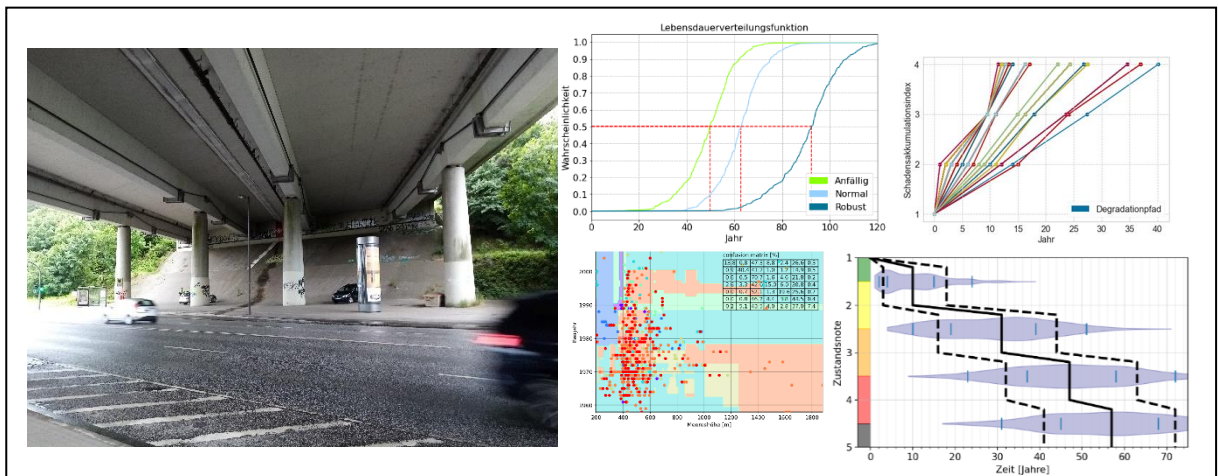


# Abschätzung der Restnutzungsdauer von Brückenbauwerken durch Entwicklung und Erprobung hybrider Modelle

## ENDURE

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
D-A-CH Kooperation  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2021  
DACH 2021

Mai 2024

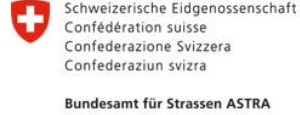




Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr



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



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra  
  
Bundesamt für Strassen ASTRA



**FFG**  
Forschung wirkt.

## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)  
Invalidenstraße 44  
10115 Berlin  
Deutschland



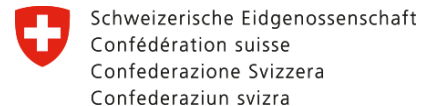
Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr

Bundesministerium für Klimaschutz (BMK)  
Radetzkystraße 2  
1030 Wien, Österreich



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

Bundesamt für Strassen (ASTRA)  
Papiermühlestrasse 13  
3063 Ittigen, Schweiz



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

### Für den Inhalt verantwortlich:

Helmut-Schmidt-Universität /Universität der Bundeswehr Hamburg  
Professur für Konstruktionswerkstoffe und Bauwerkserhaltung  
Holstenhofweg 85  
22043 Hamburg, Deutschland



HELMUT SCHMIDT  
UNIVERSITÄT  
Universität der Bundeswehr Hamburg

AIT Austrian Institute of Technology GmbH  
Center for Transport Technologies  
Transportation Infrastructure Technologies  
Giefinggasse 4  
1210 Wien, Österreich



**AIT**  
AUSTRIAN INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

IMC - Infrastructure Management Consultants GmbH  
Bellerivestrasse 209  
8008 Zürich, Schweiz



INFRASTRUCTURE  
MANAGEMENT  
CONSULTANTS

### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Thematische Programme  
Sensengasse 1  
1090 Wien, Österreich



**FFG**  
Forschung wirkt.

# Abschätzung der Restnutzungsdauer von Brückenbauwerken durch Entwicklung und Erprobung hybrider Modelle ENDURE

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
D-A-CH Kooperation  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2021  
DACH 2021

**Autorinnen und Autoren:**

Dr.-Ing. Francesca MARSILI  
Dr. Holger DIEDERICH  
DI Marian RALBOVSKY, PhD  
Prof. Dr. Rade HAJDIN  
Dr. DI Alois VORWAGNER  
Prof. Dr.-Ing. Sylvia KEßLER

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Deutschland  
Bundesministerium für Klimaschutz, Österreich  
Bundesamt für Strassen, Schweiz

**Auftragnehmer:**

Helmut-Schmidt-Universität /Universität der Bundeswehr Hamburg  
AIT Austrian Institute of Technology GmbH  
IMC - Infrastructure Management Consultants GmbH

## KURZFASSUNG

Stahlbetonbrücken sind eine der wichtigsten Infrastrukturen im Straßennetz der D-A-CH-Länder, doch ihr Zustand verschlechtert sich, da die Verkehrsbelastung zunimmt und sie sich dem Ende ihrer vorgesehenen Lebensdauer nähern. Infolgedessen steht das Infrastrukturmanagement vor der Herausforderung, die begrenzten Instandhaltungsressourcen effizient einzusetzen und die Ausfallzeiten aufgrund der Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen zu reduzieren.

Das Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Degradationsmodellen und der daraus resultierenden Nutzungsdauerabschätzung für Stahlbetonbrücken in den D-A-CH-Ländern zu erhöhen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die im Brückenmanagementsystem erfassten Bestands- und Zustandsdaten unter Anwendung einer hybriden Methodik analysiert, die auf physikalischen Modellen der Korrosionsentwicklung, stochastischen Prozessen und KI-Techniken basiert. Insbesondere werden Markov-Ketten und Gamma-Prozesse zur Modellierung des sich verschlechternden Brückenzustands verwendet. Techniken des unüberwachten Lernens, wie Cluster-Algorithmen, werden angewandt, um Gruppen von Brücken, Bauteilen oder Schäden zu identifizieren, die ähnliche Merkmale aufweisen und sich mit ähnlicher Geschwindigkeit verschlechtern. Weiterhin werden Techniken des überwachten Lernens eingesetzt, um die Cluster auf der Grundlage der Bestandsdaten vorherzusagen.

Die Analyse berücksichtigt ebenso erklärbare (explainable) KI-Technik, um aufzuzeigen, dass die Datengrundlage verzerrt ist: anfällige Brücken, die in der Vergangenheit gebaut wurden, wurden bereits ersetzt oder ihre Schäden wurden repariert, bevor ihr Zustand in den Brückenmanagementsystemen erfasst werden konnte, weil sie erst vor 30-40 Jahren entwickelt wurden. Auf der Grundlage dieses Ergebnisses werden Degradationsmodelle entwickelt, die „verzerrungsresistent“ sind, und somit eine zuverlässigere und präzisere Schätzung der Nutzungsdauer für die zuvor identifizierte Populationen von Brücken ermöglichen.

Um die Anwendung der entwickelten Degradationsmodelle in der Praxis des Infrastrukturmanagements zu erleichtern, werden die Modelle in einer IT-Toolbox integriert. Die Software ist mit einer grafischen Oberfläche ausgestattet und ermöglicht auch die Durchführung von strukturellen Zuverlässigkeitsanalysen auf der Grundlage der erhaltenen Ergebnisse.



## ABSTRACT

Reinforced concrete bridges are key infrastructure elements in the road systems of the D-A-CH countries. However, their condition is deteriorating as they near the end of their designed service life and face increasing traffic loads. Consequently, infrastructure management faces the challenge of efficiently allocating limited maintenance resources and minimizing downtime due to maintenance actions.

The aim of this research project is to increase the precision and reliability of degradation models and the resulting service life estimations for reinforced concrete bridges in the D-A-CH countries. To achieve this, inventory and condition data collected in Bridge Management Systems are analyzed using a hybrid methodology that incorporates physical models of corrosion development, stochastic processes, and AI techniques. Specifically, Markov chains and gamma processes are used to model the deteriorating condition of bridges. Unsupervised learning techniques, such as cluster algorithms, are applied to identify groups of bridges, bridge components, or damages that share similar characteristics and deterioration rates. Supervised learning techniques are employed to predict these clusters based on inventory data.

The analysis is also integrated with explainable AI techniques to highlight data biases: fragile bridges built in the past were often replaced or repaired before their condition could be recorded in the Bridge Management Systems, which were developed only 30-40 years ago. Based on this result, degradation models are developed that are resistant to bias and thus allow a more reliable and precise estimation of the service life for previously identified populations of bridges.

An IT toolbox is being developed to facilitate the application of these degradation models in infrastructure management practices. The software is equipped with a graphical interface and allows for structural reliability analysis based on the obtained results.

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>6</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>10</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>26</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>29</b>
1.1 Ausgangslage und Problemstellung .....	29
1.2 Ziele .....	29
1.3 Methodik und Lösungsansatz .....	30
1.4 Aufbau des Berichts.....	32
<b>2 GRUNDLAGEN DES INFRASTRUKTURMANAGEMENTS</b> .....	<b>34</b>
2.1 Allgemeines .....	34
2.2 Länderspezifische Unterschiede in den Begrifflichkeiten.....	34
2.3 Lebenszyklusmanagement .....	35
2.3.1 Planung, Entwurf, Ausführung und Inbetriebnahme .....	36
2.3.2 Bauwerksprüfung / Inspektion .....	37
2.3.3 Maßnahmen der Instandhaltung und -setzung .....	38
2.3.4 Rückbau und Recycling der Baustoffe.....	38
2.4 Erhaltungsmanagement.....	38
2.5 Zieldefinition .....	41
2.6 Zustandserfassung .....	42
2.6.1 Konventionelle Verfahren – Stand der Technik .....	44
2.6.2 Innovative Verfahren – Stand der Forschung .....	49
2.6.3 Datenverarbeitung und Building Information Modeling (BIM) .....	50
2.7 Zustandsbewertung .....	50
2.7.1 Autobahn GmbH / Straßenbauverwaltungen der Länder.....	51
2.7.2 ASFiNAG (AT) .....	54
2.7.3 Bundesamt für Strassen ASTRA (CH).....	55

2.8 Zustandsprognose .....	56
2.9 Maßnahmenplanung.....	58
2.10 Wirkungsanalyse .....	60
2.11 Kapitelzusammenfassung.....	61
<b>3 ENTWICKLUNG DER METHODEN DER ZUSTANDSPROGNOSE.....</b>	<b>63</b>
3.1 Methoden der Zustandsprognose auf Schadens- und Bauwerksteilebene.....	64
3.1.1 Einführung .....	64
Schadensbeispiele Stand SIB-Bauwerke 1.94 .....	65
3.1.2 Methode .....	69
3.1.3 Der k-means-Algorithmus.....	70
3.1.4 Gamma-Prozess.....	71
3.1.5 Physikalisches Modell für Rissbildung und Abplatzungen .....	73
3.1.6 Physikalisches Modell für Durchmesser verringering .....	75
3.1.7 Abhängigkeit zwischen dem Schadensakkumulationsindex, den Korrosionsphasen und den daraus resultierenden Schäden sowie den physikalischen Parametern der physikalischen Modelle .....	76
3.1.8 Integration physikalischer Modelle in die Zustandsbewertung auf der Grundlage der visuellen Prüfung .....	79
3.1.9 Clustering .....	81
3.1.10 Integration des physikalischen Modells in die Zustandsdaten .....	82
3.1.11 Anpassung und Simulation des Gamma-Prozesses .....	84
3.2 Stochastische Methoden der Zustandsnotenprognose auf Bauwerksteil- und Objekt-Ebene .....	87
3.2.1 Vorprozessierung der Daten.....	88
3.2.2 Gruppierungsalgorithmen .....	98
3.2.3 Prognosealgorithmen .....	111
3.2.4 Modellauswahl.....	119
<b>4 ANWENDUNG DER METHODEN DER ZUSTANDSPROGNOSE.....</b>	<b>121</b>
4.1 Deutschland.....	121
4.1.1 Datengrundlage SIB-Bauwerke .....	121
4.1.2 Analyse auf Schadensebene .....	127

4.1.3	Analyse auf Bauteil- und Objektebene .....	140
4.2	Schweiz .....	153
4.2.1	Datengrundlage KUBA-DB .....	153
4.2.2	Analyse auf Bauwerks- und Bauteilebene .....	154
4.2.3	Analyse auf Bauwerksebene mittels Markov-Ketten.....	159
4.3	Österreich .....	166
4.3.1	Datengrundlage IMT .....	166
4.3.2	Analyse auf Bauteil- und Objektebene .....	167
<b>5</b>	<b>ZUSÄTZLICHE ANALYSEN.....</b>	<b>175</b>
5.1	Beschreibung des entwickelten hybriden KI-Systems .....	176
5.2	XAI: SHAP-Analyse .....	178
5.3	Ergebnisse der Analyse .....	180
5.3.1	SIB-BW.....	180
5.3.2	KUBA-DB .....	188
5.4	Interpretation der Ergebnisse .....	190
<b>6</b>	<b>ENTWICKLUNG EINES IT-PROTOTYPS .....</b>	<b>192</b>
6.1	Konzept .....	192
6.2	Datengrundlage und -aufbereitung .....	192
6.3	Zuverlässigkeit.....	193
6.3.1	Allgemeines .....	193
6.3.2	Methodik zur Bewertung der Zuverlässigkeit eines Bauwerks.....	194
6.3.3	Schäden und Schadensarten .....	195
6.3.4	Prognose der Schadensentwicklung .....	196
6.3.5	Vereinfachtes statisches Modell .....	197
6.3.6	Gefährdete Bereiche eines Bauwerks .....	199
6.3.7	Probabilistische Parameter.....	200
6.3.8	Berechnung und Ergebnisse .....	201
6.4	Grafisches User Interface .....	202
6.4.1	Kartenansicht .....	202
6.4.2	Bewertung .....	203
6.5	Exemplarische Anwendung .....	205

6.6	Kapitelzusammenfassung.....	209
<b>7</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN.....</b>	<b>210</b>
7.1	Zusammenfassung .....	210
7.2	Schlussfolgerungen .....	211
7.3	Empfehlungen und Ausblick .....	212
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>214</b>
<b>9</b>	<b>ANHÄNGE .....</b>	<b>220</b>
9.1	Zustandsprognosemodelle Deutschland.....	220
9.2	Zustandsprognosemodelle Schweiz .....	237
9.3	Zustandsprognosemodelle Österreich .....	245

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1	Grundsätzlicher Ansatz zur mittel- bis langfristigen Planung von Erhaltungsmaßnahmen innerhalb eines Lebenszyklusmanagements für Infrastrukturbauwerke.....	36
Abbildung 2-2	Prozesse eines systematischen Lebenszyklusmanagements .....	40
Abbildung 2-3	Vollständige Zielformulierung.....	42
Abbildung 2-4	Überblick zu Verfahren zur Zustandserfassung eines Bauwerks..	43
Abbildung 2-5	Ergebnisse der Zustandsbewertung einer Brücke in schlechtem Zustand	46
Abbildung 2-6	Ergebnisse der Zustandsbewertung einer Brücke in gutem Zustand	46
Abbildung 2-7	Zustandsbewertung von Brücken auf verschiedenen Gliederungsebenen	51
Abbildung 2-8	Prognose der Kennzahlen Zuverlässigkeit $\beta$ und Eintrittswahrscheinlichkeit $p_f$ .....	57
Abbildung 3-1	Chloridinduzierte Korrosion in Stahlbeton: Vergleich des Schädigungsgrades und der Zustandsnote/Schadensklasse für IMT, KUBA-DB und SIB-BW.....	66
Abbildung 3-2	Flussdiagramm zur Unterstützung der Bewertung von Korrosionsschäden (BAW, 2023). .....	66
Abbildung 3-3	Hauptschritte des Ansatzes zur Ableitung des Zustandsmodells. ....	70
Abbildung 3-4	Monte-Carlo-Simulation des physikalischen Modells für „Rissbildung und Abplatzungen“ (N = 1000 Simulationen).....	78
Abbildung 3-5	Monte-Carlo-Simulation des physikalischen Modells für „Durchmesserverringerng“ (N = 1000 Simulationen). .....	79
Abbildung 3-6	Darstellung der Werte des Silhouette-Widths – Beispiel: Abplatzung in Unterbau (SIB-BW), A: Anfällig, N: Normal, R: Robust. ....	82
Abbildung 3-7	Ergebnisse der Clusteranalyse – Beispiel: Abplatzung in Unterbau (SIB-BW). .....	82



Abbildung 3-8 Integration des physikalischen Modells in die Zustandsdaten. Schritt 1: Auswahl des optimalen MC-Simulationspfads (Modell: Rissbildung und Abplatzung). Beispiel: Abplatzung im Unterbau (SIB-BW). .....	83
Abbildung 3-9 Integration des physikalischen Modells in die Zustandsdaten. Schritt 2: Auswahl des optimalen MC-Simulationspfads (Modell: Durchmessererringerung). Beispiel: Abplatzung im Unterbau (SIB-BW). .....	83
Abbildung 3-10 Vollständiger Degradationspfad mit Hilfe von physikalischen Modellen rekonstruiert – Beispiel: Abplatzung im Unterbau (SIB-BW).....	84
Abbildung 3-11 Simulation des Gamma-Prozesses unter Berücksichtigung der Initiierungs- und Ausbreitungsphase der Korrosion für anfällige, normale und robuste Cluster – Beispiel: Abplatzung im Unterbau (SIB-BW).....	85
Abbildung 3-12 Verteilungsfunktion der Lebensdauer, die sich aus der Simulation des Gamma-Prozesses für anfällige, normale und robuste Cluster ergibt – Beispiel: Abplatzung im Unterbau (SIB-BW).....	85
Abbildung 3-13 Simulation des Gamma-Prozesses für die Ausbreitungsphase der Korrosion – Beispiel: Abplatzung im Unterbau (SIB-BW).....	86
Abbildung 3-14 Verteilungsfunktion für die Lebensdauer, die sich aus der Simulation des Gamma-Prozesses für die Ausbreitungsphase ergibt – Beispiel: Abplatzung im Unterbau (SIB-BW). .....	86
Abbildung 3-15 Baujahre der Brücken in den drei DACH-Ländern.....	89
Abbildung 3-16 Jahr der ersten Bauwerksprüfung, die in Datenbanken gespeichert ist .....	89
Abbildung 3-17 Zeitabstand zwischen Baujahr und der ersten gespeicherten Bauwerksprüfung .....	90
Abbildung 3-18 Durch gespeicherte Bauwerksprüfungen abgedeckter Zeitraum.....	90
Abbildung 3-19 Anzahl der gespeicherten Bauwerksprüfungen pro Bauwerk .....	91
Abbildung 3-20 Beispiel eines Degradationspfades mit 6 Bauwerksprüfungen.....	91
Abbildung 3-21 Zwei Beispiele von beobachteter Entwicklung der Zustandsnoten und der vermuteten Baumaßnahmen.....	92
Abbildung 3-22 Zwei Beispiele der Zustandsnotenentwicklung mit unklarem Rückschluss auf vermutete Baumaßnahmen.....	93

Abbildung 3-23 Zwei Beispiele der Verbindung vom Degradationspfad zwischen dem Baujahr und der ersten verfügbaren Bauwerksprüfung ( $\Delta t_{bj} \leq \Delta t_{bj,lim}$ ).....	97
Abbildung 3-24 Zwei Beispiele, wo die Verbindung vom Degradationspfad zwischen dem Baujahr und der ersten verfügbaren Bauwerksprüfung nicht möglich war ( $\Delta t_{bj} > \Delta t_{bj,lim}$ ) .....	98
Abbildung 3-25 Schema der Aufteilung auf Gruppen .....	98
Abbildung 3-26 Schema der Kodierung eines kategorischen Parameters .....	99
Abbildung 3-27 Beispiel der Aufteilung auf Gruppen durch einen Entscheidungsbaum [aus dem Forschungsprojekt „TAniA“ (Weninger-Vycudil, et al., 2021)] .....	100
Abbildung 3-28 Schema der Aufteilung von Bauwerken/Bauteilen auf Gruppen.....	102
Abbildung 3-29 Beispiel einer Zustandsnotenprognose .....	103
Abbildung 3-30 Beispiel der Zusammenführung der Gruppen aus dem Satz 1.....	105
Abbildung 3-31 Beispielhafte Darstellung von Verteilungsdichten, die zur Ersetzung von unbekanntem Verweildauern verwendet werden.....	106
Abbildung 3-32 Beispielhafte Darstellung von geclusterten Degradationspfaden. Degradationspfade (links) und ihre Verweildauern in Zuständen 1 und 2 (rechts)..	107
Abbildung 3-33 Beispiel der Zustandsprognosen. Links oben: Prognose für eine Gruppe aus dem Satz 1; restliche Bilder: Prognose für einzelne Cluster, die durch Aufteilung dieser Gruppe entstanden sind. ....	108
Abbildung 3-34 Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse eines Random-Forest Klassifikators. ....	110
Abbildung 3-35 Vorgegebene Anzahl der Entscheidungsbäume im Random-Forest. ....	111
Abbildung 3-36 Beispiel der aus Bauwerksprüfungen ermittelten Degradationspfade einer Bauwerksgruppe. ....	111
Abbildung 3-37 Beispiel des Histogramms der Verweildauer in einer Zustandsstufe und der daran angepassten Verteilung. ....	112
Abbildung 3-38 Beispiel der Zustandsprognose mittels Monte-Carlo Simulation. Generierte Degradationspfade (grau) und Verteilungen der Verweildauer in den Zuständen 1-3 (blau). ....	113
Abbildung 3-39 Matrix der jährlichen Übertrittswahrscheinlichkeiten <b>P</b> . ....	113

Abbildung 3-40 Histogramm der erfassten Bauwerkszustandsnoten aus dem gesamten verfügbaren Zeitraum der Bauwerksprüfungen (alle Bauwerke).....	114
Abbildung 3-41 Beispiel der Zustandsprognose mittels Simulation durch Markov-Ketten.....	115
Abbildung 3-42 Angenommene Übertittswahrscheinlichkeiten $p_{i, i + 1}$ für die Fälle ohne Daten, für Österreich und Schweiz (links), sowie für Deutschland (rechts). ...	117
Abbildung 3-43 Anwendung von drei Prognosemethoden an dem selben Datensatz. Zeitbasierte Monte-Carlo Simulation (links), zustandsbasierte Markov Ketten zeithomogen (mitte) und zeitinhomogen (rechts). ....	118
Abbildung 3-44 Koeffizienten des Lernbedarfs und der Lehrfähigkeit der Prognosemodelle .....	119
Abbildung 4-1. Übergänge von Schadensklassen - Abplatzung im Unterbau (SIB-BW). .....	121
Abbildung 4-2. Übergänge von Schadensklassen - Abplatzung im Überbau (SIB-BW). .....	122
Abbildung 4-3. Übergänge von Schadensklassen - Längsrisse im Unterbau in (SIB-BW). ....	122
Abbildung 4-4. Übergänge von Schadensklassen - Längsrisse im Überbau (SIB-BW) .....	122
Abbildung 4-5. Übergänge von Schadensklassen - Schrägrisse im Unterbau (SIB-BW). .....	123
Abbildung 4-6. Übergänge von Schadensklassen - Schrägrisse im Überbau (SIB-BW). .....	123
Abbildung 4-7. Übergänge von Schadensklassen - Querrisse im Unterbau (SIB-BW). .....	123
Abbildung 4-8. Übergänge von Schadensklassen - Querrisse, Überbau (SIB-BW).124	
Abbildung 4-9. Übergänge von Schadensklassen - Netzrisse im Unterbau (SIB-BW). .....	124
Abbildung 4-10. Übergänge von Schadensklassen - Netzrisse im Überbau (SIB-BW). .....	124

Abbildung4-11. Ergebnisse der Clusteranalyse, Abplatzung im Unterbau (SIB-BW). .....	128
Abbildung4-12. Ergebnisse der Clusteranalyse, Abplatzung im Überbau (SIB-BW). .....	128
Abbildung4-13. Ergebnisse der Clusteranalyse, Längsrisse im Unterbau (SIB-BW). .....	129
Abbildung4-14. Ergebnisse der Clusteranalyse, Längsrisse im Überbau (SIB-BW). .....	129
Abbildung4-15. Ergebnisse der Clusteranalyse, Schrägrisse im Unterbau (SIB-BW). .....	129
Abbildung4-16. Ergebnisse der Clusteranalyse, Schrägrisse im Überbau (SIB-BW). .....	130
Abbildung4-17. Ergebnisse der Clusteranalyse, Querrisse im Unterbau (SIB-BW).	130
Abbildung4-18. Ergebnisse der Clusteranalyse, Querrisse im Überbau (SIB-BW)..	130
Abbildung4-19. Ergebnisse der Clusteranalyse, Netzrisse im Unterbau (SIB-BW).	131
Abbildung 4-20. Ergebnisse der Clusteranalyse, Netzrisse im Überbau (SIB-BW).	131
Abbildung 4-21 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Abplatzung im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0. ....	133
Abbildung 4-22 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Längsrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0. ....	133
Abbildung 4-23 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Schrägrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0. ....	133
Abbildung 4-24 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Querrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0. ....	134
Abbildung 4-25 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Netzrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0. ....	134

Abbildung 4-26 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Abplatzung im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0. ....	134
Abbildung 4-27 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Längsriss im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0. ....	135
Abbildung 4-28 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Schrägriss im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0. ....	135
Abbildung 4-29 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Querriss im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0. ....	135
Abbildung 4-30 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Netzziss im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0. ....	136
Abbildung 4-31. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Abplatzung im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1. ....	137
Abbildung 4-32. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Längriss im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1. ....	137
Abbildung 4-33. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Schrägriss im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1. ....	137
Abbildung 4-34. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Querriss im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1. ....	138
Abbildung 4-35 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Netzziss im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1. ....	138

Abbildung 4-36 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Abplatzung im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1. ....	138
Abbildung 4-37. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Längsriss im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1. ....	139
Abbildung 4-38. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Schrägriss im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1. ....	139
Abbildung 4-39. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Querriss im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1. ....	139
Abbildung 4-40 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Netzzrisse im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1. ....	140
Abbildung 4-41 Sortierte Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe im Satz 1 (Gruppen A).....	143
Abbildung 4-42 Prognose auf Objektebene für Gruppe A1 (Stahlbetonplatten ohne Durchlaufwirkung, links) und Gruppe A16 (Stahlbetonplatten mit Durchlaufwirkung, rechts) .....	144
Abbildung 4-43 Prognose auf Objektebene für Gruppe A31 (Spannbetonhohlkasten Zement unbekannt, links) und Gruppe A34 (Spannbetonhohlkasten CEM II, rechts) .....	144
Abbildung 4-44 Median des Alters, wann die Zustände 2,0, 2,5 und 3,0 gemäß den Prognosemodellen der Gruppen A für den Überbau erreicht werden.....	145
Abbildung 4-45 Median des Alters, wann die Zustände 2,0, 2,5 und 3,0 gemäß den Prognosemodellen der Gruppen C für den Überbau erreicht werden .....	145
Abbildung 4-46 Prognose auf Objektebene für Gruppe A48 (Spannbetonplatte mit Durchlaufwirkung, links) und Gruppe B7 (mehrere gruppierte Typen, rechts).....	146
Abbildung 4-47 Prognose für die Gruppe A15, Bauteiltyp Überbau .....	146



Abbildung 4-48 Prognose für die Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A15 Überbau auf 9 Gruppen entstanden sind .....	147
Abbildung 4-49 Antrainierter Random-Forest Klassifikator mit zwei Parametern ....	148
Abbildung 4-50 Prognose für die Gruppe A1, Bauteiltyp Unterbau .....	149
Abbildung 4-51 Prognose für die Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Unterbau auf 8 Gruppen entstanden sind .....	150
Abbildung 4-52 Vergleich der Anzahl von Degradationspfaden pro Gruppe im Satz 1 (Gruppen A) bei zwei unterschiedlichen Annahmen von $\Delta t_{bj,lim}$ .....	151
Abbildung 4-53 Vergleich des Medianalters beim Erreichen vom Zustand 2,0 (links), 2,5 (mitte) und 3,0 (rechts) bei zwei unterschiedlichen Annahmen von $\Delta t_{bj,lim}$ für alle Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A) .....	152
Abbildung 4-54. - Übergänge von Zustandsnoten - Bauteilgruppe 1 (Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger) (KUBA-DB) .....	153
Abbildung 4-55 Übergänge von Zustandsnoten - Bauteilgruppe 2 (Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze) (KUBA-DB) .....	154
Abbildung 4-56 Übergänge von Zustandsnoten - Bauteilgruppe 3 (Punktkipplager, Linienkipplager, Lager) (KUBA-DB) .....	154
Abbildung 4-57 Ergebnisse der Clusteranalyse - Bauteilgruppe 1 (Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger) (KUBA-DB) .....	155
Abbildung 4-58 Ergebnisse der Clusteranalyse - Bauteilgruppe 2 (Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze) (KUBA-DB) .....	155
Abbildung 4-59 Ergebnisse der Clusteranalyse - Bauteilgruppe 3 (Punktkipplager, Linienkipplager, Lager) (KUBA-DB) .....	156
Abbildung 4-60 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 1 (Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 1. ....	157
Abbildung 4-61 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 2 (Flügelmauer,	

Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 1. ....	157
Abbildung 4-62 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 3 (Punktkipplager, Linienkipplager, Lager) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 1.....	157
Abbildung 4-63 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 1 (Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 2. ....	158
Abbildung 4-64 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 2 (Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 2. ....	159
Abbildung 4-65 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 3 (Punktkipplager, Linienkipplager, Lager) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 2. ....	159
Abbildung 4-66 Sortierte Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe im Satz 1 (Gruppen A, links) und im Satz 3 (Gruppen C, rechts).....	161
Abbildung 4-67 Prognose auf Objektebene für Gruppe A2 (Spannbeton, mit Durchlaufwirkung, links) und Gruppe A3 (Stahlbeton mit Durchlaufwirkung, rechts).....	162
Abbildung 4-68 Prognose auf Objektebene für Gruppe A1 (Stahlbetonrahmen, links) und Gruppe A7 (Spannbetonrahmen, rechts).....	162
Abbildung 4-69 Median des Alters, wann die Zustände 2, 3 und 4 gemäß den Prognosemodellen der Gruppen A erreicht werden .....	163
Abbildung 4-70 Median des Alters, wann die Zustände 2, 3 und 4 gemäß den Prognosemodellen der Gruppen C erreicht werden .....	163
Abbildung 4-71 Beispiel der Prognosemodelle aus Gruppe C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 entstanden sind, Variante mit 7 Clustern. ....	164
Abbildung 4-72 Schätzung der Clusterzuordnung durch den Random-Forest Klassifikator .....	164

Abbildung 4-73 Vergleich des Medianalters beim Erreichen vom Zustand 2 (links), 3 (mitte) und 4 (rechts) bei zwei unterschiedlichen Annahmen von $\Delta t_{bj,lim}$ für alle Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A).....	165
Abbildung 4-74 Sortierte Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe im Satz 1 (Gruppen A).....	169
Abbildung 4-75 Sortierte Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe im Satz 3 (Gruppen C) .....	169
Abbildung 4-76 Zustandsprognose auf Objektebene für Stahlbetonplattenbalken ohne (links) und mit (rechts) Durchlaufwirkung; Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A) ..	170
Abbildung 4-77 Zustandsprognose auf Bauteilebene für den Überbau von Stahlbetonbrücken mit Plattenbalkenquerschnitt ohne vorige Baumaßnahmen (links) und nach 1 Baumaßnahme (rechts); Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A).....	170
Abbildung 4-78 Zustandsprognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 auf Objektebene entstanden sind.....	171
Abbildung 4-79 Zuordnung zu Clustern (Aufteilung der Gruppe A1 auf Objektebene) durch einen Random-Forest Klassifikator mit zwei numerischen Parametern. ....	172
Abbildung 4-80 Vergleich der Anzahl von Degradationspfaden pro Gruppe im Satz 1 (Gruppen A) bei zwei unterschiedlichen Annahmen von $\Delta t_{bj,lim}$ .....	174
Abbildung 4-81 Vergleich des Medianalters beim Erreichen vom Zustand 2 (links), 3 (mitte) und 4 (rechts) bei zwei unterschiedlichen Annahmen von $\Delta t_{bj,lim}$ für alle Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A).....	174
Abbildung 5-1 Integration der zur Entwicklung des Zustandsmodells durchgeführten Analyse in einen größeren Kontext und Integration mit zusätzlichen Analysen. ....	175
Abbildung 5-2 Datensätze, die mit dem hybriden KI-System analysiert wurden (SAI: Schadensakkumulationsindex).....	178
Abbildung 5-3 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Abplatzung, Unterbau. ....	180
Abbildung 5-4 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Abplatzung, Unterbau.....	180
Abbildung 5-5 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Längsriss, Unterbau.....	181

Abbildung 5-6 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Längsrisse, Unterbau. ....	181
Abbildung 5-7 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Schrägrisse, Unterbau. ....	182
Abbildung 5-8 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Schrägrisse, Unterbau.....	182
Abbildung 5-9 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Querrisse, Unterbau.....	183
Abbildung 5-10 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Querrisse, Unterbau. ....	183
Abbildung 5-11 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Abplatzung, Überbau. ....	184
Abbildung 5-12 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Abplatzung, Überbau.....	184
Abbildung 5-13 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Längsrisse, Überbau.....	185
Abbildung 5-14 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Längsrisse, Überbau. ....	185
Abbildung 5-15 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Schrägrisse, Überbau. ....	186
Abbildung 5-16 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Schrägrisse, Überbau.....	186
Abbildung 5-17 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Querrisse, Überbau.....	187
Abbildung 5-18 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Querrisse, Überbau. ....	187
Abbildung 5-19 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) – Bauteilgruppe 1: Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger. ....	188
Abbildung 5-20 SHAP-Beeswarm-Plots (links: anfällig, rechts: robust) – Bauteilgruppe 1: Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger. ....	188

Abbildung 5-21 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) – Bauteilgruppe 2: Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze. ....	188
Abbildung 5-22 SHAP-Beeswarm-Plots (links: anfällig, rechts: robust) – Bauteilgruppe 2: Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze. ....	189
Abbildung 5-23 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) – Bauteilgruppe 3: Punktkipplager, Linienkipplager, Lager. ....	189
Abbildung 5-24 SHAP-Beeswarm-Plots (links: anfällig, rechts: robust) – Bauteilgruppe 3: Punktkipplager, Linienkipplager, Lager. ....	189
Abbildung 6-1 Übersicht an notwendigen Eingangsdaten für den IT-Prototyp...	193
Abbildung 6-2 Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Zuverlässigkeit eines Bauwerks	194
Abbildung 6-3 a) Balkenmodelle für eine Brücke; b) Beispiel einer Bemessungsnorm für Deutschland .....	198
Abbildung 6-4 Grundwerte von Lastmodell 1 nach DIN EN 1991-2:2010-12 (Verkehrsnorm) für Deutschland .....	199
Abbildung 6-5 Versagensarten und sich daraus ergebende gefährdete Bereiche bei Einfeld- und Mehrfeldträgern in Bezug auf Momentenbelastung unter Berücksichtigung der Lage der Schäden im Querschnitt (Hajdin & Fastrich, 2019)	200
Abbildung 6-6 Modellierung der Änderung des Widerstandes infolge von Schäden (Hajdin & Fastrich, 2019).....	202
Abbildung 6-7 Übersicht der Infrastrukturbauwerke in der Kartendarstellung ....	203
Abbildung 6-8 Zustandsprognose am Beispiel zeitinhomogene Markov-Kette ..	204
Abbildung 6-9 Zuverlässigkeitsanalyse am Beispiel zeitinhomogene Markov-Kette	204
Abbildung 6-10 Bayes'sches Netz zur Berechnung von a priori Zuverlässigkeitsindizes: Widerstand/Gebrauchsgrenze Eingabedaten.....	206

Abbildung 6-11 Widerstandverminderung aufgrund vordefinierter Schäden: Bayes'sches Netz für die Berechnung (oben); resultierender reduzierter Widerstand (unten).....	206
Abbildung 6-12 Startfenster mit ausgewähltem Bauwerk .....	207
Abbildung 6-13 Zustandsprognose am Beispiel des Prognosemodells „zeitinhomogene Markov-Kette“ .....	208
Abbildung 6-14 Auswirkungen von Querrissen auf die Zuverlässigkeit über die Zeit 208	
Abbildung 6-15 Auswirkung von einem weiteren Schaden auf die Zuverlässigkeit über die Zeit .....	209
Abbildung 9-1 Prognose für Gruppe A11 Unterbau.....	233
Abbildung 9-2 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A11 Unterbau entstanden sind, Variante mit 5 Clustern.....	233
Abbildung 9-3 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A11 Unterbau entstanden sind, Variante mit 12 Clustern.....	233
Abbildung 9-4 Prognose für Gruppe A13 Unterbau.....	234
Abbildung 9-5 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A13 Unterbau entstanden sind, Variante mit 4 Clustern.....	234
Abbildung 9-6 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A13 Unterbau entstanden sind, Variante mit 11 Clustern.....	234
Abbildung 9-7 Prognose für Gruppe A1 Oberbau.....	235
Abbildung 9-8 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Oberbau entstanden sind, Variante mit 4 Clustern.....	235
Abbildung 9-9 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Oberbau entstanden sind, Variante mit 14 Clustern.....	235
Abbildung 9-10 Prognose für Gruppe A6 Oberbau.....	236
Abbildung 9-11 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A6 Oberbau entstanden sind, Variante mit 4 Clustern.....	236
Abbildung 9-12 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A6 Oberbau entstanden sind, Variante mit 11 Clustern.....	236



Abbildung 9-13 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 entstanden sind, Variante mit 5 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten).....	239
Abbildung 9-14 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 entstanden sind, Variante mit 12 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten).....	240
Abbildung 9-15 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 entstanden sind, Variante mit 3 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten).....	241
Abbildung 9-16 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 entstanden sind, Variante mit 12 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten).....	242
Abbildung 9-17 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A3 entstanden sind, Variante mit 5 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten).....	243
Abbildung 9-18 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A3 entstanden sind, Variante mit 15 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten).....	244
Abbildung 9-19 Prognose für Gruppe A2 Objektebene .....	253
Abbildung 9-20 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Objektebene entstanden sind, Variante mit 5 Clustern .....	253
Abbildung 9-21 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Objektebene entstanden sind, Variante mit 12 Clustern .....	254
Abbildung 9-22 Prognose für Gruppe A3 Objektebene .....	254
Abbildung 9-23 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A3 Objektebene entstanden sind, Variante mit 5 Clustern .....	254
Abbildung 9-24 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A3 Objektebene entstanden sind, Variante mit 12 Clustern .....	255
Abbildung 9-25 Prognose für Gruppe A4 Objektebene .....	255
Abbildung 9-26 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Objektebene entstanden sind, Variante mit 5 Clustern .....	255

Abbildung 9-27 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Objektebene entstanden sind, Variante mit 12 Clustern .....	256
Abbildung 9-28 Prognose für Gruppe A2 Überbau .....	256
Abbildung 9-29 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Überbau entstanden sind, Variante mit 5 Clustern.....	256
Abbildung 9-30 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Überbau entstanden sind, Variante mit 22 Clustern.....	257
Abbildung 9-31 Prognose für Gruppe A4 Überbau .....	257
Abbildung 9-32 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Überbau entstanden sind, Variante mit 5 Clustern.....	257
Abbildung 9-33 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Überbau entstanden sind, Variante mit 20 Clustern.....	258
Abbildung 9-34 Prognose für Gruppe A1 Unterbau .....	258
Abbildung 9-35 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Unterbau entstanden sind, Variante mit 5 Clustern.....	258
Abbildung 9-36 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Unterbau entstanden sind, Variante mit 13 Clustern.....	259
Abbildung 9-37 Prognose für Gruppe A2 Unterbau .....	259
Abbildung 9-38 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Unterbau entstanden sind, Variante mit 5 Clustern.....	259
Abbildung 9-39 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Unterbau entstanden sind, Variante mit 13 Clustern.....	260
Abbildung 9-40 Prognose für Gruppe A1 Abdichtung.....	260
Abbildung 9-41 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Abdichtung entstanden sind, Variante mit 5 Clustern.....	260
Abbildung 9-42 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Abdichtung entstanden sind, Variante mit 12 Clustern.....	261
Abbildung 9-43 Prognose für Gruppe A1 Kappen .....	261
Abbildung 9-44 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Kappen entstanden sind, Variante mit 5 Clustern.....	261

Abbildung 9-45 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Kappen entstanden sind, Variante mit 12 Clustern.....	262
Abbildung 9-46 Prognose für Gruppe A2 Kappen .....	262
Abbildung 9-47 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Kappen entstanden sind, Variante mit 5 Clustern.....	262
Abbildung 9-48 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Kappen entstanden sind, Variante mit 13 Clustern.....	263
Abbildung 9-49 Prognose für Gruppe A4 Kappen .....	263
Abbildung 9-50 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Kappen entstanden sind, Variante mit 5 Clustern.....	263
Abbildung 9-51 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Kappen entstanden sind, Variante mit 12 Clustern.....	264

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1	Beurteilung der Wirksamkeit von zerstörungsfreien Prüfmethode(n) (Kušar, Galvão, & Sein, 2019).....	48
Tabelle 2-2	Notenbereiche der Zustandsbewertung (RI-EBW-PRÜF).....	53
Tabelle 2-3	Notensystem zur Beurteilung des Bauwerkszustands .....	54
Tabelle 2-4	Objektbeurteilung gemäß RVS 13.03.11 (FSV, 2011) .....	54
Tabelle 2-5	Zustandsklassen mit Beschreibung (SIA 469) .....	55
Tabelle 2-6	Übersicht zu eingesetzten Prognosemethoden für Infrastrukturbauwerke 58	
Tabelle 2-7	Kennwerte bzw. Grenzwerte für die Planung u. Einleitung von Erhaltungsmaßnahmen der Infrastrukturbetreiber.....	59
Tabelle 2-8	Übersicht zum Stand der Technik in der Praxis in Bezug auf die Durchführung einer Erstinspektion und die Analyse von Kosten und Wirkung von durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen .....	61
Tabelle 3-1	Überblick über die Systemebene , auf der die Analysen durchgeführt wurden. ....	63
Tabelle 3-2	Vergleich der Schadens- und Zustandsbeschreibung sowie der Kriterien, nach denen Zustandsnoten und Schadensklassen nach verschiedenen Dokumenten und Richtlinien vergeben werden (ASTRA, 2021) (BMVI, 2017) (BAW, 2023). ....	65
Tabelle 3-3	Zusammenhang zwischen der Zustandsklasse von KUBA-DB, der Zustandsnote von SIB-BW und dem Schadensakkumulationsindex. ....	67
Tabelle 3-4	Probabilistische Modelle für die Eingabeparameter der physikalischen Modelle.....	75
Tabelle 3-5	Zusammenhang zwischen dem Schadensakkumulationsindex, den Korrosionsphasen und den daraus resultierenden Schäden sowie den physikalischen Parametern der physikalischen Modelle.....	78
Tabelle 3-6	Zuweisung von Zustandsstufen zu den Zustandsnoten der Bauwerksprüfung .....	88
Tabelle 3-7	Visualisierung der Notenadaptierungen anhand von Beispielen .....	95
Tabelle 3-8	Auswirkung der Notenadaptierungsvarianten am Beispiel der Brücken in Deutschland (Objektebene). Dauer zwischen Baujahr und erster vermuteten	

Baumaßnahme (oben); Dauer zwischen erster und zweiter vermuteten Baumaßnahme (unten).	96
Tabelle 3-9 Kategorische Parameter und ihre Werte .....	102
Tabelle 4-1 Potentiell relevante Eigenschaften, extrahiert aus SIB-Bauwerke .....	125
Tabelle 4-2 Bauteile der Brücken in Deutschland .....	127
Tabelle 4-3 Anzahl der erstellten Gruppen/Prognosemodelle für die einzelnen Bauteiltypen	141
Tabelle 4-4 Die 20 größten Gruppen aus dem Satz 1 für den Bauteil Überbau....	142
Tabelle 4-5 Confusion Matrix [%] des Random-Forest Klassifikators mit vier Parametern	148
Tabelle 4-6 Häufigkeit der Auswahl von numerischen Parameter in der Random-Forest Analyse	149
Tabelle 4-7 Confusion Matrix [%] des zugehörigen Random-Forest Klassifikators	151
Tabelle 4-8 Verwendete Eigenschaften, extrahiert aus KUBA-DB.....	160
Tabelle 4-9 Anzahl der erstellten Gruppen/Prognosemodelle.....	160
Tabelle 4-10 Gruppen aus dem Satz 1, Objektebene .....	161
Tabelle 4-11 Bauwerkseigenschaften extrahiert aus der Datenbank IMT .....	166
Tabelle 4-12 Bauteile der IMT und ihre Bezeichnungen .....	167
Tabelle 4-13 Anzahl der erstellten Gruppen/Prognosemodelle für die einzelnen Bauteiltypen	168
Tabelle 4-14 Die Gruppen aus dem Satz 1 auf Objektebene .....	168
Tabelle 4-15 Confusion matrix [%] zwischen Gruppen C nach der Aufteilung der Gruppe A1 auf Objektebene.....	172
Tabelle 4-16 Häufigkeit der Auswahl von numerischen Parameter in der Random-Forest Analyse	173
Tabelle 6-1 Schadensarten eines Brückenbauwerks und Auswirkungen auf Biegung und Querkraft (S-Bewertung) .....	195
Tabelle 6-2 Beispielhafte Verteilungsfunktionen, Variationskoeffizienten und Quantile für die Einwirkungen und den Widerstand für Brückenbauwerke .....	200
Tabelle 9-1 Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Brücke (Objektebene) .....	220

Tabelle 9-2	Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Überbau .....	222
Tabelle 9-3	Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Unterbau .....	224
Tabelle 9-4	Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Lager.....	225
Tabelle 9-5	Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Fahrbahnübergang .....	226
Tabelle 9-6	Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Kappen.....	226
Tabelle 9-7	Ausgewählte Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Überbau .....	229
Tabelle 9-8	Ausgewählte Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Unterbau .....	231
Tabelle 9-9	Ausgewählte Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Vorspannung 232	
Tabelle 9-10	Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Objektebene .....	238
Tabelle 9-11	Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Überbau.....	245
Tabelle 9-12	Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Unterbau.....	245
Tabelle 9-13	Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Abdichtung .....	246
Tabelle 9-14	Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Kappen .....	246
Tabelle 9-15	Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Objektebene .....	248
Tabelle 9-16	Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Bauteil Überbau .....	249
Tabelle 9-17	Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Bauteil Unterbau .....	250
Tabelle 9-18	Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Bauteil Abdichtung.....	251
Tabelle 9-19	Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Bauteil Kappen .....	253



## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Immer mehr Stahlbetonbrücken in den D-A-CH-Ländern müssen instandgehalten werden, jedoch sind die Ressourcen für die Instandhaltung (Investitionen in die Instandhaltung, Personal) begrenzt. Um die begrenzten Ressourcen effizient einsetzen zu können, muss die Lebensdauer bestehender Brücken präzise ermittelt werden. Brückenmanagementsysteme (BMS) wie SIB-BW in Deutschland, KUBA-DB in der Schweiz und IMT in Österreich erfassen die Bestands- und Zustandsdaten von Brücken, die sich aus visuellen Inspektionen ergeben. Während der visuellen Inspektion wird den Schäden ein Zustandsindex zugeordnet; diese Daten werden dann auf höheren Systemebenen aggregiert, um einen Zustandsindex für Brückenkomponenten/Bauteilgruppen und für das gesamte Objekt zu erstellen. Die in BMS gesammelten Bestands- und Zustandsdaten sind eine wertvolle Informationsquelle für die Entwicklung von Degradations- und Lebenszyklusmodellen, doch die Analyse solcher Daten ist mit einigen Herausforderungen verbunden. Die größte Herausforderung besteht darin, dass die Zustandsdaten insofern unausgewogen sind, als die meisten Brücken noch in einem ausreichenden Zustand sind und nur wenige Brücken bereits einen kritischen Zustand erreicht haben. Folglich kann die Beurteilung, wann ein kritischer Zustand erreicht ist, nicht einfach aus der Analyse, der in den BMS enthaltenen Zustandsdaten abgeleitet werden.

Eine zusätzliche Herausforderung besteht darin, dass die in der BMS erfassten Zustandsdaten durch eine Stichprobenverzerrung beeinflusst werden: Schäden, die sich schnell entwickeln, wurden repariert, und anfällige Brücken wurden ersetzt, bevor ihr Zustand beobachtet und in den Datenbanken erfasst werden konnte, da die Datenbanken erst vor 30-40 Jahren entwickelt wurden. Folglich könnten die auf diesen Daten basierenden Degradationsmodelle zu optimistisch sein. Um die Entwicklung der Schäden an neu gebauten Brücken zu dokumentieren, muss der Zustand der Brücke über einen längeren Zeitraum als 30-40 Jahre beobachtet werden. Im ersten Fall handelt es sich bei der Stichprobenverzerrung um eine Überlebensverzerrung, die in der Forschung, die sich mit der Entwicklung von Degradationsmodellen befasst, bisher vernachlässigt wurde.

### 1.2 Ziele

Die im Rahmen des Projekts "Endure" durchgeführten Forschungsarbeiten zielen auf die Entwicklung zuverlässiger und präziser (mit begrenzten Unsicherheiten behafteter) Degradationsmodelle und Lebensdauerbewertungen für die Stahlbetonbrücken der D-A-CH-

Länder ab. Die wichtigsten Schäden an Stahlbetonbrücken sind Korrosion (Abplatzung der Betondeckung, Verringerung des Durchmessers der Stahlbewehrung) und Risse. Für die Korrosion gibt es physikalische Modelle, die die Entwicklung der Schäden über die Zeit in Abhängigkeit von einer Reihe physikalischer Parameter beschreiben. Um zuverlässigere und präzisere Degradationsmodelle für Korrosion zu entwickeln, werden die im BMS erfassten Zustandsdaten mit physikalischen Modellen für die Schadensentwicklung integriert. Solche Modelle sind in Zustand und Zeit kontinuierlich, während die Zustandsdaten mit diskreten Zuständen verknüpft sind. Im Rahmen dieses Projekts soll auch ein vernünftiger Ansatz für die Integration verschiedener Arten von Informationen aus unterschiedlichen Quellen entwickelt werden. Die Bauwerksdaten und andere relevante Informationen sollen in den Prognosemodellen berücksichtigt werden, so dass Abhängigkeiten der Zustandsentwicklung von Baustoffarten, unterschiedlichen Tragsystemen, Umwelteinwirkungen, Verkehrsbelastungen usw. erkannt und in der Prognose genutzt werden.

### 1.3 Methodik und Lösungsansatz

Um diese Ziele zu erreichen, werden verschiedene Ansätze für die Analyse der Daten und unterschiedliche Methoden für die Entwicklung von Degradationsmodellen und die Bewertung der Nutzungsdauer verwendet. Stahlbetonbrücken und generell alle zivilen Infrastrukturen können in hierarchische Ebenen unterteilt werden: erste Ebene (die Brücke), zweite Ebene (Bauwerksteile oder Brückenteilsystem) und dritte Ebene (die Schäden, die sich auf dem Brückenteilsystem befinden).

Algorithmen des unüberwachten und überwachten Lernens werden zur Analyse von Bestands- und Zustandsdaten eingesetzt. Auf der Schadensebene wird der k-means-Algorithmus verwendet, um Zustandsdaten zu analysieren und Gruppen von Schäden zu identifizieren, die sich mit der gleichen Geschwindigkeit entwickeln. Der Random-Forest-Algorithmus wird verwendet, um die Schadensgruppen auf der Grundlage von Brückenbestandsdaten vorherzusagen. Diese Analysen werden mit einer erklärbaren (explainable) Technik der künstlichen Intelligenz (XAI), der SHAP-Analyse, integriert, um die Ergebnisse der Vorhersage zu erklären und zu interpretieren. Diese Methode ermöglicht es, die Zusammensetzung der resultierenden Cluster zu visualisieren und Beziehungen und Interaktionen zwischen den Merkmalen der Brücke zu erkennen. Auf diese Weise wird eine Stichproben- und Überlebensverzerrung in den Daten festgestellt, und es können "verzerrungsresistente" Degradationsmodelle entwickelt werden. Der Gamma-Prozess, ein stochastischer Prozess,

der sowohl räumlich als auch zeitlich kontinuierlich ist, wird zur Entwicklung von Degradationsmodellen verwendet, die die Schadenverläufe beschreiben.

Um die Daten auf höherer Systemebene zu analysieren, werden die Zusammenhänge zwischen der Zustandsnotenentwicklung von Bauwerken oder Bauteilen und ihren Merkmalen (Baujahr, Material, usw.) ermittelt. Dies erfolgt durch eine Kombination von einer manuellen und automatisierten Aufteilung der Bauwerke oder Bauteile in Gruppen, die sich in ihrer Zustandsentwicklung unterscheiden, und einer anschließenden Einflussanalyse. Die nicht-numerischen Merkmale (z.B. Querschnittstyp, statisches System) formen die Basis für eine manuelle Gruppierung, während die beobachtete Zustandsnotenentwicklung zusammen mit Clustering-Algorithmen einer weiteren Separation dienen. Um die Zusammenhänge zwischen numerischen Merkmalen (z.B. Baujahr, Spannweite) und der Zustandsentwicklung zu erkennen, werden Random-Forest Klassifikationsroutinen eingesetzt. Diese beinhalten eine Sortierung der Merkmale nach ihrer Wichtigkeit (ihrem Einfluss) für die Zustandsnotenentwicklung, die das Auslassen von weniger wichtigen Merkmalen erlaubt. Für die Prognose der Zustandsnoten auf Objekt- und Bauteilebene werden zeitinhomogene Markov-Ketten eingesetzt, die die Entwicklung in diskreten Zuständen stochastisch abbilden. Durch die Zeitinhomogenität wird berücksichtigt, wie lange sich das Bauwerk oder Bauteil im jeweiligen Zustand schon befindet, was einen Einfluss auf dessen weiteren Degradationsverlauf hat.

Das Ende der Nutzungsdauer, welches schlussendlich prognostiziert werden soll, definiert sich nicht einfach über das Erreichen der höchsten Zustandsnote – schließlich ist ein Schaden je nach Kontext mehr oder weniger relevant. Sondern es wird in Abhängigkeit der Zustandsnote zunächst eine Widerstandsreduktion angenommen. Auf Grundlage eines probabilistischen Vergleichs zwischen Beanspruchung aus den Einwirkungen aus ständigen Lasten und Verkehrslasten und dem Widerstand wird der Zuverlässigkeitsindex ermittelt. Aus der Prognose ergibt sich, wann der Zuverlässigkeitsindex voraussichtlich einen zulässigen Wert unterschreitet. Wenn dies der Fall ist, ist das Ende der Nutzungsdauer erreicht.

Es wird ein IT-Prototyp als Webapplikation entwickelt, in der die entwickelten Degradationsmodelle unter der Annahme von üblichen Schäden an repräsentativen Bauwerken ausgetestet werden können. Im IT-Prototypen werden die unterschiedlichen Datengrundlagen der D-A-CH-Länder berücksichtigt.

## 1.4 Aufbau des Berichts

Kapitel 2 legt die Grundlagen des Infrastrukturmanagements dar und thematisiert unter anderem die Zustandserfassung und Zustandsbeurteilung, welche die wesentliche Datengrundlage für die folgenden Analysen darstellt, sowie heutige Methoden der Zustandsprognose. Es werden die Grundzüge der Erhaltungsstrategien der BAST, der ASFiNAG und des ASTRA dargelegt.

Im Kapitel 3 wird die Methodik zur Entwicklung der Degradationsmodelle und Lebensdauerbewertung auf Schadens-, Bauwerks- und Objektebene auf Basis der Brückenmanagementsysteme der D-ACH-Länder erläutert. Ergänzend werden die theoretischen Grundlagen der Algorithmen des unüberwachten und überwachten Lernens, sowie der stochastischen Algorithmen zur Modellierung der Schadens- und Zustandsentwicklung erklärt. Neben der Vorstellung der physikalischen Modelle für die Schadensentwicklung wird der Ansatz beschrieben, diese mit den Zustandsdaten aus den Brückenmanagementsystemen zu integrieren. Die Methodik wird anhand von Beispielen verdeutlicht.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der in Kapitel 3 erläuterten Methoden vorgestellt. Die Ergebnisse werden in Form der durchschnittlichen Lebensdauer beschrieben und in mehreren Diagrammen visualisiert, die die Simulation der durchschnittlichen Lebensdauer und die daraus resultierenden kumulativen Wahrscheinlichkeitsfunktionen zeigen. Die Anwendung auf höherer Systemebene wird beispielhaft präsentiert, wobei die Prognoseergebnisse für selektierte Gruppen von Bauwerken und Bauteilen dargestellt werden, sowie deren Gruppierung erläutert wird. Für weitere Prognoseergebnisse wird auf den Anhang verwiesen.

In Kapitel 5 werden zusätzliche Analysen und Ergebnisse vorgestellt, die nicht in der IT-Toolbox enthalten sind, die aber für die Interpretation der in Kapitel 4 erzielten Ergebnisse relevant sind. Diese Analysen werden auf die Daten von SIB-BW und KUBA-DB auf Schadens- bzw. Bauteilebene angewendet. Die Ergebnisse ermöglichen es, die Zusammensetzung des identifizierten Clusters zu verstehen und auf diese Weise Degradationsmodelle zu entwickeln, die "verzerrungsresistent" sind.

Kapitel 6 beschreibt den IT-Prototypen, der die Anwendung ausgewählter Prognosemodelle auf Grundlage der in den Managementsystemen verfügbaren Daten zeigt. In Kapitel 7 werden die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen zusammengefasst und die Erkenntnisse aus den Ergebnissen hervorgehoben, aus denen Empfehlungen abgeleitet

werden. Der Anhang beinhaltet ergänzende Darstellungen der Prognosemodelle von Zustandsnoten auf Objekt- und Bauteilebene.

## 2 GRUNDLAGEN DES INFRASTRUKTURMANAGEMENTS

### 2.1 Allgemeines

Dieses Kapitel bietet eine umfassende Beschreibung über die gängige Praxis des Infrastrukturmanagements. Im Folgenden werden wesentliche Trends und relevante Beiträge in diesen Bereichen vorgestellt:

- Lebenszyklusmanagement (Kap. 2.3)
- Erhaltungsmanagement (Kap. 2.4)
- Zieldefinition (Kap. 2.5)
- Zustandserfassung: Verfahren der Datengewinnung und -verarbeitung (Kap. 2.6)
- Zustandsbewertung (Kap. 2.7)
- Zustandsprognose (Kap. 2.8)
- Maßnahmenplanung (Kap. 2.9)
- Wirkungsanalyse (Kap. 2.10)

Das Projekt beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Zustandsprognose, welche ein Teil des Erhaltungsmanagements ist und auf die Daten der vorhergehenden Schritte angewiesen ist – vor allem Zustandserfassung und Zustandsbewertung – und dessen Resultat in die darauffolgende Maßnahmenplanung einfließt.

### 2.2 Länderspezifische Unterschiede in den Begrifflichkeiten

Einzelne Begriffe werden von den jeweiligen Infrastrukturbetreibern der D-A-CH-Länder unterschiedlich verwendet. Dies betrifft vor allem den in Deutschland gebräuchlichen Begriff des Lebenszyklusmanagements, der dem betriebswirtschaftlichen Konzept des Produktlebenszyklus entlehnt ist, der allerdings umfassender als in seiner ursprünglichen Bedeutung verwendet wird, damit der Begriff überhaupt auf ein Infrastrukturbauwerk angewendet werden kann. Diese abweichende Definition ist nötig, weil in der Infrastruktur lediglich einzelne Bauteile und nur sehr selten ganze Bauwerke einen Lebenszyklus mit definiertem Anfang und Ende aufweisen. Das ganze System der Infrastruktur unterliegt aber einer ständigen Transformation, die kein definiertes Ende hat. Der Begriff des Lebenszyklusmanagements wird in der Regel auf Bauwerksebene verwendet.

In Österreich und in der Schweiz ist der Begriff des Lebenszyklusmanagements unter den Infrastrukturbetreibern nicht gebräuchlich. Auf Bauwerksebene ist der Begriff des Erhaltungsmanagements gebräuchlich, wobei dieser Begriff enger gefasst ist, weil er Planung,

Ausführung und Inbetriebnahme nur soweit umfasst, dass in diesen Phasen Daten generiert werden, auf die das Erhaltungsmanagement später zurückgreift. Wenn es um die Netzebene geht, wird in allen D-A-CH-Ländern vom Infrastrukturmanagement gesprochen.

Der Begriff, der den Kern dieses Forschungsthemas betrifft, nämlich die Zustandsprognose, wird in den D-A-CH-Ländern gleichermaßen verwendet.

## 2.3 Lebenszyklusmanagement

Unter dem Begriff Lebenszyklusmanagement wird in Deutschland der Transformationsprozess eines Infrastrukturbauwerkes innerhalb der Lebensphasen Planung, Ausführung, Instandhaltung bzw. -setzung, Rückbau und Recycling verstanden. (Auch wenn der Begriff des Lebenszyklusmanagements in Österreich und der Schweiz nicht geläufig ist, gelten die folgenden Ausführungen für die untergeordneten Begriffe in diesen Ländern analog.) In Anlehnung an (Pelzeter, 2017) sowie (Lebhardt, Seiler, Gerdes, Bombeck, & Lennerts, 2020) lässt sich der Begriff Lebenszyklusmanagement als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit mit dem Ziel einer lebenszyklusphasen-übergreifenden Nutzungs-, Ressourcen- und Informations-Optimierung“ definieren.

Basierend auf dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung inkludiert ein ganzheitliches Lebenszyklusmanagement über den gesamten Betrachtungszeitraum die folgenden Ziele (Herrmann, 2010):

- Minimierung von Risiken
- Minimierung von Kosten und Optimierung der Erlöse
- Minimierung von sozialen und Umwelteinwirkungen
- Maximierung der Gesamtanlageneffektivität und der Werterhaltung

Für den Infrastrukturbetreiber ist daher von Relevanz, die Gesamtkosten zu ermitteln, die ein bestimmtes Bauwerk über alle Lebensphasen generiert (Lüking, Schneider, Hafen, & Albrecht, 2014), um ein zu definierendes Maß der konkurrierenden Zielkriterien zu erfüllen. Damit einhergehend bedient man sich sogenannter Bauwerksmanagementsysteme, um mit Hilfe der vorhandenen Finanzmittel den netzweiten Erhalt dieser Bauwerke über den gesamten Lebenszyklus zu managen. Der Lebenszyklus von Infrastrukturbauwerken umfasst die Phasen der Planung, Ausführung, Inbetriebnahme, Instandhaltung bzw. -setzung bis hin zum Rückbau und Recycling der Baustoffe (Gehlen, Mayer, & Schießl, 2008) bzw. in der Definition nach EN



15643 (2021) die Planungsphase, Herstellungsphase, Errichtungsphase (Bau), Nutzungsphase (Betrieb) und die Entsorgungsphase.

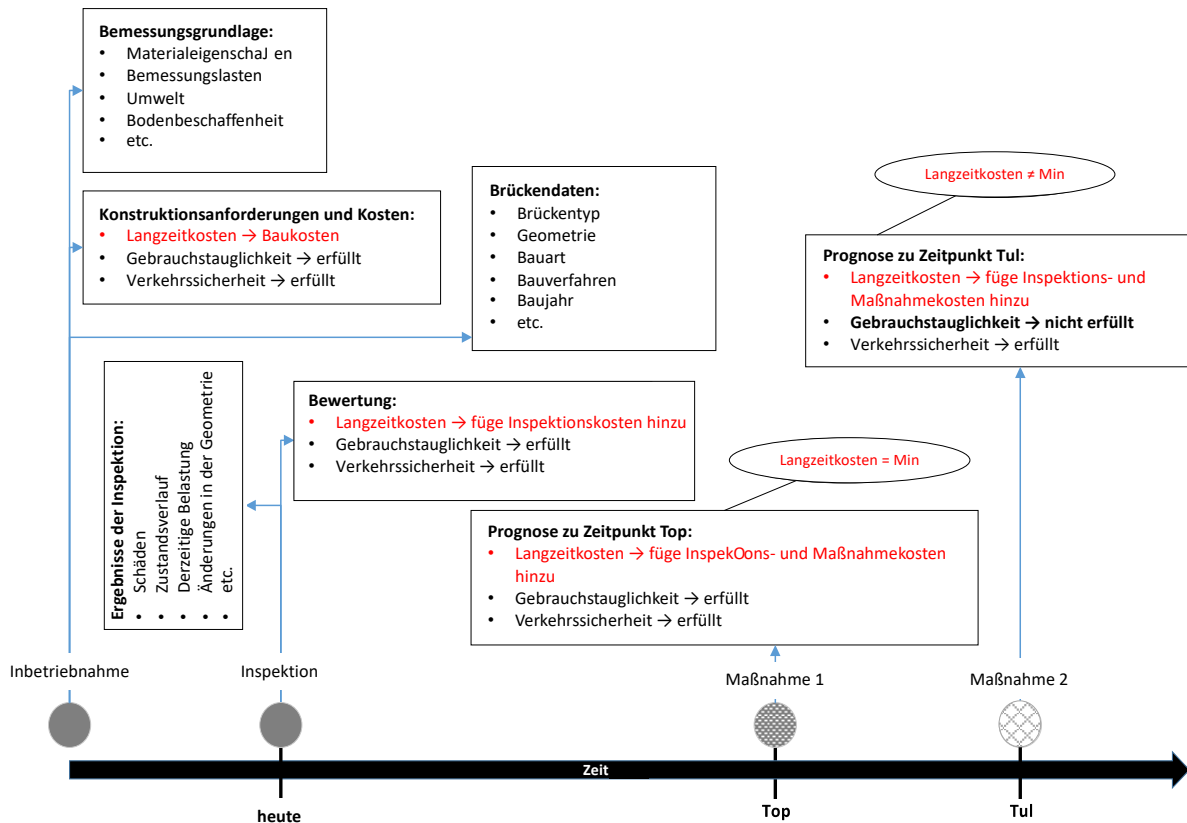


Abbildung 2-1 Grundsätzlicher Ansatz zur mittel- bis langfristigen Planung von Erhaltungsmaßnahmen innerhalb eines Lebenszyklusmanagements für Infrastrukturbauwerke  
In Abbildung 2-1 sind zusammenfassend die wesentlichen Prozesse innerhalb der Lebensdauer beschrieben und in Anlehnung an (Hajdin, 2016) aufgezeigt, zu welchen Zeitpunkten Daten bzw. Informationen zu den Bauwerken erhoben werden.

### 2.3.1 Planung, Entwurf, Ausführung und Inbetriebnahme

Die Planung eines Infrastrukturbauwerks verläuft grundsätzlich über mehrere Planungsstufen, in denen der Detaillierungsgrad der Ausarbeitung des Entwurfs kontinuierlich zunimmt. Während des Planungsablaufs werden von der anfangs zu findenden Linienführung über die Lage der Trasse im Höhenplan bis hin zur Konstruktion von Knotenpunkten, die einzelnen Elemente einer Trasse sowie eines Bauwerks immer detaillierter ausgearbeitet bis hin zum eigentlichen Ausführungsentwurf. Dabei bauen die einzelnen Planungsstufen aufeinander auf, sodass Änderungen in vorangegangenen Planungsschritten immer Auswirkungen auf die nachfolgende Planungsstufe haben und Planungselemente daran angepasst werden müssen.

Planung, Ausführung und Inbetriebnahme haben daher auch einen entscheidenden Einfluss auf die zukünftige Entwicklung eines Infrastrukturbauwerks. Im Rahmen von der Vorplanung bis zur Ausführungsplanung sollten bereits mögliche Beeinträchtigungen eines Bauwerks aufgrund von der geografischen Lage erkannt und bspw. durch eine Optimierung der Linienführung im Lageplan vermieden werden. Dies bedeutet, dass bereits in der Planungsphase durch Auswahl von Standort und Materialien eines Bauwerks die Lebensdauer eines Bauwerks entscheidend beeinflusst werden kann. Weiterhin kann durch die Auswahl eines geeigneten statischen Systems bzw. die Auswahl von robusteren Konstruktionen, d. h. teurere Anfangskonstruktionen, auf die langfristigen Kosten positiv eingewirkt werden.

Über die Planung und die Eigenschaften der verwendeten Baustoffe sowie derer Zusammensetzung für ein Infrastrukturbauwerk ist i. d. R. viel bekannt, da diese unter vielfältiger und bewusster Einwirkung des Menschen geschieht und im Rahmen von Qualitätsprüfungen dokumentiert werden. Aufgrund von Inhomogenitäten und Unregelmäßigkeiten in dem Prozess der Bauausführung ist das Ergebnis der Herstellung jedoch bereits nicht mehr durchweg im Detail bekannt. Mit der Qualität der verwendeten Materialien sowie der Herstellung variiert die Dauer der Nutzungsphase und die Anzahl der erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen. Eine schlechte oder mangelhafte Ausführung führt zu einer kürzeren Dauer der Nutzungsphase oder erfordert mehr Erhaltungsmaßnahmen, einer überdurchschnittlich guten Ausführung können eine längere Dauer der Nutzungsphase oder weniger Maßnahmen der Erhaltung folgen. Im Sinne eines Ansatzes zum Lebenszyklusmanagement ist das Potential durch Einbeziehung der Abläufe und Festlegung der Planungs- und Bauphase für die Betriebsphase und die Rückspiegelung der Erkenntnisse der Betriebsphase in die nächste Planungs- und Betriebsphase von großer Bedeutung. Hierbei lassen sich bereits frühzeitig Kosten über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks optimieren.

### **2.3.2 Bauwerksprüfung / Inspektion**

Nach Inbetriebnahme eines Infrastrukturbauwerks werden im Rahmen eines langfristigen Überwachungsprozesses als Teil des Erhaltungsmanagements regelmäßig Inspektionen durchgeführt, die Rückschlüsse auf den Zustand des Bauwerks ermöglichen. Die Beurteilung des aktuellen Zustandes erfolgt zumeist anhand von Informationen aus Bauwerksuntersuchungen. Die hierbei erhobenen Daten müssen in Hinblick auf die Erreichung von zuvor definierten Zielen, wie z. B. eine ausreichende Standsicherheit und Funktionalität der Bauwerke, mit Hilfe von geeigneten Kennzahlen bewertet werden. Der Begriff Bauwerksprüfung wird für Bauwerke oft als Synonym für die Inspektion verwendet. Zur Feststellung von

Leistungsindikatoren können auch Messungen, zerstörungsfreie und zerstörungsarme Untersuchungen vorgenommen werden.

Die Kenntnis zum derzeitigen als auch zum zukünftigen Bauwerkszustand ist für die Auswahl von Maßnahmen der Instandhaltung bzw. -setzung von entscheidender Bedeutung. Auf Basis dieser beiden Informationen sowie weiterer Randbedingungen werden schließlich Entscheidungen zu Art, Umfang und Zeitpunkt von Erhaltungsmaßnahmen getroffen.

### **2.3.3 Maßnahmen der Instandhaltung und -setzung**

Die Planung von Maßnahmen der Instandhaltung und -setzung sind dem strategischen Erhaltungsmanagement zugeordnet. Das Erhaltungsmanagement ist nur als ein Teil des Lebenszyklusmanagements zu sehen. Es ist zudem meist reaktiv, da alle Maßnahmen und Überlegungen erst in der Betriebsphase beginnen, viele Probleme aber aus der Planungs- und Bauphase stammen. Die kurzfristige Instandhaltungsplanung basiert auf eingehenden Untersuchungen und Bauwerksanalysen und beinhaltet eine detaillierte Spezifikation von Eingriffen, die zeitnah vorgenommen werden sollen. Die mittel- bis langfristige Instandhaltungsplanung (bzw. Erhaltungsplanung in der Schweiz) ist ein Prozess, bei dem verschiedene Eingriffsszenarien entwickelt werden. Hier besteht die Möglichkeit, zwischen präventiven, korrektiven und operativen Maßnahmen zu wählen. Diese Maßnahmen werden nicht im Detail spezifiziert, sondern nur grob geschätzt. Ziel ist es, den finanziellen Erhaltungsbedarf im Voraus abzuschätzen. Eine frühzeitige Planung ermöglicht es, den optimalen Zeitpunkt für Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen zu wählen und langfristige Kosten zu reduzieren.

### **2.3.4 Rückbau und Recycling der Baustoffe**

Zum Rückbau und anschließendem Recycling von Baustoffen kommt es z. B. wenn ein Bauwerk den zukünftigen Verkehrsbelastungen nicht mehr gewachsen ist und durch ein neues Bauwerk ersetzt werden muss.

## **2.4 Erhaltungsmanagement**

In Abgrenzung zum Lebenszyklusmanagement beinhaltet das Erhaltungsmanagement nicht den Entwurf und die Ausführung von Neubauprojekten, sondern nur die Erhaltung von bestehenden Infrastrukturbauwerken. Gerade im Bereich der Verkehrsinfrastrukturen liegt der Fokus hauptsächlich auf der bestehenden Infrastruktur. Der Neubau findet im Gegensatz zu früher auch durch eine veränderte politische Zielrichtung immer mehr nur punktuell statt.

Das Erhaltungsmanagement der Infrastruktur mit ihren Teilsystemen, wie z. B. Fahrbahnbefestigungen, Ingenieurbauwerken oder elektromechanischen Anlagen, umfasst gemäß des schweizerischen Normenwerks (vgl. SN 640 900) die systematische Planung und Lenkung der Erhaltung und stellt die Vorbereitung der Entscheidungsfindung für das Projektmanagement und damit zur Projektierung der Straßeninfrastruktur und deren Bauausführung dar.

Das Erhaltungsmanagement wird in einen strategischen und operativen Teil gegliedert. Dies steht im Einklang mit der Asset Management Definition gemäß ISO 55000. Adaptiert man dies für eine Darstellung eines Lebenszyklusmanagements, werden im Rahmen eines strategischen Infrastrukturmanagements jeweils für die Netzplanung, das Betriebs- und Verkehrsmanagement sowie das Erhaltungsmanagement und weiterführend für das Projektmanagement, Leistungsziele und eine übergeordnete Strategie definiert. Zusätzlich werden die Geschäftsprozesse festgelegt, angepasst und kommuniziert.

Das in Abbildung 2-2 dargestellte Erhaltungsmanagement verläuft zyklisch im Rahmen einer rollenden Planung und ist unterteilt in die Überwachung, die Erhaltungsplanung, die begleitende Stellungnahme zu den ausgelösten Projekten im Projektmanagement und die Wirkungsanalyse. Bei dieser Wirkungsanalyse erfolgt eine Analyse von angestrebten und erreichten Leistungszielen. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse und Schlussfolgerungen fließen wieder in die Anpassung von Strategie und Leistungszieldefinition ein. Zusätzlich werden auch die Prozessabläufe analysiert und Schlussfolgerungen für notwendige Anpassungen gezogen.

Bei der Erhaltungsplanung erfolgt eine Analyse und Bewertung auf der Grundlage der vorhandenen Daten aus der Überwachung. Es werden hierbei die relevanten Leistungsindikatoren zu einem Zeitpunkt  $t$  bestimmt. Für eine Entscheidungsfindung auf der Grundlage von Analysen über langfristige Betrachtungszeiträume ist es notwendig diese Leistungsindikatoren auch zu einem Zeitpunkt  $t + x$  zu ermitteln. Hierfür werden Prognosemodelle benötigt, welche eine Ermittlung des Erhaltungsbedarfs auf der Grundlage der relevanten Leistungsindikatoren ermöglichen. Zudem können die Konsequenzen von Erhaltungsmaßnahmen; wenn diese für die relevanten Leistungsindikatoren bekannt sind; zu unterschiedlichen Zeitpunkten an jedem Infrastrukturobjekt der Teilsysteme zur Ermittlung von Handlungsoptionen im Rahmen von Szenariensimulationen aufgezeigt werden.

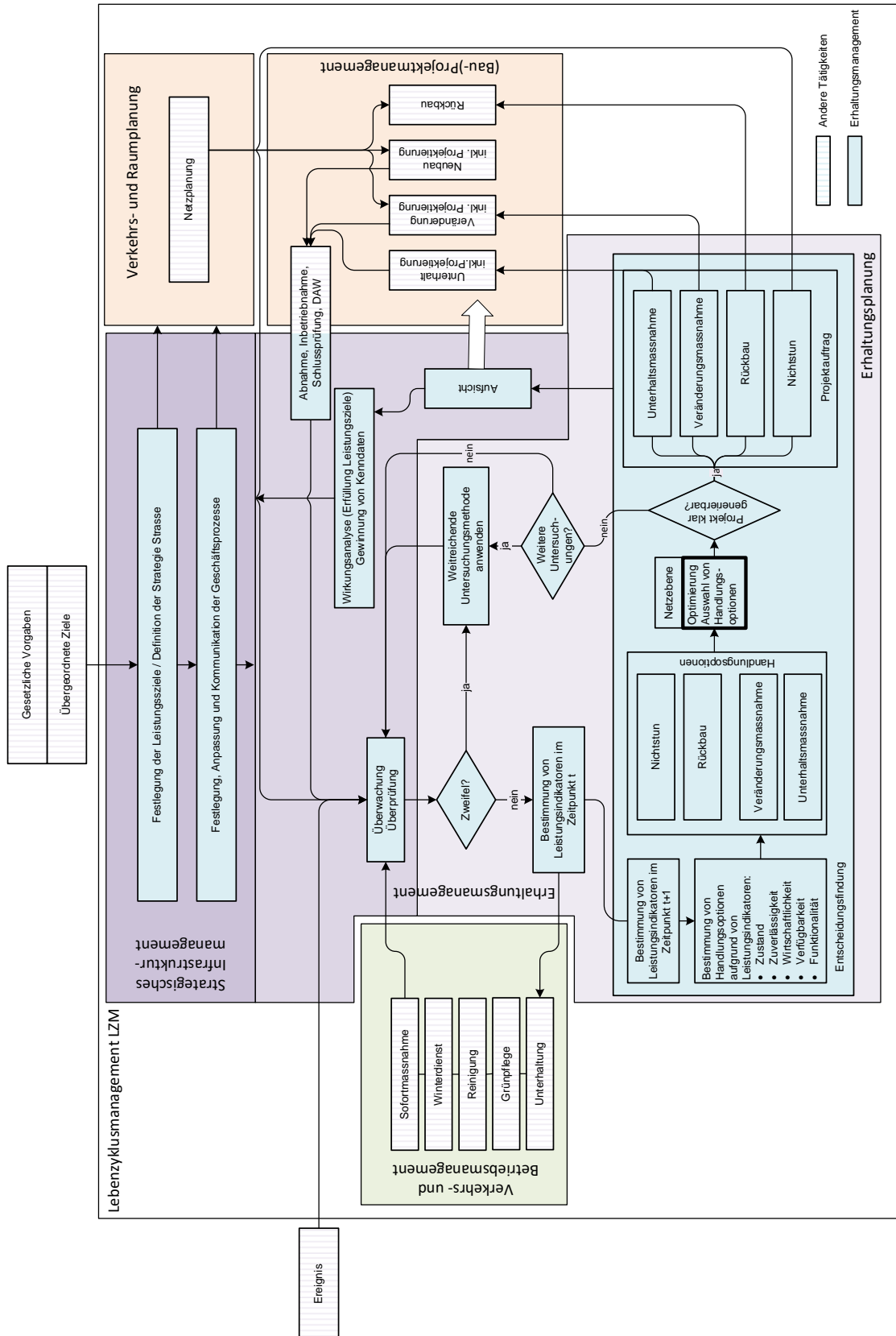


Abbildung 2-2 Prozesse eines systematischen Lebenszyklusmanagements

Im Anschluss erfolgt auf der Basis der ermittelten Handlungsoptionen aller relevanten Teilsysteme eine übergeordnete Optimierung bzw. Koordinierung auf Netzebene. Ist aus den vorhandenen Informationen am Ende dieses Teilschritts ein Projekt generierbar, erfolgt die Formulierung eines Projektauftrags für das Projektmanagement oder die Entscheidung nichts zu tun, d. h. keine Erhaltungsmaßnahme durchzuführen. Sind die vorhandenen Informationen am Ende dieses Teilschritts für die Projektgenerierung nicht ausreichend, müssen weitere Daten, z. B. durch weitreichende Untersuchungsmethoden, beschafft werden. Dieser generische Prozesskreislauf gilt für alle Teilsysteme der Straßeninfrastruktur, welche im Detail eigene fachspezifische Teilprozesse und Datenstrukturen besitzen.

## 2.5 Zieldefinition

Die Definition von Zielen ist die grundlegende Voraussetzung für ein Lebenszyklusmanagement. Nach (Keeney & Raiffa, 1976) sollte die Zieldefinition vollständig und zweckmäßig, sodass alle bedeutenden Aspekte der Problemstellung abgebildet werden. Dabei müssen die Bedeutung und Wertigkeit des Ziels erkennbar sein. Ziele sollten so formuliert werden, dass diese auch bei Bedarf zerlegt bzw. vereinfacht werden können. Sie sollten sich nicht überschneiden, sodass kein Einfluss doppelt berücksichtigt wird. (Heinen, 1966) unterscheidet bei einer Zieldefinition in Bezug auf das Zielausmaß der Zielvariable. Dabei kann ein Entscheidungsträger Alternativen suchen, für welche die Zielvariable optimale Werte annimmt (Extremierung) oder konkrete Werte, welche als befriedigend anzunehmen sind, einhält (Satisfizierung). (Bea & Haas, 2009) fügen zusätzlich die Fixierung in Bezug auf das Zielausmaß hinzu, bei der die Zielvariable auf einen konkreten Wert festgelegt wird. Weiter unterscheidet (Heinen, 1966) Ziele hinsichtlich ihrer zeitlichen Einordnung. So existieren kurz-, mittel- und langfristige Ziele. Zusätzlich können Ziele auf einen Zeitpunkt bzw. einen Zeitraum bezogen, statisch oder dynamisch sowie andauernd und vorübergehend relevant sein (Heinen, 1966); (Schulenburg & Hülsmann, 2008). Abbildung 2-3 zeigt die beschriebenen Aspekte einer vollständigen Zielformulierung.

Die nachhaltige Sicherstellung der gesamtwirtschaftlich nutzenstiftenden Wirkung der Verkehrsinfrastruktur ist das ureigene Ziel der öffentlichen Betreiber. Dies ist nur möglich, wenn alle Komponenten, d. h. auch Bauwerke, durch gezielte und rechtzeitig eingeleitete Erhaltungsmaßnahmen funktionsfähig gehalten werden. Die hierfür benötigten öffentlichen Mittel stehen im Wettbewerb mit anderen Bedürfnissen (Gesundheit, öffentlicher Verkehr, Ausbildung, usw.), weswegen ihre Einsatzeffizienz nachgewiesen werden muss. Die optimale Einsatzeffizienz wird dann erreicht, wenn die Bauwerksfunktionalität, welche den

gesellschaftlichen Erwartungen entspricht, zu minimalen Betreiberkosten nachhaltig gewährleistet wird.

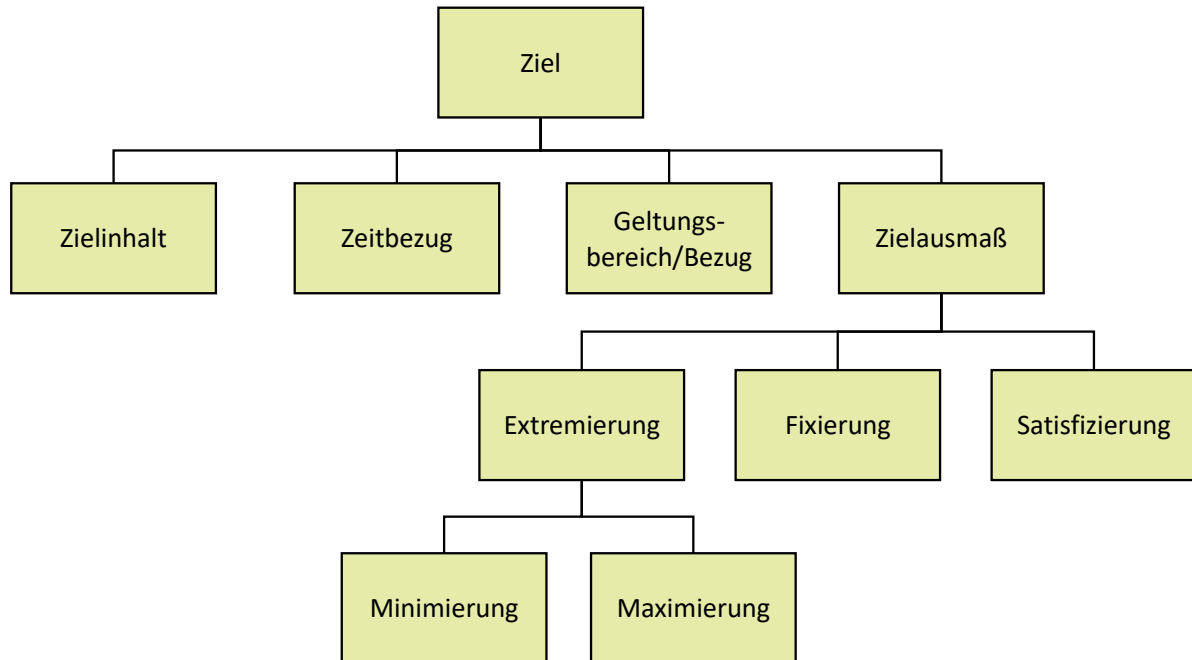


Abbildung 2-3 Vollständige Zielformulierung

Normen, Richtlinien, Handbücher und Best Practices definieren implizit oder explizit Leistungsziele (Performance Goals), welche ein Gleichgewicht zwischen den Erwartungen und den verfügbaren finanziellen Mitteln sicherstellen sollen. Sie sind als benutzer- bzw. gesellschaftsorientiert definiert. In der Literatur werden diese Leistungsziele oft als übergeordnete oder strategische Leistungsziele definiert. Demgegenüber stehen die Leistungsziele auf der Ebene der einzelnen Bauwerke oder Bauwerksteile. Die größte Herausforderung im Erhaltungsmanagement von Infrastrukturanlagen besteht darin, die strategischen Leistungsziele mit jenen auf der Bauwerksebene rational zu verknüpfen. Dies gestaltet sich in der Regel sehr schwierig, so dass oft auf qualitative Leistungsziele bzw. auf zugehörige ebenfalls qualitative Leistungsindikatoren zurückgegriffen werden muss (Hajdin, 2016).

## 2.6 Zustandserfassung

Zustandsdaten bilden die Grundlage innerhalb des Lebenszyklusmanagements (D) bzw. Erhaltungsmanagements (A und CH). Diese Daten entstammen aus unterschiedlichen Datenquellen und Erhebungsformen. Ziel ist es, die erhobenen Daten systematisch zu speichern und miteinander räumlich und zeitlich zu verknüpfen. Diese werden im Anschluss



als wichtige Informationen genutzt, um den Erhaltungsbedarf abzuschätzen bzw. Erhaltungsprogramme zu entwickeln.

Der Trend der Wissenschaft und Technik zur Erhaltungsplanung von Transportinfrastrukturen geht bei professionellen Betreibern in Richtung einer zuverlässigkeits- bzw. risikobasierten Erhaltungsplanung. Eine wichtige Grundlage dazu ist die zuverlässigkeitsbasierte Prüfung der Bauwerke (Hajdin & Fastrich, 2019). Die Methoden zur Prüfung der Bauwerke können grob in drei Methoden eingeteilt werden:

- Qualitative Methoden: z. B. (TRB, 2014; ITRC WS2, 2012), (PIEVC, 2011), (Transit New Zealand, 2004), (British Waterways Direction, 2008) und (Holland, 2014)
- Hybride Methoden: z. B. (CAN/CSA-Q850-97 Risk Management, 2002), (Florida DOT, 2013) und (US Army Corps of Engineers, 2014)
- Quantitative Methoden: z. B. (JCSS Joint Committee on Structural Safety, 2008), (LoBEG, 2011), (Wesley, 2012), (US Army Corps of Engineers, 2014), (State Emergency Management Committee, 2014), (Transit New Zealand, 2004), (ASTRA, 2014), (ASTRA, 2016)

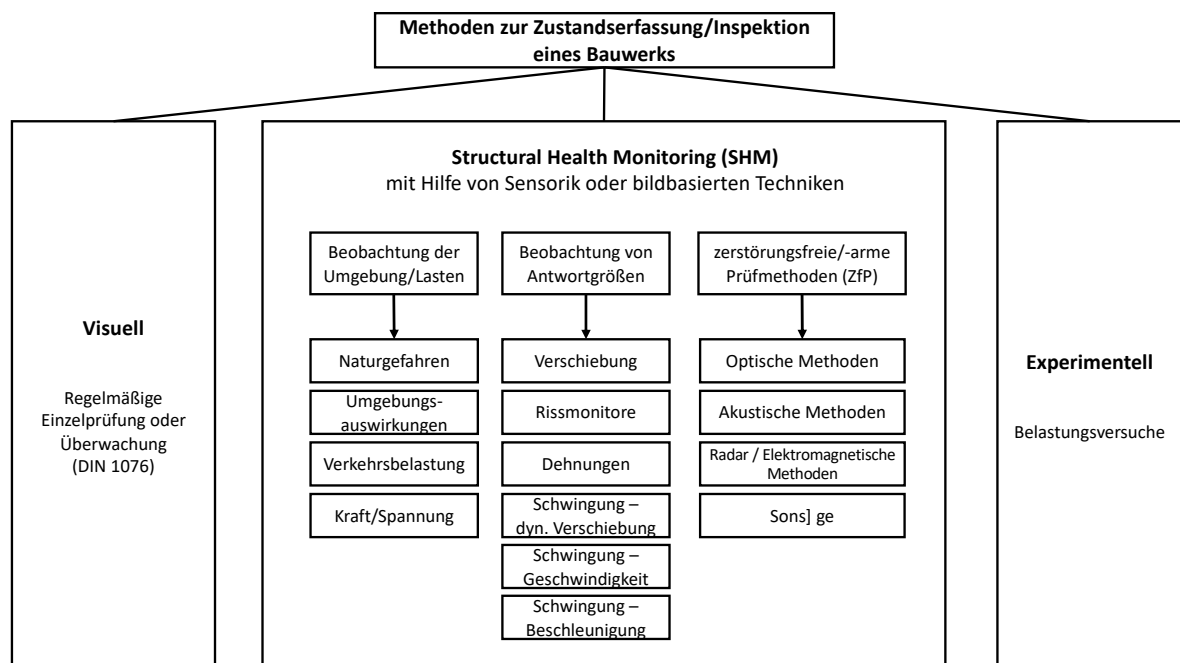


Abbildung 2-4 Überblick zu Verfahren zur Zustandserfassung eines Bauwerks

Die Abbildung 2-4 gibt eine Übersicht zu den Verfahren zur Zustandserfassung eines Bauwerks.

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technik ausführlich vorgestellt und konventionelle und innovative Verfahren zur Prüfung von Bauwerken zusammenfassend aufgezählt.

### 2.6.1 Konventionelle Verfahren – Stand der Technik

Gegenwärtig basiert das Erhaltungsmanagement größtenteils auf den Daten aus visuellen Bauwerksprüfungen, welche in einer Datenbank gehalten werden. Die normative Grundlage bildet hierbei in Deutschland die DIN 1076, in der zwischen Bauwerksprüfung und Bauwerksüberwachung unterschieden wird. Darin werden die Bedingungen für die Durchführung der Bauwerksprüfung und Bauwerksüberwachung erläutert. Zusätzlich werden die, für die Prüfung und Überwachung benötigten Unterlagen (Bauwerksverzeichnis, -buch und -akte) dargelegt.

Die RI-ERH-ING (BMVI, 2017), die Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten, enthalten die wesentlichen Richtlinien zu den Bauwerksprüfungen (RI-EBW-PRÜF (BMVI, 2017)), der Planung der Bauwerkserhaltung (RPE-ING (BMVI, 2020)), zur objektbezogenen Schadensanalyse (OSA), zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (RI-WI-BRÜ) sowie zur Erhaltung des Korrosionsschutzes von Stahlbauten (RI-ERH-KOR). Für die Prüfung von Ingenieurbauwerken ist insbesondere die RI-EBW-PRÜF, die Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 von Interesse. In dieser Richtlinie ist beschrieben, wie die am Bauwerk festgestellten Schäden standardisiert erfasst und bewertet werden sollen. Zusätzlich zur Richtlinie werden Beispiele von Schäden mit den entsprechenden Bewertungen in einer pdf-Datei (BMVI, 2017) gesammelt, um die Schadenserfassung weiter zu vereinheitlichen. Die, aus der Schadenaufnahme gewonnen Daten werden im Programmsystem SIB-Bauwerke erfasst, welches von Bund und Ländern entwickelt wurde. Für eine Bauwerksprüfung müssen die Bauwerksdaten gemäß der Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten (ASB-ING (BMVI, 2018)) in SIB-Bauwerke bereits erfasst sein.

Gemäß RI-EBW-PRÜF kann die visuelle Bauwerksprüfung durch eine messtechnische Kontrolle und in gewissen Fällen mit weitreichenden und kostenintensiven Untersuchungen ergänzt werden. Hierzu zählen Monitoring- und Identifikationsverfahren. Zusätzlich können meist aufwändige Belastungsversuche im Rahmen von experimentellen Untersuchungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Prüfung werden in ein Programmsystem, z. B. SIB-Bauwerke, eingegeben und mit einem festgelegten Algorithmus bewertet.

In Österreich wird der Erhaltungszustand durch drei Arten der Inspektion ermittelt: Überwachung, Kontrolle und Prüfung. Die Intervalle dieser Inspektionen sind für Ingenieurbauwerke in der RVS-Reihe 13.03 festgelegt.

Das ASTRA in der Schweiz überwacht und bewertet seine Kunstbauten nach der eigenen Richtlinie (ASTRA, 2005).

### 2.6.1.1 Visuelle Zustandserfassung

Visuell durchgeführte Inspektionen, sogenannte handnahe Prüfungen gemäß DIN 1076, vgl. z. B. (Borrmann, Fischer, Dori, & Wild, 2014) sind – sofern sie von einem qualifizierten Bauwerksprüfer durchgeführt werden – kostengünstig und eine sehr wertvolle Informationsquelle. Während der Inspektion werden die Beobachtungen aufgezeichnet und ausgewertet. Das Ergebnis der Inspektion ist zunächst ein qualitativer Indikator. Diese Prüfungen werden in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Je nach Zustand werden die Inspektionszyklen angepasst, d. h. eventuell verkürzt.

(Phares, Washer, Rolander, Graybeal, & Moore, 2004) untersuchten die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der visuellen Zustandserfassung von Routineprüfungen von Autobahnbrücken in den USA, da diese überwiegend auf einer visuellen Inspektion beruhen und somit subjektive Einschätzungen der Brückeninspektoren sind. In dieser Studie wurden die Ergebnisse von 49 Prüfberichten über den Zustand des Überbaus, des Unterbaus und des Decks von sieben Brückenbauwerken verglichen. In dem verwendeten Bewertungssystem steht 0 für Versagen und 9 für einen ausgezeichneten Zustand. Der Vergleich der Ergebnisse für zwei Brücken, eine, bei der alle Komponenten (Überbau, Unterbau und Fahrbahn) bekanntermaßen in schlechtem Zustand waren, mit einer Referenzzustandsbewertung von 4 (Abbildung 2-5) mit einer Brücke, bei der alle Komponenten in gutem Zustand waren, Referenzbewertung 7, Abbildung 2-6, ergab:

- für das Brückenbauwerk mit bekannt schlechtem Zustand lag die Durchschnittsbewertung aller 49 Inspektoren zwischen 4,3 und 4,9 für die drei Bauteilgruppen. Die Standardabweichung bei den Zustandsbewertungen lag zwischen 0,76 und 0,94 für die drei Bauteilgruppen. Dies spiegelt sich in der Bandbreite der Bewertungen wider, bspw. variierte die Zustandsbewertung für das Brückendeck (vgl. Abbildung 2-5) von einem Minimum von 2 (kritisch) bis zu einem Maximum von 7.
- für das Brückenbauwerk in bekannt gutem Zustand (vgl. Abbildung 2-6) lag die durchschnittliche Bewertung für die Bauteilgruppen im Bereich von 6,7 bis 7,2. Die

Standardabweichung für die Bauteilgruppen war mit 0,53 bis 0,66 deutlich geringer und der maximale Bereich für die Bewertung des Überbaus lag zwischen 5 und 8.

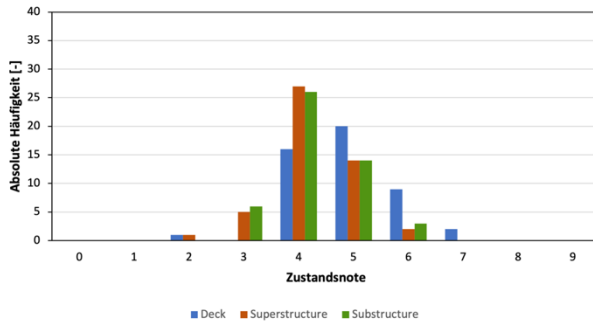


Abbildung 2-5 Ergebnisse der Zustandsbewertung einer Brücke in schlechtem Zustand

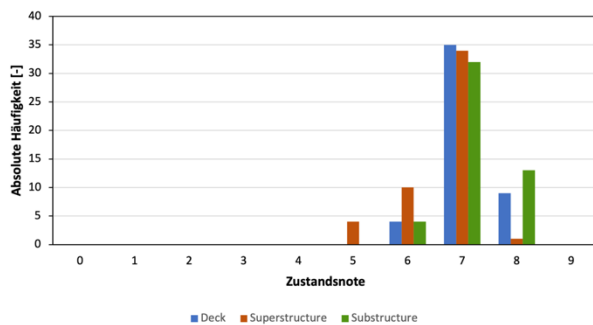


Abbildung 2-6 Ergebnisse der Zustandsbewertung einer Brücke in gutem Zustand

Dies zeigt, dass die Unsicherheit bzw. Subjektivität der Zustandsbewertung, die anhand visueller Beurteilungen ermittelt wird, zunimmt, wenn sich der Zustand der Brücke verschlechtert. Die Autoren untersuchten weiterhin die Notizen der 49 Inspektoren vor Ort und stellten eine erhebliche Variabilität in dem verwendeten Detaillierungsgrad fest sowie Fälle, in denen Mängelbeschreibungen ausgelassen wurden. Bei der Untersuchung der fotografischen Aufzeichnungen der Inspektoren stellen sie fest, dass die Hälfte der Inspektoren nur vier Fotos machte, die Fotos im Allgemeinen allgemeine Details zeigten, die von leicht zugänglichen Positionen aus aufgenommen wurden und viele Mängel nicht fotografiert wurden.

Diese Untersuchung verdeutlicht, dass die Aussagegenauigkeit der visuellen Zustandserfassung begrenzt ist. Dies zeigt zum einen die Notwendigkeit der Vorgabe von eindeutigen Bewertungskriterien zur Zustandserfassung im Rahmen eines umfangreichen technischen Regelwerks, wie es derzeit in Deutschland bereits umgesetzt ist. Zum anderen gilt es, die meist kostengünstigen visuellen Zustandserfassungen mit dem Einsatz von neuen Technologien (z. B. Drohnenerfassung) zu erweitern, um insbesondere schwer zugängliche

Bauwerksbereiche intensiver zu inspizieren sowie Veränderungen aus dem Inneren der Konstruktion frühzeitig erkennen zu können.

### 2.6.1.2 Messtechnische Zustandserfassung

Neben der visuellen Zustandserfassung gibt es eine Vielzahl an zusätzlichen messtechnischen Erfassungsmethoden. Dazu zählen u. a. zerstörungsfreie Prüfmethode, wie z. B. Verfahren zur Bewehrungsortung, Messung der Betonüberdeckung, Schweißnahtprüfung mittels Ultraschallverfahren sowie weitere Baustoff- und Materialprüfungen. Zum Teil kommen im Rahmen der messtechnischen Zustandserfassung spezielle Fahrzeuge (z. B. Tunnelinspektionsfahrzeug) oder andere Gerätschaften (Brückenuntersichtgerät, Ultraschallmessgerät zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) von Stahlkonstruktionen) zum Einsatz.

In einer Studie von (Kušar, Galvão, & Sein, 2019) wurden zerstörungsfreie Methoden zur Zustandserfassung anhand von sechs Kriterien, u.a. Testdauer, Kosten, Status in Hinblick auf eine Normung des Testverfahrens, Zuverlässigkeit der Ergebnisse, Anwendungsvielfalt (z. B., ob der Test mehr als eine Art von Schäden messen kann) und Komplexität bei der Interpretation der Versuchsergebnisse, bewertet. Diese Kriterien wurden von einer Experten-Gruppe der COST-Aktion TU1406 bewertet und ein analytischer Hierarchieprozess verwendet, um die Ergebnisse zu quantifizieren und die Wirksamkeit der Verfahren zu bestimmen. Die Methoden wurden schließlich in die drei Kategorien zur Bestimmung von Materialeigenschaften, Schadenserkennung von Korrosion eingeteilt (vgl. Tabelle 2-1).

Zu den wesentlichen Vorteilen von zerstörungsfreien Prüfmethode zählt die Möglichkeit Ergebnisse aus Modellrechnungen anhand von tatsächlichen Messergebnissen zu festen Zeitpunkten (z. B. zu Beginn des Überwachungszeitraums) zu validieren.

Oftmals erfolgt keine strikte Trennung zwischen zerstörungsfreien Prüfmethode und den bei Routineuntersuchungen zur Schadenserkennung eingesetzten Verfahren. Dies liegt zum Teil daran, dass einige dieser Techniken, z. B. GPR, Schalldruck-Verfahren (Acoustic emission), tatsächlich sowohl für eine Momentaufnahme der Schadensbeurteilung als auch für die Überwachung des Degradationsprozesses verwendet werden können. Für eine detaillierte Darstellung der einzelnen messtechnischen Verfahren der Zustandserfassung wird auf weiterführende Literatur verwiesen (z. B. (Stöckner, et al., 2022)).

Während die visuelle Bauwerksinspektion sowie die vorgestellten messtechnischen Methoden eine zeitlich punktuelle Beschreibung des Zustands liefern, ermöglichen Monitoring-Methoden eine kontinuierliche Beobachtung von Schädigungsprozessen. Je nach betrachtetem

Schadensmerkmal besteht hierbei ein bisher wenig ausgeschöpftes Potenzial von Monitoringdaten.

Anwendungsfall	Wirksamkeit der Prüfmethode	Zerstörungsfreie Prüfmethode	
		engl.	deutsch
Ermittlung von Materialeigenschaften	2,71	Cover measurement	Messung der Überdeckung
	2,55	Phenolphthalein Test	Phenolphthaleintest
	2,43	Probe penetration test	Penetrationstest
	2,42	Pull-off- test	Abzieh-Test
	2,22	Rebound hammer	Rückprallhammer
Schadenserkennung	2,22	Impact echo	Aufprallechos
	1,86	Thermography	Thermografie
	1,80	Ground penetrating radar	GPR
	1,63	Ultrasonic pulse echo	Ultraschallimpulsecho
Korrosion	1,89	Half-cell potential	Halbzellenpotential
	1,82	Galvanostatic pulse	Galvanostatischer Impuls
	1,82	Electrical resistivity	Elektrischer Widerstand
	1,65	Linear polarization resistance	Lineare Polarisationswiderstand

Tabelle 2-1 Beurteilung der Wirksamkeit von zerstörungsfreien Prüfmethoden (Kušar, Galvão, & Sein, 2019)

### 2.6.1.3 Experimentelle Zustandserfassung

Das Zustandsverhalten von Bauteilen wird oftmals im Rahmen von experimentellen Untersuchungen im Labor unter kontrollierten Randbedingungen analysiert. Hierbei wird im Rahmen von experimentellen Untersuchungen der Einfluss einzelner Faktoren auf das mechanische und chemische Verhalten der Bauteile untersucht. Zu den wichtigsten Schädigungsprozessen zählen u. a. Karbonatisierung, Chlorideintrag, Bewehrungskorrosion, Spannungsrisskorrosion, Frost-Tausalz-Angriff, Alkali-Kieselsäure-Reaktion und Ermüdung

(Borrmann, Fischer, Dori, & Wild, 2014), (Schnellenbach-Held, Peeters, & Miedzinski, 2015). Des Weiteren lassen sich anhand von experimentellen Untersuchungen neue Konstruktionsmethoden im Labor überprüfen (Stuppak & Maurer, 2018).

## 2.6.2 Innovative Verfahren – Stand der Forschung

Das vorherige Unterkapitel beinhaltete eine Übersicht zu den am häufigsten eingesetzten Methoden zur Schadenserkennung. Im Folgenden wird ein Überblick zu weiteren innovativen Verfahren gegeben, die derzeit im Rahmen aktueller Forschungsarbeiten entwickelt bzw. erprobt werden.

Von den innovativen Verfahren hat am ehesten die Kombination aus Laser Scanning und UAV-Fotogrammetrie das Potential zu einem flächendeckenden Einsatz in der Zustandserfassung, vor allem in Kombination mit einer automatisierten Klassifizierung möglicher Schäden unter Zuhilfenahme von künstlicher Intelligenz. Diese Technologie kann anhand ihrer Stärken und Schwächen die bisherige Praxis der visuellen Zustandserfassung sinnvoll ergänzen.

Verfahren wie Space-borne Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) bieten sich in Spezialfällen an, wie beispielsweise für das Monitoring von großräumigen Prozessen wie Erdbeben und tektonischen Aktivitäten (Colesanti & Wasowski, 2006). Eine rückwirkende Anwendung auf das Polcevera-Viadukt in Italien durch (Milillo, et al., 2019) zeigt, dass die Methode zur Erkennung von Veränderungen im Verschiebungsverhalten von Brücken eingesetzt werden kann.

Unmanned Marine Vehicles (UMVs) können bei Verdacht auf Unterkolkung der Foundation eingesetzt werden. Eine Anwendung zeigen (Clubley, Manes, & Richards, 2015), indem sie Sonar- und Meereslasertechnologie für die Untersuchung der Foundation eines Eisenbahnviadukts kombinierten.

Das Monitoring von (Teil-)Bauwerken ist eine geeignete Methode, die in Ergänzung zur traditionellen Bauwerksprüfung angewendet werden kann. Es umfasst die temporäre oder dauerhafte Überwachung und Bewertung eines Bauwerks hinsichtlich seiner strukturellen Zustände und deren Veränderung aufgrund von bestimmten Fragestellungen. Mit Hilfe eines Monitorings ist es möglich, den aktuellen Bauwerkszustand und dessen Entwicklung und Langzeitverhalten eines Bauwerks, verschiedene Parameter, wie z. B. Kräfte, Verformungen, Dehnungen, Temperatur, Feuchte, Risse und Schwingungen, sowie die vorhandene Restnutzungsdauer abzuschätzen. Aufgrund der i. d. R. kontinuierlichen und in beliebigen



Zeitabständen aufgenommenen Daten eignet sich dieses Verfahren insbesondere für Bauwerke, deren Abschätzung der Zuverlässigkeit nur mit großen Unsicherheiten zu bestimmen ist.

### **2.6.3 Datenverarbeitung und Building Information Modeling (BIM)**

Das Zusammenführen von unterschiedlichen Datenquellen (z. B. visuelle Prüfung, Monitoring, ZfP, Drohnen) auf einem gemeinsamen Modell ist von großer Bedeutung und kann mit dem Einsatz von BIM (Building Information Modeling) erfolgen. Es ist bereits heute absehbar, dass BIM nicht nur ein Hilfsmittel in der Projektierung ist, sondern auch über die gesamte Lebensdauer einen Mehrwert bietet (Isailović, Petronijević, & Hajdin, 2019). Ein BIM-Modell bildet ein Bauwerk dreidimensional ab. Im Gegensatz zu einem gewöhnlichen Plan, der nur eine grafische Darstellung ist, besitzt bei BIM jedes Bauteil eine Vielzahl von Attributen, wie z. B. Baustoff und Kosten. Im speziellen Fall von Brücken wird zudem das statische Modell mit sämtlichen untersuchten Gefährdungsbildern und nachgewiesenen Laststellungen hinterlegt. Mit jeder Inspektion wird das BIM-Modell anhand der Befunde nachgeführt. Da die Schäden so präzise lokalisiert sind und da eine Verknüpfung mit dem statischen Modell vorliegt, kann der Einfluss auf Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit abgeschätzt werden. Im Weiteren können die Sensoren, deren Messdaten sowie die Ergebnisse der übrigen Überwachungsmethoden genau platziert werden (digitaler Zwilling). Damit sind Prognosen möglich, wann die Brücke voraussichtlich die geforderte Zuverlässigkeit unterschreitet. Dies erlaubt eine Abschätzung der interventionsfreien Zeit und erleichtert die Bildung von Unterhaltsabschnitten.

## **2.7 Zustandsbewertung**

Die im Rahmen der Zustandserfassung dokumentierten Schäden am Bauwerk sind anschließend zu bewerten. Diese Bewertung kann je nach Detaillierungsgrad auf unterschiedlichen Gliederungsebenen der definierten Bauwerksstruktur bis hin zum Einzelschaden als Gliederungsebene stattfinden. Dabei kann die Bewertung direkt erfasst oder berechnet werden. Für die Zustandsbewertung kommen je nach Infrastrukturbetreiber bei den drei Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasser unterschiedliche Bewertungssysteme zum Einsatz. Diese werden in diesem Kapitel jeweils detailliert erläutert.

Für einen ersten Überblick ist nachfolgend die Zustandsbewertung von Bauwerken der beteiligten Infrastrukturbetreiber auf den relevanten Gliederungsebenen dargestellt. Die in der Abbildung 2-7 dunkelgrüne Färbung des Feldes bedeutet, dass auf dieser Gliederungsebene

eine Zustandsnote direkt erfasst wird. Bei den hellgrün hinterlegten Felder wird die Note aus Noten berechnet, welche in der untergeordneten Gliederungsebene verteilt wurden.

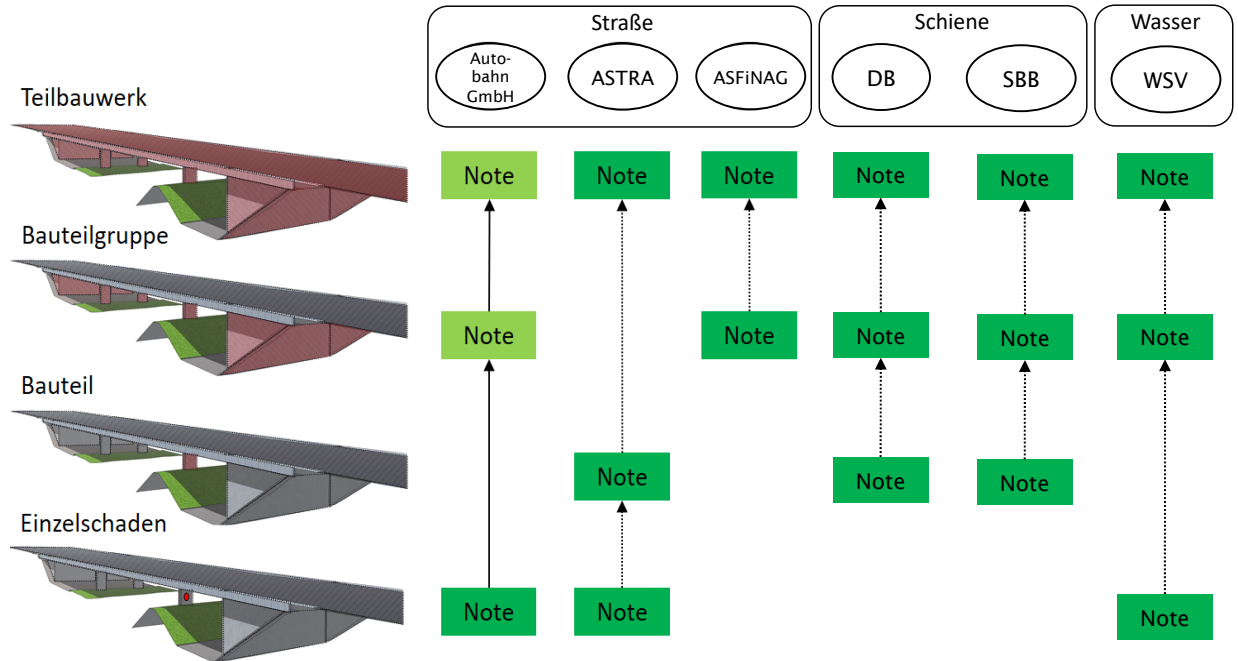


Abbildung 2-7 Zustandsbewertung von Brücken auf verschiedenen Gliederungsebenen

### 2.7.1 Autobahn GmbH / Straßenbauverwaltungen der Länder

Die Ergebnisse der (visuellen) Zustandserfassung werden im Rahmen eines Bewertungsverfahrens in Zustandsnoten transformiert. Die dokumentierten Schäden und Mängel werden einer Bauteilgruppe zugeordnet und nach den Kriterien Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit getrennt bewertet. Hierbei erfolgt die Bewertung der Kriterien nach der RI-EBW-PRÜF (BMVI, 2017) bei der eine Notenskala zwischen 1,0 und 4,0 verwendet wird. Im Anschluss daran wird schließlich eine Gesamtnote für das Bauwerk in mehreren Schritten berechnet. Die Zustandsnoten für Ingenieurbauwerke und für Bauwerksgruppen werden sechs Zustandsnotenbereichen zugeordnet, welche Tabelle 2-2 ersichtlich sind.

Notenbereich	Zustand	Beschreibung
1,0 – 1,4	sehr gut	Die <b>Standsicherheit, Verkehrssicherheit</b> und <b>Dauerhaftigkeit</b> des Bauwerks sind <b>gegeben</b> . <b>Laufende Unterhaltung</b> erforderlich.
1,5 – 1,9	gut	<b>Verkehrssicherheit</b> des Bauwerks sind <b>gegeben</b> . Die <b>Dauerhaftigkeit</b> mindestens einer <b>Bauteilgruppe</b> kann <b>beeinträchtigt</b> sein. Die <b>Dauerhaftigkeit</b> des <b>Bauwerks</b> kann <b>langfristig geringfügig beeinträchtigt</b> werden. <b>Laufende Unterhaltung</b> erforderlich.
2,0 – 2,4	befriedigend	Die <b>Standsicherheit</b> und <b>Verkehrssicherheit</b> des Bauwerks sind <b>gegeben</b> . Die <b>Standsicherheit</b> und/oder <b>Dauerhaftigkeit</b> mindestens einer <b>Bauteilgruppe</b> können <b>beeinträchtigt</b> sein. Die <b>Dauerhaftigkeit</b> des <b>Bauwerks</b> kann <b>langfristig beeinträchtigt</b> werden. Eine <b>Schadensausbreitung</b> oder <b>Folgeschädigung</b> des <b>Bauwerks</b> , die <b>langfristig</b> zu erheblichen Standsicherheits- und/oder Verkehrssicherheitsbeeinträchtigungen oder erhöhtem Verschleiß führt, ist <b>möglich</b> . <b>Laufende Unterhaltung</b> erforderlich. <b>Mittelfristig Instandsetzung</b> erforderlich. Maßnahmen zur <b>Schadensbeseitigung</b> oder <b>Warnhinweise</b> zur Aufrechterhaltung der <b>Verkehrssicherheit</b> können <b>kurzfristig</b> erforderlich werden.
2,5 – 2,9	ausreichend	Die <b>Verkehrssicherheit</b> des <b>Bauwerks</b> kann <b>beeinträchtigt</b> sein. Die <b>Standsicherheit</b> und/oder <b>Dauerhaftigkeit</b> mindestens einer <b>Bauteilgruppe</b> können <b>beeinträchtigt</b> sein. Die <b>Dauerhaftigkeit</b> des <b>Bauwerks</b> kann <b>beeinträchtigt</b> sein. Eine <b>Schadensausbreitung</b> oder <b>Folgeschädigung</b> des <b>Bauwerks</b> , die <b>mittelfristig</b> zu erheblichen Standsicherheits- und/oder Verkehrssicherheitsbeeinträchtigungen oder erhöhtem Verschleiß führt, ist dann <b>zu erwarten</b> . <b>Laufende Unterhaltung</b> erforderlich. <b>Kurzfristig bis mittelfristig Instandsetzung</b> erforderlich. Maßnahmen zur <b>Schadensbeseitigung</b> oder <b>Warnhinweise</b> zur Aufrechterhaltung der <b>Verkehrssicherheit</b> können <b>kurzfristig</b> erforderlich sein.

3,0 – 3,4	nicht ausreichend	<p>Die <b>Standsicherheit</b> und/oder <b>Verkehrssicherheit</b> des <b>Bauwerks</b> sind <b>beeinträchtigt</b>. Die <b>Dauerhaftigkeit</b> des <b>Bauwerks</b> kann <b>nicht mehr gegeben</b> sein. Eine <b>Schadensausbreitung</b> oder <b>Folgeschädigung</b> kann <b>kurzfristig</b> dazu führen, dass die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben sind. <b>Laufende Unterhaltung</b> erforderlich. <b>Umgehende Instandsetzung</b> erforderlich. Maßnahmen zur <b>Schadensbeseitigung</b> oder <b>Warnhinweise</b> zur Aufrechterhaltung der <b>Verkehrssicherheit</b> oder <b>Nutzungseinschränkungen</b> sind <b>umgehend</b> erforderlich.</p>
3,5 – 4,0	ungenügend	<p>Die <b>Standsicherheit</b> und/oder <b>Verkehrssicherheit</b> des <b>Bauwerks</b> sind <b>erheblich beeinträchtigt</b> oder <b>nicht mehr gegeben</b>. Die <b>Dauerhaftigkeit</b> des <b>Bauwerks</b> kann <b>nicht mehr gegeben</b> sein. Eine <b>Schadensausbreitung</b> oder <b>Folgeschädigung</b> kann <b>kurzfristig</b> dazu führen, dass die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben sind oder dass sich ein irreparabler Bauwerksverfall einstellt. <b>Laufende Unterhaltung</b> erforderlich. <b>Umgehende Instandsetzung</b> bzw. <b>Erneuerung</b> erforderlich. Maßnahmen zur <b>Schadensbeseitigung</b> oder <b>Warnhinweise</b> zur Aufrechterhaltung der <b>Verkehrssicherheit</b> oder <b>Nutzungseinschränkungen</b> sind <b>sofort</b> erforderlich.</p>

Tabelle 2-2 Notenbereiche der Zustandsbewertung (RI-EBW-PRÜF)

Basierend auf der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 ist die Bewertungseinheit der Einzel-schaden. In einem weiteren Schritt wird in Abhängigkeit der drei Noten für jeden Schaden die Basiszustandszahl aus einer Tabelle ausgelesen. Diese Basiszustandszahl wird in Abhängigkeit des Schadenumfangs (geometrisch) leicht korrigiert. Diese korrigierte Basis-zustandszahl wird als Zustandszahl bezeichnet. Aus dieser Note werden dann mittels eines Algorithmus Zustandsnoten für Bauteilgruppen und Teilbauwerke vergeben. Die Zustandsnote kann nicht direkt mittels eines Algorithmus aus den Noten der untergeordneten Objekte ermittelt werden. Vielmehr gibt sie den Gesamtzustand, die Funktionalität und die Sicherheit des Objektes wieder.

## 2.7.2 ASFiNAG (AT)

Die Bewertung des Erhaltungszustandes von Infrastrukturbauwerken der ASFiNAG erfolgt gemäß Richtlinie 13.03.11 (FSV, 2021) nach dem Notensystem in Tabelle 2-3.

Note	Beschreibung
1	Sehr guter Zustand
2	Guter Zustand
3	Ausreichender Zustand
4	Schlechter Zustand
5	Sehr schlechter Zustand

Tabelle 2-3 Notensystem zur Beurteilung des Bauwerkszustands

Die Bauteilgruppen und das gesamte Bauwerk werden im Wesentlichen separat bewertet. Die Note des Gesamtbauwerks ist nicht direkt von den Noten der einzelnen Bauteilgruppen abhängig. Die Objektbewertung, d. h. die Bewertung des gesamten Bauwerks erfolgt gemäß Tabelle 2-4.

Note	Beschreibung
1	<b>Sehr guter Zustand</b>
	Keine oder sehr geringe Schäden; Mängel aus der Bauzeit wie Abweichungen der Abmessungen, ästhetische Mängel. Keine Einschränkung der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Keine Maßnahmen erforderlich.
2	<b>Guter Zustand</b>
	Geringe, leichte Schäden; Mängel aus der Bauzeit, die noch keine Verschlechterung zeigen. Keine Einschränkung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Bei Nichtbeheben kommt es erst längerfristig zu einer Verminderung der Gebrauchstauglichkeit bzw. Dauerhaftigkeit.
3	<b>Ausreichender Zustand</b>
	Mittelschwere Schäden, die keine Einschränkung der Tragfähigkeit zur Folge haben. Es sind Anzeichen einer Verminderung der Gebrauchstauglichkeit bzw. Dauerhaftigkeit des Bauwerks zu erkennen. Eine geeignete Maßnahme sollte mittelfristig eingeleitet werden, um die Gebrauchstauglichkeit bzw. die Dauerhaftigkeit auf das geplante Maß anzuheben.
4	<b>Schlechter Zustand</b>
	Schwere Schäden, die derzeit noch keine Einschränkung der Tragfähigkeit zur Folge haben. Es ist eine Verminderung der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit deutlich erkennbar. Eine geeignete Maßnahme soll kurzfristig eingeleitet werden, um die Gebrauchstauglichkeit bzw. die Dauerhaftigkeit auf das geplante Maß anzuheben.
5	<b>Sehr schlechter Zustand</b>
	Schwere Schäden, die eine Einschränkung der Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit zur Folge haben. Maßnahmen sind unverzüglich einzuleiten.

Tabelle 2-4 Objektbeurteilung gemäß RVS 13.03.11 (FSV, 2021)

Um Anhaltspunkte für die Beurteilung von Bauteilen zu geben, listet die RVS 13.03.11 beispielhafte Schadensbilder für die acht unterschiedlichen Bauteile (Unterbau, Überbau, Deckschicht, Lager, Fahrbahnübergang, Abdichtung / Entwässerung, Randbalken und sonstige Ausrüstung) auf. Die beispielhaften Schadensbilder stellen sicher, dass die Bauteile vergleichbar bewertet werden.

### 2.7.3 Bundesamt für Strassen ASTRA (CH)

In der Schweiz regelt und definiert die Norm SIA 469 (SIA, 1997) die Terminologie, die Erhaltungsziele, die Erhaltungsmaßnahmen und -tätigkeiten und die Bauwerksakten. Das ASTRA hat in (ASTRA, 2005) die Grundsätze für die Überwachung und den Unterhalt (baulicher Unterhalt und Erneuerung) von Kunstbauten der Nationalstraßen festgelegt. Diese Richtlinie gibt Auskunft über die anzuwendenden Grundlagen, Grundprinzipien und Ziele. In einem allgemeinen Rahmen gliedert die Richtlinie die Überwachungs- und Unterhaltstätigkeiten für die Erhaltung der Kunstbauten.

Im Rahmen der Inspektion wird der Zustand des Bauwerks und seiner Bestandteile bewertet. Hierfür werden die folgenden Zustandsklassen (ZK) von 1-5 verwendet:

Zustandsklasse	Beschreibung	Schäden
1	Guter Zustand	Keine / geringfügige Schäden
2	Akzeptabler Zustand	Unbedeutende Schäden
3	Beschädigter Zustand	Bedeutende Schäden
4	Schlechter Zustand	Große Schäden
5	Alarmierender Zustand	Die Sicherheit ist gefährdet, Maßnahmen sind vor der nächsten Hauptinspektion erforderlich.

Tabelle 2-5 Zustandsklassen mit Beschreibung (SIA 469)

Die Zustandsbeurteilung wird auf drei Ebenen erfasst: Auf der Ebene der Schadensgruppe, des Bauwerksteils und des Bauwerks. Die Zustandsbeurteilung auf der Ebene der Schadensgruppe wird jedoch nur für vorab definierte Bauwerksteile, die maßgebend für die Erhaltungskosten eines Bauwerks sind, erfasst.

Im Leitfaden (ASTRA, 2016) werden Beispiele von typischen Schadensbildern gegeben. Sie dienen als Anhaltspunkt für den Inspektor und sollen eine einheitliche Beurteilung



sicherstellen. Die Zustandsbewertung erfolgt aufgrund der Einschätzung des Inspektors entlang der Objekthierarchie beginnend mit der kleinsten Einheit bis hin zur Gesamtbeurteilung des Infrastrukturobjekts.

Zuerst wird jeder Schadensgruppe eine Zustandsklasse zugeordnet. Sie beschreibt den Zustand des betreffenden Bereichs eines Bauwerksteils und bezieht sich auf die Schäden der Schadensgruppe.

In einem zweiten Schritt wird der Zustand von Bauwerksteilen erfasst. In diese Bewertung fließen die Art, Anzahl und Schadensausmaß der Schadensgruppen des betreffenden Bauwerksteils ein. Die Auswirkungen der Befunde auf die Funktionsfähigkeit und Sicherheit des Bauwerksteils werden dabei berücksichtigt. Schließlich ordnet der Inspektor das gesamte Bauteil einer Zustandsklasse zu.

Im dritten Schritt wird der Zustand für das gesamte Bauwerk beurteilt. Die Zustandsbeurteilung baut auf den Zuständen der untergeordneten Infrastrukturobjekte auf, erfolgt jedoch prinzipiell nach der Einschätzung des Inspektors. Die Zustandsbewertung muss somit nicht dem Mittelwert der untergeordneten Objekte entsprechen. Sie gibt vielmehr den Gesamtzustand, die Funktionalität und die Sicherheit des Objektes an.

## 2.8 Zustandsprognose

Neben dem aktuellen Bauwerkszustand werden zur Abschätzung von Zustandsentwicklungen Verhaltensfunktionen, die z. B. den Zusammenhang zwischen Zustandsnote und Alter eines Bauwerks beschreiben, benötigt. Insbesondere bei verkehrstechnisch bedeutsamen Brückenbauwerken ist die prädiktive Erhaltungsplanung notwendig, da damit meist erhebliche Verkehrssicherungskosten verbunden sind. Die Ergebnisse der Zustandsprognose werden dazu verwendet, um den Zeitpunkt, Art und Kosten von zukünftigen Erhaltungsmaßnahmen abzuschätzen.

Die Zustandsprognose stellt daher ein wesentliches Werkzeug innerhalb des Lebenszyklusmanagements von Bauwerken dar. Sie bildet die Grundlage, um den zukünftigen Erhaltungsbedarf abzuschätzen, da anhand von geeigneten Prognosemodellen sowohl der Schadensverlauf vor als auch nach der Durchführung einer Erhaltungsmaßnahme modelliert wird. Solche Funktionen werden durch Auswertungen einer Stichprobe des Brückenbestandes über mehrere Bauwerksprüfungen hinweg ermittelt, wobei jedoch nur solche Bauwerke zu berücksichtigen sind, bei denen im Beobachtungszeitraum keine Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt wurden (Krieger & Gehrlicher, 2000). Zusätzlich können weitere Eingangsdaten,



wie z. B. Ergebnisse aus Bauwerksuntersuchungen und Materialprüfungen, in die Zustandsprognose integriert werden (Gehlen, Mayer, & Schießl, 2008). Die Prognose kann sowohl auf Basis von zusammengesetzten Indizes durchgeführt werden (Mašović & Hajdin, 2014) oder separiert für einzelne Schädigungsprozesse (Schnellenbach-Held, Peeters, & Miedzinski, 2015), wie z. B. Karbonatisierung, Chlorideintrag, Bewehrungskorrosion oder Alkali-Kieselsäure-Reaktion erfolgen.

Zumeist werden sogenannte Alterungsfunktionen auf Basis von zusammengesetzten Indizes, wie z. B. von Zustandsnoten oder der Substanzkennzahl erstellt, bei denen die theoretische Nutzungsdauer in einen auf den Wert 1 normierten Bezugswert (normative Nutzungsdauer) umgeformt wird.

In Hinblick auf ein zuverlässigkeitsbasiertes Erhaltungsmanagement zur Bewertung von Brückenbauwerken empfehlen (Schnellenbach-Held, Peeters, & Miedzinski, 2015) die Beschreibung des zeitlich veränderlichen Zustands eines Bauteils mit Hilfe von Einwirkungs- und Widerstandsfunktionen. Aufgrund der bei den Einwirkungen und Widerständen vorhandenen Streuungen sollte die Modellierung mit Hilfe von probabilistischen Methoden erfolgen (Fischer, Straub, Schneider, Thöns, & Rücker, 2014). Ziel der Zustandsprognose ist es, verschiedene Schädigungsmechanismen über einen zu definierenden Prognosezeitraum abzuschätzen, um daraus schließlich Aussagen zur Eintrittswahrscheinlichkeiten von Schäden treffen zu können. Abbildung 2-8 zeigt hierzu ein typisches Beispiel einer Prognose der zeitlichen Entwicklung der Kennzahlen Zuverlässigkeit und Eintrittswahrscheinlichkeit für ein Bauwerk.

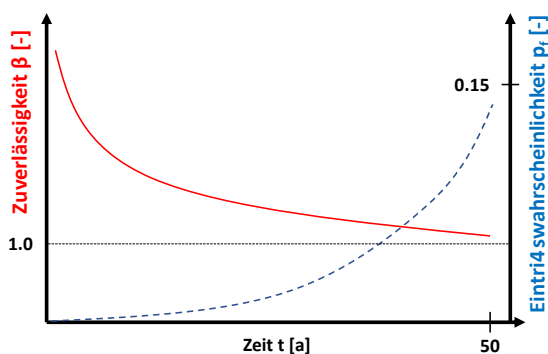


Abbildung 2-8 Prognose der Kennzahlen Zuverlässigkeit  $\beta$  und Eintrittswahrscheinlichkeit  $p_f$

Im deutschsprachigen Raum kommen für die Zustandsprognose von Bauwerken größtenteils deterministische Prognosemethoden zur Anwendung. In der Schweiz erfolgt bereits seit einigen Jahren ein erfolgreicher Einsatz von probabilistischen Prognosemethoden (Markov-

Ketten) in der Praxis zur Zustandsprognose von Bauwerken des Bundesamts für Strassen (ASTRA). Die ASFiNAG sowie die BAW haben solche Prognosemethoden ebenfalls bereits zumindest im Rahmen von Forschungsvorhaben erprobt. Im Bereich der elektromechanischen Anlagenteile werden hingegen oftmals standardmäßig probabilistische Methoden eingesetzt (vgl. Tabelle 2-6).

	Bundesamt für Strassen	ASFiNAG	Autobahn GmbH –	Landesbetrieb BW	LS Brandenburg	DB Netz AG	SBB	BAW / WSV
deterministisch		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
probabilistisch	✓	(✓) ✓*				✓*	✓*	(✓) ✓*

**Legende:**

- ✓ Stand der Technik
- (✓) Ansatz im Rahmen von Forschungsprojekten erprobt bzw. in Vorbereitung
- ✓\* Eine Anwendung erfolgt für elektromechanische Anlagen

Tabelle 2-6 Übersicht zu eingesetzten Prognosemethoden für Infrastrukturbauwerke  
Für die netzweite Anwendung von Prognoseberechnungen kommen i. d. R. Softwaretools zum Einsatz (vgl. z. B. EPING (Zwerger, et al., 2019)). In der Praxis kommen zumeist lineare oder exponentielle Funktionsansätze zur Anwendung. Diese beziehen sich i. d. R. auf das Gesamtbauwerk und nicht auf einzelne Bauteile.

## 2.9 Maßnahmenplanung

Für das Ermitteln von Handlungsoptionen zur Maßnahmenplanung ist die Zustandsprognose und die Erhaltungsstrategie, welche im Rahmen des strategischen Erhaltungsmanagements definiert wurde, von Bedeutung. Die Handlungsoptionen für relevante Infrastrukturbauwerke, d. h. Bauwerke mit identifiziertem Erhaltungsbedarf, ergeben sich für einen definierten Zeitraum durch die in der Erhaltungsstrategie definierte Zuordnung der Typen von Erhaltungsmaßnahmen zu einem festgelegten Zustandsniveau. Die Maßnahmenplanung und Priorisierung von Maßnahmen erfolgt bei den verschiedenen Verkehrsträgern zumeist zustandsbasiert. Für die Ermittlung von erhaltungsbedürftigen Bauwerken werden i. d. R.

Zustandsgrenzen oder -klassen bzw. Schadenskategorien verwendet. In Tabelle 2-7 sind für verschiedene Infrastrukturbetreiber einige Kriterien aufgelistet, die zum Einleiten von Vorbereitungen bzw. zum Auslösen einer Erhaltungsmaßnahme herangezogen werden.

Infrastrukturbetreiber	Kennwert	Handlungsbedarf
ASFiNAG	10 % der Fläche mit Zustandsnote 4	Vorbereitung von Maßnahmen
	Zustandsnote 4 bis 5	direkte Durchführung einer Maßnahme
BAW / WSV	Zustandsgrenze 3,5	Vorbereitung von Maßnahmen
	Schadensklasse 3	Schaden ist je nach Schadensausmaß akzeptabel
	Schadensklasse 4	Schaden ist inakzeptabel, direkte Maßnahme notwendig
DB Netz AG	Schadenskategorie A	Schaden unmittelbar relevant für den technischen Zustand
	Schadenskategorie B	Schaden mittelbar relevant für den technischen Zustand
	Schadenskategorie C	Schaden nicht relevant für den technischen Zustand
SBB	Schwellenwert	Vorbereitung von Maßnahmen
	Toprisikobrücken aus risikobasiertem Anlagenmanagement	
Autobahn GmbH	Zustandsnote 2,6	Vorbereitung von Maßnahmen
	Zustandsnote 3,4	Eingreifzeitpunkt für Maßnahmen gemäß RI-EBW-PRÜF

Tabelle 2-7 Kennwerte bzw. Grenzwerte für die Planung u. Einleitung von Erhaltungsmaßnahmen der Infrastrukturbetreiber

Für die Entscheidungsfindung und die netzweite Optimierung bzw. Koordinierung werden zum Teil mehrere Szenarien z. B. für unterschiedliche Erhaltungsstrategien (bspw. gemäß RPE-ING) oder Budgetvarianten gebildet. Die netz- oder korridorweite Zusammenführung der Erhaltungsmaßnahmen und deren resultierende Kosten ergeben dann das Arbeitsprogramm

mit zugehörigem Finanzbedarf je Szenario als Grundlage für die Optimierung bzw. Koordinierung über alle Teilsysteme. Für einzelne Bauwerke erfolgt dies anhand von Wirtschaftlichkeitsberechnungen nach den Vorgaben der RI-ERH-ING und den RI-WI-BRÜ. Hierbei kommen oftmals vereinfachte Abschreibungsmodelle zum Einsatz. Weiterhin erfolgt derzeit keine Berücksichtigung von volkswirtschaftlichen Kosten.

Die räumliche, zeitliche sowie anlagenübergreifende Koordinierung von Erhaltungsmaßnahmen erfolgt anhand von qualitativen Kriterien im Rahmen von Koordinationsgremien. Wichtige Randbedingungen sind hierbei die Sicherstellung einer möglichst hohen Verfügbarkeit während der Erhaltungsmaßnahmen. Dazu kommen bspw. Vorgaben zur maximalen Länge von Arbeitszonen (ASFiNAG, ASTRA) zum Einsatz. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsprüfung von Erhaltungsmaßnahmen im Einzelfall mit Vorhabenskosten über 50 Mio. € werden ggf. auch Staukosten bzw. Reisezeitverluste von verschiedenen Verkehrsführungsvarianten auf Projektebene gegenübergestellt.

## 2.10 Wirkungsanalyse

Die Wirkungsanalyse stellt einen bedeutenden Arbeitsschritt innerhalb des Prozesskreislaufs (vgl. Abbildung 2-2) dar. Dieser unterstützt vor allem das strategische Erhaltungsmanagement. Im Rahmen der Wirkungsanalyse werden Kennzahlen ermittelt, welche z. B. eine Bewertung der Leistungsziele in Bezug auf ihren Erfüllungsgrad und ihre Relevanz bei der Entscheidungsfindung zulassen. Dies sollte mindestens in einem jährlichen Rhythmus stattfinden. Zusätzlich sollten in Abständen in diesem Rahmen auch die Geschäftsprozesse überprüft werden, um diese bei Bedarf anzupassen. Hierbei spielen in der Organisation des Straßenbetreibers auch vorhandene Ressourcen eine wichtige Rolle.

Die Durchführung einer Erhaltungsmaßnahme bewirkt i. d. R. eine Verbesserung des Bauwerkszustands. Der Bauwerkszustand nach Durchführung einer Erhaltungsmaßnahme wird bei allen Verkehrsträgern derzeit erfasst. Diese projektbezogenen Daten bzw. Informationen zur Wirksamkeit einer Erhaltungsmaßnahme werden jedoch zumeist nicht in einer Datenbank abgelegt, sodass deren Auswertung in Bezug auf das Verhältnis zwischen Kosten und Wirkung derzeit nur mit einer manuellen zeitaufwändigen Datenaufbereitung möglich ist. Ziel der Infrastrukturbetreibenden ist es, diese Daten mittelfristig ebenfalls für das Erhaltungsmanagement von Bauwerken bereitzustellen. Tabelle 2-8 zeigt den derzeitigen Stand bei ausgewählten Infrastrukturbetreibenden in Bezug auf die Durchführung einer

Erstinspektion nach einer Maßnahme und die Analyse von Kosten und Wirkung der durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen.

	Bundesamt für Strassen	ASFiNAG	Autobahn GmbH –	Landesbetrieb BW	LS Brandenburg	DB Netz AG	SBB	BAW / WSV
Erstinspektion nach Maßnahme	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Analyse von Kosten u. Wirkung von Maßnahmen	0	0	(✓)	–	–	0	0	0
<b>Legende:</b>								
✓ Stand der Technik								
(✓) im Rahmen von Forschungsprojekten erprobt bzw. in Vorbereitung								
0 Eine Aufbereitung der Daten befindet sich aktuell in Bearbeitung								

Tabelle 2-8 Übersicht zum Stand der Technik in der Praxis in Bezug auf die Durchführung einer Erstinspektion und die Analyse von Kosten und Wirkung von durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen

## 2.11 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die grundlegenden Arbeitsschritte innerhalb eines systematischen Erhaltungsmanagements von Bauwerken dargestellt. Ein wesentliches Kernelement dieses generischen Prozesskreislaufs stellt die Zustandserfassung dar. Gegenwärtig basiert das Lebenszyklusmanagement auf den Daten aus visuellen Bauwerksprüfungen. Diese können bei Bedarf mit weiterführenden messtechnischen Methoden der Zustandserfassung sowie dem Monitoring ergänzt werden. Die Daten der Zustandserfassung bilden derzeit die Grundlage für die Bewertung des aktuellen Zustands eines Bauwerks als auch für die

Abschätzung der zukünftigen Zustandsentwicklung. Beide Informationen sind bei der Wahl von Art, Umfang und Zeitpunkt von Erhaltungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

Die Zustandsprognose liefert wichtige Informationen zur zukünftigen Entwicklung des Bauwerkszustands, welche derzeit vorwiegend mit Hilfe von deterministischen Prognosemethoden angewendet wird. Die Aussagekraft, bzw. -genauigkeit der Zustandsprognosen von bisherig eingesetzten Modellen ist begrenzt. Zudem ist mit rein deterministischen Modellen keine Risikobetrachtung möglich. Die bestehenden Modelle basieren meist einzig auf historisierten Zustandsdaten sowie Begleitdaten (z. B. Aufbau- und Verkehrsdaten). Obwohl diese Daten eine wesentliche und wertvolle Basis für die Ableitung von Modellen darstellen, hat sich jedoch gezeigt, dass die reine Projektion der Vergangenheit aus den vorhandenen Zustandsdaten auf die Zukunft nicht ausreichend ist. Die zunehmend veränderlichen Einflüsse auf die Bauwerke erzeugen eine große Streuung in der Prognose von Zustandsentwicklungen. Dies wird durch klimatische Veränderungen zusätzlich verstärkt. Gleichzeitig sieht man sich mit einer weiter steigenden Verkehrsbelastung konfrontiert, welche in keinem linearen Zusammenhang mit der Zustandsentwicklung steht. Gegenwärtige Modelle versuchen deshalb Kausalitätsverhältnisse besser zu beschreiben, damit Prognosen an neuen Umständen dynamisch angepasst werden können. Der meistverwendete Lösungsansatz im deutschsprachigen Raum für die Zustandsprognose von Infrastrukturen sind deterministische Modelle.

Die Planung und Priorisierung von Maßnahmen erfolgt bei den einzelnen Verkehrsträgern zustandsbezogen. Hierzu werden zumeist definierte Grenzwerte verwendet, bei deren Überschreiten Erhaltungsmaßnahmen vorbereitet oder eingeleitet werden. Eine anlagenübergreifende Korridorplanung von mehreren Maßnahmen erfolgt derzeit oftmals anhand von qualitativen Kriterien.

### 3 ENTWICKLUNG DER METHODEN DER ZUSTANDSPROGNOSE

Die Analysen von Zustands- und Bestandsdaten von Brücken werden von HSU und AIT auf unterschiedlichen Ebenen des Brückensystems durchgeführt. Tabelle 3-1 gibt einen allgemeinen Überblick über die Ebenen des Brückensystems, auf die sich die Analysen von HSU und AIT konzentrieren. Die Brücke kann hierarchisch in drei Hauptebenen zerlegt werden: Schadensebene, Bauwerksteil- oder Brückenteilsystemeebene und Objektebene. Die Brückenmanagementsysteme unterstützen und halten Zustandsdaten, indem sie dieser hierarchischen Struktur folgen. Zuerst werden die Schäden erfasst gefolgt vom Zustand des Bauteils oder Brückenteilsystems und der Objekte. Allerdings weist nur SIB-BW der Schadensebene eine Zustandsnote zu, die sogenannte Schadensklasse. Im Fall von KUBA-DB werden die Schäden nicht singular, sondern als Schadensgruppe erfasst, welche durch einen Schadenprozess verursacht wird. Im Infrastructure Management Tool (IMT) der ASFINAG werden die Schäden überhaupt nicht erfasst. Die von der HSU durchgeführte Studie konzentriert sich im Fall von SIB-BW auf die Schadensebene und im Fall von KUBA-DB auf die Bauwerksteilebene. Diese Analysen zielen auf die Integration von Zustandsdaten und physikalischen Modellen zur Schadensentwicklung ab und werden daher auf der niedrigsten möglichen hierarchischen Ebene durchgeführt. Die vom AIT durchgeführte Studie ist auf die Entwicklung von Zustandsmodellen auf höherer Systemebene ausgerichtet.

Tabelle 3-1 Überblick über die Systemebene, auf der die Analysen durchgeführt wurden.

	<b>Österreich</b> (IMT)	<b>Die Schweiz</b> (KUBA-DB)	<b>Deutschland</b> (SIB-BW)
Schadensebene			Abschnitt 4.1.2 (HSU)
Bauwerksteil- /Bauwerksteilebene	Abschnitt 4.3.2 (AIT)	Abschnitt 4.2.2 (HSU)	Abschnitt 4.1.3 (AIT)
Objektebene		Abschnitt 4.2.3 (AIT)	



## 3.1 Methoden der Zustandsprognose auf Schadens- und Bauwerksteilebene

### 3.1.1 Einführung

KUBA-DB und SIB-BW sind Datenbanken für das Erhaltungsmanagement von alternden Straßeninfrastrukturen in der Schweiz bzw. in Deutschland. Die Brücken werden in periodischen Intervallen durch visuelle Inspektion geprüft. Die Ergebnisse dieser Inspektionen werden in Datenbanken gespeichert und bilden die Grundlage für die Planung der Instandhaltungsmaßnahmen.

Das wichtigste Ergebnis der visuellen Prüfungen ist die Bewertung des Zustands der Brücken. Da eine Brücke hierarchisch in Bauteile und Unterbauteile zerlegt werden kann, basiert die Bewertung des Zustands von Brücken auf der Bewertung des Zustands der Bauteile und der Schäden auf den unteren Systemebenen:

- Der Zustandswert in KUBA-DB wird dem Bauwerksteil zugewiesen und nimmt einen Wert in einer Skala von 1 (guter Zustand) bis 5 (alarmierender Zustand) an.
- Die Schadensklasse in SIB-BW wird dem Schaden zugewiesen und nimmt einen Wert in einer Skala von 0 (guter Zustand) bis 4 (kritischer Zustand, dringender Instandsetzungsbedarf) an.

Die Zuordnung der Zustandsnote oder Schadensklasse erfolgt nach risikobezogenen Kriterien (BAW, 2023). Um die Arbeit der Brückenprüfer zu unterstützen, werden die Kriterien und ihre Verknüpfung mit der Zustandsnote oder der Schadensklasse in speziellen Leitfäden erläutert.

Der am weitesten verbreitete Schadensmechanismus bei Stahlbetoninfrastrukturen ist die durch Chlorideintrag ausgelöste Korrosion der Bewehrung. Die Kriterien, die die Beurteilung des Zustands von Stahlbetonbauwerke und die Bewertung des Schadensprozesses "Korrosion in Stahlbetonbauteilen" unterstützen, sind in Tabelle 3-1 unter Berücksichtigung verschiedener Leitfäden (ASTRA, 2021) (BMVI, 2017) (BAW, 2023) aufgeführt.

Tabelle 3-2 Vergleich der Schadens- und Zustandsbeschreibung sowie der Kriterien, nach denen Zustandsnoten und Schadensklassen nach verschiedenen Dokumenten und Richtlinien vergeben werden (ASTRA, 2021) (BMVI, 2017) (BAW, 2023).

CH (ZN)	Bewehrungskorrosion bei Stahlbeton IT-Dokumentation KUBA DB	D (SK)	BAW Schadenmerkblatt Schäden an der Bewehrung (Bewehrungsgruppe 3)	Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten RI-ERH-ING RI-EBW-PRÜF	RI-EBW-PRÜF Schadensbeispiele Stand SIB-Bauwerke 1.94  BRÜCKEN, ÜBERBAU / * / BETON außer Betondeckung / *  BRÜCKEN, UNTERBAU / * / BETON außer Betondeckung / *
1	Keine nennenswerten Schäden; nur feine Oberflächenrisse; keine Spuren von Korrosion.	0	/	Der Mangel/Schaden hat keinen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Bauteils/Bauwerks	/
2	Vereinzelte und lokal sichtbare Korrosionsspuren (Rostflecken) und / oder Abplatzungen; feine Risse infolge von Korrosion an Bewehrungsstäben und / oder Nassstellen ( $r < 0.5 \text{ mm}$ , Gesamtlänge der Risse $< 4 \text{ m/m}^2$ ); Bewehrungslagen erkennbar; geringfügige mechanische Schäden.	1	/	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Dauerhaftigkeit des Bauteils, hat jedoch langfristig nur geringen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Bauwerks. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung anderer Bauteile ist nicht zu erwarten. Schadensbeseitigung im Rahmen der Bauwerksunterhaltung.	Abplatzungen im oberflächennahen Bereich ohne freiliegende Bewehrung
3	Gehäuft Abplatzungen mit freiliegenden Bewehrungsstäben, Korrosionsabtrag unbedeutend, im Mittel weniger als 10 % der freiliegenden Bewehrungsstäbe; Risse und / oder Nassstellen.	2	Querschnittsverlust $< 10 \%$ Narbentiefe $< 1 \text{ mm}$	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Dauerhaftigkeit des Bauteils und kann langfristig auch zur Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit des Bauwerks führen. Die Schadensausbreitung oder Folgeschädigung anderer Bauteile kann nicht ausgeschlossen werden. Schadensbeseitigung mittelfristig erforderlich	größere Abplatzungen, Abplatzungen im oberflächennahen Bereich mit freil. Bewehrung
4	Flächige Abplatzungen mit freiliegenden Bewehrungsstäben, Korrosionsabtrag bedeutend, im Mittel mehr als 10 % der freiliegenden Bewehrungsstäbe und / oder Lochfrass; Biege- und Schubrisse 1-3mm und / oder Nassstellen.	3	Querschnittsverlust $< 15 \%$ Narbentiefe $< 1,5 \text{ mm}$	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Dauerhaftigkeit des Bauteils und führt mittelfristig zur Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit des Bauwerks. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung anderer Bauteile ist zu erwarten. Schadensbeseitigung kurzfristig erforderlich.	größere Abplatzungen, Freiliegende korrodierte Bewehrung, einsetzende Querschnittsminderung, fortgeschrittene Querschnittsminderung Stark korrodierte Tragbewehrung (fortgeschrittene Querschnittsminderung)

5	Die Sicherheit ist gefährdet; Massnahmen sind vor der nächsten Hauptinspektion erforderlich; dringliche Massnahme.	4	Querschnittsverlust > 15 % Narbentiefe > 1,5 mm	Durch den Mangel/Schaden ist die Dauerhaftigkeit des Bauteils und des Bauwerks nicht mehr gegeben. Die Schadensausbreitung oder Folgeschädigung anderer Bauteile erfordert umgehend eine Nutzungseinschränkung, Instandsetzung oder Bauwerkserneuerung.	Stark korrodierte Tragbewehrung (teilweiser Ausfall von Tragbewehrung)
---	--	---	--	--	--

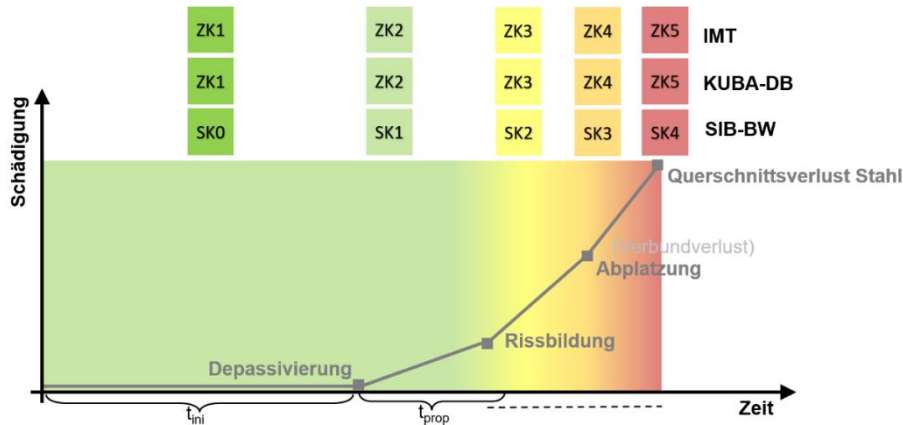


Abbildung 3-1 Chloridinduzierte Korrosion in Stahlbeton: Vergleich des Schädigungsgrades und der Zustandsnote/Schadensklasse für IMT, KUBA-DB und SIB-BW.

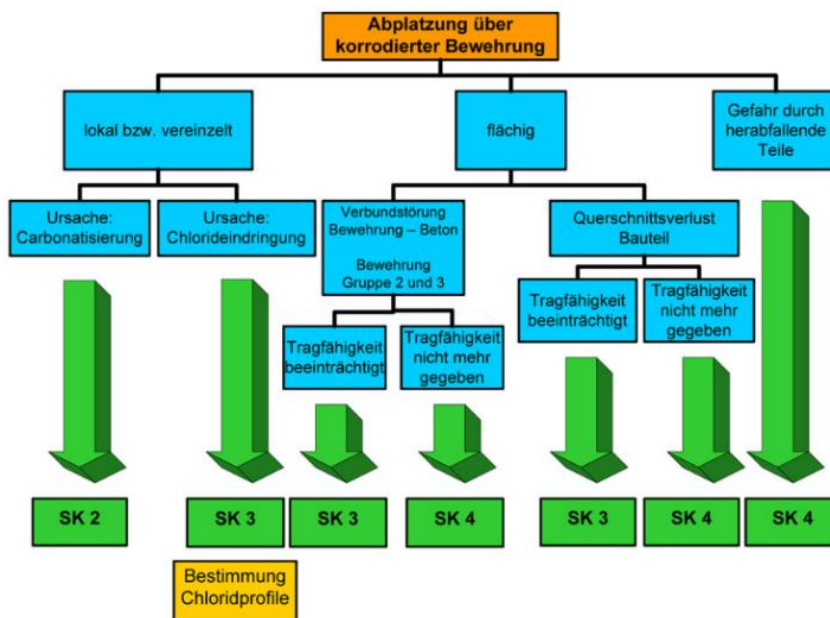


Abbildung 3-2 Flussdiagramm zur Unterstützung der Bewertung von Korrosionsschäden (BAW, 2023).

Tabelle 3-3 Zusammenhang zwischen der Zustandsklasse von KUBA-DB, der Zustandsnote von SIB-BW und dem Schadensakkumulationsindex.

CH (Zustandsnote)	D (Schadensklasse)	Schadensakkumulationsindex
1	0	0
2	1	1
3	2	2
4	3	3
5	4	4

Die Datenbanken, KUBA-DB und SIB-BW, weisen unausgeglichene Datensätze auf, da schlechte, kritische und alarmierende Zustände selten vorkommen. Dies stellt eine Herausforderung für die Verwendung der Daten zur Vorhersage der Restnutzungsdauer der Brücke dar. Um diesen Nachteil zu beheben, wurde die Integration der physikalischen Modelle für die Korrosionsentwicklung in die Zustandsbewertungsdaten, die aus rein visuellen Inspektionen resultieren, untersucht.

Die Integration solcher Daten und die Entwicklung stochastischer Modelle für die Vorhersage des Zustands weist einige Besonderheiten und Herausforderungen auf, die vor Beginn der Analyse berücksichtigt werden sollten:

1. Schädigungsprozesse können auf zwei verschiedene Arten modelliert werden:
  - Die erste ist die klassische (direkte) Methode: Die Schadenszunahme und damit das Schadensniveau zu einem bestimmten Zeitpunkt wird als Zufallsvariable modelliert, die von der Zeit abhängt.
  - Die zweite ist die inverse Methode: die Zeit, in der ein Schadensniveau erreicht wird, wird als Zufallsvariable modelliert.

Die Beobachtung eines sich verschlechternden Bauwerkszustands erfolgt durch Zuweisung einer Zustandsnote oder Schadensklasse einem bestimmten Alter des Bauwerks zu. Somit wird das Alter des Bauwerks als Zufallsvariable modelliert, die von der Zustandsnote oder der Schadensklasse abhängt.

2. Chloridinduzierte Korrosion ist der häufigste Schädigungsprozess von Stahlbetonbrücken. Dieser Schädigungsprozess setzt sich aus einer Initiierungsphase und einer Ausbreitungsphase zusammen. Während die Initiierungsphase nicht sichtbar ist, ist die Ausbreitungsphase sichtbar und äußert sich durch Risse und Abplatzungen der Betondeckung und in der Folge durch Delamination der Betondeckung und Verringerung des Durchmessers der Stahlbewehrung. Dies bedeutet, dass die chloridinduzierte Korrosion mit mindestens drei

physikalischen Modellen modelliert werden sollte: 1) Beginn der Korrosion; 2) Rissbildung und Abplatzungen der Betondeckung; 3) Verringerung des Durchmessers der Stahlbewehrung. Allerdings sind nur 2) und 3) sichtbar und können daher mit den Daten der Zustandsbewertung in Beziehung gesetzt werden. Außerdem sind die Prozesse "Initiierung und Ausbreitung der Korrosion" nicht linear, während der Prozess "Ausbreitung der Korrosion" in guter Näherung als linear angesehen werden kann.

3. Zustandsbewertungsdaten sind das Ergebnis einer visuellen Prüfung, während physikalische Modelle die Entwicklung eines mit der Korrosion zusammenhängenden physikalischen Parameters beschreiben, der auf objektive Weise gemessen werden kann. Beispiele für solche physikalischen Parameter sind die Rissbreite und der Prozentsatz des reduzierten Durchmessers der Stahlbewehrung. Obwohl eine Parallele zwischen der Zustandsnote oder der Schadensklasse und den physikalischen Parametern, die den Schaden beschreiben, besteht, ist dieser Zusammenhang mit großen Unsicherheiten behaftet.
4. Zusätzliche Unsicherheiten, die das Problem beeinflussen, sind: 1) Unsicherheit im Zusammenhang mit der zukünftigen Entwicklung der Schäden in einer bestimmten Sequenz ("Schadens- oder Degradationspfad") eines Schadensprozesses, d. h. die Variabilität des ersten Zeitpunkts, zu dem ein Schadensniveau erreicht wird. 2) Populationsvariabilität der Schadens- oder Zustandsentwicklung (Variabilität des Schadensprozesses von Bauteil zu Bauteil, von Schaden zu Schaden).

Im Hinblick auf dieses Forschungsprojekt ist es wichtig, dass die Schadensklasse oder Zustandsnote einen Schadensakkumulationsindex darstellt (d. h. wenn kein Schaden vorliegt, muss der Wert des Index 0 sein). Während die Schadensklasse in SIB-BW bereits ein Schadensakkumulationsindex ist, muss die Zustandsnote in KUBA-DB von 1 abgezogen werden. Der Einfachheit halber beziehen wir uns in dieser Studie auf einen eindeutigen Schadensakkumulationsindex, der Kardinalzahlen zwischen 0 (guter Zustand) und 4 (kritischer oder alarmierender Zustand) sowohl für die Analyse der Daten in SIB-BW als auch in KUBA-DB annimmt (Tabelle 3-1).

### 3.1.2 Methode

Die allgemeine Methodik zur Entwicklung der Zustandsmodelle, die die Grundlage der IT-Toolbox bilden, ist in Abbildung 3-3 dargestellt. Die Methodik basiert auf den im BMS gesammelten Zustandsdaten. Die Daten werden zunächst bereinigt und in eine geeignete Form gebracht. Die Transformation erlaubt es, Schäden oder Bauwerksteile zu selektieren, die eine signifikante, zunehmende Verschlechterung aufweisen.

- Im Falle von SIB-BW werden Schäden ausgewählt, die sich von Schadensklasse 0 über 1 bis zu Schadensklasse 2 entwickeln.
- Im Falle von KUBA-DB werden Bauwerksteile ausgewählt, die sich von Zustandsklasse 1 bis Zustandsklasse 3 über 2 entwickeln.

Die Auswahl der oben genannten Daten lässt sich wie folgt begründen:

- Die Anzahl dieser Degradationspfade und damit Schäden und Bauwerksteilen ist so groß, dass eine statistische Untersuchung möglich ist.
- Diese Degradationspfade erlauben es, die Degradationsrate von Schäden oder Bauwerksteilen zu untersuchen.
- Da das physikalische Modell für die Schadensentwicklung die zunehmende Degradation modelliert, sind die ausgewählten Zustandsdaten besser geeignet, mit dem physikalischen Modell integriert zu werden.

Um die Integration durchzuführen, werden die Parameter der Modelle als Zufallsvariablen behandelt. Es wird eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, um die Auswirkungen der Unsicherheit der Eingangsparameter auf die Degradationspfade zu bewerten. Die Ergebnisse der Simulation werden zur Ergänzung der Degradationspfade auf der Grundlage von Zustandsdaten verwendet. Sobald die vollständigen Degradationspfade erhalten sind, wird im Ansatz der HSU ein Gamma-Prozess an den Degradationspfad angepasst. Durch die Simulation des Gamma-Prozesses wird die Schadens- oder Bauwerksteil-Zustandsentwicklung abgeleitet und eine Vorhersage der Lebensdauer durchgeführt. Im Folgenden werden die wichtigsten Algorithmen, die den Analysen zugrunde liegen, sowie die physikalischen Modelle für die Schadensentwicklung und der Ansatz für die Datenintegration vorgestellt.

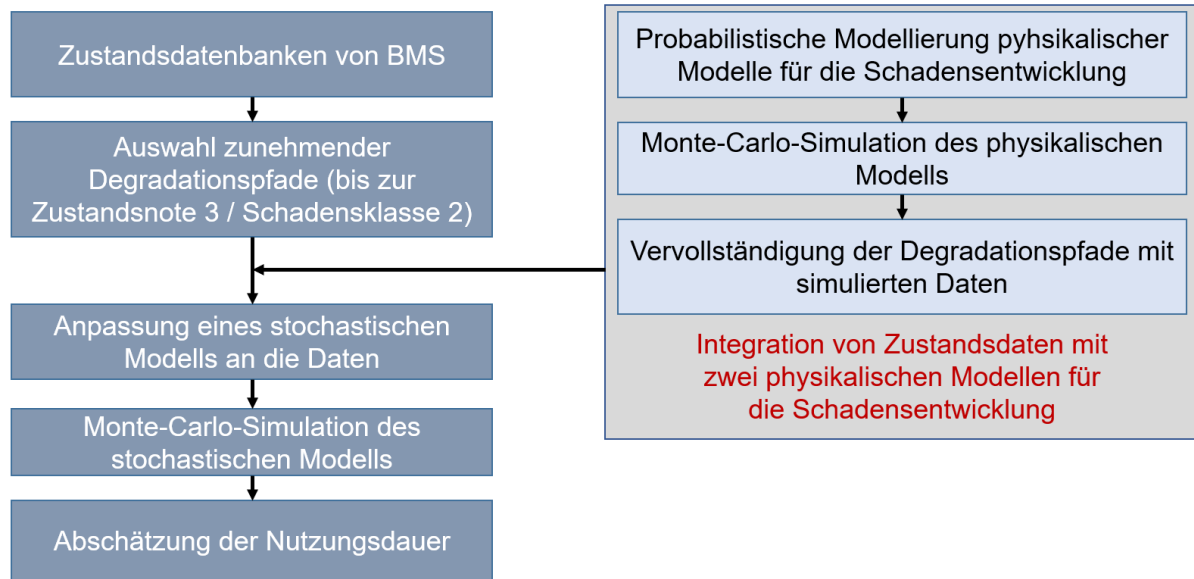


Abbildung 3-3 Hauptschritte des Ansatzes zur Ableitung des Zustandsmodells.

### 3.1.3 Der k-means-Algorithmus

Der k-means-Algorithmus ist einer der einfachsten und effizientesten sowie am weitesten verbreiteten partitionalen Clustering-Algorithmen. Der Algorithmus beginnt mit der Auswahl von K repräsentativen Punkten als anfängliche Mittelwerte. Jeder Punkt wird dann dem nächstgelegenen Mittelwert auf der Grundlage eines Distanzmaßes, in der Regel der euklidischen Distanzmetrik, zugeordnet. Sobald die Cluster gebildet sind, werden die Mittelwerte für jedes Cluster aktualisiert. Der Algorithmus wiederholt dann iterativ diese beiden Schritte, bis ein Konvergenzkriterium erfüllt ist und sich die Mittelwerte nicht mehr ändern. Die von k-means verwendete Zielfunktion ist die Quadratsumme der Residuen.

Eine allgemeine Einführung in den Algorithmus findet sich in (Aggarwal & Reddy, 2014). Gegeben eine Menge von m Beobachtungen  $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_m$ , in dem jede Beobachtung ein d-dimensionaler reeller Vektor ist, zielt der k-means-Algorithmus darauf ab, die m Beobachtungen in  $k \leq m$  Mengen  $\mathbf{D} = \mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_k$  zu partitionieren, um die Quadratsumme der Residuen zu minimieren

$$\arg \min_D \sum_{k=1}^K \sum_{z_j \in D_k} \|z_j - d_k\|^2 \quad 1$$

$$d_k = \frac{\sum_{z_j \in D_k} z_j}{|D_k|}, \quad 2$$

in der  $\mathbf{d}_k$  ist der Zentroid des Clusters  $D_k$  und  $|D_k|$  ist die Größe von  $D_k$ .



Die wichtigsten Faktoren, die die Leistung des k-means-Algorithmus beeinflussen können, sind die folgenden: 1) Wahl der anfänglichen Mittelwerte; 2) Schätzung der Anzahl der Cluster  $K$ . In der Literatur werden mehrere Methoden vorgeschlagen, um diese Faktoren zu bewältigen. In dieser Arbeit wird der k-means++ Algorithmus für die Auswahl der anfänglichen Mittelwerte verwendet. Das Problem der Schätzung der richtigen Anzahl von Clustern wird durch die Berechnung des Silhouette-Width angegangen. Dieses Leistungsmaß basiert auf der Berechnung der Intra- und Inter-Cluster-Abstände. Für einen gegebenen Punkt  $z_j$  wird zunächst der Durchschnitt der Abstände zu allen Punkten im selben Cluster berechnet. Dieser Wert wird mit  $e_j$  bezeichnet. Dann wird für jedes Cluster, das  $z_j$  nicht enthält, der durchschnittliche Abstand von  $z_j$  zu allen Datenpunkten in jedem Cluster berechnet. Dieser Wert wird mit  $f_j$  bezeichnet. Anhand dieser beiden Werte wird der Silhouette-Width eines Punktes geschätzt. Der Durchschnitt aller Silhouette-Width im Datensatz wird als durchschnittliche Silhouette-Width bezeichnet

$$P = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{f_j - e_j}{\max(f_j, e_j)}}{m}, \quad 3$$

und je größer dieser Wert ist, desto höher ist die Qualität der Clusterbildung.

### 3.1.4 Gamma-Prozess

Der Gamma-Prozess ermöglicht die Modellierung der Unsicherheit, die mit der zukünftigen Entwicklung eines Schadens verbunden ist. (van Noortwijk, 2009) gibt einen Überblick über Gamma-Prozesse in der Instandhaltung. In Anlehnung an seine Darstellung des Gamma-Prozesses hat eine Zufallsgröße  $X$  eine Gamma-Verteilung mit dem Formparameter  $\nu > 0$  und dem Skalenparameter  $u > 0$ , wenn ihre Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF)

$$\text{Ga}(x|\nu, u) = \frac{u^\nu}{\Gamma(\nu)} x^{\nu-1} \exp(-ux) I_{0,\infty}(x) \quad 4$$

ist, wobei  $I_A(x) = 1$  wenn  $x \in A$  und  $I_A(x) = 0$  wenn  $x \notin A$ , und  $\Gamma(a) = \int_{z=0}^{\infty} z^{a-1} e^{-z} dz$  ist die Gamma-Funktion,  $a > 0$ .

Außerdem betrachten wir, dass  $\nu(t)$  eine nicht fallende, rechtsstetige, reale Funktion für  $t \geq 0$  mit  $\nu(0) = 0$  ist.

Der Gamma-Prozess wird häufig für die Modellierung nicht fallender Degradationsprozesse im Zeitverlauf verwendet, z. B.  $D(t), t \geq 0$ . Unter Berücksichtigung einer Formfunktion  $\nu(t) > 0$

und eines Skalenparameters  $u > 0$  ist der Gamma-Prozess ein zeitkontinuierlicher stochastischer Prozess  $D(t), t \geq 0$  mit den folgenden Eigenschaften:

- $D(0) = 0$  mit einer Wahrscheinlichkeit von eins;
- $D(\tau) - D(t) \sim \text{Ga}(v(\tau) - v(t), u), t \in [0, \tau]$ ;
- $D(t)$  hat unabhängige Inkremente.

Obwohl die Beschreibung des Schadensniveaus in Abhängigkeit von der Zeit die übliche "direkte" Art der Modellierung eines Schädigungsmechanismus ist, könnte es angemessener sein, den "inversen" Prozess  $T(d), d \geq 0$  zu betrachten, d. h. den Prozess des ersten Zeitpunkts beim Erreichen des Schadensniveaus  $d$  (Guida & Pulcini, 2013). Im Allgemeinen ist der Zeitpunkt des Erreichens des Schadensniveaus nicht bekannt, sondern nur der Zeitpunkt, zu dem das Schadensniveau festgestellt wurde.

Im zweiten Fall hat der Gamma-Prozess, der den "inversen" Prozess  $T(d), d \geq 0$  modelliert, unabhängige Zeitinkremente, und der Degradationsprozess  $D(t), t \geq 0$  ist ein inverser Gamma-Prozess, bei dem die Verteilung des Degradationswachstums nur vom aktuellen Zustand der Einheit und nicht vom Alter  $t$  abhängt.

In diesem Projekt wird der erste Zeitpunkt für das Erreichen des Schadensniveaus  $T(d), d \geq 0$  als Gamma-Prozess modelliert.

Ihre Wahrscheinlichkeitsverteilung ist

$$f_{T(d)}(d) = \text{Ga}(t|v(d), u) \tag{5}$$

wobei

$$E(T(d)) = \frac{v(d)}{u} = \frac{cd^b}{u}, \tag{6}$$

$$\text{Var}(T(d)) = \frac{v(d)}{u^2} \tag{7}$$

sind der Erwartungswert bzw. die Varianz.

Die Parameter  $c > 0$  und  $b > 0$  sind konstant. Der Gamma-Prozess wird als stationär bezeichnet, wenn die Zeit als Funktion des Degradationsniveaus linear ist, d. h. wenn  $b = 1$  ist, und nicht stationär, wenn  $b \neq 1$  ist.

Betrachten wir einen Datensatz mit einem (festen) Degradationsniveau  $d_i, i = 1, \dots, n$ , wobei  $0 = d_0 \leq d_1 \leq \dots \leq d_n$  und dem entsprechenden (zufälligen) Zeitpunkt, zu dem der Degradationsniveau erreicht ist  $t_i, i = 1, \dots, n$ , wobei  $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n$ .

Der Parameter  $b$  kann auf der Grundlage der Daten nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden (Hu, 2022)

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n (\log d_i) (\log t_i) - (\sum_{i=1}^n \log d_i) (\sum_{i=1}^n \log t_i)}{n \sum_{i=1}^n (\log d_i)^2 - (\sum_{i=1}^n \log d_i)^2} \quad 8$$

Die Parameter  $c$  und  $u$  können nach verschiedenen Ansätzen geschätzt werden, z. B. nach der Maximum-Likelihood-Methode, der Methode der Momente oder der Methode der Bayes'schen Statistik.

Nach der Methode der Momente (Hu, 2022), (van Noortwijk, 2009)

$$c = \frac{t_n^2 \left[ 1 - \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta d_i}{d_n} \right)^2 \right]}{d_n S_Y^2}, \quad 9$$

$$u = \frac{t_n \left[ 1 - \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta d_i}{d_n} \right)^2 \right]}{S_Y^2}, \quad 10$$

wobei

$$S_Y^2 = \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \bar{Y} \Delta d_i)^2, \quad 11$$

und

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta d_i} = \frac{t_n}{d_n}. \quad 12$$

Nehmen wir nun an, dass eine Prüfung ergibt, dass  $T(d = d_1) = t_1$ . Die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $T(d = d_2), d_2 \geq d_1$  ist die folgende (Yuan, 2021):

$$f_{T(d=d_2)}(d) = Ga(t|v(d_2) - v(d_1), u) \quad 13$$

wobei

$$E(T(d)) = \frac{v(d)}{u} = \frac{c(d_2^b - d_1^b)}{u}, \quad 14$$

$$Var(T(d)) = \frac{c(d_2^b - d_1^b)}{u^2}. \quad 15$$

### 3.1.5 Physikalisches Modell für Rissbildung und Abplatzungen

Die physikalischen Modelle für Korrosion in Stahlbetonbauwerke beruhen zumeist auf den Ergebnissen des DuraCrete-Projekts (DURACRETE, 2000), das die Grundlage für die probabilistische Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauwerke bildete. In dieser Studie wird das von DuraCrete vorgeschlagene Modell für die Propagationsphase (Rissbildung und Abplatzungen) übernommen.

Die Korrosion der Bewehrung führt zur Bildung von Korrosionsprodukten, die ein größeres Volumen als der ursprüngliche Bewehrungsstahl einnehmen und so Risse in der Betondeckung und schließlich Abplatzungen verursachen. Die Rissbreite wird nach dem physikalischen Modell bewertet

$$w(t) = w_0 + b[p(t) - p_0] \quad 16$$

wobei

- $w_0$  ist die Anfangsbreite des sichtbaren Risses (mm);
- $b$  ist der Parameter, der die Ausbreitung steuert und von der Position der Bewehrung abhängig ist (mm/ $\mu\text{m}$ );
- $p_0$  ist der Wert der Korrosionspenetration, der notwendig ist, um einen Riss zu erzeugen ( $\mu\text{m}$ );
- $p(t)$  ist die Korrosionspenetration an der Zeit  $t$  ( $\mu\text{m}$ ).

Die zum Öffnen eines Risses erforderliche Korrosionspenetration  $p_0$  kann aus der folgenden Gleichung abgeleitet werden

$$p_0 = a_1 + a_2 \frac{x}{\phi_0} + a_3 f_{ct} \quad 17$$

wobei

- $a_1, a_2, a_3$  sind Regressionsparameter;
- $x$  ist die Dicke der Betondeckung (mm);
- $\phi_0$  ist der Durchmesser des Bewehrungsstahls (mm);
- $f_{ct}$  ist die Betonzugfestigkeit ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ).

Die Korrosionspenetration zum Zeitpunkt  $t$ ,  $p(t)$ , wird berechnet als

$$p(t) = i_{corr}(t)w_t(t - T_{corr}) \quad 18$$

wobei

- $w_t$  beschreibt die zeitabhängige Feuchteexposition;
- $T_{corr}$  ist die Zeit bis zum Beginn der Korrosion;
- $i_{corr}(t)$  ist die Korrosionsrate zum Zeitpunkt  $t$  in mm/Jahr, die von der Temperatur abhängt und ausgehend von dem Wert bei  $20^\circ\text{C}$  ( $i_{corr,20}$ ) wie folgt geschätzt wird

$$i_{corr}(t) = i_{corr,20}[1 + K(T(t) - 20)] \quad 19$$

wobei

- $K$  ist der Faktor, der die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur  $T$  beschreibt.

Referenzwerte für die Parameter in Gleichung 16-19 sind im Abschlussbericht des DuraCrete-Projekts (DURACRETE, 2000) angegeben, zusammen mit ihren probabilistischen Modellen, die Tabelle 3-4 zusammengefasst sind.

Tabelle 3-4 Probabilistische Modelle für die Eingabeparameter der physikalischen Modelle.

Parameter	$\mu$	$\sigma$	PDF	Einheit
x	3.3326	0.1371	LogNormal	[mm]
$\phi_0$	10	1	Normal	[mm]
$w_0$	0.05	0.005	Normal	[mm]
b	-4.8916	0.2712	Lognormal	[mm/ $\mu\text{m}$ ]
$a_1$	74.4	3.2	Normal	[-]
$a_2$	7.3	0.06	Normal	[-]
$a_3$	-17.4	5.7	Normal	[-]
$f_c$	20	2	Normal	[MPa]
$f_{ct}$	$0.53\sqrt{f_c}$	$0.08\sqrt{f_c}$	Normal	[MPa]
$w_t$	0.75	0.20	Normal	[-]
$i_{corr}$	30	20	Weibull	[mm/year]
$K(T < 20^\circ\text{C})$	0.025	0.005	Normal	[-]

### 3.1.6 Physikalisches Modell für Durchmesserverringering

In Anlehnung an (Choe, Gardoni, Rosowsky, & Haukaas, 2009) wird angenommen, dass der Durchmesser der Bewehrung nach Beginn des Korrosionsprozesses mit der Zeit abnimmt. Zusammenfassend kann der Durchmesser der Bewehrung zu einem allgemeinen Zeitpunkt t für eine gegebene Korrosionseinleitungszeit  $T_{corr}$  als

$$\phi(t|T_{corr}) = \begin{cases} \phi & t \leq T_{corr} \\ \phi_0 - \left\{ \frac{1.0508 \left(1 - \frac{w}{c}\right)^{-1.64}}{x} \right\} (t - T_{corr})^{0.71} & T_{corr} < t \leq T_f \\ 0 & t > T_f \end{cases}$$

20

berechnet werden, wobei

- $\phi_0$  ist der Durchmesser des Bewehrungsstahls zum Zeitpunkt  $t = 0$  (mm);
- x ist die Dicke der Betondeckung (mm);
- $T_{corr}$  ist die Zeit bis zum Beginn der Korrosion;
- $\frac{w}{c} = 0.5$  ist der Wasser-Zement-Wert;
- $T_f$  ist der Zeitpunkt, an dem  $\phi(t|T_{corr}) = 0$  erreicht;

### 3.1.7 Abhängigkeit zwischen dem Schadensakkumulationsindex, den Korrosionsphasen und den daraus resultierenden Schäden sowie den physikalischen Parametern der physikalischen Modelle

Eine Herausforderung dieses Forschungsprojekts ist die Integration von physikalischen Modellen für die Schadensentwicklung und den Schadensakkumulationsindex. Bei den Schäden, die durch physikalische Modelle beschrieben werden, handelt es sich insbesondere um Korrosion. Die Herausforderung besteht also vor allem darin, dass Korrosion durch mehr als ein Modell beschrieben wird und die Schadensakkumulationsindizes sich auf verschiedene Schäden beziehen, die visuell beobachtet werden können:

- die Schadensakkumulationsindizes 1 und 2 beziehen sich auf den Schadensmechanismus der Rissbildung.
- der Schadensakkumulationsindex 3 bezieht sich auf den Schadensmechanismus der Abplatzung.
- der Schadensakkumulationsindex 4 bezieht sich auf die Verringerung des Stahlbewehrungsdurchmessers.

Die Verringerung des Stahlbewehrungsdurchmessers steht auch hinter den Prozessen, die mit dem Schadensakkumulationsindex 1, 2 und 3 zusammenhängen, kann aber nicht direkt beobachtet werden, solange die Betondeckung noch nicht abgeplatzt ist.

Folglich erfolgt die Beschreibung der Schäden bis zum Schadensakkumulationsindex 3 in Form von Rissen und abgeplatzt Beton, bei Index 4 in Form von freiliegenden korrodierten Bewehrungen. Dies bedeutet, dass das physikalische Modell für Risse und Abplatzungen bis zum Schadensakkumulationsindex 3 gültig ist, während im Fall von Index 4 das physikalische Modell der Verringerung des Durchmessers der Stahlbewehrung verwendet werden muss, da die Betondeckung bereits abgeplatzt ist.

In (Tahershamsi, 2016) werden die Korrelationen zwischen Rissbreite und Korrosionsniveau untersucht. Es gibt mehrere Formeln, nach denen eine durchschnittliche Rissbreite  $w$  als Funktion der Korrosionspenetration  $x_c$  bewertet werden kann. Ein Beispiel für eine solche Formel findet sich in (Rodriguez, Ortega, & Garda, 1994)

$$w = 0.05 + 4.5 \cdot x_c$$

21

wobei

- $w$  ist die Breite des Risses (mm);

- $x_c$  ist die Korrosionspenetration (mm).

Eine weitere Gleichung liefert der fib Model Code 2010 (fib, 2010):

$$w = 0.004 \cdot x_c$$

22

wobei

- $w$  ist die Breite des Risses (mm);
- $x_c$  ist die Korrosionspenetration ( $\mu\text{m}$ ).

Es ist möglich, die Gleichung 21 und 22 zu nutzen, um das Modell für Rissbildung und Abplatzungen mit dem Modell für die Durchmesser verringering und somit mit dem Schadensakkumulationsindex zu korrelieren. Betrachtet man beispielsweise den durchschnittlichen Durchmesser der Stahlbewehrung  $\phi_0 = 10$  mm und eine durchschnittliche Verringerung des Durchmessers aufgrund von Korrosion von 7.5 %, so ergibt sich die entsprechende durchschnittliche Rissbreite  $w = 1.7$  mm im Fall von Gleichung 21 und  $w = 1.5$  mm im Fall von Gleichung 22. Diese Beziehung ist wichtig, um eine Parallele zwischen den physikalischen Parametern, die das Ergebnis des physikalischen Modells sind, und dem Schadensakkumulationsindex herzustellen. Nach Duracrete (DURACRETE, 2000) beginnt die Abplatzung bei einer Rissbreite  $w = 1$  mm, während nach (BAW, 2023) ein Kriterium für die Zuweisung des Schadensakkumulationsindex 3 Narbentiefe  $< 1.5$  mm ist. In dem Versuch, zwischen diesen Empfehlungen und den Ergebnissen der physikalischen Modelle zu vermitteln, wird davon ausgegangen, dass für den Schadensakkumulationsindex 3 eine Rissbreite von  $w = 1.4$  mm berücksichtigt werden kann. Unter Berücksichtigung einer linearen Ausbreitungsphase wird bei einer Verringerung des Durchmessers der Stahlbewehrung von ca. 10 % eine fortgeschrittene Korrosion erreicht, die einem Schadensakkumulationsindex von 4 entspricht.

Da die Beziehung zwischen den physikalischen Parametern und dem Schadensakkumulationsindex definiert ist, ist es möglich, die Eingangsparameter der physikalischen Modelle gemäß ihren probabilistischen Modellen zu testen, um die Variation der Zeit bis zum Erreichen eines Schadensakkumulationsindex zu untersuchen. Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation sind in Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 dargestellt.



Tabelle 3-5 Zusammenhang zwischen dem Schadensakkumulationsindex, den Korrosionsphasen und den daraus resultierenden Schäden sowie den physikalischen Parametern der physikalischen Modelle.

C	D	Schadensakkumulationsindex	Korrosionsphase	Schaden	Risse Breite (mm)	Durchmesserverringernung (%)
1	0	0	keine Korrosion oder nicht sichtbare Korrosionsauslösung	kein sichtbarer Schaden		
2	1	1	Auslösung und Ausbreitung von Korrosion	erster sichtbarer Riss	0.05	2.5
3	2	2	Ausbreitung von Korrosion	Rissbildung	0.65	5
4	3	3	Ausbreitung von Korrosion	Abplatzungen	1.40	7.5
5	4	4	Ausbreitung von Korrosion	Fortgeschrittene Korrosion		10

Die Monte-Carlo-Simulation zeigt, dass es einige Diskrepanzen zwischen den Modellen gibt. Ein visueller Vergleich der Abbildung 3-4 und Abb. 3-5 zeigt zum Beispiel, dass nach dem Modell „Rissbildung und Abplatzungen“ der Schadensakkumulationsindex 3 erst nach 10 Jahren erreicht wird, während er nach dem Modell „Durchmesserverringernung“ schon nach wenigen Jahren der Lebensdauer erreicht werden kann. Diese Diskrepanzen hängen von den Unsicherheiten ab, die mit den Modellen verbunden sind, und von den Unsicherheiten, die mit der Übereinstimmung zwischen den Modellen und der Schadensklasse verbunden sind.

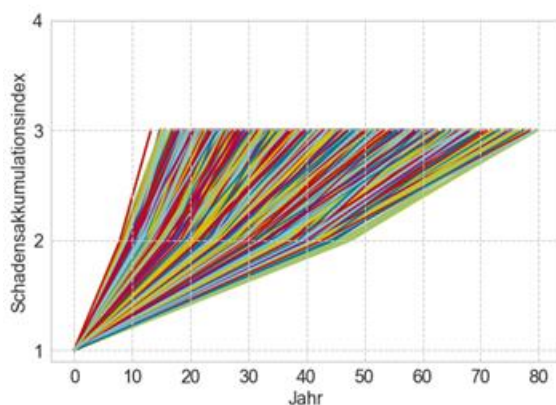


Abbildung 3-4 Monte-Carlo-Simulation des physikalischen Modells für „Rissbildung und Abplatzungen“ (N = 1000 Simulationen).

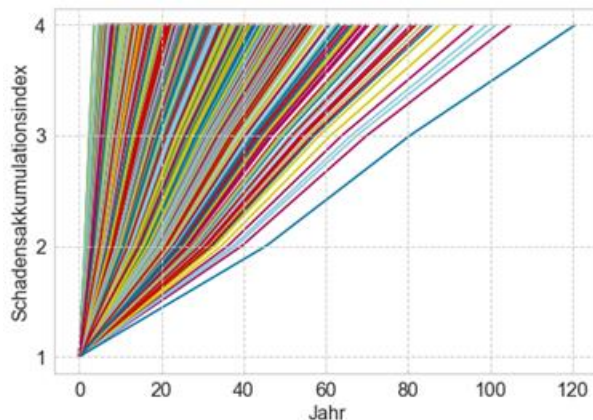


Abbildung 3-5 Monte-Carlo-Simulation des physikalischen Modells für „Durchmesser-  
verringering“ (N = 1000 Simulationen).

### 3.1.8 Integration physikalischer Modelle in die Zustandsbewertung auf der Grundlage der visuellen Prüfung

Die Integration der physikalischen Modelle, in die durch visuelle Prüfungen durchgeführte Zustandsbewertung hat zum Ziel, den Zeitpunkt zu bestimmen, an dem der Schadensakkumulationsindex 3 und 4 erreicht wird. Die durch die visuellen Prüfungen beobachteten Degradationspfade  $m$  sind

$$\mathbf{v}_{insp}^m = [0, t_{insp,1}^m, t_{insp,2}^m] \quad 23$$

wobei  $t_{insp,1}^m$  und  $t_{insp,2}^m$  der erste Zeitpunkt sind, zu dem der Schadensakkumulationsindex 1 bzw. 2 auf der Grundlage der visuellen Prüfung erreicht wird. Das Ziel ist es, den folgenden Vektor zu erhalten:

$$\mathbf{v}^m = [0, t_1^m, t_2^m, t_3^m, t_4^m] \quad 24$$

wobei  $t_1^m, t_2^m, t_3^m, t_4^m$  der erste Zeitpunkt ist, zu dem der Schadensakkumulationsindex 1, 2, 3 bzw. 4 auf dem Degradationspfad  $m$  erreicht wird.

Die Integration der physikalischen Modelle in die Zustandsbewertung erfordert die folgenden Schritte:

- Durchführen einer Monte-Carlo-Simulation: Die Zufallsparameter der physikalischen Modelle "Abplatzung" und "Durchmesser-  
verringering" werden  $n$ -mal entsprechend ihrer vorgegebenen PDF abgetastet;
- Für jede Stichprobe wird der Zeitpunkt ermittelt, an dem das Schadensniveau erreicht wird, das dem Wert des Schadensakkumulationsindex von 2, 3 und 4 entspricht.

Das Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation sind die folgenden Mengen  $V_{Abpl}$  und  $V_{Dver}$  von  $n$  Vektoren

$$V_{Abpl} = [v_{Abpl}^1, v_{Abpl}^2, \dots, v_{Abpl}^n] \quad 25$$

$$V_{Dver} = [v_{Dver}^1, v_{Dver}^2, \dots, v_{Dver}^n] \quad 26$$

Jeder Vektor der Menge  $V_{Abpl}$  setzt sich aus den folgenden Elementen zusammen:

$$v_{Abpl}^n = [0, t_{Abpl,2}^n, t_{Abpl,3}^n] \quad 27$$

wobei  $t_{Abpl,2}^n$  ist der Zeitpunkt, an dem das Schadensakkumulationsindex 2 erreicht wird, und  $t_{Abpl,3}^n$  ist der Zeitpunkt, an dem das Schadensakkumulationsindex 3 erreicht wird.

Jeder Vektor der Menge  $V_{Dver}$  setzt sich aus den folgenden Elementen zusammen:

$$v_{Dver}^n = [0, t_{Dver,2}^n, t_{Dver,3}^n, t_{Dver,4}^n] \quad 28$$

wobei  $t_{Dver,2}^n$  ist der Zeitpunkt, an dem das Schadensakkumulationsindex 2 erreicht wird,  $t_{Dver,3}^n$  ist der Zeitpunkt, an dem das Schadensakkumulationsindex 3 erreicht wird, und  $t_{Dver,4}^n$  ist der Zeitpunkt, an dem das Schadensakkumulationsindex 4 erreicht wird.

- 1) Auswahl der optimalen Degradationspfade, die sich aus der Simulation des physikalischen Modells "Rissbildung und Abplatzungen" ergeben. Die optimalen Degradationspfade sind diejenige mit dem geringsten euklidischen Abstand zu den empirischen Degradationspfaden, der sich aus visuellen Inspektionen ergeben.

$$t_{Abpl}^{opt,m} = \arg \min_{t_{Abpl}^n \in T_{Abpl}} \sqrt{(t_{Insp,2}^m - t_{Abpl,2}^n)^2} \quad 29$$

$$t_{Abpl}^{opt,m} = [0, t_{Abpl,2}^{opt,m}, t_{Abpl,3}^{opt,m}] \quad 30$$

- 2) Auswahl der optimalen Degradationspfade, die sich aus der Simulation des physikalischen Modells "Durchmesserverringering" ergeben. Die optimalen Degradationspfade sind diejenige mit dem geringsten euklidischen Abstand zu den empirischen Degradationspfaden, der sich aus visuellen Inspektionen und aus der Simulation des physikalischen Modells "Rissbildung und Abplatzungen" ergeben.

$$t_{Dver}^{opt,m} = \arg \min_{t_{Dver}^n \in T_{Dver}} \sqrt{(t_{Insp,2}^m - t_{Dver,2}^n)^2 + (t_{Abpl,3}^{opt,m} - t_{Dver,3}^n)^2} \quad 31$$

$$t_{Dver}^{opt,m} = [0, t_{Dver,2}^{opt,m}, t_{Dver,3}^{opt,m}, t_{Dver,4}^{opt,m}] \quad 32$$

Die optimalen Degradationspfade ergänzen die empirischen Degradationspfade, die sich aus der visuellen Inspektion ergeben. Auf diese Weise erhält man eine vollständige Reihe

von Zeitpunkten  $t^m$ , zu denen die Schadensakkumulationsindizes 1, 2, 3 und 4 erreicht werden.

$$t^m = [0, t_{Insp,1}^m, t_{Insp,2}^m, t_{Abpl,3}^{opt,m}, t_{Dver,4}^{opt,m}] \quad 33$$

### 3.1.9 Clustering

Der erste Schritt besteht darin, die Daten für die Analyse vorzubereiten. In diesem Schritt werden Daten, die aufgrund menschlicher Fehler bei der Aufzeichnung Unstimmigkeiten aufweisen, wie z. B. Tippfehler, entfernt. Die Daten werden bereinigt und in ein für die Analyse geeignetes Format umgewandelt. In einem zweiten Schritt werden die Daten für jedes Bauteil oder jeden Schadenstyp ausgewählt, wobei der Schwerpunkt auf den Bauteilen und Schäden liegt, die eine erhebliche Verschlechterung ihres Zustands aufweisen, d. h. für die der Schadensakkumulationsindex mindestens einen Anstieg von 0 auf 1 und von 1 auf 2 erfahren hat. Solche Schäden oder Bauteile können relevante Informationen über die Entwicklung ihres Zustands liefern. Anschließend wird eine Clusteranalyse durchgeführt, wobei ein durch drei Cluster gekennzeichnetes Modell betrachtet wird, und das Leistungsmaß berechnet wird. Der Wert des Leistungsmaßes, d. h. die Silhouetten-Width, gewährleistet, dass das Modell angemessen ist. Durchschnittliche Werte der Silhouetten-Width über 0.7 zeigen eine starke Datenstruktur und ein vernünftiges Modell. Ist der Wert niedriger (0.5-0.7), bedeutet dies, dass die Struktur schwächer ist, aber immer noch als angemessen angesehen werden kann (Rousseeuw, 1987). Der Durchschnittswert der Silhouetten-Width ist in Abb. 3-5 durch die gestrichelte rote Linie dargestellt.

Die Clusteranalyse ermöglicht es, die Bauteile oder die Schäden in drei Klassen einzuteilen:

- 3) anfällig: wenn sich der Zustand oder die Schäden mit hoher Geschwindigkeit entwickeln
- 4) normal: wenn sich der Zustand oder die Schäden mit normaler Geschwindigkeit entwickeln
- 5) robust: wenn sich der Zustand oder die Beschädigung mit geringerer Geschwindigkeit entwickelt

Es werden Daten zu folgenden Schäden und Brückenbauteilen analysiert:

- SIB-BW: Netzrisse, Querrisse, Schrägrisse, Längsrisse, Abplattung. Jede Schadensart wird im Überbau und Unterbau analysiert.
- KUBA-DB:
  1. Bauteilgruppe 1: Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger

2. Bauteilgruppe 2: Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze
3. Bauteilgruppe 3: Punktkipplager, Linienkipplager, Lager

Es gilt zu beachten, dass für die Schäden Netzrisse, Querrisse, Schrägrisse, Längsrisse und für die Bauteilgruppe 3 keine Integration eines physikalischen Modells in die Zustandsdaten möglich ist. In diesen Fällen wurden die Sequenzen der Verweildauer im Schadensakkumulationsindex 0 und 1 durch Stichproben aus der Wahrscheinlichkeitsmassenfunktion der Verweildauer im Zustandsindex 2 ergänzt.

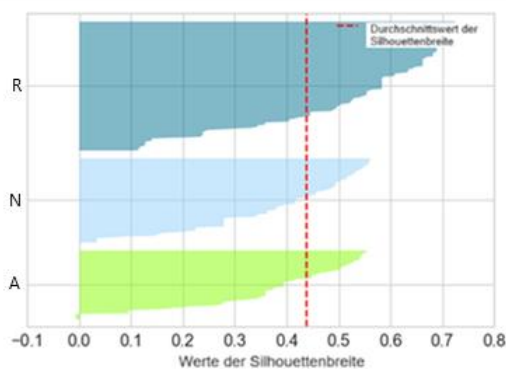


Abbildung 3-6 Darstellung der Werte des Silhouette-Widths – Beispiel: Abplattung in Unterbau (SIB-BW), A: Anfällig, N: Normal, R: Robust.

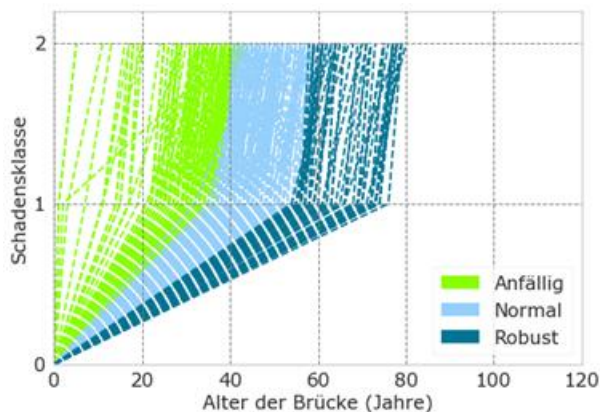


Abbildung 3-7 Ergebnisse der Clusteranalyse – Beispiel: Abplattung in Unterbau (SIB-BW).

### 3.1.10 Integration des physikalischen Modells in die Zustandsdaten

Der nächste Schritt besteht in der Vervollständigung der Zeitreihe, der jeder Schadensakkumulationsindex zugewiesen wird. Nach dem in Abschnitt 3 erläuterten Ansatz werden die folgenden Zeitreihen

$$v_{insp}^m = [0, t_{insp,1}^m, t_{insp,2}^m] \quad 34$$

mit  $t_{Abpl,3}^{opt,m}, t_{Dver,4}^{opt,m}$  ergänzt, um eine vollständige Zeitreihe für den Prozess der Korrosions-  
initiiierung und -ausbreitung zu erhalten

$$v^m = [0, t_{insp,1}^m, t_{insp,2}^m, t_{Abpl,3}^{opt,m}, t_{Dver,4}^{opt,m}]. \quad 35$$

Die Zeitreihen, die sich nur auf den Prozess der Korrosionsausbreitung beziehen, werden  
ebenfalls berücksichtigt

$$v^m = [0, (v_{insp,2}^m - v_{insp,1}^m), (v_{Abpl,3}^{opt,m} - v_{insp,1}^m), (v_{Dver,4}^{opt,m} - v_{insp,1}^m)]. \quad 36$$

Im nächsten Schritt der Analyse wird der Gammaprozess an diese Zeitreihen angepasst.

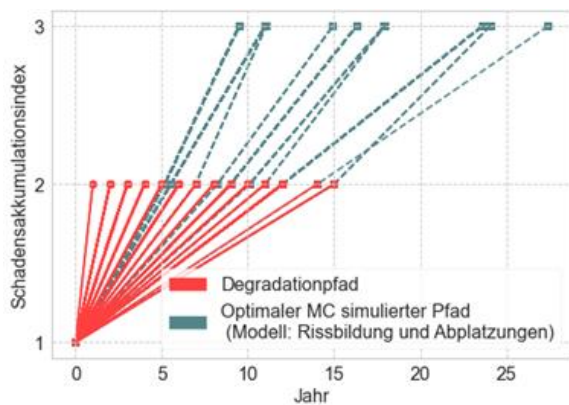


Abbildung 3-8 Integration des physikalischen Modells in die Zustandsdaten. Schritt 1: Auswahl  
des optimalen MC-Simulationspfads (Modell: Rissbildung und Abplatzungen). Beispiel:  
Abplatzung im Unterbau (SIB-BW).

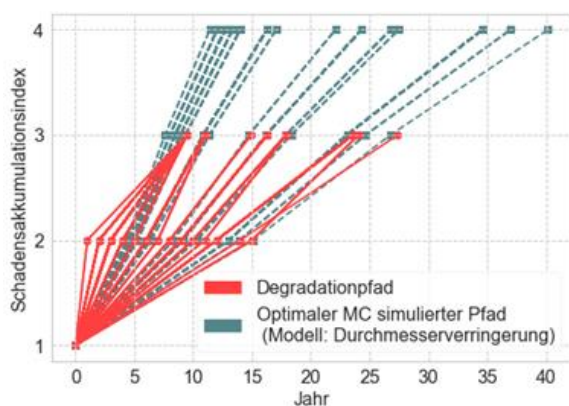


Abbildung 3-9 Integration des physikalischen Modells in die Zustandsdaten. Schritt 2: Auswahl  
des optimalen MC-Simulationspfads (Modell: Durchmesser verringern). Beispiel: Abplatzung  
im Unterbau (SIB-BW).



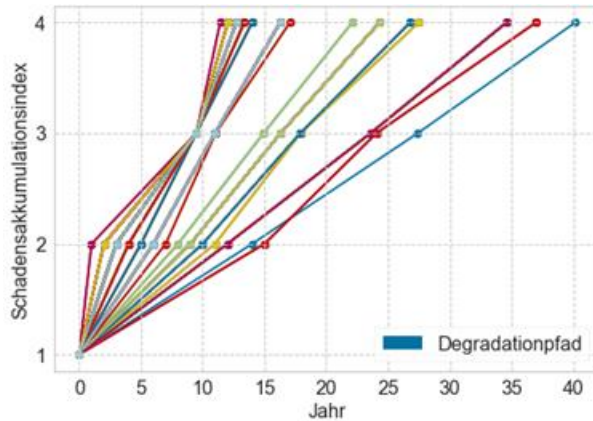


Abbildung 3-10 Vollständiger Degradationspfad mit Hilfe von physikalischen Modellen rekonstruiert – Beispiel: Abplattung im Unterbau (SIB-BW).

### 3.1.11 Anpassung und Simulation des Gamma-Prozesses

Sobald das Clustermodell definiert ist, wird ein Gamma-Prozess an jede Zeitreihe  $t^m$  angepasst. Die Parameter des Gamma-Prozesses werden anhand der Gleichungen 5, 6 und 7 bestimmt. Die Anpassung des Gamma-Prozesses und die Definition der Modellparameter  $u$ ,  $c$ ,  $b$  erfolgt unter Berücksichtigung folgender Punkte:

1. Korrosionsinitiation und -ausbreitung: In diesem Fall ist der Gamma-Prozess nicht stationär ( $b \neq 1$ ), und die zu definierenden Parameter sind  $u$ ,  $c$ ,  $b$ .
2. nur Korrosionsausbreitung: In diesem Fall wird angenommen, dass der Gamma-Prozess stationär ist ( $b = 1$ ), wie von (van Noortwijk, 2009) vorgeschlagen wurde, daher sind die zu definierenden Parameter nur  $u$  und  $c$ .

Durch die Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation des Gamma-Prozesses in Bezug auf den Beginn und die Ausbreitung der Korrosion ist es möglich, die mittlere Zeit bis zum Versagen (Erreichung des Schadensakkumulationsindex 4) sowie die Lebensdauer-Verteilungsfunktion für jedes Cluster abzuleiten.

Durch die Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation des Gamma-Prozesses, der sich nur auf die Korrosionsausbreitung bezieht, können die mittlere Zeit bis zum Erreichen des Akkumulationsindex 4 sowie die Verteilungsfunktion für ein Objekt oder einen Schaden



abgeleitet werden, dem bereits der Schadensakkumulationsindex 1 oder höher (2, 3) zugewiesen worden ist.

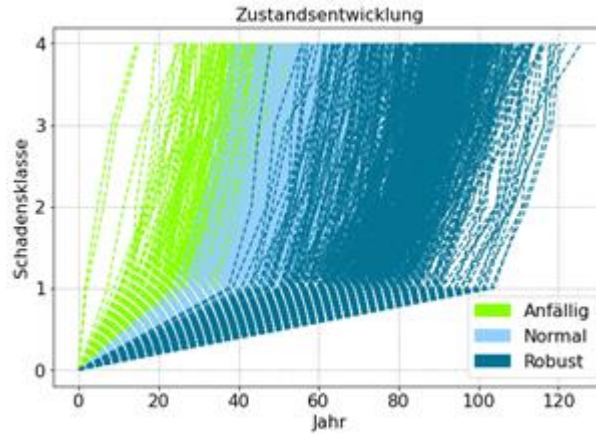


Abbildung 3-11 Simulation des Gamma-Prozesses unter Berücksichtigung der Initiierungs- und Ausbreitungsphase der Korrosion für anfällige, normale und robuste Cluster – Beispiel: Abplatzung im Unterbau (SIB-BW).

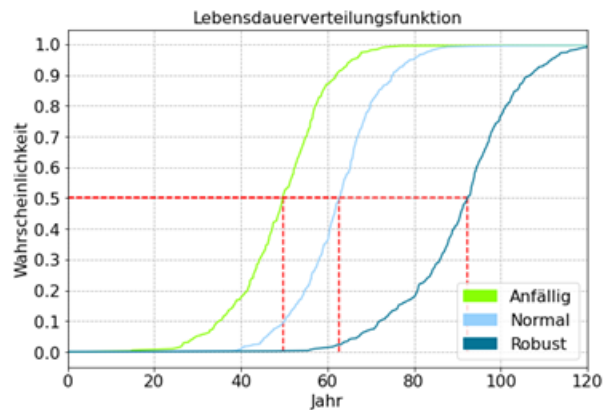


Abbildung 3-12 Verteilungsfunktion der Lebensdauer, die sich aus der Simulation des Gamma-Prozesses für anfällige, normale und robuste Cluster ergibt – Beispiel: Abplatzung im Unterbau (SIB-BW).

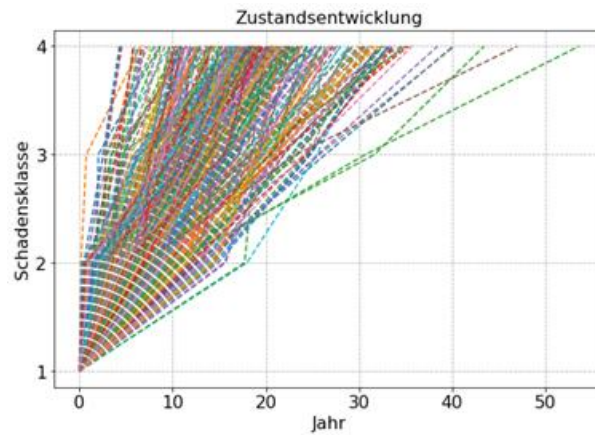


Abbildung 3-13 Simulation des Gamma-Prozesses für die Ausbreitungsphase der Korrosion – Beispiel: Abplatzung im Unterbau (SIB-BW).

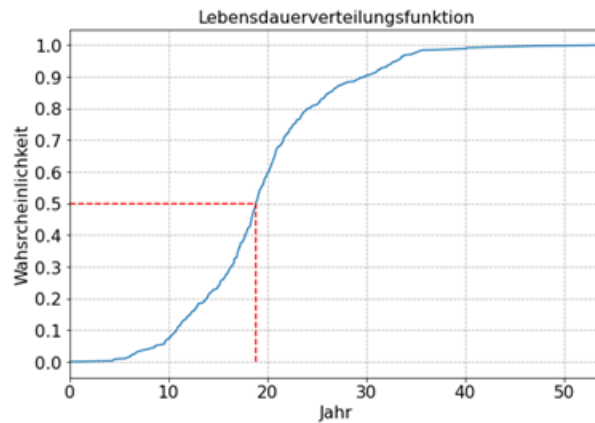


Abbildung 3-14 Verteilungsfunktion für die Lebensdauer, die sich aus der Simulation des Gamma-Prozesses für die Ausbreitungsphase ergibt – Beispiel: Abplatzung im Unterbau (SIB-BW).

### 3.2 Stochastische Methoden der Zustandsnotenprognose auf Bauwerksteil- und Objekt-Ebene

In der Literatur gibt es einige Beispiele für die Entwicklung der Prognose von Zustandsnoten der Bauwerke oder Bauteile. Eine Zusammenfassung der bisher dazu eingesetzten Methoden (Srikanth & Arockiasamy, 2020) zeigt 5 Gruppen von entwickelten Methoden:

- Deterministische Modelle bieten einen sehr simplen Zugang, der auf Regressionsanalysen von Zustandsnoten basiert,
- Zustandsbasierte stochastische Modelle nutzen Markov-Ketten, und beschreiben das Degradationsmodell durch die Wahrscheinlichkeiten der Übergänge zwischen einzelnen Zuständen,
- Zeitbasierte stochastische Modelle verwenden die probabilistische Definition der Verweildauer in einzelnen Zuständen,
- Mechanistische Modelle bilden die physikalischen Degradationsprozesse mathematisch ab (siehe auch Abschnitte 3.1.5, 3.1.6, 3.1.7), und durch ihre hohen Datenanforderungen sind sie mehr für die Analyse von Einzelbauwerken als für netzweite Analysen geeignet,
- Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) nutzen die vielfältigen KI-Algorithmen (z. B. neuronale Netzwerke, Evolutionsalgorithmen, fallbasiertes Argumentieren, etc.).

Im Rahmen von diesem Projekt wurden die stochastischen Modelle (zustandsbasiert und zeitbasiert) implementiert und weiterentwickelt – siehe Abschnitt 3.2.3. Doch um eine anwendbare Methode zu erlangen, ist es wichtig, den Verarbeitungsschritten, die der Prognose vorausgehen, eine ebenso große Bedeutung und Wichtigkeit zu schenken. Es handelt sich dabei um die Vorprozessierung der Inspektionsdaten (Abschnitt 3.2.1) und die Gruppierung der Bauwerke/Bauteile (Abschnitt 3.2.2), die die anschließende Prognose wesentlich beeinflussen. Ein Gesamtalgorithmus, der diese Schritte beinhaltet wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „TAniA“ (Weninger-Vycudil, et al., 2021) entwickelt und seine wesentlichen Schritte sind in (Prammer, Vorwagner, & Weninger-Vycudil, 2021) zusammengefasst. Die vorliegende Arbeit baut auf diesen Ergebnissen auf, entwickelt sie weiter und wendet sie an Inspektionsdaten der 3 D-A-CH Länder an.

### 3.2.1 Vorprozessierung der Daten

Die verfügbaren Daten der Bauwerksprüfungen sind grundsätzlich lückenhaft und zwischen den 3 DACH-Ländern nicht einheitlich. Die Unterschiede zwischen den Benotungssystemen der drei Länder wurden im Abschnitt 2.7 erläutert. In Deutschland wird die Zustandsnote mit 1 Nachkommastelle angegeben, was zwischen den Noten 1,0 und 4,0 zu insgesamt 31 möglichen Zuständen führt. Da bei den notenbasierten stochastischen Zustandsmodellen für jeden Notenübergang eine eigene Modellanpassung erfolgt, wären jedoch die Datenanforderungen für die Anpassung von 30 Zustandsübergänge zu hoch gewesen. Deswegen wurde stattdessen jeder Notenbereich (Tabelle 2-2) als eine Zustandsstufe betrachtet. Dies ist in Tabelle 3-6 durch die Zuweisung der Notenbereiche bzw. Noten zu einzelnen (Zustands-) Stufen ausgedrückt. Hier ist die letzte Spalte („Anhaltspunkt“) nicht als eine genaue Beschreibung des Zustandes in den einzelnen Stufen zu betrachten, denn jedes Land hat eine eigene Definition, die im Abschnitt 2.7 genau dargelegt ist. Zusätzlich wurde aus programmier-technischen Gründen für Deutschland noch die Stufe 4,0 programmintern eingeführt. Daher ergeben sich für Deutschland insgesamt 7 Zustandsstufen (d.h. 6 Stufenübergänge), und in Österreich und in der Schweiz jeweils 5 Zustandsstufen (4 Stufenübergänge).

Autobahn (DE)		ASFiNAG (AT)		ASTRA (CH)		Anhaltspunkt
Notenbereich	Stufe	Note	Stufe	Note	Stufe	
1,0 – 1,4	1,0	1	1	1	1	wie neu
1,5 – 1,9	1,5	2	2	2	2	Dauerhaftigkeit leicht geringer
2,0 – 2,4	2,0	3	3	3	3	Maßnahmen mittelfristig nötig
2,5 – 2,9	2,5		4		4	
3,0 – 3,4	3,0		4		4	
3,5 – 4,0	3,5	5	5	5	5	Maßnahmen umgehend nötig

Tabelle 3-6 Zuweisung von Zustandsstufen zu den Zustandsnoten der Bauwerksprüfung

Eine wesentliche Eigenschaft der vorhandenen Brückenprüfungsdaten ist, dass sie meistens nicht seit der Brückenerrichtung verfügbar sind. Die Bauwerke sind teilweise älter (Histogramm der Baujahre siehe Abbildung 3-15) und die Daten der Bauwerksprüfungen, die lange Zeit zurückliegen, sind nicht in den aktuellen Datenbanken eingepflegt. Die Abbildung 3-16 zeigt Histogramme der Jahre, wann die erste Bauwerksprüfung in den drei Datenbanken eingetragen ist. Während in Deutschland manche Einträge ca. im Jahr 1995 beginnen, ist es

in Österreich schon ab dem Jahr 1985; in der Schweiz (KUBA) datieren manche der ersten Bauwerksprüfungen noch vor 1980.

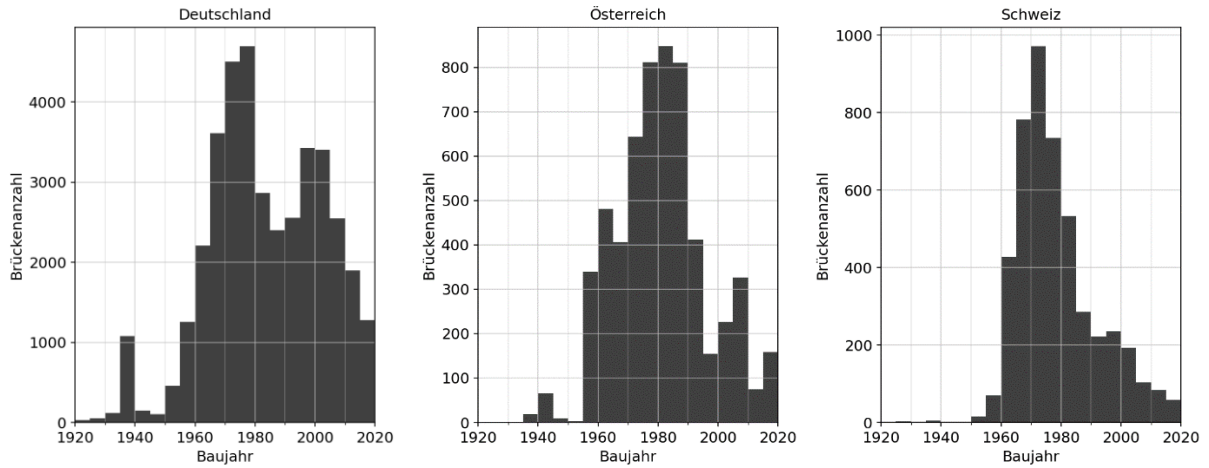


Abbildung 3-15 Baujahre der Brücken in den drei DACH-Ländern

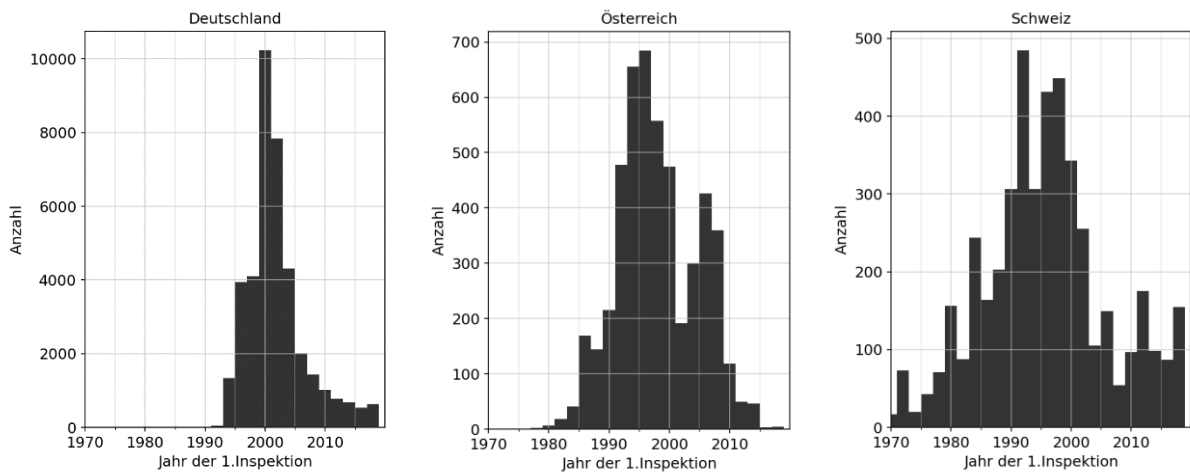


Abbildung 3-16 Jahr der ersten Bauwerksprüfung, die in Datenbanken gespeichert ist

Der Zeitabstand zwischen der Brückenerrichtung und der ersten Bauwerksprüfung, die in der Datenbank gespeichert ist, stellt einen Zeitraum dar, von dem wir die Zustandsentwicklung aufgrund fehlender Daten nicht beobachten können. Dies erschwert die Erstellung von datenbasierten Prognosemodellen. Die Histogramme der Dauer dieses datenlosen Zeitraumes sind für die drei Länder in der Abbildung 3-17 dargestellt.

Je länger der Zeitraum ist, in dem Bauwerksprüfungen einer Brücke verfügbar sind, desto bessere Prognosemodelle lassen sich aus diesen Daten erstellen. Der Zeitraum zwischen der ersten und der letzten verfügbaren Bauwerksprüfung wird hier «Inspektionszeitraum» genannt

und deren Histogramme sind in der Abbildung 3-18 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass der Inspektionszeitraum im Durchschnitt bei ca. 20 Jahren liegt.

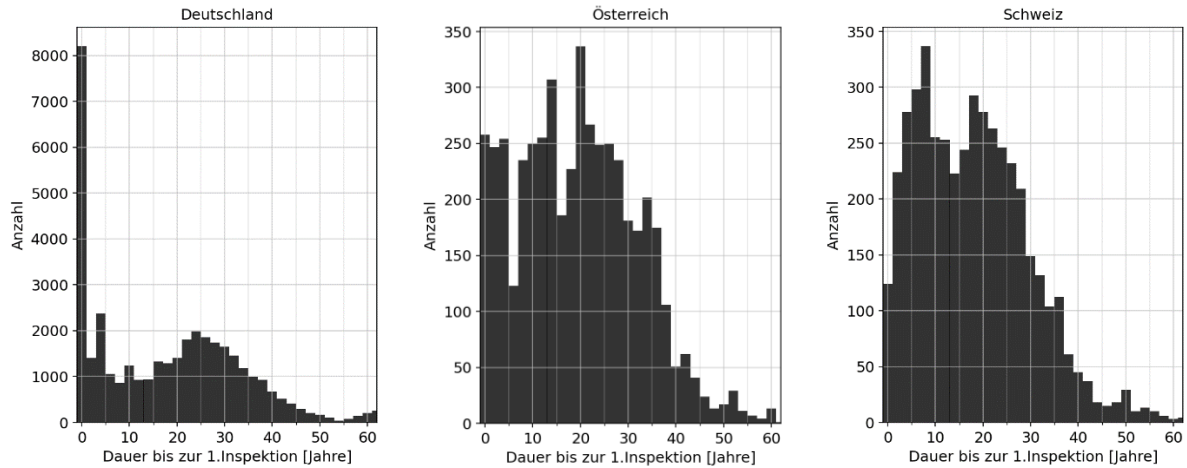


Abbildung 3-17 Zeitabstand zwischen Baujahr und der ersten gespeicherten Bauwerksprüfung

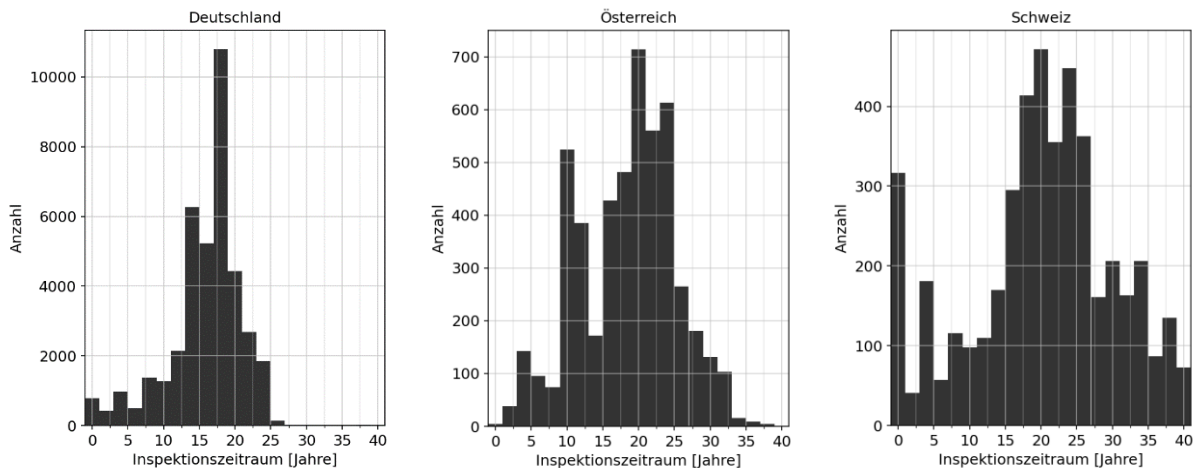


Abbildung 3-18 Durch gespeicherte Bauwerksprüfungen abgedeckter Zeitraum

Die Anzahl der Prüfungen im Inspektionszeitraum einer Brücke stellt für die Prognosemodellerstellung die Länge des Datensatzes dar, der zur Modellanpassung verfügbar ist. Die Abbildung 3-19 zeigt Histogramme der Anzahl der pro Brücke verfügbaren Bauwerksprüfungen; hier sind nicht nur die Hauptprüfungen enthalten, sondern auch alle anderen Prüfungsarten (Zwischenprüfung, Sonderprüfung), die eine Zustandsnote auf Objektebene registrieren.



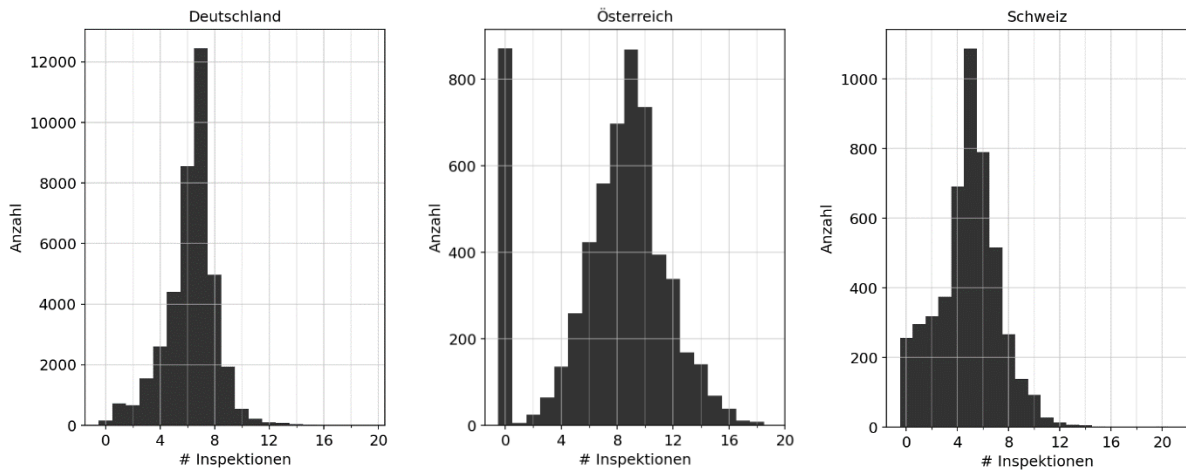


Abbildung 3-19 Anzahl der gespeicherten Bauwerksprüfungen pro Bauwerk

Im Inspektionszeitraum kann auf Basis der Zustandsnoten die Degradation der Bauwerke verfolgt werden. Durch die Verbindung der Datenpunkte der Zustandsnoten entsteht ein Degradationspfad (Abbildung 3-20). Dabei wird der Zeitpunkt des Zustandsnotenübergangs zwischen Stufe X und X+1 dort angesetzt, wo die stückweise-lineare Verbindungslinie der Datenpunkte die Stufe X+0,5 kreuzt. Im Normalfall wird erwartet, dass man einen stetig abfallenden Degradationspfad beobachtet, wenn keine Baumaßnahmen gesetzt werden. Falls im Baujahr keine Prüfung vorhanden ist, wird dort die Zustandsnote 1 angenommen. Die Verweildauern in einzelnen Zuständen X sind als die Dauer, in der sich der Degradationspfad im Zustand X befindet, definiert.

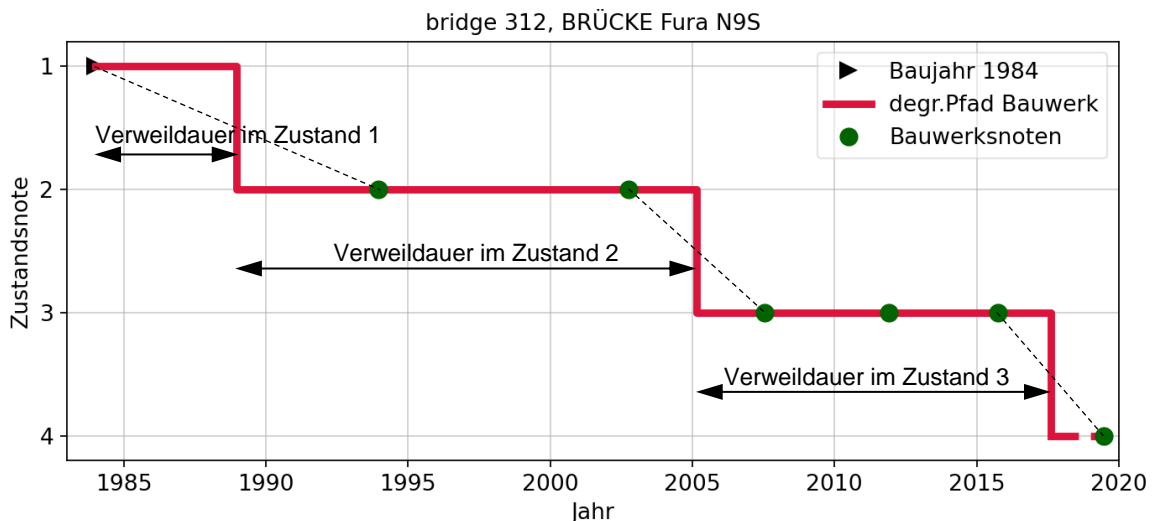


Abbildung 3-20 Beispiel eines Degradationspfades mit 6 Bauwerksprüfungen



Die Zustandsentwicklung wird jedoch auch durch die Erhaltungsmaßnahmen beeinflusst, die bei den meisten Tragwerken leider nicht zuverlässig in den Datenbanken dokumentiert sind. Dies erschwert die Interpretation von Zustandsdaten.

Im Allgemeinen wäre zu erwarten, dass sich eine durchgeführte Baumaßnahme auf die Verbesserung von der Zustandsnote der Brücke oder ihrer Bauteile auswirken würde. Eine Analyse der vorhandenen Daten über Baumaßnahmen in SIB-Bauwerke hat gezeigt, dass nur ca. 40% der gespeicherten Baumaßnahmen mit einer Zustandsnotenverbesserung in Verbindung gebracht werden konnten. Dass die Baumaßnahmen bei relativ wenigen Bauwerken in der SIB-Datenbank dokumentiert sind, zeigte sich wiederum dadurch, dass nur ca. 2,6% der registrierten Zustandsnotenverbesserungen auf Objektebene den gespeicherten Baumaßnahmen zuordenbar sind. In der KUBA-Datenbank sind die Erhaltungsmaßnahmen ebenfalls nicht konsequent gespeichert; und in der IMT-Datenbank sind diese Informationen nicht vorhanden. Aus diesem Grund war es notwendig, die Baumaßnahmen durch Rückschlüsse aus der Zustandsnotenentwicklung abzuschätzen.

Dabei wird angenommen, dass eine Zustandsnotenverbesserung eine Baumaßnahme als Ursache hat. Deshalb wird grundsätzlich eine Baumaßnahme überall dort vermutet, wo eine Verbesserung des Bauwerks- oder Bauteilzustandes beobachtet wurde. Die Abbildung 3-21 zeigt zwei Beispiele der Zustandsnotenentwicklung auf Bauwerksebene. Dargestellt sind die Prüfergebnisse (grün), interpretierte Degradationspfade (rot) und vermutete Baumaßnahmen (schwarzer Pfeil).

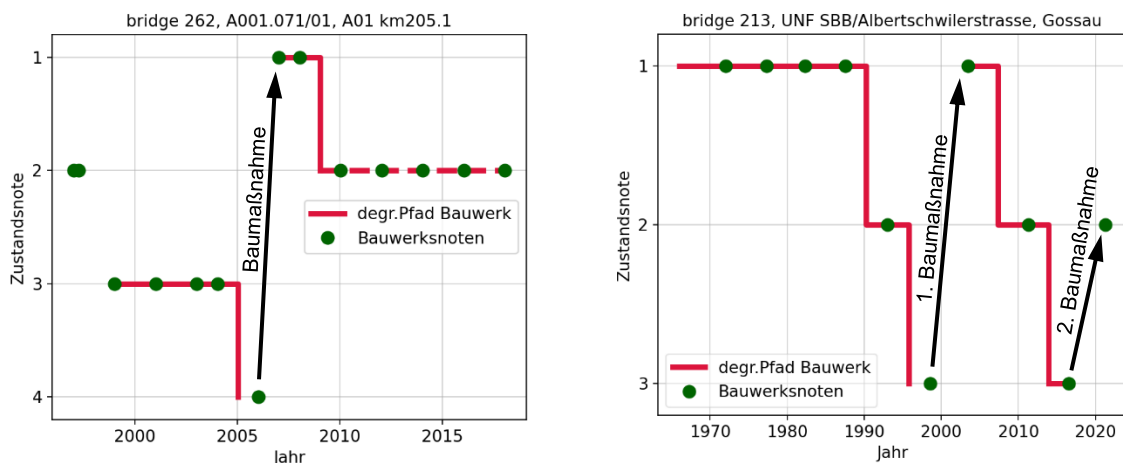


Abbildung 3-21 Zwei Beispiele von beobachteter Entwicklung der Zustandsnoten und der vermuteten Baumaßnahmen

Eine Baumaßnahme unterbricht den bisherigen Degradationspfad; nach der Baumaßnahme beginnt ein neuer Degradationspfad am selben Bauwerk. Bei langen Inspektionszeiträumen können sich an einem Bauwerk/Bauteil daher auch 3 (theoretisch auch mehr) Degradationspfade ergeben.

Diese Art der Zustandsnoteninterpretation führt jedoch relativ oft zu unrealistischen Schlussfolgerungen, insbesondere bei Zustandsnotenentwicklungen, die häufige Notenänderungen beinhalten (Abbildung 3-22). In diesem Fall würden sich unrealistisch oft vermutete Baumaßnahmen ergeben.

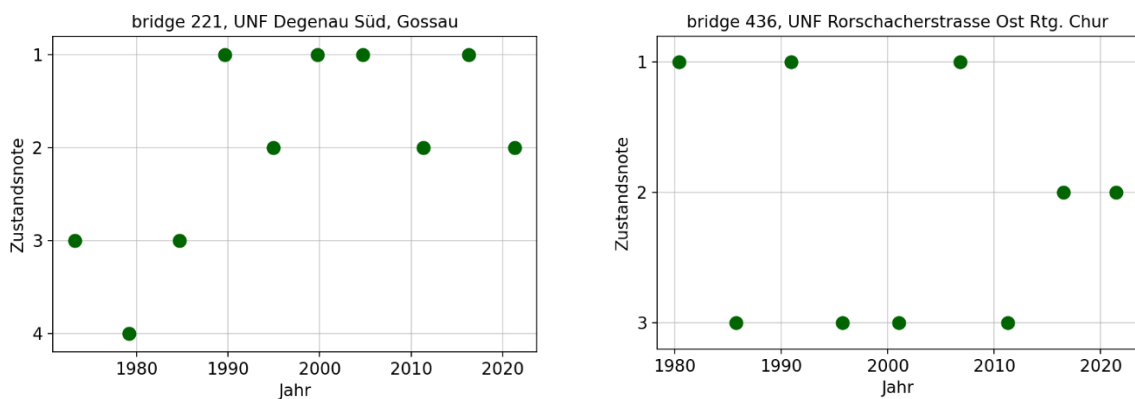


Abbildung 3-22 Zwei Beispiele der Zustandsnotenentwicklung mit unklarem Rückschluss auf vermutete Baumaßnahmen

Der Grund dafür wird darin vermutet, dass die Zuweisung der Zustandsnoten entweder mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist oder gewisse Aspekte widerspiegelt, die mit der physischen Degradation nicht im direkten Zusammenhang stehen (z. B. Graffiti, Bewuchs, usw.). Deswegen wurde in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss eine Adaptierung der Zustandsnotenentwicklung implementiert, die sich aus folgenden Schritten zusammensetzt (grafische Darstellung in Tabelle 3-7):

1. Glättung von kurzfristigen (1 Inspektion) Sprüngen zwischen den Stufen 1 und 2, wenn  $\Delta t \leq 12$  Jahre ist, aufgrund der geringen Unterschiede zwischen diesen Stufen;
2. Glättung von kurzfristigen (1 Inspektion) Sprüngen aufgrund der Vermutung, dass diese nicht mit Degradationsprozessen zusammenhängen, und zwar wenn:
  - a) der Notenausreißer in Richtung schlechtere Stufe zeigt und  $\Delta t \leq 6$  Jahre ist, oder
  - b) der Notenausreißer in Richtung bessere Stufe zeigt und  $\Delta t \leq 12$  Jahre ist;
3. Glättung von Ausreißern im Zuge einer Stufenänderung, welche die Größe der Änderung anfangs überschätzt haben, und zwar wenn:

- a) die Änderung in Richtung schlechtere Stufe zeigt und  $\Delta t_1 \leq 6$  Jahre und  $\Delta t \leq 12$  Jahre ist, oder
  - b) die Änderung in Richtung bessere Stufe zeigt und  $\Delta t \leq 12$  Jahre ist;
4. Adaptierung, wenn sich durch die Interpretation der Notenentwicklung unrealistisch häufige Baumaßnahmen ergeben würden: wenn eine Baumaßnahme durch die Korrektur von genau einer Zustandsnote entfallen würde, und die letzte Baumaßnahme oder das Baujahr max. 10 Jahre zurückliegen, wird eine Adaptierung durchgeführt.

Die beschriebenen Adaptierungen der erfassten Zustandsnoten bewirken, dass insgesamt weniger Baumaßnahmen in die Zustandsnotenentwicklung hineininterpretiert werden. Dadurch wird vermieden, dass die Zustandsnotenentwicklung eines Bauwerkes in zu viele Degradationspfade unterteilt wird, und dass diese eine zu rasante Degradationsentwicklung aufweisen. Die Auswirkung auf die Dauer der Zeitabschnitte zwischen den vermuteten Baumaßnahmen ist in der Tabelle 3-8 beispielhaft dargestellt. Der Parameter  $\Delta t_{bj,lim}$  wird im weiteren Text erklärt. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass sich die Zeit bis zur ersten Baumaßnahme zwischen den Annahmen in Spalte 1 und Spalte 3 verlängert. Die Annahmen in Spalte 1 resultierten darin, dass bei 22.825 Bauwerken mindestens eine Baumaßnahme vermutet wird, und bei 6.492 Bauwerken mindestens zwei Baumaßnahmen. Dagegen resultieren die Annahmen in den Spalte 2 und 3 in 16.962 Bauwerke mit mindestens einer Baumaßnahme und 2.597 Bauwerke mit mindestens zwei Baumaßnahmen.

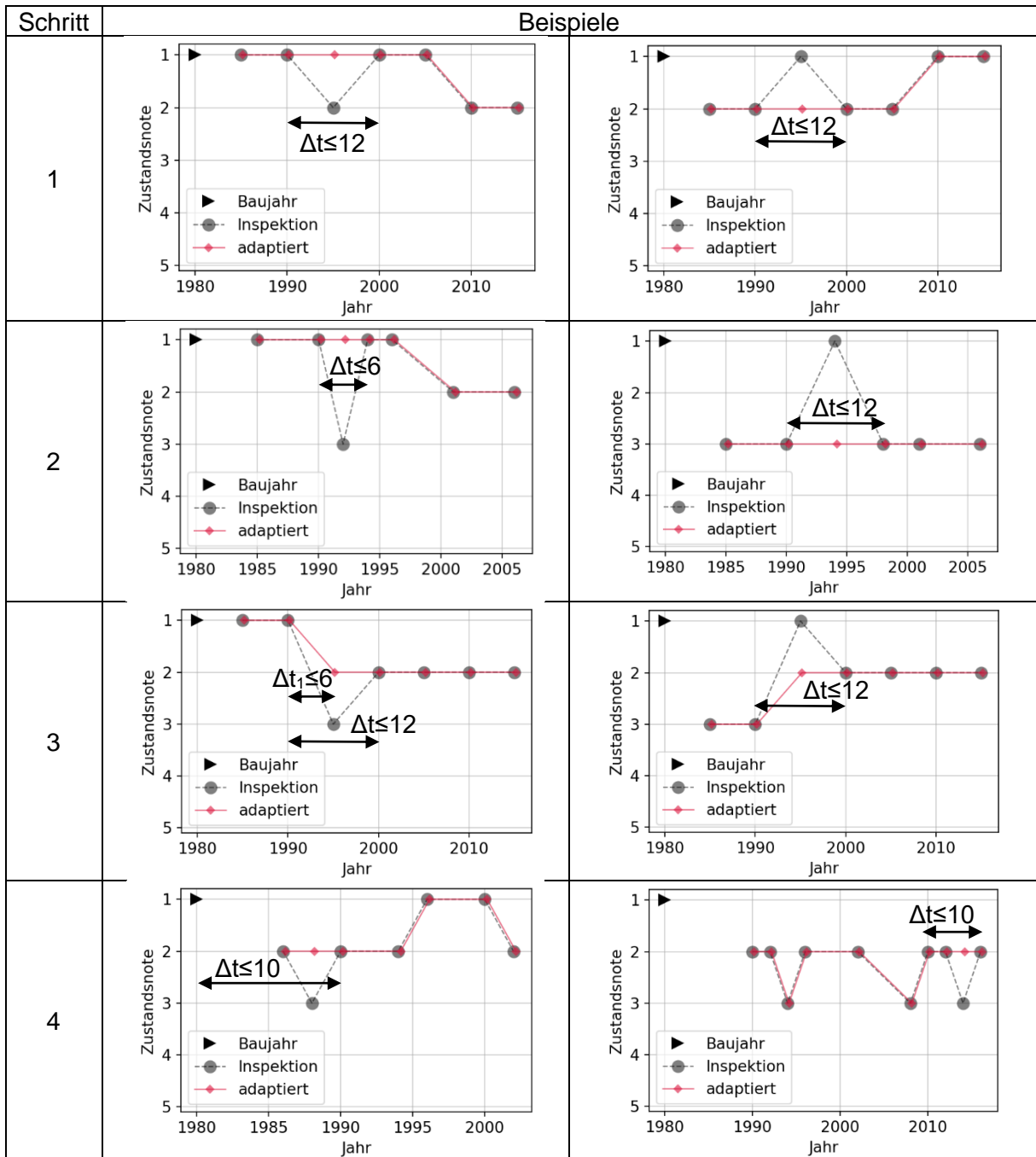


Tabelle 3-7 Visualisierung der Notenadaptierungen anhand von Beispielen

Die Dauer zwischen der ersten und zweiten Baumaßnahme befindet sich in der Spalte 1 Großteils unter 10 Jahren, was unrealistisch erscheint. Die Spalten 2 und 3 zeigen ein etwas ausgeglicheneres Bild.

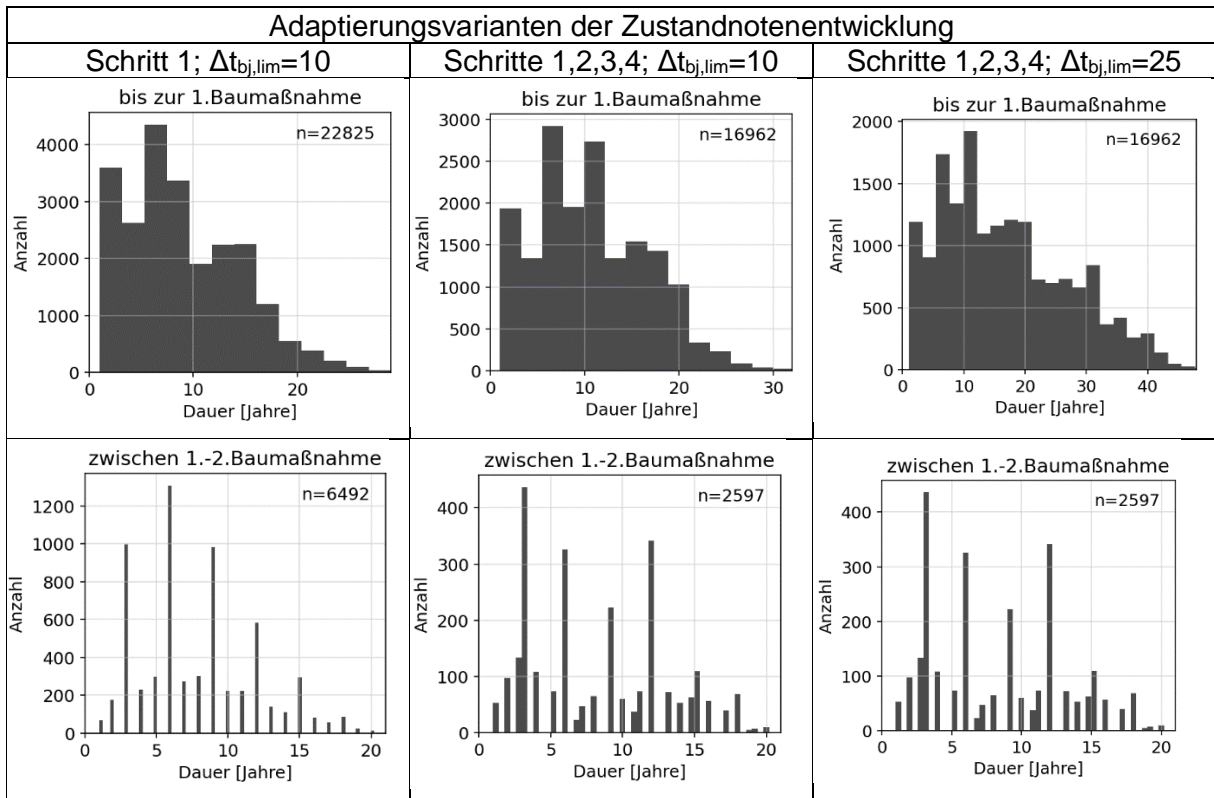


Tabelle 3-8 Auswirkung der Notenadaptierungsvarianten am Beispiel der Brücken in Deutschland (Objektebene). Dauer zwischen Baujahr und erster vermuteten Baumaßnahme (oben); Dauer zwischen erster und zweiter vermuteten Baumaßnahme (unten).

Das Problem der unvollständigen Daten betrifft insbesondere die älteren Bauwerke im Zeitraum zwischen der Brückenerrichtung und der ersten gespeicherten Prüfung. Die Anzahl der betroffenen Bauwerke ist beträchtlich (siehe Abbildung 3-17). Um mit diesen Daten umgehen zu können, wird folgende Annahme getroffen: in den ersten  $\Delta t_{bj,lim}$  Jahren nach Brückenerrichtung ist mit keinen Baumaßnahmen zu rechnen. Das heißt, wenn der Zeitabstand zwischen dem Baujahr und der ersten verfügbaren Bauwerksprüfung  $\Delta t_{bj} \leq \Delta t_{bj,lim}$  ist, wird ein kontinuierlicher Degradationspfad dazwischen angenommen, sowie auch die Zustandsnote 1 zum Zeitpunkt der Brückenerrichtung. Es wurde mit parallel mit zwei Annahmen über den Wert von  $\Delta t_{bj,lim}$  gearbeitet:

- $\Delta t_{bj,lim} = 10$  Jahre
- $\Delta t_{bj,lim} = 25$  Jahre

Die Abbildung 3-23 zeigt Beispiele der Ermittlung von Degradationspfaden, wenn  $\Delta t_{bj} \leq \Delta t_{bj,lim}$  ist. Der unvollständige Teil des Degradationspfades wird gestrichelt dargestellt: in der Abbildung links hat der Degradationspfad einen Notenübergang (von 1 zu 2), daher kann die

Verweildauer im Zustand 1 ermittelt werden. Im Zustand 2 ist der Pfad unvollständig, weil der Zeitpunkt des Übergangs in die Note 3 unbekannt ist; die Verweildauer im Zustand 2 kann nicht ermittelt werden. In der Abbildung rechts ergeben sich zwei Degradationspfade: der erste Pfad ist zwischen dem Baujahr und 2011, wo ein Übergang in die Note 3 stattfand. Zwischen 2012 und 2014 wird eine Baumaßnahme vermutet. Der zweite Pfad beginnt in 2014 und besteht nur aus einem unvollständigen Teil im Zustand 2.

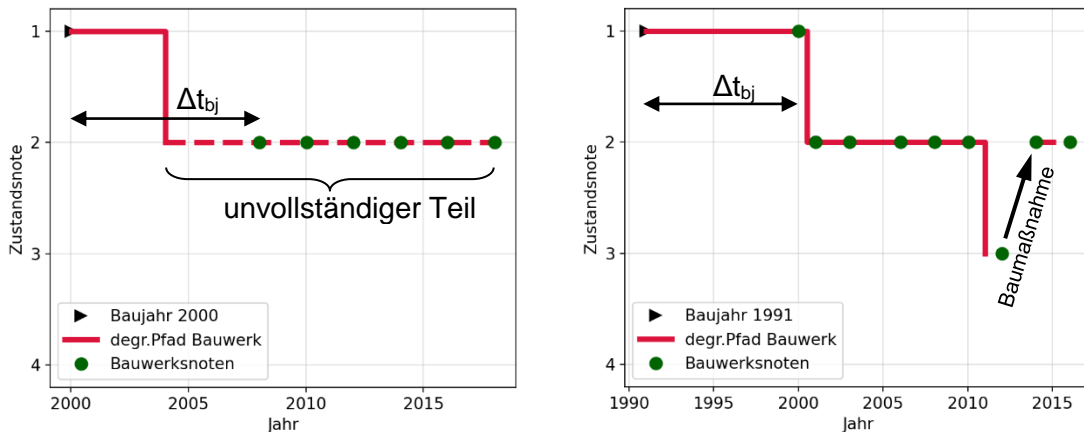


Abbildung 3-23 Zwei Beispiele der Verbindung vom Degradationspfad zwischen dem Baujahr und der ersten verfügbaren Bauwerksprüfung ( $\Delta t_{bj} \leq \Delta t_{bj,lim}$ )

Die Abbildung 3-24 zeigt Beispiele der Ermittlung von Degradationspfaden, wenn  $\Delta t_{bj} > \Delta t_{bj,lim}$  ist. In der Abbildung links ist die erste Bauwerksprüfung im Jahr 1988 verfügbar (Note 3) und kann daher nicht durch einen Degradationspfad mit dem Baujahr verbunden werden. Es kann nicht festgestellt werden, wie lange vorher die Zustandsnote 3 schon andauerte, und auch nicht, wie lange nachher sie noch andauern würde, denn zwischen 1988 und 2000 wird eine Baumaßnahme vermutet, die eine Zustandsnote 2 als Folge hatte. Der Degradationspfad beginnt daher im Jahr 2000. In Abbildung rechts kann nicht festgestellt werden, ob zwischen dem Baujahr 1961 und der ersten Bauwerksprüfung in 1988 eine Baumaßnahme stattfand oder nicht ( $\Delta t_{bj} > \Delta t_{bj,lim}$ ), deshalb wird hier ebenfalls kein Degradationspfad gelegt. Das Bauwerk verbleibt zwischen 1988 und 2018 im Zustand 3, es kann jedoch nicht festgestellt werden, wann dieser Zustand anfang und wann er enden wird, daher kann gar kein Degradationspfad ermittelt werden.

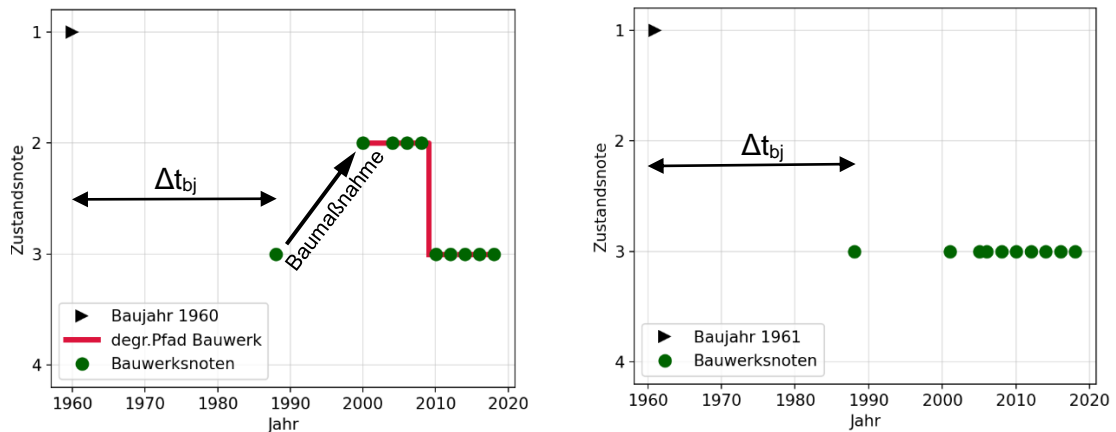


Abbildung 3-24 Zwei Beispiele, wo die Verbindung vom Degradationspfad zwischen dem Baujahr und der ersten verfügbaren Bauwerksprüfung nicht möglich war ( $\Delta t_{bj} > \Delta t_{bj,lim}$ )

Der Beginn jedes Degradationspfades muss bekannt sein, entweder durch das Baujahr (wenn  $\Delta t_{bj} \leq \Delta t_{bj,lim}$  ist), oder durch einen Zustandsnotenübergang. Dieser kann entweder durch Zustands-Verschlechterung (Degradation) oder -Verbesserung (Baumaßnahme) stattfinden.

### 3.2.2 Gruppierungsalgorithmen

Um eine Zustandsprognose zu erstellen, die auf Daten der registrierten Zustandsnoten basiert, müssen zunächst die Bauwerke und Bauteile in Gruppen aufgeteilt werden. Für jede Gruppe wird anschließend ein stochastisches Prognosemodell erstellt (Abbildung 3-25).

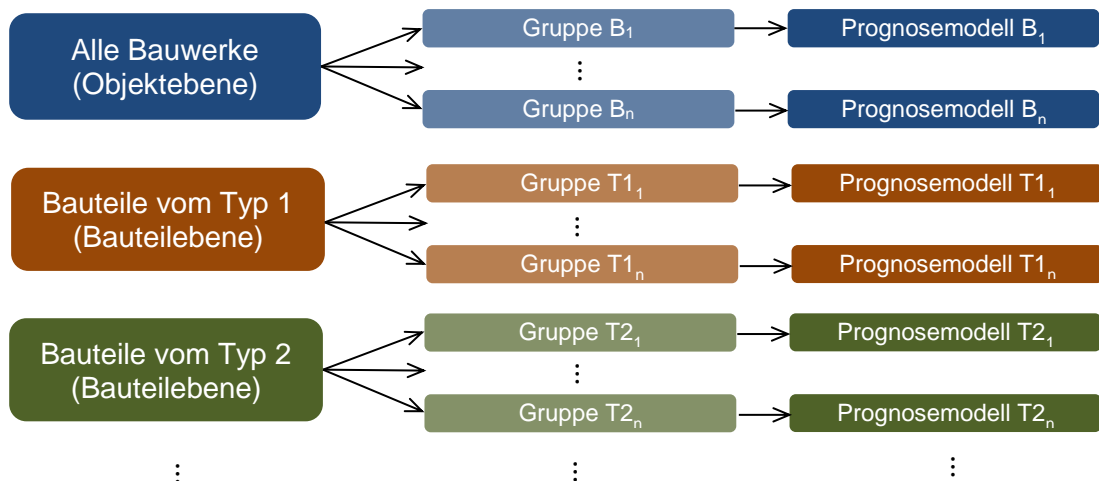


Abbildung 3-25 Schema der Aufteilung auf Gruppen

Die Aufteilung auf Gruppen hat das Ziel, Bauwerke/Bauteile mit ähnlichen Eigenschaften zusammenzuführen. Weiterhin ist auch ein Ziel, Bauwerke/Bauteile mit einer ähnlichen



Zustandsnotenentwicklung in gemeinsame Gruppe einzuordnen, denn das verringert die Streuung der Daten innerhalb der Gruppe und so ermöglicht, genauere Prognosemodelle zu erstellen.

Im Forschungsprojektes „TAniA“ (Weninger-Vycudil, et al., 2021) wurde eine Methodik vorgeschlagen, in der im ersten Schritt mit Hilfe einer Random-Forest Analyse die wichtigen Eigenschaften, die sich auf die Verweildauern in einzelnen Zuständen auswirken, identifiziert werden. Um hier den Umgang mit kategorischen Parametern<sup>1</sup> zu ermöglichen, wurde deren Enkodierung durchgeführt. Dabei wird die Spalte des Parameters, der  $k$  Kategorien aufweist, in  $k$  Spalten aufgeteilt, die in binäre Werte umgewandelt werden (Abbildung 3-26). Diese Random-Forest Analyse wird separat für die Verweildauern in einzelnen Zuständen durchgeführt; für jede Zustandsstufe wird ein eigenes Modell gebildet.

ursprünglich	enkodiert			
Baumaterial	Baumaterial_Stahlbeton	Baumaterial_Spannbeton	Baumaterial_Verbund	Baumaterial_Stahl
Stahlbeton	1	0	0	0
Stahlbeton	1	0	0	0
Spannbeton	0	1	0	0
Verbund	0	0	1	0
Stahl	0	0	0	1
Verbund	0	0	1	0
Spannbeton	0	1	0	0

Abbildung 3-26 Schema der Kodierung eines kategorischen Parameters

Aus dem an die Daten angepassten Random-Forest wird ein Entscheidungsbaum ausgewählt, der die Aufteilung der Bauwerke/Bauteile auf Gruppen definiert. Die Abbildung 3-27 zeigt beispielhaft eine Aufteilung basierend auf 2 Parametern: Baujahr und Länge. Die «Blätter» des Entscheidungsbaums stellen die einzelnen Gruppen dar; in diesem Fall 8 Gruppen (grün eingekreist).

<sup>1</sup> Kategorische Parameter sind solche, die keine numerischen Werte haben, sondern Kategorien. Zum Beispiel der Parameter «Baumaterial» hat Kategorien: Stahlbeton, Spannbeton, Stahl, Verbund, usw. Im Gegensatz zu numerischen Parametern lassen sich die Werte von kategorischen Parametern grundsätzlich nicht in eine eindeutige, objektive Reihenfolge sortieren.

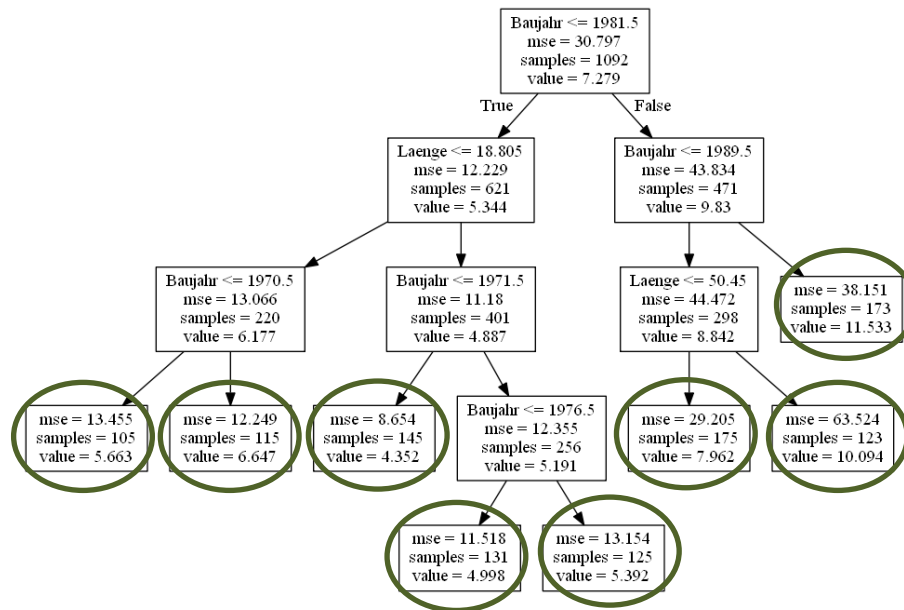


Abbildung 3-27 Beispiel der Aufteilung auf Gruppen durch einen Entscheidungsbaum [aus dem Forschungsprojekt „TAniA“ (Weninger-Vycudil, et al., 2021)]

In diesem Projekt wurde diese Methodik, die in (Prammer, Vorwagner, & Weninger-Vycudil, 2021) beschrieben ist, implementiert. Deren Anwendung an die Brückenprüfungsdaten der DACH-Länder war nicht ganz zufriedenstellend. Dabei haben sich zwei Problembereiche herausgestellt:

- Kategorische Variablen: durch deren Enkodierung betrachtet die Random-Forest Analyse jede Parameterkategorie als eigenen Parameter, was dazu führte, dass deren Wichtigkeit, die in der Analyse quantifiziert wird, meist klein ausfiel (vermutlich eine Konsequenz des Anstiegs der Parameteranzahl) und infolgedessen in dem iterativen Verfahren eliminiert wurde;
- Die Auswahl des Entscheidungsbaums aus dem Random-Forest ist durch keine objektiven Kriterien gesichert.

Die daraus resultierenden Gruppen wiesen relativ große Streuungen auf, was sich dann später auf die Genauigkeit der Prognosemodelle auswirkte. Deshalb wurde trotz der Vorteile der „TAniA“-Methodik (z. B. die leicht nachvollziehbaren Kriterien der Gruppeneinteilung, die dadurch einfach manuell korrigierbar sind) eine alternative Methode der Gruppeneinteilung gesucht und entwickelt.

In dieser Methodik werden mehrere Gruppierungsvarianten erstellt, und für jede Variante wird ein Prognosemodell erstellt. Die Auswahl der zu verwendenden Gruppierungsvariante erfolgt

erst bei der Anwendung am konkreten Bauwerk. Die Erstellung der Gruppierungsvarianten erfolgt in vier Schritten:

1. Gruppeneinteilung mit allen Kombinationen der Werte von kategorischen Parametern. Hier musste eine Mindestgruppengröße gewählt werden, damit eine statistische Auswertung pro Gruppe möglich ist. Da die Degradationspfade i.d.R. unvollständige Vektoren der Zustandsverweildauern sind, sind hier etwas höhere Anforderungen an die Datenmenge im Vergleich zu einer Gruppe von Skalarwerten angebracht. Deshalb wurde hier eine Mindestgruppengröße von 20 Degradationspfaden gewählt, anstatt der bei Skalarwerten oft verwendeten Mindestanzahl von 9 Proben.
2. Zusammenführung der im Schritt 1 erstellten Gruppen, die ähnliche Notenentwicklung aufweisen
3. Aufteilung der Gruppen aus den Schritten 1 und 2 durch Clustering-Methoden, mit dem Ziel, Gruppen mit ähnlicher Notenentwicklung zu schaffen. Dieser Schritt erzeugt mehrere Aufteilungsvarianten, die sich durch die Anzahl der Cluster unterscheiden.
4. Für jede Aufteilung aus dem Schritt 3 wird ein Random-Forest Klassifikator angepasst, der eine Zuordnung zwischen den Bauwerks- oder Bauteileigenschaften und den einzelnen Gruppen schafft.

Durch diesen Vorgang werden insgesamt 4 Sätze von Gruppierungen erzeugt. Der Prozess ist beispielhaft in der Abbildung 3-28 dargestellt. Der erste Satz von Gruppierungen entsteht durch alle Kombinationen der Werte von kategorischen Parametern, in denen sich mindestens 20 verfügbare Degradationspfade ergeben (in diesem Beispiel: 13 Gruppen). Der zweite Satz entsteht durch die Zusammenführung der Gruppen aus Satz 1 anhand ähnlicher Notenentwicklung. Die Gruppierungssätze 3 und 4 entstehen durch Clustering jeweils aus Sätzen 1 und 2, wobei hier jeweils mehrere Varianten (Clusteranzahl) erzeugt werden.

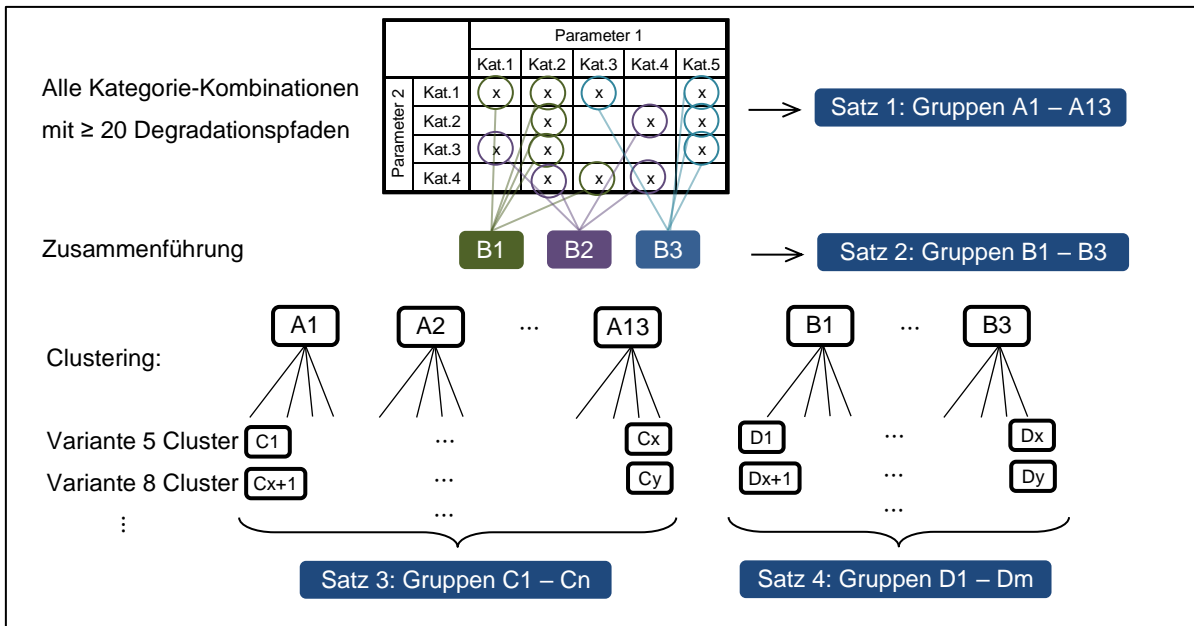


Abbildung 3-28 Schema der Aufteilung von Bauwerken/Bauteilen auf Gruppen

**Im Schritt 1** werden die Gruppen nach verschiedenen Kombinationen der kategorischen Parameter gebildet. Durch Aufbereitung der Daten in den Datenbanken SIB, IMT, KUBA wurden kategorische Parameter identifiziert, und für jeden Parameter wurden bis zu 6 Kategorien identifiziert (Tabelle 3-9). Dabei wurde darauf geachtet, dass jede Parameterkategorie eine ausreichende Datenmenge aufweist. Hier zeigten sich Unterschiede zwischen Datenbanken: der Parameter «Zementtyp» war nur in der SIB-Datenbank verfügbar, nicht in IMT und KUBA. Weiterhin konnte aus der KUBA die Information über den Querschnittstyp nicht gewonnen werden, deshalb entfällt auch dieser Parameter in den Analysen der Schweizer Bauwerke.

Kategorie Nr.	kategorischer Parameter			
	Baumaterial	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Zementtyp
1	Stahlbeton	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	I
2	Spannbeton	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	II
3	Verbund	Träger+Platte	Rahmen	III
4	Stahl	Hohlkasten	Fachwerk	IV
5	unbekannt	Trog	Bogen oder Schrägseil	unbekannt
6	-	unbekannt	unbekannt	-

Tabelle 3-9 Kategorische Parameter und ihre Werte

Anschließend wird für jede erstellte Gruppe aus deren Degradationspfaden (aus dem Verlauf der Zustandsnoten ermittelt, vgl. Abbildung 3-20) ein Prognosemodell abgeleitet (siehe Abschnitt 3.2.3). Ein Beispiel der Zustandsprognose ist in der Abbildung 3-29 dargestellt. Die hier gezeigten Kennzahlen sind:

- Median der Zustandsprognose (dicke schwarze Linie)
- 16%- und 84%-Quantile<sup>2</sup> der Zustandsprognose (dicke gestrichelte Linien)
- Verteilungsdichte vom Zeitpunkt der Zustandsnotenübergänge (hellblaue Flächen)
- 5%-, 25%-, 75%- und 95%-Quantile vom Zeitpunkt der Zustandsnotenübergänge (kurze blaue vertikale Linien)

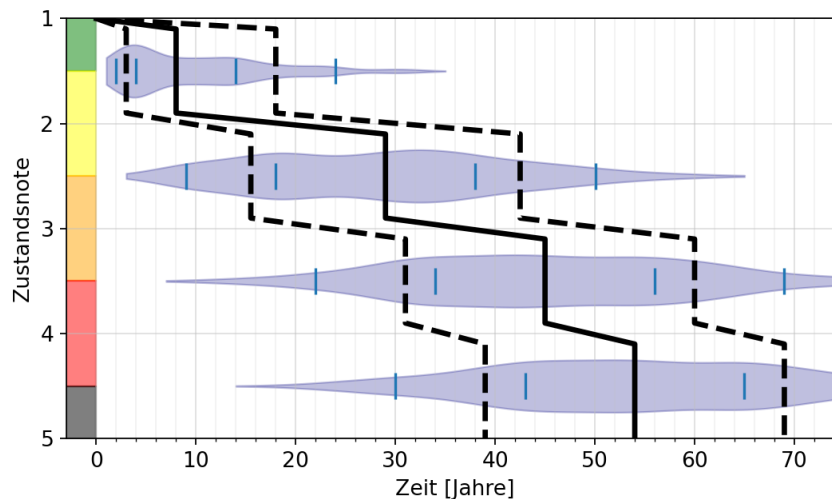


Abbildung 3-29 Beispiel einer Zustandsnotenprognose

**Im Schritt 2** erfolgt die Zusammenführung der Gruppen aus dem Satz 1. Der Zweck davon ist, kleinere Gruppen aus dem Satz 1, die ähnliche Zustandsentwicklung aufzeigen, zu vereinen. Dadurch soll die Datenmenge pro Gruppe maßgeblich erhöht werden, während die Streuung innerhalb der Gruppen nur leicht ansteigen sollte. Die Zusammenführung erfolgt durch einen Clustering-Algorithmus. Dazu wurde die Affinitätsfortpflanzung-Methode gewählt (Frey & Dueck, 2007), konkret ihre Implementierung «AffinityPropagation» in der Python-Bibliothek «scikit-learn». Die Gruppierung erfolgt auf der Basis von einer Distanzmatrix, die «Distanzen» zwischen jedem Paar von Elementen enthält. Dabei sind die Elemente die

<sup>2</sup> Genauer sind es die 15,86552% und 84,13447%-Quantile, welche bei einer Normalverteilung den Werten bei  $\pm 1\sigma$  entsprechen. Um den Berichtstext zu vereinfachen, werden diese im gesamten Bericht als „16%“ und „84%“-Quantile bezeichnet.

Zustandsprognosen, die sich aus einzelnen Gruppen aus dem Gruppensatz 1 ergeben. Die «Distanz» zwischen zwei Gruppen  $i, j$  wurde wie folgt definiert:

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{g=2}^n \left( (a_{50,i,g} - a_{50,j,g}) \cdot s_{i,g} \cdot s_{j,g} \right)^2}, \quad 37$$

wobei:  $g$ ...Zustandsstufe von 2 bis  $n$ ,

$a_{50,i,g}$ ...Medianalter beim Erreichen der Stufe  $g$  gemäß Prognose für Gruppe  $i$ ,

$a_{50,j,g}$ ...Medianalter beim Erreichen der Stufe  $g$  gemäß Prognose für Gruppe  $j$ ,

$s_{i,g}, s_{j,g}$ ...Skalierungsfaktoren der Stufe  $g$  jeweils für Gruppe  $i$  und  $j$ .

Die Skalierungsfaktoren berücksichtigen die Prognosestreuungen, sowie die zugrundeliegende Datenmenge:

$$s_{i,g} = \sqrt{\frac{a_{84,i,g} - a_{16,i,g}}{a_{50,i,g}} \cdot \frac{\bar{r}_{ndp}}{r_{ndp,i,g}}}, \quad 38$$

$$r_{ndp,i,g} = \frac{n_{vd,i,g} + 0,35 \cdot n_{uv,i,g}}{n_{dp,i}}, \quad 39$$

wobei:  $a_{16,i,g}$  und  $a_{84,i,g}$  ... 16% und 84%-Quantile<sup>3</sup> des Alters beim Erreichen der Stufe  $g$  gemäß Prognose für Gruppe  $i$ ,

$r_{ndp,i,g}$ ...relative Anzahl der zugrundeliegenden Datenpunkte für Stufe  $g$  in Gruppe  $i$ ,

$\bar{r}_{ndp}$ ...Mittelwert von  $r_{ndp,i,g}$  über alle Zustandsstufen und Gruppen im Satz 1,

$n_{vd,i,g}$ ...Anzahl der verfügbaren Daten der Verweildauer in der Stufe  $g$  in Gruppe  $i$ ,

$n_{uv,i,g}$ ...Anzahl der unvollständigen Teile vom Degradationspfad (siehe Abbildung 3-23 links) in der Stufe  $g$  in Gruppe  $i$ ,

$n_{dp,i}$ ...Anzahl der verfügbaren Degradationspfade in Gruppe  $i$ .

Diese Gruppierungsmethode wertet die „Nähe“ der einzelnen Gruppen im Satz 1 aus. Ein Beispiel ist in der Abbildung 3-30 dargestellt. Die einzelnen Kurven stellen den Median der Zustandsentwicklungsprognosen der Gruppen im Satz 1 (Gruppen A) dar. Die Gruppen, die eine ähnliche Zustandsprognose haben, wurden hier zusammengeführt, was durch ihre Farbkodierung dargestellt ist: gleiche Farbe für zusammengeführte Gruppen.

<sup>3</sup> Genauer: 15,86552% und 84,13447%-Quantile

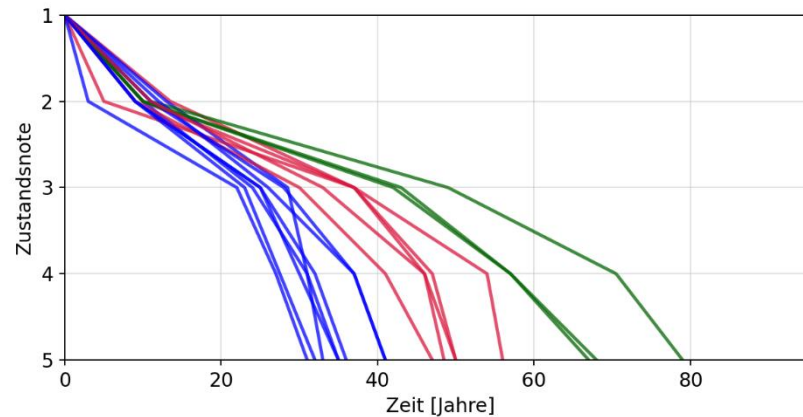


Abbildung 3-30 Beispiel der Zusammenführung der Gruppen aus dem Satz 1

**Im Schritt 3** erfolgt die Aufteilung der Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A) und dem Satz 2 (Gruppen B), nach dem Kriterium der Ähnlichkeit der Degradationspfade. Dabei wird die Verweildauer in einzelnen Zustandsstufen zur Aufteilung herangezogen. Die unvollständigen Teile der Degradationspfade werden hier auch berücksichtigt.

Der Prozess besteht aus diesen Schritten:

- Auswahl der Zustandsnoten, deren Verweildauer herangezogen wird
- Ergänzung der fehlenden Werte von Verweildauern durch Verteilungen
- Clustering

Die Degradationspfade sind Großteils unvollständig; vor allem die Verweildauern in den schlechteren Zuständen sind typischerweise nicht vorhanden. Deshalb werden für das bevorstehende Clustering nur die Zustandsnoten herangezogen, bei denen mindestens 5 Degradationspfade eine bekannte Verweildauer besitzen. In den meisten Fällen handelt es sich um Zustandsnoten 1-3. Die schlechteren Zustandsbereiche, die besonders interessant sind und deren Verlauf sich wesentlich von den besseren Zustandsbereichen unterscheiden kann, werden später bei der Prognosemodellbildung auch berücksichtigt, aber zum Clustering nur dann verwendet, wenn oben genannte Mindestanzahl an bekannten Verweildauern erreicht wurde. Da jedoch nicht alle Degradationspfade eine bekannte Verweildauer in jeder der ausgewählten Zustandsnoten besitzen, müssen diese Lücken gefüllt werden, da das Clustering mit fehlenden Daten nicht umgehen kann. Dabei wird zunächst aus den Daten der Gruppe die kumulative Dichtefunktion der Verweildauer ( $d_x$ ) in der Zustandsnote X ermittelt, wobei nur die Degradationspfade benützt werden, bei denen  $d_x$  bekannt ist. Bei Degradationspfaden, wo  $d_x$  unbekannt ist, wird  $d_x$  durch diese Verteilung (Beispiel: Abbildung 3-31, schwarze Kurve) ersetzt.



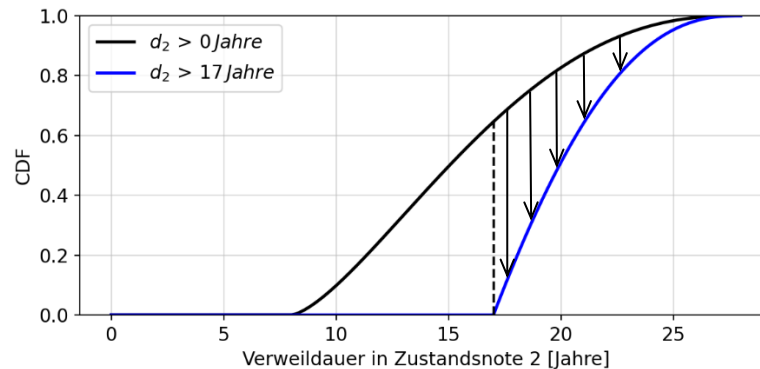


Abbildung 3-31 Beispiel von Verteilungsdichten der Verweildauer in Zustandsnote 2, die aus einer Gruppe von Degradationspfaden ermittelt wurden, und die zur Ersetzung von unbekanntem Verweildauern in dieser Gruppen verwendet werden.

Einige Degradationspfade sind im Zustand X unvollständig, d. h. es ist die Zeit ( $Z$ ) bekannt, die im Zustand X schon verstrichen ist, aber noch nicht, wann der Zustand X enden wird. Anders gesagt: Wert von  $d_x$  ist unbekannt, aber es ist bekannt, dass  $d_x > Z$  ist. Um diese Information ebenfalls zu nutzen, wird der unbekannte Wert  $d_x$  mit einer Verteilung ersetzt. Dazu wird die vorher ermittelte kumulative Verteilungsdichte von  $d_x$  (die aus bekannten Verweildauern ermittelt wurde) angepasst, in dem nur ihr Teil  $t \geq Z$  verwendet wird, und dieser entsprechend zwischen den CDF-Werten 0 und 1 skaliert wird. Ein Beispiel für  $Z = 17 \text{ Jahre}$  ist in der Abbildung 3-31 (blaue Kurve) dargestellt. Hier erreicht die ursprüngliche Verteilung von  $d_x$  im Bereich  $t \geq 17 \text{ Jahre}$  in dem oben gezeigten Beispiel die Werte zwischen 0,62 und 1,0. Die CDF der angepassten Verteilung  $d_{x,mod}$  (blau) würde sich hier daher durch  $CDF(d_{x,mod}) = \frac{CDF(d_x) - 0,62}{1 - 0,62}$  ergeben. Diese Modifikation ist in der Abbildung 3-31 durch die schwarzen Pfeile symbolisiert. In der programmiertechnischen Anwendung werden die eingesetzten Verteilungen zunächst gesampelt, bevor sie an den Clustering-Algorithmus übergeben werden.

Für das Clustering wurde der K-Means Algorithmus verwendet, konkret die Implementierung «KMeans» in der Python-Bibliothek «scikit-learn». Vor dem Clustering von mehrdimensionalen Daten ist empfehlenswert, diese vorher zu skalieren, damit die unterschiedlichen Verweildauern in den einzelnen Zuständen normalisiert werden. Hier wurde zusätzlich auch die zugrundeliegende Datenmenge in der Skalierung berücksichtigt:

$$k_x = \frac{n_{vd,x} + 0,35 \cdot n_{uv,x}}{n_{dp}} \cdot \frac{1}{d_{x,90\%}}, \quad 40$$

wobei  $k_x$ ...Skalierungsfaktor für die Verweildauern im Zustand X,

- $d_{x,90\%}$ ...90%-Quantil der Verweildauern im Zustand X,
- $n_{vd,x}$ ...Anzahl der Degradationspfade mit bekannten Verweildauern  $d_x$ ,
- $n_{uv,x}$ ...Anzahl der unvollständigen Degradationspfadteile im Zustand X,
- $n_{dp}$ ...Gesamtanzahl der verwendeten Degradationspfade.

Ein Beispiel vom Ergebnis der Aufteilung von Degradationspfaden durch Clustering ist in der Abbildung 3-32 dargestellt. Zu Zwecken der Darstellung wurden hier die Verweildauern in nur zwei Zuständen (1 und 2) verwendet, damit ein zweidimensionaler Raum entsteht. Die Gruppe beinhaltet 673 Degradationspfade, die links ersichtlich sind (einzelnen Pfaden wurde ein geringer Offset nach rechts oben hinzugefügt, damit überlappende Linien sichtbar werden). Die Verweildauern der Degradationspfade sind rechts dargestellt; durch das Sampling von Verteilungen der unbekannteren Verweildauern ergibt sich die Transparenz der dargestellten Punkte.

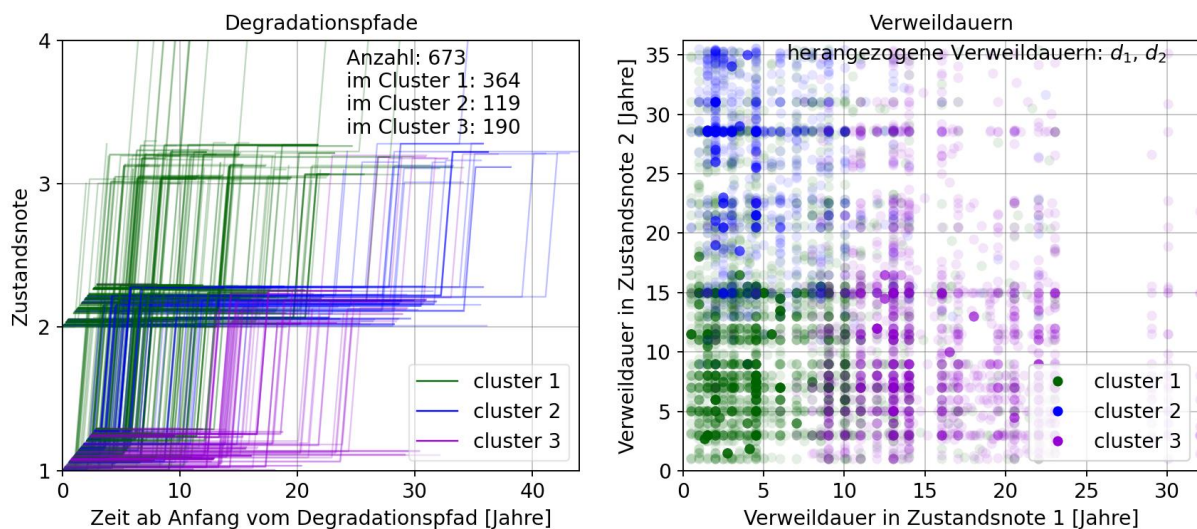


Abbildung 3-32 Beispielhafte Darstellung von geclusterten Degradationspfaden. Degradationspfade (links) und ihre Verweildauern in Zuständen 1 und 2 (rechts).

Die Anzahl der Cluster wird dem K-Means Algorithmus vorgegeben. Hier hat sich herausgestellt, dass die Wahl einer optimalen Clusteranzahl nicht eindeutig festgelegt werden kann. Deshalb werden an dieser Stelle mehrere Clustering-Varianten erstellt, wobei die Clusteranzahl zwischen  $n_{cl,min}$  und  $n_{cl,max}$  variiert wird.

$$n_{cl,min} = \max(n_z; \lfloor n_{dp}^{0,2} \rfloor), \quad 41$$

$$n_{cl,max} = \min(30; \lfloor n_z \cdot n_{dp}^{0,3} \rfloor), \quad 42$$

wobei  $n_z$ ...die Anzahl der herangezogenen Verweildauern (i.e. die Dimensionalität),  
 $n_{dp}$ ...die Anzahl der Degradationspfade ist.

Die finale Festlegung der verwendeten Clusteranzahl erfolgt erst in der Anwendung am konkreten Bauwerk/Bauteil; dieser Prozess ist Abschnitt 3.2.4 erklärt. Durch die oben beschriebene Aufteilung der Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A) und Satz 2 (Gruppen B) mithilfe von Clustering entstehen Gruppen der Sätze 3 (Gruppen C) und 4 (Gruppen D). Diese besitzen eine geringere Streuung innerhalb der Gruppe, weil sie nach Ähnlichkeit der Notenentwicklung geclustert wurden. Ein Beispiel ist in der Abbildung 3-33 dargestellt: die Prognose für eine Gruppe aus dem Satz 1 (links oben) besitzt hohe Unsicherheiten, die sich aus der Streuung der Degradationspfade innerhalb dieser Gruppe ergeben. Die Gruppe wurde in 7 Cluster (bzw. Gruppen vom Satz 3) aufgeteilt (wegen Übersichtlichkeit sind nur 5 Cluster dargestellt). Die Prognose für jeden dieser Cluster besitzt geringere Unsicherheiten.

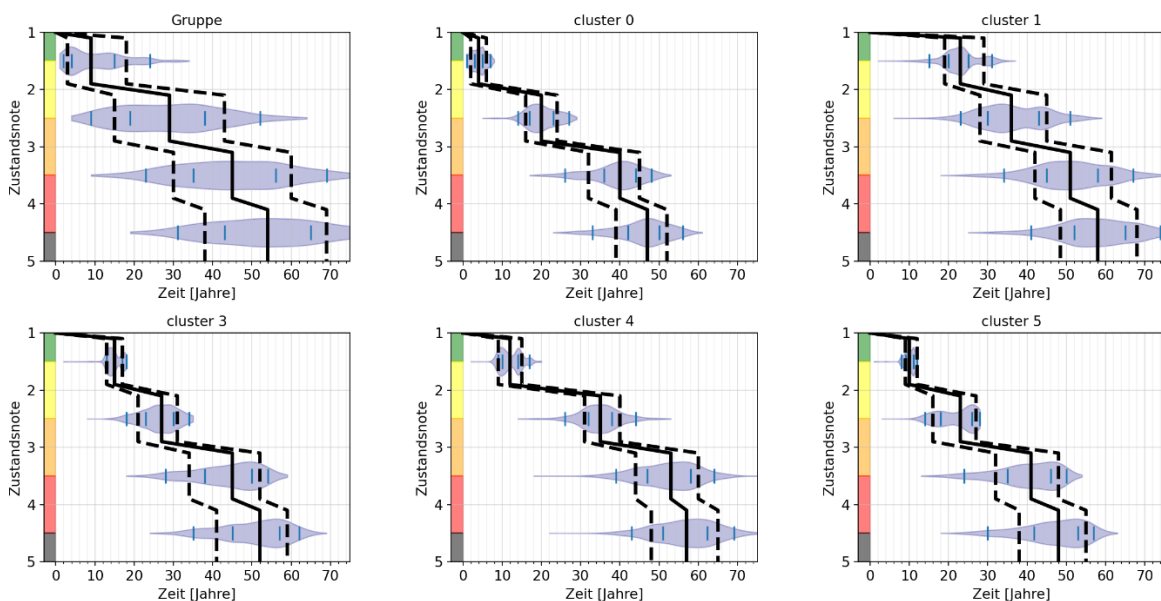


Abbildung 3-33 Beispiel der Zustandsprognosen. Links oben: Prognose für eine Gruppe aus dem Satz 1; restliche Bilder: Prognose für einzelne Cluster, die durch Aufteilung dieser Gruppe entstanden sind.

Das oben beschriebene Clustering basiert auf bekannten Zustandsentwicklungen. Das Ziel ist jedoch, eine Zustandsprognose für Bauwerke/Bauteile zu erstellen, ohne der Notwendigkeit, ihre Zustandsentwicklung vorher zu kennen. Dazu ist es nötig, das Bauwerk/Bauteil einem Cluster zuzuordnen, basierend auf seinen bekannten Eigenschaften wie z. B. Baujahr, Spannweite, Meereshöhe usw. Dafür werden im Schritt 4 Klassifikatoren erstellt.

**Im Schritt 4** wird eine Zuordnung zwischen den numerischen Parametern von Bauwerken/Bauteilen und den einzelnen Clustern geschaffen. Dies geschieht durch Random-Forest Klassifizierung (Breiman L. , 2001), die für jede Gruppeneinteilung (Clustering) einzeln durchgeführt wird. Hier wurde die Implementierung «RandomForestClassifier» aus der Python-Bibliothek «scikit-learn» verwendet. Der Algorithmus bereitet mithilfe von Trainingsdaten eine Reihe von Entscheidungsbäumen vor. Als Trainingsdaten werden die Eigenschaften (numerische Parameter) der Bauwerke/Bauteile verwendet, sowie für jedes Bauwerk/Bauteil die zugehörige Clusternummer, die basierend auf dessen Zustandsentwicklung im Schritt 3 zugewiesen wurde. Aus mathematischen Gründen werden die numerischen Parameter zunächst normalisiert, d. h. so linear transformiert, dass der Mittelwert eines Parameters 0 und dessen Standardabweichung 1 beträgt.

Das Ziel des antrainierten Random-Forest Klassifikators ist es, für beliebige Eigenschaften des Bauwerks/Bauteils die richtige Clusternummer vorherzusagen. Dies gelingt nicht immer, weil oft vorkommt, dass Bauwerke/Bauteile mit sehr ähnlichen Eigenschaften unterschiedliche Zustandsentwicklungen aufweisen, und daher unterschiedlichen Clustern zugeordnet werden. Die Genauigkeit des Klassifikators wird durch s.g. «confusion matrix» ausgedrückt, die mithilfe eines Testdatensatzes die Clusterzuordnungen prüft. In der «confusion matrix» bezieht sich jede Zeile auf ein Cluster und stellt dar, welcher Anteil von diesem Cluster wurde durch den Klassifikator den einzelnen Clustern zugeordnet. Die confusion matrix wäre idealerweise diagonal (100% richtige Zuordnungen). Die Abbildung 3-34 zeigt ein Beispiel vom Ergebnis eines Random-Forest Klassifikators. Hier wurden zwei numerische Parameter für die Vorhersage der Clusternummern verwendet: die Meereshöhe und das Baujahr. Die Meereshöhe beeinflusst die Anzahl der Frosttage, die wiederum einen Einfluss auf die gestreuten Salzmengen hat; deswegen kann ein Einfluss der Meereshöhe auf die Schnelligkeit der Notenentwicklung erwartet werden. Die Meereshöhe wurde zwischen 0 und 1200 m variiert; das Baujahr zwischen 1958 und 2018. Für diesen Wertebereich hat der Klassifikator die Clusternummern vorhergesagt, die mit den farbigen Flächen gekennzeichnet sind (cluster 1 = violett, cluster 2 = grün, cluster 3 = rot). Die Testdaten sind durch die Punkte dargestellt, mit der gleichen Farbkodierung. Die unrichtigen Clusterzuordnungen sind schwarz eingekreist.

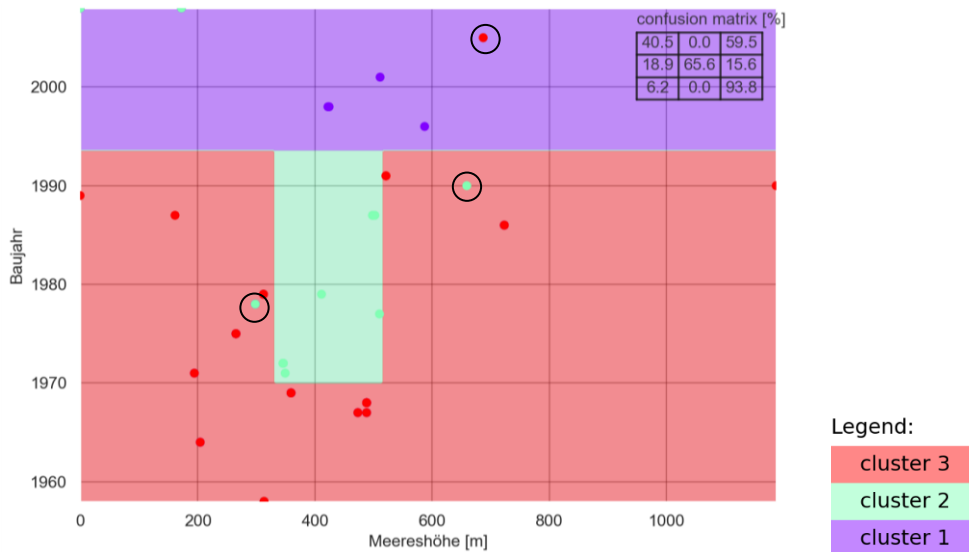


Abbildung 3-34 Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse eines Random-Forest Klassifikators.

In der Anwendung treten i. d. R. mehr als zwei numerische Parameter auf, was sich dann nicht mehr visuell darstellen lässt (N-Parameter bedeutet N-dimensionaler Raum). Mit steigender Anzahl der verwendeten Cluster (die aus dem Schritt 3 stammt) wird es schwieriger, die richtigen Cluster vorherzusagen.

Um Überanpassung (overfitting) zu vermeiden, wurden bei der Klassifikatorerstellung folgende Beschränkungen eingeführt, die durch mehrere Durchlaufversuche iterativ bestimmt wurden:

- Max. Tiefe der Entscheidungsbäume = 3 \* Anzahl der numerischen Parameter
- Erforderliche Mindestdatenmenge für Leaf-splitting = 8 Bauwerke/Bauteile
- Erforderliche Mindestdatenmenge für ein Leaf = 3 Bauwerke/Bauteile

Die Anzahl der Entscheidungsbäume im Random-Forest wurde abhängig von der Anzahl der geclusterten Bauwerke/Bauteile festgelegt (Abbildung 3-35). Diese Festlegung wurde im Projekt gemacht und orientiert sich an Erfahrungen aus anderen Bereichen (Oshiro, Perez, & Baranauskas, 2012), wo Mengen zwischen 64 und 128 Entscheidungsbäumen empfohlen wurden. Zusätzlich wurde eine Mindestanzahl von Bauwerken/Bauteilen mit 30 festgelegt.

Die oben beschriebene Methodik dient der sinnvollen Einteilung von Bauwerken/Bauteilen in Gruppen. Basierend auf den Zustandsentwicklungen der gruppierten Bauwerke/Bauteile wird für jede Gruppe mithilfe von Prognosealgorithmen ein Prognosemodell erstellt.

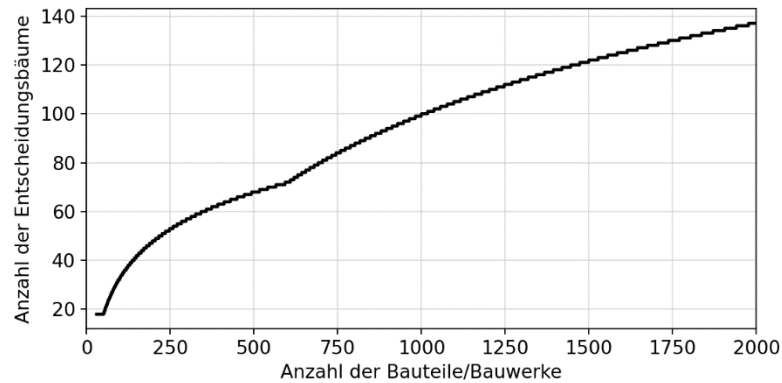


Abbildung 3-35 Vorgegebene Anzahl der Entscheidungsbäume im Random-Forest.

### 3.2.3 Prognosealgorithmen

Das Ziel der Algorithmen ist es, für eine Gruppe von Bauwerken/Bauteilen eine Zustandsentwicklungsprognose zu schaffen. Als Datenbasis dienen die Degradationspfade, die aus Bauwerksprüfungen ermittelt wurden (Beispiel in Abbildung 3-36).

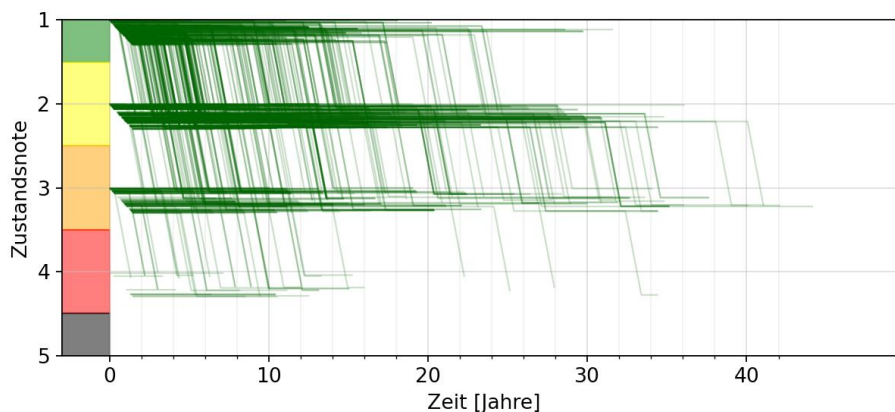


Abbildung 3-36 Beispiel der aus Bauwerksprüfungen ermittelten Degradationspfade einer Bauwerksgruppe.

Für die Prognose wurden mehrere Ansätze verfolgt:

- Zeitbasierte stochastische Modelle
- Zustandsbasierte stochastische Modelle
  - Stationär (zeithomogen)
  - Instationär (zeitinhomogen)

**Zeitbasierte stochastische Modelle** basieren auf der Definition von probabilistischen Verteilungen der Verweildauer in einzelnen Zustandsstufen. Die Verteilungen werden durch Anpassung an die Daten der Verweildauer, die aus den Bauwerksprüfungen bestimmt wurde,



ermittelt. Für eine Gruppe von Bauwerken/Bauteilen werden zunächst die Histogramme der Verweildauer in einzelnen Zuständen ermittelt, bevor eine entsprechende Verteilung angepasst wird. Ein Beispiel einer angepassten Verteilung der Verweildauer ist in der Abbildung 3-37 zusammen mit dem dazugehörigen Histogramm dargestellt.

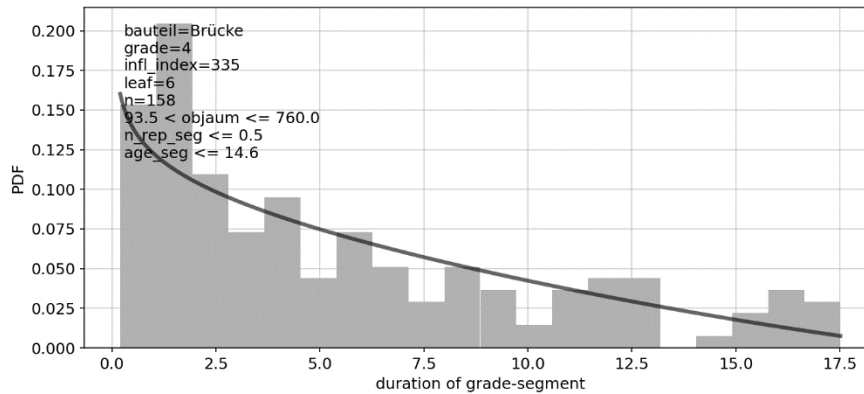


Abbildung 3-37 Beispiel des Histogramms der Verweildauer in einer Zustandsstufe und der daran angepassten Verteilung.

Nachdem die Verteilungen der Verweildauer in einzelnen Zustandsnoten bekannt sind, kann eine Prognose erstellt werden. Das geschieht mit einer Monte-Carlo Simulation, bei der  $n$  Degradationspfade (typischerweise  $n = 500 \sim 1000$ ) generiert werden. Dabei wird bei einem generierten Degradationspfad in jeder Zustandsstufe die Verweildauer durch ein zufälliges Sample aus der entsprechenden Verteilung gewählt. Es wird angenommen, dass die Verteilungen der Verweildauern in einzelnen Zuständen nicht korreliert sind. Ein Beispiel der generierten Degradationspfade und der Verteilungen der Verweildauer ist in der Abbildung 3-38 dargestellt.

Ein Nachteil bei dieser Methode ist, dass die Information aus den unvollständigen Teilen der Degradationspfade nicht genutzt werden kann. Bedingt durch die begrenzte Zeitreihe der verfügbaren Bauwerksprüfungen kommt es zu systematischen Verzerrungen, in dem die Fälle, wo sich ein Bauwerk/Bauteil lange in einer Zustandsstufe hält, systematisch verworfen werden müssen, weil der Zeitpunkt der Übergangs zur nächsten Zustandsstufe in der Zukunft liegt und daher nicht bekannt ist. Dadurch tendieren die zeitbasierten Modelle dazu, eine zu schnelle Degradation vorherzusagen.



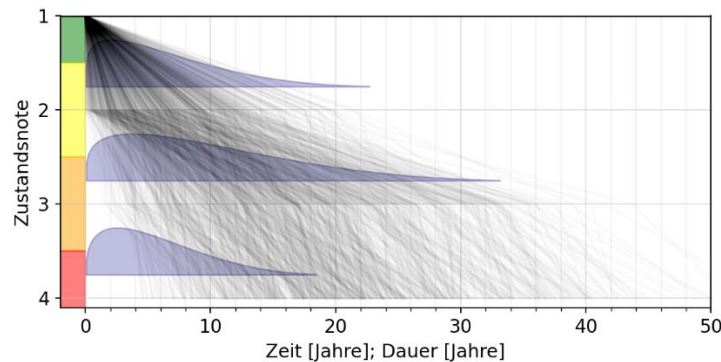


Abbildung 3-38 Beispiel der Zustandsprognose mittels Monte-Carlo Simulation. Generierte Degradationspfade (grau) und Verteilungen der Verweildauer in den Zuständen 1-3 (blau).

**Zustandsbasierte stochastische Modelle** basieren auf ermittelten Wahrscheinlichkeiten, dass sich die Zustandsstufe innerhalb eines Zeitraums (hier: 1 Jahr) ändert. Aus den Degradationspfaden einer Gruppe von Bauwerken/Bauteilen werden die Wahrscheinlichkeiten  $p_{i,j}$  ermittelt:

$$p_{i,j} = \frac{\sum_t n_{z(t)=i \cap z(t+1)=j}}{\sum_t n_{z(t)=i}}, \quad 43$$

wobei  $n_{z(t)=i}$ ...Anzahl der Bauwerke/Bauteile, die sich im Jahr  $t$  im Zustand  $i$  befinden und gleichzeitig einen bekannten Zustand im Jahr  $t + 1$  haben,

$n_{z(t)=i \cap z(t+1)=j}$ ...Anzahl der Bauwerke/Bauteile, die sich Jahr  $t$  im Zustand  $i$  befanden und im Jahr  $t + 1$  im Zustand  $j$ .

So lässt sich die Matrix der jährlichen Übertrittswahrscheinlichkeiten  $\mathbf{P}$  (Abbildung 3-39) ermitteln. Da eine spontane Zustandsverbesserung ausgeschlossen ist, sind die Elemente unter der Diagonale 0. Eine Zustandsverschlechterung um mehr als 1 Stufe innerhalb eines Jahres kommt sehr selten vor, deshalb besteht die Matrix meistens nur aus der Hauptdiagonale  $p_{i,i}$  und einer Nebendiagonale  $p_{i,i+1}$ . Die Summe jeder Zeile ist 1,0.

		Zustand im Jahr X+1				
		1	2	3	4	5
Zustand im Jahr X	1	$p_{1,1}$	$p_{1,2}$	$p_{1,3}$	$p_{1,4}$	$p_{1,5}$
	2	-	$p_{2,2}$	$p_{2,3}$	$p_{2,4}$	$p_{2,5}$
	3	-	-	$p_{3,3}$	$p_{3,4}$	$p_{3,5}$
	4	-	-	-	$p_{4,4}$	$p_{4,5}$
	5	-	-	-	-	$p_{5,5}$

Abbildung 3-39 Matrix der jährlichen Übertrittswahrscheinlichkeiten  $\mathbf{P}$ .

Da die Datenlage in den schlechteren Zustandsnoten gering bis nicht vorhanden ist, ist es üblicherweise nicht möglich, alle Elemente der Matrix aus den Daten abzuleiten. Die Abbildung 3-40 zeigt das Histogramm der erfassten Bauwerkszustandsnoten in den DACH-Ländern, wobei hier der gesamte verfügbare Zeitraum (d. h. mehrere Prüfungen pro Bauwerk) und alle Bauwerke eingeflossen sind. Obwohl hier ein kleiner Anteil der Prüfungsergebnisse mit schlechten Noten ersichtlich ist, geht dieser bei der Aufteilung der Bauwerke auf kleinere Gruppen in vieler dieser Gruppen verloren.

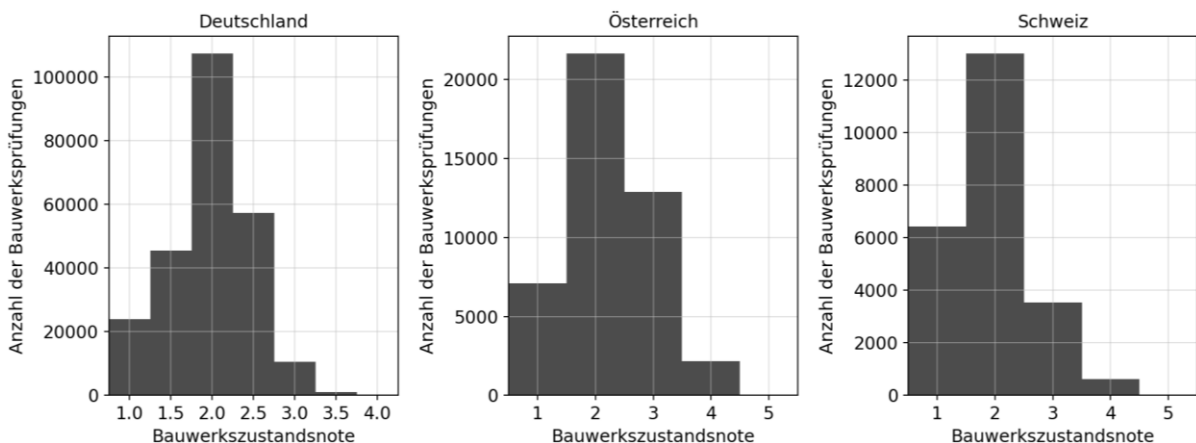


Abbildung 3-40 Histogramm der erfassten Bauwerkszustandsnoten aus dem gesamten verfügbaren Zeitraum der Bauwerksprüfungen (alle Bauwerke)

Die Prognose durch Markov-Ketten (Saydam, Bocchini, & Frangopol, 2013) nutzt die Matrix der jährlichen Übertrittswahrscheinlichkeiten für die Generierung eines Sets von möglichen Degradationspfaden. Ähnlich wie bei der Monte-Carlo Simulation werden  $n$  Simulationen gestartet. In jedem Simulationsjahr wird der Zustand durch generierte Zufallszahlen, den bisherigen Zustand, und der Matrix der Übertrittswahrscheinlichkeiten ermittelt. Durch die statistische Auswertung der verschiedenen Prognosen der  $n$  generierten Degradationspfade ergibt sich die Streuung der Prognose. Die Abbildung 3-41 zeigt ein Beispiel der Simulation mit 1000 Degradationspfaden (hellgraue Linien). Da der Zeitschritt ganzzahlig ist (1 Jahr), überlappen sich viele der dargestellten Linien, wodurch eine dunklere Linie entsteht.

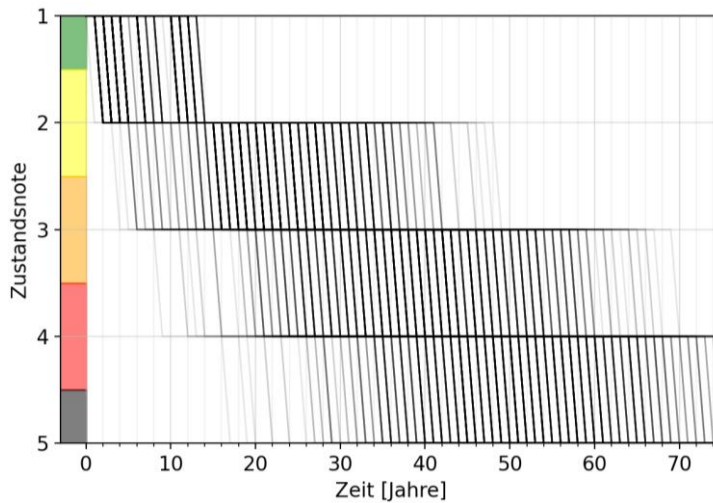


Abbildung 3-41 Beispiel der Zustandsprognose mittels Simulation durch Markov-Ketten.

Einer der Vorteile dieser Prognosemethode ist, dass die unvollständigen Teile der Degradationspfade berücksichtigt werden. Dabei wird jedoch nicht abgebildet, dass die Zustandsübertrittswahrscheinlichkeiten nicht konstant sind, sondern sich jährlich ändern (erhöhen). Anders gesagt: je länger das Bauwerk/Bauteil in einem Zustand verweilt, desto wahrscheinlicher wird es, dass sich seine Zustandsnote im nächsten Jahr verschlechtert. Dagegen bewirken die konstanten Übertrittswahrscheinlichkeiten, dass die Verweildauer in einzelnen Zuständen überschätzt wird, und eine unrealistisch lange Lebensdauer prognostiziert wird. Dieser Umstand kann durch zeitinhomogene Modelle gelöst werden.

Zeitinhomogene (instationäre) Markov-Ketten basieren auch auf einer Matrix der jährlichen Übertrittswahrscheinlichkeiten, jedoch die Werte dieser Matrix ändern sich mit der Zeit (Liu, Wang, & Wu, 2019). Diese Methode wurde auch für die Zustandsprognose von Brücken schon angewandt (Prammer, Vorwagner, & Weninger-Vycudil, 2021). Dabei wird die Matrix  $\mathbf{P}(t)$  in einzelnen Beobachtungsjahren  $t$  separat bestimmt. Die Beobachtungsdauer  $t$  drückt aus, wie lange sich das Bauwerk/Bauteil schon im aktuellen Zustand schon befindet. Die Matrizen  $\mathbf{P}(t)$  werden wieder aus den beobachteten Zustandsnoten ermittelt:

$$p_{i,j}(t) = \frac{n_{z(t)=i \cap z(t+1)=j}}{n_{z(t)=i}}, \quad 44$$

wobei  $n_{z(t)=i}$ ...Anzahl der Bauwerke/Bauteile, die sich schon  $t$  Jahre im Zustand  $i$  befanden und gleichzeitig einen bekannten Zustand im nächsten Jahr haben,

$n_{z(t)=i \cap z(t+1)=j}$ ...Anzahl der Bauwerke/Bauteile, die sich schon  $t$  Jahre im Zustand  $i$  befanden und im nächsten Jahr den Zustand  $j$  besitzen.

Da hier mehrere Matrizen (für die einzelnen Beobachtungsjahre) gebildet werden, sind die Datenanforderungen höher. Deshalb werden zusätzliche Annahmen eingeführt, die in Fällen von geringen Datenmengen die Übertrittswahrscheinlichkeiten anpassen:

$$1. \text{ Anpassung, wenn } p_{i,i}(t) = 1,0 : p_{i,i}(t) = 1 - \frac{1}{2 \cdot n_{z(t)=i}} \quad 45$$

$$2. \text{ Anpassung, wenn } n_{z(t)=i} = 0 : p_{i,i}(t) = p_{no\_data} ; p_{i,i+1}(t) = 1 - p_{no\_data} , \quad 46$$

wobei  $p_{no\_data} = p_{nd0} \cdot k_{nd}^{T_{nd}}$  und

$p_{nd0} = 0,9$  für Österreich und Schweiz,  $p_{nd0} = 0,8$  für Deutschland,

$k_{nd} = 0,95$  für Österreich und Schweiz,  $k_{nd} = 0,9$  für Deutschland,

$T_{nd}$ ...Anzahl der nacheinander folgenden Jahre, in denen  $n_{z(t)=i} = 0$  ist.

Zusätzliche Bedingung, wenn  $T_{nd} = T_{nd,max}$ :  $p_{i,i}(t) = 0$  ;  $p_{i,i+1}(t) = 1$  ,

wobei  $T_{nd,max} = 12$  für Österreich und Schweiz,  $T_{nd,max} = 7$  für Deutschland ist.

Die erste Annahme behandelt den Fall, wenn alle Bauwerke/Bauteile, die sich im Beobachtungsjahr  $t$  im Zustand  $i$  befinden, diesen Zustand im nächsten Jahr beibehalten. Daraus würde sich eine rechnerische Wahrscheinlichkeit von 100%, dass sich der Zustand nicht ändert, ergeben. Die erste Annahme verhindert Werte von  $p_{i,i}(t) = 1$  in der Hauptdiagonale, in dem angenommen wird, dass wenn doppelt so viele Bauwerke/Bauteile zur Beobachtung verfügbar gewesen wären ( $2 \cdot n_{z(t)=i}$ ), dann würde man bei einem davon eine Zustandsverschlechterung um eine Stufe beobachten können.

Die zweite Annahme behandelt die Fälle, wenn gar keine Daten über den Zustand von Bauwerken/Bauteilen im Beobachtungsjahr  $t$  im Zustand  $i$  verfügbar sind ( $n_{z(t)=i} = 0$ ). Dies ist oft der Fall bei schlechteren Zustandsnoten. Damit auch hier eine Prognose erfolgen kann, wurde die Annahme 2 implementiert. Hier wird zunächst angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Zustand in einem Jahr nicht ändert, 90% ist (80% für Deutschland). In jedem nachfolgenden Jahr wird diese Wahrscheinlichkeit mit dem Faktor 0,95 (0,9 für Deutschland) reduziert. Daraus ergeben sich die Wahrscheinlichkeiten, dass sich die Zustandsnote um eine Stufe verschlechtert, wie in Abbildung 3-42 dargestellt.

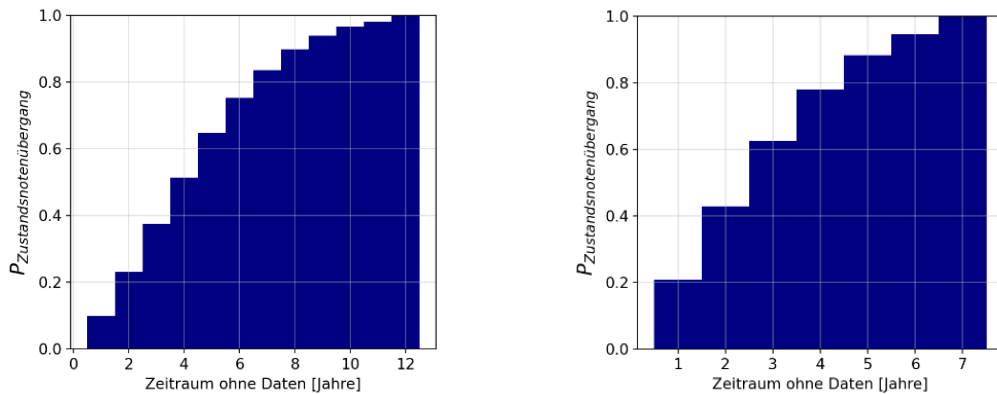


Abbildung 3-42 Angenommene Übertittswahrscheinlichkeiten  $p_{i,i+1}$  für die Fälle ohne Daten, für Österreich und Schweiz (links), sowie für Deutschland (rechts).

Der Übergang in die nächste Zustandsnote erfolgt spätestens nach 12 Jahren (7 für Deutschland). Für Deutschland wurden deshalb andere Werte angenommen, weil hier eine feinere Abstufung der Zustandsstufen vorgenommen wurde, und daher mit dem Erreichen der nächsten Zustandsstufe früher gerechnet werden muss.

Die Prognose erfolgt wie oben beschrieben durch Simulation von  $n$  Degradationspfaden mit Markov-Ketten.

### Vergleich der Prognosealgorithmen

Die drei oben beschriebenen Prognosealgorithmen (zeitbasierte Monte-Carlo Simulation, zustandsbasierte Markov-Ketten zeithomogen und zeitinhomogen) wurden durch Anwendung an verschiedenen Datensätzen verglichen. Bei Datensätzen mit vollständigen Degradationspfaden führten sie zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Die Unterschiede zeigten sich bei der Verwendung von Datensätzen, die unvollständige Teile von Degradationspfaden beinhalteten, was der Mehrheit der verfügbaren Daten entspricht. Ein Vergleich der Prognoseergebnisse ist in der Abbildung 3-43 dargestellt. Während sich die Prognose des Zeitpunktes der Erreichung vom Zustand 2 zwischen den Modellen wenig unterscheidet, bilden sich aufgrund der geringeren Datenlage und unvollständigen Degradationspfaden größere Unterschiede bei den höheren Zustandsnoten.

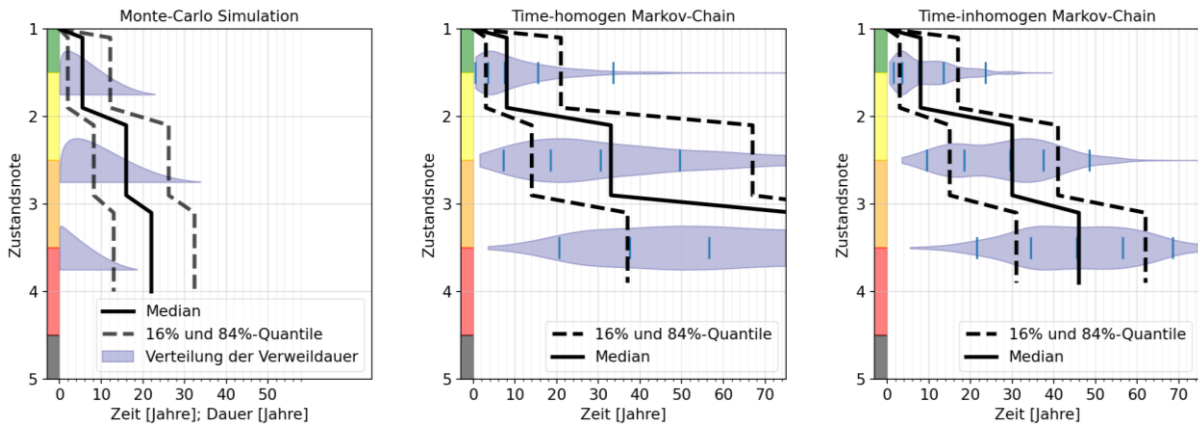


Abbildung 3-43 Anwendung von drei Prognosemethoden an dem selben Datensatz. Zeitbasierte Monte-Carlo Simulation (links), zustandsbasierte Markov Ketten zeithomogen (mitte) und zeitinhomogen (rechts).

Der Algorithmus der zeitinhomogenen Markov-Ketten lieferte in diesem Vergleich die besten Ergebnisse und wurde deshalb zur Erstellung der Prognosemodelle verwendet.

### Anpassung der Übertrittswahrscheinlichkeiten nach der Gruppeneinteilung

Im Abschnitt 3.2.2 wurde die Aufteilung der Bauwerke/Bauteile durch Clustering-Methoden beschrieben, durch die einerseits die Streuung innerhalb der resultierenden Gruppen reduziert wird, aber gleichzeitig auch die Datenmenge pro Gruppe. Dies führt dazu, dass insbesondere bei höheren Zustandsnoten ein Datenmangel in den kleineren Gruppen entsteht. Um diesem Nachteil entgegenzuwirken, wurden die ausgewerteten Übertrittswahrscheinlichkeiten modifiziert. Das Prinzip, das hier befolgt wurde, ist, dass die „Kind-Modelle“ (die durch Aufteilung der Gruppe auf Cluster entstanden sind) bei Bedarf vom „Eltern-Modell“ (der nicht-aufgeteilten Gruppe) lernen können. Der Bedarf ist dabei eine Funktion der äquivalenten Anzahl der zugrundeliegenden Degradationspfaden ( $n_{dp,eq}$ ) und ist in der Abbildung 3-44 (rote Kurve) dargestellt. Es handelt sich um einen Koeffizienten zwischen 0 und 1. Die „Lehrfähigkeit“ des Elternmodells ist analog dazu definiert (grüne Kurve). Diese zwei Kurven stellen Festlegungen dar, die für kleine Gruppengrößen (weniger als 30) die Unsicherheiten, die sich aus der Verwendung geringer Datenmengen ergeben, reduzieren sollen.

$$n_{dp,eq,x} = n_{vd,x} + 0,35 \cdot n_{uv,x} , \quad 47$$

wobei  $n_{vd,x}$ ...Anzahl der Degradationspfade mit bekannten Verweildauern im Zustand x,

$n_{uv,x}$ ...Anzahl der unvollständigen Degradationspfadteile im Zustand x.

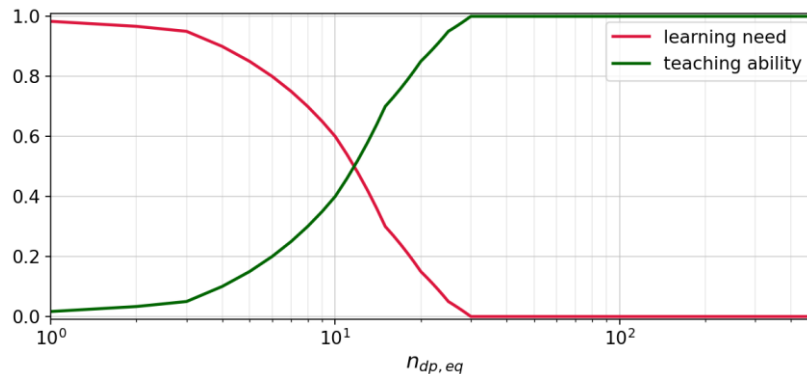


Abbildung 3-44 Koeffizienten des Lernbedarfs und der Lehrfähigkeit der Prognosemodelle

Die Wahrscheinlichkeiten  $p_{i,j}(t)$  der „Kind-Modelle“ werden wie folgt modifiziert:

$$w_{teach} = ability(n_{dp,eq,i,parent}) \cdot need(n_{dp,eq,i,child}), \quad 48$$

$$p_{mod,i,j}(t) = w_{teach} \cdot p_{parent,i,j}(t) + (1 - w_{teach}) \cdot p_{child,i,j}(t), \quad 49$$

wobei  $ability(n_{dp,eq,i,parent})$ ...Lehrfähigkeit des Elternmodells basierend auf dessen

äquivalenter Anzahl der Degradationspfade im Zustand  $i$ ,

$need(n_{dp,eq,i,child})$ ...Lernbedarf des Kindmodells basierend auf dessen äquivalenter

Anzahl der Degradationspfade im Zustand  $i$ ,

$w_{teach}$ ...Lernkoeffizient,

$p_{parent,i,j}(t)$ ... $p_{i,j}(t)$  des Elternmodells,

$p_{child,i,j}(t)$ ... $p_{i,j}(t)$  des Kindmodells.

$p_{mod,i,j}(t)$ ...modifizierte  $p_{i,j}(t)$  des Kindmodells.

Aus der Abbildung 3-44 ist ersichtlich, dass diese Anpassung der Übertrittswahrscheinlichkeiten  $p_{i,j}(t)$  nur dann vorgenommen wird, wenn die äquivalente Anzahl der Degradationspfade, die zur Modellbildung herangezogen wurden, 30 unterschreitet.

### 3.2.4 Modellauswahl

Im Abschnitt 3.2.2 wurde beschrieben, dass die Bauwerke/Bauteile auf mehrere Gruppen aufgeteilt werden. Dabei entstehen mehrere Varianten der Aufteilung (z. B. durch die Anzahl von Clustern) in insgesamt 4 Sätzen von Gruppen. Für jede erstellte Gruppe wurde ein Prognosemodell durch zeitinhomogene Markov-Ketten erstellt. Für die Anwendung am konkreten Bauwerk/Bauteil stehen daher mehrere Modelle zur Verfügung, die zutreffen. In der Auswahl des zu verwendenden Modells wird dessen Prognosestreuung, die Größe des zugrundeliegenden Datensatzes, sowie auch die Abweichung zu anderen zutreffenden Modellen herangezogen.



Nehmen wir an, dass  $M$  Prognosemodelle zutreffen. Für jedes Modell werden zunächst durch die Markov-Ketten Simulation die prognostizierten Zeitpunkte der Erreichung einzelner Zustandsnoten ermittelt, ausgehend vom Neuzustand des Bauwerks/Bauteils. Diese werden statistisch ausgewertet, so dass sich für das Modell  $m = (1 \dots M)$  folgende Kennzahlen für Zustandsstufen  $i = 1 \dots n$  ergeben:

$t_{m,i,16\%}$ ...16%-Quantil des Zeitpunktes der Erreichung des Zustands  $i$ ,

$t_{m,i,84\%}$ ...84%-Quantil des Zeitpunktes der Erreichung des Zustands  $i$ ,

$t_{m,i,mean}$ ...Mittelwert des Zeitpunktes der Erreichung des Zustands  $i$ .

Es wird die Standardabweichung abgeschätzt:

$$\sigma_{m,i} = \frac{t_{m,i,84\%} - t_{m,i,16\%}}{2}, \quad 50$$

die in weiterer Folge mit dem Standardfehler des Mittelwertes ( $s_{\mu,m,i}$ ) und der Standardabweichung ( $s_{\sigma,m,i}$ ) erweitert wird:

$$\sigma_{e,m,i} = \sigma_{m,i} + s_{\mu,m,i} + s_{\sigma,m,i}, \quad 51$$

$$\text{wobei } s_{\mu,m,i} = \frac{\sigma_{m,i}}{\sqrt{n_{dp,eq,m,i}}}, \quad 52$$

$$\text{und } s_{\sigma,m,i} = \frac{\sigma_{m,i}}{\sqrt{2 \cdot n_{dp,eq,m,i} - 1}}, \quad 53$$

mit  $n_{dp,eq,m,i}$ ...äquivalente Anzahl der zugrundeliegenden Degradationspfade im Zustand  $i$ .

Dadurch werden die erwarteten Fehler, die sich durch die Verwendung von kleinen Datenmengen ergeben, berücksichtigt, und in die Streuungen miteingerechnet.

Weiterhin werden auch die Modelle untereinander verglichen, um Ausreißer zu vermeiden. Dazu wird zunächst der Median von  $t_{m,i,mean}$  unter den Modellen  $m = (1 \dots M)$  gebildet und als  $\widetilde{t_{i,mean}}$  gekennzeichnet. Die Abweichung des Modells  $m$  von diesem Modellmedian wird zu der erweiterten Standardabweichung addiert und im Verhältnis zum Modellmedian gesetzt. So werden die erweiterten Variationskoeffizienten ( $c_{ev,m,i}$ ) ermittelt, die neben der Prognosestreuung auch die Standardfehler und die Abweichung zum Median der zutreffenden Modelle beinhalten:

$$c_{ev,m,i} = \frac{\sigma_{e,m,i} + |t_{m,i,mean} - \widetilde{t_{i,mean}}|}{\widetilde{t_{i,mean}}} \quad 54$$

Das gesuchte Modell soll kleine erweiterte Standardabweichung, sowie kleine Abweichung vom Modellmedian haben. Es wird das Modell ausgewählt, welches die Summe  $J_m$  maximiert:

$$J_m = \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_{ev,m,i}} \quad 55$$

## 4 ANWENDUNG DER METHODEN DER ZUSTANDSPROGNOSE

### 4.1 Deutschland

#### 4.1.1 Datengrundlage SIB-Bauwerke

##### 4.1.1.1 Schadensebene

Die Analyse auf Schadenebene konzentriert sich auf die Schäden, denen die Schadensklassen 1 und 2 zugewiesen wurden, die zunehmend berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass Schäden, die über den Zeitraum, in dem die Inspektionen durchgeführt wurden, einen stationären Zustand aufweisen, sowie Zustandsdaten, die sich auf Verbesserungen durch Reparaturarbeiten beziehen, bei der Analyse nicht berücksichtigt wurden. Die berücksichtigten Zustandsdaten ermöglichen es, Schadensfamilien anhand der Geschwindigkeit, mit der sich ihr Zustand entwickelt, zu identifizieren. Die Schadensklassen 3 und 4 werden den Schäden seltener zugeordnet, so dass diese Daten, obwohl sie vorhanden sind, bei der Clusteranalyse nicht berücksichtigt werden, da es keine vollständigen Sequenzen gibt, die gruppiert werden können. Daten über das Alter der Brücke, bei dem die Verschlechterung der Schadensklasse 3 zugeordnet wird, ermöglichen jedoch statistische Untersuchungen. Die Degradationspfade, die in der Schadensklasse 2 enden, wurden durch Stichproben aus der Wahrscheinlichkeitsmassenfunktion (PMF) der Verweildauer in der Schadensklasse 2 vervollständigt. Anschließend wird die Abfolge des Brückenalters, bei dem die Zustandsnote 1, 2 und 3 erreicht wird, in der Analyse auf der Grundlage des Gamma-Prozesses berücksichtigt.

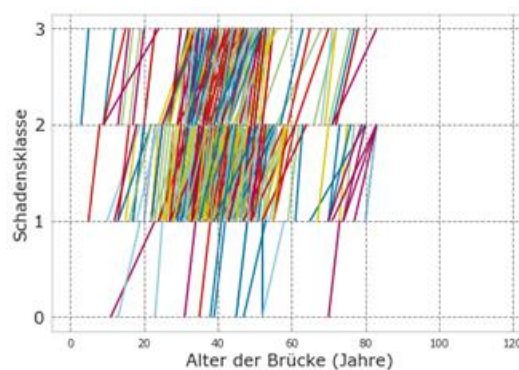


Abbildung 4-1. Übergänge von Schadensklassen - Abplatzung im Unterbau (SIB-BW).

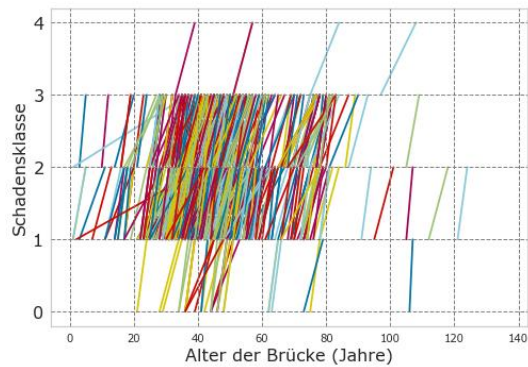


Abbildung 4-2. Übergänge von Schadensklassen - Abplatzung im Überbau (SIB-BW).

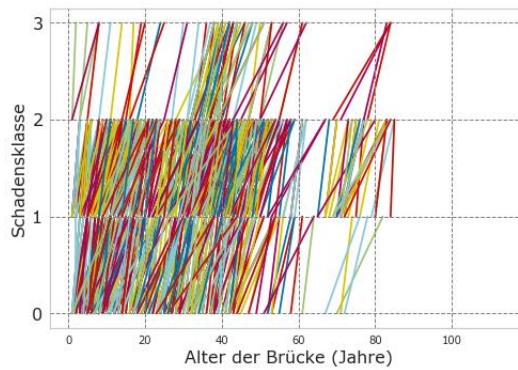


Abbildung 4-3. Übergänge von Schadensklassen - Längsrisse im Unterbau in (SIB-BW).

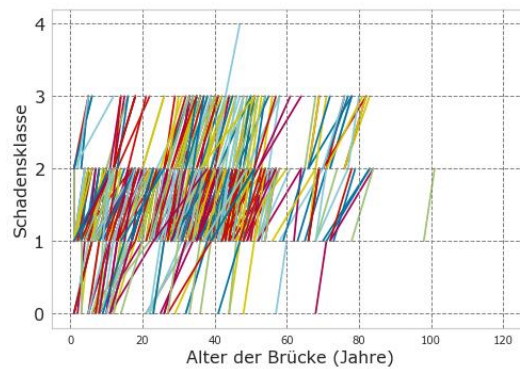


Abbildung 4-4. Übergänge von Schadensklassen - Längsrisse im Überbau (SIB-BW)

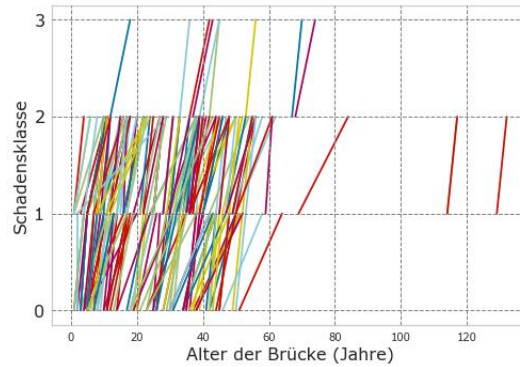


Abbildung 4-5. Übergänge von Schadensklassen - Schrägrisse im Unterbau (SIB-BW).

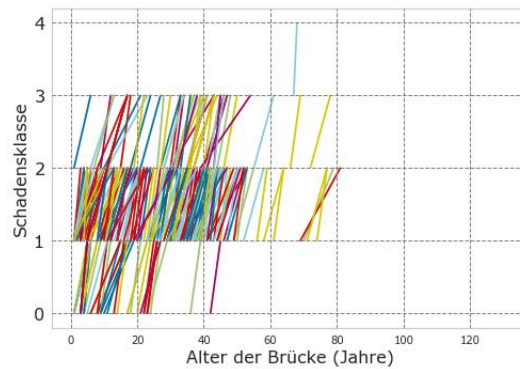


Abbildung 4-6. Übergänge von Schadensklassen - Schrägrisse im Überbau (SIB-BW).

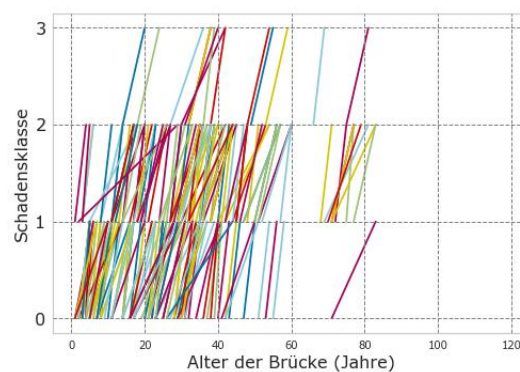


Abbildung 4-7. Übergänge von Schadensklassen - Querrisse im Unterbau (SIB-BW).

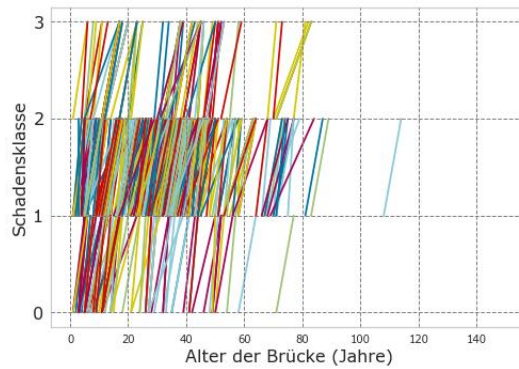


Abbildung 4-8. Übergänge von Schadensklassen - Querrisse, Überbau (SIB-BW).

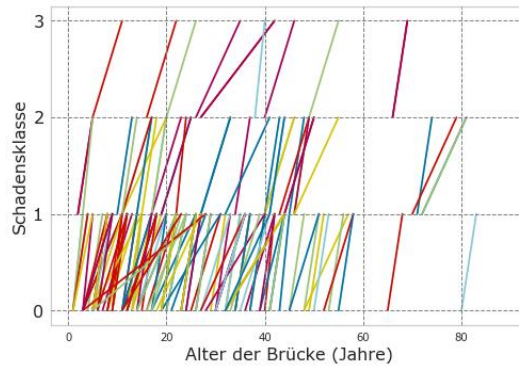


Abbildung 4-9. Übergänge von Schadensklassen - Netzrisse im Unterbau (SIB-BW).

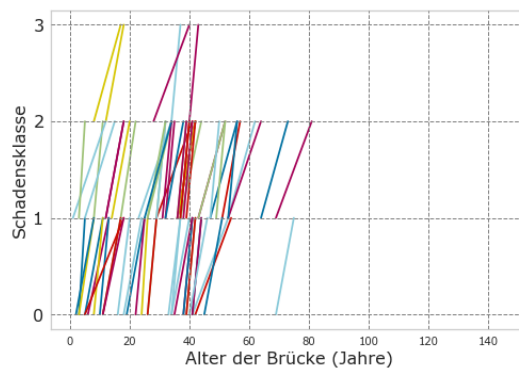


Abbildung 4-10. Übergänge von Schadensklassen - Netzrisse im Überbau (SIB-BW).



#### 4.1.1.2 Eigenschaften der Bauwerke/Bauteile

Zur Verfügung standen Daten zu 39.053 Brücken aus der Datenbank SIB-Bauwerke. Daraus wurden für die Analyse auf Objekt- und Bauteilebene die in der Tabelle 4-1 angeführten Eigenschaften, die potenziell relevant sind, extrahiert. In der Tabelle ist angeführt, bei welchem Anteil der Bauwerke die Eigenschaften bekannt waren (Vollständigkeit) und ob sie in der Analyse verwendet wurden.

Bezeichnung	Beschreibung	Vollständigkeit	Verwendung
<i>lat, lon</i>	Geographische Position (Breitengrad, Längengrad)	29,7 %	-
<i>elev</i>	Meereshöhe [m]	29,7 %	-
<i>bau</i>	Baujahr	99,98 %	N
<i>cs<sub>typ</sub></i>	Querschnittstyp	67,4 %	K
<i>ls<sub>typ</sub></i>	Statisches System in der Längsrichtung	94,4 %	K
<i>mat</i>	Baumaterial	96,9 %	K
<i>norm</i>	Norm, die bei der Brückenplanung gültig war	100 %	-
<i>cem</i>	Zementtyp	80 %; 71 % *	K
<i>load<sub>target</sub></i>	Ziellastniveau	99,9 %	N
<i>n<sub>span</sub></i>	Anzahl der Felder	99,98 %	N
<i>n<sub>pier, tr</sub></i>	Anzahl der Stützen in der transversalen Richtung	30 %	-
<i>A<sub>br</sub></i>	Fahrbahnfläche [m <sup>2</sup> ]	99,99 %	N
<i>α</i>	Kreuzungswinkel [°]	98,6 %	-
<i>w<sub>br</sub></i>	Brückenbreite [m]	100 %	N
<i>L<sub>min</sub></i>	Kleinste Spannweite [m]	99,86 %	-
<i>L<sub>max</sub></i>	Größte Spannweite [m]	99,86 %	N
<i>L</i>	Brückenlänge [m]	100 %	-
<i>h<sub>min</sub></i>	Kleinste Pfeilerhöhe [m]	80 %	-
<i>h<sub>max</sub></i>	Größte Pfeilerhöhe [m]	80 %	N
<i>f<sub>ck</sub></i>	Betondruckfestigkeit [MPa]	87 %; 77 % *	N <sub>teil</sub>
<i>f<sub>y</sub></i>	Streckgrenze der schlaffen Bewehrung [MPa]	81 %; 71 % *	N <sub>teil</sub>
<i>z<sub>bet</sub></i>	Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	33 %; 28 % *	-

\* angeführt sind Werte für die Bauteile Überbau; Unterbau

Legende zur Spalte «Verwendung»:

K: kategorischer Parameter

N: numerischer Parameter

N<sub>teil</sub>: numerischer Parameter mit Verwendung nur bei Bauteilen: Oberbau, Unterbau, Fundament, Kappen

Tabelle 4-1 Potentiell relevante Eigenschaften, extrahiert aus SIB-Bauwerke

Da die geographische Position und daraus bestimmte Meereshöhe nur bei weniger als 30% der Bauwerke bekannt waren, wurde dieser Parameter nicht in die Analyse übernommen, da sonst 70% der Bauwerke nicht analysiert hätten werden könnten. Dasselbe gilt für die Anzahl der Stützen in der transversalen Richtung und den Zementgehalt. Die Parameter Querschnittstyp und Zementtyp haben zwar einen höheren Anteil an fehlenden Daten, wurden aber in die Analyse übernommen, da sie kategorische Parameter sind und ihre fehlenden Einträge in die Kategorie „unbekannt“ eingestuft werden. Die Kategorien (mögliche Werte) der kategorischen Parameter sind in der Tabelle 3-9 angeführt.

Bei der Analyse auf Bauteilebene wurden die oben angeführten Eigenschaften vom Bauwerk herangezogen, und zusätzlich wurden die bauteilspezifische Parameter Zementtyp, Betondruckfestigkeit und die Streckgrenze der verwendeten schlaffen Bewehrung hinzugefügt. Dies jedoch nur bei den Bauteilen Überbau, Unterbau, Fundament und Kappen.

#### 4.1.1.3 Zustandsnoten der Bauwerke/Bauteile

Für die Analyse auf Objektebene wurden die Daten der Brückenzustandsnoten herangezogen. Diese erreichen Werte zwischen 1,0 und 4,0 und haben eine Nachkommastelle. Wie im Abschnitt 3.2.1 beschrieben, wurden diese Werte in 7 Zustandsstufen eingeordnet, die jeweils dem Bereich von einer halben Zustandsnote entsprechen. Für die Analyse wurden die Daten mehrerer Inspektionsarten herangezogen. In Fällen, wo mehrere Inspektionsergebnisse in demselben Jahr vorliegen, wurde die detailliertere Inspektionsart bevorzugt (Hauptinspektion vor der einfachen Prüfung) und andere Daten in dem Jahr wurden nicht benutzt. Da eine Sonderprüfung nicht das ganze Tragwerk abdecken muss, sondern sich nur auf ein Bauteil beziehen kann, sollten die Sonderprüfungsergebnisse auf Objektebene eher nicht genutzt werden. Der Datensatz der Zustandsnoten auf Objektebene bestand zu 42 % aus einfachen Prüfungen, 54 % Hauptinspektionen und 3,8% Sonderprüfungen.

Auf der Bauteilebene konnten aus der SIB-Datenbank nur die aktuellen Zustandsnoten extrahiert werden, jedoch nicht ihre historischen Werte. Deshalb erfolgte hier eine Rekonstruktion der Substanzkennzahlen der Bauteile aus den dokumentierten Schäden. Die Substanzkennzahl, die die Aspekte der Standsicherheit und der Dauerhaftigkeit beinhaltet, wurde hier als ein Maß des physischen Bauteilzustands, welches man prognostizieren möchte, herangezogen. Zur Ermittlung der Substanzkennzahl wurde der in Deutschland verwendete Algorithmus (BMVI, 2017) implementiert. Aus der Bewertung der Einzelschäden – konkret ihres Einflusses auf die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit ausgedrückt in Stufen 0 bis 4 – wurde durch ihre Zusammenführung am konkreten Bauteil dessen Substanzkennzahl bestimmt. Das heißt, der Aspekt der Verkehrssicherheit wurde hier bewusst ausgeschlossen, weil dieser nicht den physischen Bauteilzustand an sich darstellt, sondern schon dessen Auswirkung. Die rekonstruierten Substanzkennzahlen erreichen Werte zwischen 1,0 und 4,0 und haben eine Nachkommastelle. Sie wurden in der Analyse in die gleichen Werteintervalle (1,0-1,4; 1,5-1,9; etc.) eingeteilt, die auch bei der Analyse auf Objektebene verwendet wurden. Schlussendlich standen für die Degradationsanalyse die Zustandsnoten auf Objektebene (d. h. inkl. dem Verkehrssicherheitsaspekt) zur Verfügung, und auf Bauteilebene die Substanzkennzahlen (d. h. ohne den Verkehrssicherheitsaspekt). Die Gliederung der Bauteile wurde



analog zu den Bauteilschreibungen in der Dokumentation der Einzelschäden in der SIB vorgenommen, woraus sich 12 Bauteile (Tabelle 4-2) ergeben haben.

Nr.	Bauteil
1	Überbau
2	Unterbau
3	Vorspannung
4	Fundament
5	Anker
6	Seile und Zugglieder
7	Lager
8	Fahrbahnübergang
9	Abdichtung
10	Belag
11	Kappen
12	Schutzeinrichtungen

Tabelle 4-2 Bauteile der Brücken in Deutschland

#### 4.1.2 Analyse auf Schadensebene

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Clusteranalyse auf der Grundlage des k-means-Algorithmus und des auf Gamma-Prozessen basierenden Degradationsmodells dargestellt. Bevor diese Analysen durchgeführt werden, werden die ausgewählten Daten bereinigt und für die Analyse vorbereitet. Die Datenbereinigung besteht in der Entfernung von Outliern und menschlichen Fehlern bei der Datenerfassung zu beseitigen. Beispiele für solche Fehler sind: eine Schadensklasse höher als 4 oder niedriger als 0 wurde zugewiesen, der Zeitpunkt der Inspektion wurde falsch erfasst, was zu einem unwahrscheinlichen oder unmöglichen Brückenalter zum Zeitpunkt der Inspektion führt.

##### 4.1.2.1 Ergebnisse der Clusteranalyse auf der Grundlage des k-means Algorithmus

Tabelle 4-1. Anzahl der Datensätze in den einzelnen Clustern (SIB-BW).

		Anfällig	Normal	Robust
<b>Abplatzung</b>	<b>Unterbau</b>	140	198	34
	<b>Überbau</b>	178	235	64
<b>Längsrisse</b>	<b>Unterbau</b>	148	172	102
	<b>Überbau</b>	248	339	120
<b>Schrägrisse</b>	<b>Unterbau</b>	44	47	28
	<b>Überbau</b>	120	84	22
<b>Querrisse</b>	<b>Unterbau</b>	32	51	14
	<b>Überbau</b>	210	218	43

<b>Netzrisse</b>	<b>Unterbau</b>	8	21	10
	<b>Überbau</b>	11	8	14

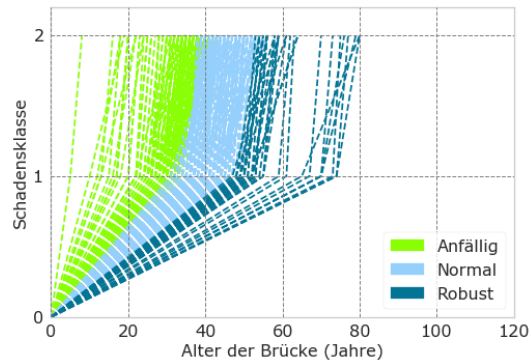


Abbildung4-11. Ergebnisse der Clusteranalyse, Abplattung im Unterbau (SIB-BW).

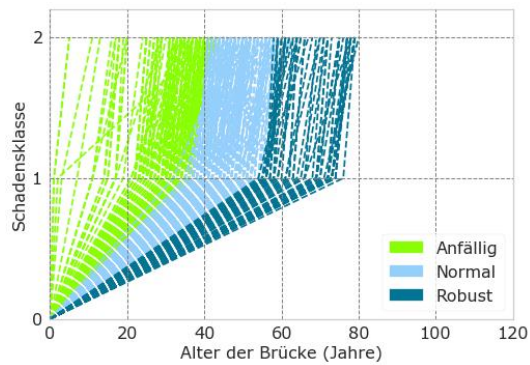


Abbildung4-12. Ergebnisse der Clusteranalyse, Abplattung im Überbau (SIB-BW).

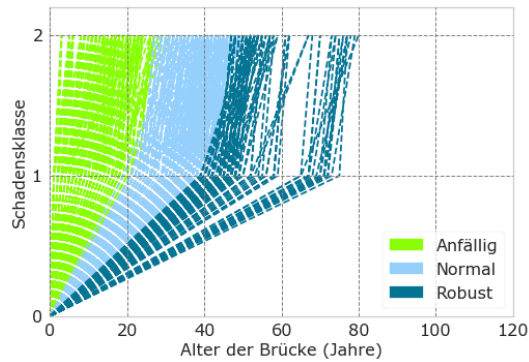


Abbildung4-13. Ergebnisse der Clusteranalyse, Längsrisse im Unterbau (SIB-BW).

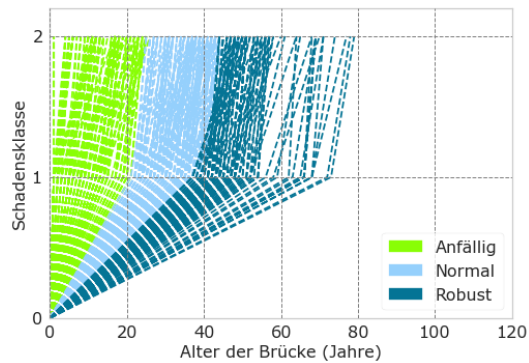


Abbildung4-14. Ergebnisse der Clusteranalyse, Längsrisse im Überbau (SIB-BW).

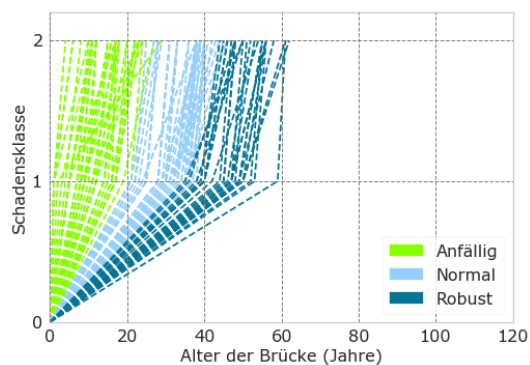


Abbildung4-15. Ergebnisse der Clusteranalyse, Schrägrisse im Unterbau (SIB-BW).

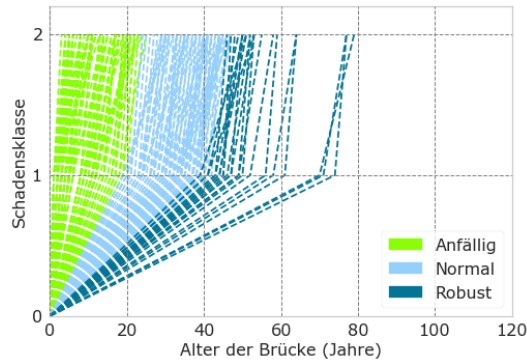


Abbildung4-16. Ergebnisse der Clusteranalyse, Schrägrisse im Überbau (SIB-BW).

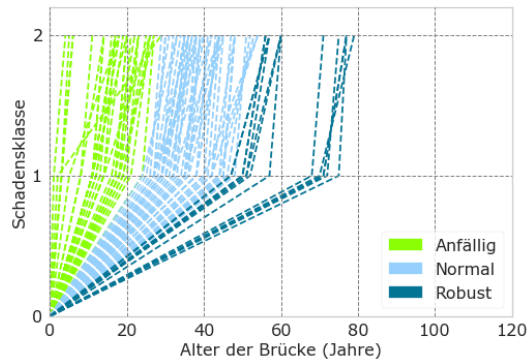


Abbildung4-17. Ergebnisse der Clusteranalyse, Querrisse im Unterbau (SIB-BW).

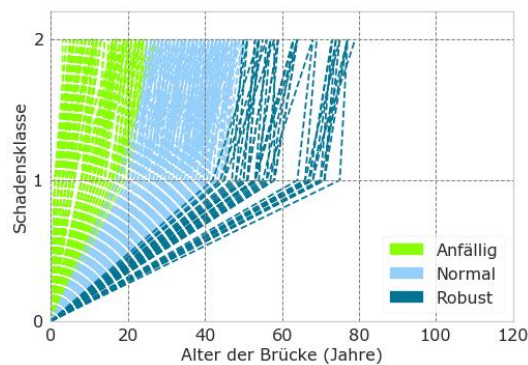


Abbildung4-18. Ergebnisse der Clusteranalyse, Querrisse im Überbau (SIB-BW).

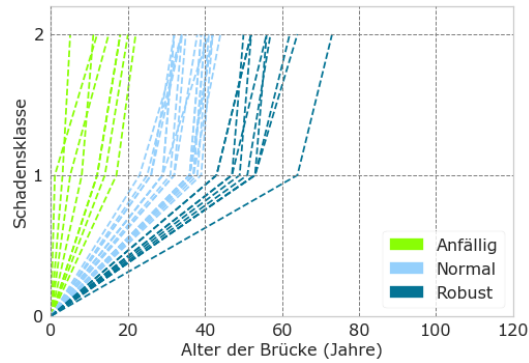


Abbildung4-19. Ergebnisse der Clusteranalyse, Netzrisse im Unterbau (SIB-BW).

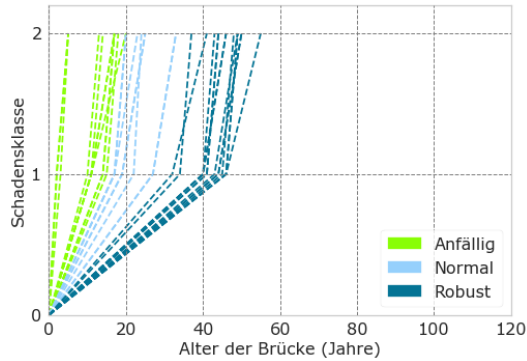


Abbildung 4-20. Ergebnisse der Clusteranalyse, Netzrisse im Überbau (SIB-BW).

#### 4.1.2.2 Degradationsmodell und Lebensdauerbewertung auf der Grundlage des Gamma-Prozesses – Schadensklasse zu Beginn: 0.

Tabelle 4-2. Durchschnittliches Alter der Brücke (Jahren), bis der Schaden die Zustandsnote erreicht (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0.

			Schadensklasse			
			1	2	3	4
<b>Abplatzung</b>	<b>Unterbau</b>	<b>Anfällig</b>	29,9	38,2	44,2	49,2
		<b>Normal</b>	43,0	52,0	58,0	62,6
		<b>Robust</b>	70,2	79,9	86,2	90,9
	<b>Überbau</b>	<b>Anfällig</b>	29,4	36,8	42,2	46,6
		<b>Normal</b>	45,3	53,0	58,1	62,0
		<b>Robust</b>	74,2	81,4	86,0	89,4
<b>Längsrisse</b>	<b>Unterbau</b>	<b>Anfällig</b>	10,1	16,0	21,7	27,2
		<b>Normal</b>	33,3	40,4	45,3	49,4
		<b>Robust</b>	49,8	57,3	62,5	66,5
	<b>Überbau</b>	<b>Anfällig</b>	9,2	14,8	20,3	26,2
		<b>Normal</b>	31,2	37,7	42,3	45,9
		<b>Robust</b>	47,6	54,4	59,1	62,6
<b>Schrägrisse</b>	<b>Unterbau</b>	<b>Anfällig</b>	9,8	15,3	20,5	25,9
		<b>Normal</b>	31,2	36,8	40,7	43,6
		<b>Robust</b>	45,0	51,7	56,2	59,8
	<b>Überbau</b>	<b>Anfällig</b>	7,0	12,4	17,9	24,0
		<b>Normal</b>	31,6	38,8	43,8	47,9
		<b>Robust</b>	51,7	58,9	63,5	67,0
<b>Querrisse</b>	<b>Unterbau</b>	<b>Anfällig</b>	12,4	18,2	23,4	29,0
		<b>Normal</b>	34,4	41,3	46,2	50,1
		<b>Robust</b>	60,0	67,3	72,0	75,6
	<b>Überbau</b>	<b>Anfällig</b>	8,1	13,6	19,4	25,4
		<b>Normal</b>	32,0	38,8	43,8	47,6
		<b>Robust</b>	57,2	64,2	68,8	72,4
<b>Netzrisse</b>	<b>Unterbau</b>	<b>Anfällig</b>	9,7	15,4	20,9	27,0
		<b>Normal</b>	20,7	26,7	31,1	34,8
		<b>Robust</b>	42,2	48,9	53,5	57,2
	<b>Überbau</b>	<b>Anfällig</b>	9,0	15,2	21,4	28,5
		<b>Normal</b>	33,2	40,4	45,6	49,6
		<b>Robust</b>	50,3	57,2	61,7	65,0



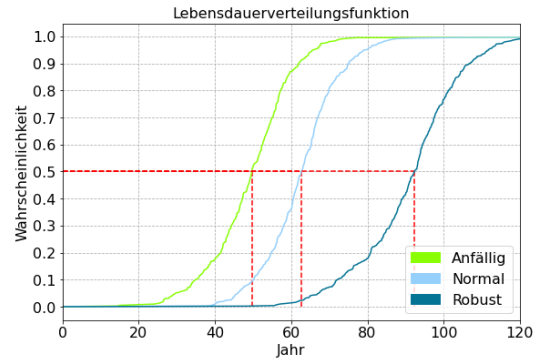
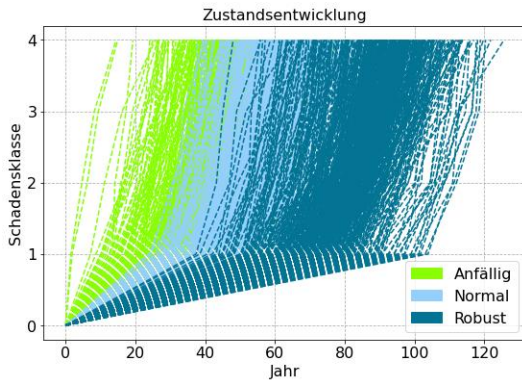


Abbildung 4-21 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Abplattung im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0.

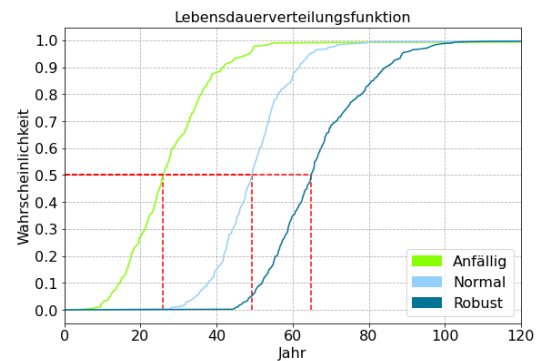
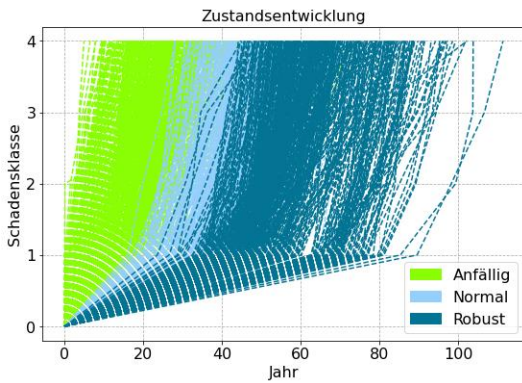


Abbildung 4-22 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Längsrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0.

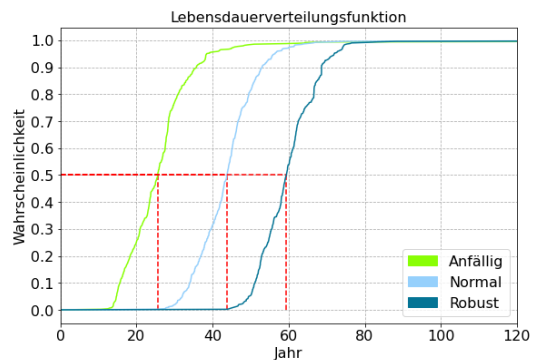
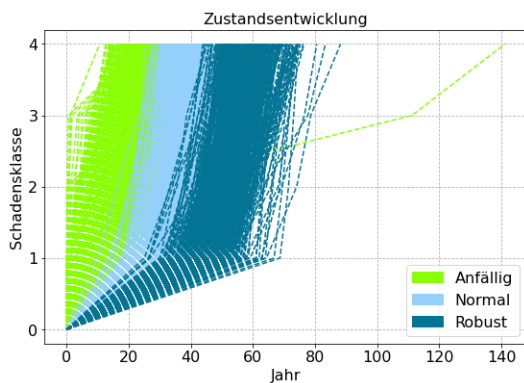


Abbildung 4-23 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Schrägrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0.



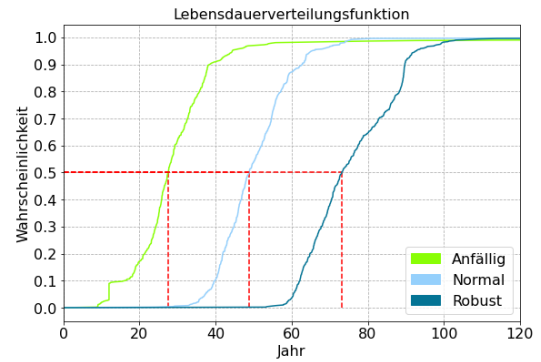
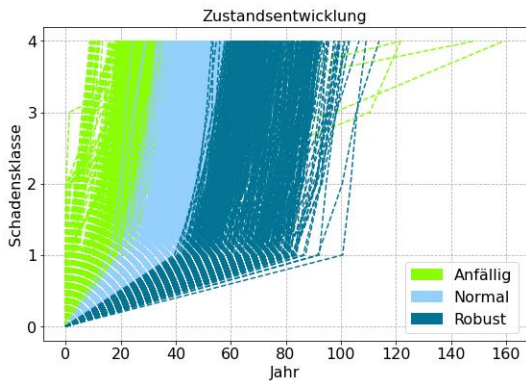


Abbildung 4-24 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Querrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0.

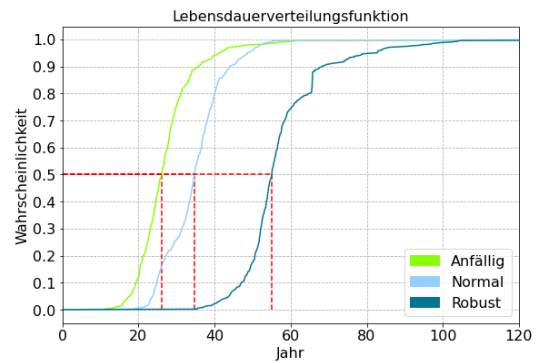
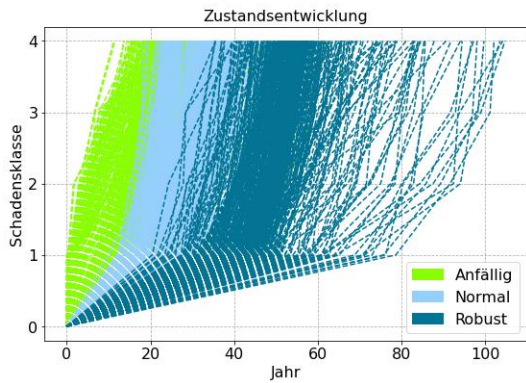


Abbildung 4-25 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Netzrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0.

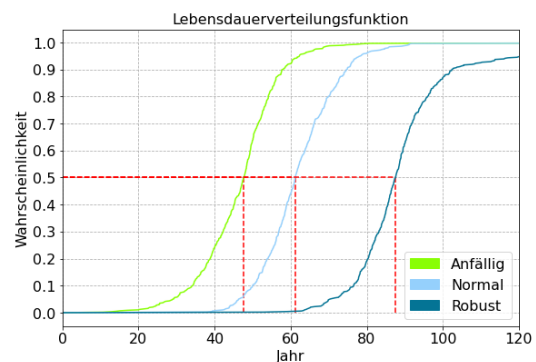
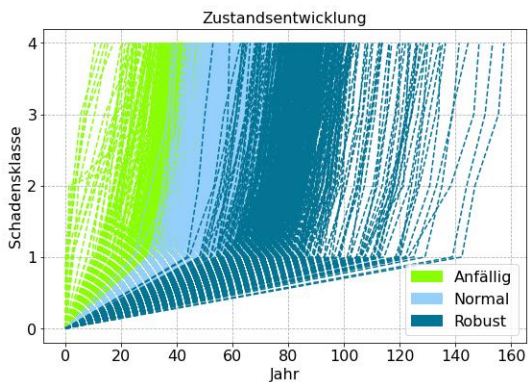


Abbildung 4-26 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Abplatzung im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0.

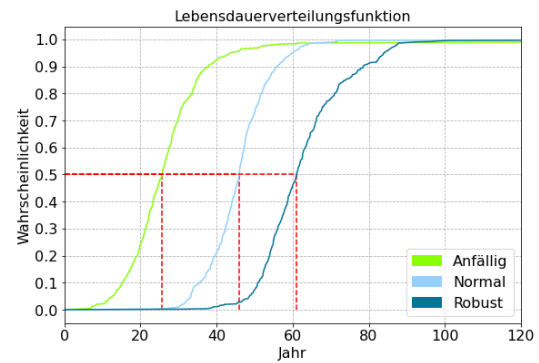
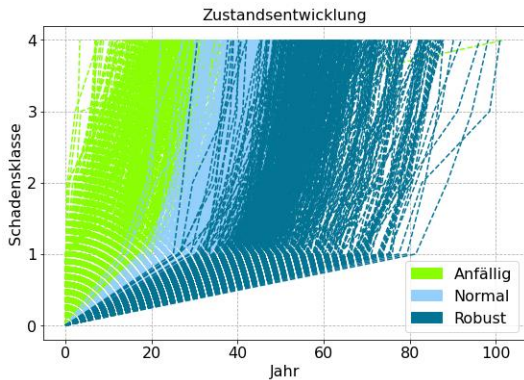


Abbildung 4-27 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Längsrisse im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0.

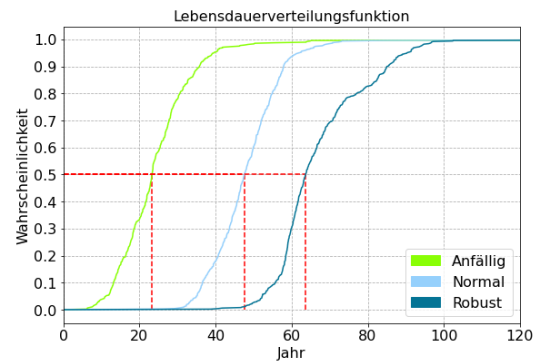
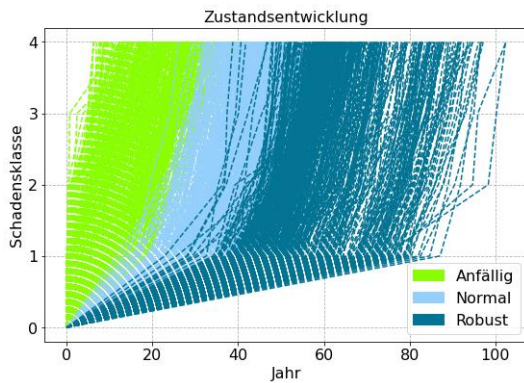


Abbildung 4-28 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Schrägrisse im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0.

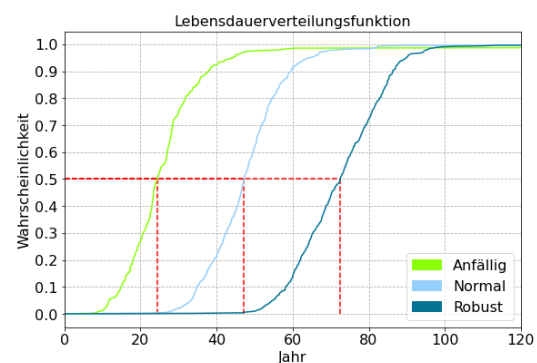
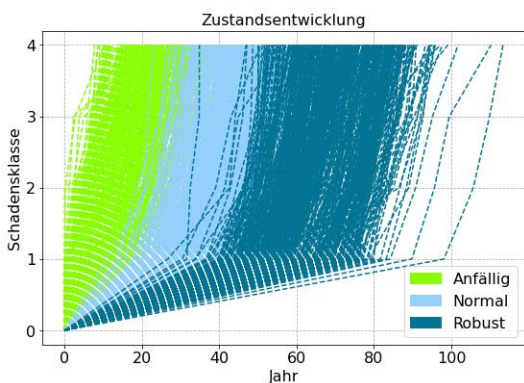


Abbildung 4-29 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Querrisse im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0.

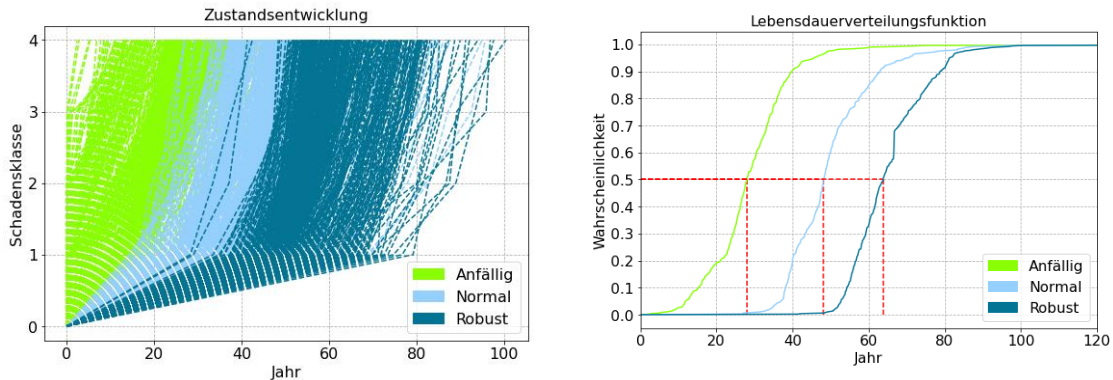


Abbildung 4-30 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Netzkritik im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 0.

#### 4.1.2.3 Degradationsmodell und Lebensdauerbewertung auf der Grundlage des Gamma-Prozesses – Schadensklasse zu Beginn: 1.

Tabelle 4-3. Durchschnittliches Alter der Brücke (Jahren), bis der Schaden die Zustandsnote erreicht (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1.

		2	3	4
<b>Abplatzung</b>	<b>Unterbau</b>	6.3	12.9	19.6
	<b>Überbau</b>	5.5	11.1	16.7
<b>Längsriss</b>	<b>Unterbau</b>	5.9	11.7	17.9
	<b>Überbau</b>	5.6	11.0	16.6
<b>Schrägriss</b>	<b>Unterbau</b>	5.0	10.2	15.3
	<b>Überbau</b>	5.9	11.8	17.9
<b>Querriss</b>	<b>Unterbau</b>	6.0	12.2	18.5
	<b>Überbau</b>	5.9	11.6	17.5
<b>Netzkritik</b>	<b>Unterbau</b>	6.0	11.7	17.8
	<b>Überbau</b>	6.3	12.6	18.5



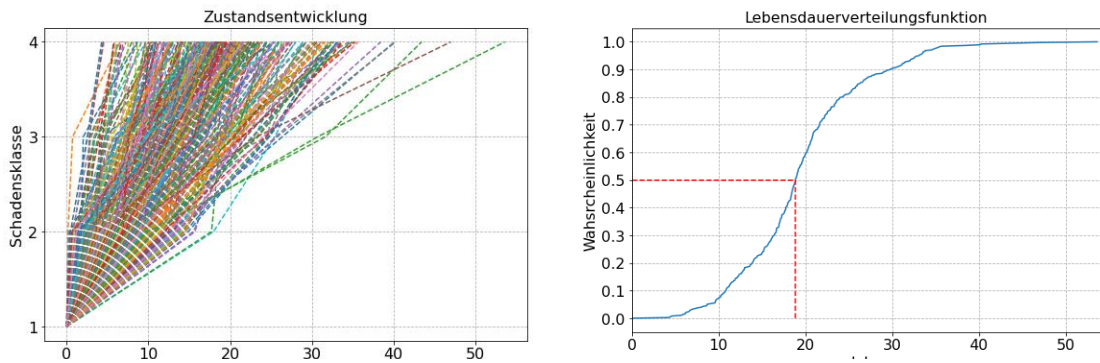


Abbildung 4-31. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Abplattung im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1.

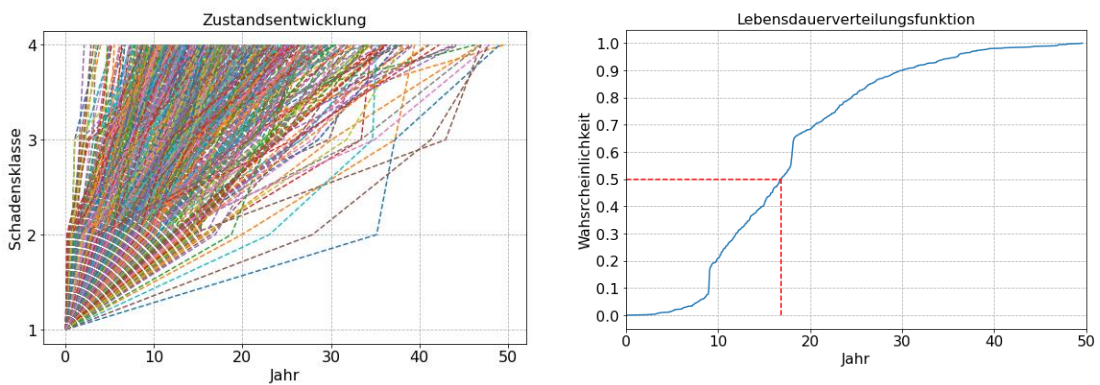


Abbildung 4-32. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Längrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1.

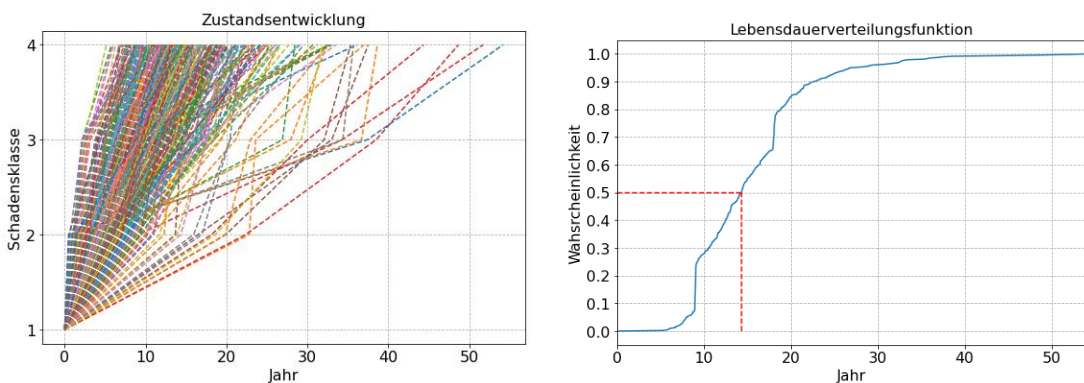


Abbildung 4-33. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Schrägrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1.

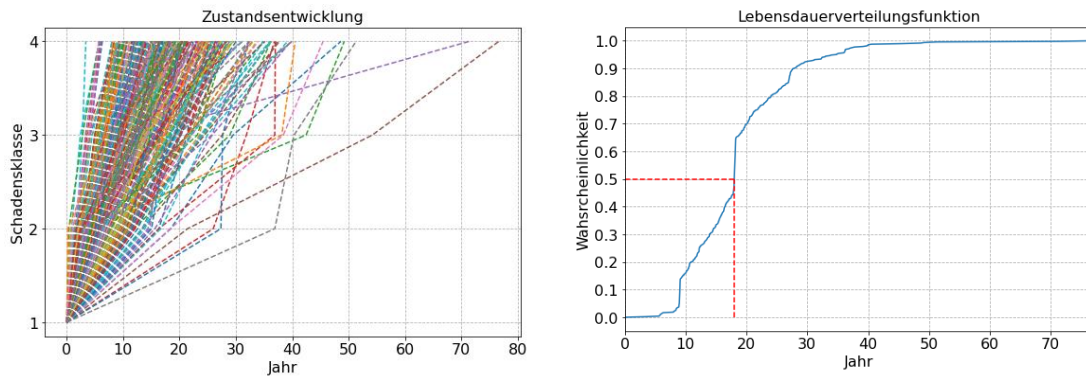


Abbildung 4-34. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Querrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1.

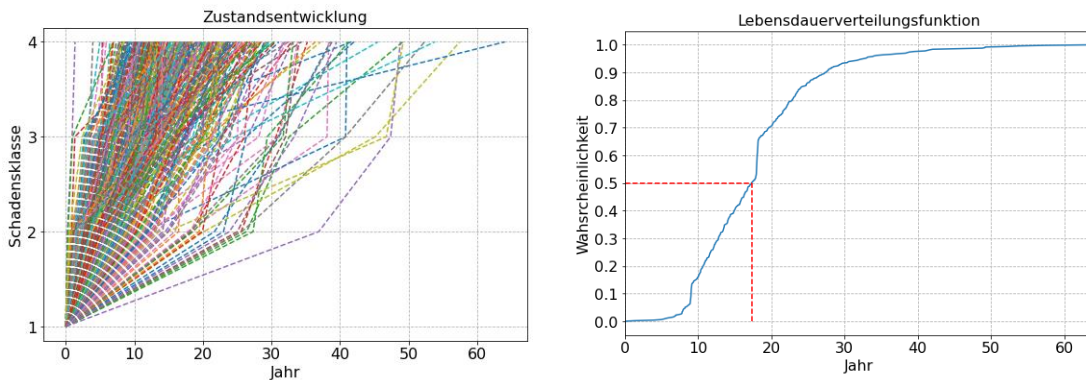


Abbildung 4-35 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Netzzrisse im Unterbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1.

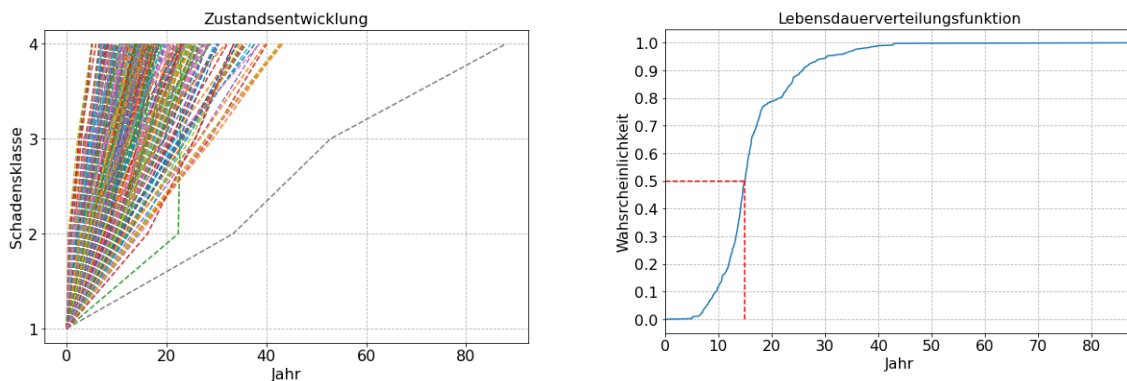


Abbildung 4-36 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Abplatzung im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1.

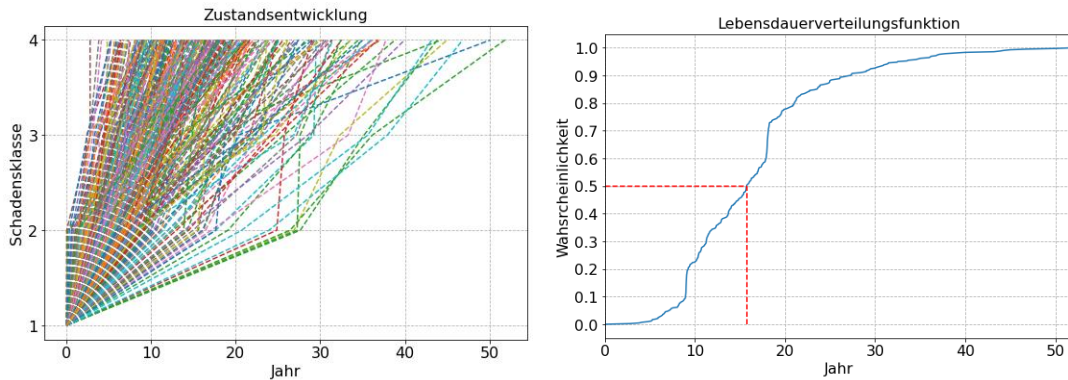


Abbildung 4-37. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Längsrisse im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1.

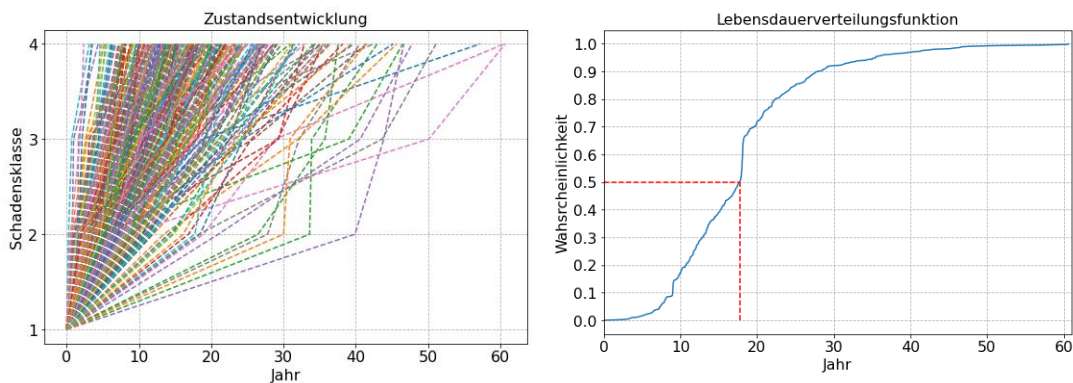


Abbildung 4-38. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Schrägrisse im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1.

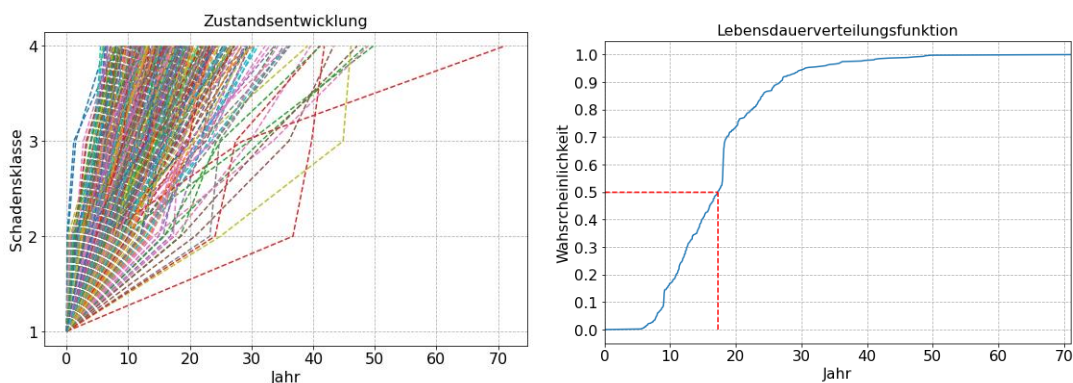


Abbildung 4-39. Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Querrisse im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1.

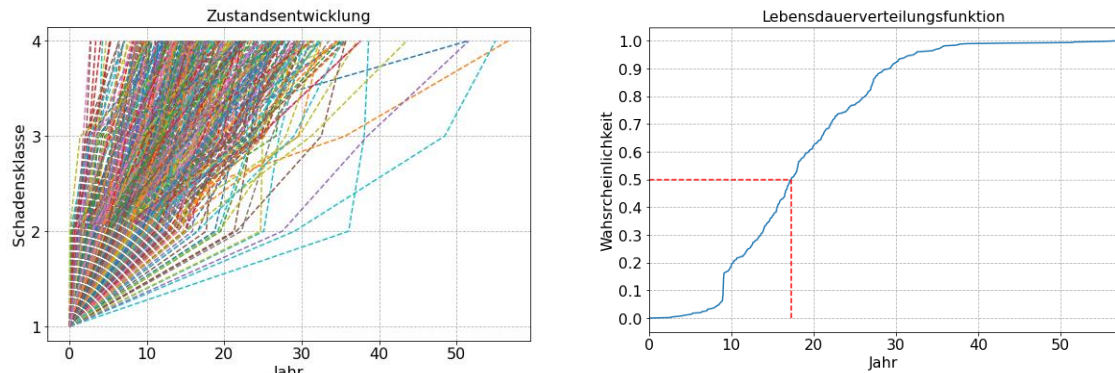


Abbildung 4-40 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Netzrisse im Überbau (SIB-BW) – Schadensklasse zu Beginn: 1.

### 4.1.3 Analyse auf Bauteil- und Objektebene

In diesem Abschnitt wird die Methodik, die im Abschnitt 03.2 beschrieben wurde, an Daten der deutschen Brücken angewandt. Die Analyse wurde separat auf der Objektebene und für jeden Bauteiltyp auf der Bauteilebene durchgeführt.

Im Schritt 1 erfolgte die Aufteilung nach den kategorischen Parametern, wobei hier alle Kombinationen der kategorischen Parameter erstellt werden. Zusätzlich zu den angeführten kategorischen Parametern (Tabelle 4-1) wurde auch die Anzahl der Baumaßnahmen als ein kategorischer Parameter hinzugefügt. Falls bei einem Bauwerk/Bauteil aus dem Notenverlauf eine Baumaßnahme identifiziert wird, teilt diese den Degradationspfad auf zwei auf. Die Teile vor und nach der identifizierten Baumaßnahme fallen in unterschiedliche Gruppen des Satzes 1, und für sie werden separate Prognosemodelle erstellt.

So entstanden die Gruppen des Satzes 1 (Gruppen A), wobei Gruppen mit weniger als 20 Degradationspfaden aufgrund ihrer geringen Größe verworfen wurden. Die Anzahl der erstellten Gruppen für die einzelnen Bauteiltypen ist in der Tabelle 4-3 angeführt. Das Bauteil „Brücke“ bezieht sich als die einzige Zeile in dieser Tabelle auf die Analyse auf Objektebene.



Bauteil	Gruppen A	Gruppen B	Gruppen C	Gruppen D
Brücke	73	10	735	328
Überbau	90	8	853	350
Unterbau	75	8	881	341
Vorspannung	5	3	0	0
Fundament	2	2	0	0
Lager	12	3	248	32
Fahrbahnübergang	14	3	261	111
Abdichtung	7	3	0	93
Kappen	58	7	702	327

Tabelle 4-3 Anzahl der erstellten Gruppen/Prognosemodelle für die einzelnen Bauteiltypen

Die Darstellung der Ergebnisse wird sich auf die Bauteile Brücke (Objektebene), sowie Überbau und Unterbau (Bauteilebene) konzentrieren.

Die Kombinationen der kategorischen Parameter in einzelnen Gruppen im Satz 1 ist der Tabelle 4-4 angeführt. Hier sind nur die 20 größten Gruppen, gemessen an der Anzahl der vorhandenen Degradationspfade, angeführt. Weitere Auflistungen sind im Anhang, Abschnitt 9.1 angeführt.

Im Schritt 2 wurden die Gruppen A anhand der Ähnlichkeit ihrer Degradationspfade in größere Gruppen zusammengefasst. So entstanden die Gruppen im Satz 2 – die Gruppen B.

Im Schritt 3 wurden die Gruppen A auf mehrere Cluster aufgeteilt, wobei jedes Cluster eine Gruppe des Satzes 3 (Gruppen C) formt. Dabei wurden mehrere Varianten der Clusterteilung, die sich in der Anzahl der Cluster unterscheiden, erstellt. Analog dazu wurden die Gruppen B auf mehrere Cluster des Satzes 4 (Gruppen D) aufgeteilt.

Gruppe	Zementtyp	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	2496
A2	CEM I	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	2004
A3	CEM II	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	1289
A4	CEM II	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	1281
A5	CEM I	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	1261
A6	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	1087
A7	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	959
A8	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	749
A9	CEM I	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	636
A10	unbekannt	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	596
A11	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Stahl	580
A12	CEM III	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	579
A13	CEM II	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	578
A14	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	518
A15	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	476
A16	CEM III	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	462
A17	CEM II	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	438
A18	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	unbekannt	368
A19	CEM II	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	344
A20	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	277
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tabelle 4-4 Die 20 größten Gruppen aus dem Satz 1 für den Bauteil Überbau

Die Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe im Satz 1 ist in der Abbildung 4-41 sortiert dargestellt. Für jede dieser Gruppen wurde aus den zugehörigen Degradationspfaden ein Prognosemodell erstellt. Je größer die Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe ist, desto besser kann ein Prognosemodell angepasst werden. Jedoch sollte die Gruppe möglichst wenig heterogen sein, um die Streuungen innerhalb der Gruppe niedrig zu halten. Das spricht wieder gegen die Erstellung von großen Gruppen.

Die Abbildung 4-42 zeigt Prognose für Gruppen A1 und A16 auf Objektebene, die aus 2496 (A1) und 462 (A16) Degradationspfaden von Stahlbetonplatten erstellt wurden.

Die Abbildung 4-43 zeigt Prognose für Gruppen A31 und A34 auf Objektebene, die aus 105 (A31) und 88 (A34) Degradationspfaden von Spannbetonhohlkästen erstellt wurden.

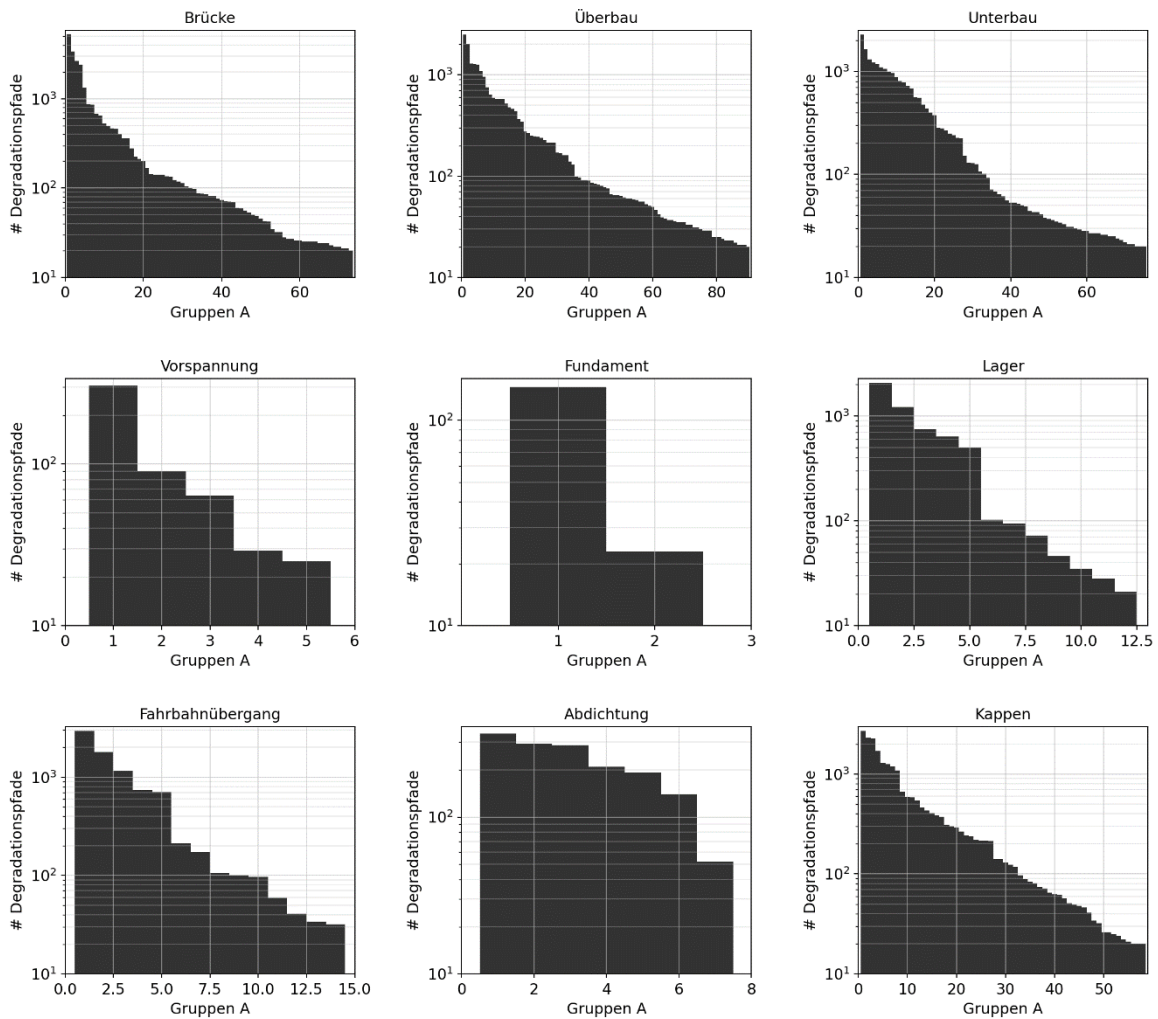


Abbildung 4-41 Sortierte Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe im Satz 1 (Gruppen A)  
Im Weiteren werden ausgewählte Prognosemodelle aus dem Satz 1 (Gruppen A) vorgestellt.  
Weitere Darstellungen befinden sich im Anhang, Abschnitt 9.1, jedoch auch hier konnten  
aufgrund der Vielzahl der erstellten Modelle nur eine Auswahl inkludiert werden.

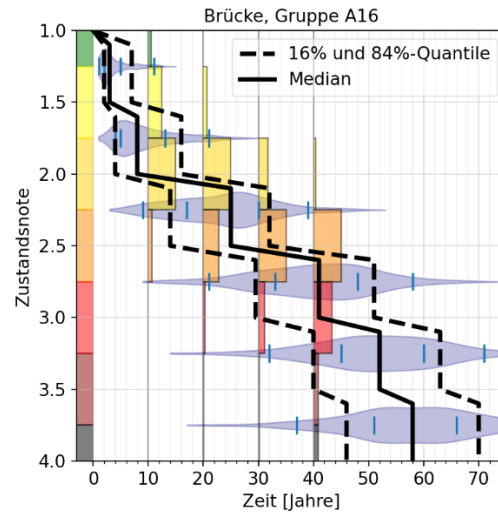
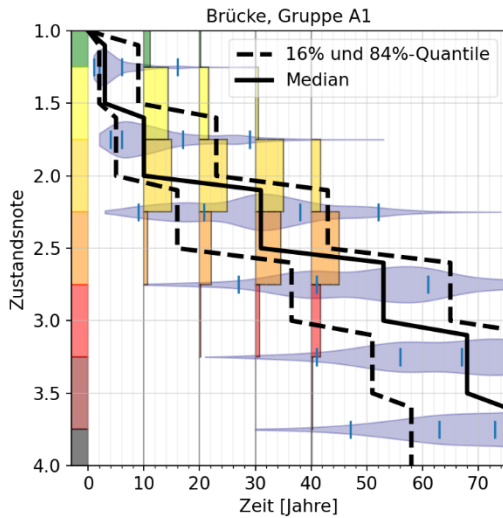


Abbildung 4-42 Prognose auf Objektebene für Gruppe A1 (Stahlbetonplatten ohne Durchlaufwirkung, links) und Gruppe A16 (Stahlbetonplatten mit Durchlaufwirkung, rechts)

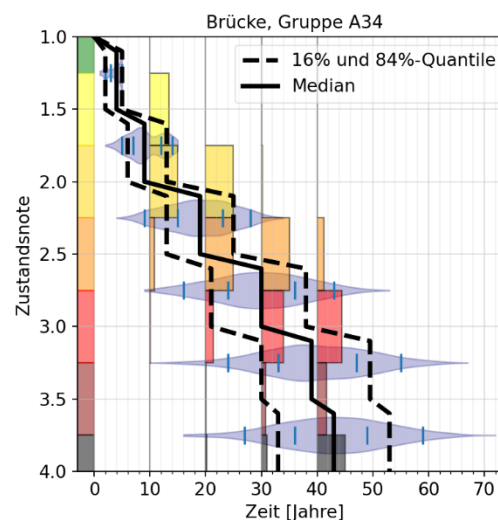
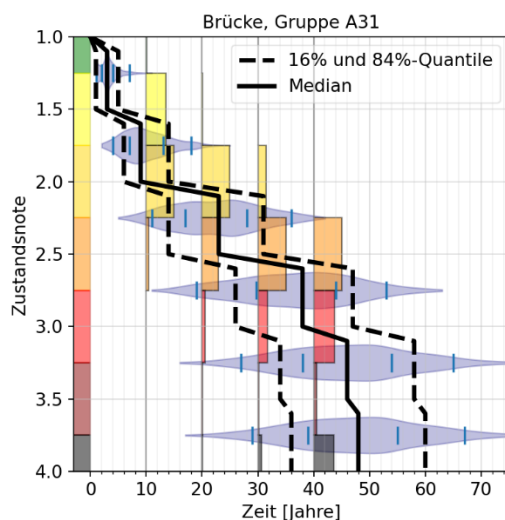


Abbildung 4-43 Prognose auf Objektebene für Gruppe A31 (Spannbetonhohlkasten Zement unbekannt, links) und Gruppe A34 (Spannbetonhohlkasten CEM II, rechts)

Die Ergebnisse der Prognosemodelle der Gruppe A zeigen eine Abhängigkeit von der Anzahl der Degradationspfade, die zur deren Ableitung benutzt wurden. Die Abbildung 4-44 zeigt für alle Prognosemodelle für Bauteil Überbau aus dem Satz 1 (Gruppen A) den Median, wann Zustandsstufen 2,0, 2,5 und 3,0 erreicht werden. Eine Korrelation mit der Anzahl der Degradationspfade ist hier offensichtlich. Der Grund dafür liegt vermutlich darin, dass in den Gruppen A wichtige Brückenparameter noch nicht berücksichtigt werden, wie z. B. das Baujahr. Hier kann es zu systematischen Verzerrungen kommen, in dem die Größe einer Gruppe (Anzahl der Bauwerke) vermutlich mit der Verteilung der Baujahre zusammenhängt.

Diese Korrelation ist bei den Gruppen C und D (Sätze 3 und 4) nicht mehr ersichtlich (Abbildung 4-45). Aus diesem Grund sind die Prognosemodelle der Gruppen A und B eher als Zwischenschritte anzusehen; für die Anwendung werden Modelle der Gruppen C und D empfohlen.

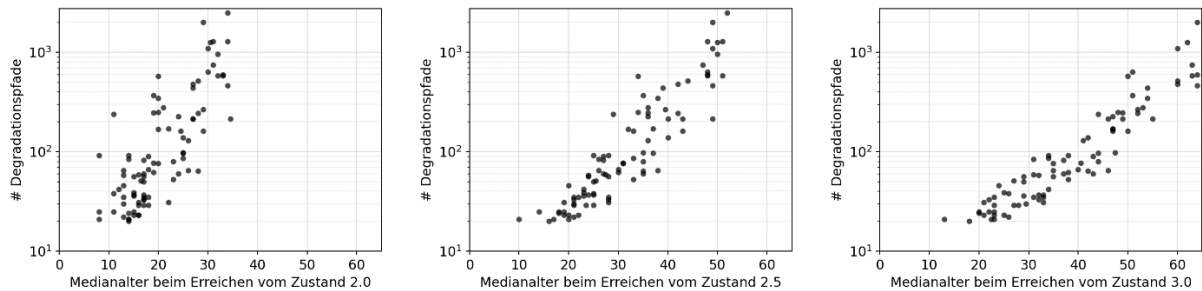


Abbildung 4-44 Median des Alters, wann die Zustände 2,0, 2,5 und 3,0 gemäß den Prognosemodellen der Gruppen A für den Überbau erreicht werden

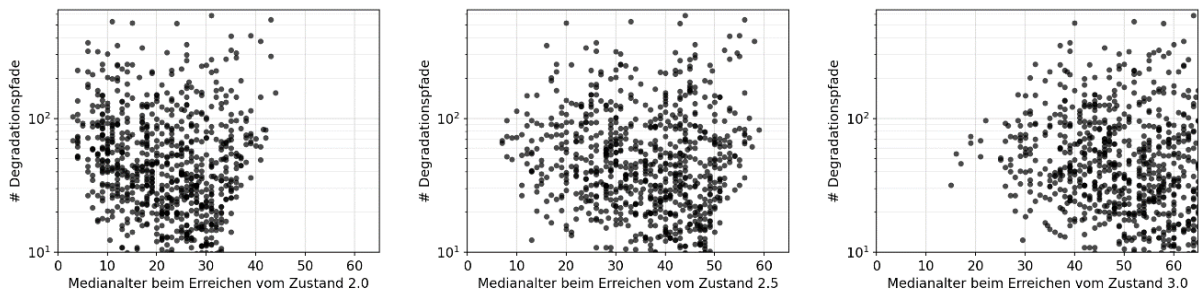


Abbildung 4-45 Median des Alters, wann die Zustände 2,0, 2,5 und 3,0 gemäß den Prognosemodellen der Gruppen C für den Überbau erreicht werden

Die Prognosemodelle der Gruppen B (Satz 2) entstehen durch Zusammenführung mehrerer Modelle aus Gruppen A. Dadurch sollen größere Datensätze entstehen. Die Folge ist, dass die Streuung der Modelle der Gruppen B generell größer ist. Die Abbildung 4-46 zeigt die Prognose für eine Gruppe aus dem Satz 1 (links) und vergleicht sie mit dem Modell aus dem Satz 2 (rechts), in das diese Gruppe (zusammen mit anderen Gruppen) eingegliedert wurde. Der Anstieg der Streuung ist an der Distanz der Kurven der 16%- und 84%-Quantile merklich.

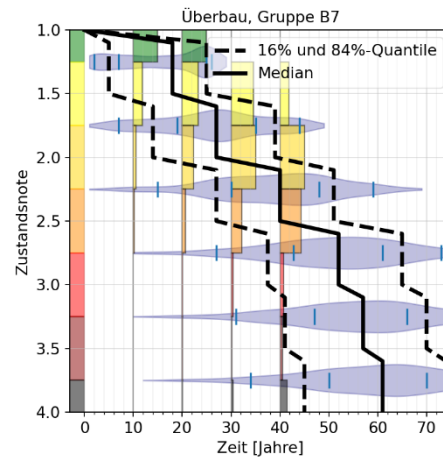
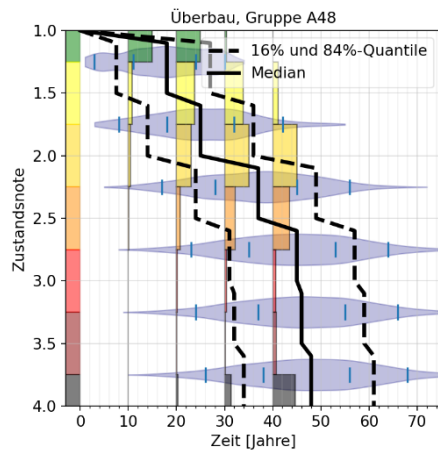


Abbildung 4-46 Prognose auf Objektebene für Gruppe A48 (Spannbetonplatte mit Durchlaufwirkung, links) und Gruppe B7 (mehrere gruppierte Typen, rechts)

Im Schritt 3 wurde jede Gruppe aus dem Satz 1 auf mehrere Cluster aufgeteilt, wodurch Gruppen C (Satz 3) entstanden sind. In der gleichen Art wurden die Gruppen B aufgeteilt, wodurch Gruppen D entstanden sind.

Ein Beispiel der Aufteilung auf Cluster ist unten angeführt. Die Abbildung 4-47 zeigt die Prognose für den Überbau von Stahlbetonplattenbalken ohne Durchlaufwirkung mit CEM II, ohne vorige Baumaßnahmen, und basiert auf 476 Degradationspfaden.

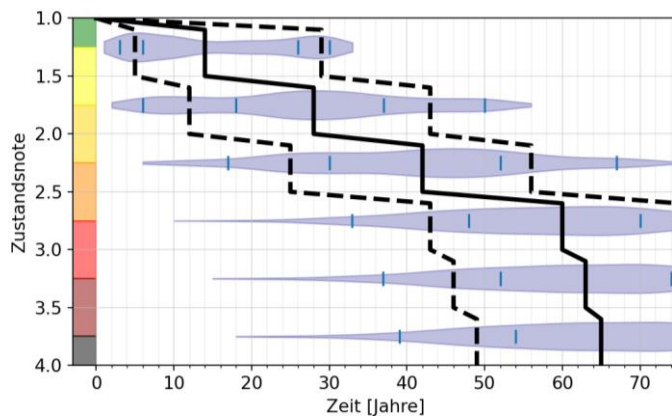


Abbildung 4-47 Prognose für die Gruppe A15, Bauteiltyp Überbau

In der Abbildung 4-48 sind die Prognosen der Gruppen C, die durch die Aufteilung der Gruppe A15 auf 9 Gruppen entstanden sind, dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Streuung der aufgeteilten Gruppen kleiner ausfällt. Diese Aufteilung wurde auch in drei weiteren Varianten durchgeführt: jeweils durch Benutzung von 3, 5 und 15 Clustern.



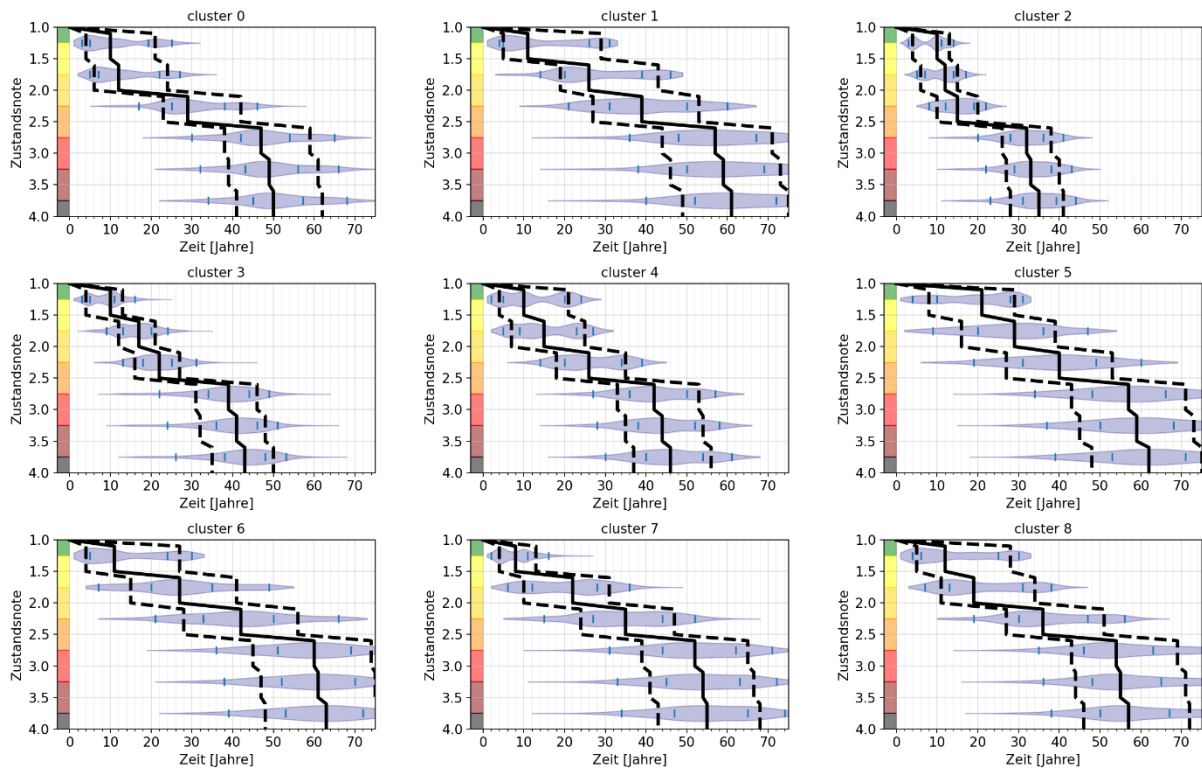


Abbildung 4-48 Prognose für die Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A15 Überbau auf 9 Gruppen entstanden sind

Eine Schwierigkeit besteht darin, das richtige Cluster basierend auf Eigenschaften des Bauwerks/Bauteils auszuwählen. Dazu werden im Schritt 4 Random-Forest Klassifikatoren gebildet. Durch die Random-Forest Analyse werden aus den numerischen Parametern die wichtigsten identifiziert. In diesem Fall hat die Random-Forest Analyse vier wichtige numerische Parameter identifiziert: Baujahr, Breite, größte Spannweite und größte Pfeilerhöhe. Der antrainierte Klassifikator schätzt basierend auf diesen vier Parametern das zugehörige Cluster. Zur visuellen Darstellung dieses Klassifikators wäre ein 4-dimensionaler Raum nötig. Für die Zwecke der Darstellung wurde hier ein Klassifikator mit nur zwei Parametern neu antrainiert; dieser ist in der Abbildung 4-49 dargestellt. Hier hat der Random-Forest Algorithmus die Parameter Baujahr und Brückenbreite ausgewählt. Die Performance des Klassifikators lässt sich durch die confusion matrix beurteilen. Im Vergleich dazu zeigt die Tabelle 4-5 die confusion matrix des Klassifikators, der vier Parameter verwendet. Es ist ersichtlich, dass dieser eine bessere Performance hat, da die Werte in der Hauptdiagonale höher sind und die Werte außerhalb der Hauptdiagonale niedriger.

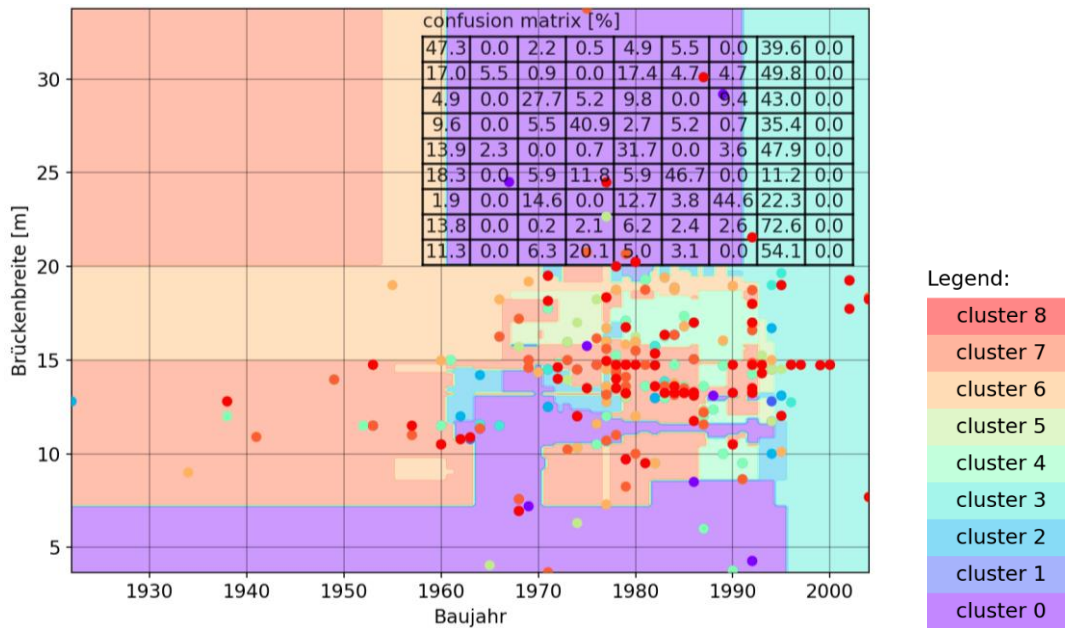


Abbildung 4-49 Antrainierter Random-Forest Klassifikator mit zwei Parametern

		Prognostizierter Cluster								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Tatsächlicher Cluster	0	46,2	14,5	6,8	0,4	10,3	4,0	0,0	1,8	16,0
	1	1,7	82,6	4,1	6,4	1,2	3,8	0,0	0,0	0,2
	2	1,0	8,2	75,7	3,5	5,8	5,8	0,0	0,0	0,0
	3	0,2	26,2	16,1	47,0	4,7	4,0	0,0	0,0	1,7
	4	9,6	16,5	15,0	2,9	40,5	6,9	0,0	0,5	8,1
	5	2,5	12,4	10,4	3,9	1,4	66,9	0,0	0,0	2,5
	6	11,1	50,4	3,0	0,7	11,9	3,7	7,4	0,7	11,1
	7	8,1	6,5	8,1	0,0	7,3	5,7	0,0	64,2	0,0
	8	23,6	13,8	2,6	4,4	8,8	2,1	0,0	0,0	44,7

Tabelle 4-5 Confusion Matrix [%] des Random-Forest Klassifikators mit vier Parametern

Ähnlich verlief die Aufteilung der Gruppen und das Antrainieren der Random-Forest Klassifikatoren für alle Gruppen aus Sätzen 1 und 2 (Gruppen A und B). Die Häufigkeit, mit der die Random-Forest Klassifikatoren die numerischen Parameter als wichtig für die Einordnung in die richtigen Cluster ausgewählt haben, ist in der Tabelle 4-6 dargestellt. Am öftesten wurden die Parameter Baujahr, max. Spannweite, Brückenbreite und max. Pfeilerhöhe ausgewählt.

Parameter	Brücke	Überbau	Unterbau	Lager	Fahrbahnübergang	Kappen
Druckfestigkeit	0	27	31	0	0	15
Streckgrenze	0	4	7	0	0	4
max.Pfeilerhöhe [m]	53	77	82	22	23	66
Anzahl der Felder	5	18	15	7	11	10
Baujahr	59	77	82	23	23	68
Brückenfläche [m <sup>2</sup> ]	58	0	1	0	0	0
max.Spannweite [m]	57	77	83	23	23	68
Ziellastniveau	19	18	10	5	8	12
Brückenbreite [m]	57	76	82	23	23	68

Tabelle 4-6 Häufigkeit der Auswahl von numerischen Parameter in der Random-Forest Analyse

Als weiteres Beispiel wird hier die Prognose für Bauteil Unterbau von Stahlbetonplattenbrücken ohne Durchlaufwirkung, ohne vorige Baumaßnahmen und mit CEM II (Abbildung 4-50) dargestellt.

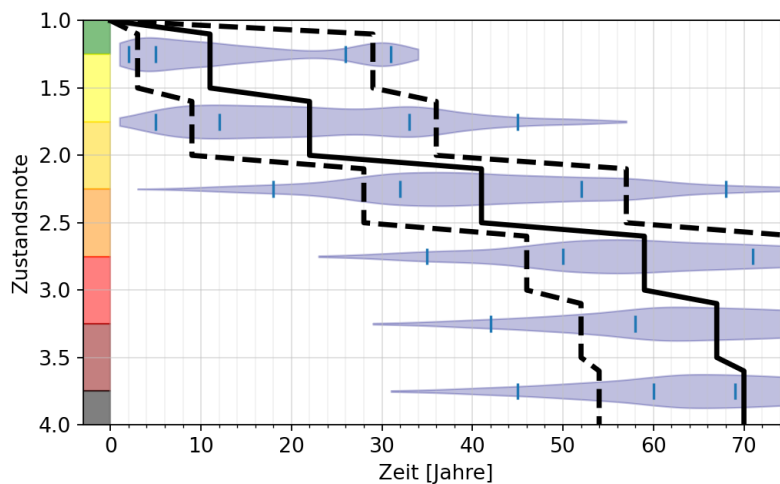


Abbildung 4-50 Prognose für die Gruppe A1, Bauteiltyp Unterbau

Die Streuung der Prognose dieser Gruppe ist relativ groß. Die Abbildung 4-51 zeigt die Prognosemodelle, die durch Aufteilung dieser Gruppe auf 8 Cluster (Gruppen C) entstanden sind. Die Streuungen innerhalb der Gruppen sind wesentlich geringer geworden. Die Performance des zugehörigen Klassifikators ist in der Tabelle 4-7 dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Cluster 2, 4 und 6 kaum richtig prognostiziert werden, sondern anderen Clustern zugeordnet werden. Das zeigt sich dadurch, dass in der confusion matrix (Tabelle 4-7) die Elemente der Hauptdiagonale an diesen Stellen kleine Werte aufweisen. Die Daten des Clusters 4 werden am häufigsten dem Cluster 1 zugeordnet. Da jedoch die Prognosen für die Cluster 1 und 4 nicht sehr unterschiedlich sind, ist die dadurch resultierende Abweichung eher

gering. Dagegen ergeben sich für die Daten des Clusters 2 größere Abweichungen, denn diese werden oft den Clustern 1 und 7 zugeordnet, deren Degradationsverlauf schneller verläuft. Hier zeigt sich die Schwierigkeit der Aufgabe, aus den Bauteileigenschaften auf die Zustandsentwicklung zu schließen. Das ergibt sich dadurch, dass es oft Bauteile mit sehr ähnlichen Eigenschaften gibt, die jedoch sehr unterschiedliche Zustandsentwicklungen aufzeigen. Deswegen ist es für die antrainierten Modelle manchmal schwierig, das Bauteil der richtigen Zustandsentwicklung zuzuordnen. Hier zeigt sich noch Potential für zukünftige Forschung, um diese Unsicherheit der Clusterzuordnung zu berücksichtigen, z.B. durch Ensemble-Modelle.

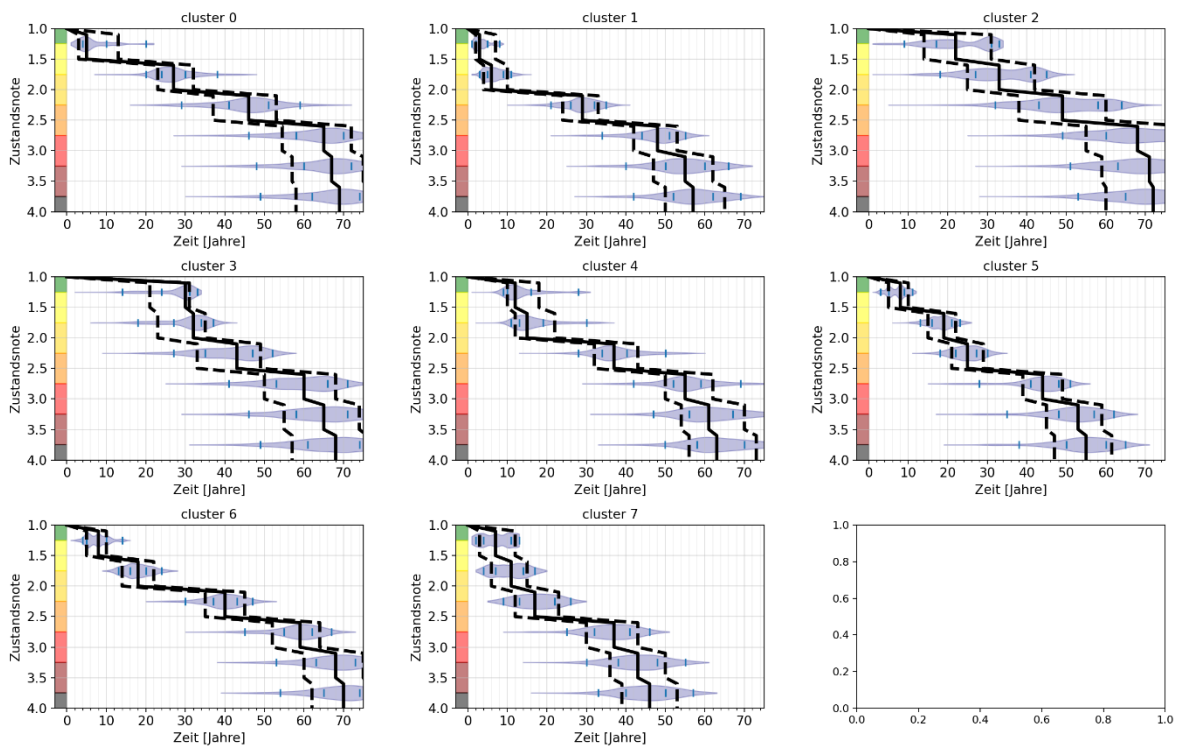


Abbildung 4-51 Prognose für die Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Unterbau auf 8 Gruppen entstanden sind

		Prognostizierter Cluster							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Tatsächlicher Cluster	0	31,6	24,4	0,0	3,3	0,0	13,2	0,0	27,6
	1	0,1	80,5	0,0	0,7	0,0	0,6	0,0	18,0
	2	1,2	30,4	0,9	17,9	0,0	15,1	0,2	34,3
	3	0,5	22,2	0,0	35,1	1,6	4,0	0,0	36,6
	4	0,1	59,7	0,1	3,5	10,2	1,3	0,0	25,1
	5	1,5	17,5	0,0	1,9	0,1	35,5	0,3	43,2
	6	1,3	50,5	0,0	1,9	0,0	15,8	3,1	27,4
	7	0,4	17,3	0,0	1,0	0,2	1,7	0,0	79,4

Tabelle 4-7 Confusion Matrix [%] des zugehörigen Random-Forest Klassifikators

Die in diesem Abschnitt bisher dargestellten Prognosemodelle nutzten die Annahme  $\Delta t_{bj,lim} = 10$  Jahre, d. h. der Zeitabstand zwischen dem Baujahr und der ersten verfügbaren Bauwerksprüfung darf max. 10 Jahre betragen, um das Baujahr mit der Zustandsnote 1 in den Degradationspfad zu inkludieren. Wie im Abschnitt 3.2.1 erwähnt, wurde alternativ auch die Annahme  $\Delta t_{bj,lim} = 25$  Jahre angewandt. Der Vergleich der Auswirkung dieser Annahme lässt sich an den Prognosemodellen der Gruppe A darstellen, denn hier ist die Aufteilung der Bauwerke/Bauteile auf die Gruppen unabhängig von  $\Delta t_{bj,lim}$ . Die Annahme  $\Delta t_{bj,lim} = 25$  Jahre ist sinnvoll vor allem bei Bauteilen, bei denen Baumaßnahmen üblicherweise erst nach 25 Jahren oder später auftreten; zu diesen zählen z. B. Überbau und Unterbau.

Die Abbildung 4-52 zeigt den Vergleich zwischen der Anzahl der Degradationspfade in den Gruppen A. Hier sind sowohl Gruppen auf Objektebene als auch auf Bauteilebene (alle Bauteiltypen) gemeinsam dargestellt. Es zeigt sich (wie erwartet), dass die Annahme  $\Delta t_{bj,lim} = 25$  Jahre zu einer größeren Anzahl der verfügbaren Degradationspfaden führt; der Effekt ist insbesondere bei kleineren Gruppen merklich. Das zeigt sich daran, dass die Punkte Großteils oberhalb der blauen gestrichelten Diagonallinie liegen.

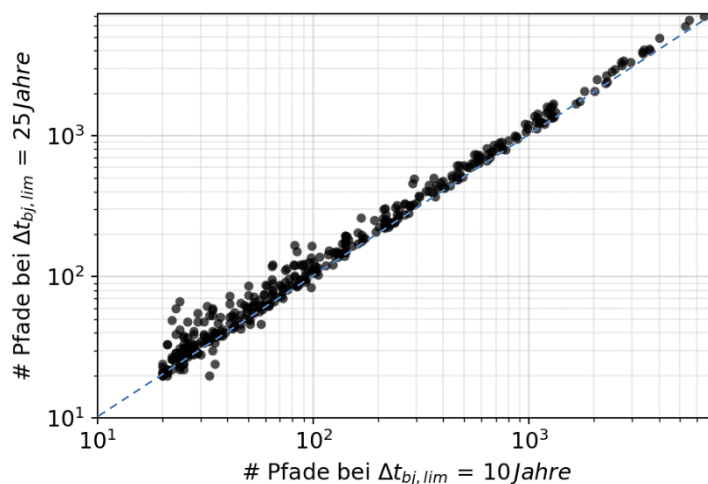


Abbildung 4-52 Vergleich der Anzahl von Degradationspfaden pro Gruppe im Satz 1 (Gruppen A) bei zwei unterschiedlichen Annahmen von  $\Delta t_{bj,lim}$

Die Auswirkung auf die resultierenden Prognosen ist in der Abbildung 4-53 dargestellt. Gezeigt wird das Medianalter beim Erreichen der Zustandsnoten 2,0, 2,5 und 3,0, für jede Gruppe aus dem Satz 1 (Gruppen A). Auch hier sind sowohl Gruppen auf Objektebene als auch auf Bauteilebene (alle Bauteiltypen) gemeinsam dargestellt.

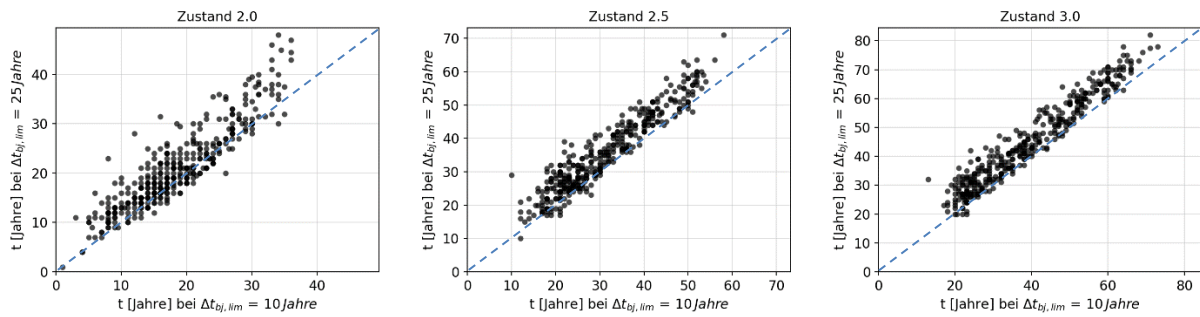


Abbildung 4-53 Vergleich des Medianalters beim Erreichen vom Zustand 2,0 (links), 2,5 (mitte) und 3,0 (rechts) bei zwei unterschiedlichen Annahmen von  $\Delta t_{bj,lim}$  für alle Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A)

Es ist ersichtlich, dass die Annahme  $\Delta t_{bj,lim} = 25$  Jahre generell zu Prognosemodellen führt, die eine etwas langsamere Degradation vorhersagen, was auch der Erwartung entspricht.



## 4.2 Schweiz

### 4.2.1 Datengrundlage KUBA-DB

Die Analyse auf Bauteilebene konzentriert sich auf Bauteile, denen die Zustandsnoten 2 und 3 zugewiesen wurden, und sich zunehmend verschlechtern. Dies bedeutet, dass Bauteile, die über den Zeitraum, in dem die Inspektionen durchgeführt wurden, einen stationären Zustand aufweisen, sowie Zustandsdaten, die sich auf Verbesserungen durch Reparaturarbeiten beziehen, bei der Analyse nicht berücksichtigt wurden. Die berücksichtigten Zustandsdaten sind reichhaltig und ermöglichen es, Schadensfamilien anhand der Geschwindigkeit, mit der sich ihr Zustand entwickelt, zu identifizieren. Die Zustandsnoten 4 und 5 werden den Bauteilen seltener zugeordnet, so dass diese Daten, obwohl sie vorhanden sind, bei der Clusteranalyse nicht berücksichtigt werden, da es keine vollständigen Sequenzen gibt, die gruppiert werden können. Die Angaben zum Alter der Brücke, für die das Bauteil der Zustandsnote 4 zugeordnet ist, ermöglichen jedoch statistische Untersuchungen. Die Degradationspfade, die bei Zustandsnote 3 enden, wurden durch Stichproben aus der Wahrscheinlichkeitsmassenfunktion (PMF) der Verweildauer in Zustandsnote 3 vervollständigt. Anschließend wird die Abfolge des Brückenalters, bei dem die Zustandsnote 2, 3 und 4 erreicht wird, in der Analyse auf der Grundlage des Gamma-Prozesses berücksichtigt.

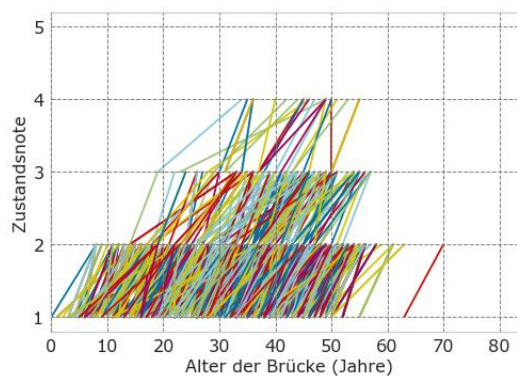


Abbildung 4-54. - Übergänge von Zustandsnoten - Bauteilgruppe 1 (Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger) (KUBA-DB).

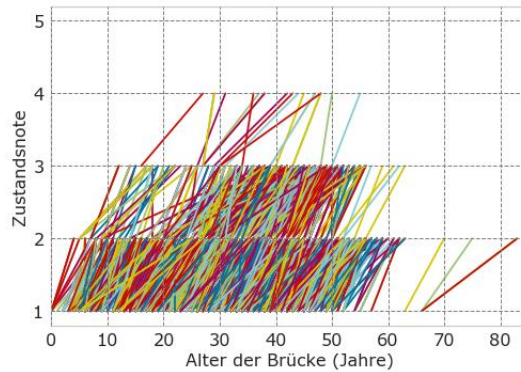


Abbildung 4-55 Übergänge von Zustandsnoten - Bauteilgruppe 2 (Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze) (KUBA-DB).

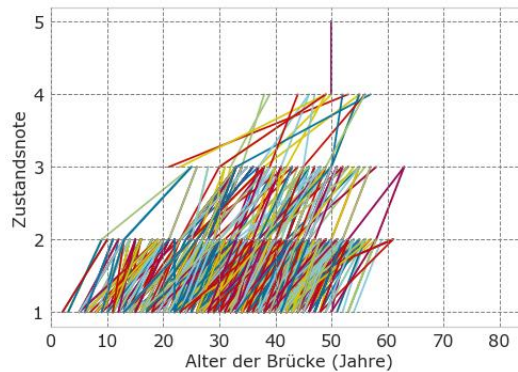


Abbildung 4-56 Übergänge von Zustandsnoten - Bauteilgruppe 3 (Punktkipplager, Linienkipplager, Lager) (KUBA-DB).

#### 4.2.2 Analyse auf Bauwerks- und Bauteilebene

Die Ergebnisse der Clusteranalyse auf der Grundlage des k-means-Algorithmus und des auf Gamma-Prozessen basierenden Degradationsmodells werden im Folgenden vorgestellt. Bevor diese Analysen durchgeführt werden, werden die ausgewählten Daten bereinigt und für die Analyse vorbereitet. Die Datenbereinigung besteht darin, Ausreißer und menschliche Fehler bei der Datenerfassung zu entfernen. Bspw. wurde der Zeitpunkt der Inspektion falsch erfasst, was zu einem unwahrscheinlichen oder unmöglichen Brückenalter zum Zeitpunkt der Inspektion führte.

#### 4.2.2.1 Ergebnisse der Clusteranalyse auf der Grundlage des k-means-Algorithmus

Tabelle 4-4. Anzahl der Datensätze in den einzelnen Clustern (KUBA-DB).

	Anfällig	Normal	Robust
<b>Bauteilgruppe 1</b> Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger	37	89	85
<b>Bauteilgruppe 2</b> Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze	44	190	255
<b>Bauteilgruppe 3</b> Punktkipplager, Linienkipplager, Lager	113	76	44

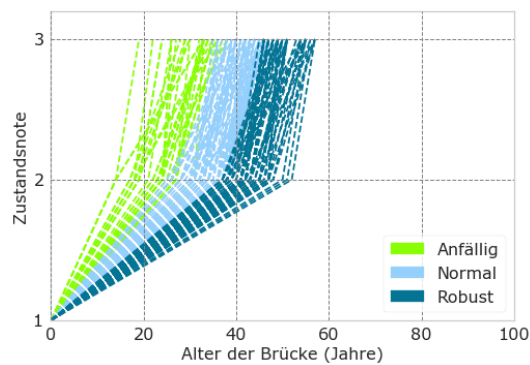


Abbildung 4-57 Ergebnisse der Clusteranalyse - Bauteilgruppe 1 (Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger) (KUBA-DB).

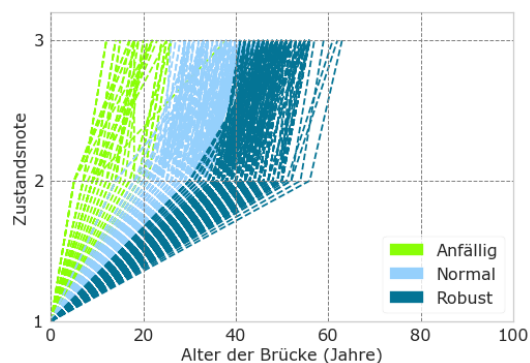


Abbildung 4-58 Ergebnisse der Clusteranalyse - Bauteilgruppe 2 (Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze) (KUBA-DB).

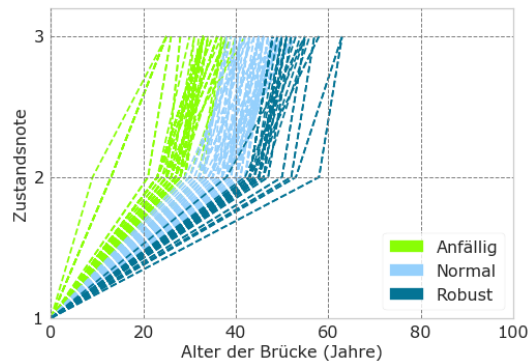


Abbildung 4-59 Ergebnisse der Clusteranalyse - Bauteilgruppe 3 (Punktkipplager, Linienkipplager, Lager) (KUBA-DB).

#### 4.2.2.2. Degradationsmodell und Lebensdauerbewertung auf der Grundlage des Gamma-Prozesses - Zustandsnote zu Beginn: 1

Tabelle 4-5. Durchschnittliches Alter der Brücke (Jahren), bis der Schaden die Zustandsnote erreicht (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 1.

		Zustandsnote			
		2	3	4	5
<b>Bauteilgruppe 1</b> Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger	<b>Anfällig</b>	22,4	32,1	40	46,9
	<b>Normal</b>	33,4	44,2	52,3	59,2
	<b>Robust</b>	42,7	52,5	59,2	64,5
<b>Bauteilgruppe 2</b> Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze	<b>Anfällig</b>	12,2	20,8	29,6	38,4
	<b>Normal</b>	27,4	38,6	47,3	54,9
	<b>Robust</b>	40,1	50,8	58,4	64,8
<b>Bauteilgruppe 3</b> Punktkipplager, Linienkipplager, Lager	<b>Anfällig</b>	26,1	36,3	44,7	51,9
	<b>Normal</b>	37,3	48,5	56,7	63,5
	<b>Robust</b>	47,2	58,6	66,7	73,2

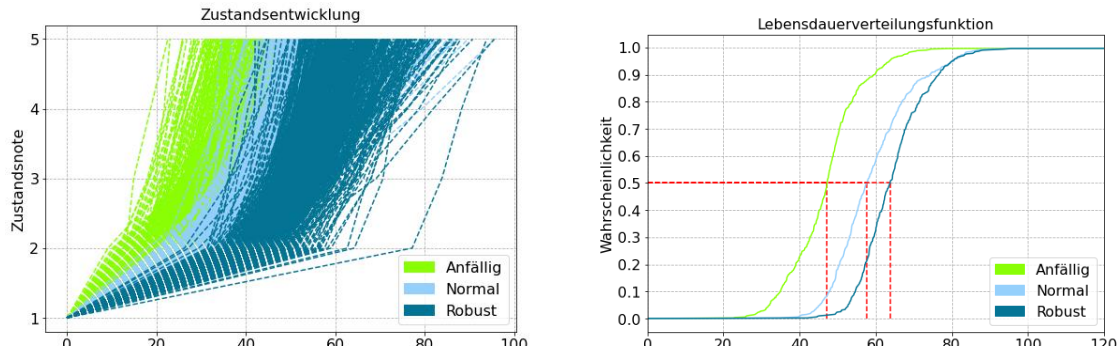


Abbildung 4-60 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 1 (Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 1.

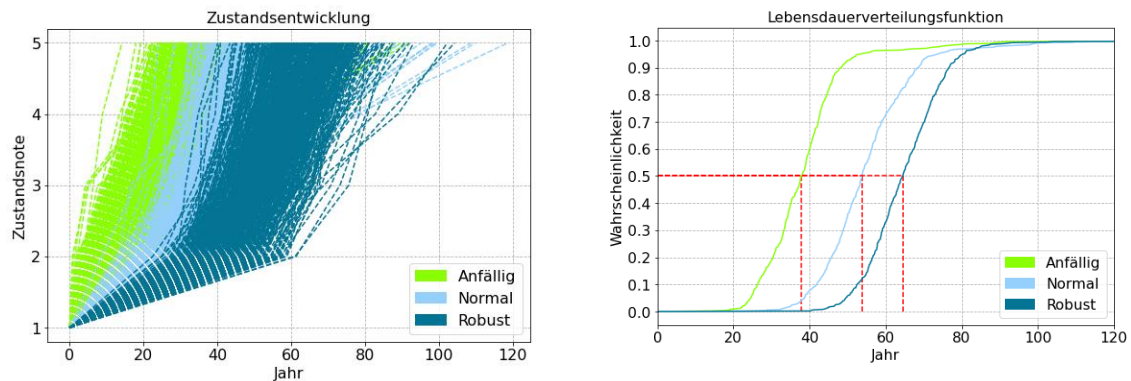


Abbildung 4-61 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 2 (Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 1.

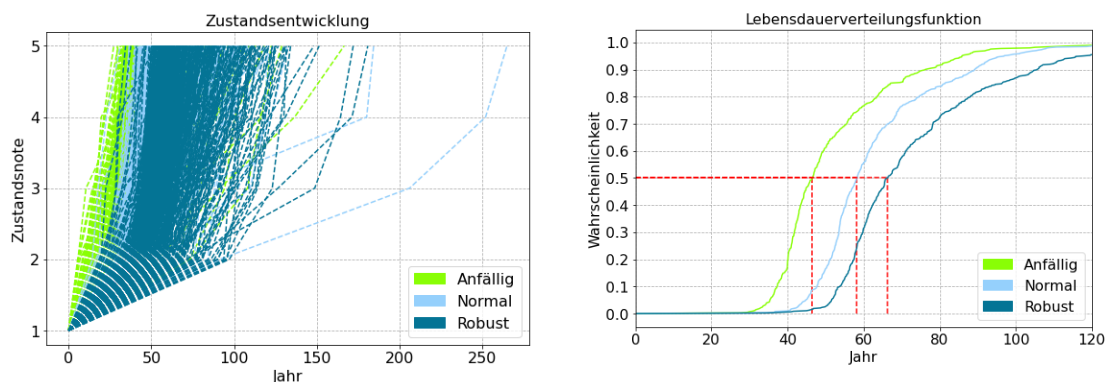


Abbildung 4-62 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 3 (Punktkipplager, Linienkipplager, Lager) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 1.



#### 4.2.2.3. Degradationsmodell und Lebensdauerbewertung auf der Grundlage des Gamma-Prozesses - Schadensklasse zu Beginn: 2

Tabelle 4-6. Durchschnittliches Alter der Brücke (Jahren), bis der Schaden die Zustandsnote erreicht (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 2.

	Zustandsnote		
	3	4	5
<b>Bauteilgruppe 1</b> Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger	8.0	16.0	24.2
<b>Bauteilgruppe 2</b> Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze	8.5	17.0	25.8
<b>Bauteilgruppe 3</b> Punktkipplager, Linienkipplager, Lager	9.7	19.3	28.7

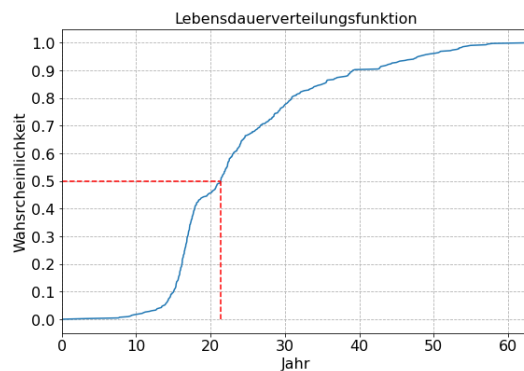
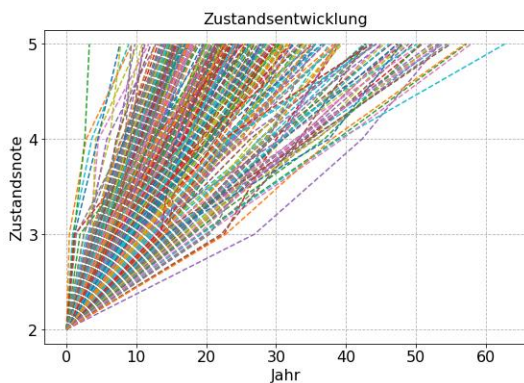


Abbildung 4-63 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 1 (Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 2.



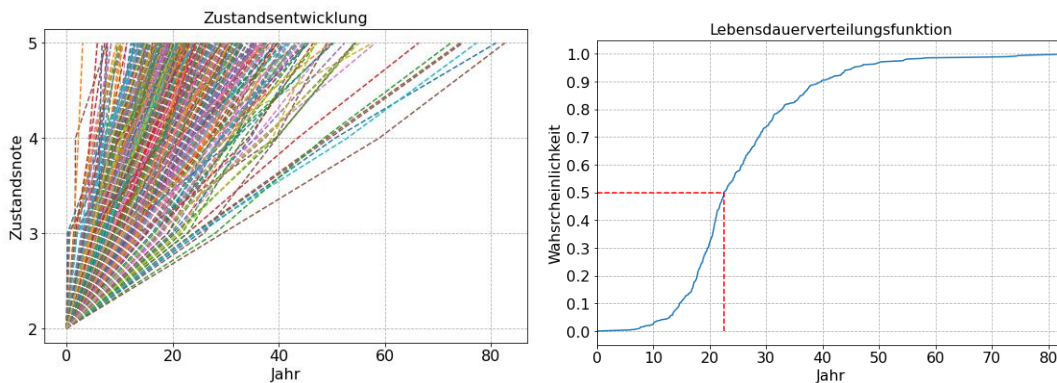


Abbildung 4-64 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 2 (Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 2.

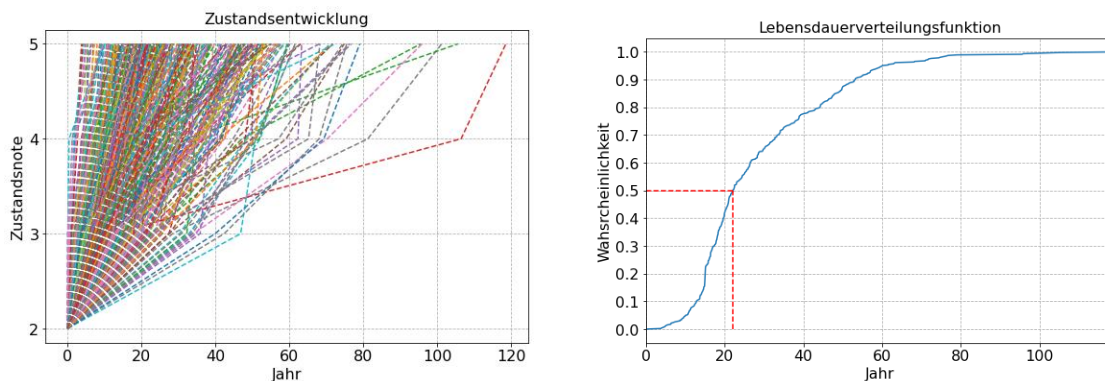


Abbildung 4-65 Simulation des Gamma-Prozesses (links) und daraus resultierende Lebensdauer-Verteilungsfunktion (rechts) – Bauteilgruppe 3 (Punktkipplager, Linienkipplager, Lager) (KUBA-DB) - Zustandsnote zu Beginn: 2.

### 4.2.3 Analyse auf Bauwerksebene mittels Markov-Ketten

Analog zu Analyse der deutschen Brücken auf Objektebene (Abschnitt 4.1.3) wurde die gleiche Methodik an den Daten der Brücken aus der Schweiz angewandt. Um Wiederholungen zu vermeiden, wird zur Beschreibung der Vorgehensweise auf den Abschnitt 4.1.3 verwiesen; der Fokus hier liegt auf der Beschreibung der Spezifika der Anwendung auf die Daten der KUBA. Die Datenlage unterscheidet sich hier im Vergleich zu SIB-Bauwerke. Um die Methodik beizubehalten, wurde versucht, die Daten aus KUBA in die gleiche Systematik zu transferieren, was z. B. die kategorischen Parameter und ihre Werte (Tabelle 3-9) anbelangt.

Dies war jedoch nur beschränkt möglich. Zum Beispiel konnte der Querschnittstyp nur bei ca. 10% der Bauwerke durch automatisierte Routinen erkannt werden. Viele weitere Parameter, die in Deutschland verfügbar waren, konnten hier nicht zum Einsatz kommen; wie z. B. Spannweiten, Anzahl der Felder, Breite, Pfeilerhöhe, usw. Deshalb ist die Liste der verwendeten Bauwerkseigenschaften (Tabelle 4-8) kurz.

Insgesamt umfassten die übermittelten Daten 4885 Brücken. Davon konnte bei ca. 87% das Baumaterial und das statische System extrahiert werden und als kategorischer Parameter verwendet werden. Im Gegensatz zu den Brücken in Deutschland, war die geographische Lage und die Meereshöhe bei fast allen Brücken in der Schweiz bekannt. Die Meereshöhe und das Baujahr waren die einzigen numerischen Parameter, die für weitere Analysen zur Verfügung standen.

Bezeichnung	Beschreibung	Vollständigkeit	Verwendung
<i>lat, lon</i>	Geographische Position (Breitengrad, Längengrad)	99,2 %	-
<i>elev</i>	Meereshöhe [m]	98 %	N
<i>bau</i>	Baujahr	99,98 %	N
<i>cs<sub>typ</sub></i>	Querschnittstyp	10 %	-
<i>ls<sub>typ</sub></i>	Statisches System in der Längsrichtung	87 %	K
<i>mat</i>	Baumaterial	87 %	K

Legende zur Spalte «Verwendung»:

K: kategorischer Parameter

N: numerischer Parameter

Tabelle 4-8 Verwendete Eigenschaften, extrahiert aus KUBA-DB

Dadurch, dass nur zwei kategorische Parameter verwendet wurden, sind im Schritt 1 nur 16 Gruppen A entstanden (Tabelle 4-9). Die Eigenschaften der Gruppen sind in der Tabelle 4-10 aufgelistet.

Bauteil	Gruppen A	Gruppen B	Gruppen C	Gruppen D
Brücke	16	3	125	119

Tabelle 4-9 Anzahl der erstellten Gruppen/Prognosemodelle

Dass die Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe generell niedriger ist als in Deutschland, hat den Grund in der unterschiedlichen Anzahl von Bauwerken in den zwei Ländern.

Gruppe	# Maßnahmen	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	Rahmen	Stahlbeton	887
A2	0	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	569
A3	0	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	451
A4	0	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	159
A5	0	unbekannt	Stahlbeton	149
A6	0	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	144
A7	0	Rahmen	Spannbeton	142
A8	0	Rahmen	unbekannt	105
A9	0	unbekannt	Spannbeton	105
A10	0	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	76
A11	0	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	39
A12	0	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	34
A13	0	unbekannt	unbekannt	33
A14	0	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	31
A15	1	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	29
A16	0	Rahmen	Beton unbewehrt	28

Tabelle 4-10 Gruppen aus dem Satz 1, Objektebene

Nach der Aufteilung der Gruppen im Schritt 3 entstehen Gruppen C, deren Größe geringer ist. In der Abbildung 4-66 sind die Gruppengrößen sortiert dargestellt. Die hier mehrere Varianten der Aufteilung, die sich durch die Anzahl der Cluster unterscheiden, zusammen dargestellt werden, beträgt die Anzahl der Gruppen C ca. 120.

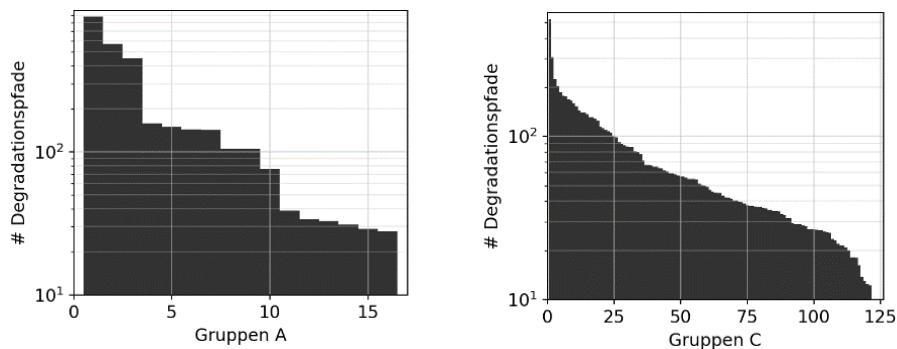


Abbildung 4-66 Sortierte Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe im Satz 1 (Gruppen A, links) und im Satz 3 (Gruppen C, rechts)

Die Abbildung 4-67 zeigt ein Beispiel der Prognose für zwei Gruppen A. Wie bereits bei der Analyse deutscher Brücken, zeigt sich hier eine große Streuung der Prognose für die Modelle der Gruppe A. Für die Anwendung werden Modelle der Gruppe C empfohlen, die zusätzlich auch die numerischen Bauwerksparameter berücksichtigen.

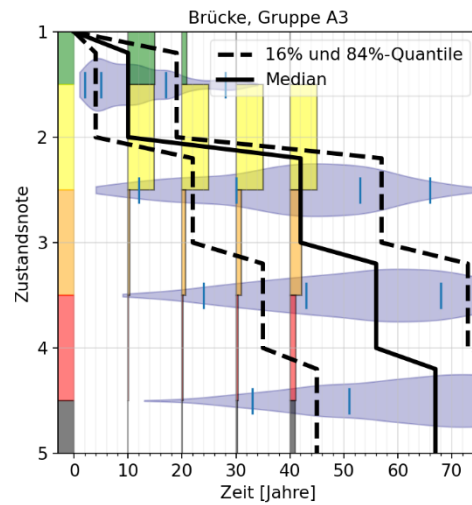
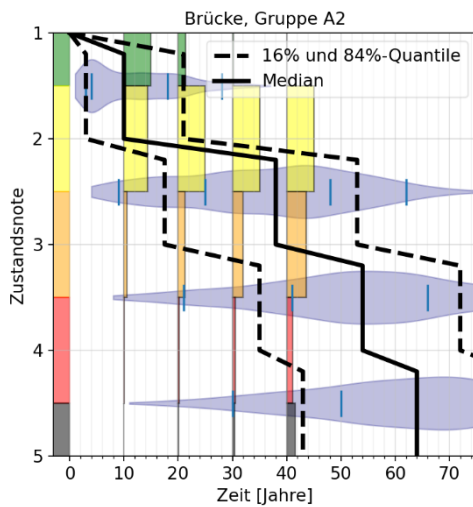


Abbildung 4-67 Prognose auf Objektebene für Gruppe A2 (Spannbeton, mit Durchlaufwirkung, links) und Gruppe A3 (Stahlbeton mit Durchlaufwirkung, rechts)

Die Abbildung 4-68 zeigt weitere zwei Beispiele der Prognose für Rahmenbrücken aus Stahlbeton und Spannbeton.

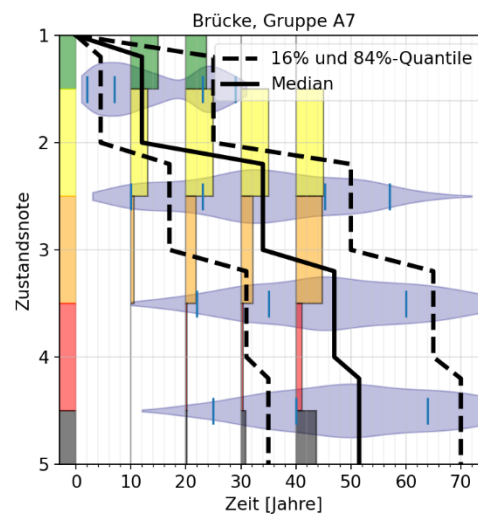
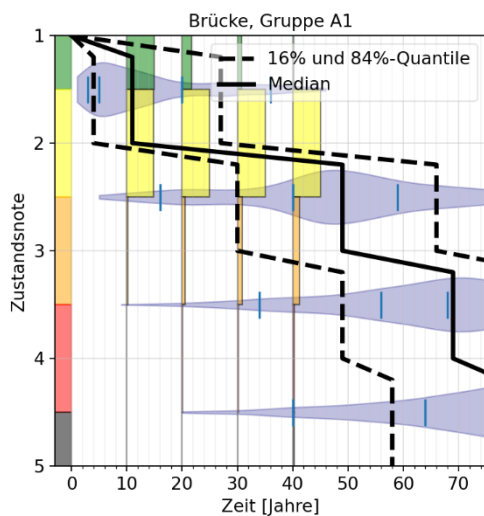


Abbildung 4-68 Prognose auf Objektebene für Gruppe A1 (Stahlbetonrahmen, links) und Gruppe A7 (Spannbetonrahmen, rechts)

Ähnlich wie bei der Analyse der deutschen Brücken, zeigt sich auch hier bei den Gruppen A eine Abhängigkeit der Prognose von der Anzahl der Degradationspfade, die zur deren Ableitung benutzt wurden (Abbildung 4-69). Diese ist bei den Gruppen C nicht mehr zu beobachten (Abbildung 4-70).

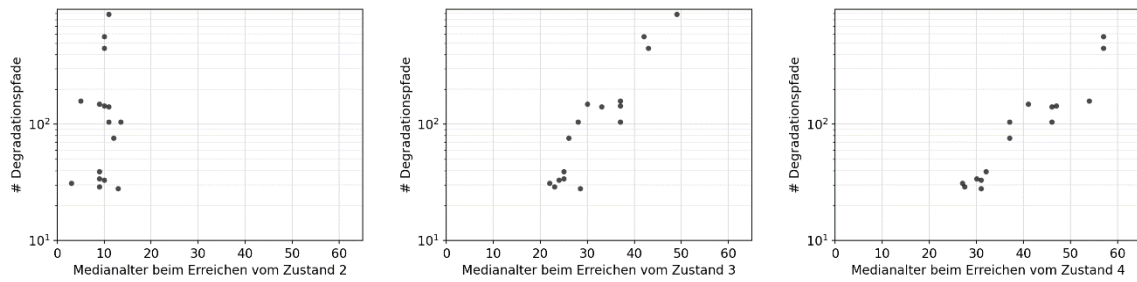


Abbildung 4-69 Median des Alters, wann die Zustände 2, 3 und 4 gemäß den Prognosemodellen der Gruppen A erreicht werden

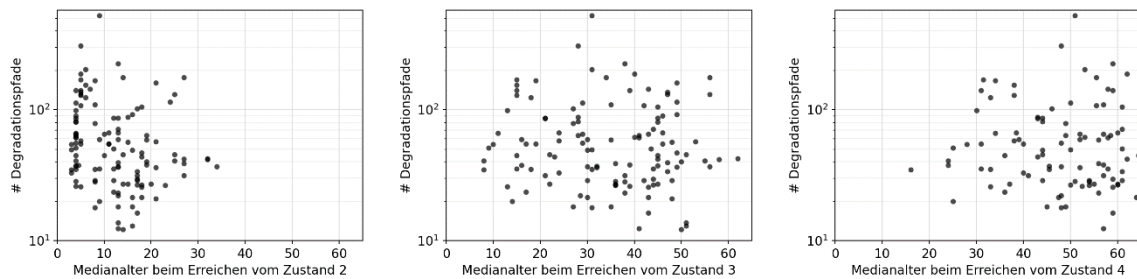


Abbildung 4-70 Median des Alters, wann die Zustände 2, 3 und 4 gemäß den Prognosemodellen der Gruppen C erreicht werden

Durch die Aufteilung der Gruppen A auf mehrere Cluster entstehen die Gruppen C, die wesentlich geringere Streuungen aufweisen. Ein Beispiel ist in der Abbildung 4-71 dargestellt, wo die Gruppe A1 auf 7 Gruppen/Cluster aufgeteilt wurde. Jedoch die Zuordnung zu richtigen Clustern zeigt sich als etwas problematisch (Abbildung 4-72). Da nur zwei numerische Parameter für diese Aufgabe genutzt werden können, ist die Performance des Klassifikators schlechter als bei der Anwendung in Deutschland. Weitere Beispiele sind im Anhang, Abschnitt 9.2 angeführt.

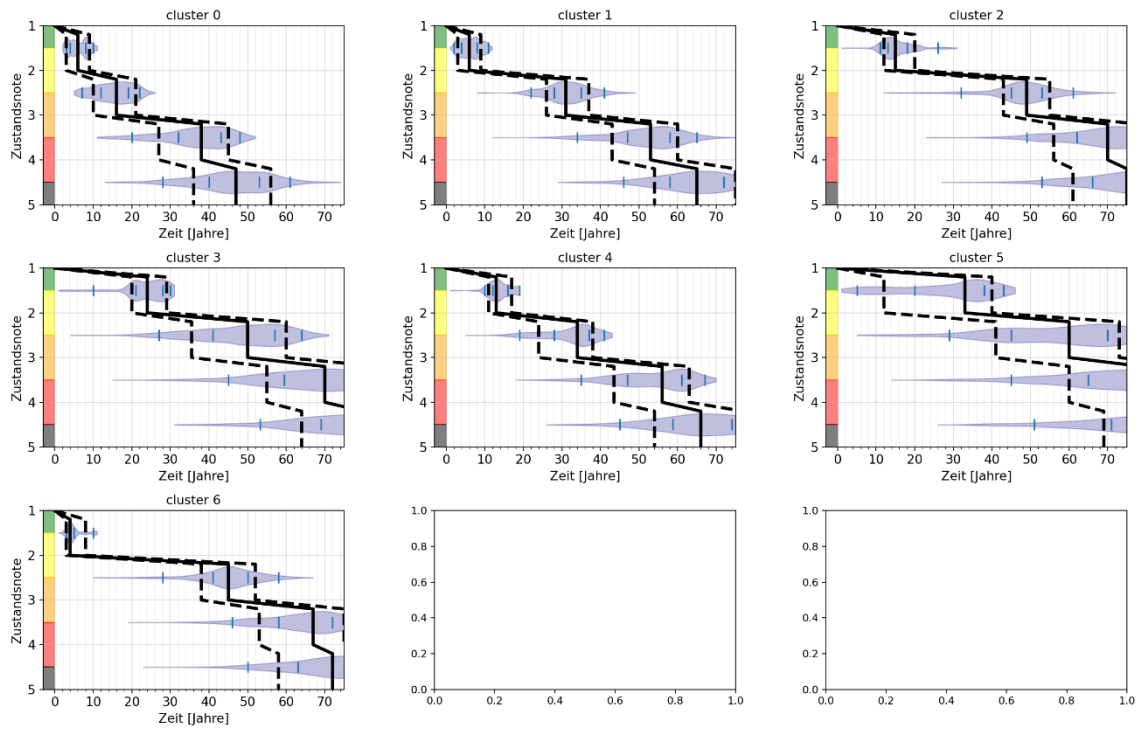


Abbildung 4-71 Beispiel der Prognosemodelle aus Gruppe C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 entstanden sind, Variante mit 7 Clustern.

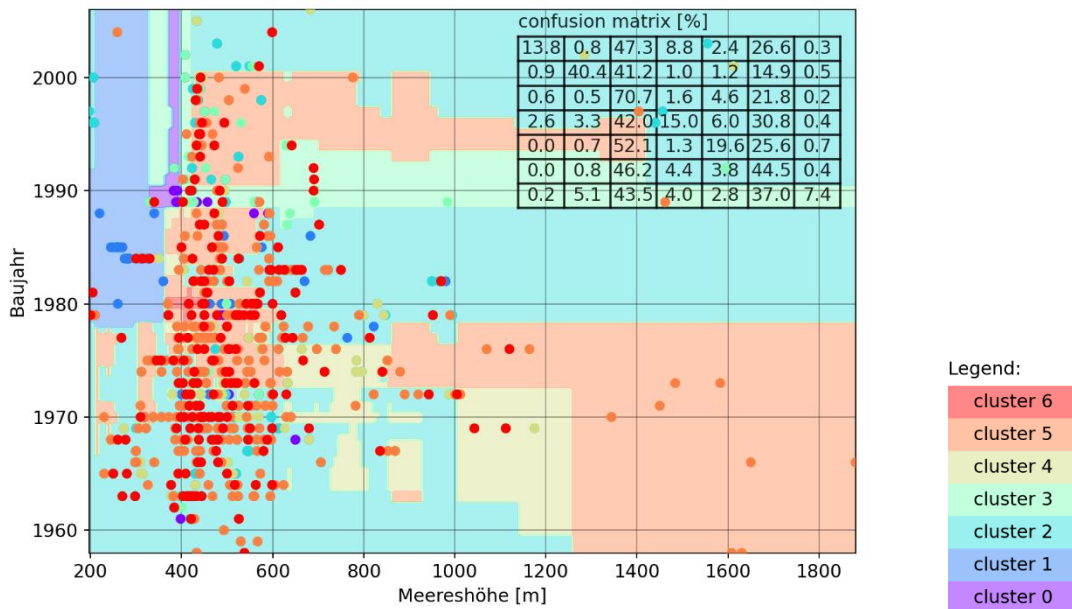


Abbildung 4-72 Schätzung der Clusterzuordnung durch den Random-Forest Klassifikator. Weiterhin wurde auch der Effekt der Änderung der Annahme von  $\Delta t_{bj,lim} = 10$  Jahre auf  $\Delta t_{bj,lim} = 25$  Jahre untersucht. Die Ergebnisse (Abbildung 4-73) sind konsistent mit der gleichen



Analyse bei deutschen Brücken. Die Zustände 3, 4 werden generell etwas später (bis zu 10 Jahre) erreicht.

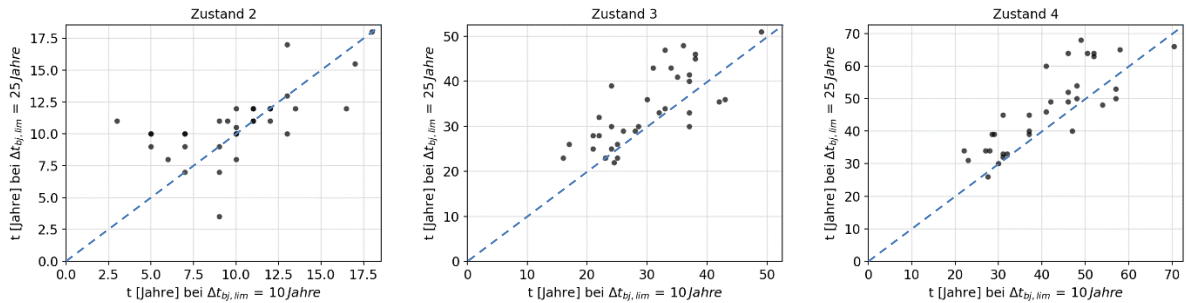


Abbildung 4-73 Vergleich des Medianalters beim Erreichen vom Zustand 2 (links), 3 (mitte) und 4 (rechts) bei zwei unterschiedlichen Annahmen von  $\Delta t_{bj,lim}$  für alle Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A)

## 4.3 Österreich

### 4.3.1 Datengrundlage IMT

Zur Verfügung standen Daten zu 5.816 Brücken aus der Datenbank IMT. Daraus wurden für die Analyse auf Objekt- und Bauteilebene die in der Tabelle 4-11 angeführten Eigenschaften extrahiert. Die geographische Position und Meereshöhe wurden aus den linearen Stationierungsdaten (Straße, km) abgeleitet. Die Brückenlänge wurde nicht verwendet, weil es ein nachgeordneter Parameter zu der bereits vorhandenen Spannweite ist.

Die Daten zu Verkehrsstärken wurden in den ersten Analysen mitberücksichtigt, es konnte hier jedoch keine Korrelation zu der Zustandsentwicklung erkannt werden, deshalb wurden diese Parameter in der finalen Analyse nicht weiterverwendet. Die Menge des Streusalzes wurde aus streckenweisen Daten über die Verwendung von Streusalz und Sole abgeleitet. Da jedoch mit diesen Daten nur ein geringer Anteil der Bauwerke abgedeckt werden konnte, wurde von der Verwendung dieses Parameters abgesehen.

In der Tabelle ist bei jedem Parameter angeführt, bei welchem Anteil der Bauwerke die Eigenschaft bekannt war (Vollständigkeit) und ob sie in der Analyse verwendet wurde. Zusätzlich wurde auch die Anzahl voriger Baumaßnahmen, die aus dem Verlauf der Zustandsnoten identifiziert wurde, als eine kategorische Variable verwendet.

Bezeichnung	Beschreibung	Vollständigkeit	Verwendung
<i>lat, lon</i>	Geographische Position (Breitengrad, Längengrad)	97 %	-
<i>elev</i>	Meereshöhe [m]	97 %	N
<i>bau</i>	Baujahr	99,7 %	N
<i>cstyp</i>	Querschnittstyp	95,7 %	K
<i>lstyp</i>	Statisches System in der Längsrichtung	95,7 %	K
<i>mat</i>	Baumaterial	84 %	K
<i>A<sub>br</sub></i>	Fahrbahnfläche [m <sup>2</sup> ]	98,8 %	N
<i>L<sub>max</sub></i>	Größte Spannweite [m]	85 %	N
<i>L</i>	Brückenlänge [m]	85 %	-
<i>DTV</i>	Durchschnittlicher täglicher Verkehr	48 %	-
<i>DTSV</i>	Durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr	48 %	-
<i>NaCl</i>	Schätzwert der Menge des Streusalzes pro m und Jahr	22 %	-

Legende zur Spalte «Verwendung»:

K: kategorischer Parameter

N: numerischer Parameter

Tabelle 4-11 Bauwerkseigenschaften extrahiert aus der Datenbank IMT

Die Parameter Querschnittstyp und statisches System wurden in die bereits vorhandene Systematik (Tabelle 3-9) überführt. Dabei konnten jedoch die Hohlkastenquerschnitte aus den IMT-Daten nicht identifiziert werden, deshalb fallen sie unter Plattenbalkenquerschnitte. Trogquerschnitte kamen nicht vor. Bei Rahmen- und Bogenbrücken wurde angenommen,

dass die Fahrbahn einen Plattenquerschnitt hat. Bei statischen Systemen waren die häufigsten Typen Träger mit und ohne Durchlaufwirkung, sowie Rahmen. Da aus der IMT-Datenbank nicht bekannt ist, ob Durchlaufwirkung besteht oder nicht, wurde hier angenommen, dass es bei mehrfeldrigen Brücken der Fall ist. Die Anzahl der Bogen- oder Schrägseilbrücken war klein (74); Fachwerke kamen nicht vor. Bei 80% der Brücken war Stahl- oder Spannbeton als Material eingetragen, das sind 95% der Brücken mit Daten zu Baumaterial. Deshalb hat sich die Analyse auf Stahl- und Spannbetonbrücken konzentriert.

In Österreich wird bei den Bauwerkprüfungen neben der Bauwerkszustandsnote die Zustandsnote von 9 Bauteilen registriert. Diese weisen geringe Unterschiede in der Terminologie auf, die bisher in diesem Bericht verwendet wurde (Tabelle 4-12). Im Gegensatz zu der deutschen Datenbank SIB sind das Fundament, die Vorspannung, die Anker, und die Seile keine eigenen Bauteile.

Bauteilbezeichnung IMT	Bauteilbezeichnung ENDURE
Überbau	Überbau
Unterbau	Unterbau
Lager	Lager
FUEG	Fahrbahnübergang
Entwässerung	Abdichtung
Belag	Belag
Randbalken	Kappen
Besichtigungseinrichtungen	Sonstiges
Ausrüstung	Sonstiges

Tabelle 4-12 Bauteile der IMT und ihre Bezeichnungen

Die Zustandsnoten auf Objekt- und Bauteilebene werden in 5 Stufen vergeben (Abschnitt 2.6.2). Die verfügbare Datenmenge und der abgedeckte Zeitraum wurden im Abschnitt 3.2.1 vorgestellt.

#### 4.3.2 Analyse auf Bauteil- und Objektebene

Die Analyse erfolgt analog zu der Analyse der deutschen Bauwerke (Abschnitt 4.1.3). Deshalb wird hier hauptsächlich auf die Unterschiede eingegangen, ohne die Vorgehensweise zu wiederholen. Die Analyse erfolgte separat auf der Objektebene und für jeden Bauteiltyp auf der Bauteilebene.

Die Aufteilung nach den kategorischen Parametern ergab 14 Gruppen A auf der Objektebene. Die Anzahl der Gruppen pro Bauteil und Gruppentyp (A, B, C, D) ist in der Tabelle 4-13 aufgelistet.

Bauteil	Gruppen A	Gruppen B	Gruppen C	Gruppen D
Brücke	14	3	189	48
Überbau	13	4	200	62
Unterbau	14	3	200	109
Lager	8	2	96	43
Fahrbahnübergang	9	3	117	51
Abdichtung	13	3	196	94
Kappen	13	3	211	73

Tabelle 4-13 Anzahl der erstellten Gruppen/Prognosemodelle für die einzelnen Bauteiltypen  
Die Darstellung der Ergebnisse wird sich auf die Bauteile Brücke (Objektebene), sowie Überbau und Unterbau (Bauteilebene) konzentrieren.

Die Kombinationen der kategorischen Parameter in einzelnen Gruppen im Satz 1 für die Analyse auf Objektebene sind in der Tabelle 4-14 angeführt. Weitere Auflistungen sind im Anhang, Abschnitt 9.3 angeführt.

Gruppe	# Maßnahmen	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	952
A2	0	Platte	Rahmen	Stahlbeton	872
A3	0	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	722
A4	0	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	586
A5	0	Platte	Rahmen	Spannbeton	233
A6	0	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	100
A7	0	Träger	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahl	88
A8	0	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	72
A9	0	Träger	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	56
A10	1	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	52
A11	0	Platte	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	49
A12	1	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	37
A13	1	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	36
A14	1	Platte	Rahmen	Stahlbeton	26

Tabelle 4-14 Die Gruppen aus dem Satz 1 auf Objektebene

Die Anzahl der verfügbaren Degradationspfade pro Gruppe im Satz 1 ist in der Abbildung 4-74 dargestellt. Nach der Aufteilung dieser Gruppen auf Cluster ergeben sich kleinere Gruppen, deren Größe in der Abbildung 4-75 dargestellt ist. Hier sind wieder mehrere Varianten der Aufteilung, die sich durch die Clusteranzahl unterscheiden, zusammen dargestellt. Die Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe stellt die Datenmenge dar, aus der ein Prognosemodell für jede Gruppe erstellt wird.

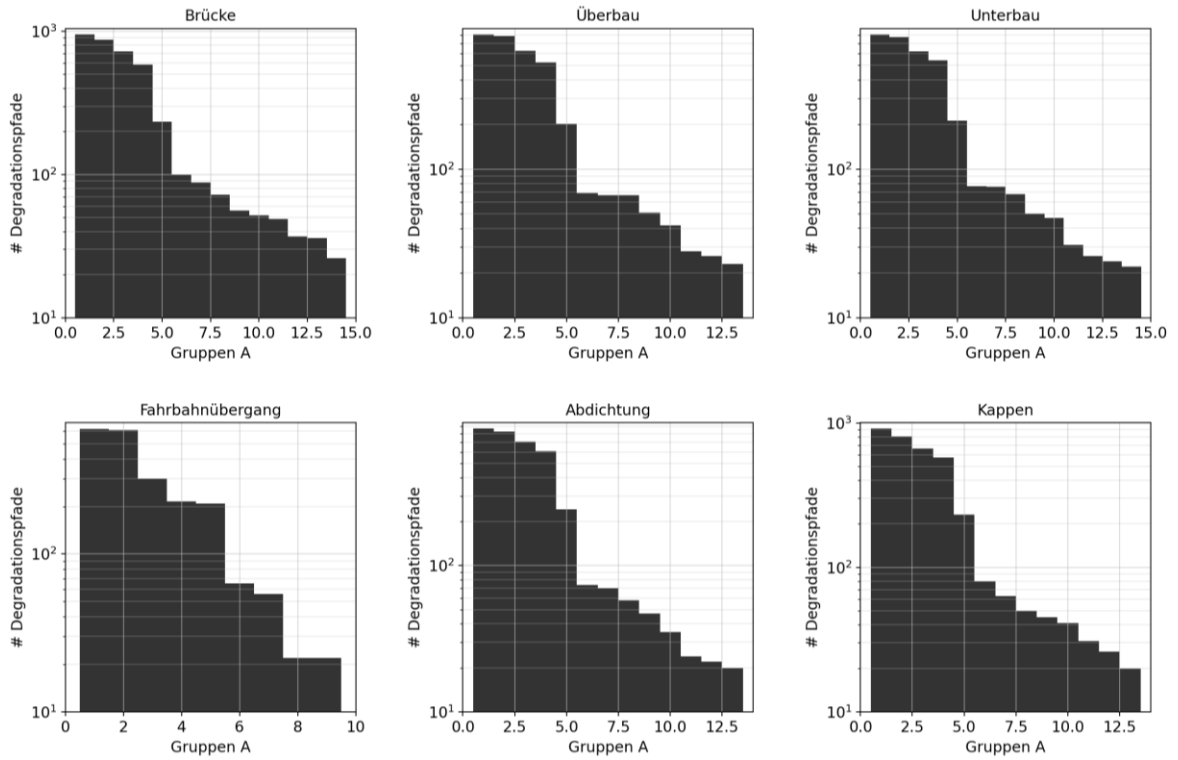


Abbildung 4-74 Sortierte Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe im Satz 1 (Gruppen A)

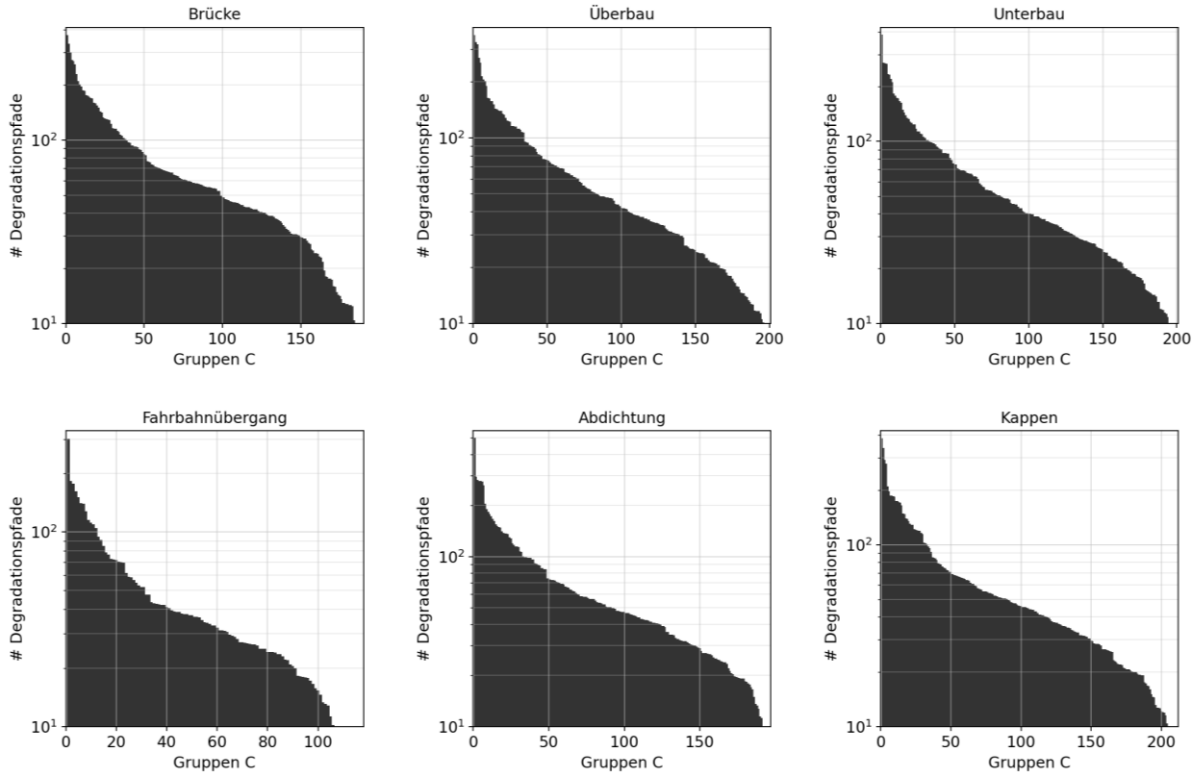


Abbildung 4-75 Sortierte Anzahl der Degradationspfade pro Gruppe im Satz 3 (Gruppen C)

Im Weiteren werden ausgewählte Prognosemodelle aus dem Satz 1 (Gruppen A) vorgestellt. Weitere Darstellungen befinden sich im Anhang, Abschnitt 9.3.

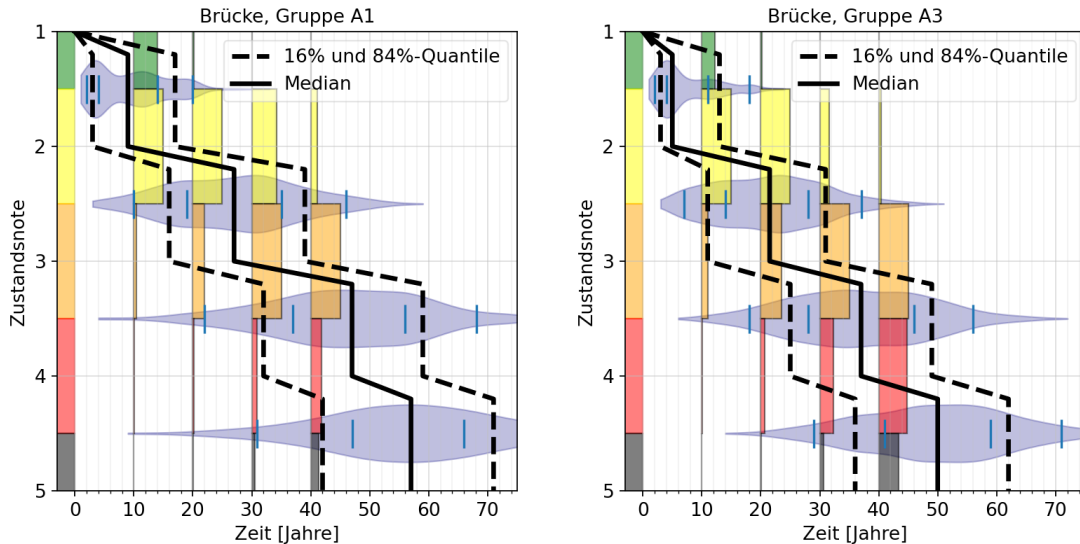


Abbildung 4-76 Zustandsprognose auf Objektebene für Stahlbetonplattenbalken ohne (links) und mit (rechts) Durchlaufwirkung; Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A)

Die Abbildung 4-77 zeigt die für den Überbau von Stahlbetonbrücken mit Plattenbalkenquerschnitt ohne vorige Baumaßnahmen und nach einer Maßnahme.

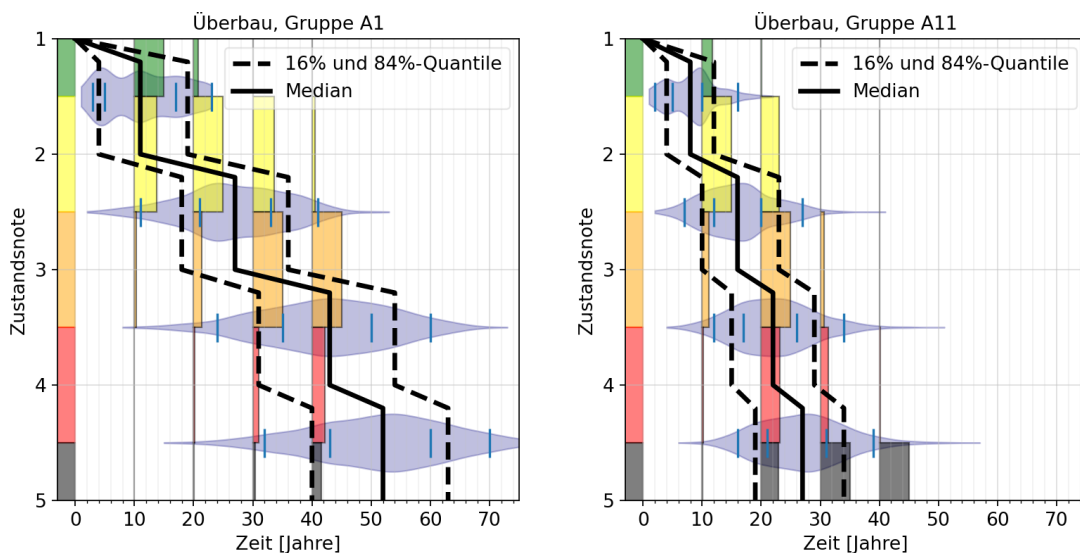


Abbildung 4-77 Zustandsprognose auf Bauteilebene für den Überbau von Stahlbetonbrücken mit Plattenbalkenquerschnitt ohne vorige Baumaßnahmen (links) und nach 1 Baumaßnahme (rechts); Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A)

Es zeigt sich, dass die Überbauten, bei denen eine Baumaßnahme durchgeführt wurde, schneller degradieren. Hier wäre es leicht, eine falsche Schlussfolgerung daraus zu ziehen:



dass eine Baumaßnahme zu schnellerem Verfall führt. Es gibt jedoch andere mögliche Erklärungen dafür: zum Beispiel könnte es sein, dass die Bauwerke, bei denen eine Baumaßnahme nötig war, schneller degradieren und deshalb sind in der Gruppe, welche die Bauwerke nach einer Baumaßnahme vereint, vermehrt schneller degradierende Bauwerke zu finden. Oder auch Einbaufehler oder außergewöhnliche Ereignisse könnten eine mögliche Ursache darstellen.

Analog zu den Ergebnissen der deutschen Bauwerke zeigte sich auch hier eine Abhängigkeit der prognostizierten Entwicklung von der Anzahl der zugrundeliegenden Degradationspfade bei Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A). Auch hier ist diese Abhängigkeit bei den Gruppen C nicht mehr zu finden.

Im Schritt 3 wurden die Gruppen aufgeteilt, wodurch Prognosemodelle mit kleineren Streuungen erstellt werden konnten.

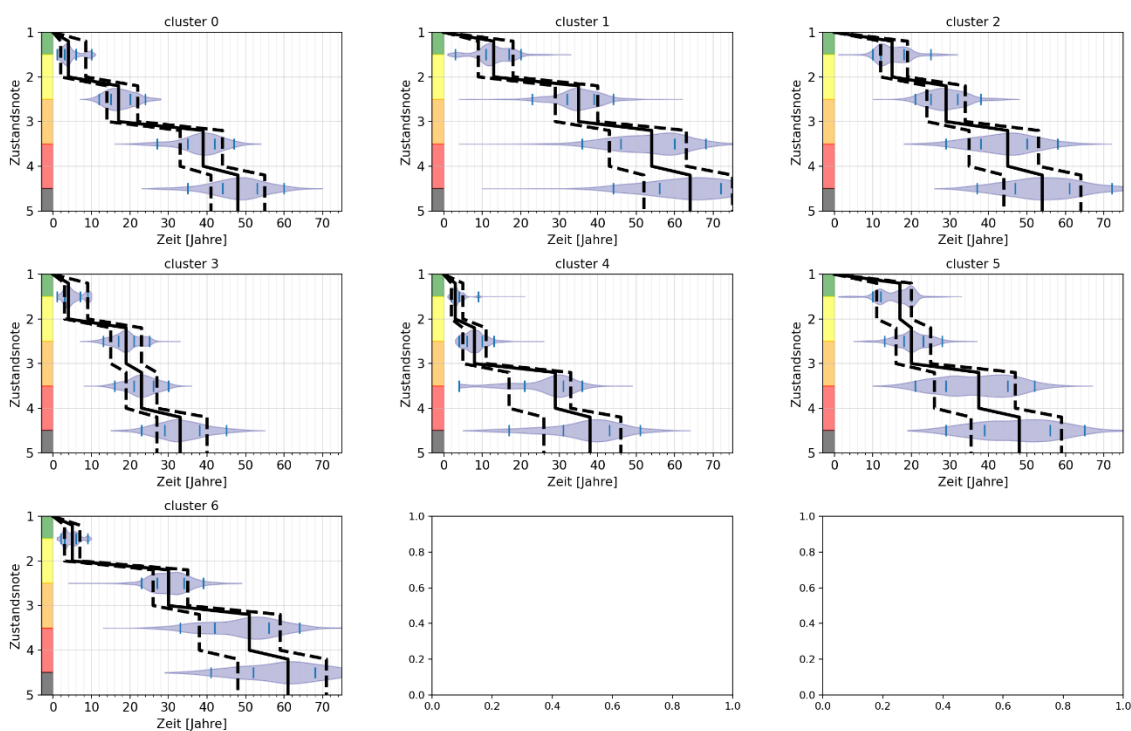


Abbildung 4-78 Zustandsprognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 auf Objektebene entstanden sind

Die Zuordnung zu einzelnen Clustern (Gruppen C) erfolgt anhand der Bauwerkseigenschaften durch antrainierte Random-Forest Klassifikatoren. Die Abbildung 4-79 zeigt ein Beispiel bei der Verwendung von zwei numerischen Parametern (Baujahr, Meereshöhe) und einer Aufteilung auf 3 Cluster.

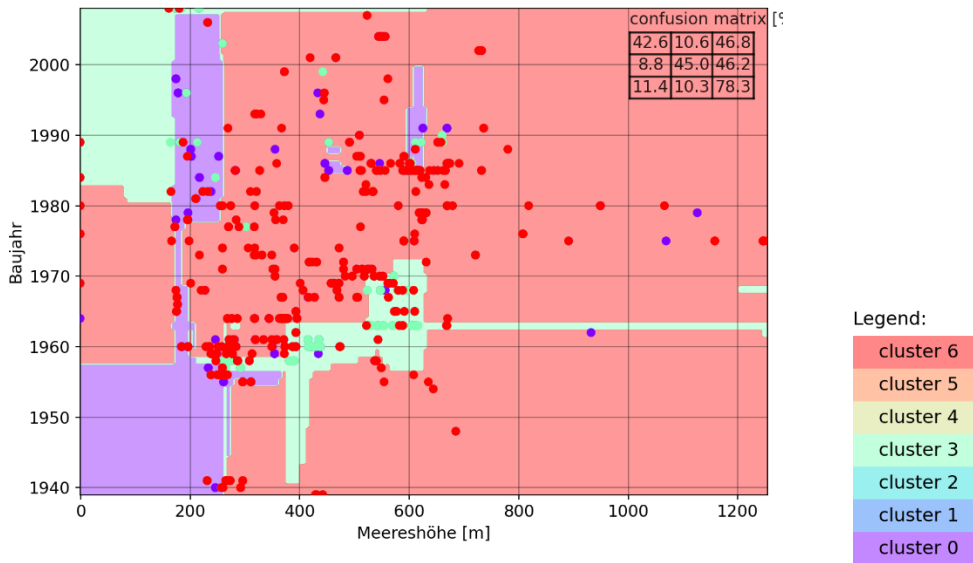


Abbildung 4-79 Zuordnung zu Clustern (Aufteilung der Gruppe A1 auf Objektebene) durch einen Random-Forest Klassifikator mit zwei numerischen Parametern.

In der realen Anwendung wurden vier numerische Parameter (Baujahr, Meereshöhe, Brückenfläche, größte Spannweite) verwendet. Die Performance des Klassifikators bei der Aufteilung auf 7 Cluster ist aus der Tabelle 4-15 ersichtlich.

		Prognostizierter Cluster						
		0	1	2	3	4	5	6
Tatsächlicher Cluster	0	40,5	0,5	15,1	19,5	15,2	1,1	8,2
	1	6,8	13,1	20,7	16,3	6,9	3,3	32,9
	2	13,0	1,8	46,8	18,8	7,1	5,9	6,7
	3	11,4	1,1	16,7	49,6	6,0	2,6	12,6
	4	16,0	0,0	4,4	6,3	64,3	5,0	4,0
	5	11,6	0,0	27,8	6,4	30,5	22,0	1,7
	6	8,5	1,4	9,0	14,7	5,4	1,3	59,8

Tabelle 4-15 Confusion matrix [%] zwischen Gruppen C nach der Aufteilung der Gruppe A1 auf Objektebene

Hier zeigt sich, dass z. B. der Cluster 1 oft mit dem Cluster 6 verwechselt wird: 32,9% der Datenpunkte aus Cluster 1 werden dem Cluster 6 zugeordnet (Zeile 2, Spalte 7 in der Tabelle 4-15). Da diese Prognose für diese zwei Cluster ähnlich ausfällt, stellt das kein größeres Problem dar. Die Bauwerke, die anhand des Notenverlaufs in den Cluster 5 gehören, werden anhand der Bauwerkseigenschaften öfter dem Cluster 4 zugeordnet. Dadurch entsteht eine

Abweichung, die das schnellere Erreichen vom Zustand 3 verursacht. Die Problematik wurde bereits bei der Analyse der deutschen Brücken aufgezeigt und begründet.

Weitere Beispiele sind im Anhang, Abschnitt 9.3 angeführt.

Die Analyse der Häufigkeit, mit der die Random-Forest Klassifikatoren die numerischen Parameter als wichtig für die Einordnung in die richtigen Cluster ausgewählt haben, hat ergeben (Tabelle 4-16), dass vermehrt alle verfügbaren numerischen Parameter als wichtig eingestuft werden. Das liegt vor allem an der kleinen Auswahl der verfügbaren numerischen Parameter.

Parameter	Brücke	Überbau	Unterbau	Lager	Fahrbahnübergang	Abdichtung	Kappen
Meereshöhe [m]	20	20	20	10	10	20	20
Baujahr	20	20	20	10	10	20	20
Brückenfläche [m <sup>2</sup> ]	20	15	13	8	8	16	17
max.Spannweite [m]	20	20	20	10	10	20	20

Tabelle 4-16 Häufigkeit der Auswahl von numerischen Parameter in der Random-Forest Analyse

Die Analyse des Effektes der Annahme über die Länge des nicht-dokumentierten Zeitraums zwischen dem Baujahr und der ersten verfügbaren Bauwerksprüfung ( $\Delta t_{bj,lim}$ ) hat ähnliche Ergebnisse gezeigt, wie bereits bei den deutschen Brücken. Die Abbildung 4-80 zeigt den Vergleich zwischen der Anzahl der Degradationspfade in den Gruppen A. Hier sind sowohl Gruppen auf Objektebene als auch auf Bauteilebene (alle Bauteiltypen) gemeinsam dargestellt. Es zeigt sich (wie erwartet), dass die Annahme  $\Delta t_{bj,lim} = 25$  Jahre zu einer größeren Anzahl der verfügbaren Degradationspfaden führt; der Effekt ist insbesondere bei kleineren Gruppen merklich.

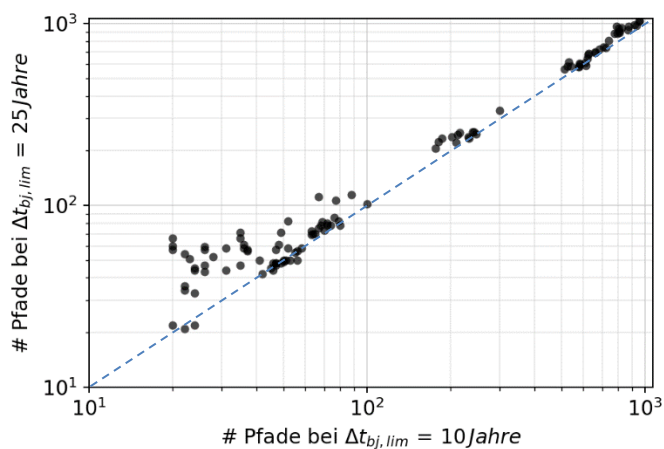


Abbildung 4-80 Vergleich der Anzahl von Degradationspfaden pro Gruppe im Satz 1 (Gruppen A) bei zwei unterschiedlichen Annahmen von  $\Delta t_{bj,lim}$

Die Auswirkung auf die resultierenden Prognosen ist in der Abbildung 4-81 dargestellt. Auch hier sind sowohl Gruppen auf Objektebene als auch auf Bauteilebene (alle Bauteiltypen) gemeinsam dargestellt.

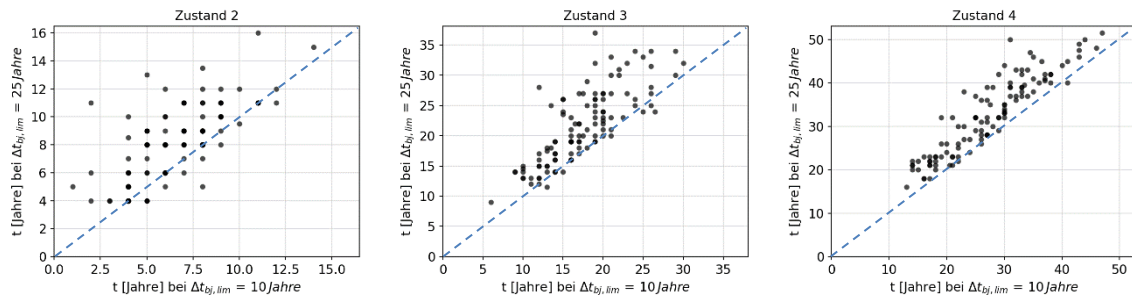


Abbildung 4-81 Vergleich des Medianalters beim Erreichen vom Zustand 2 (links), 3 (mitte) und 4 (rechts) bei zwei unterschiedlichen Annahmen von  $\Delta t_{bj,lim}$  für alle Gruppen aus dem Satz 1 (Gruppen A)

Es ist ersichtlich, dass die Annahme  $\Delta t_{bj,lim} = 25$  Jahre generell zu Prognosemodellen führt, die eine etwas langsamere Degradation vorhersagen, was auch der Erwartung entspricht.

## 5 ZUSÄTZLICHE ANALYSEN

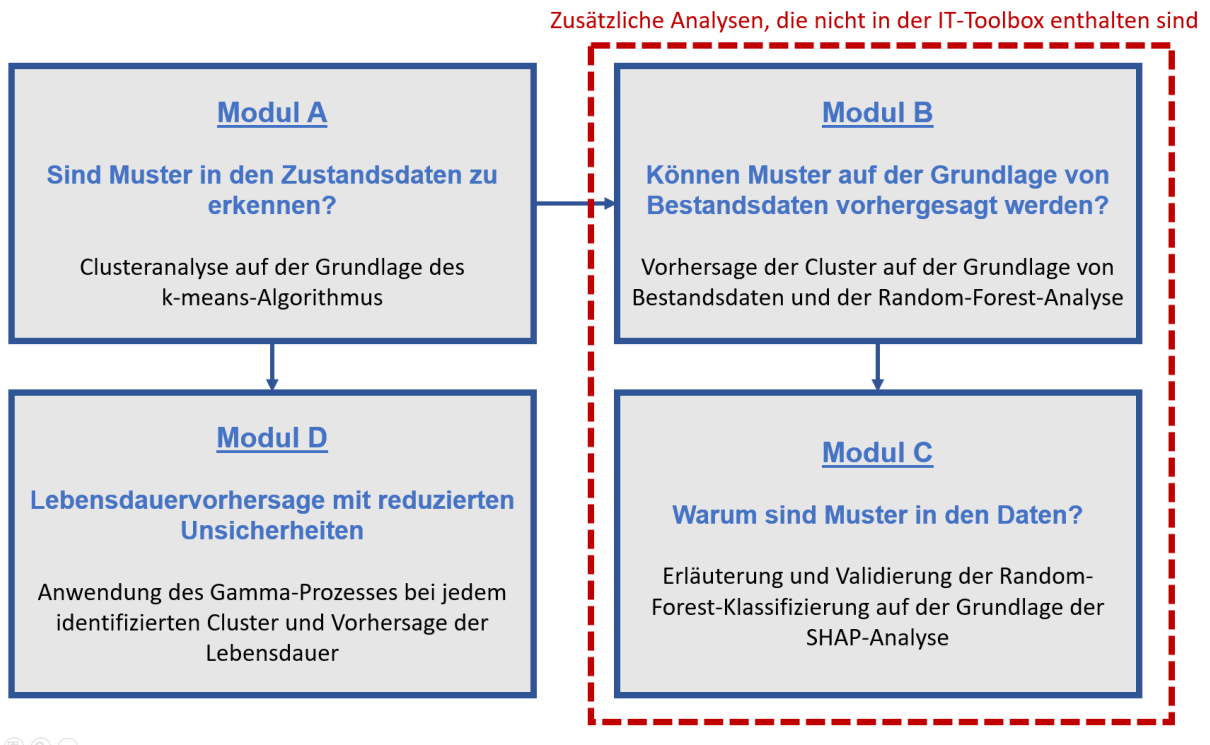


Abbildung 5-1 Integration der zur Entwicklung des Zustandsmodells durchgeführten Analyse in einen größeren Kontext und Integration mit zusätzlichen Analysen.

Die Clusteranalyse ermöglicht die Identifizierung von Mustern in den Zustandsdaten; durch die Integration von Zustandsdaten mit einem physikalischen Modell für die Schadensentwicklung und durch die Anpassung eines Gamma-Prozesses an jedes Muster werden Vorhersagemodelle entwickelt.

1. Die Identifizierung von Mustern in den Daten durch die Clusteranalyse wirft jedoch zwei Fragen auf: Ist es möglich, Cluster anhand von Bestandsdaten über Brücken, die in Brückenmanagementsystemen erfasst werden, vorherzusagen?
2. Wenn eine Vorhersage möglich ist, wie setzen sich dann die Muster zusammen? Mit anderen Worten: Warum existieren die Muster?

Um diese Fragen zu beantworten, werden die bisher durchgeführten Analysen, nämlich die Clusteranalyse auf der Grundlage des k-means-Algorithmus und die Lebensdauervorhersage auf der Grundlage des Gamma-Prozesses, mit zusätzlichen Analysen integriert, nämlich einer Random-Forest-Analyse zur Vorhersage des Clusters anhand der Bestandsdaten und einer SHAP-Analyse zur Erklärung und Validierung der Ergebnisse der mit dem Random-Forest-

Algorithmus durchgeführten Klassifizierung. Die Gesamtintegration dieser vier Analysen führt zu einem hybriden System der künstlichen Intelligenz (Abbildung 5-1).

Die zusätzlichen Analysen wurden jedoch nicht in die IT-Toolbox aufgenommen: Sie stellen wissenschaftliche Untersuchungen zu den entwickelten Zustandsmodellen und zur Struktur der Datenbank dar, die bei der Anleitung von Infrastrukturbetreibern über mögliche Verbesserungen der Brückenmanagementsysteme abgeschlossen wurden.

Explainable AI (XAI) ist ein Ansatz, der darauf abzielt, die Entscheidungsprozesse von KI-Systemen transparenter und verständlicher zu machen, um zu gewährleisten, dass die Ergebnisse nicht durch Verzerrungen beeinflusst werden.

KI-Anwendungen und wissenschaftliche Untersuchungen im Allgemeinen können durch verschiedene Quellen von Verzerrungen beeinträchtigt werden (Mehrabi, Morstatter, Saxena, Lerman, & Galstyan, 2021), wie z. B.: Messverzerrungen, die sich aus der Art und Weise ergeben, wie Merkmale gemessen werden; Verzerrungen durch weggelassene Variablen, die auftreten, wenn wichtige Merkmale außer Acht gelassen werden; Repräsentations- oder Stichprobenverzerrungen, die sich aus der Art und Weise ergeben, wie eine Population während des Datenerfassungsprozesses erfasst wird. Eine besondere Art der Stichprobenverzerrung ist die Überlebensverzerrung, die auftritt, wenn die Stichprobendaten nicht die interessierende Population repräsentieren, da einige Datenelemente "gestorben" sind.

XAI-Techniken können verwendet werden, um mögliche Verzerrungen im Datensatz zu erkennen. Bei XAI-Ansätzen, die auf der Spieltheorie basieren, wird die Vorhersage einer einzelnen Instanz des Datensatzes als "Spiel" betrachtet, der "Gewinn" ist die Vorhersage für diese Instanz, und die "Spieler" sind die Merkmalswerte der Instanz, die zusammenarbeiten, um den Gewinn zu erzielen. Dieser Ansatz basiert auf der Berechnung der Shapley-Werte, die den durchschnittlichen marginalen Beitrag jedes Spielers zu allen möglichen Koalitionen in einem kooperativen Spiel darstellen. Shapley-Werte werden speziell als SHAP-Werte bezeichnet, wenn dieser Ansatz zur Interpretation von Modellen des maschinellen Lernens angewendet wird (Lundberg & Lee, 2017).

## 5.1 Beschreibung des entwickelten hybriden KI-Systems

- Es wird ein hybrides KI-System entwickelt, um Verzerrungen in den Zustands- und Bestandsdaten aufzuzeigen und „verzerrungsresistente“ Degradationsmodelle zu entwickeln. Das hybride KI-System besteht aus vier Hauptmodulen:



- Modul A: Der k-means-Algorithmus wird auf die Zustandsdaten angewandt, um ein Clustermodell zu erzeugen, was auch der Erzeugung des Cluster-Labels, entspricht. Der Akteur berechnet eine Leistungsparameter, die Silhouette Width (SW), für jedes Clustermodell und wählt das Modell mit der optimalen Anzahl von Clustern aus, wobei er sein Vorwissen berücksichtigt.
- Modul B: Das Random-Forest-Modell wird auf Bestandsdaten (unabhängige Variablen, Prädiktoren) für Klassifizierungszwecke trainiert, d. h. für die Vorhersage des Cluster-Labels (abhängige Variable, Ziel).
- Modul C: Die SHAP-Analyse wird durch die Entwicklung eines einfacheren Modells durchgeführt, das die Erklärung des Random Forest-Modells ermöglicht. Das einfachere Modell basiert auf der Berechnung der SHAP-Werte für jeden Prädiktor des Random-Forest-Klassifikators, die die Datenausgabe darstellen. Durch die Analyse und Visualisierung der SHAP-Werte identifiziert der Akteur Beziehungen zwischen den Merkmalen. Beispiele für solche Beziehungen sind: Wichtigkeitsrang, Abhängigkeit, Interaktion. Diese Beziehungen ermöglichen die Validierung sowohl des Random-Forest-Modells als auch der Eingabedaten (der Prädiktoren), die vom Akteur in Übereinstimmung mit seinem Vorwissen durchgeführt wird.
- Modul D: Der Gamma-Prozess wird auf den Zustand der in jedem Cluster gruppierten Schäden angewandt. Eine MC-Simulation der Gamma-Prozesse ermöglicht die Vorhersage des Zeitpunkts, zu dem der Schaden einen kritischen Zustand erreicht, und damit die Vorhersage der durchschnittlichen Lebensdauer des Teilsystems Brücke.

Der für das hybride KI-System in Frage kommende Datensatz ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Im Folgenden werden die Methoden vorgestellt, auf denen die zusätzlichen Analysen beruhen, nämlich der Random-Forest-Algorithmus und die SHAP-Analyse.

Brücke ID-Nummer	Schaden ID Number	Schadensart	Bauteil	Baujahr	Ziellastniveau	Typ
4704573	13	Längsrisse	Überbau	1988	80 nach DIN 1072	1-feldrige Stahlbeton-Plattenbrücke

Traglastindex	Statisches System	Bauart	Fläche	Alter der Brücke (Schadensklasse = 1)	Alter der Brücke (Schadensklasse = 2)	Cluster
III	Einfeldrig freiaufliegend	Plattenbrücke	135 m <sup>2</sup>	31 Jahren	42 Jahren	Robust



Abbildung 5-2 Beispiel für den Datensatz von SIB-BW, der mit KI-Techniken analysiert wurde.

## 5.2 XAI: SHAP-Analyse

SHapley Additive exPlanations (SHAP) ist ein Rahmen für die Erklärung und Interpretation der Vorhersage von Modellen des maschinellen Lernens. Die Philosophie hinter der SHAP-Analyse besteht darin, ein Erklärungsmodell  $g$  für das ursprüngliche Vorhersagemodell  $f$  zu entwickeln. Das Erklärungsmodell ist einfacher und ermöglicht somit seine Erklärung. Die SHAP-Analyse hat ihre Wurzeln in der kooperativen Spieltheorie, die untersucht, wie ein Wert gleichmäßig unter einer Gruppe von Spielern verteilt werden kann. Im Kontext des maschinellen Lernens sind die "Spieler" die Merkmale und der "Wert" ist die Vorhersage des Modells für eine bestimmte Instanz.

Die SHAP-Analyse gibt Aufschluss darüber, wie jedes Merkmal im Datensatz zur Vorhersage eines bestimmten Falles beiträgt: Durch die Berechnung von SHAP-Werten ist es möglich, Merkmale nach ihrer Auswirkung auf die Vorhersage zu ordnen und Wechselwirkungen und Korrelationen zwischen Merkmalswerten zu entdecken.

Die Diagramme, die eine globale SHAP-Analyse unterstützen, sind der SHAP-Importance-Plot, der SHAP-Beeswarm-Plot und der SHAP-Dependence-Plot.

- SHAP-Importance-Plot bewertet die globale Auswirkung eines Merkmals auf die Vorhersage und wird berechnet, indem der absolute SHAP-Wert für jedes Merkmal über alle Daten gemittelt wird. Je größer der SHAP-Wert für ein Merkmal ist, desto mehr spielt das Merkmal eine wesentliche Rolle bei der Vorhersage.

- SHAP-Beeswarm-Plot zeigt die Auswirkung der Merkmale in einem Datensatz auf die Ausgabe des Modells. Jede Instanz wird durch einen einzelnen Punkt in jeder Merkmalsreihe dargestellt. Die x-Position des Punktes wird durch den SHAP-Wert des betreffenden Merkmals bestimmt, und die Punkte "stapeln" sich entlang jeder Merkmalsreihe, um die Dichte zu zeigen. Die Farbe stellt den Wert der Instanz in Bezug auf jedes Merkmal dar. Für jede Zielvariable kann ein Bienenschwarmdiagramm erstellt werden: Wenn der SHAP-Wert der Instanz positiv ist, trägt ihr Wert zur Vorhersage der Zielvariablen bei.
- SHAP-Dependence-Plot ist eine kartesische Ebene, in der die x-Achse die Werte der Instanzen für ein bestimmtes Merkmal und die y-Achse die SHAP-Werte für die Instanzen darstellt. Diese Darstellung ist besonders geeignet, um nicht-lineare Interaktionseffekte zwischen dem betrachteten Merkmal und anderen Merkmalen zu zeigen. Diese Information wird insbesondere durch die vertikale Streuung der Punkte vermittelt, was bedeutet, dass der gleiche Wert für das betrachtete Merkmal sich unterschiedlich auf die Modellausgabe auswirken kann. Die Interaktion kann auch durch die Einfärbung des Diagramms in Abhängigkeit von den Werten eines anderen Merkmals sichtbar gemacht werden.

In der Literatur zielt die Anwendung der SHAP-Analyse auf die Vorhersage des Brückenzustands auf die Identifizierung von Brückenmerkmalen ab, die den Zustand der Fahrbahnplatte am stärksten beeinflussen (Li & Song, 2022) (Kong, Li, Zhang, & Das, 2022) (Kale, Kassa, Ricks, & Gandhi, 2023). In solchen Studien gelingt es, Black-Box-KI-Modelle durch die SHAP-Analyse transparenter zu machen. Allerdings fehlt es ihnen an Allgemeinheit und Interaktion zwischen menschlichem Agenten und Computeralgorithmen.

## 5.3 Ergebnisse der Analyse

### 5.3.1 SIB-BW

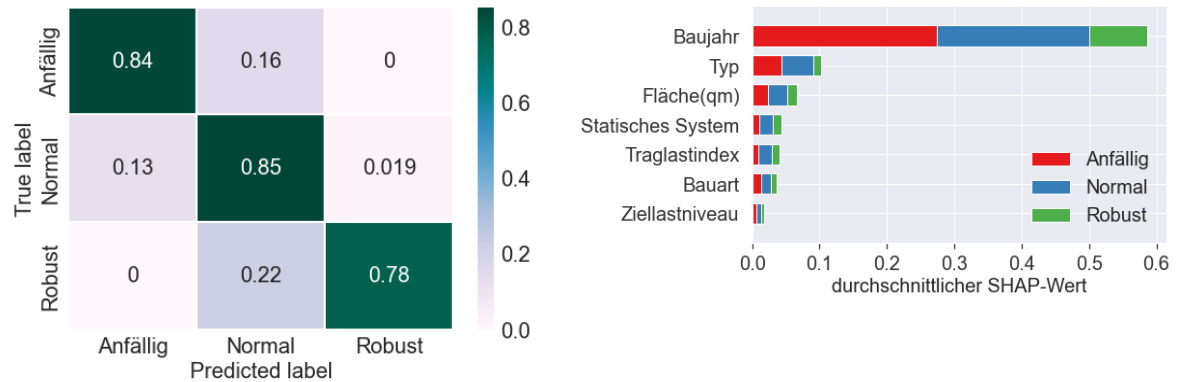


Abbildung 5-3 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Abplattung, Unterbau.

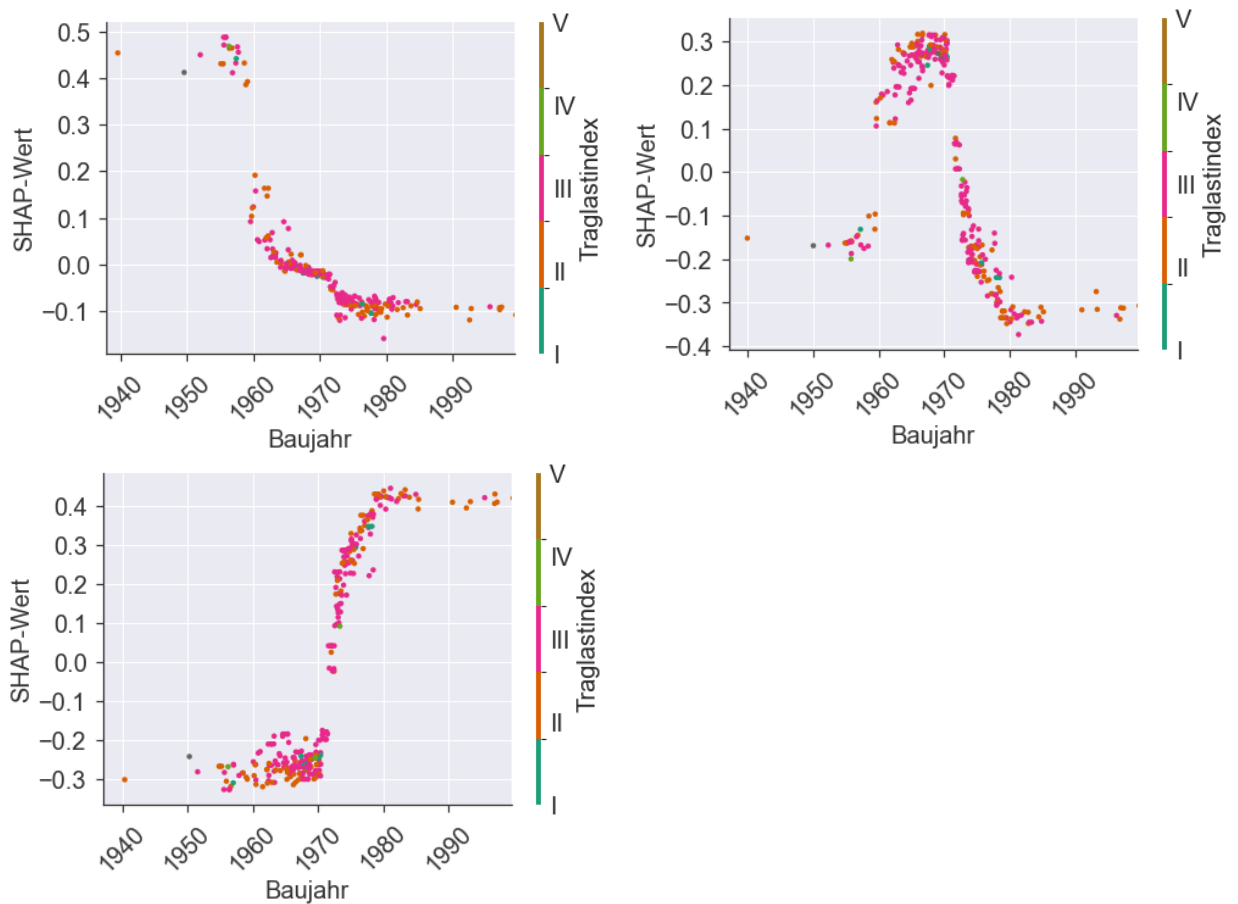


Abbildung 5-4 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Abplattung, Unterbau.

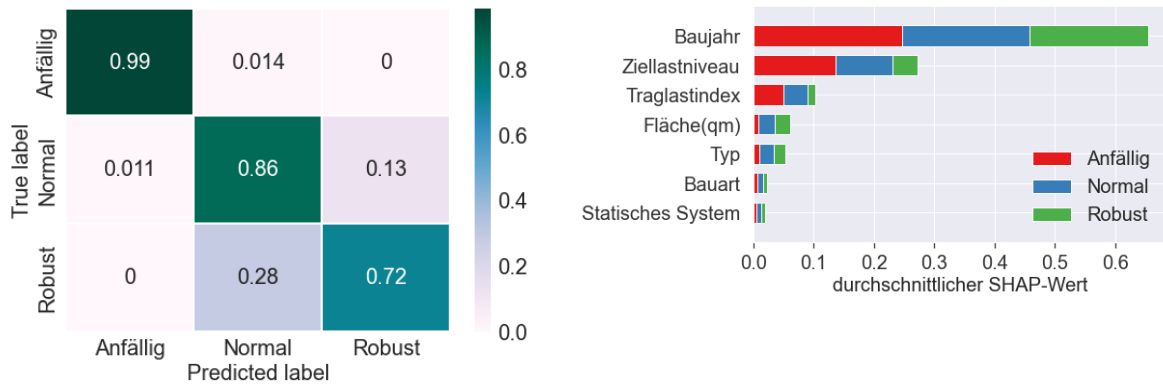


Abbildung 5-5 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Längsrisse, Unterbau.

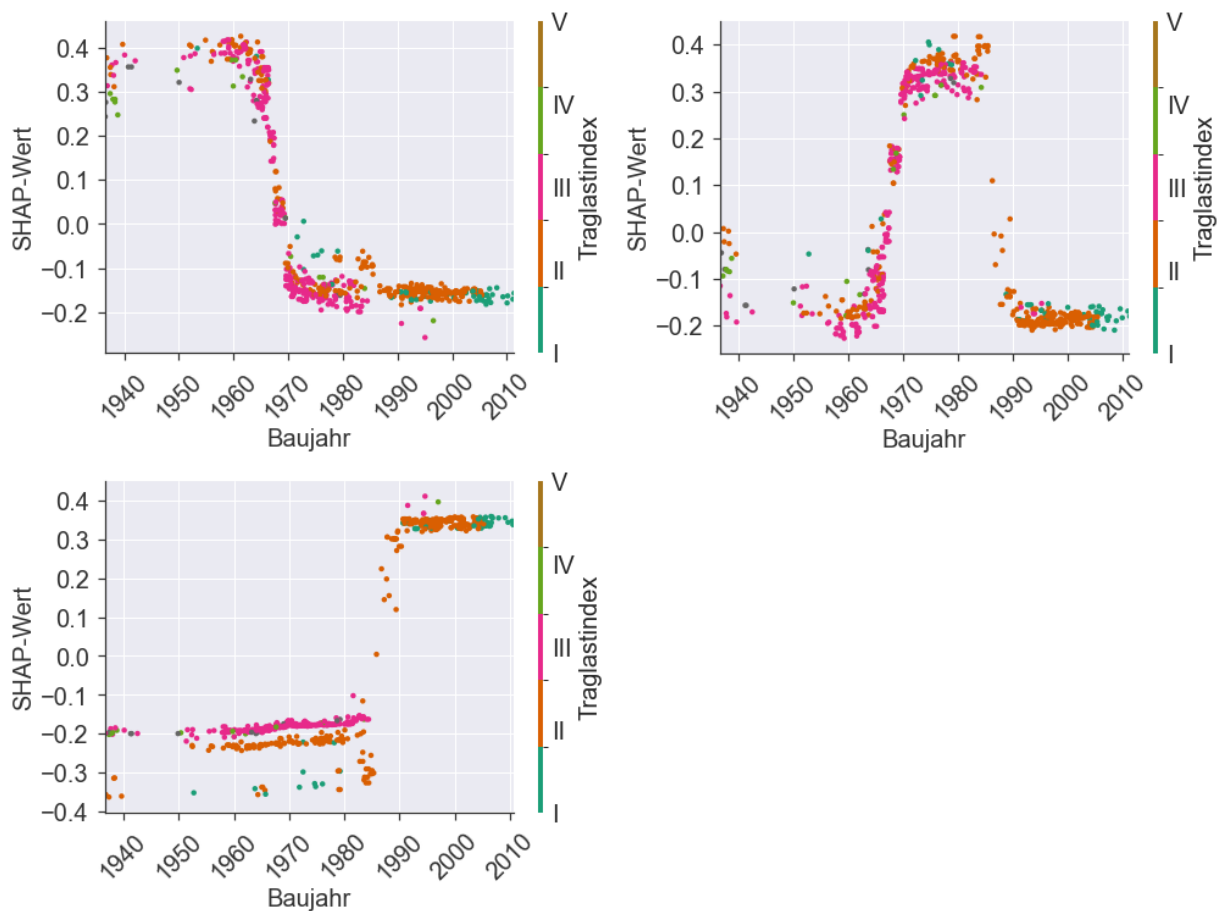


Abbildung 5-6 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Längsrisse, Unterbau.

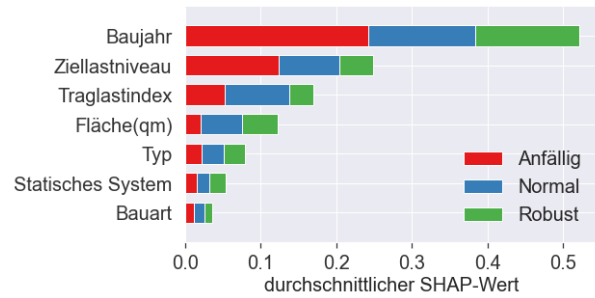
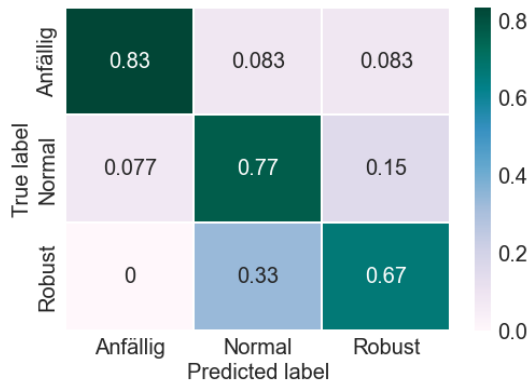


Abbildung 5-7 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Schrägrisse, Unterbau.

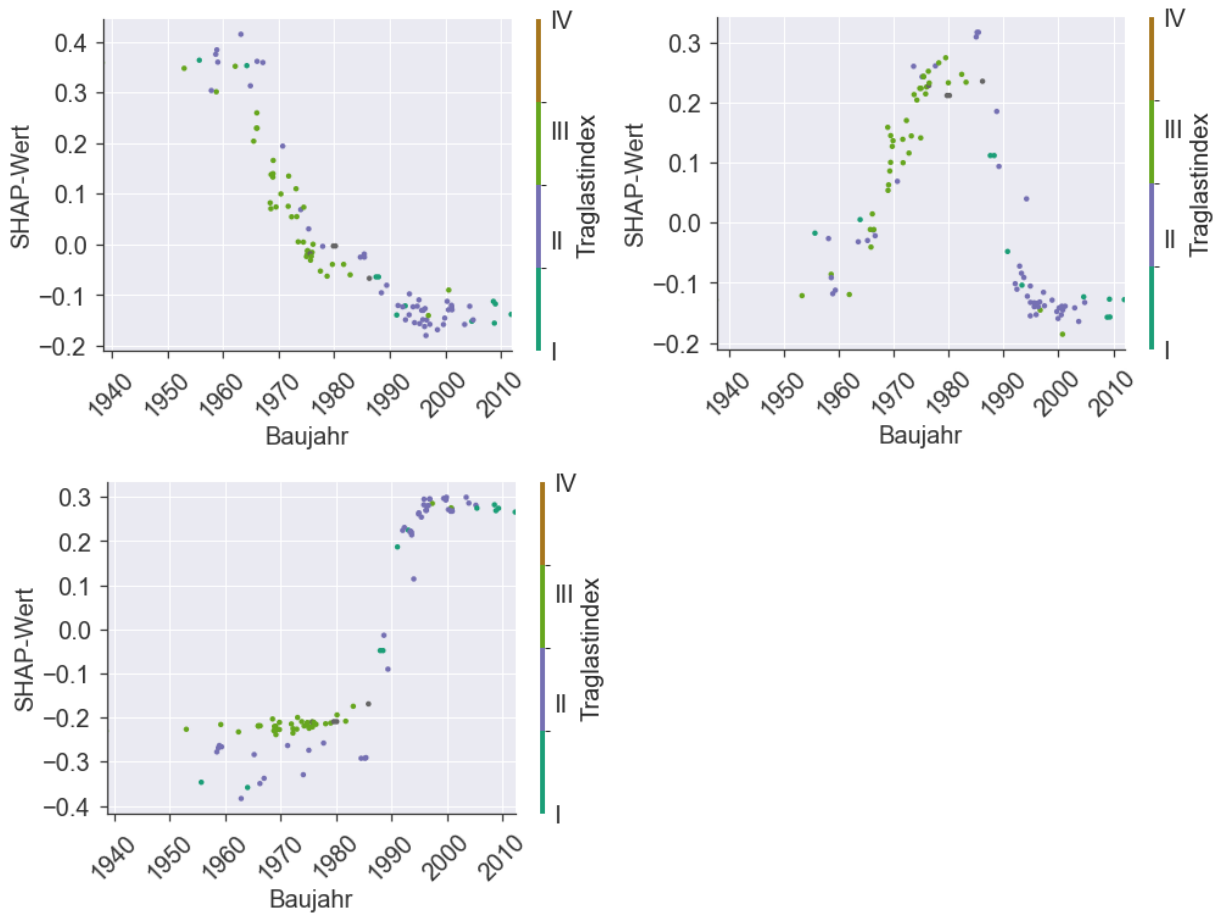


Abbildung 5-8 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Schrägrisse, Unterbau.



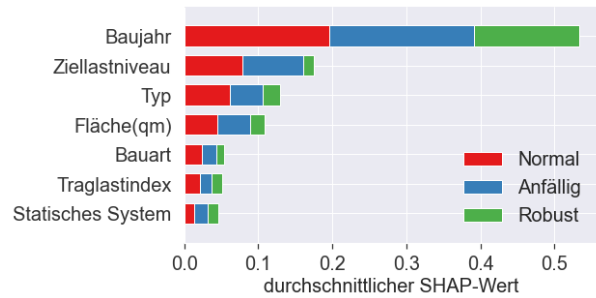
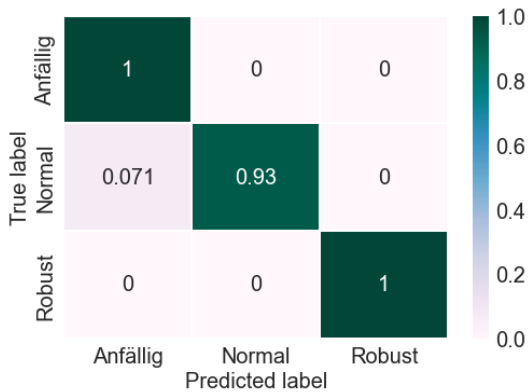


Abbildung 5-9 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Querrisse, Unterbau.

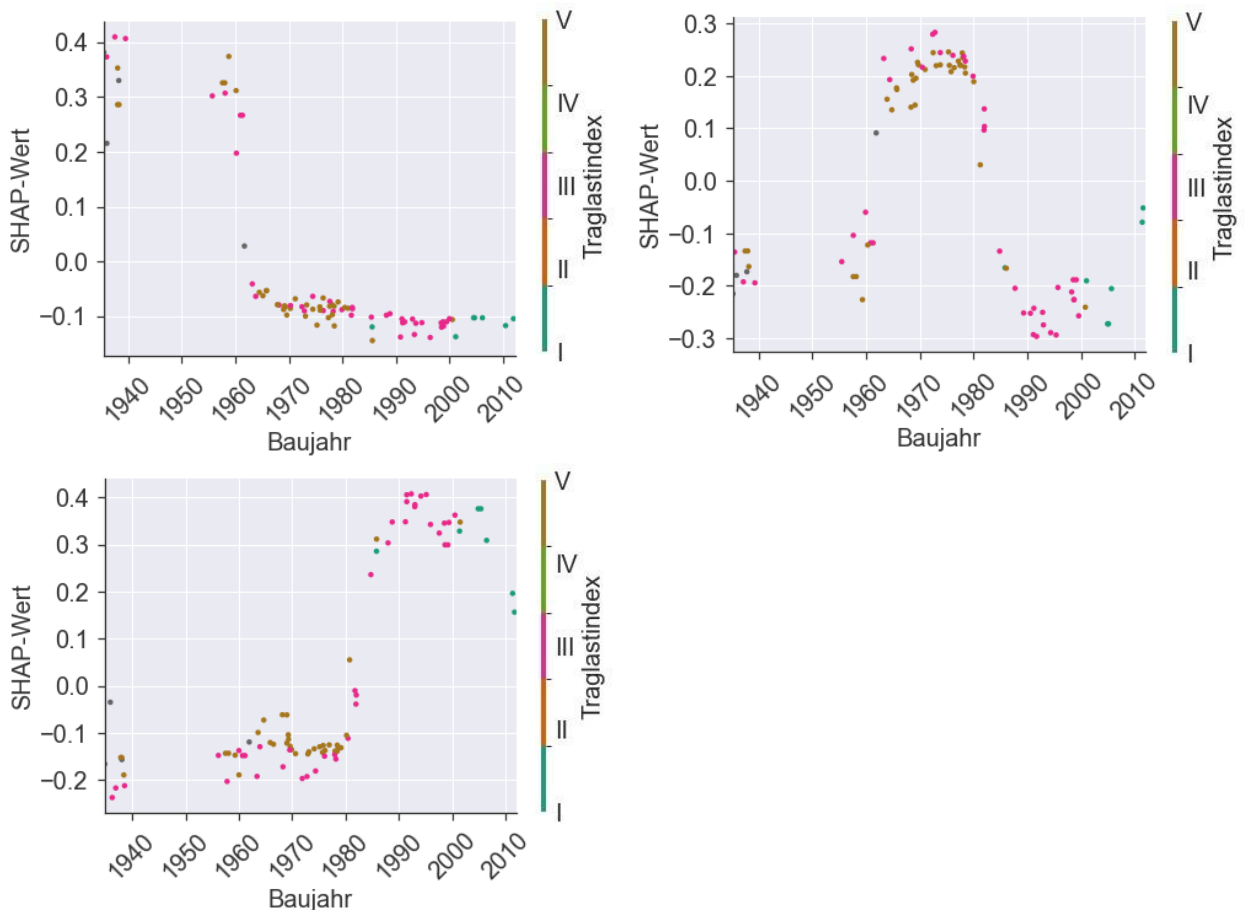


Abbildung 5-10 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Querrisse, Unterbau.

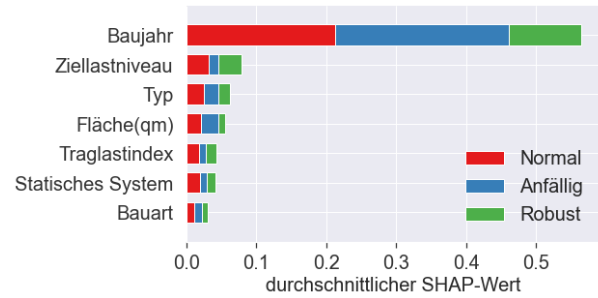
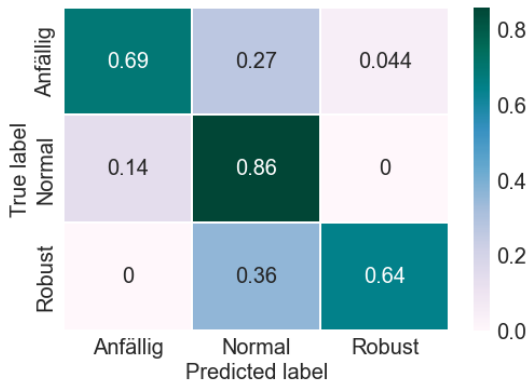


Abbildung 5-11 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Abplattung, Überbau.

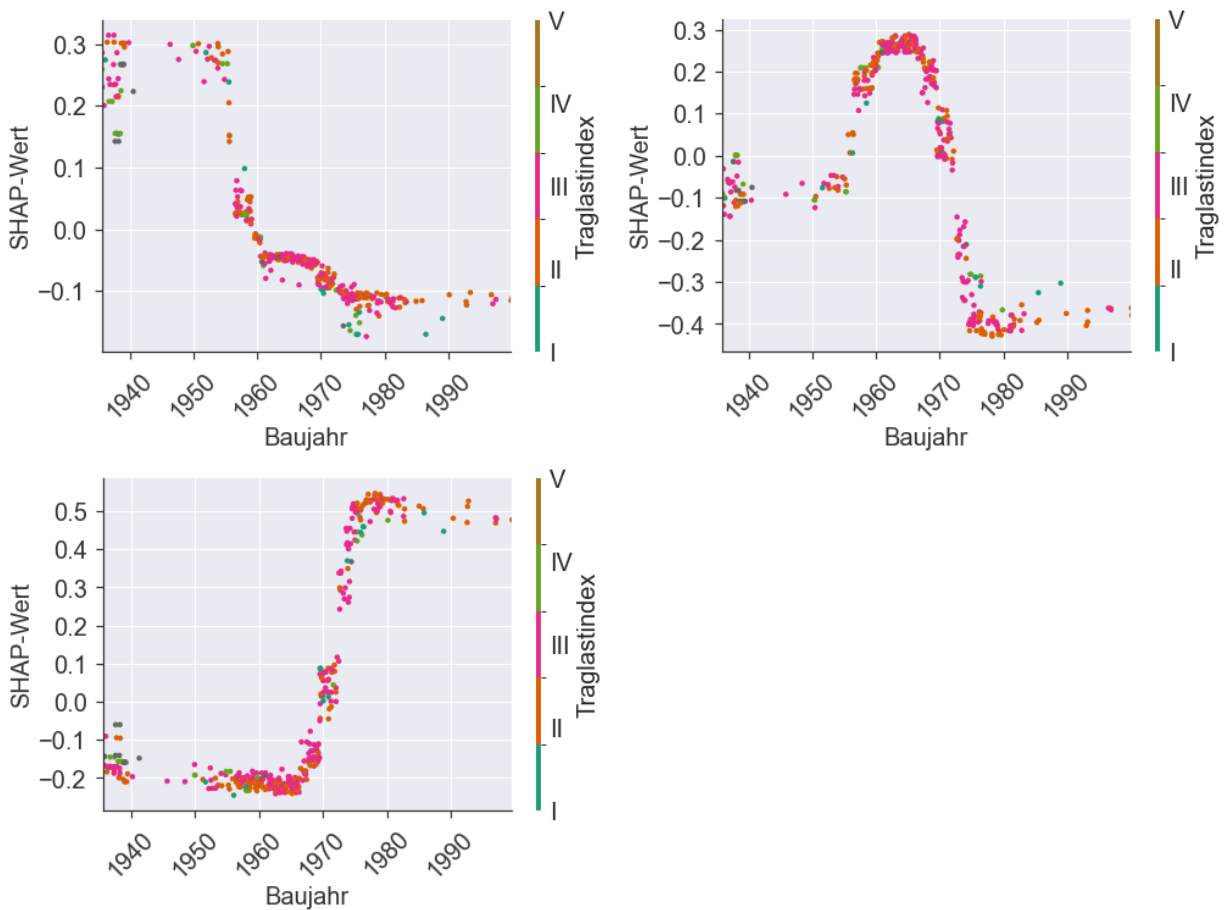


Abbildung 5-12 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Abplattung, Überbau.

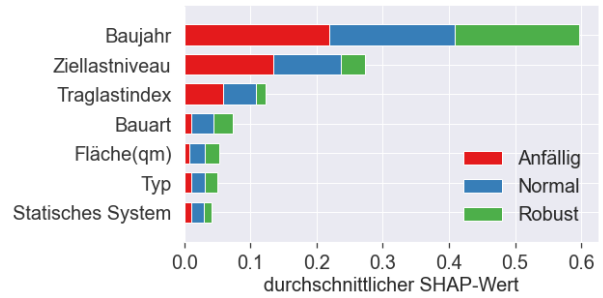
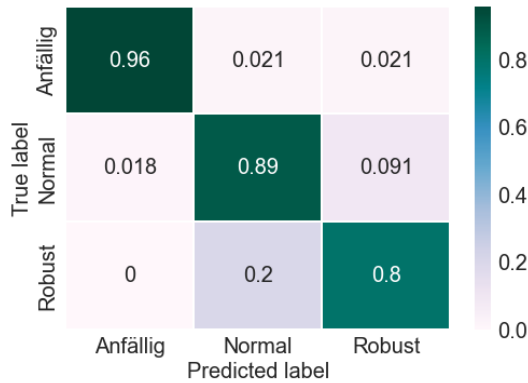


Abbildung 5-13 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Längsriss, Überbau.

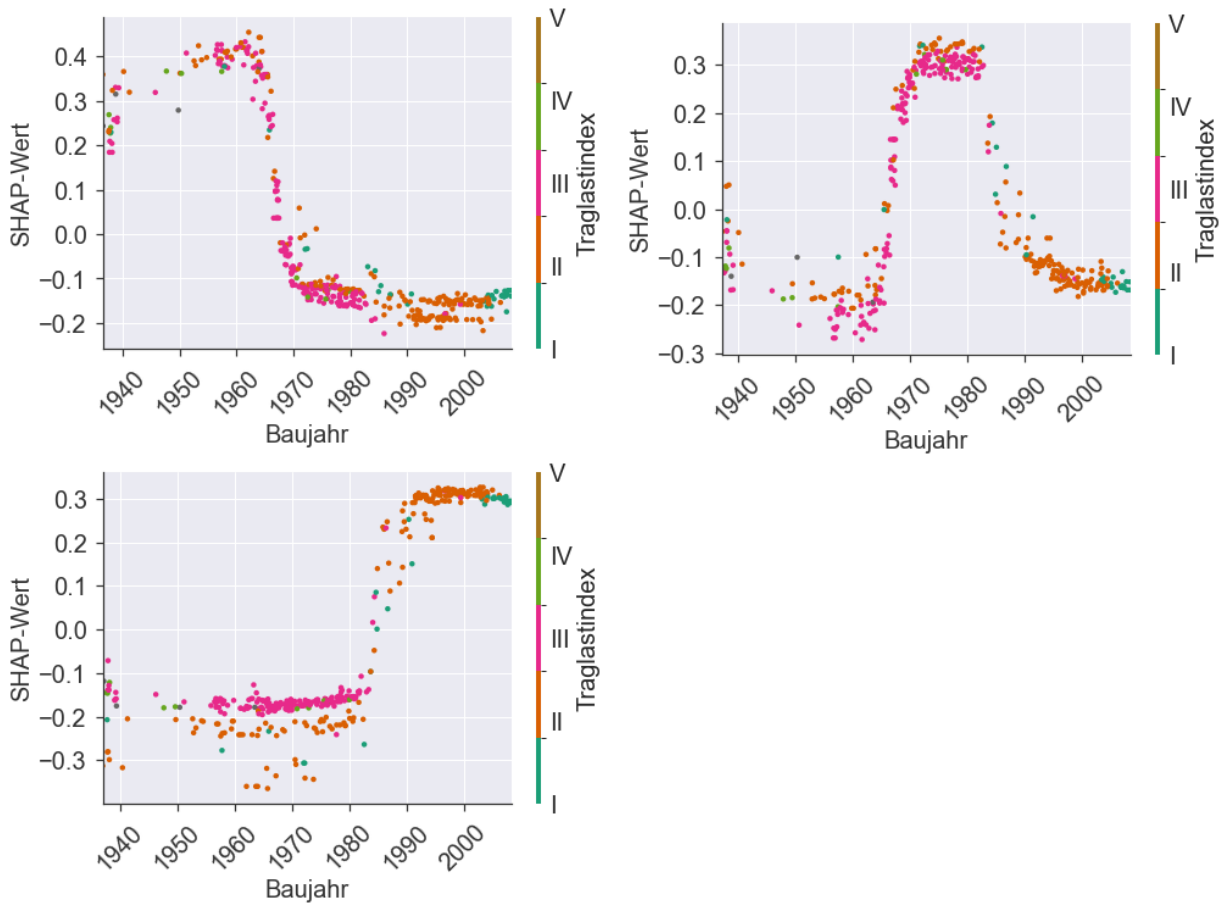


Abbildung 5-14 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Längsriss, Überbau.

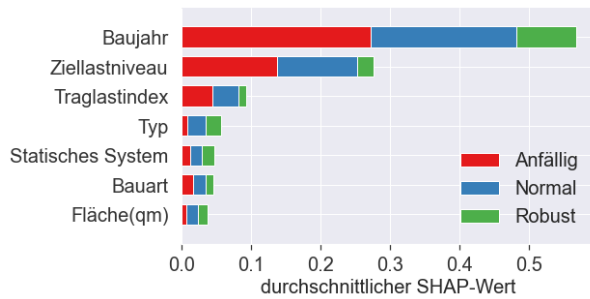
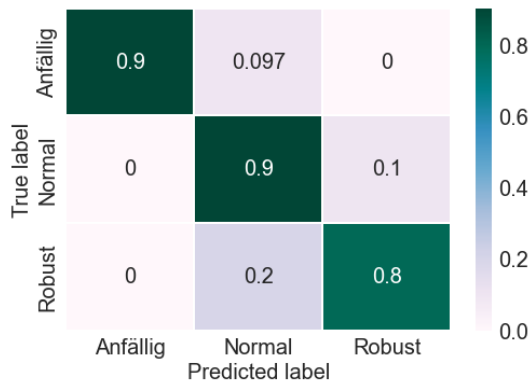


Abbildung 5-15 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Schrägrisse, Überbau.

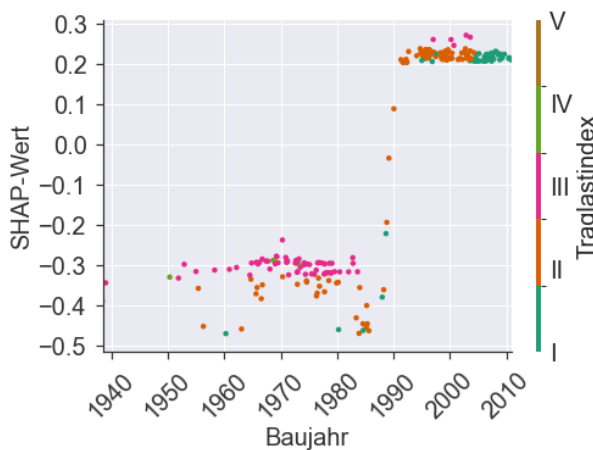
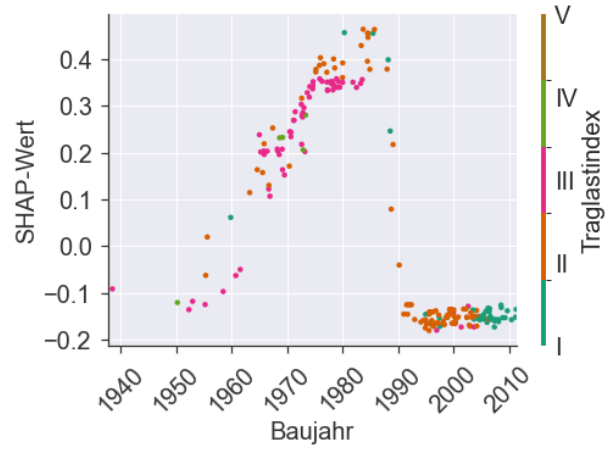
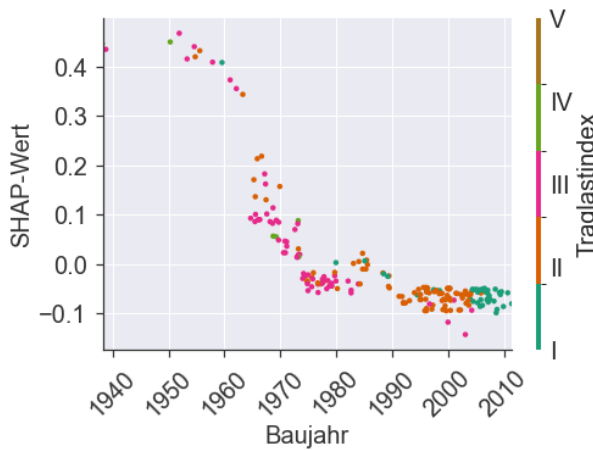


Abbildung 5-16 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Schrägrisse, Überbau.

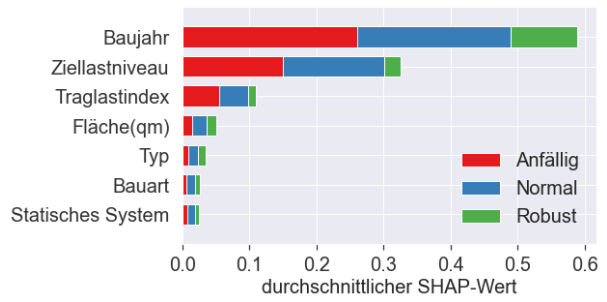
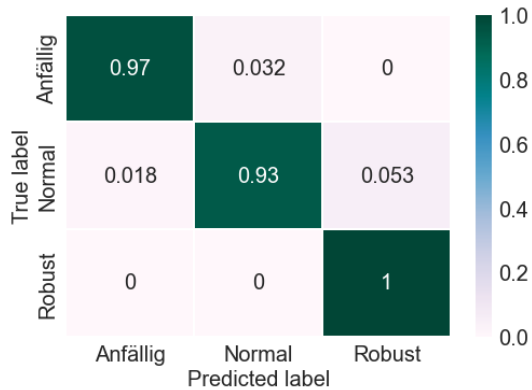


Abbildung 5-17 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) - Querrisse, Überbau.

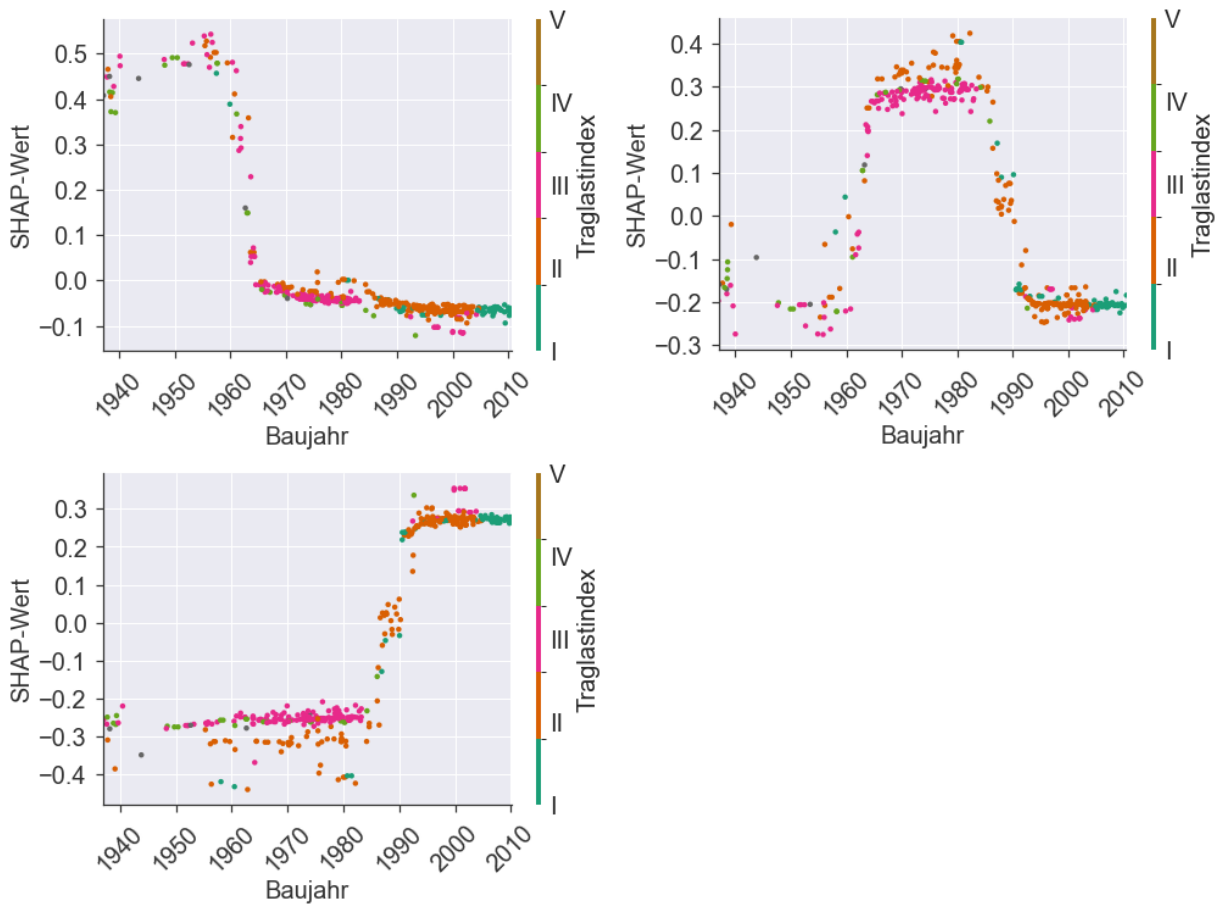


Abbildung 5-18 SHAP-Dependence-Plots (im Uhrzeigersinn: robust, normal, anfällig) - Querrisse, Überbau.

### 5.3.2 KUBA-DB

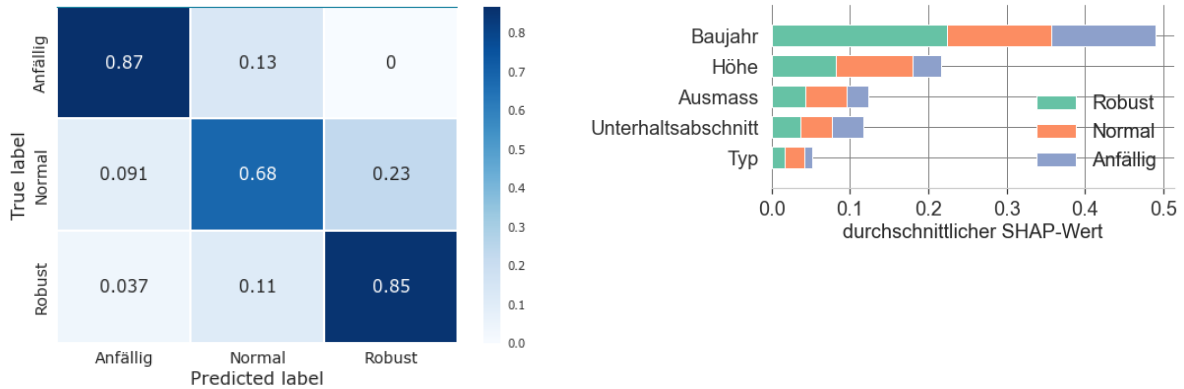


Abbildung 5-19 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) – Bauteilgruppe 1: Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger.

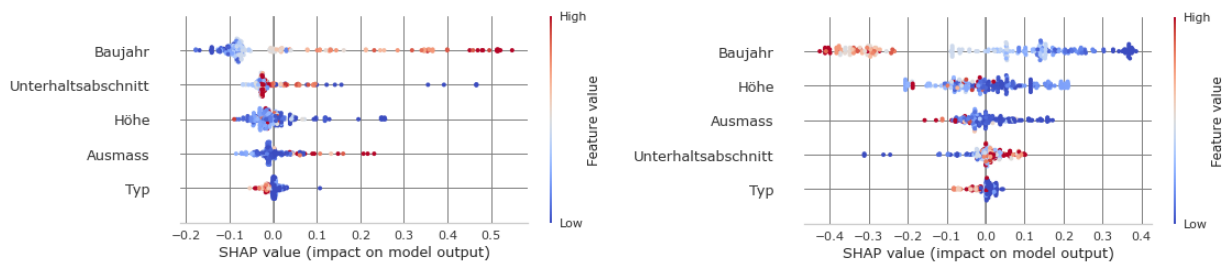


Abbildung 5-20 SHAP-Beeswarm-Plots (links: anfällig, rechts: robust) – Bauteilgruppe 1: Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger.

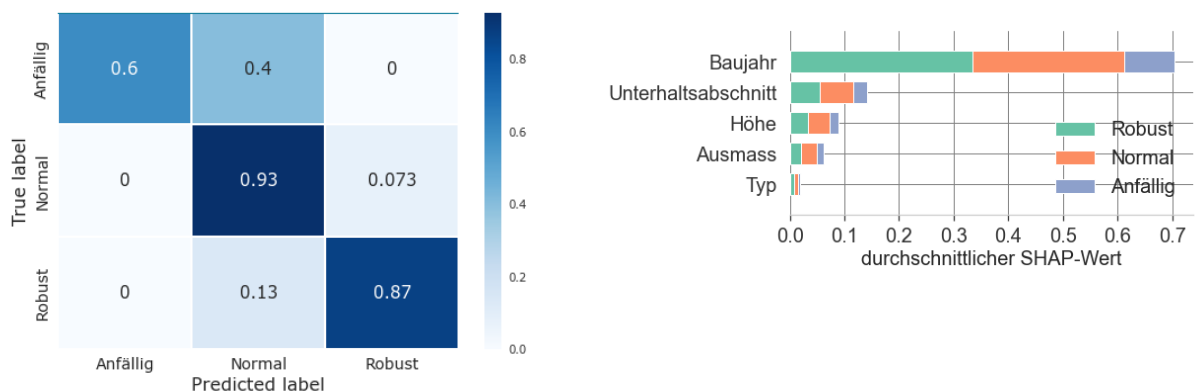


Abbildung 5-21 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) – Bauteilgruppe 2: Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze.



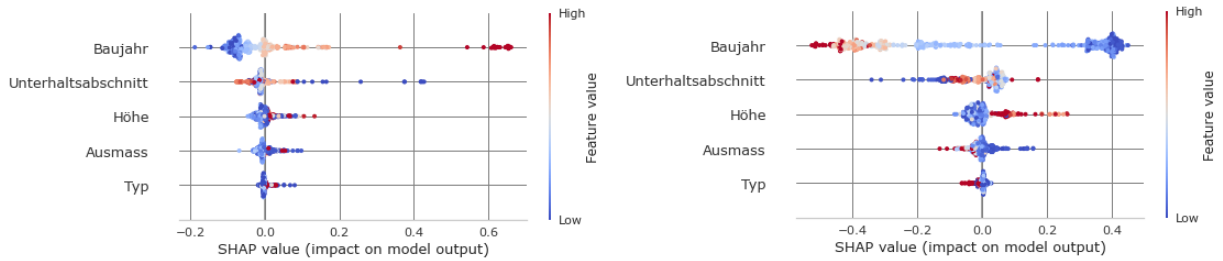


Abbildung 5-22 SHAP-Beeswarm-Plots (links: anfällig, rechts: robust) – Bauteilgruppe 2: Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelfeiler, Einzelstütze.

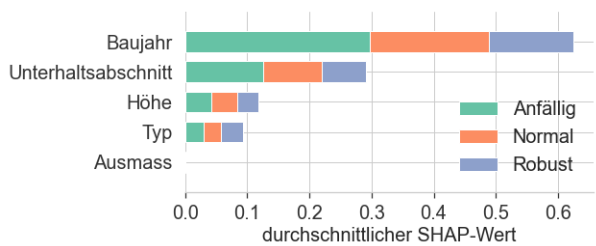
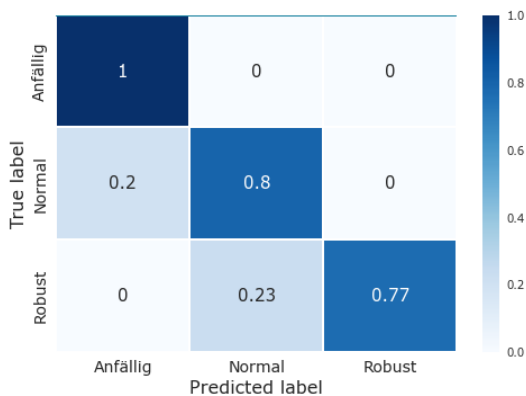


Abbildung 5-23 Konfusionsmatrix aus der Random-Forest-Klassifikation (links) und SHAP-Importance-Plot (rechts) – Bauteilgruppe 3: Punktkipplager, Linienkipplager, Lager.

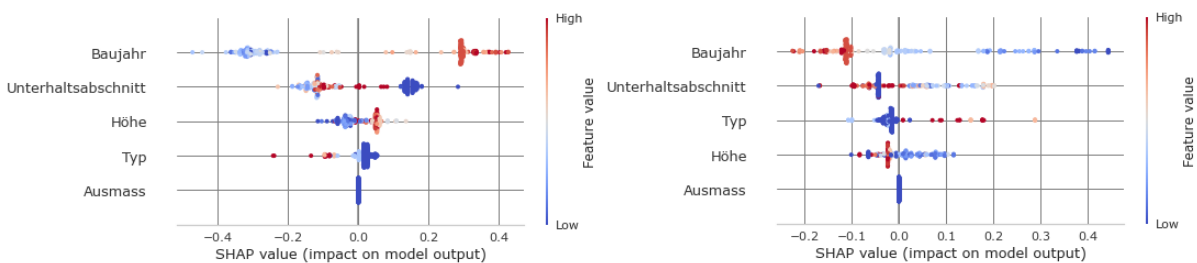


Abbildung 5-24 SHAP-Beeswarm-Plots (links: anfällig, rechts: robust) – Bauteilgruppe 3: Punktkipplager, Linienkipplager, Lager.

## 5.4 Interpretation der Ergebnisse

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Random Forest-Klassifizierung und der SHAP-Analyse können wir einige Schlussfolgerungen ziehen. Zuerst sind einige Cluster in dem Sinne unausgewogen, dass die Cluster nicht die gleiche Menge an Datenpunkten umfassen. Wenn ein Cluster wenige Datenpunkte hat, ist es schwierig, ihn mit dem Random-Forest-Algorithmus vorherzusagen.

Die Analyse der SIB-BW-Daten zeigt, dass im Falle von Abplatzungen das "Baujahr" das einzige Merkmal ist, das bei der Vorhersage eine Rolle spielt. Bei den anderen Schadensarten spielen die Merkmale "Baujahr" und "Ziellastniveau" sowie „Traglastindex“ die wichtigste Rolle bei der Vorhersage. Letztere sind mit dem Baujahr korreliert.

Die Analyse der Daten der KUBA-DB zeigt, dass das Merkmal, das bei der Vorhersage des Clusters die größte Rolle spielt, ist „Baujahr“, gefolgt von "Höhe" im Falle der Bauteilgruppe 1 und "Unterhaltsabschnitt" im Falle der Bauteilgruppen 2 und 3. Die herausragende Rolle von "Unterhaltsabschnitt" kann auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass die Bauteile zur selben Brücke gehören.

Die SHAP-Analyse zeigt, dass das Baujahr der Brücke eine wichtige Rolle bei der Vorhersage des Clusters spielt: Der Cluster von Schäden, die sich schnell entwickeln, steht in Zusammenhang mit kürzlich gebauten Brücken, während der Cluster von Schäden, die sich langsam entwickeln, mit alten, in der Vergangenheit gebauten Brücken zusammenhängt.

Diese Ergebnisse sind kontraintuitiv, denn in Anbetracht der Verbesserungen bei den Bautechniken, Vorschriften und Materialien würde man erwarten, dass in der Vergangenheit gebaute Brücken schneller Risse entwickeln, während in jüngerer Zeit gebaute Brücken langsamer Risse entwickeln würden.

Dieses Ergebnis lässt sich rechtfertigen, wenn man bedenkt, dass alte anfällige Brücken bereits ersetzt oder repariert wurden und daher die Entwicklung ihrer Schäden in der Datenbank, die erst vor 30 Jahren entwickelt wurde, nicht dokumentiert wurde. Um die Entwicklung der Schäden an neu gebauten Brücken zu dokumentieren, muss der Zustand der Brücke über einen längeren Zeitraum als 30 Jahre beobachtet werden.

Daher sind die Zustandsdaten mit einer "Stichprobenverzerrung" betroffen, die dadurch entsteht, dass die analysierten Zustandsdaten nicht die gesamte interessierende Population

repräsentieren, da sich schnell entwickelnde Schäden aus der Vergangenheit bereits repariert oder Brücken ersetzt wurden, bevor Zustandsdaten im BMS erfasst werden konnten. Gleichzeitig haben neu gebaute, robuste Brücken noch keine signifikanten Schäden entwickelt, und ihre Entwicklung wird im BMS nicht dokumentiert.

Die entwickelten Degradationsmodelle sind für die drei identifizierten Cluster gültig. Im Wesentlichen modellieren sie die Entwicklung des Zustands von kürzlich gebauten anfälligen Brücken (ca. 1990-2010), von robusten Brücken, die in der Vergangenheit gebaut wurden (ca. 1940-1960), und von Brücken, die durch durchschnittliche Degradationsraten gekennzeichnet sind und in den Jahren 1960-1990 gebaut wurden. Die Übertragbarkeit dieser Modelle auf andere Brückengenerationen als die, auf denen sie basieren, ist nicht bekannt und stellt ein interessantes Forschungsthema dar, das in Zukunft weiter untersucht werden kann. Die SHAP-Analyse ermöglicht es, die Verzerrung in den Daten zu identifizieren und klar zu visualisieren und Degradationsmodelle zu entwickeln, die sich der Verzerrung „bewusst“ sind. Zusammenfassend ist es wichtig, Degradationsmodelle zu entwickeln, die sich auf eine klar definierte Brückenpopulation beziehen. Wenn Degradationsmodelle, die auf allen Daten basieren, auf eine bestimmte Brückenpopulation angewendet werden, kann die Lebensdauer der Brücke über- oder unterschätzt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es nicht möglich ist, den Cluster allein auf der Grundlage der aktuellen Bestandsdaten in der Datenbank vorherzusagen und somit für ein neues Brückenteilsystem zu prognostizieren, wann die Schäden beginnen und einen kritischen Zustand erreichen werden. Um die Verzerrung zu mildern, ist es notwendig, Zustandsdaten über einen längeren Zeitraum zu erheben und die Zustands- und Bestandsdatenbank mit zusätzlichen Merkmalen zu versehen, die eine Vorhersage des Clusters und damit des Zeitpunkts der Schadensentstehung ermöglichen.

Eine Abschätzung der Restnutzungsdauer kann jedoch für den Fall vorgenommen werden, dass die Schäden bereits begonnen haben und dem Zustandsindex 1 zugeordnet wurden.

Tatsächlich ist es möglich, sich ausschließlich auf die Ausbreitungsphase der Degradation zu konzentrieren, d. h. die Öffnung des Risses, Ausbreitung der Korrosion, und einen Gamma-Prozess an die zeitliche Abfolge anzupassen, in der der Zustandsindex 2 und 3 zugeordnet ist. Es wird angenommen, dass der Gamma-Prozess durch  $b = 1$  charakterisiert ist, d. h. die Zeit ist eine lineare Funktion des Zustandsindex. Durch die Simulation des Gamma-Prozesses ausgehend von dem Schaden aktuell zugewiesenen Zustandsindex kann die Restlebensdauer des Bauteils abgeschätzt werden.

## 6 ENTWICKLUNG EINES IT-PROTOTYPS

### 6.1 Konzept

Fokus des Projekts ist die Neu- und Weiterentwicklung von Methoden zur Zustandsprognose. Daher soll die Umsetzbarkeit der Methoden der Zustandsprognose, deren Entwicklung in Kapitel 3 und deren Umsetzung in Kapitel 0 beschrieben wurde, anhand eines Prototyps nachgewiesen werden.

Im Prototyp wird anhand von Beispielbrücken mit typischen Schadensbildern eine Zustandsprognose nach unterschiedlichen Methoden vorgenommen und die Resultate werden visualisiert. In Abhängigkeit der Zustandsnote wird eine Widerstandsreduktion angenommen. Auf Grundlage eines probabilistischen Vergleichs zwischen Beanspruchung aus den Einwirkungen aus ständigen Lasten und Verkehrslasten und dem Widerstand wird der Zuverlässigkeitsindex ermittelt. Aus der Prognose ergibt sich, wann der Zuverlässigkeitsindex voraussichtlich einen zulässigen Wert unterschreitet. Wenn dies der Fall ist, ist das Ende der Nutzungsdauer erreicht.

Mit der prototypischen Umsetzung soll es möglich sein, die neu entwickelten Methoden der Zustandsprognose zu visualisieren, zu vergleichen und einer Plausibilisierung zu unterziehen. Da die Aufgabenstellung den Fokus auf die Restnutzungsdauer legt, beschränkt sich der Prototyp auf das Leistungsziel, welches der Nutzungsdauer eines Tragwerks ein Ende setzt, nämlich dem der Zuverlässigkeit. Das Konzept lässt sich jedoch auch ohne weiteres in ein umfassendes Managementsystem einbinden, welches nicht nur einzelne Tragwerke, sondern das ganze Netz betrachtet und wo neben der Zuverlässigkeit auch weitere Leistungsziele wie die Sicherheit für Nutzer und Dritte, die Verfügbarkeit, die Nachhaltigkeit und die Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden.

### 6.2 Datengrundlage und -aufbereitung

Im Folgenden werden die für die Anwendung des IT-Prototyps benötigten Eingangsdaten und deren Datenquellen erläutert.

Um die innerhalb des Prototyps vorhandenen Teilmodule nutzen zu können, werden Eingangsdaten benötigt. Innerhalb des IT-Prototyps wird zwischen statischen, d. h. vordefinierten Daten und dynamischen, d. h. durch den Nutzer veränderbaren Parametern unterschieden.

Als Datenquellen für statische, vordefinierte Daten dienen Auszüge der Anlagedaten aus SIB-Bauwerke, IMT und KUBA-DB. Zu den benötigten Inventardaten zählen der Bauwerkstyp, die Lokalisierung des Bauwerks, die geometrischen Abmessungen sowie die zugrundeliegende Bemessungsnorm zur Analyse des vereinfachten statischen Systems.

Weiterhin werden für die Abbildung von Schäden sowie die Modellierung von Schadensentwicklungen heuristische Verfahren genutzt. Art, Lage und Ausmaß der Schäden werden benötigt, um deren Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit zu beurteilen. Diese Daten sind dynamisch, d. h. durch den Benutzer veränderbar.

In Abbildung 6-1 ist eine Übersicht zu den notwendigen Eingangsdaten für den IT-Prototyp dargestellt.

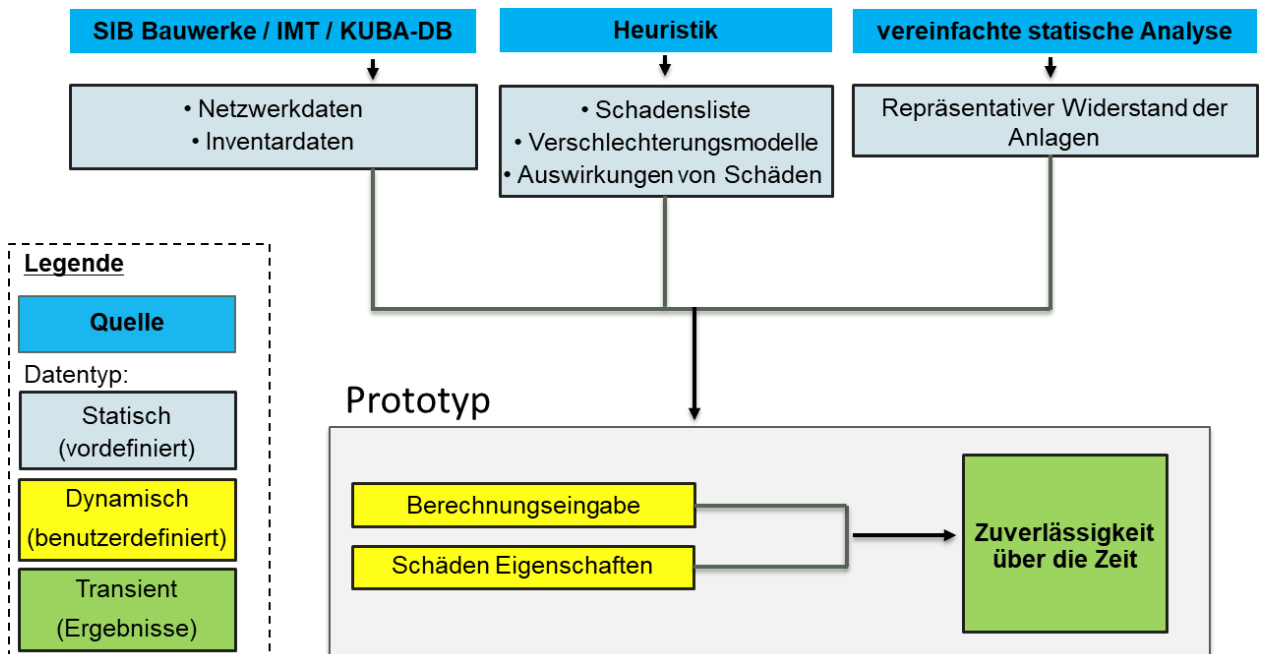


Abbildung 6-1 Übersicht an notwendigen Eingangsdaten für den IT-Prototyp

## 6.3 Zuverlässigkeit

### 6.3.1 Allgemeines

Unter Zuverlässigkeit einer Anlage wird die Wahrscheinlichkeit verstanden, dass diese Anlage während ihrer Nutzungsdauer sowohl sicher als auch funktionsfähig ist. Sie ist der Gegensatz zur Wahrscheinlichkeit eines strukturellen Versagens (Tragsicherheit) oder eines betrieblichen Versagens (Gebrauchstauglichkeit). Der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  wird am häufigsten verwendet, um die Zuverlässigkeit eines Bauwerks zu bewerten. Die Berechnung der  $\beta$ -Werte

für ein Bauwerk kann im Einzelfall sehr aufwändig werden, jedoch kann ein einfaches statisches Modell, welches auf Bestandsdaten und ingenieurmäßigem Urteilsvermögen basiert, ein sehr sinnvolles Instrument für ein netzweites Screening einer Vielzahl von Objekten sein.

### 6.3.2 Methodik zur Bewertung der Zuverlässigkeit eines Bauwerks

Die Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Zuverlässigkeit eines Bauwerks ist in Abbildung 6-2 dargestellt.

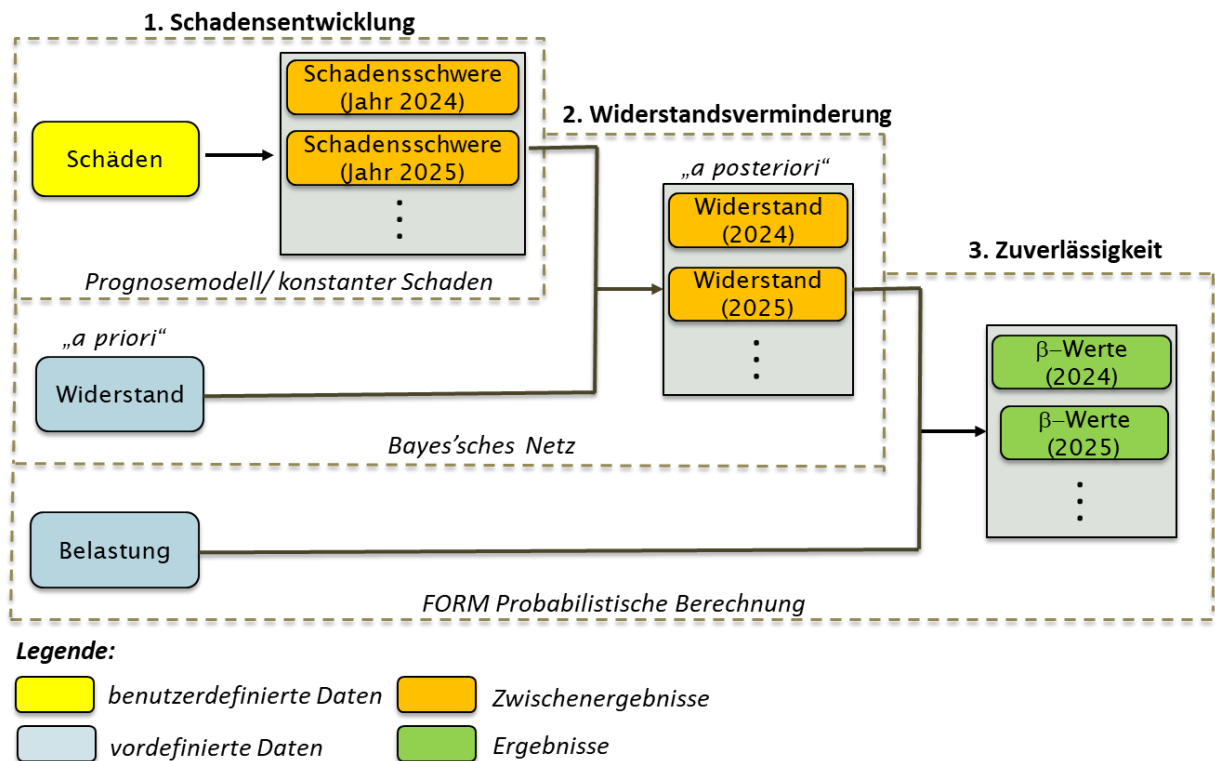


Abbildung 6-2 Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Zuverlässigkeit eines Bauwerks

Für die benutzerdefinierten Schäden an den Infrastrukturbauwerken und das ausgewählte Schadensprognosemodell (Zeitinhomogene Markov-Kette bzw. Gamma-Prozess & Physikalische Modelle) wird die Entwicklung der Schadensschwere berechnet (Schritt 1 in Abbildung 6-2).

Die Auswirkungen der Schadensverschlechterung auf die Widerstände der Infrastrukturbauwerke im Laufe der Zeit werden mit Hilfe eines Bayes'schen Netzes berücksichtigt (Schritt 2 in Abbildung 6-2).



Die zugehörige Methodik zur Berechnung von a priori und a posteriori Zuverlässigkeitsindizes  $\beta$  für Bauwerke ist in (Hajdin & Fastrich, 2019) ausführlich beschrieben. Die dort vorgestellte Vorgehensweise berücksichtigt ein vereinfachtes statisches Modell für eine Brücke und einen oder mehrere Schäden, die anhand von Art, Schwere und Lage des Schadens bei der Bewertung der beiden Hauptversagensarten, d. h. Biegung in der Mitte der Spannweite und Querkraft an den Stützen. Die Hauptergebnisse der Methodik aus (Hajdin & Fastrich, 2019) enthält vier Werte pro Brücke, die die Zuverlässigkeitsindizes für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) für das Durchbiegungsmoment bzw. die Querkraft darstellen (a posteriori). Diese strukturelle Widerstandsfähigkeit der Anlage wird für jedes Jahr in der Zukunft neu berechnet, um schließlich die Prognose der  $\beta$  -Werte für eine Anlage über den analysierten Zeitraum zu erhalten (Schritt 3 in Abbildung 6-2).

### 6.3.3 Schäden und Schadensarten

Die Struktur der Datenbank SIB-Bauwerke erlaubt in erster Näherung die Annahme, ob ein Schaden anhand seiner Schadensart eher für das Moment oder für die Querkraft relevant ist. Die für den Prototypen getroffenen Annahmen sind in Tabelle 6-1 dokumentiert.

Für IMT und KUBA-DB wurde keine solche Zuordnung der Schadensart vorgenommen. Für die österreichischen bzw. schweizerischen Brücken wird ein Schaden oder eine Schadensgruppe dann für Moment bzw. Querkraft als relevant angenommen, wenn sich der Schaden im Feld bzw. beim Auflager befindet.

Schadensart	Relevant für Biegung (Moment)	Relevant für Querkraft
Netzrisse	x	
Querrisse	x	
Schrägrisse		x
Längsrisse	x	
Abplatzung	x	

Tabelle 6-1 Schadensarten eines Brückenbauwerks und Auswirkungen auf Biegung und Querkraft (S-Bewertung)

### 6.3.4 Prognose der Schadensentwicklung

Im IT-Prototyp können Schäden abgebildet werden, welche einer Verschlechterung über die Zeit unterliegen. Für die Verschlechterung dieser Schäden sind Korrosionsprozesse ursächlich.

Zur Abbildung der Verschlechterung über die Zeit sind zwei Prognosemodelle auswählbar:

- „Gamma-Prozess & Physikalische Modelle“, näher beschrieben in Kapitel 3.1 und
- „zeitinhomogene Markov-Kette“, näher beschrieben in Kapitel 3.2.

Bei der Prognose muss die Verschlechterung, die durch den zugrundeliegenden Korrosionsprozess eigentlich kontinuierlich erfolgt, in die diskreten Schadensklassen entsprechend der länderspezifischen Methodik der Schadensbewertung umgerechnet werden.

Im Folgenden sind die Parameter aufgelistet, nach denen die Prognosemodelle differenzieren. Daten, die das Infrastrukturobjekt betreffen, sind im IT-Prototyp bereits vorausgefüllt. Daten, die den Schaden betreffen, können vom Benutzer variiert werden.

#### 6.3.4.1 Gamma-Prozesse & Physikalische Modelle

Das Prognosemodell „Gamma-Prozesse & Physikalische Modelle“ differenziert nach Bauteil, Art des Schadens und Bewertung des Schadens.

Für das deutsche Netz wird betreffend Bauteil zwischen

- Überbau und
- Unterbau.

differenziert. Für das Schweizer Netz gibt es betreffend Bauteil eine Einteilung in drei Gruppen:

- Gruppe 1: Fahrbahnplatte, Vollwandträger, Querträger
- Gruppe 2: Flügelmauer, Widerlagermauer, Widerlager ohne Kontrollgang, Widerlager mit Kontrollgang, Einzelpfeiler, Einzelstütze
- Gruppe 3: Punktkipplager, Linienkipplager, Lager

Für das deutsche Netz wird betreffend Art des Schadens differenziert nach:

- Netzkrisse
- Querrisse
- Schrägrisse
- Längsrisse
- Abplatzung

Für das schweizerische Netz gibt es keine Differenzierung, sondern es wird angenommen, dass es sich um eine „maßgebende Schadensart“ handelt, in dem Sinne, dass der Schaden der relevante Schaden für den Verlauf der Zuverlässigkeit über die Zeit der maßgebende ist. Zuletzt wird je nach Netz die D-Note (Deutschland) bzw. die Zustandsklasse (Schweiz) eingegeben.

Für das österreichische Netz ist bei diesem Prognosemodell keine Eingabe möglich. Der Grund ist, dass die Einzelschäden nicht als strukturierte Daten vorliegen.

#### **6.3.4.2 Zeitinhomogene Markov-Kette**

Das Prognosemodell „Zeitinhomogene Markov-Kette“ differenziert nach den folgenden Parametern:

- Längssystem: z. B. Träger ohne Durchlaufwirkung oder Rahmen
- Querschnittstyp: z. B. Platte
- Material Überbau: Stahlbeton oder Spannbeton
- Baujahr
- Bauteiltyp: z. B. Überbau, Unterbau oder Vorspannung
- Zustandsnote (Deutschland und Österreich) bzw. Zustandsklasse (Schweiz)
- Anzahl der bereits durchgeführten Maßnahmen

Es wird nicht nach der Art des Schadens differenziert, sondern es wird angenommen, dass es sich um eine „maßgebende Schadensart“ handelt, in dem Sinne, dass der Schaden der relevante Schaden für den Verlauf der Zuverlässigkeit über die Zeit der maßgebende ist.

#### **6.3.5 Vereinfachtes statisches Modell**

Zur Berechnung des Widerstandes und der Nutzlast einer Anlage sollten die Inventardaten (Geometrie, Bemessungsnorm, Verkehrslasten oder eine ähnliche Norm) verwendet werden. Im Falle eines Brückenbauwerks können z. B. einfache Balkenmodelle angewendet werden, bei denen der Widerstand auf einer Bemessungsnorm und die Einwirkungen auf der aktuell gültigen Norm basieren.

Das vereinfachte statische Modell eines Bauwerks sollte eine nahtlose Bewertung der Zuverlässigkeit während seiner Nutzung ermöglichen. Im Falle eines Brückenbauwerks gibt es Kriterien, welche die Tragsicherheit betreffen (ULS) und solche, welche die Gebrauchstauglichkeit betreffen (SLS). Beide Kriterien werden stellvertretend durch einen Vergleich von Biegemoments und Querkraft an den relevanten Nachweisschnitten überprüft. In den meisten

Fällen und aufgrund der Art der vorherrschenden Verkehrslast ist es ausreichend, nur den Überbau, d. h. den Mittelteil und die Auflagerzone in einem Balkenmodell zu untersuchen. Für den Fall von Brückenbauwerken werden im IT-Prototyp folgende Größen an einem Ersatzsystem berechnet:

- vier Werte für den Widerstand (Bemessungsnorm)
  - o  $M_{RE}$  (Biegung in kNm), für die ULS und SLS (insgesamt zwei Werte)
  - o  $V_{RE}$  (Querkraft in kN) für die ULS und SLS (insgesamt zwei Werte)
- vier Werte für die Belastung (Verkehrsnorm)
  - o  $M_{LL}$  (Biegung in kNm), für die ULS und SLS (insgesamt zwei Werte)
  - o  $V_{LL}$  (Querkraft in kN), für die ULS und SLS (insgesamt zwei Werte)

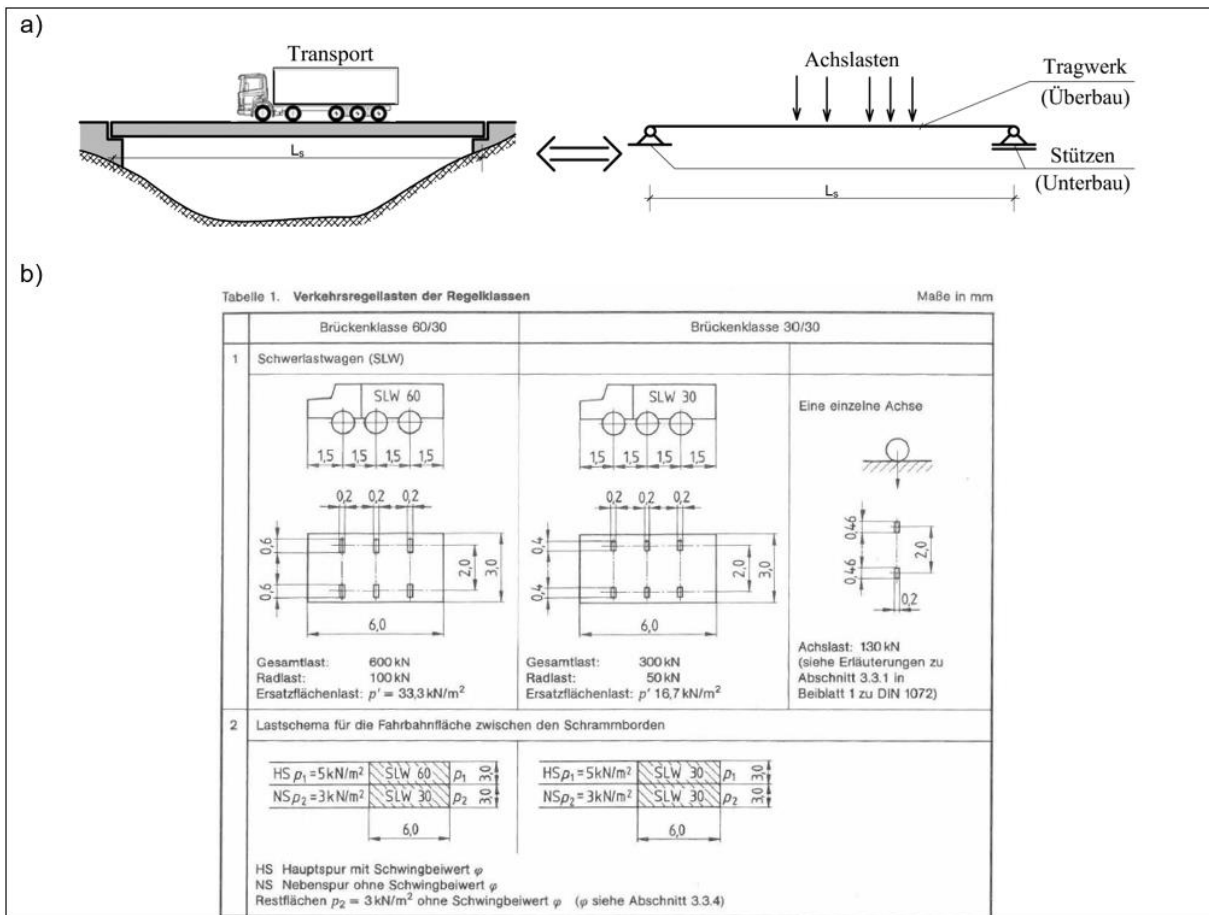


Abbildung 6-3 a) Balkenmodelle für eine Brücke; b) Beispiel einer Bemessungsnorm für Deutschland (DIN 1072)

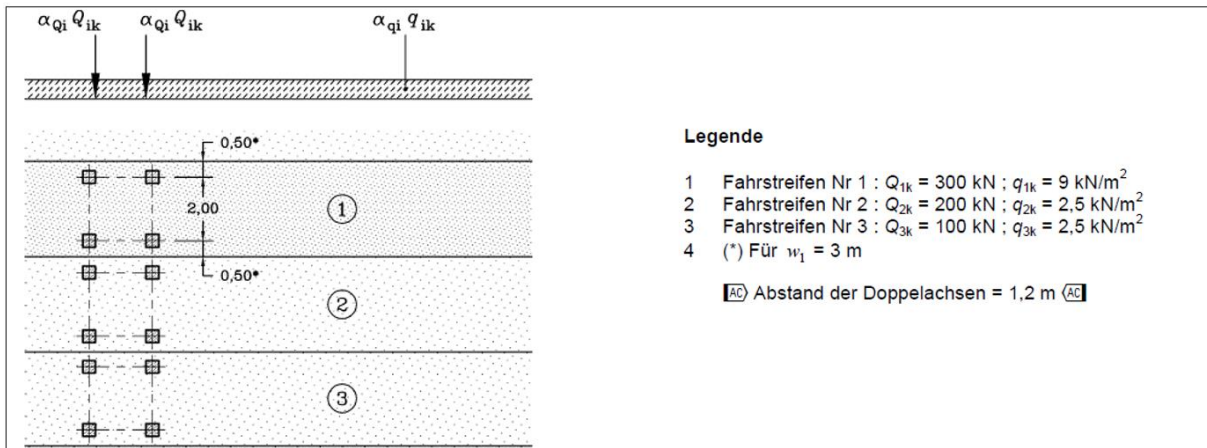


Abbildung 6-4 Grundwerte von Lastmodell 1 nach DIN EN 1991-2:2010-12 (Verkehrsnorm) für Deutschland

Die Berechnung dieser Werte kann mit vorhandenen Tools oder Software (z. B. VEMAGS Statik-Rechenkern) durchgeführt werden. Für die Berechnungen im IT-Prototyp wurden diese Daten mit der Software InfTruck erstellt.

Beispiele für die hinterlegten Bemessungsnormen von Bestandsbauten und Normen für heutige Verkehrslasten sind in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 dargestellt.

### 6.3.6 Gefährdete Bereiche eines Bauwerks

Schäden können an verschiedensten Stellen des Bauwerks festgestellt werden. Teilweise ist die exakte Lage eines Schadens jedoch nicht bekannt. Für eine umfassende Abschätzung des Einflusses eines Schadens auf den Widerstand eines Bauwerks müssen zunächst die gefährdeten Bauwerksbereiche bekannt sein. In Abbildung 6-5 sind die Versagensarten für ein Versagen auf Biegung für einen Einfeld- und einen Mehrfeldträger sowie die sich daraus ergebenden Bereiche hoher, mittlerer und geringer Anfälligkeit dargestellt. Bei Mehrfeldträgern ist je nach Zug- oder Druckbelastung zwischen den Bereichen oben bzw. unten am Querschnitt zu unterscheiden.

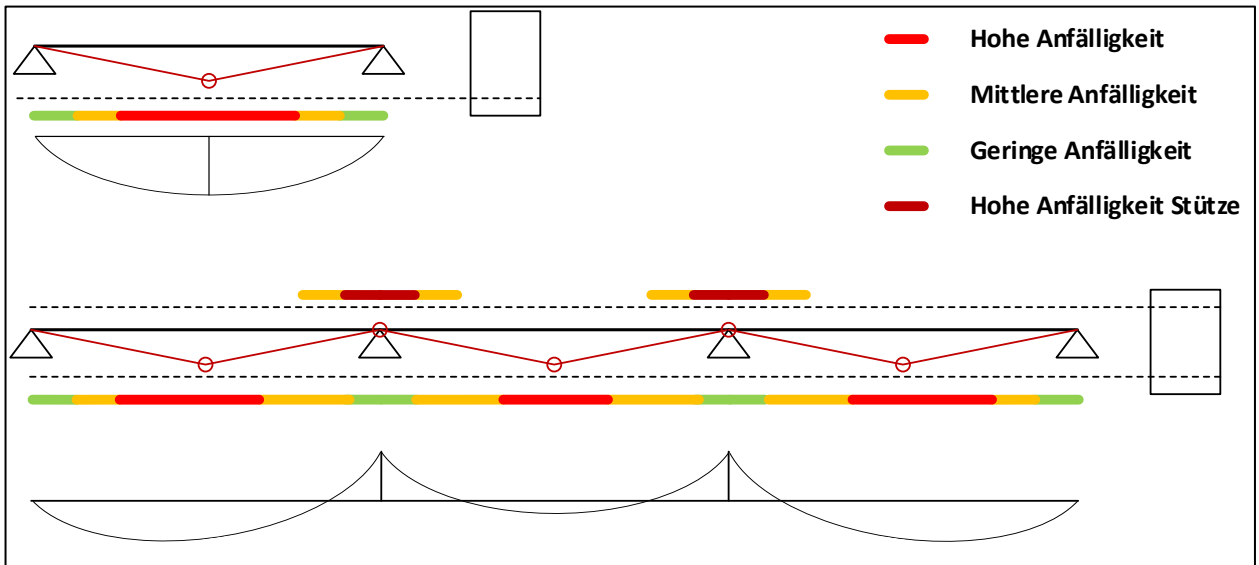


Abbildung 6-5 Versagensarten und sich daraus ergebende gefährdete Bereiche bei Einfeld- und Mehrfeldträgern in Bezug auf Momentenbelastung unter Berücksichtigung der Lage der Schäden im Querschnitt (Hajdin & Fastrich, 2019)

Die Abschätzung der Länge dieser Zonen für einfache statische Systeme und die Auswirkungen auf die Widerstandsverminderung ist in (Hajdin & Fastrich, 2019) ausführlich beschrieben. Innerhalb des IT-Prototyps werden die Längen der gefährdeten Bereiche als vordefinierte Werte angenommen.

### 6.3.7 Probabilistische Parameter

Um die vorhandenen Unsicherheiten in den Berechnungen zu berücksichtigen, werden im Rahmen der Modellierung des Widerstandes und der Einwirkungen (Tabelle 6-2) probabilistische Parameter für die Modellierung des Schadensumfangs und der resultierenden Widerstandsreduktion verwendet (Abbildung 6-6).

Fall	Verteilungsfunktion	Variationskoeffizient	Quantil charakteristischer Wert
Variable Einwirkungen (LM1)	Gumbel-Verteilung	30 %	99.9 %
Ständige Einwirkungen	Lognormalverteilung	10 %	50.0 %
Festigkeits-/ Widerstandsparameter	Lognormalverteilung	15 %	5.0 %

Tabelle 6-2 Beispielhafte Verteilungsfunktionen, Variationskoeffizienten und Quantile für die Einwirkungen und den Widerstand für Brückenbauwerke



### 6.3.8 Berechnung und Ergebnisse

Ausgehend von den Eingabedaten und den benutzerdefinierten Schäden werden im IT-Prototyp folgende Berechnungen durchgeführt:

- Für die eingegebenen Schäden wird eine Prognose für den Schadensfortschritt vorgenommen. Wahlweise geschieht dies über „Gamma-Prozess & Physikalische Modelle“ (Kapitel 3.1) oder über „zeitinhomogene Markov-Kette“ (Kapitel 3.2). Die Werte der Schadensschwere werden zwischen den berechneten Werten interpoliert.
- Die Auswirkungen der Prognosewerte der Schäden auf den Widerstand der Anlage werden über ein Bayes'sches Netz berücksichtigt. Die Schäden beziehen sich auf die Zustandsnote bzw. Zustandsklasse. Deren Werte und Lage in Bezug auf die gefährdeten Bereiche werden vom Benutzer eingegeben.
- Die probabilistischen Berechnungen, deren Endergebnis die Zuverlässigkeitsindizes sind, werden mittels FORM-Methode (First Order Reliability Method) durchgeführt. Dabei wird pro Versagensart (Biegung, Querkraft) und betrachtetem Fall (ULS, SLS) der Zuverlässigkeitsindex berechnet. Die Zuverlässigkeitsindizes werden auf Anlagenebene im Fenster Bewertung über die Zeit geplottet.

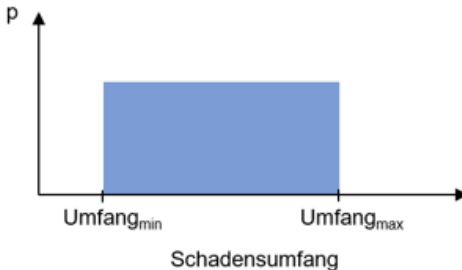
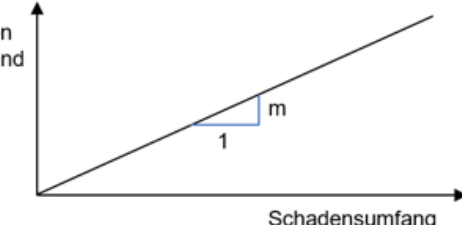
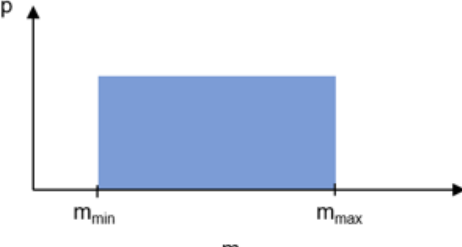
Verwendete Verteilungsfunktionen	Abplatzungen Oberbau																																	
<p>Für die Abschätzung des Schadensumfangs wird eine uniforme Verteilung verwendet.</p>  <p>Es wird angenommen, dass die Reduktion des Widerstands (Mittelwert und Varianz) linear mit dem Schadensumfang zusammenhängt.</p>  <p>Der Steigungsparameter wird wiederum als linearverteilt angenommen.</p> 	<p>Der Schadensumfang von Abplatzungen ist der Prozentsatz der abgeplatzten Länge. Es wird angenommen, dass das Ausmaß uniform zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert ist. Der Schadensumfang ist von der S-Bewertung abhängig.</p> <table border="1" data-bbox="853 548 1476 761"> <thead> <tr> <th>S</th> <th>Umfang<sub>min</sub></th> <th>Umfang<sub>max</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&lt; 2</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.1</td> <td>0.7</td> </tr> </tbody> </table> <p>Es wird angenommen, dass das Ausmaß linear mit der Reduktion des Widerstands zusammenhängt.</p> <p><b>Moment</b></p> <table border="1" data-bbox="853 1064 1476 1198"> <thead> <tr> <th></th> <th>m<sub>min</sub></th> <th>m<sub>max</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Mittelwert</td> <td>0</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>Varianz</td> <td>0</td> <td>0.25</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Querkraft</b></p> <table border="1" data-bbox="853 1276 1476 1400"> <thead> <tr> <th></th> <th>m<sub>min</sub></th> <th>m<sub>max</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Mittelwert</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Varianz</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	S	Umfang <sub>min</sub>	Umfang <sub>max</sub>	< 2	0	0	2	0	0.1	3	0	0.3	4	0.1	0.7		m <sub>min</sub>	m <sub>max</sub>	Mittelwert	0	0.5	Varianz	0	0.25		m <sub>min</sub>	m <sub>max</sub>	Mittelwert	0	0	Varianz	0	0
S	Umfang <sub>min</sub>	Umfang <sub>max</sub>																																
< 2	0	0																																
2	0	0.1																																
3	0	0.3																																
4	0.1	0.7																																
	m <sub>min</sub>	m <sub>max</sub>																																
Mittelwert	0	0.5																																
Varianz	0	0.25																																
	m <sub>min</sub>	m <sub>max</sub>																																
Mittelwert	0	0																																
Varianz	0	0																																

Abbildung 6-6 Modellierung der Änderung des Widerstandes infolge von Schäden (Hajdin & Fastrich, 2019)

## 6.4 Grafisches User Interface

Über das webbasierte grafische User Interface (GUI) gelangt der Nutzer zu einzelnen Ansichtsfenstern innerhalb des IT-Prototyps. Die Web-Applikation startet in der Kartenansicht (Kap. 6.4.1), von wo aus die Bewertung (Kap. 6.4.2) der Beispiel-Bauwerke zugänglich ist.

### 6.4.1 Kartenansicht

Der Anwender startet mit einer Kartendarstellung (Abbildung 6-7) zu den Infrastrukturbauwerken. Dort kann er zunächst das Netz auswählen (Deutschland, Österreich oder

Schweiz). Nach Auswahl des Netzes fokussiert der Kartenausschnitt auf die Beispielbauwerke des jeweiligen Netzes.

In der Übersicht am linken Rand erscheinen dann Beispielbauwerke zur Auswahl. Unter den Bauwerksdaten erhält der Anwender durch Auswahl des jeweiligen Bauwerks die Informationen zu Namen, Bauart, Baujahr, Länge, Breite, Fahrbahnbreite, Baujahr und Norm, sowie ein Foto des Bauwerks.

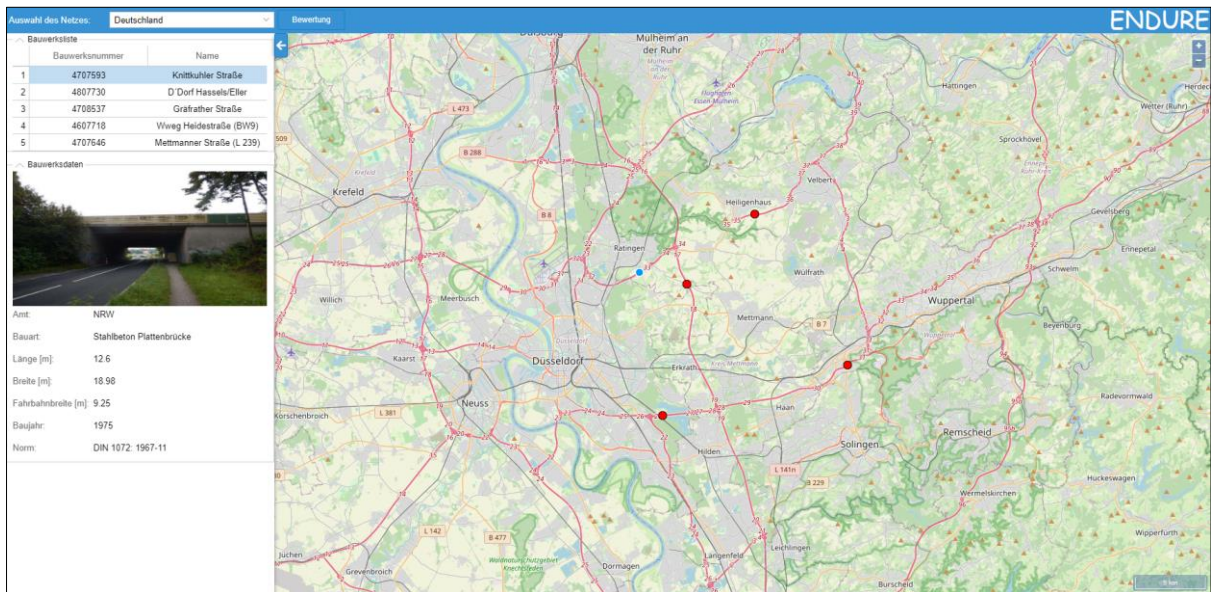


Abbildung 6-7 Übersicht der Infrastrukturbauwerke in der Kartendarstellung

## 6.4.2 Bewertung

Im Menü „Bewertung“ kann für ein einzelnes Bauwerk der Schadensfortschritt und deren Auswirkung auf den Zuverlässigkeitsindex simuliert und visualisiert werden.

Unter „Zustandsprognose“ (Abbildung 6-8) wird die Schadensentwicklung über die Zeit anhand der benutzerdefinierten Modellparameter berechnet und visualisiert.

Unter „Zuverlässigkeitsprognose“ (Abbildung 6-9) können ein oder mehrere Schäden in einer Schadensliste an definierten oder zufälligen Orten eingegeben werden. Die Auswirkung dieser Schäden auf den Zuverlässigkeitsindex wird über die Zeit geplottet.

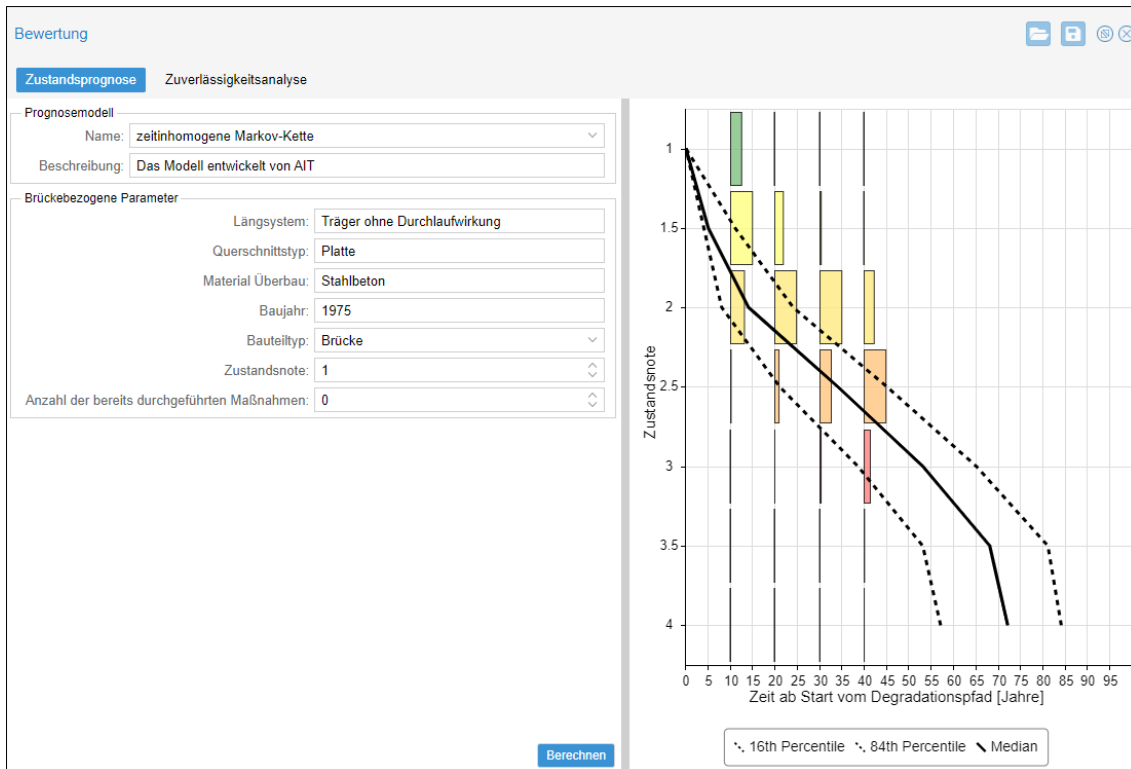


Abbildung 6-8 Zustandsprognose am Beispiel zeitinhomogene Markov-Kette

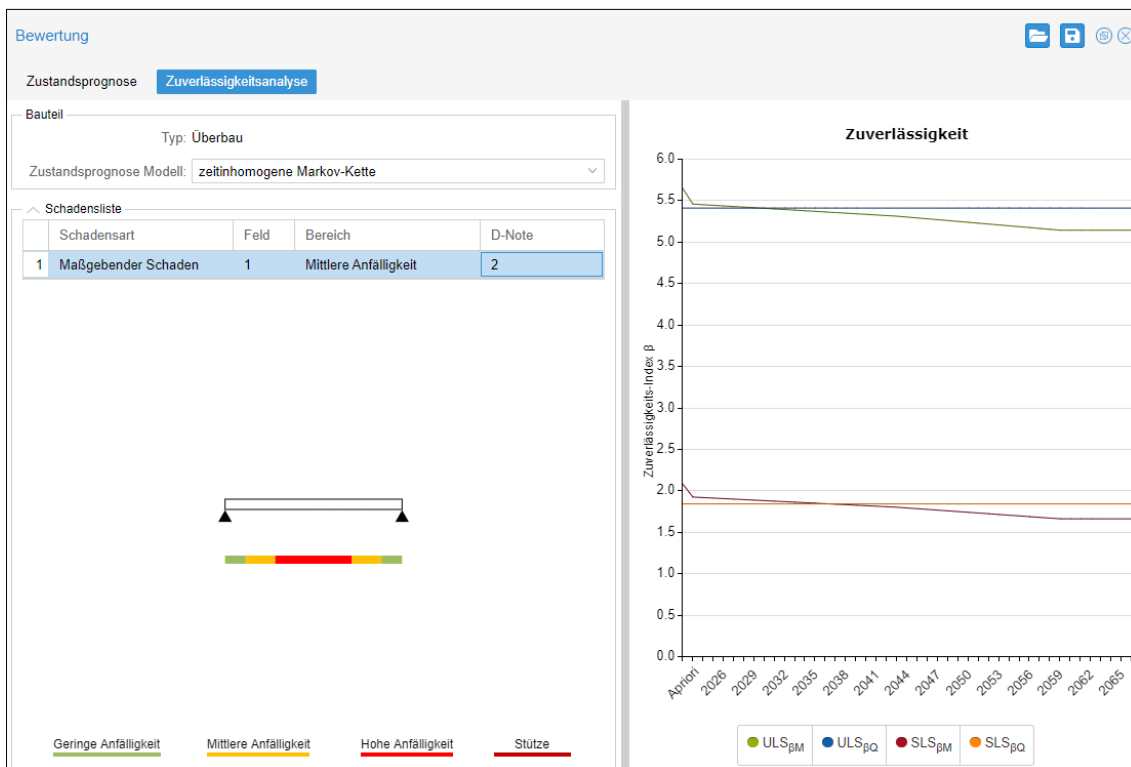


Abbildung 6-9 Zuverlässigkeitsanalyse am Beispiel zeitinhomogene Markov-Kette

Die Schadensliste beinhaltet die Attribute Schadensart, Feld, Bereich, S-Bewertung und V-Bewertung. Unterhalb der tabellarischen Darstellung der Schäden wird dem Anwender eine Skizze zum statischen System inklusive der anfälligen Zonen des Bauwerks angezeigt. Im IT-Prototyp ist das statische System eines Infrastrukturbauwerks als Einfeld- oder Mehrfeldträger dargestellt. Die Länge der gefährdeten Zonen ist vordefiniert:

- Geringe Anfälligkeit (grün) = 20 % Spannweite,
- Geringe Anfälligkeit (gelb) = 30 % Spannweite,
- Höhe Anfälligkeit (rot) = 50 % Spannweite, und
- Stütze (dunkelrot) = 20 % Spannweite (Anwendung für durchgehenden Balken)

Die ausgewiesenen Schäden an einer Anlage wirken sich negativ auf den Zuverlässigkeitsindex dieser Anlage aus. Der Hintergrund für diese Berechnung wird durch Klicken auf den Öffnen-Button angezeigt. (Abbildung 6-10). Darin sind die für die Anwendung des Bayes'schen Netzes verwendeten Eingabedaten und die berechneten Ergebnisse angegeben.

Die Art, die Schwere und der Ort des Schadens (d. h. Feld und Auflager) spielen eine Rolle bei der Bewertung der Versagensmechanismus (Biegung, Querkraft) und der damit verbundenen Versagenswahrscheinlichkeiten für die Grenzzustände (ULS und SLS). Die Auswirkung dieser Schäden auf den Zuverlässigkeitsindex auf der Anlagenebene wird schließlich durch vier Werte angegeben, die den Zuverlässigkeitsindex für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) für die Durchbiegung bzw. Querkraft darstellen (Abbildung 6-11).

## 6.5 Exemplarische Anwendung

Die Funktionsweise des IT-Prototyps wird im Folgenden anhand von einem Anwendungsbeispiel erläutert. Das Beispiel zeigt, wie man für ein Bauwerk mehrere Schäden erfasst und die Auswirkung auf den Zuverlässigkeitsindex über die Zeit simuliert. Für das Beispiel wurden die Bestandsdaten der Bauwerke aus SIB-Bauwerke entnommen und die a-priori Zuverlässigkeit auf der Grundlage eines vereinfachten statischen Modells berechnet. Die Schäden werden durch den Benutzer eingegeben.

Die wesentlichen Arbeitsschritte innerhalb des Prototyps sind:

- Festlegen von Schäden
- Zustandsprognose
- Zuverlässigkeitsanalyse

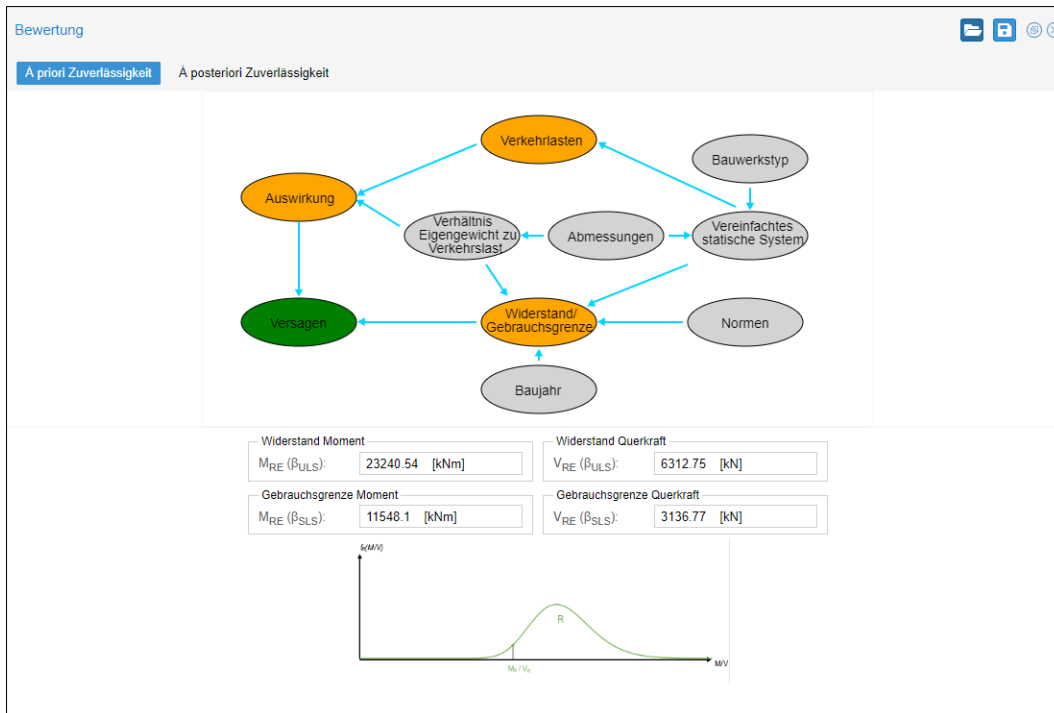


Abbildung 6-10 Bayes'sches Netz zur Berechnung von a priori Zuverlässigkeitsindizes: Widerstand/Gebrauchsgrenze Eingabedaten

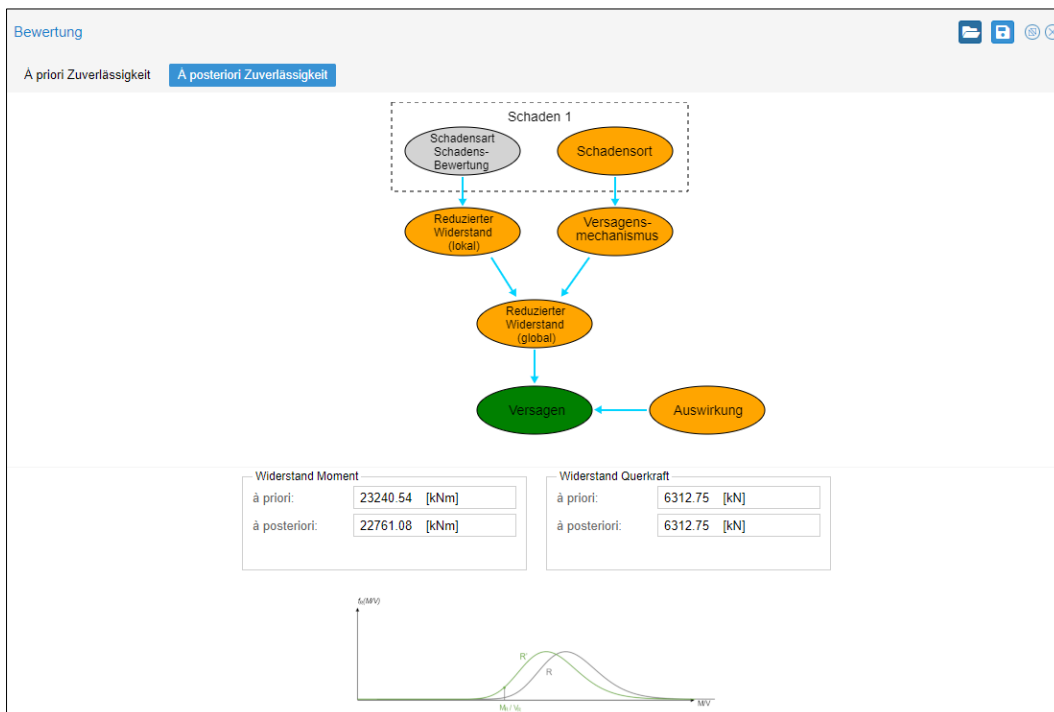


Abbildung 6-11 Widerstandverminderung aufgrund vordefinierter Schäden: Bayes'sches Netz für die Berechnung (oben); resultierender reduzierter Widerstand (unten)



Beim Beispielbauwerk handelt es sich um die Brücke Mettmanner Straße (L 239) mit der Bauwerksnummer 4707646, welche die gleichnamige Straße über die A3 führt. Die Bauwerksdaten des Bauwerks werden dem Anwender in der linken Seite des Ansichtsfensters angezeigt (Abbildung 6-12).

Mit Klick auf „Bewertung“ öffnet sich ein Fenster mit den zwei Kategorie-Reitern „Zustandsprognose“ und „Zuverlässigkeitsanalyse“.

Unter „Zustandsprognose“ wird die Arbeitsweise der hinterlegten Modelle für die Prognose des Schadensfortschritts veranschaulicht. Das Beispiel in Abbildung 6-13 zeigt die Degradation für das ausgewählte Prognosemodell „zeitinhomogene Markov-Kette“. Dabei werden die brückenbezogenen Parameter, welche das Modell benötigt, anhand von Daten aus SIB-Bauwerke vorausgefüllt. Mit einem Klick auf das Speichern-Symbol wird der Degradationspfad berechnet und unter Berücksichtigung der statistischen Unsicherheiten geplottet.

Unter „Zuverlässigkeitsanalyse“ können anschließend Schäden angenommen und deren Auswirkung auf den Zuverlässigkeitsindex über die Zeit simuliert werden. Abbildung 6-14 zeigt die Simulation der Zuverlässigkeit über die Zeit mit dem Prognosemodell „Gamma-Prozess & Physikalische Modelle“ unter der Annahme, dass sich in Feld 1 Querrisse im Bereich hoher Anfälligkeit befinden, die mit Zustandsnote 1 bewertet wurden. Diese haben eine Auswirkung auf das Moment. Ein Klick auf den Speichern-Button startet die Simulation.

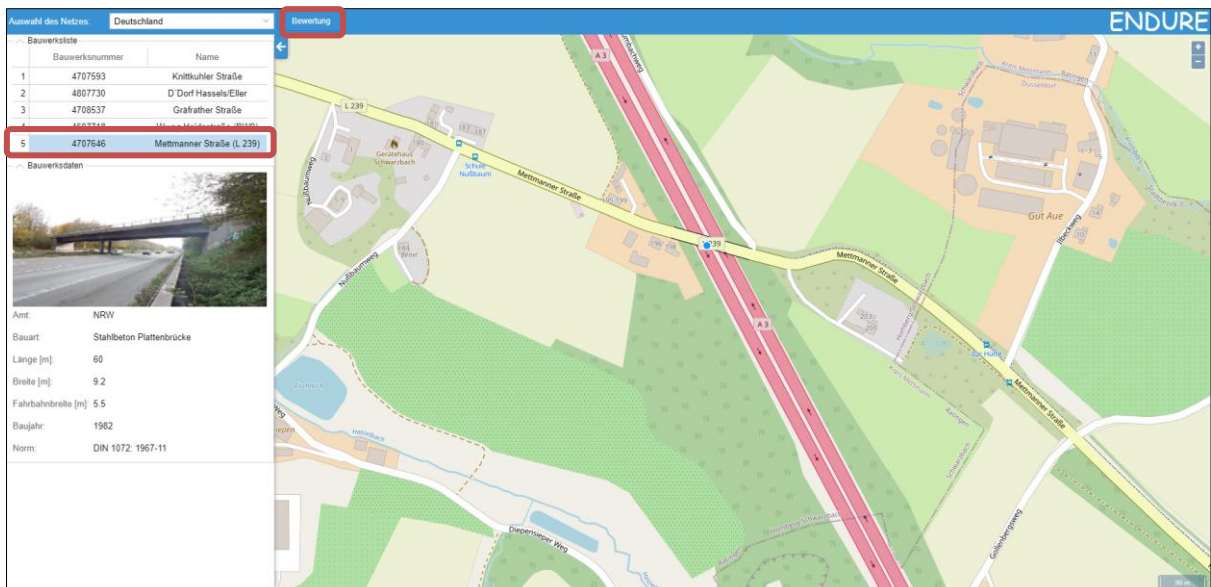


Abbildung 6-12 Startfenster mit ausgewähltem Bauwerk

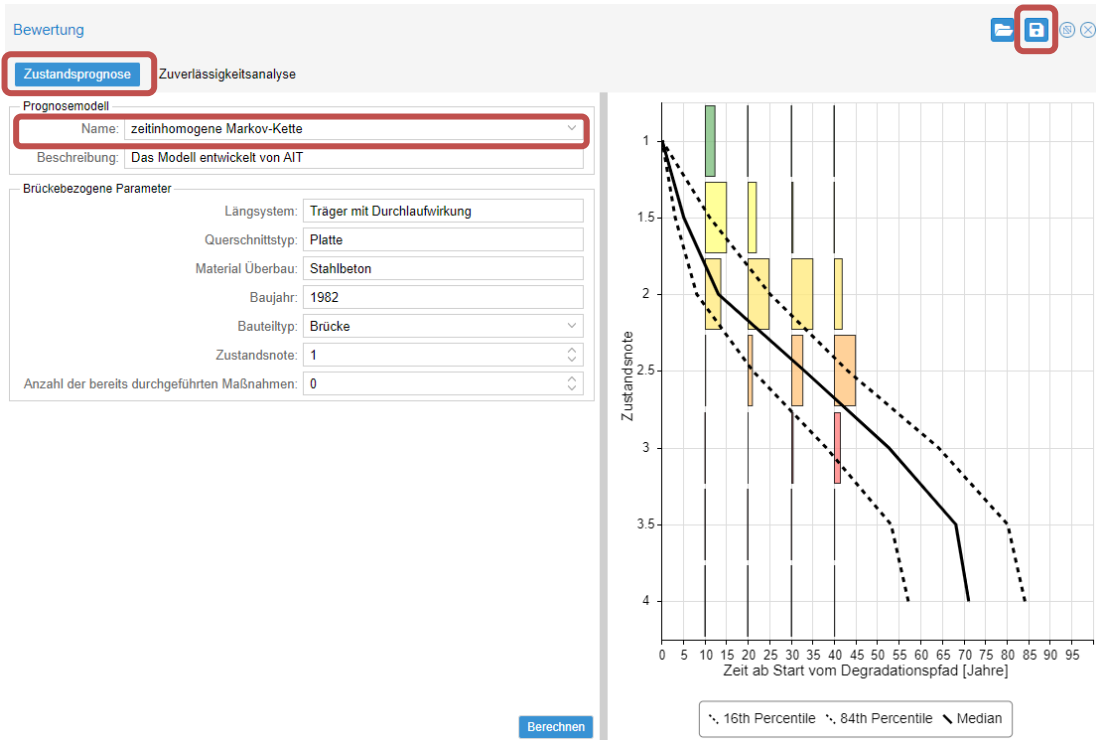


Abbildung 6-13 Zustandsprognose am Beispiel des Prognosemodells „zeitinhomogene Markov-Kette“

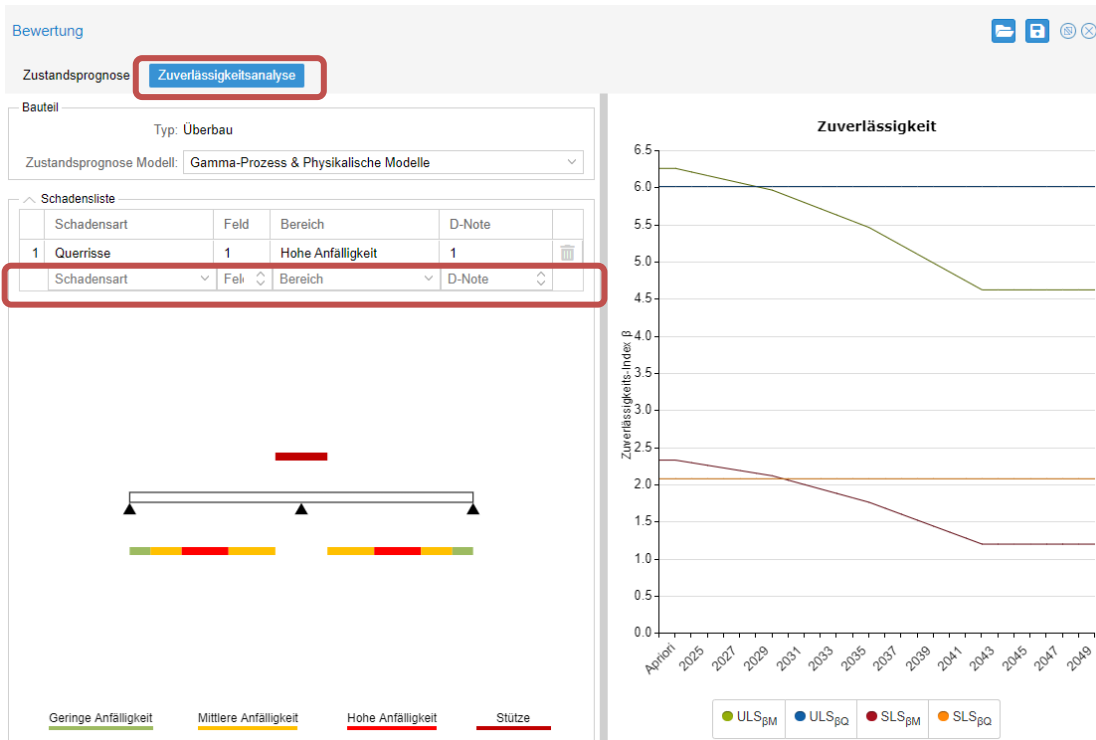


Abbildung 6-14 Auswirkungen von Querrissen auf die Zuverlässigkeit über die Zeit

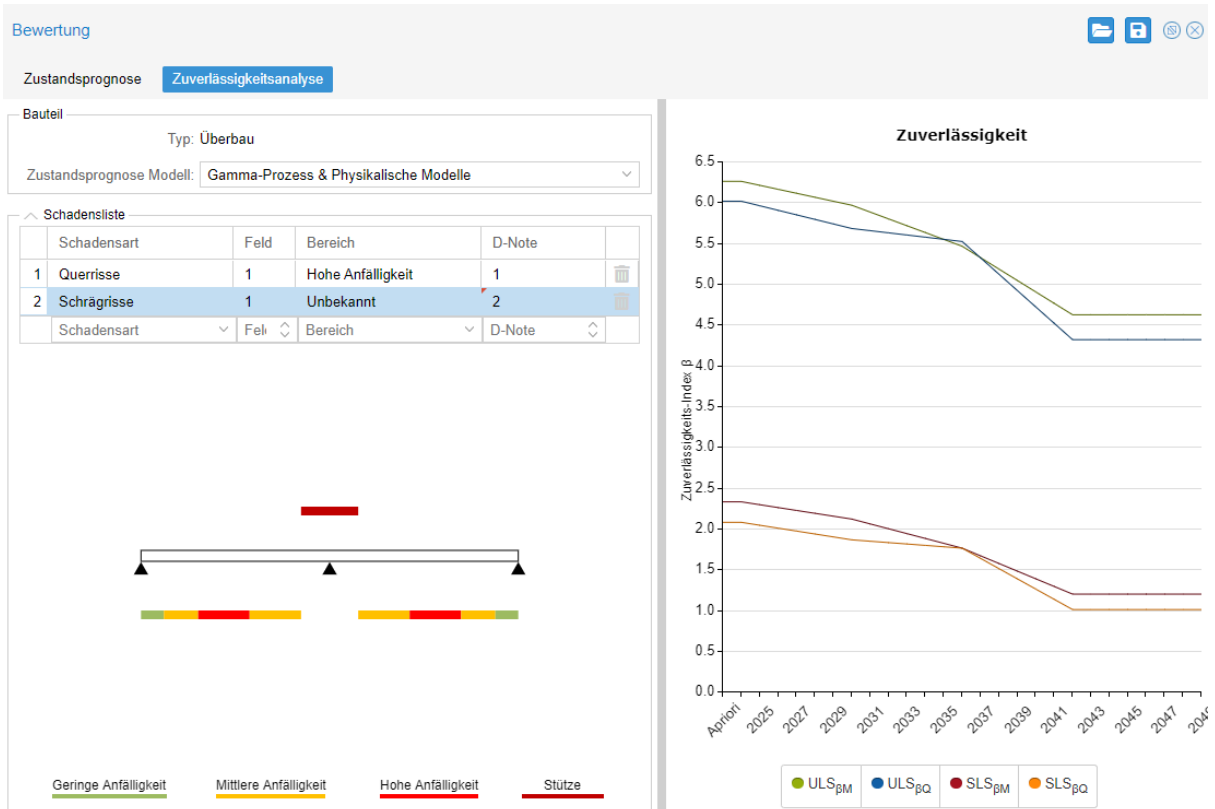


Abbildung 6-15 Auswirkung von einem weiteren Schaden auf die Zuverlässigkeit über die Zeit  
Wenn als zusätzlicher Schaden Schrägrisse angenommen werden (Abbildung 6-15), in diesem Beispiel bewertet mit Zustandsnote 2 und an einem nicht weiter spezifizierten Ort, gibt es zusätzlich Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit in Bezug auf ein Querkraftversagen.

## 6.6 Kapitelzusammenfassung

Um die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Methodik zu überprüfen erfolgte in diesem Kapitel die prototypische Umsetzung im Rahmen einer Webanwendung. Zunächst galt es die grundlegenden Funktionen innerhalb des IT-Prototyps zu konzipieren sowie die für die Anwendung benötigte Datengrundlage aufzubereiten. Dazu wurde erörtert, welche Eingangsdaten zur Anwendung des IT-Prototyps benötigt werden und in welcher Form diese aufzubereiten sind. Weiterhin wurde aufgezeigt, welche theoretischen Annahmen und Berechnungsschritte für die Ermittlung Zuverlässigkeit über die Zeit angewendet werden.

## 7 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

### 7.1 Zusammenfassung

Es werden Degradationsmodelle entwickelt, die auf den Zustandsdaten auf Schadensebene aus SIB-BW und auf Bauteilebene aus KUBA-DB basieren. Die Degradationsmodelle beruhen auf einer Clusteranalyse auf der Grundlage des k-means-Algorithmus und der Anwendung des Gamma-Prozesses. Die Zustandsdaten bestehen insbesondere aus der Sequenz der Verweildauer in Schadensakkumulationsindex 1 und Schadensakkumulationsindex 2, ausgedrückt in Jahren. Es werden nur solche Schäden oder Bauteile berücksichtigt, die bereits eine Verschlechterung von Schadensakkumulationsindex 0 auf 2 über 1 gezeigt haben. Die Neuheit dieser Degradationsmodelle besteht darin, dass die Zustandsdaten direkt geclustert werden und ein kontinuierlicher zeit- und zustandsabhängiger stochastischer Prozess verwendet wird, um ein Degradationsmodell für jeden identifizierten Cluster zu entwickeln. Darüber hinaus wird ein Ansatz zur Integration solcher Zustandsdaten mit physikalischen Modellen für die Korrosionsentwicklung durch die Integration von zwei physikalischen Modellen (Korrosionsinitiierung und Korrosionsausbreitung) in die Zustandsdaten entwickelt.

Um die Ergebnisse der Clusteranalyse zu interpretieren, werden zusätzliche Analysen durchgeführt, die auf dem Random-Forest-Algorithmus und XAI-Technik, der SHAP-Analyse, basieren. Die Analyse, bei der auch Bestandsdaten berücksichtigt werden, ermöglicht es, die Zusammensetzung der Cluster zu verstehen und zu visualisieren.

Zur Prognose der Entwicklung von Zustandsnoten auf Objekt- und Bauteilebene wurden viele Prognosemodelle auf Basis der zeitinhomogenen Markov-Ketten erstellt. Zur Auswahl des zu verwendenden Prognosemodells wurden entsprechende Tools entwickelt, die basierend auf den Merkmalen des Bauwerks/Bauteils, sowie auch der Streuung der potenziell zutreffenden Modelle ein Modell selektieren. Hier hat sich gezeigt, dass die Verwendung von nur kategorischen Merkmalen nicht ausreichend ist, um Prognosen mit einer akzeptablen Streuung zu erstellen. Erst das Berücksichtigen von numerischen Merkmalen (Baujahr, Spannweite, usw.) führt in Kombination mit den antrainierten Random-Forest Klassifikatoren zu Prognosen, dessen Streuung deutlich geringer ist. Die herangezogenen numerischen Merkmale variieren zwischen den Ländern und den automatisiert erstellten Klassifikatoren. In Deutschland war die Anzahl der verfügbaren numerischen Merkmale am größten, und am häufigsten wurden hier (neben den kategorischen Merkmalen) die numerischen Merkmale Baujahr, größte Spannweite, Brückenbreite und größte Pfeilerhöhe in der Prognose

verwendet. In Österreich standen nur vier numerische Merkmale zur Verfügung und daher wurden sie in den meisten Fällen alle verwendet; am öftesten jedoch das Baujahr, die Meereshöhe und die größte Spannweite. Der Einfluss der Meereshöhe wird durch einen indirekten Zusammenhang erklärt, und zwar durch die Menge des jährlich gestreuten Salzes / der Salzsole. Ein Zusammenhang zwischen der Zustandsnotentwicklung und der Verkehrsstärke wurde gesucht, konnte aber nicht festgestellt werden. In der Schweiz standen neben den kategorischen Merkmalen nur zwei numerische Merkmale: das Baujahr und die Meereshöhe zur Verfügung. Das führte zu einer schlechteren Performance der Klassifikatoren, die für die Prognosemodellauswahl zuständig sind. Dadurch kommt es nicht nur zu größeren Prognosestreuungen, sondern vermehrt auch zu Prognosen mit systematischen Abweichungen. Die Performance der Klassifikatoren ist an der „confusion matrix“ erkennbar und es empfiehlt sich, diese bei der Anwendung der Modelle zu beachten.

Die Anwendung der zeitinhomogenen Markov-Ketten für die Prognose der diskreten Zustände erzielte sehr zufriedenstellende Ergebnisse angesichts der unvollständigen Beobachtungen der Notenenwicklungen. Der Mangel an Beobachtungen in schlechteren Zuständen wurde dabei teilweise durch geeignete Annahmen kompensiert.

Diejenigen Prognosemodelle, die sich als vielversprechend erwiesen haben, wurden in einem IT-Prototypen implementiert, um zu zeigen, welche Auswertungen mit den zurzeit verfügbaren Daten in den Managementsystemen möglich sind.

## 7.2 Schlussfolgerungen

Die Anwendung des Random-Forest-Algorithmus und der SHAP-Analyse auf die Ergebnisse der Clusteranalyse auf Schadensebene für SIB-BW und auf Bauteilebene für KUBA-DB verdeutlicht die Zusammensetzung der identifizierten Cluster. Der Cluster "anfällig" bezieht sich auf neu gebaute Brücken, während der Cluster "robust" auf alte, in der Vergangenheit gebaute Brücken zurückzuführen ist. Daher kann festgestellt werden, dass solche Analysen eine Stichprobeverzerrung aufzeigen, die im Wesentlichen eine Überlebensverzerrung ist: Anfällige Brücken, die in der Vergangenheit gebaut wurden, wurden bereits vor der Entwicklung des Brückenmanagementsystems ersetzt oder repariert, weshalb ihr Zustand nicht in der Datenbank dokumentiert wurde. Gleichzeitig wurde die Entwicklung des Zustands robuster Brücken, die erst kürzlich gebaut wurden, noch nicht beobachtet. Die Anwendung des Random-Forest-Algorithmus und der SHAP-Analyse ermöglicht es, die Verzerrungen zu identifizieren und „verzerrungsresistente“ Degradationsmodelle zu entwickeln.

Verzerrungsresistent bedeutet hier, dass die Zusammensetzung des Clusters oder, anders ausgedrückt, der Population, auf die sich das Degradationsmodell bezieht, bekannt ist. In diesem Sinne ist das entwickelte Degradationsmodell „bias-aware“ oder auf Deutsch „verzerrungsresistent“.

Die Analyse der Zustandsnotenentwicklung auf Objekt- und Bauteilebene hat gezeigt, dass sich neben den kategorischen Merkmalen wie Baumaterial und statisches System insbesondere das Baujahr, die Meereshöhe und die größte Spannweite als maßgeblich für die Zustandsentwicklung erwiesen haben. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Verfügbarkeit von einer größeren Anzahl der Merkmale (z. B. Pfeilerhöhen, Brückenbreite, Druckfestigkeit) es möglich macht, die Streuungen und systematische Abweichungen zu verringern. Die Vorprozessierung der Zustandsnoten bei der Ermittlung von Degradationspfaden hat sich angesichts der großteils fehlenden Daten zu Baumaßnahmen als entscheidend erwiesen. Annahmen zu fehlenden Daten beeinflussen die Prognose: standardmäßig wurde angenommen, dass es ausgeschlossen ist, dass eine Baumaßnahme innerhalb von 10 Jahren nach der Brückenerrichtung nötig ist. Wenn dieser Zeitraum auf 25 Jahre ausgedehnt wird, führt das zu Prognosen, die das Erreichen einzelner Zustandsstufen im Durchschnitt um ca. 5 Jahre später voraussagen.

Die Anwendbarkeit ausgewählter Prognosemodelle mit den verfügbaren Daten in den Managementsystemen konnte mithilfe eines IT-Prototypen gezeigt werden.

### 7.3 Empfehlungen und Ausblick

Diese Forschung hat das Vorhandensein einer Überlebensverzerrung aufgezeigt. Das Vorhandensein dieser Verzerrung ist darauf zurückzuführen, dass Brückenmanagementsysteme erst in den letzten 30-40 Jahren entwickelt wurden, während viele Brücken, die heute noch in Betrieb sind, älter sind. In der Vergangenheit wurden jedoch keine Forschungen zur Abschätzung der Lebensdauer und zur Entwicklung von Degradationsmodellen für Brücken durchgeführt, die diese Verzerrung berücksichtigt hätten. Die Vernachlässigung einer Überlebensverzerrung kann zu einer zu optimistischen Lebensdauerschätzung führen, daher ist es von größter Bedeutung, Degradationsmodelle zu entwickeln, die „verzerrungsresistent“ sind. Durch die Entwicklung eines hybriden KI-Systems, das auf XAI basiert, zeigt diese Forschung das Vorhandensein des Bias auf und stellt daher einen ersten Schritt in diese Richtung dar. Wir empfehlen weitere Untersuchungen, um die Verzerrungen zu quantifizieren



und die Anwendbarkeit der entwickelten Degradationsmodelle zur Vorhersage der Lebensdauer von neu gebauten Brücken zu überprüfen.

Im Analyseprozess wurde deutlich, wie fehlende Daten die Prognose erschweren, bzw. wie vollständige und vielseitige Daten die Prognose erleichtern können. Eine Vielzahl der erfassten Merkmale von Bauwerken/Bauteilen (z. B. Pfeilerhöhe, Druckfestigkeit, Meereshöhe, usw.) erleichtert die Prognoseaufgabe maßgeblich. Die Erfassung von Schäden sowie auch Bau-maßnahmen in einer Form, die leicht maschinenlesbar ist (z.B. durch deren Kategorisierung) könnte in Zukunft zur weiteren Verbesserung der Prognosemodelle wesentlich beitragen. Dabei ist wichtig, dass die Dokumentation konsequent geführt wird, damit die Verwendung dieser Daten in der Prognose möglich gemacht wird.

Die erstellten Prognosealgorithmen zeigen nichtsdestotrotz schon jetzt, dass sie anwendbar sind und ein hohes Potential für das Erhaltungsmanagement bieten. Es kann empfohlen werden, die Prognosemodelle an der Schadensebene an Einzeltragwerken mit bekannten Schäden anzuwenden, während die Prognosemodelle auf Bauteil- und Objektebene eher bei netzweiten Betrachtungen zu verwenden sind, z.B. um den langfristigen Erhaltungsaufwand für das Gesamtnetz zu planen. Zur Überführung der Forschungsergebnisse in die Praxis sind noch weitere Entwicklungsschritte nötig, wie z. B. das kontinuierliche Einbeziehen von neuen Bauwerksprüfdaten zur Anpassung der Prognosen. Weiterhin besteht auch noch Potenzial in der Weiterentwicklung der Prognosemodelle, mit dem Ziel ihre Streuung zu reduzieren und die Genauigkeit weiter zu verbessern, wodurch ihr Nutzen noch mehr steigen würde.

Die Arbeit an den Prognosemodellen hat erneut aufgezeigt, dass die Zustandsdaten in den Managementsystemen der Infrastrukturbetreiber eine wertvolle Grundlage zur Entscheidungsfindung darstellen. Nach wie vor beinhaltet die Interpretation dieser Daten Herausforderungen, da sich Sprünge in den Zustandsnoten oft nur mit Annahmen plausibilisieren lassen. Eine konsequente Erfassung von Erhaltungsmaßnahmen, die Erfassung des Zustands vor dem Abbruch und Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Zustandsnoten würde die Prognosegüte stark verbessern.

## 8 LITERATURVERZEICHNIS

- Aggarwal, C. C., & Reddy, C. K. (2014). *Data Clustering, Algorithms and Applications*. Taylor Francis Group.
- Ang, A. H.-S., & Tang, W. H. (1975). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, risk and reliability*. Wiley.
- ASTRA. (2005). *Richtlinie Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen*. Bern: Bundesamt für Strassen.
- ASTRA. (2014). *Management von Naturgefahren auf den Nationalstrassen*. Schweiz: Bundesamt für Strassen.
- ASTRA. (2016). *KUBA 5 Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel – Leitfaden für Inspektoren*. Bern: Bundesamt für Strassen.
- ASTRA. (2016). *Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten, Forschungspaket AGB1, 11 Berichte, 2009-2010*. Schweiz: Bundesamt für Strassen.
- ASTRA. (2021). *IT-DOKUMENTATION KUBA 5.1, Leitfaden für Inspektoren von Kunstbauten*.
- BAW. (2023). *BAW Merkblatt, Schadensbewertung an Verkehrswasserbauwerken der Inspektionskategorie A (MSV-A)*. Karlsruhe.
- Bea, F., & Haas, J. (2009). *Strategisches Management* (5. Auflage Ausg.). Stuttgart: Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft mbH.
- BMVI. (2017). *Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING)*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- BMVI. (2017). *Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING)*.
- BMVI. (2017). *Richtlinien zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 – RI-EBW-PRÜF*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- BMVI. (2018). *Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten (ASB-ING)*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- BMVI. (2020). *Richtlinien für die strategische Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken (RPE-ING)*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- Borrmann, Fischer, Dori, & Wild. (2014). *Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse* (Bd. Heft B 104). Bergisch Gladbach: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 5-32.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, S. 5-32.
- British Waterways Direction. (2008). *Asset Inspection Procedures (AIP 2008)*. UK.
- CAN/CSA-Q850-97 Risk Management. (2002). *Guideline for Decision-Makers, Canadian Standards Association 1997 (reaffirmed 2002)*. Canada.

- Cesare, M. A., Santamarina, C., Turkstra, C., & Vanmarcke, E. H. (1992). Modeling bridge deterioration with Markov chains. *Journal of Transportation Engineering*, 118, 820-833.
- Choe, D., Gardoni, P., Rosowsky, D., & Haukaas, T. (2009). Seismic fragility estimates for reinforced concrete bridges subject to corrosion. *Structural Safety* 31, S. 275–283.
- Clubley, S. K., Manes, C., & Richards, D. J. (2015). High resolution sonars set to revolutionise bridge scour inspections. *Proc. Inst. Civ. Eng. Civil Engineering*, 168, 35–42.
- Colesanti, C., & Wasowski, J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Eng Geol*, 88(3–4), 173–199.
- DURACRETE. (2000). *General guidelines for durability design and redesign: DuraCrete, probabilistic performance based durability design of concrete structures*. Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R15, February 2000.
- fib. (2010). *Fib Model code 2010 (Vol. 1)*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete.
- Fischer, J., Straub, D., Schneider, R., Thöns, S., & Rücker, W. (2014). Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen. *Brücken- und Ingenieurbau*, B 99.
- Florida DOT. (2013). *Development of the Risk Models for Florida's Bridge management system*. USA.
- Frey, B. J., & Dueck, D. (2007). Clustering by Passing Messages Between Data Points. *Science* vol.315, 972-976.
- FSV. (2021). *RVS 13.03.11: Qualitätssicherung bauliche Erhaltung Überwachung, Kontrolle und Prüfung*. Wien: Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr.
- Gehlen, C., Mayer, T., & Schießl, P. (2008). *Von Bausteinen eines nachhaltigen Lebenszyklusmanagements für Ingenieurbauwerke. Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen zerstörungsfreier Prüfungen und zukunftsaufgaben*. Berlin.
- Guida, M., & Pulcini, M. (2013). The inverse Gamma process: A family of continuous stochastic models for describing state-dependent deterioration phenomena. *Reliability Engineering and System Safety* 120, S. 72-79.
- Haardt, P. (1999). *Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurtragwerken. Berichte der BAST, Heft B22*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Hajdin, R. (2016). *Machbarkeitsstudie zu risikobasierten, objektbezogenen Ansätzen der Erhaltungsplanung von Brücken und Wasserbauwerken*. Karlsruhe: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau.
- Hajdin, R., & Fastrich, A. (2019). *Zuverlässigkeitsbasierte Bauwerksprüfung – Feinkonzept, Schlussbericht zu FE 89.0333/2017, unveröffentlicht*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Hajdin, R., & Schiffmann, F. (2019). infFaros – Road Infrastructure Management Systems for Research and Practice. *IABSE Symposium, Guimaraes, Portugal*.
- Heinen, E. (1966). *Das Zielsystem der Unternehmung: Grundlagen betriebswirtschaftlicher Entscheidungen*. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler.

- Herrmann, C. (2010). *Ganzheitliches Life Cycle Management; Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen*. Springer Verlag.
- Holland, G. (2014). *Asset Management in the Waterways, Canal & River Trust (formerly British Waterways), Presentation*.
- Holst, R. (2018). Bauwerksprüfung im Verkehrssektor außerhalb der Straße – Entwicklungen und Chancen. *Erfahrungsaustausch des Bauwerksprüfpersonals, Koblenz*.
- Hu, C. F. (2022). Gamma Process-Based Degradation Modeling and Residual Life Prediction. Singapore: Springer Singapore.
- Iannacone, L., Giordano, P. F., Gardoni, P., & Limongelli, M. P. (2022). Quantifying the value of information from inspecting and monitoring engineering systems subject to gradual and shock deterioration. *Structural Health Monitoring, Vol. 21(1)*, 72–89.
- Isailović, D., Petronijević, M., & Hajdin, R. (2019). The future of BIM and Bridge Management Systems. *IABSE Symposium*. Guimaraes, Portugal.
- ITRC WS2. (2012). *A Method Statement for Infrastructure Network Risk Analysis*. UK: UK Infrastructure Transitions Research Consortium.
- JCSS Joint Committee on Structural Safety. (2008). *Risk Assessment in Engineering - Principles, System Representation & Risk Criteria*. Switzerland.
- Kale, A., Kassa, Y., Ricks, B., & Gandhi, R. (2023). A Comparative Assessment of Bridge Deck Wearing Surfaces: Performance, Deterioration, and Maintenance. *Applied Sciences*.
- Keeney, R., & Raiffa, H. (1976). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*. New York, Santa Barbara, London, Sydney, Toronto: John Wiley & Sons.
- Kong, X., Li, Z., Zhang, Y., & Das, S. (2022). Bridge Deck Deterioration: Reasons and Patterns. *Transportation Research Record, S. 570-584*.
- Krieger, J. (2020). Risiko- und Resilienzmanagement im Kontext von Asset Management. *Straße und Autobahn, Heft 7, Kirschbaum Verlag, Bonn*, 582-590.
- Krieger, J., & Gehrlicher, K. (2000). Die Entwicklung der Erhaltungsausgaben für die Brücken der Bundesfernstraßen. *Bautechnik, 77(11)*.
- Kruschke, J. (2015). *Doing Bayesian Data Analysis, A Tutorial with R, Jags, and Stan*. Elsevier Inc.
- Kušar, M., Galvão, N., & Sein, S. (2019). *Regular bridge inspection data improvement using non-destructive testing, In Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision*. (Caspelle, Taerwe, & Frangopol, Hrsg.) London: Taylor & Francis Group.
- Lehardt, A., Seiler, D., Gerdes, A., Bombeck, A., & Lennerts, K. (2020). *Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorengestützten Systems* (Bd. Heft B 159). Bergisch Gladbach: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Li, Q. a. (2022). Ensemble-Learning-Based Prediction of Steel Bridge Deck Defect Condition. *Applied Sciences*.

- Li, Q., & Song, Z. (2022). Ensemble-Learning-Based Prediction of Steel Bridge Deck Defect Condition. *Applied Sciences*.
- Liu, L., Wangd, R., & Wua, J. (2019). A time-inhomogeneous Markov chain and its distributed solution for message dissemination in OUSNs. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 179–192.
- LoBEG. (2011). *Good Practice Guide: Phase I – Maintenance Prioritisation for Highway Structures, Version 4.0*. UK: LoBEG (London Bridges Engineering Group).
- Lüking, J., Schneider, A., Hafen, M., & Albrecht, J. (2014). *Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen*. Schweiz: Bundesamt für Strassen.
- Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*.
- Marsili, F., Mendler, A., Landi, F., & Kessler, S. (2023). Minimum detectable changes based on linear Bayesian filters. *Mechanical Systems and Signal Processing*(202 ), 110656.
- Mašović, S., & Hajdin, R. (2014). Modelling of bridge elements deterioration for Serbian bridge inventory. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(8), 976-987. doi:10.1080/15732479.2013.774426
- Mehrabi, N., Morstatter, F., Saxena, N., Lerman, K., & Galstyan, A. (2021). A Survey on Bias and Fairness in Machine Learning. *Association for Computing Machinery*.
- Mia, M. M., & Kameshwar, S. (2023). Machine learning approach for predicting bridge components' condition ratings. *Front. Built Environ*.
- Milillo, P., Giardina, G., Perissin, D., Milillo, G., Coletta, A., & Terranova, C. (2019). Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge. *Remote Sensing*, 11, 1403.
- Mosqueira-Rey, E. a.-P.-R.-B.-L. (2023). Human-in-the-loop machine learning: a state of the art. *Artificial Intelligence Review*, S. 3005-3054.
- Oshiro, T. M., Perez, P. S., & Baranauskas, J. A. (2012). How Many Trees in a Random Forest? *8th International Conference on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition*.
- Pelzeter, A. (2017). *Lebenszyklus-Management von Immobilien: Ressourcen- und Umweltschonung in Gebäudekonzeption und -betrieb* (1. Auflage. ed Ausg.). Berlin Wien Zürich: Beuth Praxis. Beuth Verlag GmbH.
- Phares, B. M., Washer, G. A., Rolander, D. D., Graybeal, B. A., & Moore, M. (2004). Routine highway bridge inspection condition documentation accuracy and reliability. *Journal of Bridge Engineering*(9(4)), 403–13.
- PIEVC. (2011). *Engineering Protocol for Infrastructure Vulnerability Assessment and Adaptation to a Changing Climate*. Canada: Canadian Council of Professional Engineers.
- Prammer, D., Vorwagner, A., & Weninger-Vycudil, A. (2021). Entwicklung von Bauwerksalterungskurven zur Zustandsprognose von Brücken unter Anwendung von Machine Learning-Verfahren. 1. *Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur Fachtagung über Planung, Bau, Betrieb von Brücken, Tunneln, Straßen*.



- Rajkumar, M. a. (2023). Bridge Infrastructure Management System: Autoencoder Approach for Predicting Bridge Condition Ratings. *Journal of Infrastructure Systems*, S. 04022042.
- Rashidi Nasab, A. a. (2023). Optimizing Machine Learning Algorithms for Improving Prediction of Bridge Deck Deterioration: A Case Study of Ohio Bridges. *Buildings*.
- Rodriguez, J., Ortega, L. M., & Gardá, A. M. (1994). Assessment of structural elements with corroded reinforcement. In *Proceedings of international conference corrosion and corrosion protection of steel in concrete*, (S. 172–185). University of Sheffield.
- Rosic, B., Kucerova, A., Sykora, J., Pajonk, O., Litvinenko, A., & Matthies, H. g. (2013). Parameter identification in a probabilistic setting. *Engineering Structures*, 50, 179-196.
- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 53-65.
- Saydam, D., Bocchini, P., & Frangopol, D. M. (2013). Time-dependent risk associated with deterioration of highway bridge networks. *Engineering Structures*, 221-233.
- Schnellenbach-Held, M., Peeters, M., & Miedzinski, G. (2015). Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton. *Brücken- und Ingenieurbau*(Heft B 110).
- Schulenburg, N., & Hülsmann, P. D. (2008). *Entstehung von Unternehmenskrisen: Eine evolutionstheoretische Erklärung*. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- SIA. (1997). *SIA 469 / SN 588 469: Erhaltung von Bauwerken*. Zürich: Schweizerische Ingenieur- und Architektenverband.
- Srikanth, I., & Arockiasamy, M. (7, 2020). Deterioration models for prediction of remaining useful life of timber and concrete bridges: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, pp. 152-173.
- State Emergency Management Committee. (2014). *Western Australian Emergency Risk Management Guide*. Australia.
- Stöckner, M., Hajdin, R., König, M., Gavin, K., Zwernemann, P., Liu, L., . . . Schiffmann, F. (2022). *Report outlining current assessment techniques and identifying opportunities how to incorporate new data streams in condition assessment. CEDR-Project AMSfree*.
- Straub, D. (2014). Value of information analysis with structural reliability methods. *Structural Safety* 49, 75–85.
- Stuppak, E., & Maurer, R. (2018). Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Bügel- und Torsionslängsbewehrung bei kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion. *3. Brückenkolloquium. Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken, 19. und 20. Juni 2018. Tagungshandbuch 2018*.
- Tahershamsi, M. F. (2016). Investigating correlations between crack width, corrosion level and anchorage capacity. *Structure and Infrastructure Engineering*, S. 1294-1307.
- Transit New Zealand. (2004). *Risk Management Process Manual*. New Zealand.



- TRB. (2014). *Proposed Guideline for Reliability-Based Bridge Inspection Practices*. USA: NCHRP Report 782.
- US Army Corps of Engineers. (2014). *Safety of dams - policy and procedures*.
- van Bekkum, M. a.-V. (2021). Modular design patterns for hybrid learning and reasoning systems. *Applied Intelligence*, S. 6528-6546.
- van Noortwijk, J. (2009). A survey of the application of gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering and System Safety* 94, S. 2-21.
- Weninger-Vycudil, A., Brozek, B., Kessel, T., Pasderski, J., Sietas, J., Bettina Chylik, C. S., . . . Bühlmann, R. (2021). *TAniA: Technische Anlagebewertung im Asset-Management. Projekt der D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung 2018*.
- Wesley, W. (2012). *RAMSSHÉP Analysis: A Tool for Risk-driven Maintenance – Applied for Primary flood Defense Systems in the Netherlands*.
- Xiu, D. (2010). *Numerical Methods for Stochastic Computations: A Spectral Method Approach*. Princeton University Press.
- Yuan, X. H. (2021). Estimation of the value of an inspection and maintenance program: A Bayesian gamma process model. *Reliability Engineering and System Safety* 2016, S. 107912.
- Zhang, W.-H., Lu, D.-G., Qin, J., Thöns, S., & Faber, M. H. (2021). Value of information analysis in civil and infrastructure engineering: a review. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2:16.
- Zwenger, J., König, W., Schimschal, B., Pinnel, R., Scuric, Z., Degenhardt, K., & Jackmuth, A. (2019). EPING: Erhaltungsbedarfsprognose für Ingenieurbauwerke. *Straßenverkehrstechnik*, 11, 807-811.

## 9 ANHÄNGE

### 9.1 Zustandsprognosemodelle Deutschland

Gruppe	# Maßnahmen	Zementtyp	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	5307
A2	0	unbekannt	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	3388
A3	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	2661
A4	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	2413
A5	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	1320
A6	0	unbekannt	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	870
A7	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	859
A8	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Stahl	680
A9	0	CEM II	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	649
A10	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	530
A11	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	unbekannt	490
A12	0	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	467
A13	0	CEM III	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	459
A14	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	400
A15	0	CEM I	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	362
A16	0	unbekannt	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	359
A17	0	CEM II	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	279
A18	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	224
A19	1	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	212
A20	0	CEM II	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	202
A21	0	unbekannt	Platte	unbekannt	Stahlbeton	168
A22	0	unbekannt	unbekannt	Rahmen	Spannbeton	143
A23	1	unbekannt	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	141
A24	0	CEM I	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	141
A25	0	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	141
A26	1	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	136
A27	0	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	134
A28	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	124
A29	0	CEM I	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	118
A30	0	CEM II	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	114
A31	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	105
A32	0	CEM III	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	100
A33	1	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	98
A34	0	CEM II	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	88
A35	0	CEM I	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	87
A36	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	86
A37	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Verbund	82
A38	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	82
A39	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Spannbeton	77
A40	0	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	74
A41	0	unbekannt	Platte	Rahmen	Stahlbeton	72
A42	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlträger im Beton	71
A43	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahl	70
A44	0	CEM III	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	60
A45	1	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	59
A46	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	56
A47	0	CEM II	unbekannt	unbekannt	Spannbeton	53
A48	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	50
A49	1	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	49
A50	0	CEM II	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	unbekannt	46

Tabelle 9-1 Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Brücke (Objektebene)

Gruppe	# Maßnahmen	Zementtyp	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A51	1	unbekannt	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	43
A52	0	unbekannt	Plattenbalken	unbekannt	Spannbeton	42
A53	0	CEM II	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	35
A54	0	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	32
A55	0	CEM III	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	32
A56	1	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Stahl	28
A57	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	27
A58	0	CEM III	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	27
A59	1	CEM II	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	26
A60	0	CEM I	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	26
A61	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	25
A62	1	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	25
A63	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Spannbeton	25
A64	0	CEM I	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	25
A65	1	CEM III	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	24
A66	0	CEM II	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	24
A67	0	CEM III	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	24
A68	0	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	23
A69	0	CEM V	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	22
A70	0	unbekannt	Plattenbalken	unbekannt	Stahlbeton	22
A71	0	CEM II	Plattenbalken	unbekannt	Stahlbeton	21
A72	0	CEM II	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	21
A73	0	CEM II	Platte	unbekannt	Stahlbeton	20

Tabelle 9-1 (fortgeführt)

Gruppe	# Maßnahmen	Zementtyp	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	2496
A2	0	CEM I	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	2004
A3	0	CEM II	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	1289
A4	0	CEM II	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	1281
A5	0	CEM I	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	1261
A6	0	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	1087
A7	0	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	959
A8	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	749
A9	0	CEM I	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	636
A10	0	unbekannt	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	596
A11	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Stahl	580
A12	0	CEM III	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	579
A13	0	CEM II	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	578
A14	0	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	518
A15	0	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	476
A16	0	CEM III	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	462
A17	0	CEM II	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	438
A18	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	unbekannt	368
A19	0	CEM II	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	344
A20	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	277
A21	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	265
A22	0	CEM II	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	250
A23	0	CEM I	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	246
A24	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	244
A25	0	CEM I	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	238
A26	0	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	227
A27	0	CEM I	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	215
A28	0	CEM III	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	215
A29	0	CEM I	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	214
A30	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	170
A31	0	CEM II	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	168
A32	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	161
A33	0	CEM III	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	161
A34	0	CEM I	unbekannt	Rahmen	Spannbeton	139
A35	0	CEM I	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	130
A36	0	unbekannt	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	98
A37	0	CEM III	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	97
A38	0	CEM I	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	92
A39	0	CEM II	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	92
A40	0	CEM III	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	90
A41	0	CEM I	Platte	unbekannt	Stahlbeton	86
A42	0	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	84
A43	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	82
A44	0	CEM II	Platte	unbekannt	Stahlbeton	80
A45	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	77
A46	0	CEM I	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	76
A47	0	unbekannt	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	66
A48	0	CEM III	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	65
A49	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	65
A50	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	64

Tabelle 9-2 Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Überbau

Gruppe	# Maßnahmen	Zementtyp	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A51	0	CEM III	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	62
A52	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	60
A53	0	CEM III	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	60
A54	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahl	59
A55	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	58
A56	0	CEM II	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	56
A57	0	CEM III	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	56
A58	0	CEM II	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	53
A59	0	CEM I	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Verbund	51
A60	1	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	50
A61	1	CEM II	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	46
A62	0	CEM II	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	unbekannt	42
A63	0	CEM I	unbekannt	Rahmen	Verbund	39
A64	0	CEM I	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	38
A65	0	CEM II	unbekannt	Rahmen	Spannbeton	37
A66	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Verbund	37
A67	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	36
A68	1	CEM I	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	35
A69	0	CEM V	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	35
A70	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlträger im Beton	35
A71	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	33
A72	1	CEM I	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	33
A73	0	unbekannt	unbekannt	Rahmen	unbekannt	31
A74	1	CEM II	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	31
A75	0	CEM II	Platte	Rahmen	Stahlbeton	30
A76	0	CEM I	unbekannt	unbekannt	Spannbeton	29
A77	0	CEM II	unbekannt	unbekannt	Spannbeton	29
A78	0	CEM I	Plattenbalken	unbekannt	Spannbeton	29
A79	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	25
A80	1	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	25
A81	0	CEM I	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Verbund	25
A82	1	CEM III	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	24
A83	1	unbekannt	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	23
A84	0	CEM III	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	23
A85	1	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	23
A86	0	CEM II	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	22
A87	0	CEM I	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	21
A88	0	CEM II	Plattenbalken	unbekannt	Stahlbeton	21
A89	0	unbekannt	unbekannt	Rahmen	Spannbeton	21
A90	1	CEM I	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	20

Tabelle 9-2 (fortgeführt)

Gruppe	# Maßnahmen	Zementtyp	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	2271
A2	0	CEM I	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	1640
A3	0	CEM I	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	1306
A4	0	CEM III	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	1222
A5	0	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	1176
A6	0	CEM II	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	1094
A7	0	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	1057
A8	0	CEM II	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	990
A9	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	961
A10	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	879
A11	0	unbekannt	unbekannt	Rahmen	unbekannt	803
A12	0	CEM I	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	775
A13	0	CEM III	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	728
A14	0	CEM III	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	688
A15	0	CEM III	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	558
A16	0	unbekannt	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	553
A17	0	CEM II	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	476
A18	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	439
A19	0	CEM II	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	397
A20	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	377
A21	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	282
A22	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	281
A23	0	CEM I	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	266
A24	0	CEM III	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	250
A25	0	CEM III	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	239
A26	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	unbekannt	227
A27	0	CEM I	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	223
A28	0	unbekannt	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	152
A29	0	CEM I	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	130
A30	0	unbekannt	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	128
A31	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	126
A32	0	CEM II	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	107
A33	0	CEM I	Platte	unbekannt	Stahlbeton	102
A34	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	93
A35	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	71
A36	0	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	68
A37	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	64
A38	1	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	61
A39	0	CEM I	Plattenbalken	unbekannt	Stahlbeton	56
A40	0	CEM II	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	53
A41	0	CEM III	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	53
A42	0	CEM II	Platte	unbekannt	Stahlbeton	52
A43	0	CEM I	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	50
A44	0	CEM II	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	49
A45	1	CEM III	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	44
A46	0	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	43
A47	0	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	43
A48	0	CEM III	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	41
A49	0	CEM V	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	38
A50	0	CEM V	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	37

Tabelle 9-3 Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Unterbau



Gruppe	# Maßnahmen	Zementtyp	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A51	0	CEM II	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	36
A52	1	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	35
A53	1	CEM I	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	34
A54	1	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	33
A55	0	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	31
A56	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	31
A57	1	CEM I	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	30
A58	1	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	29
A59	0	CEM III	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	28
A60	0	unbekannt	Platte	unbekannt	Stahlbeton	28
A61	0	CEM III	Platte	unbekannt	Stahlbeton	27
A62	1	CEM I	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	27
A63	0	CEM I	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	27
A64	1	CEM II	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	26
A65	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Stahl	26
A66	0	unbekannt	Platte	unbekannt	unbekannt	25
A67	1	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	25
A68	1	unbekannt	unbekannt	Rahmen	unbekannt	24
A69	0	CEM V	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	23
A70	1	CEM II	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	22
A71	1	unbekannt	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	21
A72	0	CEM II	Platte	Rahmen	Stahlbeton	21
A73	0	unbekannt	Platte	Rahmen	unbekannt	20
A74	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	20
A75	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	20

Tabelle 9-3 (fortgeführt)

Gruppe	# Maßnahmen	Zementtyp	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	2055
A2	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	1212
A3	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	748
A4	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	636
A5	0	unbekannt	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	500
A6	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	unbekannt	102
A7	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	94
A8	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	72
A9	1	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	46
A10	0	unbekannt	Plattenbalken	unbekannt	unbekannt	35
A11	0	unbekannt	unbekannt	Rahmen	unbekannt	28
A12	1	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	21

Tabelle 9-4 Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Lager

Gruppe	# Maßnahmen	Zementtyp	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	2945
A2	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	1803
A3	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	1156
A4	0	unbekannt	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	744
A5	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	707
A6	0	unbekannt	unbekannt	Rahmen	unbekannt	214
A7	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	unbekannt	173
A8	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	105
A9	1	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	100
A10	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	97
A11	0	unbekannt	Plattenbalken	unbekannt	unbekannt	59
A12	1	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	41
A13	1	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	34
A14	0	unbekannt	Platte	unbekannt	unbekannt	32

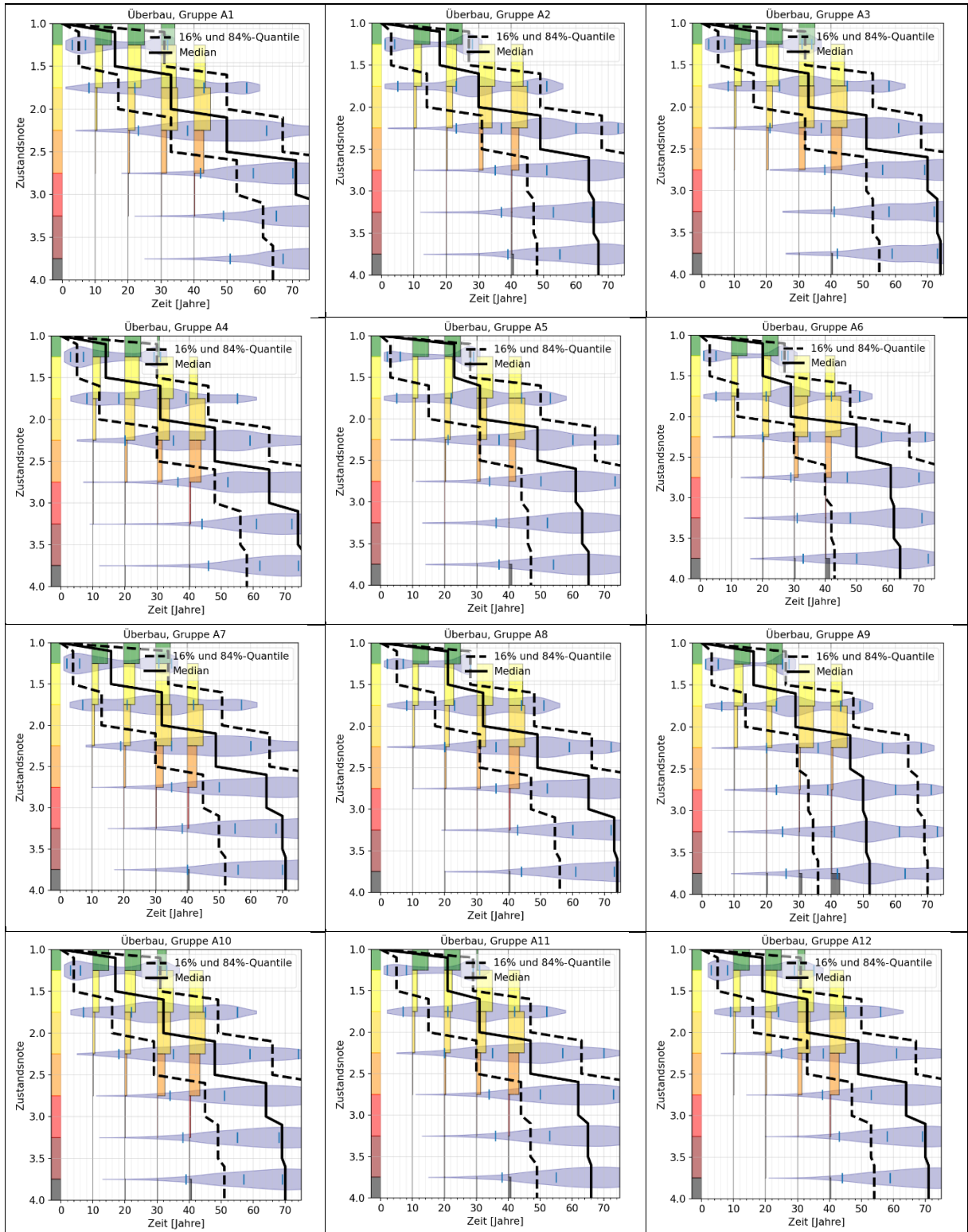
Tabelle 9-5 Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Fahrbahnübergang

Gruppe	# Maßnahmen	Zementtyp	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	2692
A2	0	CEM I	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	2304
A3	0	CEM I	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	2262
A4	0	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	1708
A5	0	CEM I	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	1284
A6	0	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	1249
A7	0	CEM II	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	1196
A8	0	CEM II	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	1090
A9	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	670
A10	0	unbekannt	unbekannt	Rahmen	unbekannt	589
A11	0	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	585
A12	0	CEM II	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	541
A13	0	CEM III	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	464
A14	0	CEM I	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	431
A15	0	CEM I	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	406
A16	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	388
A17	0	CEM II	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	371
A18	0	unbekannt	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	311
A19	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	unbekannt	299
A20	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	291
A21	0	CEM III	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	266
A22	0	CEM III	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	243
A23	0	CEM I	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	237
A24	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	218
A25	0	CEM III	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	216

Tabelle 9-6 Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Kappen

Gruppe	# Maßnahmen	Zementtyp	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A26	0	unbekannt	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	216
A27	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	213
A28	0	CEM II	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	141
A29	0	unbekannt	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	141
A30	0	unbekannt	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	unbekannt	130
A31	0	CEM I	Platte	unbekannt	Stahlbeton	123
A32	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	117
A33	1	CEM I	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	97
A34	0	CEM III	Platte	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	89
A35	0	unbekannt	unbekannt	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	84
A36	1	CEM II	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	81
A37	0	CEM III	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	74
A38	0	CEM I	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	72
A39	0	CEM II	Platte	unbekannt	Stahlbeton	65
A40	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	63
A41	0	CEM I	Plattenbalken	unbekannt	Stahlbeton	62
A42	1	CEM I	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	57
A43	1	CEM I	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	51
A44	0	CEM II	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	49
A45	1	CEM II	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	48
A46	1	CEM I	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	46
A47	0	CEM II	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	41
A48	0	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	34
A49	1	CEM II	unbekannt	Rahmen	Stahlbeton	32
A50	0	CEM II	Platte	Rahmen	Stahlbeton	26
A51	0	CEM I	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	26
A52	0	unbekannt	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	25
A53	1	CEM II	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	24
A54	0	CEM III	Hohlkasten	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	22
A55	1	CEM I	Hohlkasten	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	21
A56	1	unbekannt	unbekannt	Rahmen	unbekannt	20
A57	1	unbekannt	Platte	Träger ohne Durchlaufwirkung	unbekannt	20
A58	0	CEM I	Platte	Rahmen	Stahlbeton	20

Tabelle 9-6 (fortgeführt)



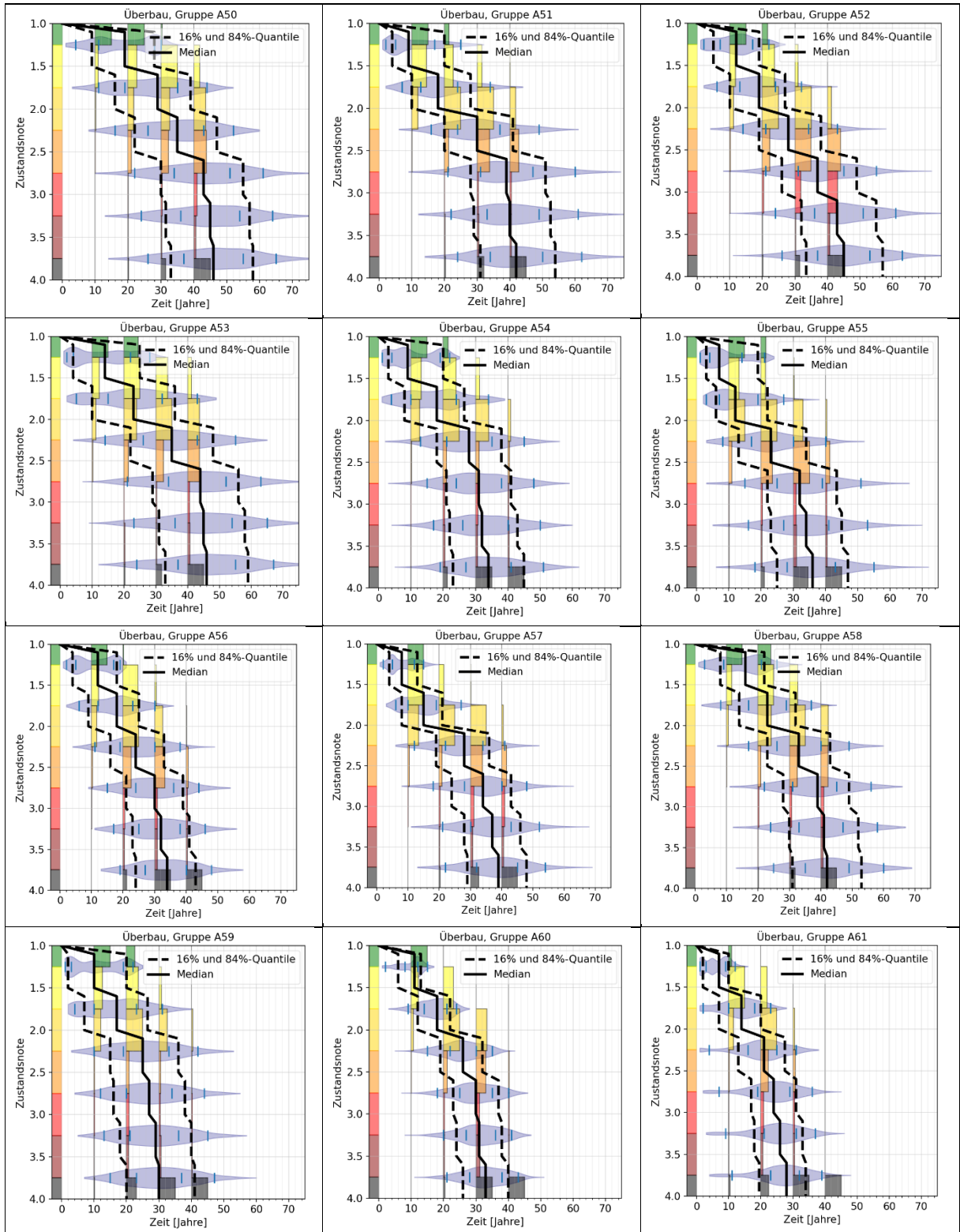
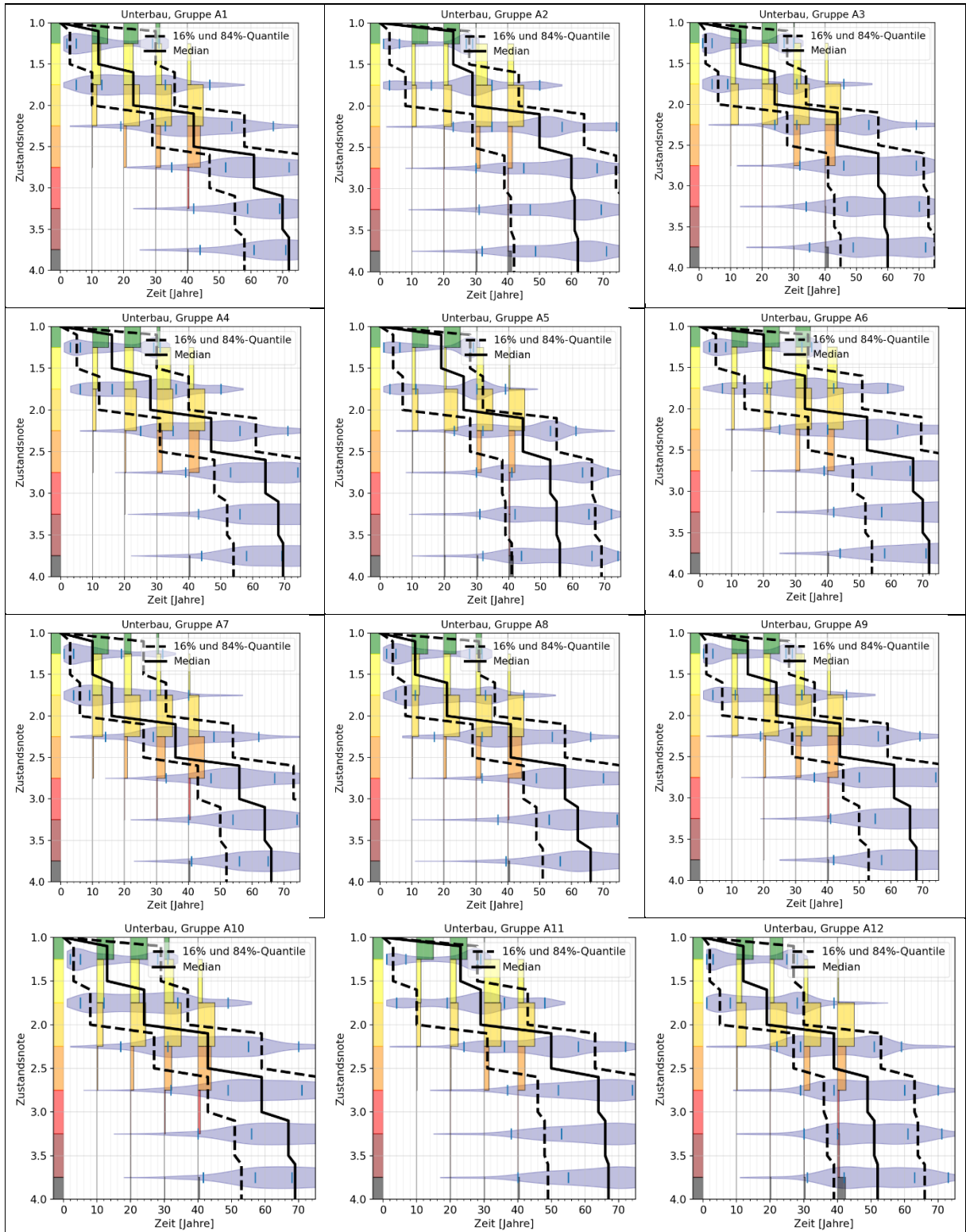


Tabelle 9-7 Ausgewählte Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Überbau





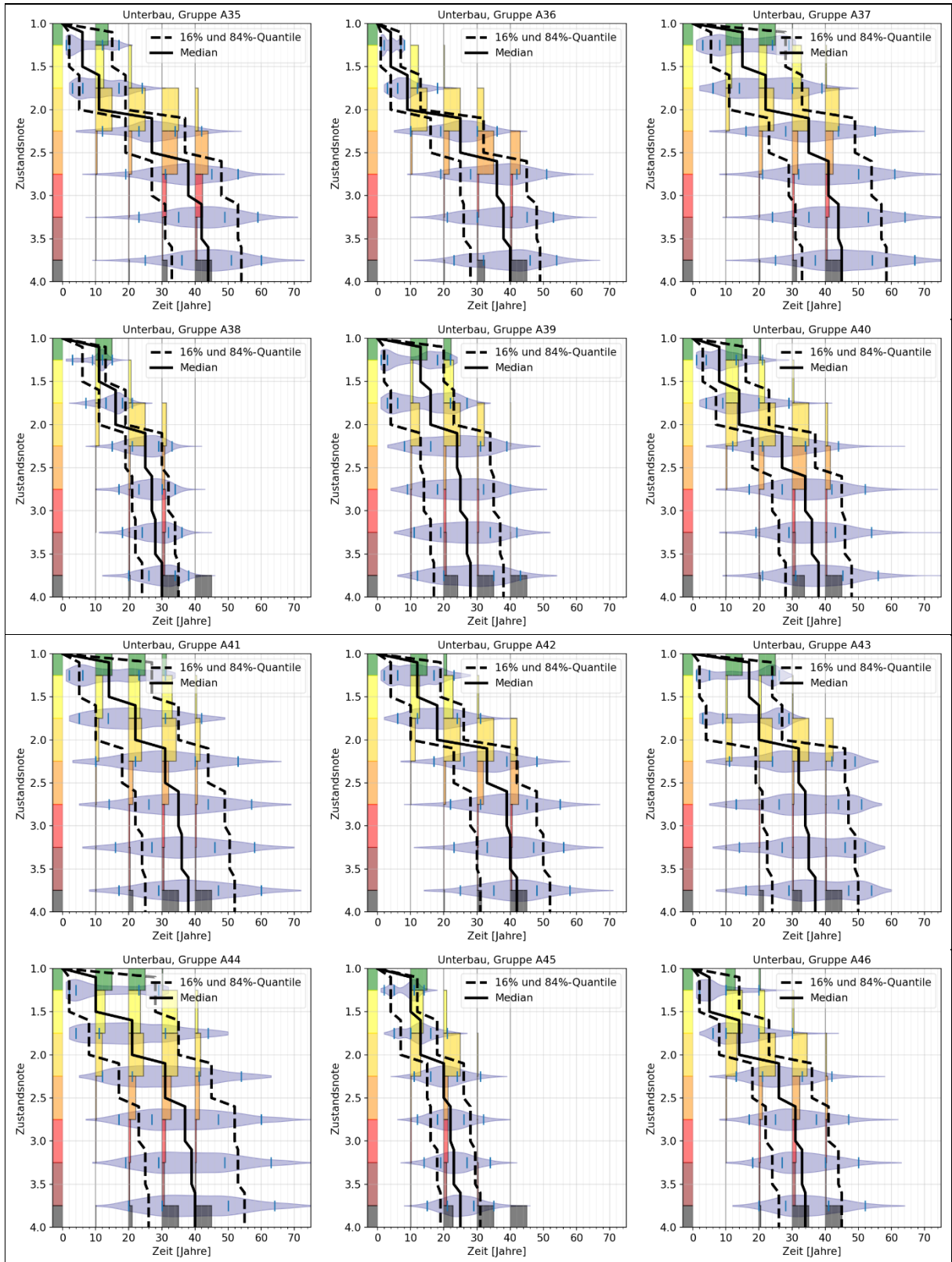


Tabelle 9-8 Ausgewählte Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Unterbau

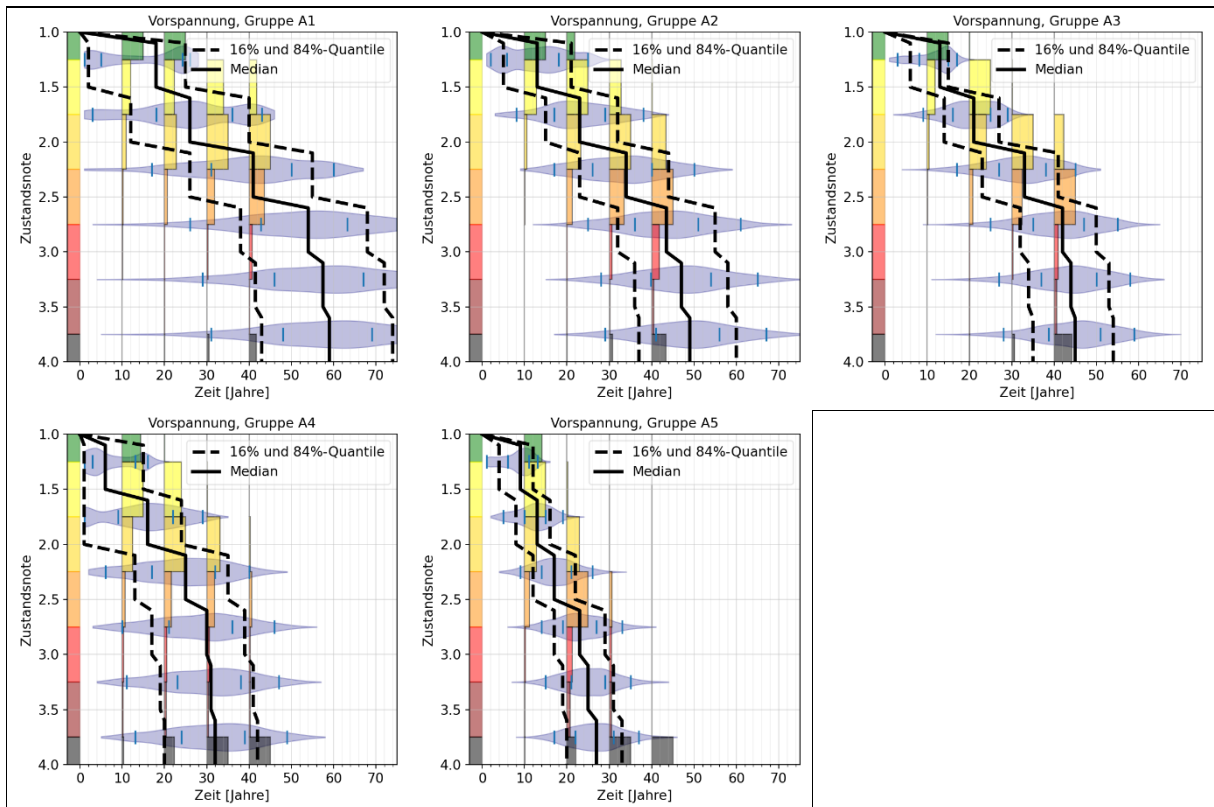


Tabelle 9-9 Ausgewählte Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Vorspannung

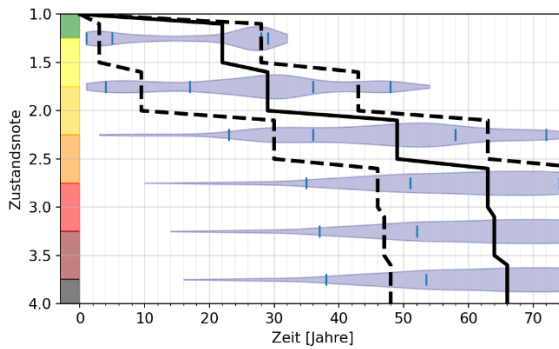


Abbildung 9-1 Prognose für Gruppe A11 Unterbau

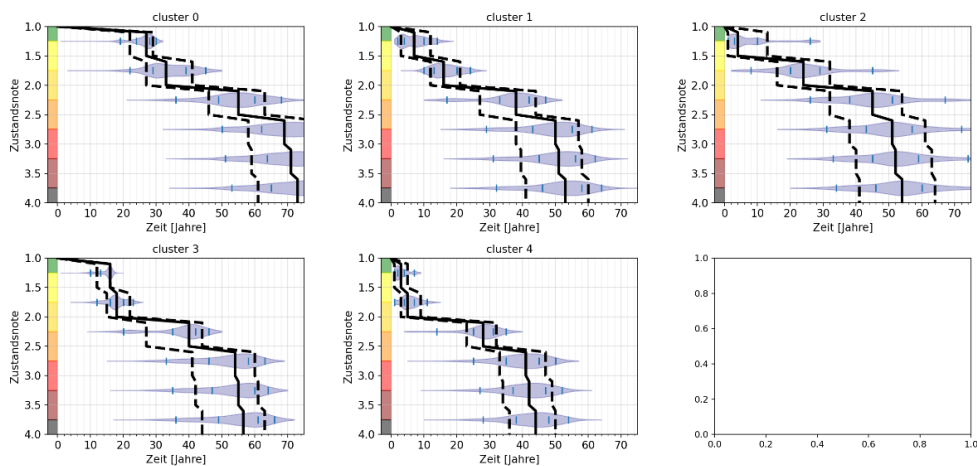


Abbildung 9-2 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A11 Unterbau entstanden sind, Variante mit 5 Clustern

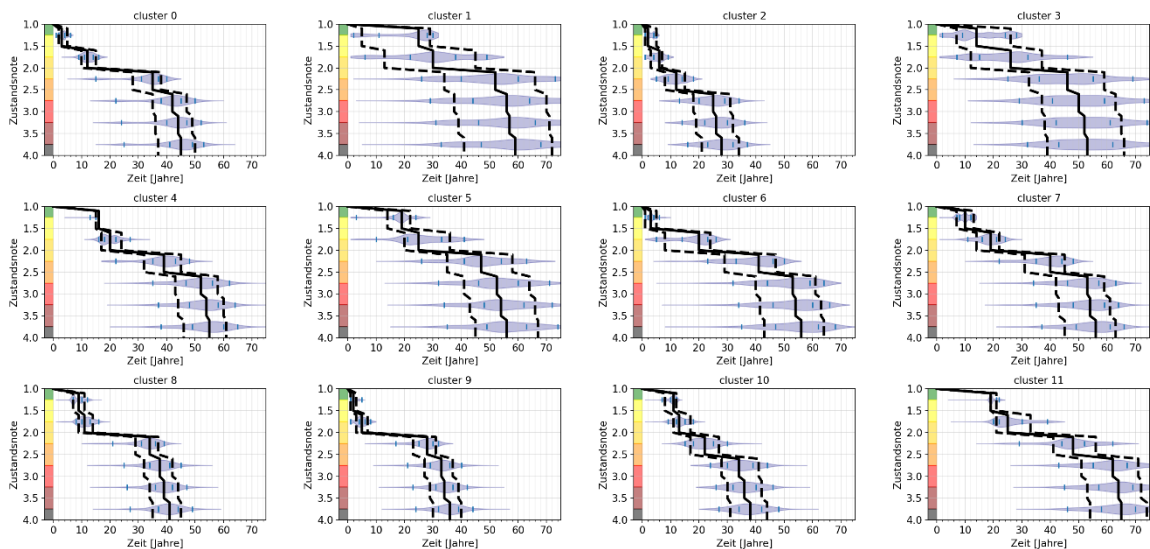


Abbildung 9-3 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A11 Unterbau entstanden sind, Variante mit 12 Clustern

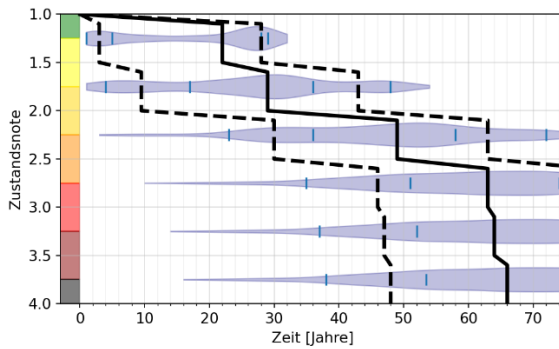


Abbildung 9-4 Prognose für Gruppe A13 Unterbau

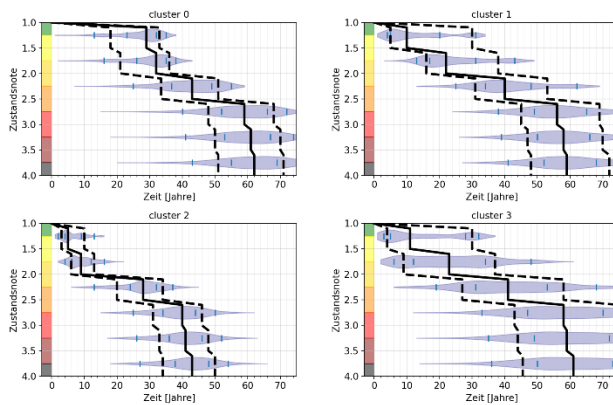


Abbildung 9-5 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A13 Unterbau entstanden sind, Variante mit 4 Clustern

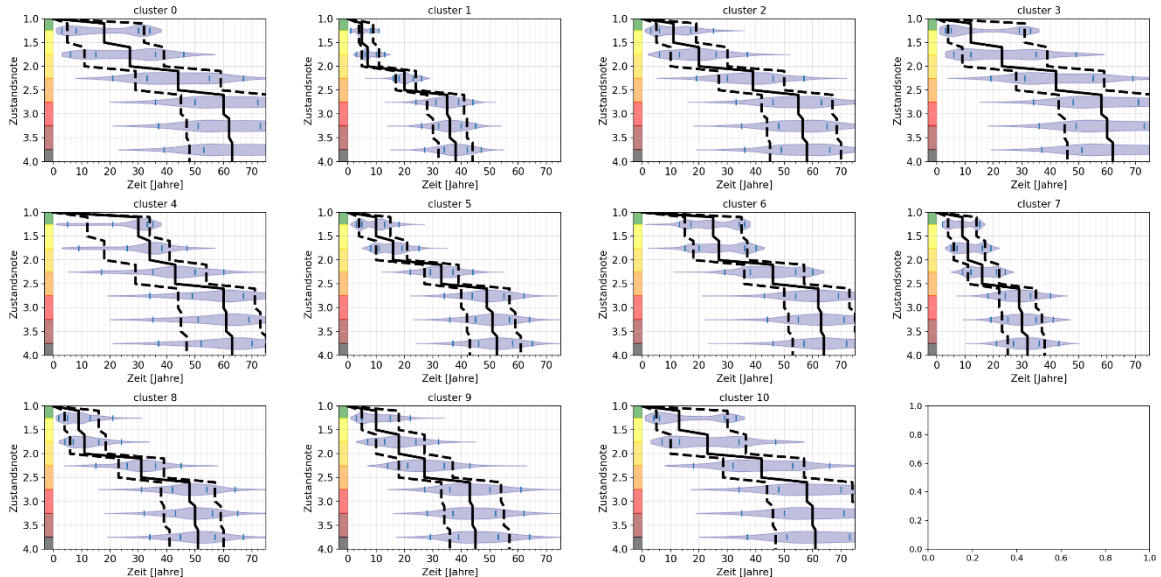


Abbildung 9-6 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A13 Unterbau entstanden sind, Variante mit 11 Clustern

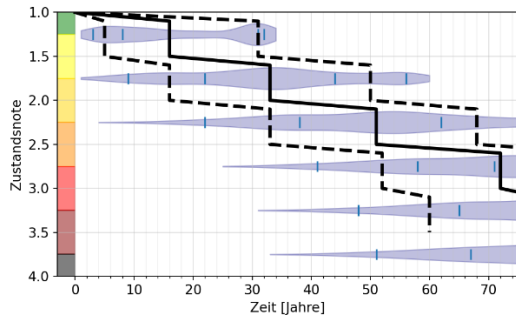


Abbildung 9-7 Prognose für Gruppe A1 Oberbau

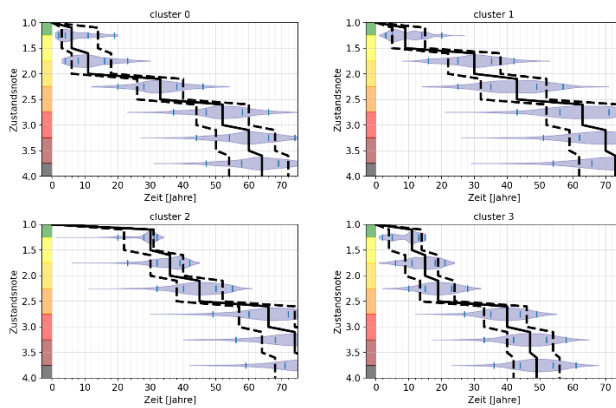


Abbildung 9-8 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Oberbau entstanden sind, Variante mit 4 Clustern

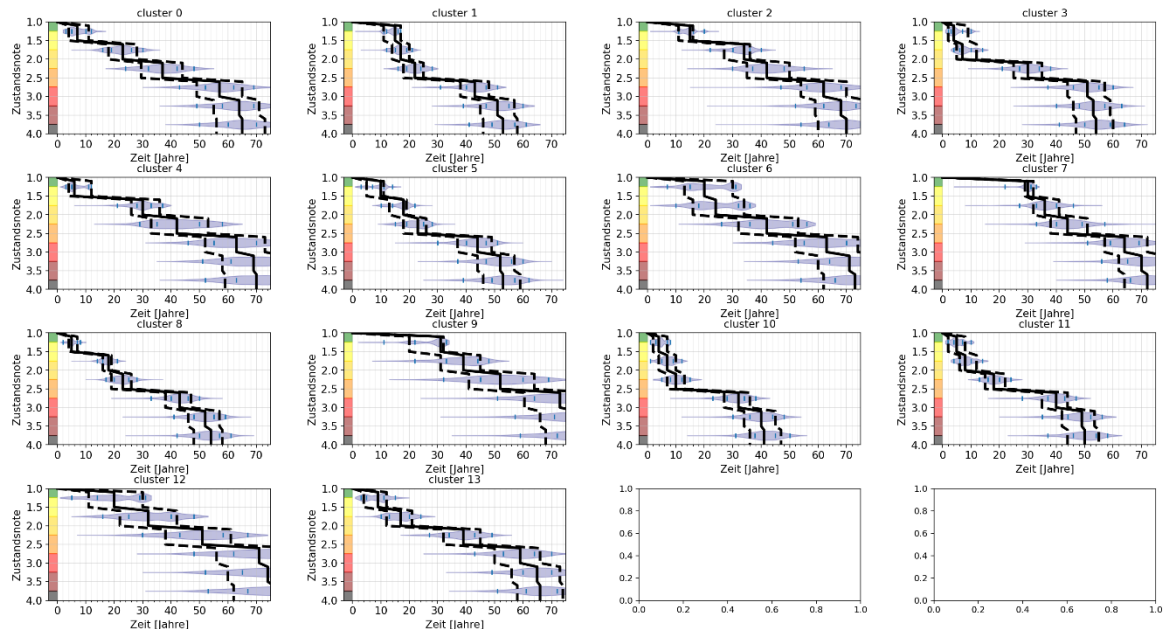


Abbildung 9-9 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Oberbau entstanden sind, Variante mit 14 Clustern

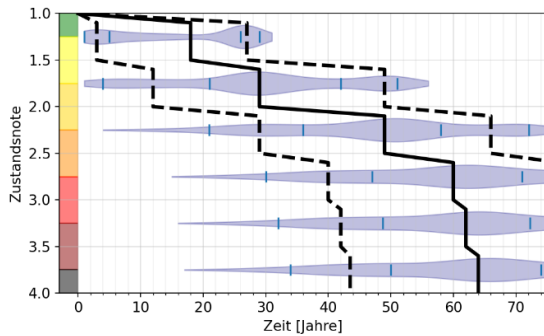


Abbildung 9-10 Prognose für Gruppe A6 Oberbau

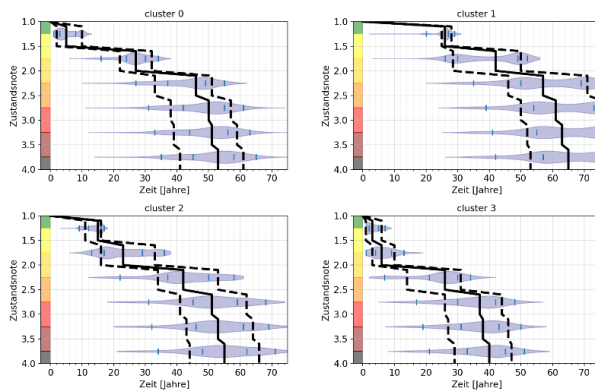


Abbildung 9-11 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A6 Oberbau entstanden sind, Variante mit 4 Clustern

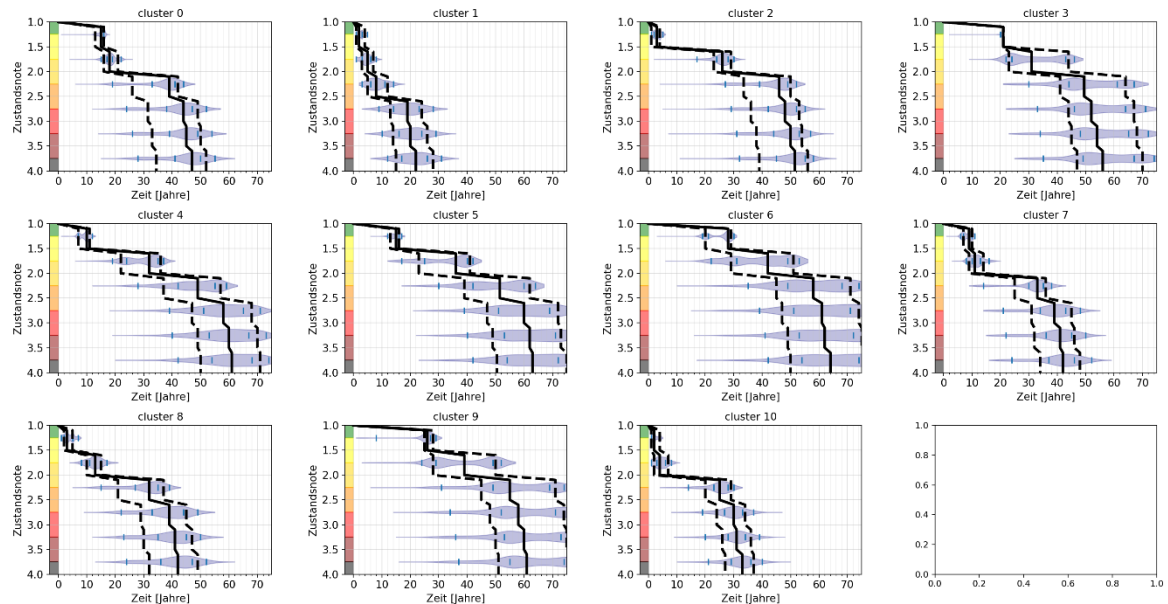
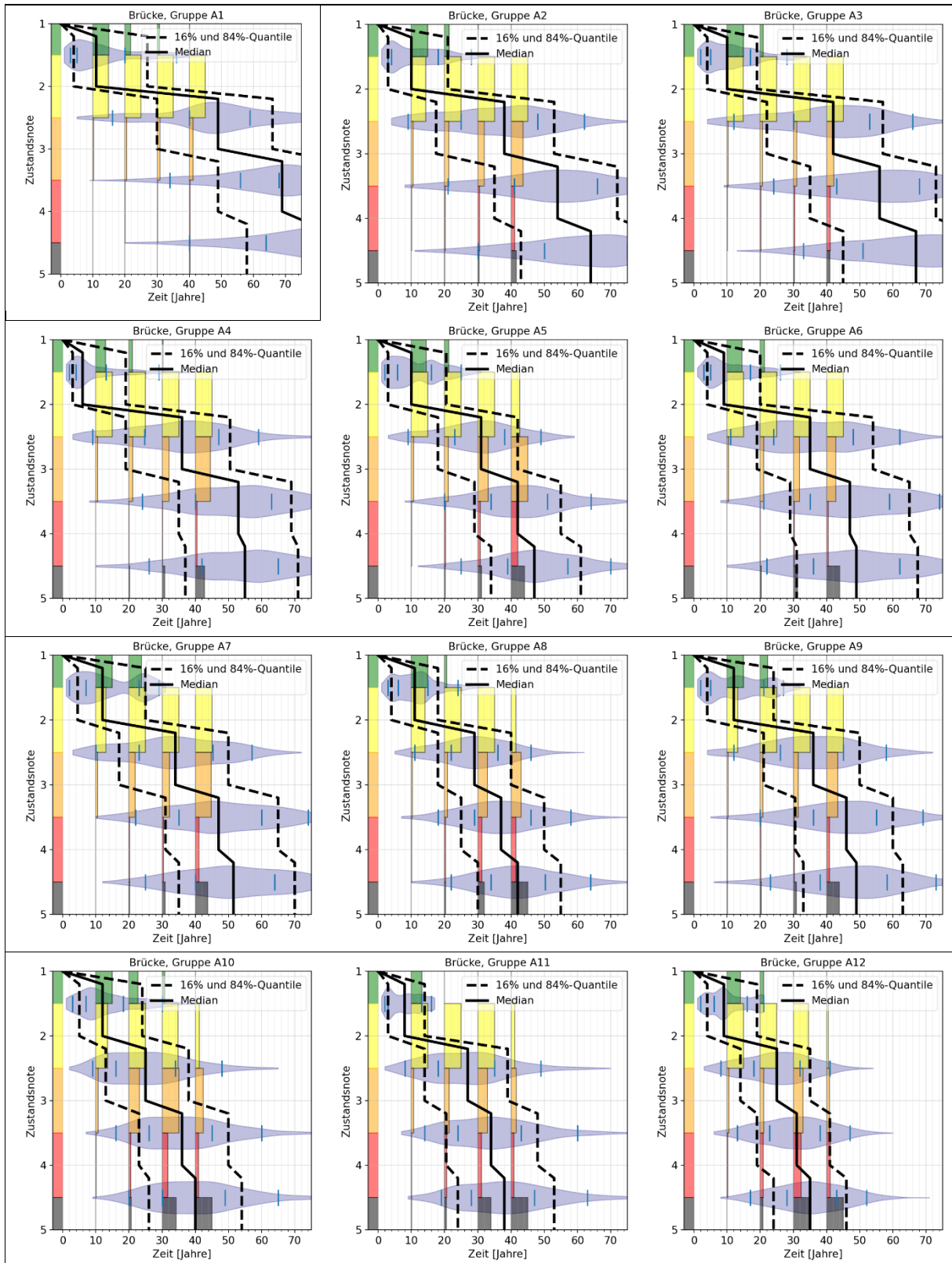


Abbildung 9-12 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A6 Oberbau entstanden sind, Variante mit 11 Clustern



## 9.2 Zustandsprognosemodelle Schweiz



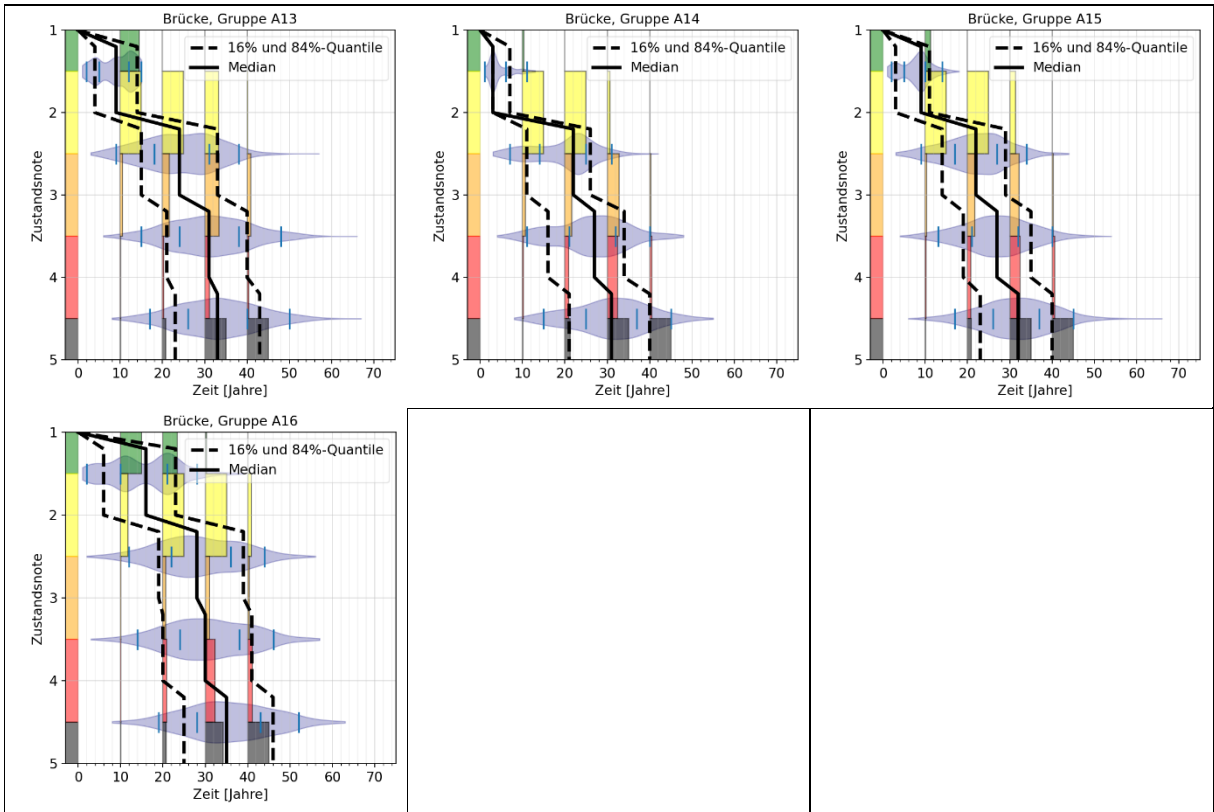


Tabelle 9-10 Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Objektebene

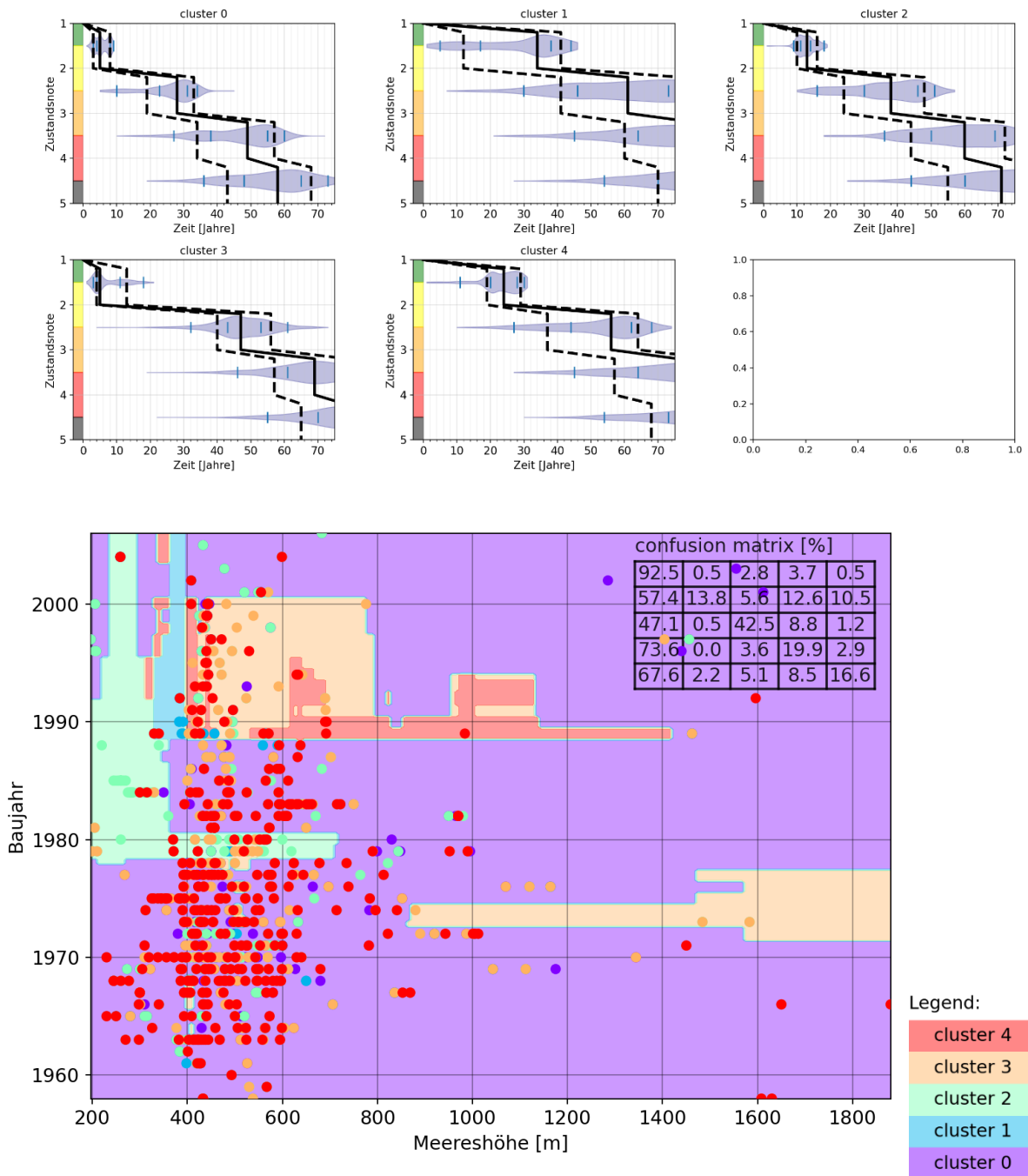


Abbildung 9-13 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 entstanden sind, Variante mit 5 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten)

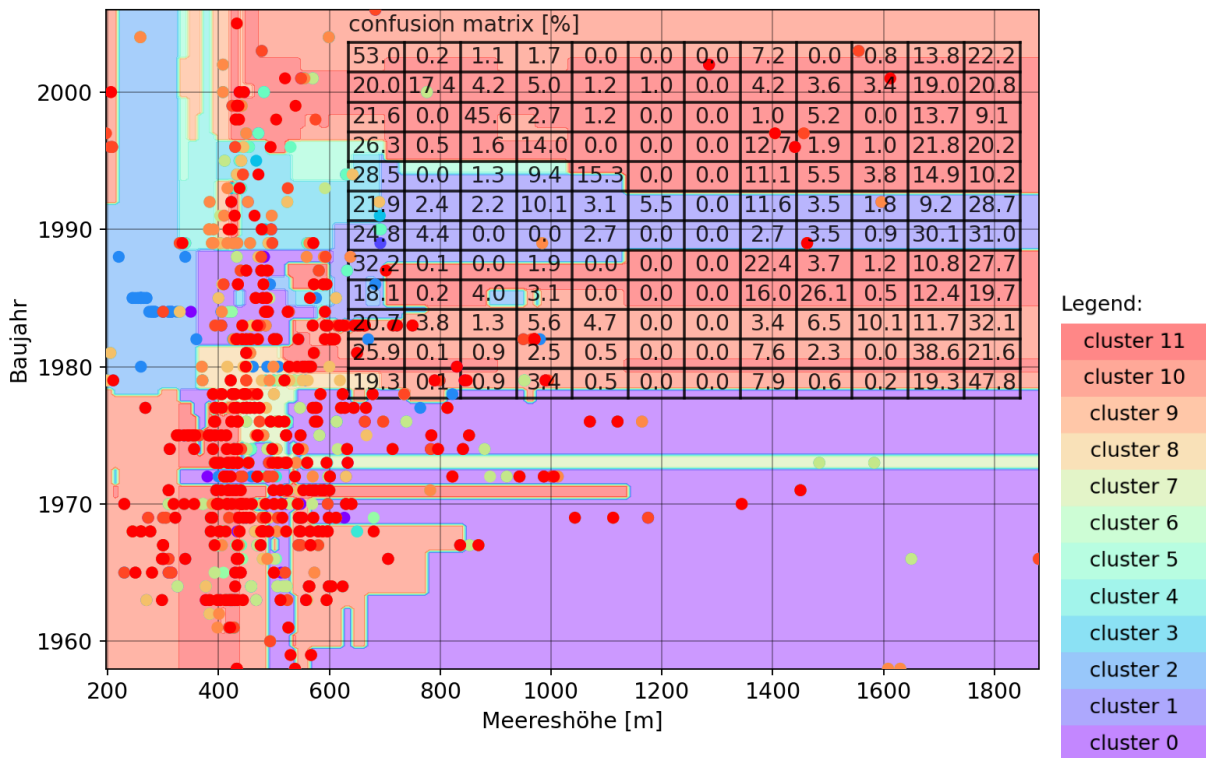
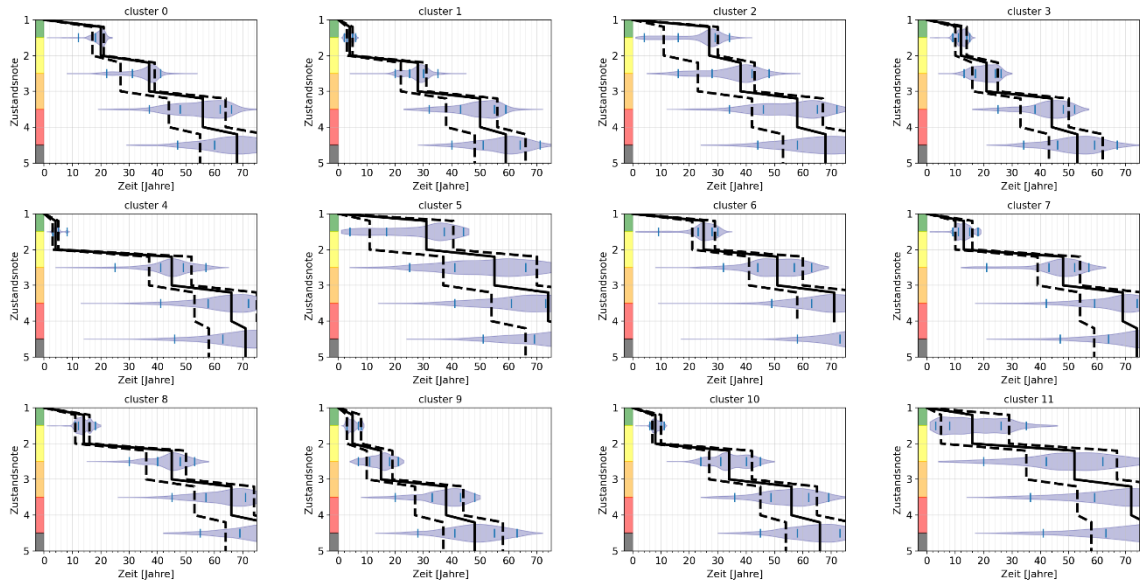


Abbildung 9-14 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 entstanden sind, Variante mit 12 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten)

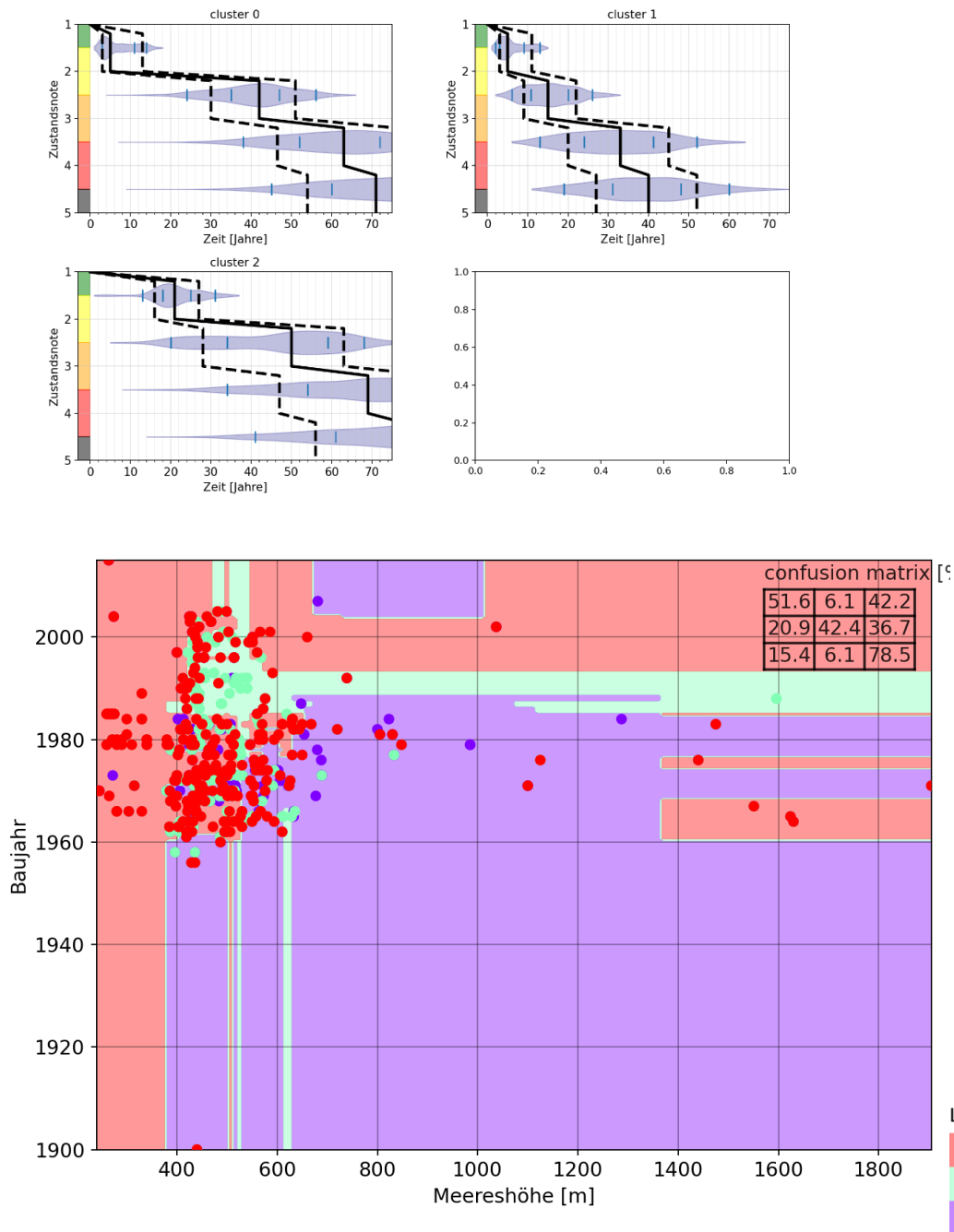


Abbildung 9-15 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 entstanden sind, Variante mit 3 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten)

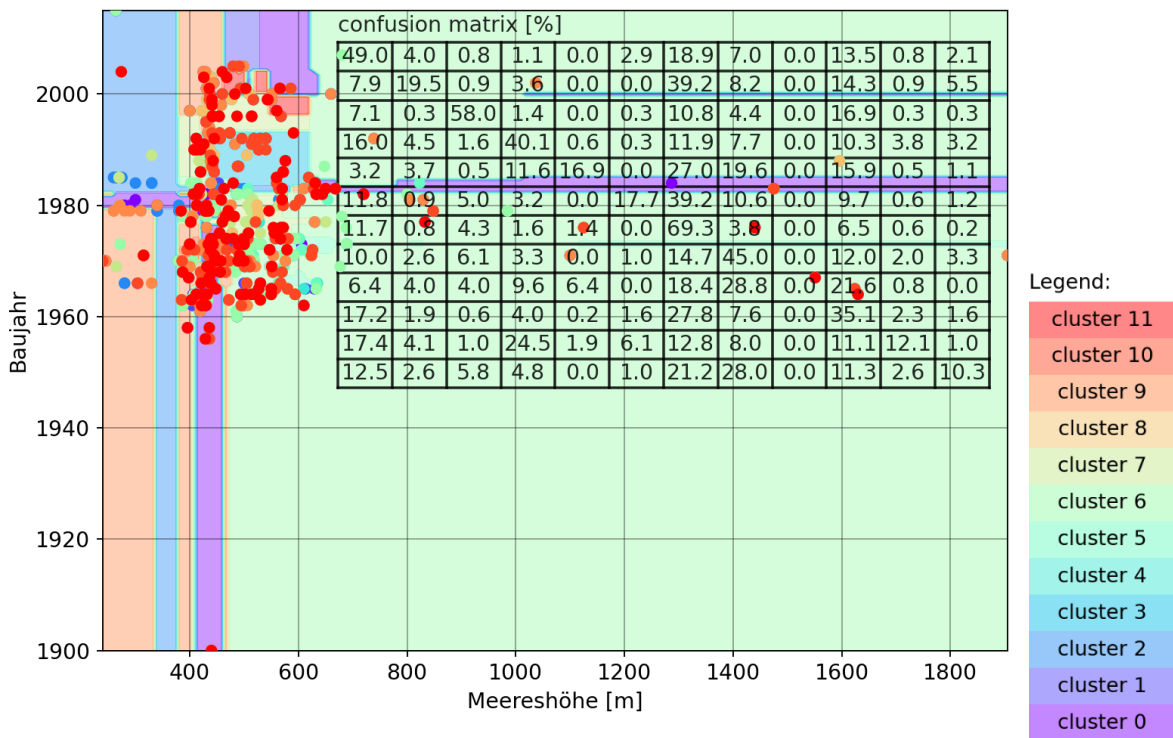
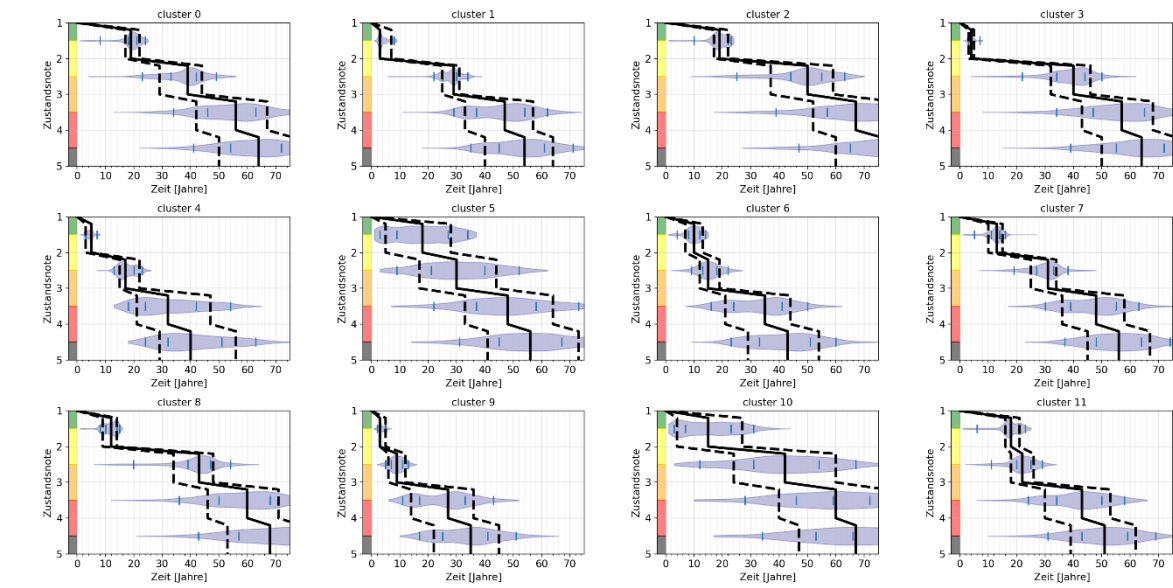


Abbildung 9-16 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 entstanden sind, Variante mit 12 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten)



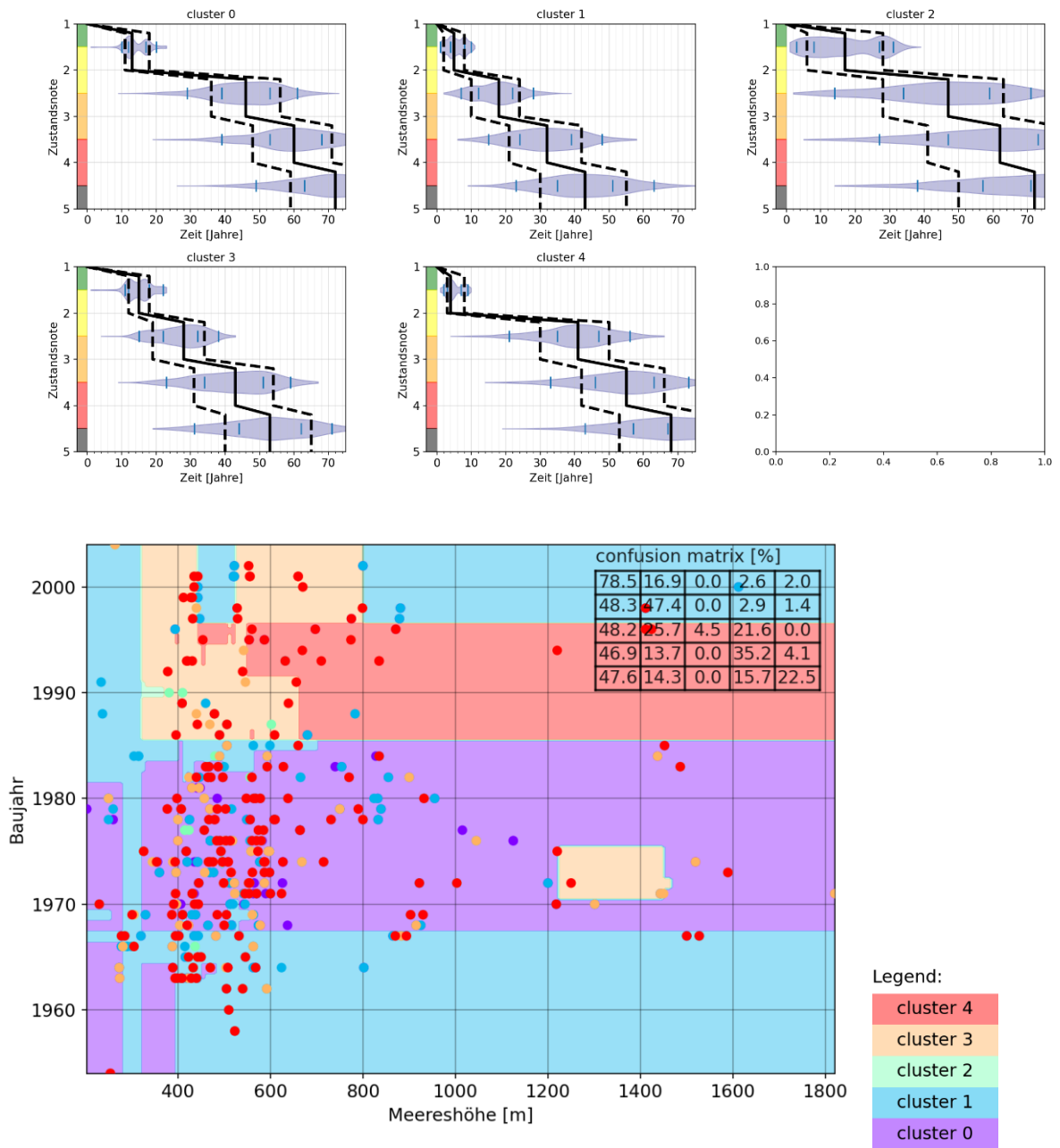


Abbildung 9-17 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A3 entstanden sind, Variante mit 5 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten)

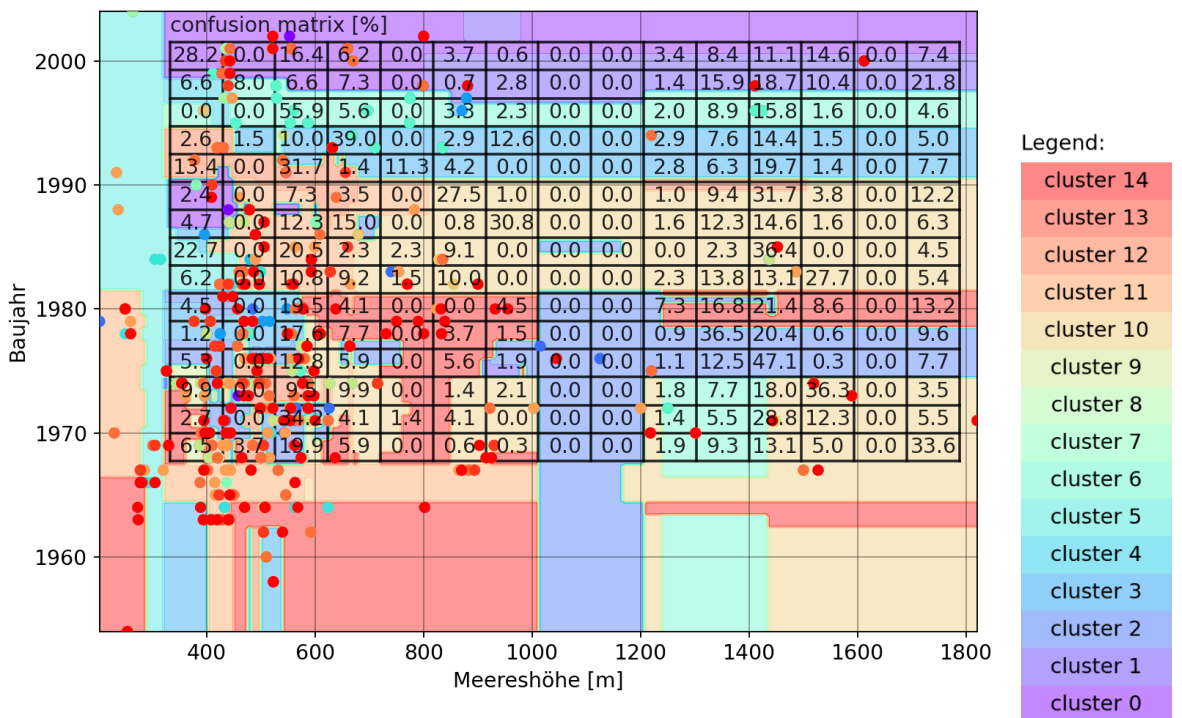
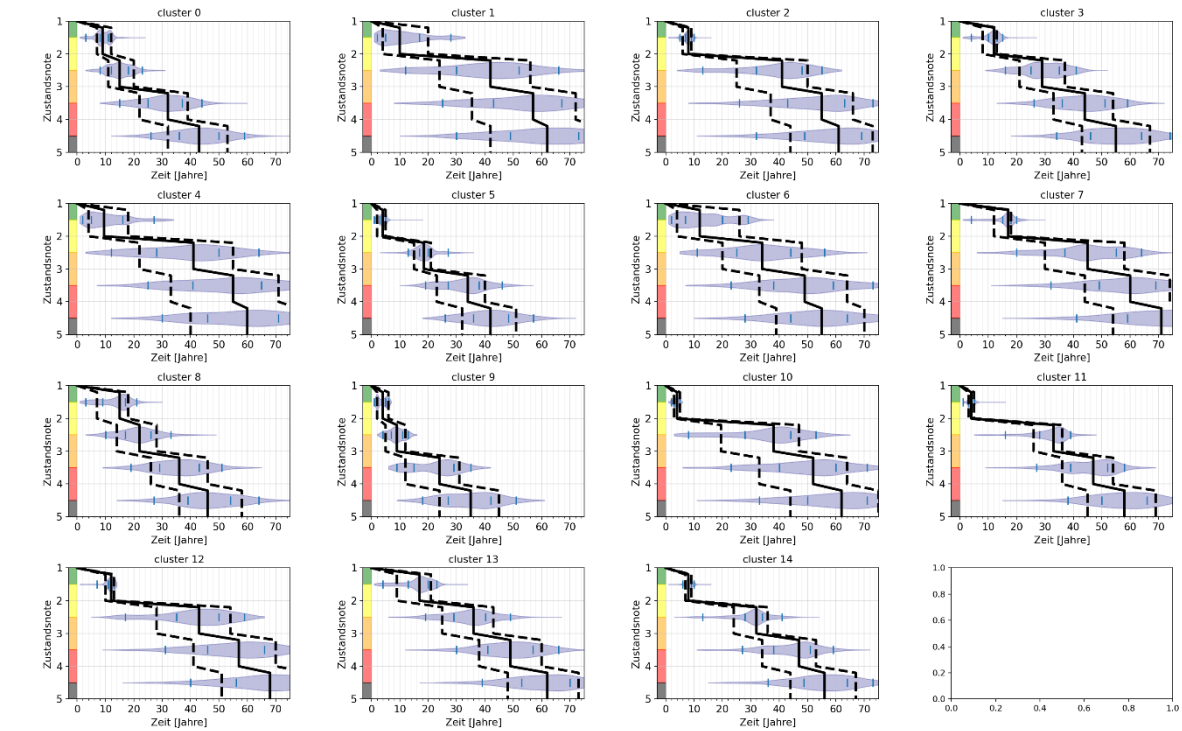


Abbildung 9-18 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A3 entstanden sind, Variante mit 15 Clustern (oben); der dazugehörige Random-Forest Klassifikator (unten)

### 9.3 Zustandsprognosemodelle Österreich

Gruppe	# Maßnahmen	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	807
A2	0	Platte	Rahmen	Stahlbeton	788
A3	0	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	626
A4	0	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	525
A5	0	Platte	Rahmen	Spannbeton	202
A6	0	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	69
A7	0	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	67
A8	0	Träger	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahl	67
A9	0	Träger	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	51
A10	0	Platte	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	42
A11	1	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	28
A12	1	Platte	Rahmen	Stahlbeton	26
A13	1	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	23

Tabelle 9-11 Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Überbau

Gruppe	# Maßnahmen	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	Platte	Rahmen	Stahlbeton	806
A2	0	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	777
A3	0	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	623
A4	0	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	540
A5	0	Platte	Rahmen	Spannbeton	212
A6	0	Träger	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahl	77
A7	0	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	76
A8	0	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	68
A9	0	Träger	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	50
A10	0	Platte	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	47
A11	1	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	31
A12	1	Platte	Rahmen	Stahlbeton	26
A13	1	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	24
A14	1	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	22

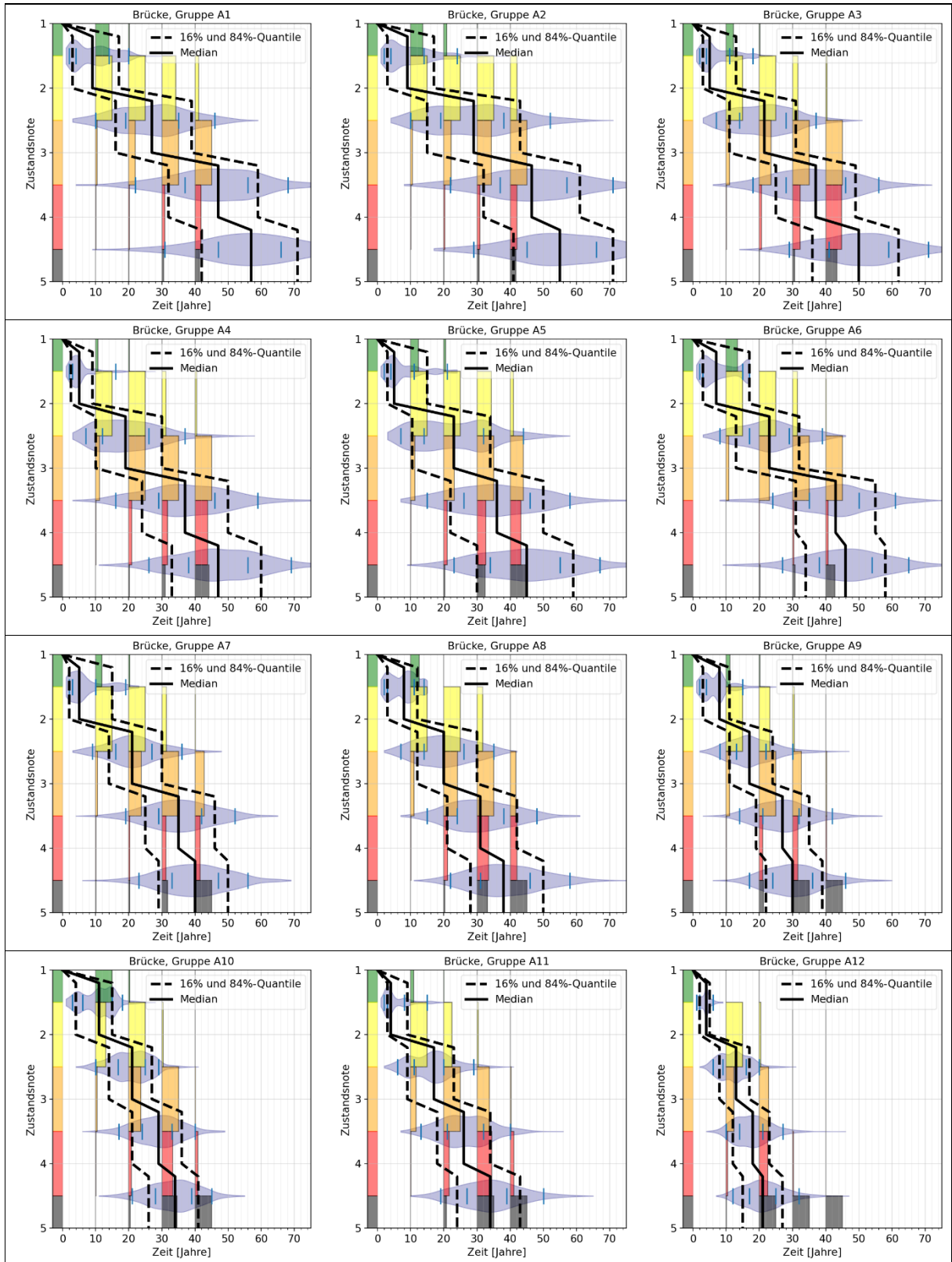
Tabelle 9-12 Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Unterbau

Gruppe	# Maßnahmen	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	869
A2	0	Platte	Rahmen	Stahlbeton	824
A3	0	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	708
A4	0	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	610
A5	0	Platte	Rahmen	Spannbeton	242
A6	0	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	74
A7	0	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	70
A8	0	Träger	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	58
A9	0	Platte	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	47
A10	1	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	35
A11	0	Träger	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahl	24
A12	1	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	22
A13	1	Platte	Rahmen	Stahlbeton	20

Tabelle 9-13 Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Abdichtung

Gruppe	# Maßnahmen	Querschnittstyp	Statisches System in Längsrichtung	Material	Anzahl Degradationspfade
A1	0	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	916
A2	0	Platte	Rahmen	Stahlbeton	808
A3	0	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	663
A4	0	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	577
A5	0	Platte	Rahmen	Spannbeton	231
A6	0	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Spannbeton	80
A7	0	unbekannt	unbekannt	Stahlbeton	63
A8	0	Träger	Träger mit Durchlaufwirkung	Verbund	50
A9	0	Platte	Bogen oder Schrägseil	Stahlbeton	45
A10	1	Plattenbalken	Träger ohne Durchlaufwirkung	Stahlbeton	41
A11	1	Platte	Rahmen	Stahlbeton	31
A12	1	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Stahlbeton	26
A13	1	Plattenbalken	Träger mit Durchlaufwirkung	Spannbeton	20

Tabelle 9-14 Die Gruppen aus dem Satz 1, Bauteil Kappen



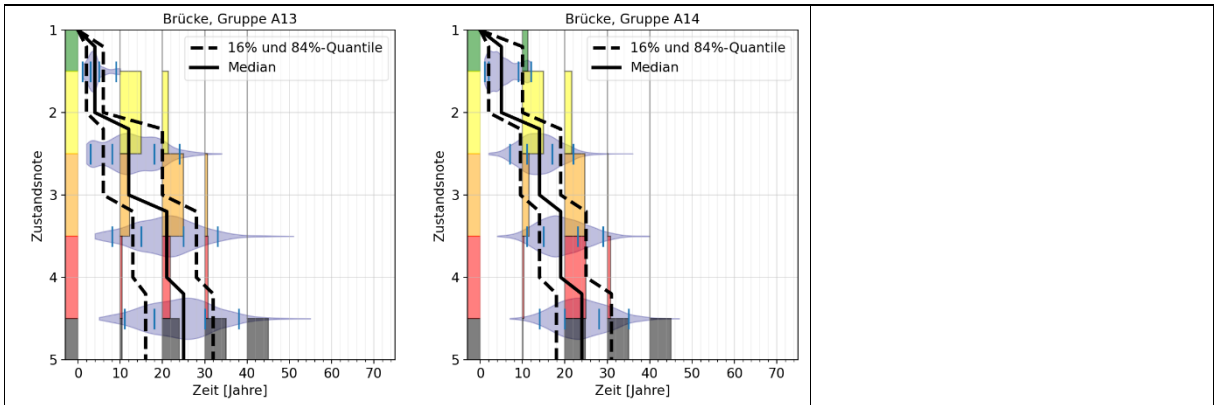
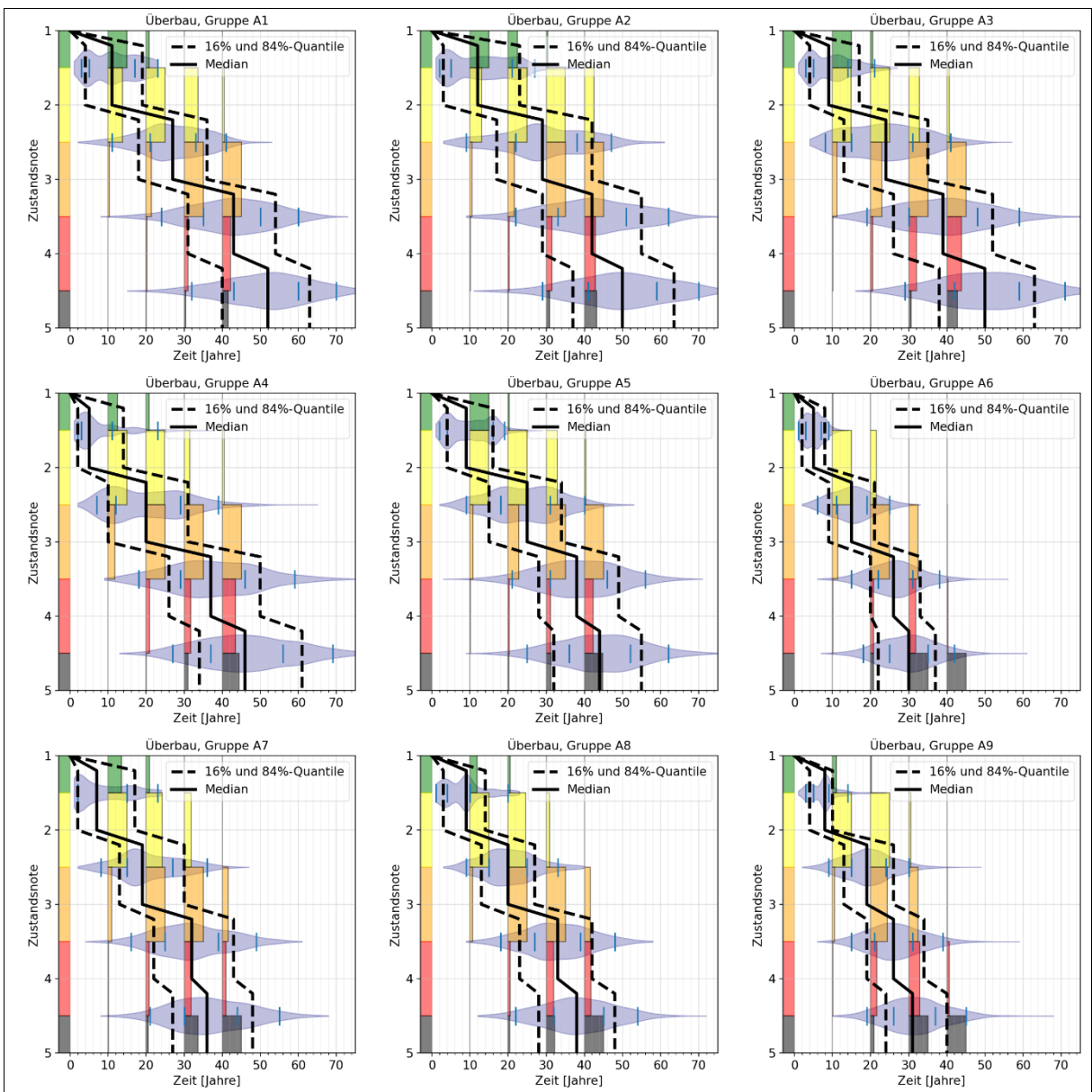


Tabelle 9-15 Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Objektebene





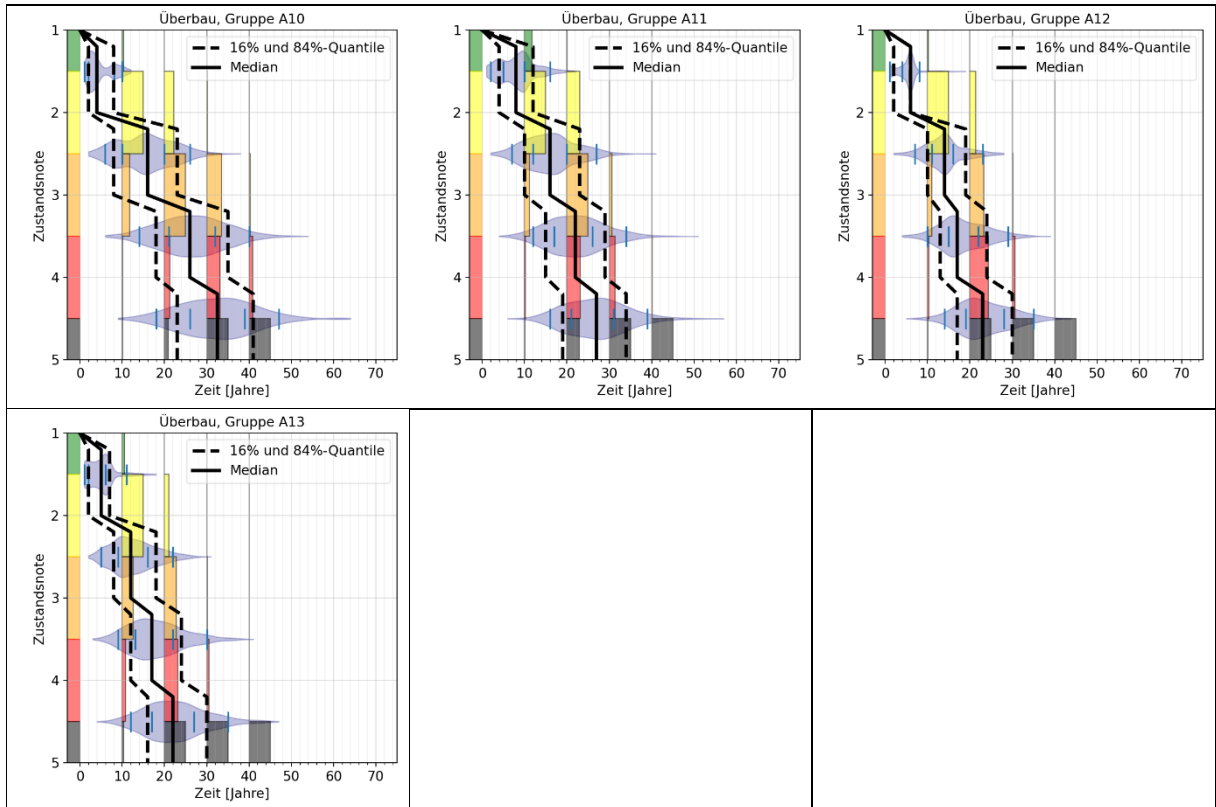
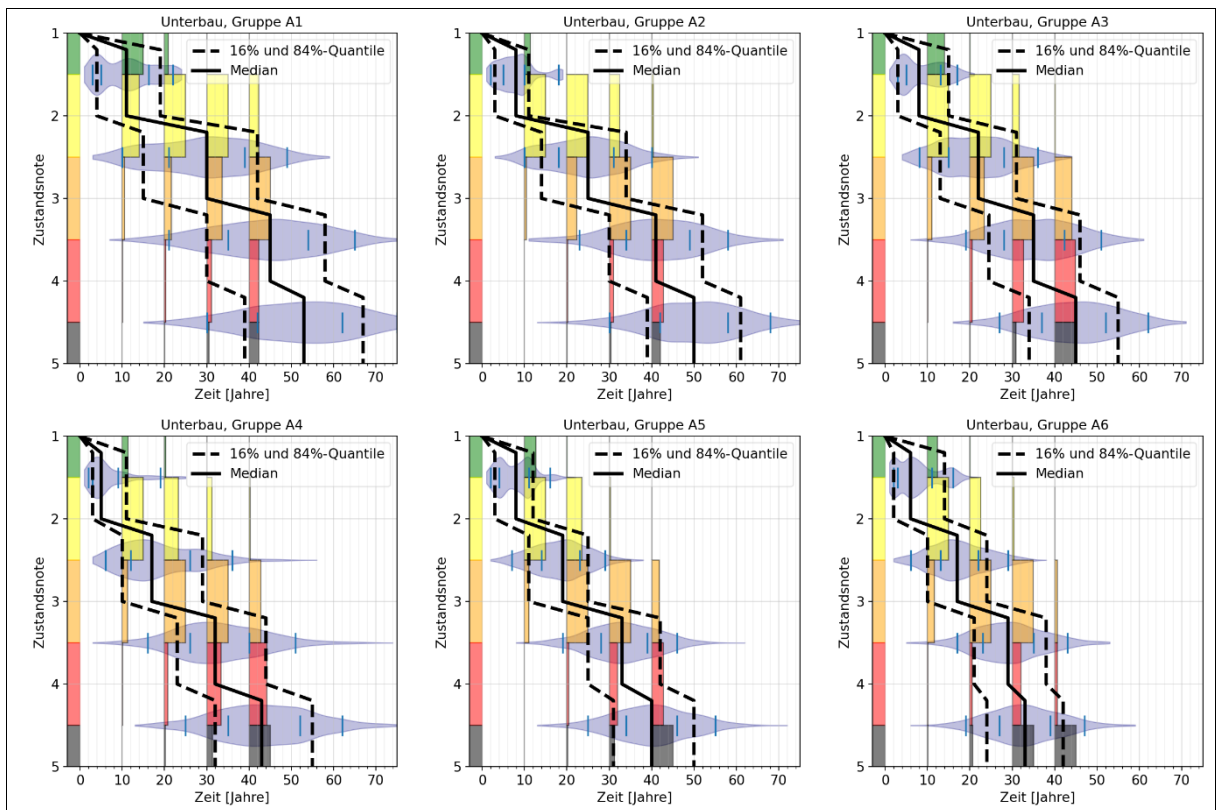


Tabelle 9-16 Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Bauteil Überbau



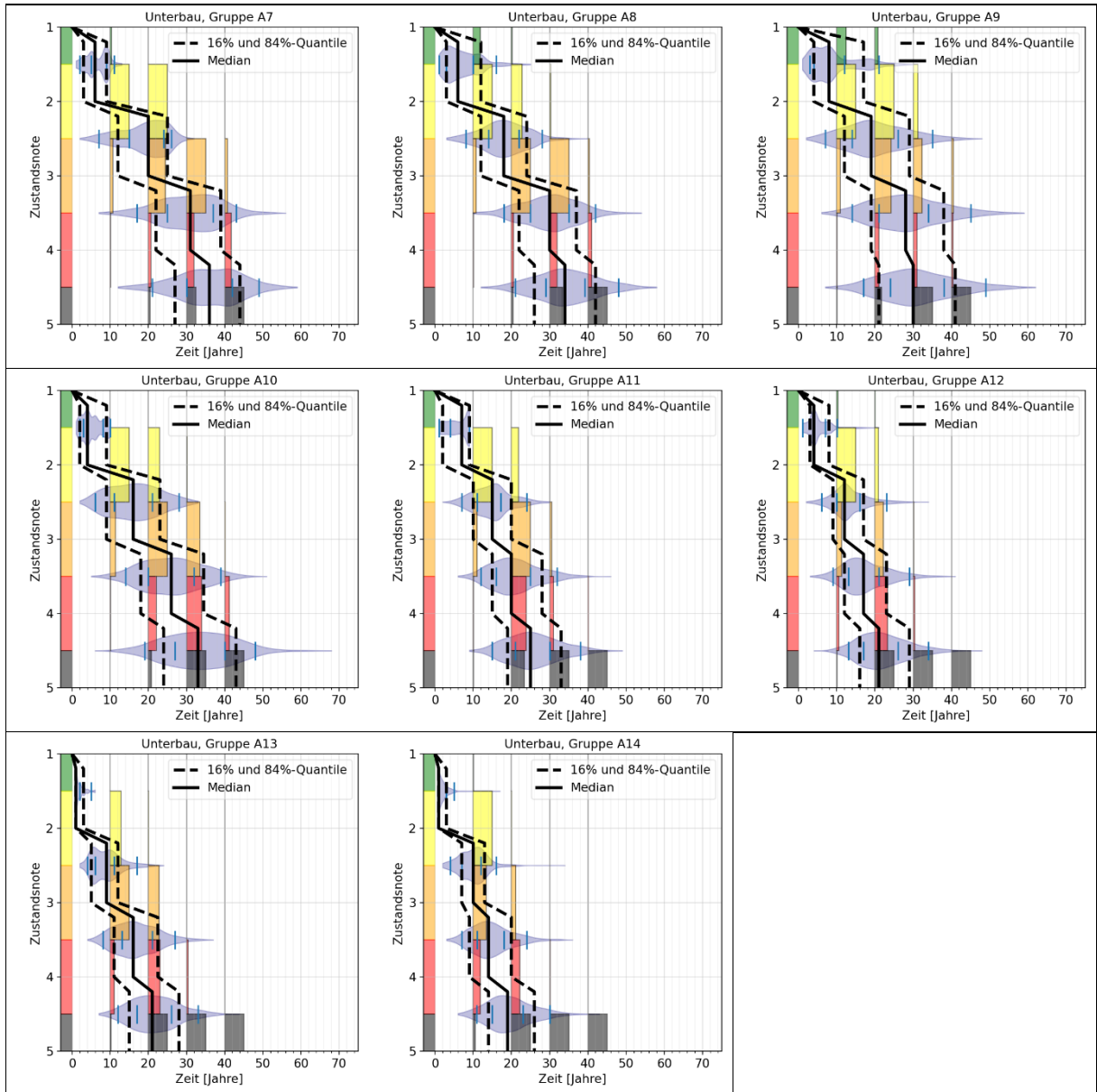
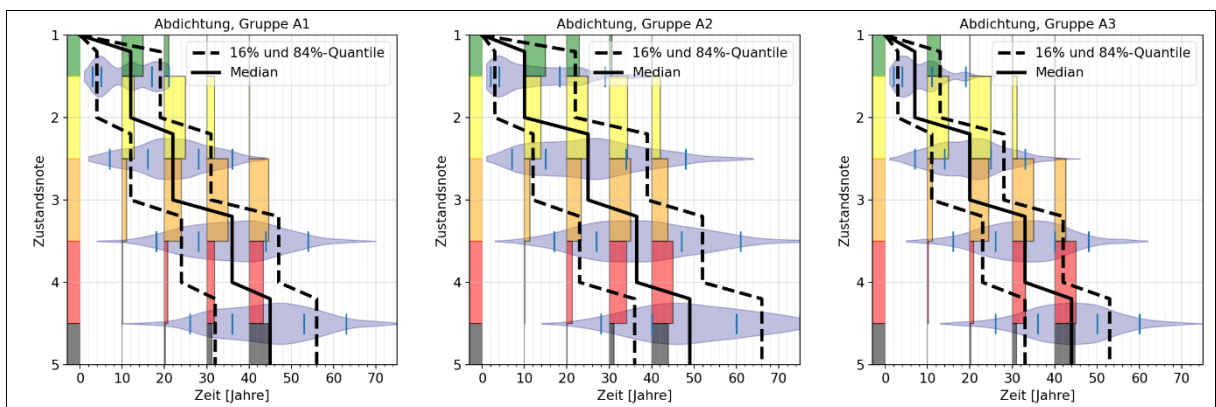


Tabelle 9-17 Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Bauteil Unterbau



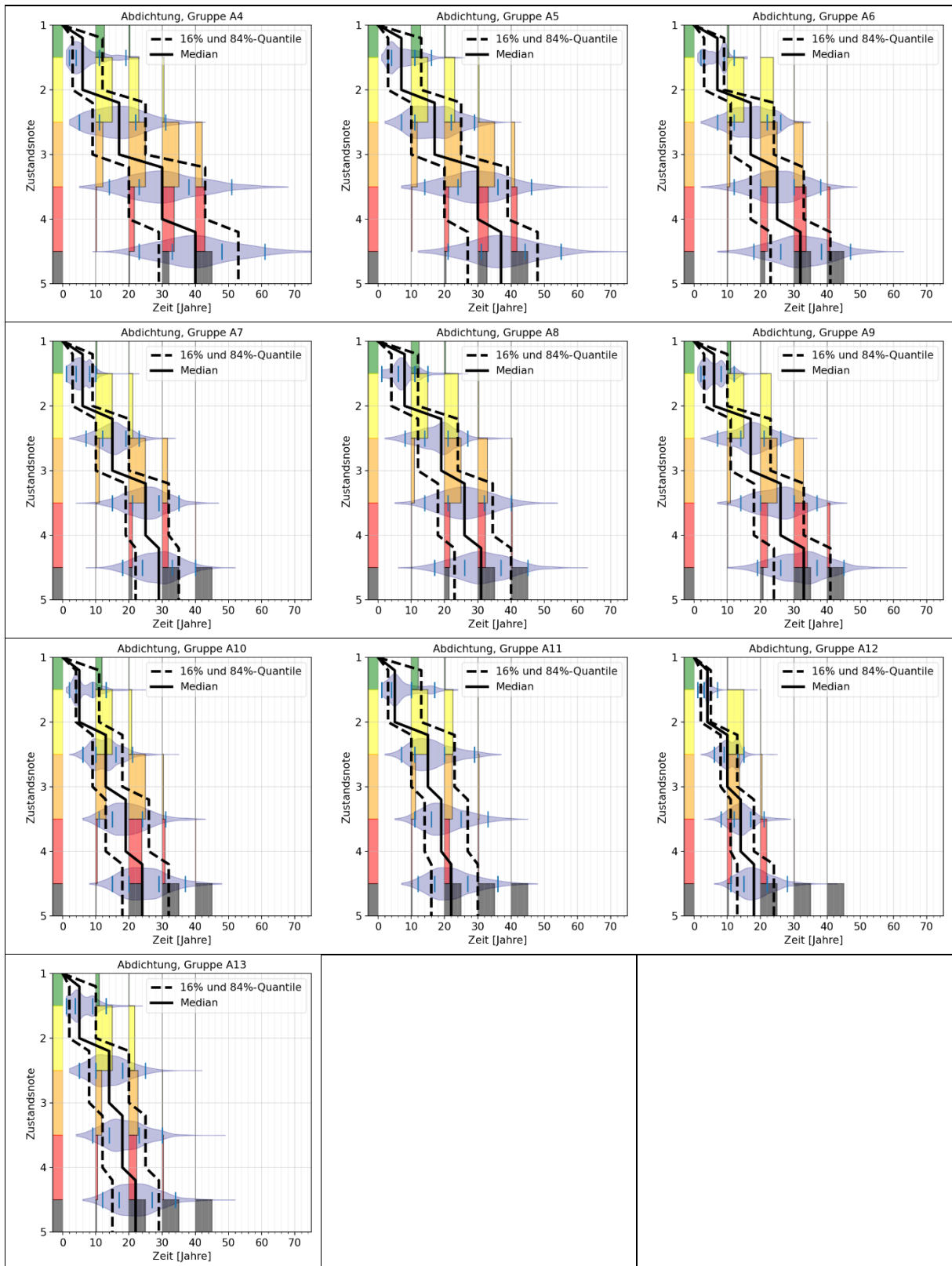
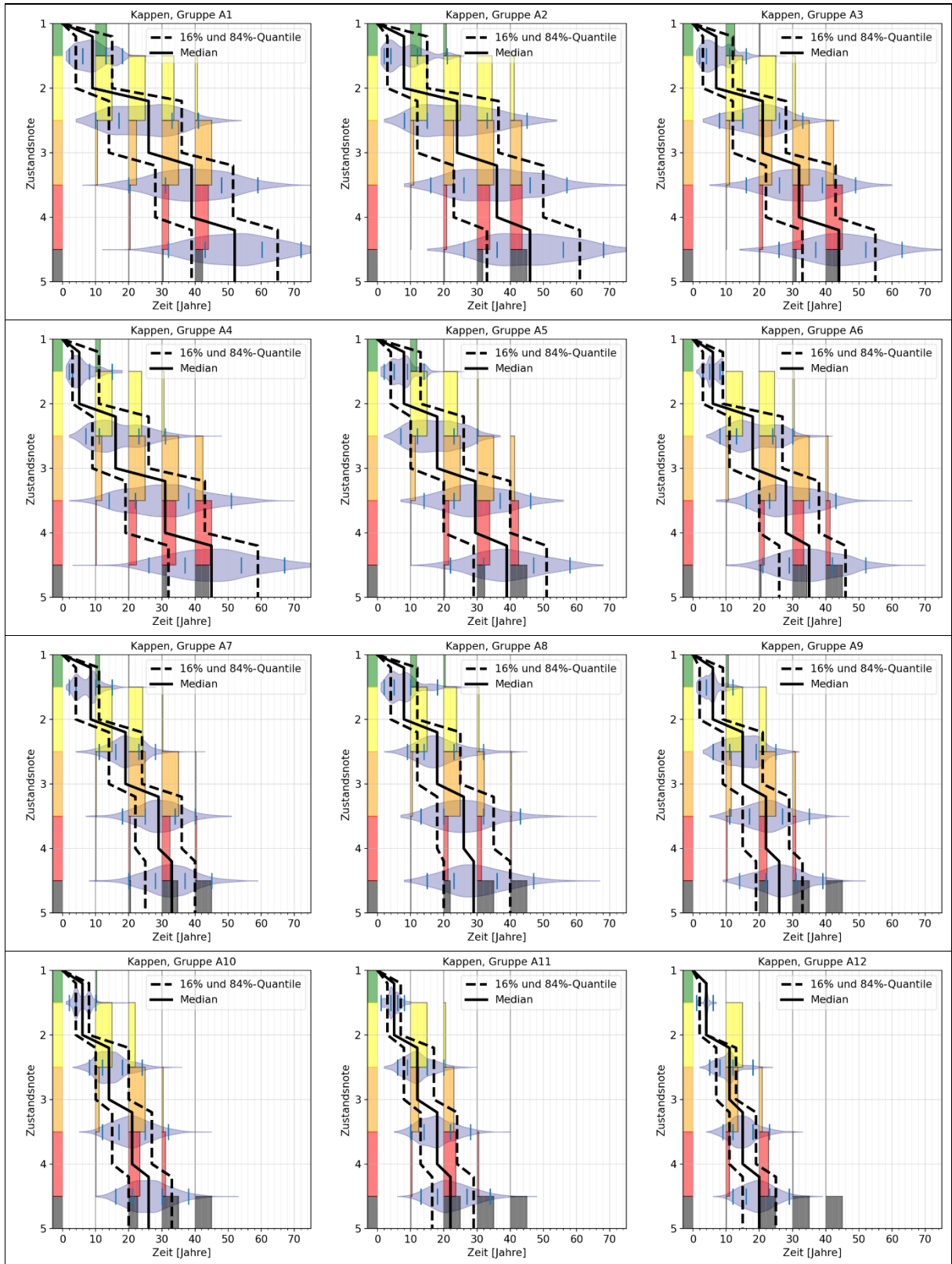


Tabelle 9-18 Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Bauteil Abdichtung



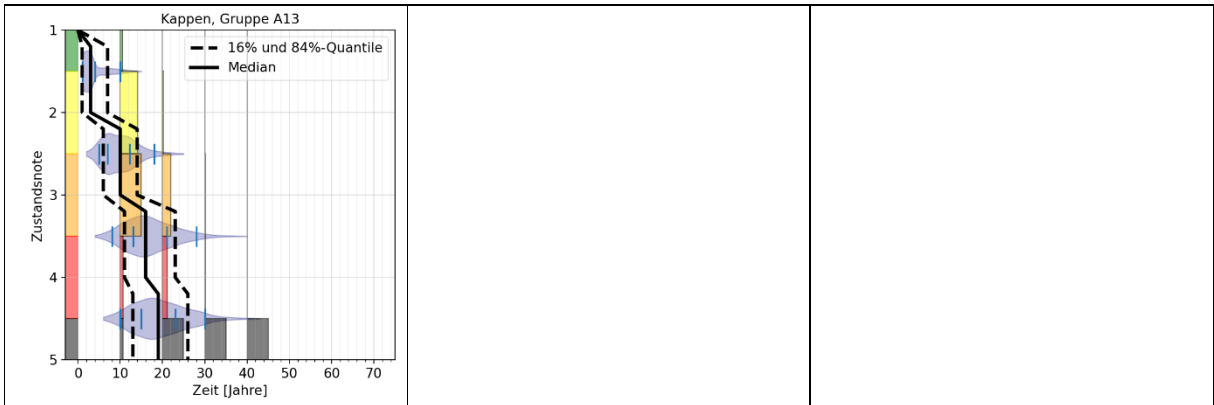


Tabelle 9-19 Prognosemodelle der Gruppen A (Satz 1), Bauteil Kappen

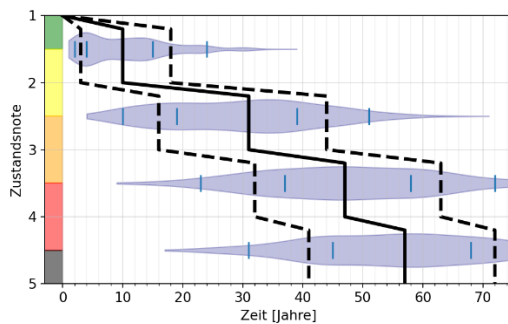


Abbildung 9-19 Prognose für Gruppe A2 Objektebene

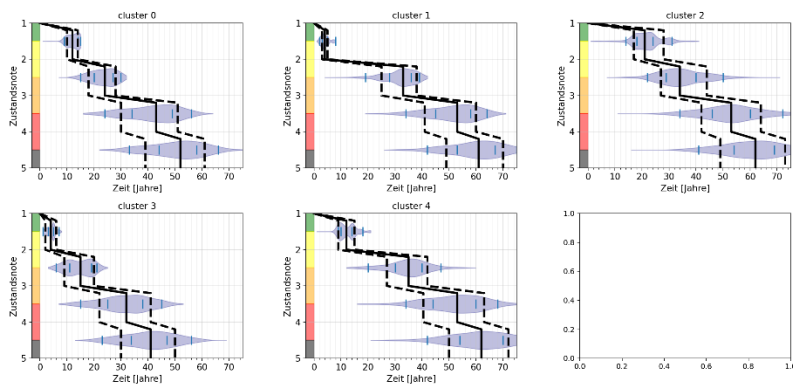


Abbildung 9-20 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Objektebene entstanden sind, Variante mit 5 Clustern

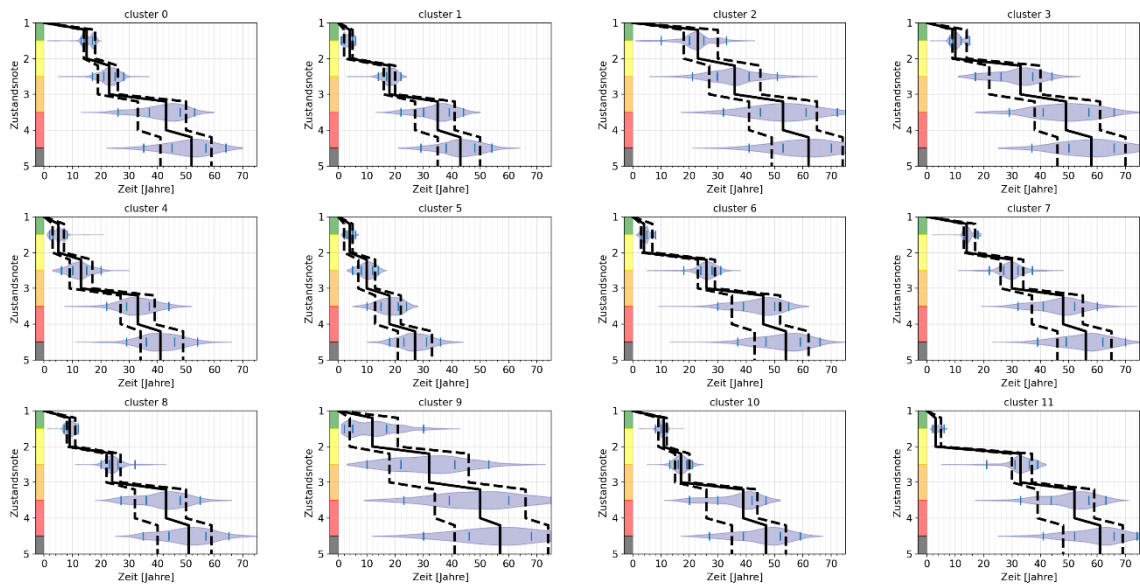


Abbildung 9-21 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Objektebene entstanden sind, Variante mit 12 Clustern

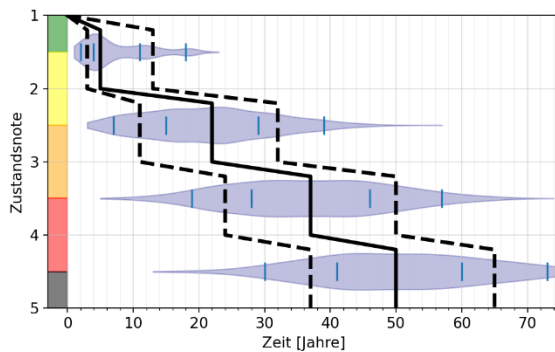


Abbildung 9-22 Prognose für Gruppe A3 Objektebene

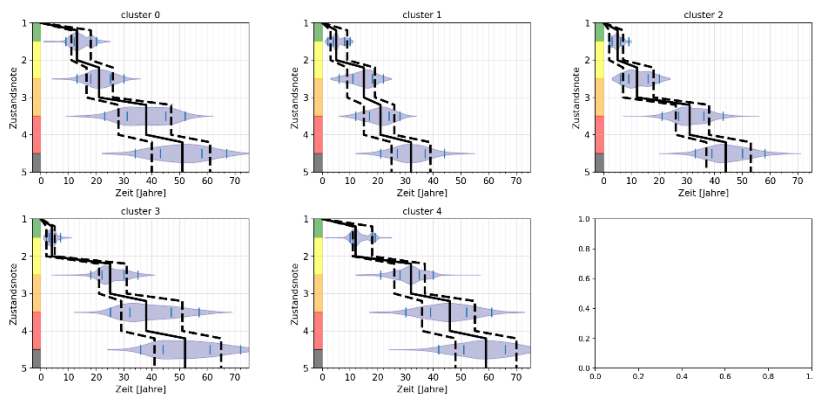


Abbildung 9-23 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A3 Objektebene entstanden sind, Variante mit 5 Clustern



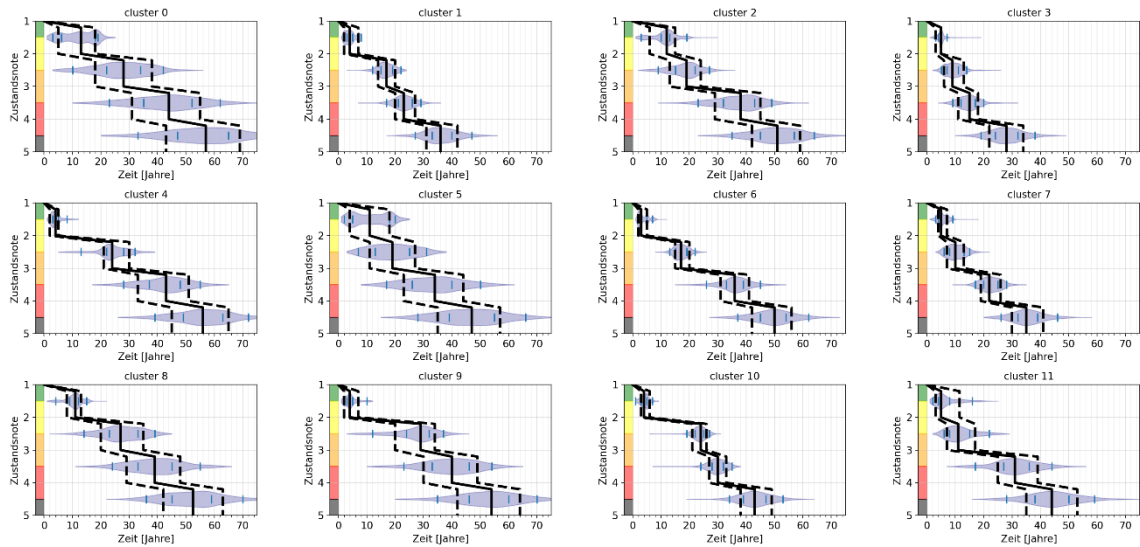


Abbildung 9-24 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A3 Objektebene entstanden sind, Variante mit 12 Clustern

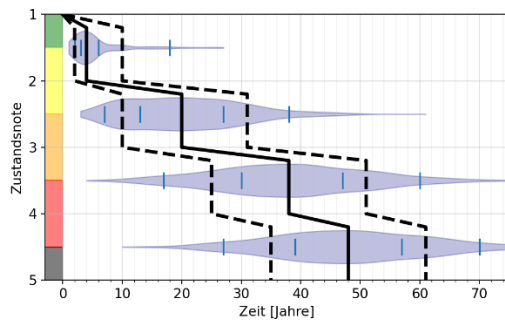


Abbildung 9-25 Prognose für Gruppe A4 Objektebene

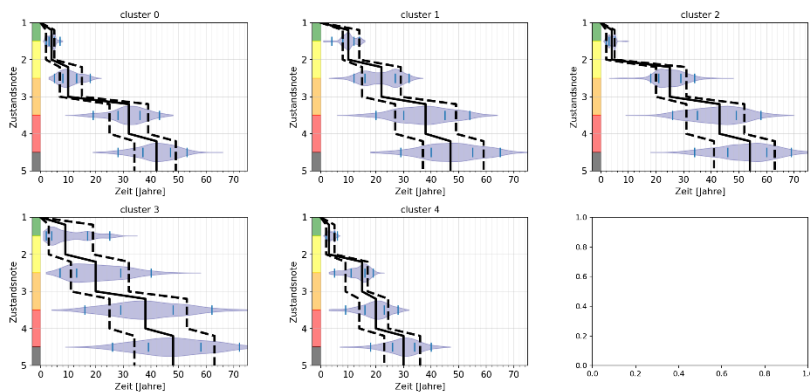


Abbildung 9-26 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Objektebene entstanden sind, Variante mit 5 Clustern

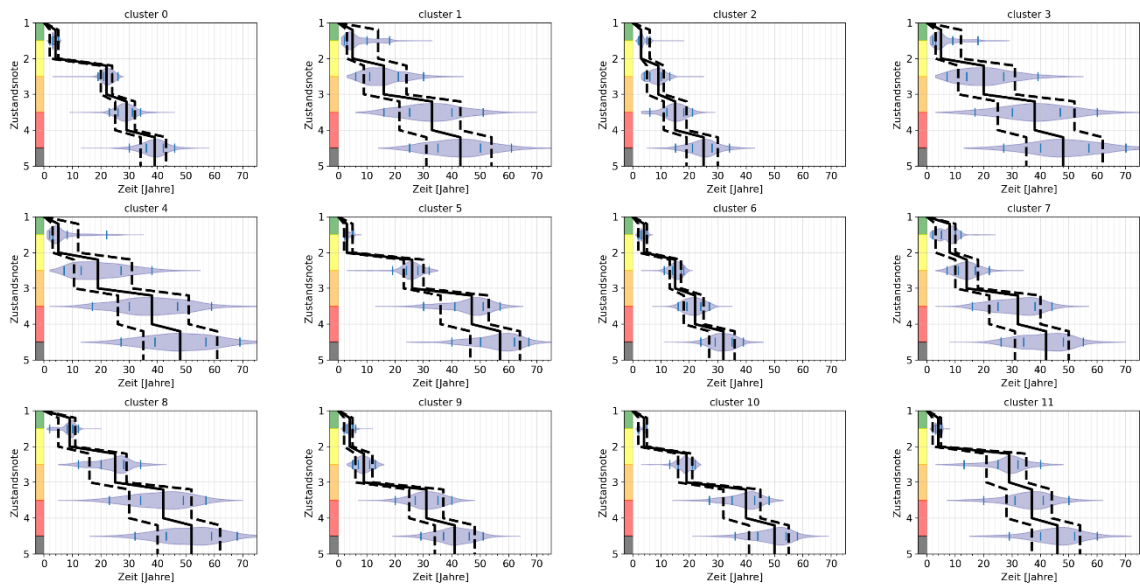


Abbildung 9-27 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Objektebene entstanden sind, Variante mit 12 Clustern

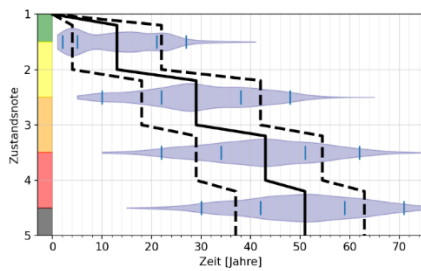


Abbildung 9-28 Prognose für Gruppe A2 Überbau

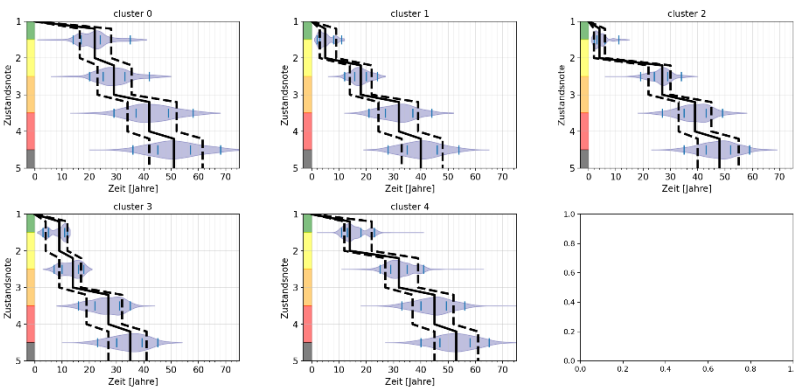


Abbildung 9-29 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Überbau entstanden sind, Variante mit 5 Clustern

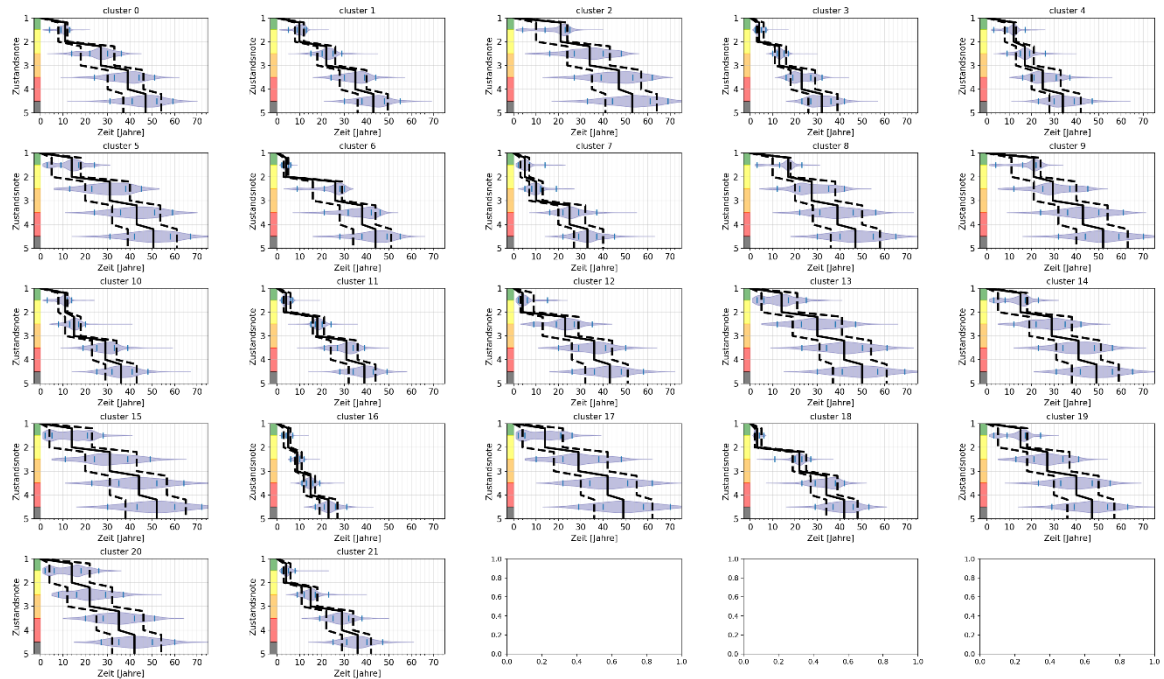


Abbildung 9-30 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Überbau entstanden sind, Variante mit 22 Clustern

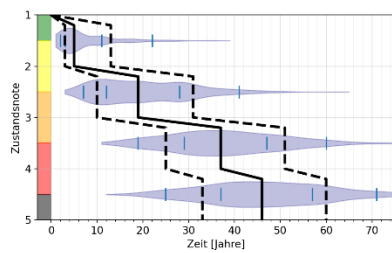


Abbildung 9-31 Prognose für Gruppe A4 Überbau

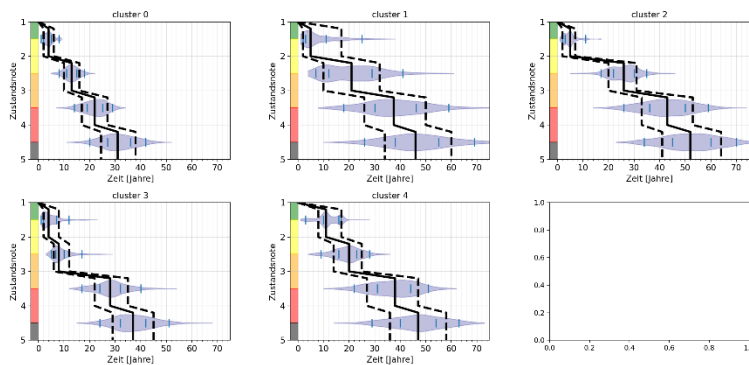


Abbildung 9-32 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Überbau entstanden sind, Variante mit 5 Clustern

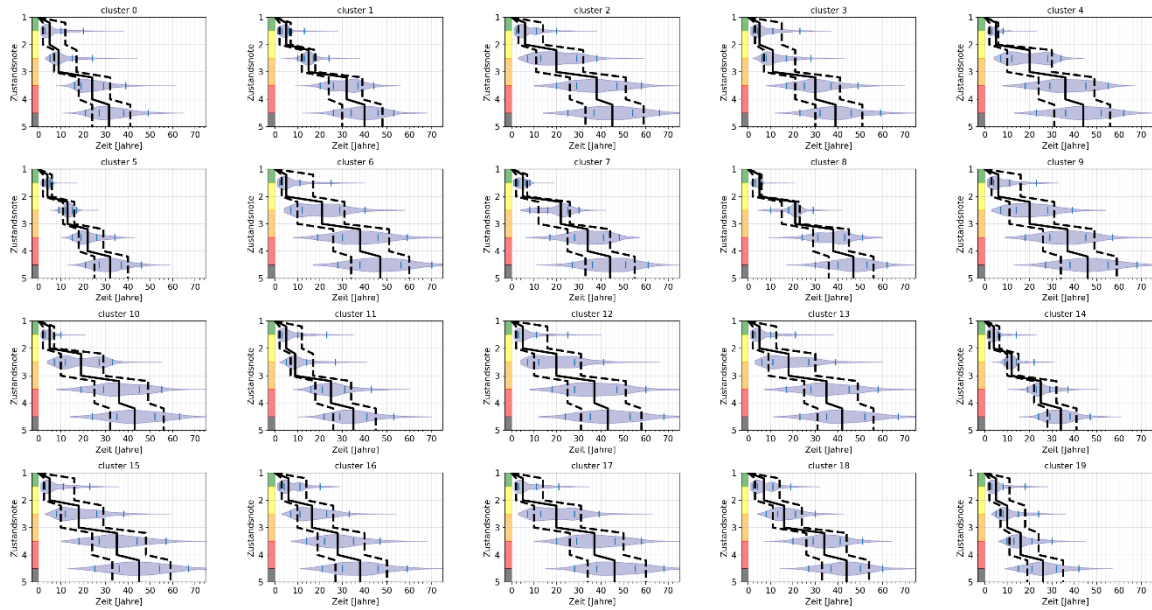


Abbildung 9-33 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Überbau entstanden sind, Variante mit 20 Clustern

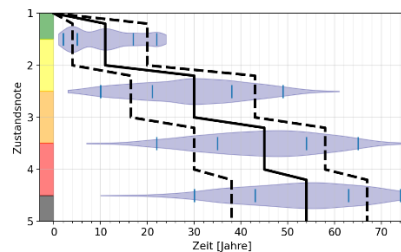


Abbildung 9-34 Prognose für Gruppe A1 Unterbau

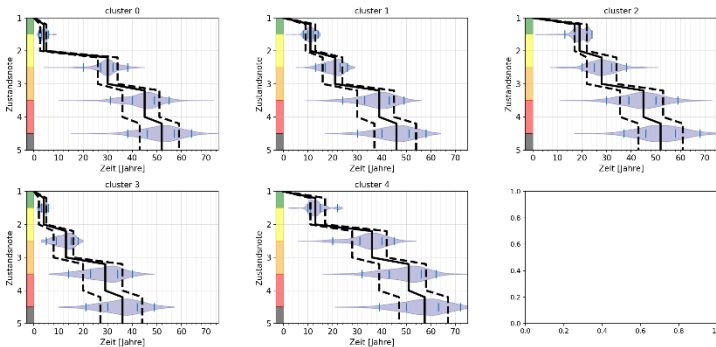


Abbildung 9-35 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Unterbau entstanden sind, Variante mit 5 Clustern

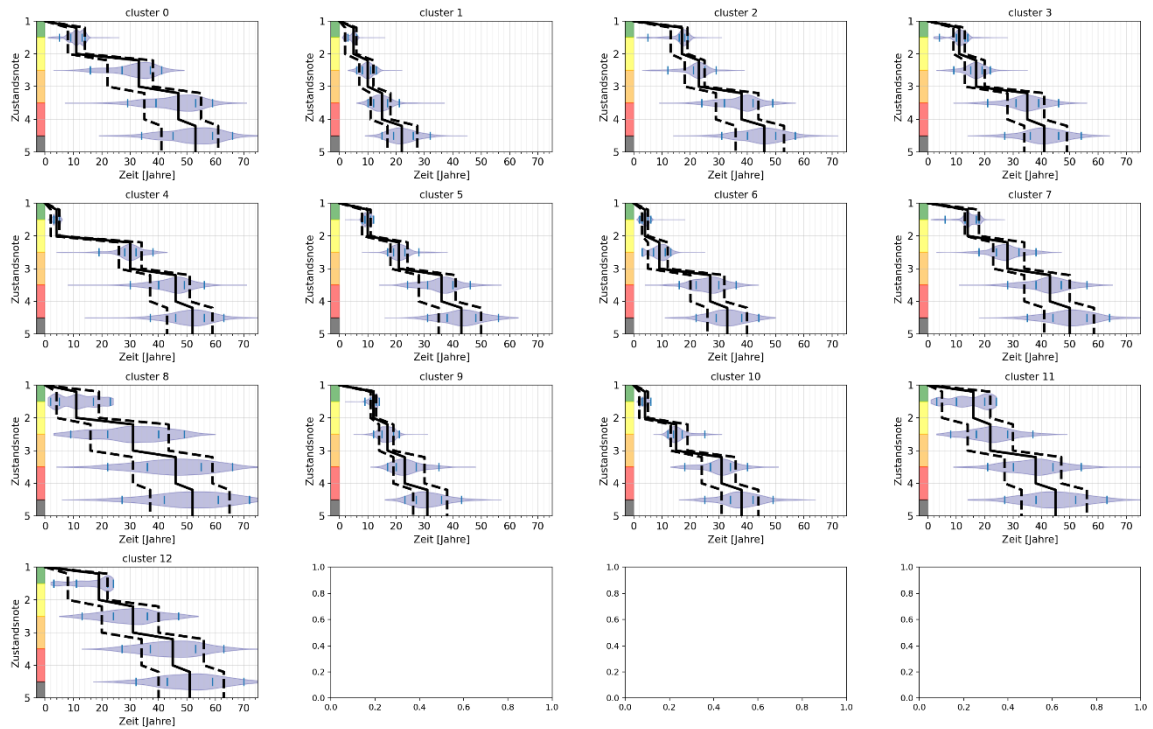


Abbildung 9-36 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Unterbau entstanden sind, Variante mit 13 Clustern

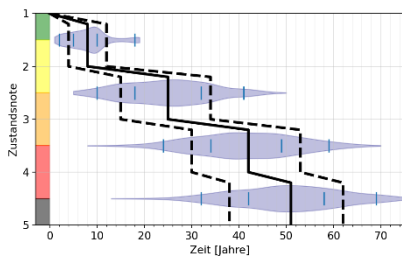


Abbildung 9-37 Prognose für Gruppe A2 Unterbau

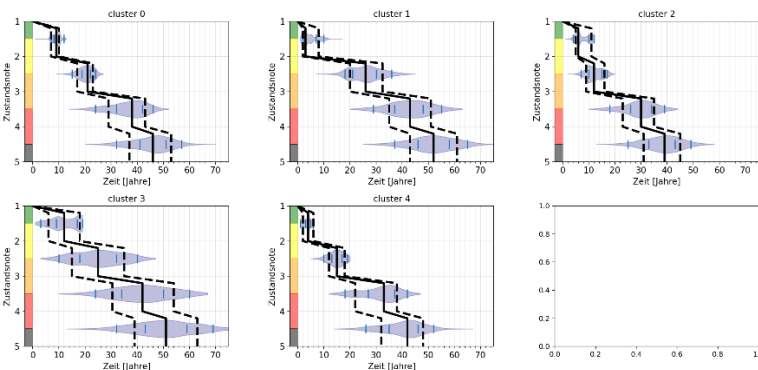


Abbildung 9-38 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Unterbau entstanden sind, Variante mit 5 Clustern

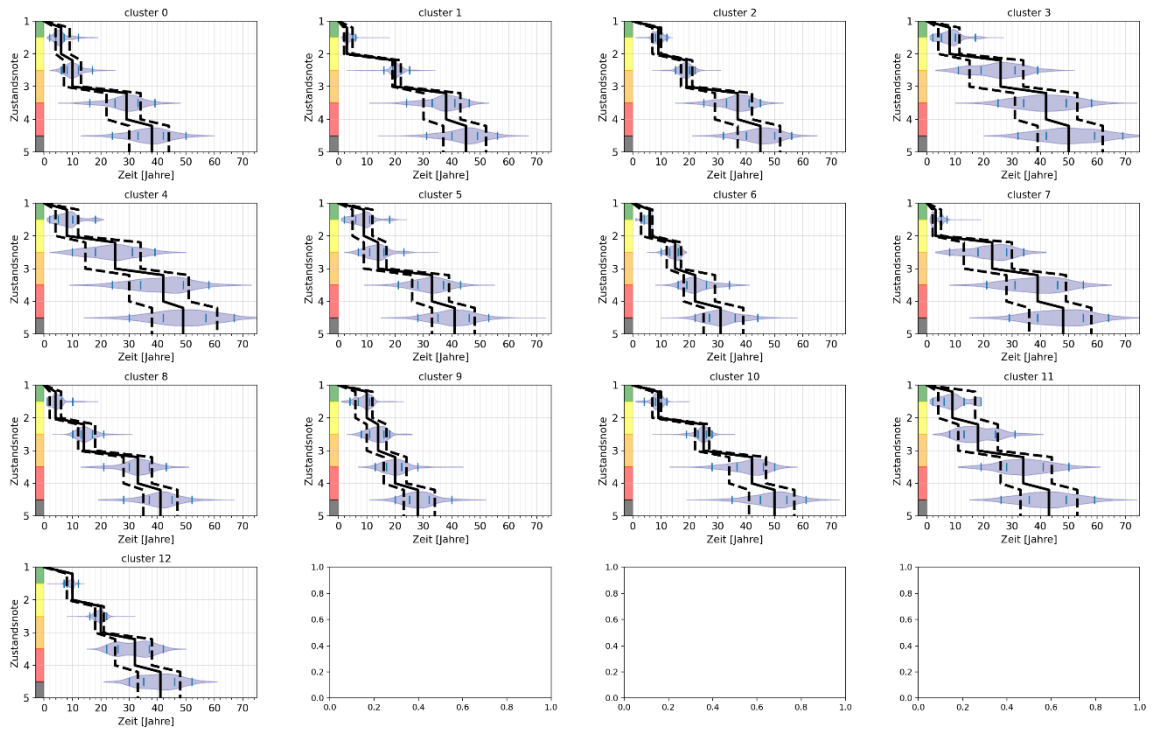


Abbildung 9-39 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Unterbau entstanden sind, Variante mit 13 Clustern

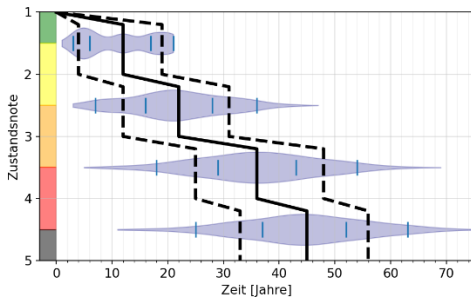


Abbildung 9-40 Prognose für Gruppe A1 Abdichtung

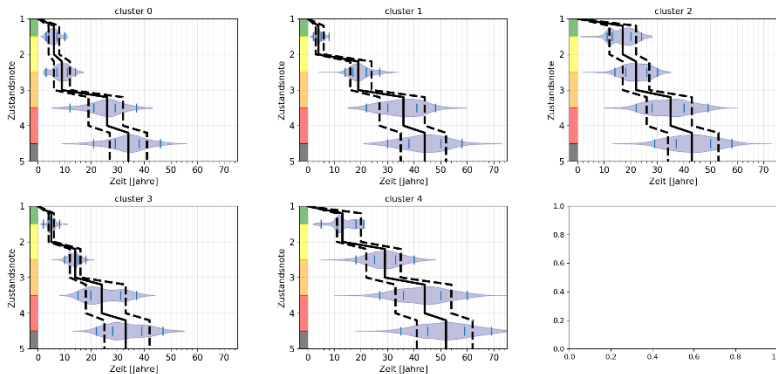


Abbildung 9-41 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Abdichtung entstanden sind, Variante mit 5 Clustern



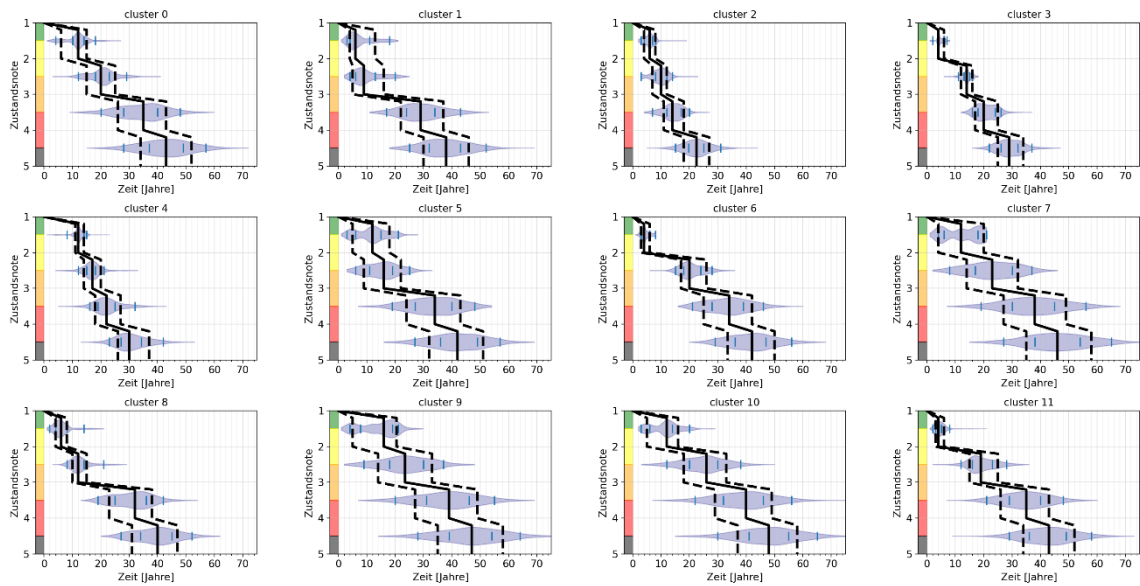


Abbildung 9-42 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Abdichtung entstanden sind, Variante mit 12 Clustern

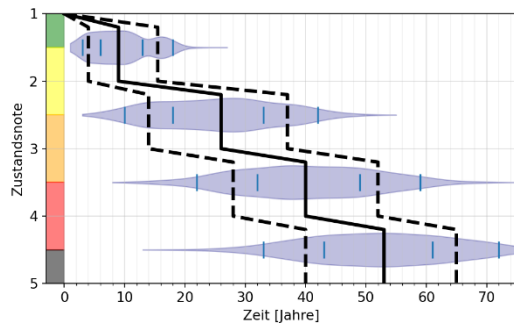


Abbildung 9-43 Prognose für Gruppe A1 Kappen

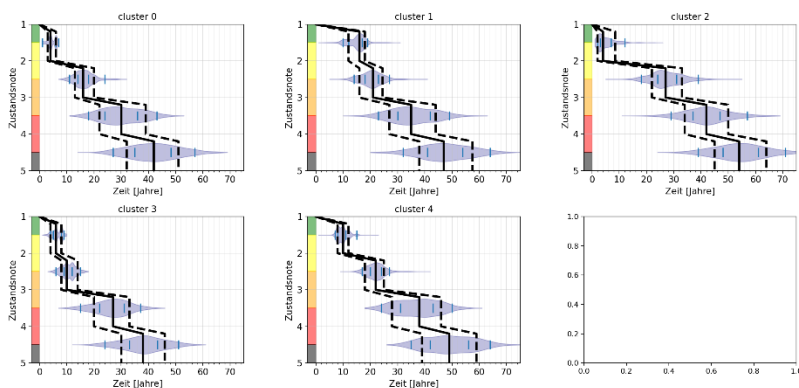


Abbildung 9-44 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Kappen entstanden sind, Variante mit 5 Clustern

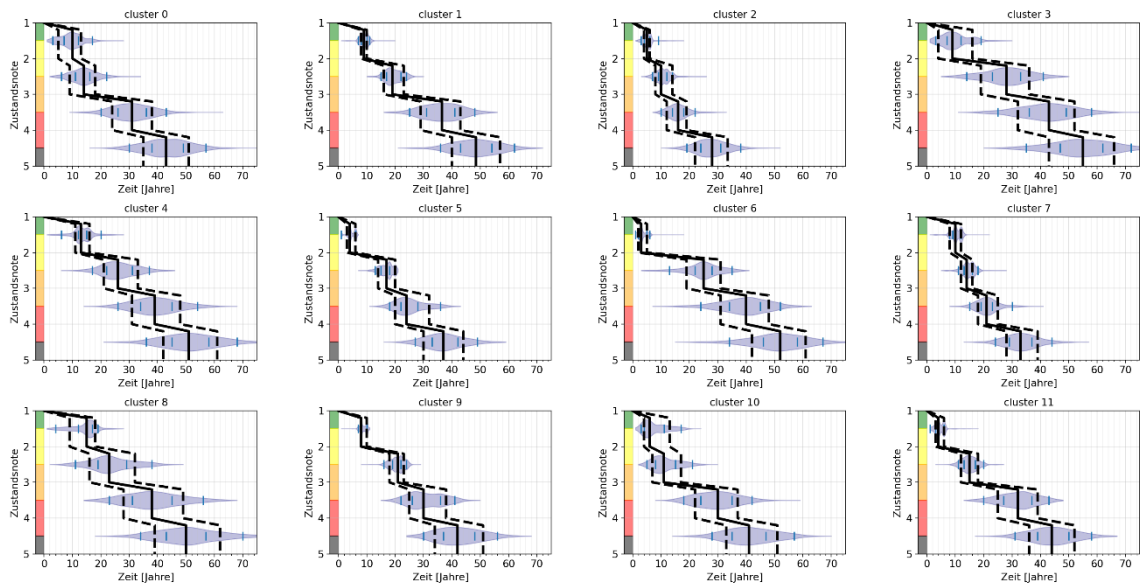


Abbildung 9-45 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A1 Kappen entstanden sind, Variante mit 12 Clustern

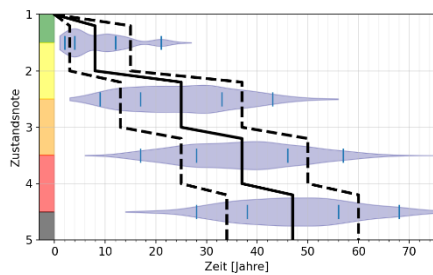


Abbildung 9-46 Prognose für Gruppe A2 Kappen

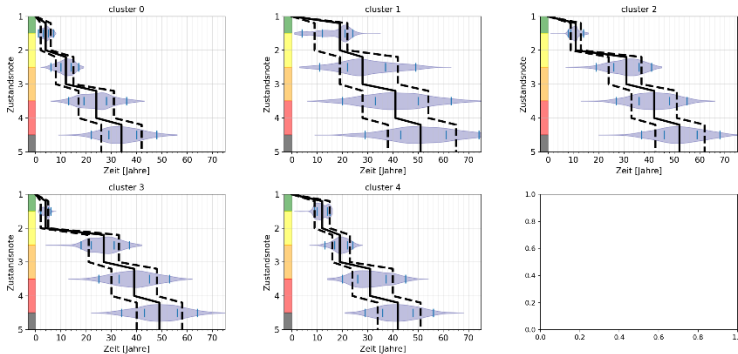


Abbildung 9-47 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Kappen entstanden sind, Variante mit 5 Clustern

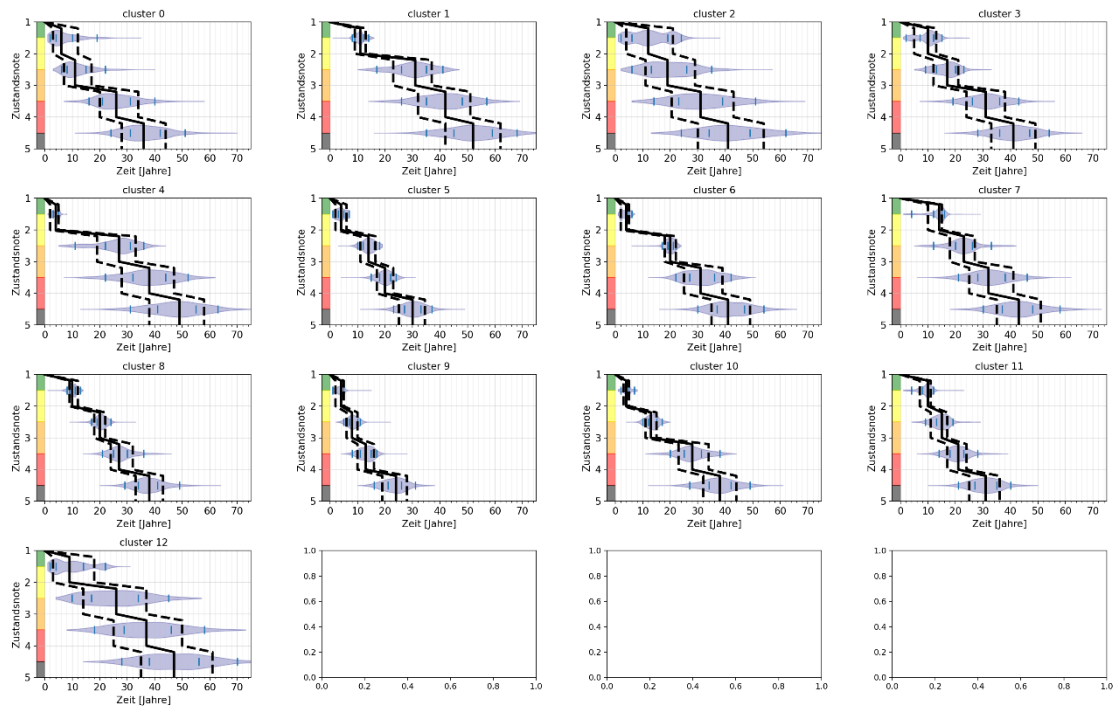


Abbildung 9-48 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A2 Kappen entstanden sind, Variante mit 13 Clustern

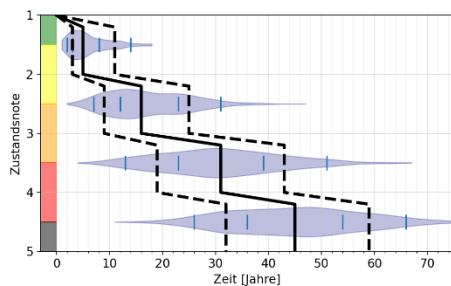


Abbildung 9-49 Prognose für Gruppe A4 Kappen

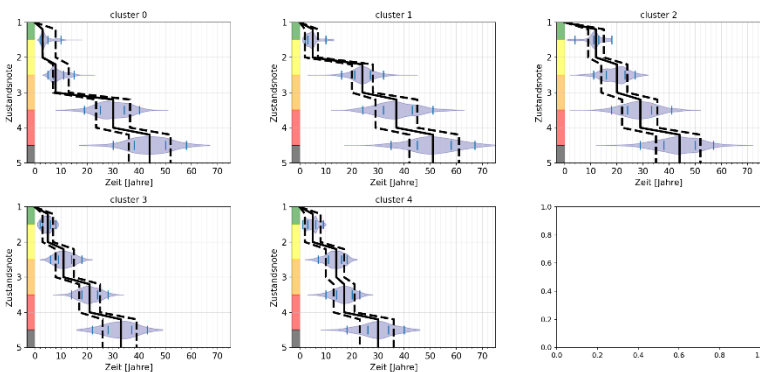


Abbildung 9-50 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Kappen entstanden sind, Variante mit 5 Clustern

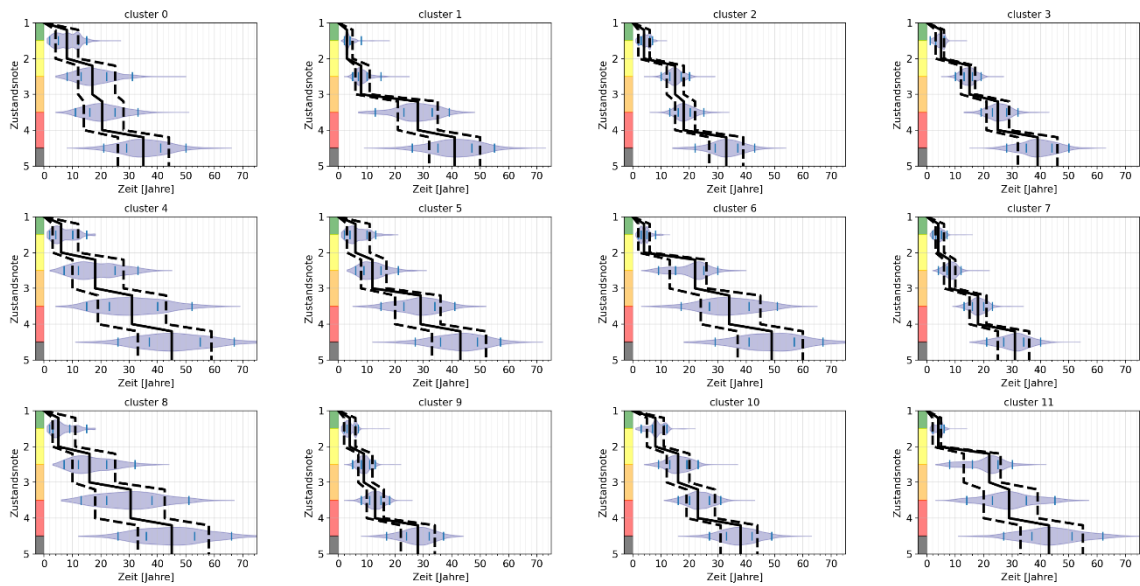


Abbildung 9-51 Prognose für Gruppen C, die durch Aufteilung der Gruppe A4 Kappen entstanden sind, Variante mit 12 Clustern