSTAR. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien, 2006
- [48] RVS 13.01.16: Bewertung von Oberflächenschäden und Rissen auf Asphalt- und Betondecken. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien, 2012
- [49] RVS 13.01.41 Straßeninstandsetzung, Asphaltstraßen, Grundlagen der Zustands- und Maßnahmenbeurteilung. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien, 2015
- [50] RVS 13.03.11: Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Straßenbrücken, Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien, 2009
- [51] RVS 13.03.31: Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Straßentunnel, baulich konstruktive Teile. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien, 2013
- [52] RVS 13.03.41 Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Straßentunnel – Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien, 2014
- [53] RVS 13.04.11: Bauwerksdatenbank, Brückenobjekte. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien, 2009
- [54] RVS 13.04.22: Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Bauwerksdatenbank, Straßentunnel in geschlossener Bauweise. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien, 2009
- [55] RVS 13.04.23: Bauwerksdatenbank, Betriebs- und sicherheitstechnische Einrichtungen Tunnel. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien, 2014

- [56] RVS 13.05.11: Lebenszykluskostenermittlung für Brücken. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien, 2017
- [57] RVS 13.05.31 Bewertung des Anlagevermögens der Straßeninfrastruktur (Merkblatt), Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien, 2019
- [58] Scazziga, I. (2008) Maßnahmenplanung im EM von Fahrbahnen: Schadensprozesse und Zustandsverläufe. Schlussbericht VSS 2004/712. Schriftenreihe Nr. 1304, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Straßen. Bern 2008
- [59] Scazziga, I. (2006) Gesamtbewertung der Fahrbahnen. Schlussbericht Forschungsprojekt FA VSS2000/544, Bundesamt für Straßen. Bern 2006
- [60] SIA 269 (SN 505 269): Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken. Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein, Bern, 2011
- [61] SIA 269/2 (SN 505 269/2): Erhaltung von Tragwerken – Betonbau. Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein, Bern, 2004
- [62] SIA 469 (SN 588 469): Erhaltung von Bauwerken. Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein, Bern, 1997
- [63] SN 640 900a: Erhaltungsmanagement (EM) – Grundnorm, inkl. Anhang Begriffssystematik. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, 2014
- [64] SN 640 904: Erhaltungsmanagement (EM); Gesamtbewertung von Fahrbahnen, Kunstbauten, und technischen Ausrüstungen: Bestimmung der Substanz und Gebrauchswerte. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, 2003
- [65] SN 640 907 Grundlagen zur Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement von Strassen. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [66] SN 640 912: Strasseninformationssystem Linearer Bezug; Räumliches Basis-Bezugssystem RBBS. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, 2005

- [67] SN 640 925 B: Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF); Zustandserhebung und Indexbewertung. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, 2003
- [68] SN 640 926: Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF); Visuelle Zustandserhebung: Einzelindizes. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, 2004
- [69] SN 640 964: Erhaltungsmanagement der technischen Ausrüstungen (EMT), Zustandserhebung und Zustandsbewertung. Schweizerischer Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute VSS, 2004
- [70] SN 640 981: Erhaltungsmanagement in Agglomerationen; Grundmodell der Werterhaltung. Schweizerischer Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute VSS, 2010
- [71] SN EN 50126-1: Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) – Teil 1: Generischer RAMS Prozess, 2017
- [72] SsD: Standards staatlicher Doppik. Beschluss des Gremiums nach § 49a HGrG am 28. November 2018, Stand nach Bearbeitung durch die AG VKR/Standards staatlicher Doppik am 17. und 18 September 2018
- [73] Stuhr, R.: Ansätze zur Bilanzierung des staatlichen Straßeninfrastrukturvermögens – Einstieg in ein ganzheitliches Asset-Management-System. Springer Gabler, Wiesbaden, 2018
- [74] TAniA - Technische Anlagenbewertung im Asset-Management: Weninger-Vycudil A., Brozek B., Kessel T., Kutz J., Chylik B., Schranz C., Prammer D., Vorwagner A., Curschellas P., Bühlmann R. Deliverable 2.1 - Bericht Status Quo DACH, Projekt finanziert im Rahmen der D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung 2018, Wien, 2019 (unveröffentlicht)
- [75] TAniA - Technische Anlagenbewertung im Asset-Management: Weninger-Vycudil A., Brozek B., Kessel T., Kutz J., Chylik B., Schranz C., Prammer D., Vorwagner A., Curschellas P., Bühlmann R. Deliverable 3.1 – Holistischer Bewertungsrahmen, Projekt finanziert im Rahmen der D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung 2018, Wien, 2019 (unveröffentlicht)

- [76] TAniA - Technische Anlagenbewertung im Asset-Management: Weninger-Vycudil A., Brozek B., Kessel T., Kutz J., Chylik B., Schranz C., Prammer D., Vorwagner A., Curschellas P., Bühlmann R. Deliverable 4.1 - Dynamische Lebenszyklen der Straßeninfrastruktur, Projekt finanziert im Rahmen der D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung 2018, Wien, 2020 (unveröffentlicht)
- [77] TAniA - Technische Anlagenbewertung im Asset-Management: Weninger-Vycudil A., Brozek B., Kessel T., Kutz J., Chylik B., Schranz C., Prammer D., Vorwagner A., Curschellas P., Bühlmann R. Deliverable 5.1 - Modellierung Technischer Anlagenwert, Projekt finanziert im Rahmen der D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung 2018, Wien, 2020 (unveröffentlicht)
- [78] VRV – Voranschlags- und Rechnungsabschlussverordnung 2015.
Bundesministerium für Finanzen, Wien, 2015
- [79] Weninger-Vycudil A., Simanek P., Brozek B. und Litzka J.: Handbuch Pavement Management in Österreich (Ausgabe 2016). PMS-Consult GmbH im Auftrag der ASFINAG, Wien, 2016
- [80] Weninger-Vycudil A., Brozek B., Maerschalk G., Petschacher M. und Litzka J.: ELISA ASFINAG – Erhaltungsziel integraler Substanzwert im Anlagenmanagement der ASFINAG. Forschungsbericht der VIF 2012 im Auftrag der ASFINAG und des BMVIT, Wien, 2014
- [81] Weninger-Vycudil A. und Brozek B.: Pilotprojekt „E&M-Erhaltung Tunnel Tirol“. PMS-Consult im Auftrag des Amtes der Tiroler Landesregierung, Schlussbericht, Innsbruck – Wien, 2018 (unveröffentlicht)
- [82] Weninger-Vycudil A. und Brozek B.: Bewertung Straßenoberbau auf der Grundlage von standardisierten Lebenszyklen- Standard-Life-Cycle-Assessment (S-LCA). Dokument im Auftrag der ASFINAG (Entwurf, unveröffentlicht), Wien, 2019/2020
- [83] Weninger-Vycudil A., Leszczynska A. und Moser T.: Lebenszyklusanalyse Brücken 2019, Konfigurationsdokument Aktualisierung Lebenszyklusanalyse IMT Brücken, Wien, 2020 (unveröffentlicht)
- [84] Wistuba M., Litzka J. und Blab R.: Klimakenngrößen für den Straßenoberbau in Österreich. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Schriftenreihe Straßenforschung Heft 507, Wien, 2001

- [85] ZTV BEA-StB 09/13: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Asphaltbauweisen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, Ausgabe 2009/Fassung 2013
- [86] ZTV ZEB-StB: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2006

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Zustandsverlaufes im Technischen Lebenszyklus [74].....	26
Abbildung 2: Betrachtung Teilbereich Lebenszyklus (Ausschnitt Lebenszyklus) [74] t ₀ ...Bezugszeitpunkt = t _A ...Anfang des Ausschnitts des Lebenszyklus	28
Abbildung 3: Wertmäßige Abbildung von Anlagen der Straßenverkehrsinfrastruktur für die systematische Erhaltungsplanung [74]	29
Abbildung 4: Spezifische Begriffsbestimmungen für die Lebenszyklusbewertung im Rahmen von TAniA (Ausschnitt Lebenszyklus) [74].....	33
Abbildung 5: Grundidee der Berechnung des Anlagenteilspezifischen Technischen Anlagenwertes. Die Skala des Zustandes wird vom besten Zustand (0 bzw. 1) bis zum schlechtesten Zustand (5) dargestellt, TAW _x bezeichnet den technischen Anlagenwert eines Anlagenteils [75]	65
Abbildung 6: Erhaltungsintervalle Konstruktionsindikator und Ausrüstungsindikator [75]	67
Abbildung 7: Bezug der Indikatoren vor und nach einer Instandsetzung mit geänderten Anforderungen [75].....	68
Abbildung 8: Betrachtung Teilbereich Lebenszyklus (Ausschnitt Lebenszyklus) [79]	75
Abbildung 9: Ablauf der Erstellung von ausführungs- und umwelteinflussabhängigen Degradationskurven in sechs Schritten [79].....	80
Abbildung 10: Vorgehen beim Ermitteln der Übergangsdauer [76].....	83
Abbildung 11: Ablauf der Erstellung der individuellen Degradationskurven mit dem probabilistischen Ansatz anhand eines Beispiels [76].....	88
Abbildung 12: Markov-Kette mit vier Zuständen und möglichen Zustandsübergängen [76]	90
Abbildung 13: Beispiel einer mit zeitinhomogenen Markov-Ketten entwickelten Degradationskurve (Mittelwert (schwarz), Standardabweichung (rot) und Einzelsimulationen (bunte, stark transparente Linien im Hintergrund)) [76]	91
Abbildung 14: Beispiel Degradationskurve (Verhaltensfunktion) Spurrinntentiefe für verhaltenshomogene Asphaltoberbaukonstruktionen nach [27] (FS1...rechter Fahrstreifen, FSR...restliche Fahrstreifen, VhG...verhaltenshomogene Gruppe).....	93
Abbildung 15: Beispiel Degradationskurve Risse Bautype Asphalt Neubau (AS_N) mit AC deck [76].....	94
Abbildung 16: Beispiel Empfehlung von Degradationskurven für die Indexwerte auf den Nationalstraßen in der Schweiz nach [58].....	94
Abbildung 17: Zwei Beispiele möglicher Degradationskurven von Überbauten [76]	96
Abbildung 18: Beispiel einer Modellrechnung mit zeitinhomogener Markov-Kette für den Zustandsverlauf der Gesamtnote von Tunneln (links) und die daraus abgeleitete (angepasste) CEN CWA 16633 Kurve (rechts) [76].....	101
Abbildung 19: Beispiel einer Degradationskurve für E&M mit vereinfachter Methode (links) und mit zeitinhomogener Markov-Kette (rechts) nach [37].....	102

Abbildung 20: Definition standardisierter Lebenszyklus [76].....	105
Abbildung 21: Prozessschritte für die Zuordnung eines Lebenszyklus zu einem Objekt (Variante B und C) [76].....	123
Abbildung 22: Auswahl aktuelles Konstruktionsintervall [76].....	126
Abbildung 23: Auswahl aktuelles Ausrüstungsintervall [76].....	128
Abbildung 24: Definition der Dauern bis zur nächsten Erhaltungsmaßnahme [76].....	130
Abbildung 25: Definition der Dauern bis zur nächsten Erhaltungsmaßnahme – nächste Erhaltungsmaßnahme = konstruktive Erhaltungsmaßnahme (oder Ende des Lebenszyklus) [76].....	131
Abbildung 26: Zeitpunktdefinitionen im Lebenszyklus [76].....	132
Abbildung 27: Standardisierter Lebenszyklus auf der Grundlage der Zustandsprognose der Bauteile nach [83].....	138
Abbildung 28: Anzahl an Datensätzen mit Maßnahmenkosten [CHF/Einheit] pro Bauwerksteilgruppe für Instandhaltungen des Schweizer Datensatzes [77].....	152
Abbildung 29: Anzahl an Datensätzen mit Maßnahmenkosten [CHF/Einheit] pro Bauwerksteilgruppe für Ersatz des Schweizer Datensatzes [77].....	153
Abbildung 30: Bildschirmausdruck dTIMS OPTimAL-Anwendung mit Gewerke-bezogenen Maßnahmenkosten [37].....	154
Abbildung 31: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW [77].....	163
Abbildung 32: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den Ausrüstungsindikator Straßenoberbau.....	167
Abbildung 33: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den Konstruktionsindikator Straßenoberbau [77].....	168
Abbildung 34: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Randbalken von Brücken [77]	171
Abbildung 35: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Fahrbahnübergangskonstruktionen von Brücken [77].....	171
Abbildung 36: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Fahrbahnbeläge von Brücken [77]	172
Abbildung 37: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Lager von Brücken [77].....	173
Abbildung 38: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Abdichtung und Entwässerung von Brücken [77].....	174

Abbildung 39: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die sonstige Ausrüstung von Brücken [77]	174
Abbildung 40: Beispiel eines linear interpolierten (links) und stufenförmigen (rechts) qualitativen Zusammenhangs TAW - Zustand für den Unterbau von Brücken [77]	175
Abbildung 41: Beispiel eines linear interpolierten (links) und stufenförmigen (rechts) qualitativen Zusammenhangs TAW - Zustand für den Überbau von Brücken [77]	175
Abbildung 42: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Abdichtung und Entwässerung von Tunnelbauwerken [77]	177
Abbildung 43: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Ausrüstung von Tunnelbauwerken [77]	178
Abbildung 44: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den Fahrbahnbelag [77]	178
Abbildung 45: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Tunnelröhre von Tunnelbauwerken [77]	179
Abbildung 46: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den erhöhten Seitenstreifen von Tunnelbauwerken [77]	179
Abbildung 47: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Fluchtwege, Nischen und Schächte von Tunnelbauwerken [77]	180
Abbildung 48: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Zwischendecken von Tunnelbauwerken [77]	180
Abbildung 49: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für Portal und Gesims von Tunnelbauwerken [77]	181
Abbildung 50: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die E&M-Ausrüstung von Tunnelbauwerken [77]	181
Abbildung 51: Kennzahlen für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit für Indikator X	183
Abbildung 52: Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Erhaltungsmaßnahmenstrategien unter Heranziehung des Technischen Anlagenwertes (Effektivitätsdiagramm)	184
Abbildung 53: Überblick Teststrecken und Teilnetz in D-A-CH-Länder	187
Abbildung 54: Qualitativer Verlauf des Technischen Anlagenwerts für das Gesamtbauwerk	200
Abbildung 55: Web-Anwendung dTIMS TAniA Prototyp	202

Abbildung 56: dTIMS TAniA Prototyp – Bildschirmausdruck – Datentabellen	204
Abbildung 57: dTIMS TAniA Prototyp – Bildschirmausdruck – Attribute (Datenfelder)....	205
Abbildung 58: dTIMS TAniA Prototyp – Bildschirmausdruck – Inventardaten.....	206
Abbildung 59: dTIMS TAniA Prototyp – Bildschirmausdruck – Prognosedaten	206
Abbildung 60: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Transformationsroutinen zur Aufbereitung der Daten.....	207
Abbildung 61: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Formeln zur Berechnung der Analysevariablen	208
Abbildung 62: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck –Liste Analysesets.....	209
Abbildung 63: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Verlauf Zustand Gebrauchswert Straßenoberbau Teststrecke Österreich	210
Abbildung 64: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Verlauf Technischer Anlagenwert Straßenoberbau Teststrecke Österreich	210
Abbildung 65: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Wirtschaftlichkeitsparameter Straßenoberbau Teststrecke Österreich	211
Abbildung 66: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Entwicklung Technischer Anlagenwert (monetär, in Mio. €) Straßenoberbau, Teststrecke Deutschland	211
Abbildung 67: dTIMS TAniA-Prototyp – Bildschirmausdruck – Entwicklung Technischer Anlagenwert (Skala 0-100) Brücken, Teststrecke Schweiz	212
Abbildung 68: Mittlerer Technischer Anlagenwert Straßenoberbau.....	213
Abbildung 69: Verteilung Technischer Anlagenwert Oberbau Teststrecke Deutschland.	214
Abbildung 70: Verteilung Technischer Anlagenwert Oberbau Teststrecke Österreich	214
Abbildung 71: Verteilung Technischer Anlagenwert Oberbau Teststrecke Schweiz	215
Abbildung 72: Verteilung Technischer Anlagenwert Oberbau Teilnetz Österreich.....	216
Abbildung 73: monetärer Technischer Anlagenwert Teststrecken und Teilnetz.....	217
Abbildung 74: Effektivitätsdiagramme „TAniA“ Oberbau Teststrecken und Teilnetz	218
Abbildung 75: Mittlerer Technischer Anlagenwert Brücken	219
Abbildung 76: Verteilung Technischer Anlagenwert Brücken Teststrecke Deutschland .	220
Abbildung 77: Verteilung Technischer Anlagenwert Brücken Teststrecke Österreich.....	220
Abbildung 78: Verteilung Technischer Anlagenwert Brücken Teststrecke Schweiz.....	221
Abbildung 79: Verteilung Technischer Anlagenwert Brücken Teilnetz Österreich.....	221
Abbildung 80: monetärer Technischer Anlagenwert Brücken Teststrecken und Teilnetz	222
Abbildung 81: Effektivitätsdiagramme „TAniA“ Brücken Teststrecken und Teilnetz.....	223
Abbildung 82: Mittlerer Technischer Anlagenwert Tunnel	224
Abbildung 83: Verteilung Technischer Anlagenwert Tunnel Teststrecke Österreich.....	225
Abbildung 84: Verteilung Technischer Anlagenwert Tunnel Teststrecke Schweiz (ausschließlich konstruktive Anlagenteile)	226

Abbildung 85: Verteilung Technischer Anlagenwert Brücken Teilnetz Österreich.....	226
Abbildung 86: monetärer Technischer Anlagenwert Tunnel Teststrecken und Teilnetz..	227
Abbildung 87: Effektivitätsdiagramme „TAniA“ Tunnel Teststrecken und Teilnetz	228
Abbildung 88: Generalisiertes Ablaufschema für den Implementierungsprozess	231
Abbildung 89: Vorgeschlagener Steuerungsprozess TAniA	234
Abbildung 90: Spezifische Begriffsbestimmungen für die Lebenszyklusbewertung im Rahmen von TAniA (Ausschnitt Lebenszyklus) [74].....	240
Abbildung 91: Modell zur Berechnung des Technischen Anlagenwertes [77].....	242
Abbildung 92: Betrachtung Teilbereich Lebenszyklus (Ausschnitt Lebenszyklus) [79] ...	244
Abbildung 93: Definition standardisierter Lebenszyklus [79][76].....	246
Abbildung 94: Beispiel eines linear interpolierten (links) und stufenförmigen (rechts) qualitativen Zusammenhangs TAW - Zustand für den Überbau von Brücken [77]	248
Abbildung 95: Linearer interpolierter (links) und stufenförmiger (rechts) qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den Konstruktionsindikator Straßenoberbau [77].....	248
Abbildung 96: Kennzahlen für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit für Indikator X	249
Abbildung 97: Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Erhaltungsmaßnahmenstrategien unter Heranziehung des Technischen Anlagenwertes (Effektivitätsdiagramm).....	250
Abbildung 98: Überblick Teststrecken und Teilnetz in D-A-CH-Länder	251
Abbildung 99: Beispiel Mittlerer Technischer Anlagenwert Straßenoberbau als Vergleich zwischen den Teststrecken und dem Teilnetz	253
Abbildung 100: Beispiel Verteilung Technischer Anlagenwert in unterschiedliche Kategorien Oberbau Teilnetz Österreich.....	253
Abbildung 101: Effektivitätsdiagramme „TAniA“ Brücken Teststrecken und Teilnetz	254

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Überblick maßgebende deutsche Literatur	41
Tabelle 2: Überblick maßgebende österreichische Literatur.....	43
Tabelle 3: Überblick maßgebende Schweizer Literatur	45
Tabelle 4: Zusammenfassung Daten und Datengrundlagen in Deutschland [74]	54
Tabelle 5: Zusammenfassung Daten und Datengrundlagen in Österreich [74].....	59
Tabelle 6: Zusammenfassung Daten und Datengrundlagen in der Schweiz [74].....	63
Tabelle 7: Bewertungsrahmen für die Anlagenbewertung in Abhängigkeit der Anlageart [75].....	69
Tabelle 8: Zuordnung Anlagenteile von Straßen zu den beiden Indikatoren KI und AI [75]	70
Tabelle 9: Zuordnung Anlagenteile von Brücken zu den beiden Indikatoren KI und AI [75]	70
Tabelle 10: Zuordnung Anlagenteile von Tunneln (baulich) zu den beiden Indizes KI und AI [75].....	71
Tabelle 11: Vorausgewählte Attribute für die RFA für den österreichischen Datensatz [79]	85
Tabelle 12: Beispiel der Bestimmung der Genauigkeit bei verschiedenen Einflussparameterkombinationen (Übergang des Überbaus von Zustandsnote 2 auf 3). [79].....	86
Tabelle 13: Jährlich ändernde Übergangswahrscheinlichkeiten einer zeitinhomogenen Markov-Kette (Ausschnitt der ersten Beobachtungsjahre) am Beispiel des Überbaus bei Brücken (Österreich) [76].....	91
Tabelle 14: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Unterbau [83].....	96
Tabelle 15: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Überbau [83].....	97
Tabelle 16: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Lager [83]	97
Tabelle 17: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil FÜK [83]	97
Tabelle 18: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Deckschicht (Belag) [83].....	98
Tabelle 19: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Entwässerung [83].....	98
Tabelle 20: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Randbalken [83].....	98
Tabelle 21: Übergangswahrscheinlichkeiten Bauteil Ausrüstung [83].....	99
Tabelle 22: Übergangswahrscheinlichkeiten Gesamtnote [83].....	99
Tabelle 23: Auswahlvorschläge Standardlebenszyklus Straßenoberbau [76].....	109
Tabelle 24: Standardlebenszyklus Asphaltoberbau mit konventioneller Deckschicht [76]	110
Tabelle 25: Standardlebenszyklus Asphaltoberbau mit kurzer technischer Lebensdauer der Deckschicht [76].....	111

Tabelle 26: Standardlebenszyklus Asphaltoberbau mit langer technischer Lebensdauer der Deckschicht [76]	112
Tabelle 27: Standardlebenszyklus Betonoberbau [76]	113
Tabelle 28: Standardlebenszyklus Betonoberbau mit Asphaltdeckschicht [76].....	114
Tabelle 29: Auswahlvorschläge Standardlebenszyklus Brücken [76]	115
Tabelle 30: Standardlebenszyklus Brücken 70 Jahre [76].....	116
Tabelle 31: Standardlebenszyklus Brücken 80 Jahre [76].....	117
Tabelle 32: Standardlebenszyklus Brücken 60 Jahre [76].....	118
Tabelle 33: Auswahlvorschlag Standardlebenszyklus Tunnel [76]	119
Tabelle 34: Standardlebenszyklus Tunnel in geschlossener Bauweise [76].....	120
Tabelle 35: Standardlebenszyklus Tunnel in offener Bauweise, Unterflurtrassen und Stadttunnel [76]	121
Tabelle 36: Daten und Objektinformationen für die Auswahl des Standardlebenszyklus [76]	124
Tabelle 37: Daten und Objektinformationen für die Auswahl des Konstruktionsintervalls [76]	125
Tabelle 38: Zeitpunkte der nächsten Erhaltungsmaßnahmen [76]	133
Tabelle 39: Erhaltungsmaßnahmen Straßenoberbau für Standardlebenszyklen [76]	137
Tabelle 40: Erhaltungsmaßnahmen Brücken für Standardlebenszyklen [76].....	138
Tabelle 41: Grundstruktur Abhängigkeits-Erhaltungs-Matrix (AEM) [76].....	140
Tabelle 42: Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen des Straßenoberbaus (ZTV BEA-StB, S.34 - 53, [85] und ZTV BEB-StB, S. 43 – 61, [86]).....	142
Tabelle 43: (gekürzte) Maßnahmenkosten (Dokumentation Grundlagen, Tabelle 18, S. 31, [40]).....	143
Tabelle 44: Kategorisierung Erhaltungsmaßnahmen Straßenoberbau nach [79].....	144
Tabelle 45: Maßnahmenkosten Erhaltungsmaßnahmen Straßenoberbau Österreich nach [79]	145
Tabelle 46: (gekürzte) Einteilung der Maßnahmen an Straßen in Asphalt- und Betonbauweise in der Schweiz [65]	147
Tabelle 47: Maßnahmenkosten für bitumenhaltige Schichten an Nationalstraßen in der Schweiz (Preisbasis 2018)	148
Tabelle 48: Maßnahmenkosten für Betonfahrbahnen in der Schweiz (Preisbasis 2018) [77]	149
Tabelle 49: Bauteilbezogene Maßnahmenliste zur Erhaltung des Brückenbauwerks nach [83]	150
Tabelle 50: Objektbezogene Maßnahmenliste zur Erhaltung des Brückenbauwerks nach [83]	150
Tabelle 51: Maßnahmenkosten Erhaltungsmaßnahmen Brücken Österreich [83]	151
Tabelle 52: Maßnahmenkosten Erhaltungsmaßnahmen Tunnel Österreich [37]	155

Tabelle 53: Qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für den Straßenoberbau [77]..	166
Tabelle 54: Qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Anlagenteile von Brücken [77].....	170
Tabelle 55: Qualitativer Zusammenhang TAW - Zustand für die Anlagenteile von Tunneln [77].....	176
Tabelle 56: Teststrecken und Teilnetz	188
Tabelle 57: Anlagen Teststrecken und Teilnetz.....	192
Tabelle 58: Quantität der Daten auf den Teststrecken und dem Teilnetz	192
Tabelle 59: Zuordnung Analysemethodik zu Teststrecken und Teilnetz in Abhängigkeit von der Art der Anlage.....	195
Tabelle 60: Modelle und Spezifikationen Straßenoberbau	196
Tabelle 61: Modelle und Spezifikationen Brücken.....	198
Tabelle 62: Umrechnung der Zustandsnoten für Brückenbauwerke	199
Tabelle 63: Modelle und Spezifikationen Tunnel (bauliche Anlagenteile, E&M-Anlagenteile)	201
Tabelle 64: Datentabellen dTIMS TAniA Prototyp.....	203
Tabelle 65: Anlagen Teststrecken und Teilnetz.....	251

ANHÄNGE

Da in den nachfolgend aufgelisteten Anhängen vertrauliche Daten und Informationen der Auftraggeber verarbeitet bzw. aufgelistet werden, stehen die Anhänge ausschließlich den Auftraggebern zur Verfügung und werden nicht veröffentlicht.

Anhang A Details zur Entwicklung der Prognosemodelle mit RFA

Anhang B Kostendaten und Grundlagen für den Technischen Anlagenwert

- **Anhang B1** Kostendaten und Grundlagen für den Technischen Anlagenwert in Österreich
- **Anhang B2** Kostendaten und Grundlagen für den Technischen Anlagenwert in Deutschland
- **Anhang B3** Kostendaten und Grundlagen für den Technischen Anlagenwert in der Schweiz

Anhang C MS Excel-Konfigurationstabellen dTIMS